



**DISEÑO DE UNA PCH PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
APROVECHANDO EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A
RIOHACHA DISTRITO TURÍSTICO Y CULTURAL**

Wilson Bladimir León López
21131626634

Universidad Antonio Nariño

Programa de Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Riohacha, Colombia

2022

**DISEÑO DE UNA PCH PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
APROVECHANDO EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A
RIOHACHA DISTRITO TURÍSTICO Y CULTURAL**

Wilson Bladimir León López

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

Esp. Deisy Johana Cala Morales

Línea de Investigación:

Energías renovables y alternativas

Universidad Antonio Nariño

Programa de Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Riohacha, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Diseño de una PCH para la generación de energía eléctrica aprovechando el sistema de abastecimiento de agua a Riohacha distrito turístico y cultural,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingeniero Electromecánico

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Riohacha, 11 05 2022

Contenido

	Pág.
Preliminares.....	X
Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción	3
1. Objetivos.....	5
1.1 Objetivo general	5
1.2 Objetivos específicos.....	5
2. Justificación.....	6
3. Marco teórico	7
3.1 Antecedentes	7
3.2 Bases teóricas	8
3.3 Contexto internacional	10
3.4 Contexto nacional.....	10
3.5 Elementos que componen una PCH.....	11
3.6 Funcionamiento de los diferentes sistemas de PCH.....	13
3.6.1 Centrales hidroelectricas	13
3.6.2 Central de agua fluyente.....	13
3.6.3 Central con embalse o de regulación.....	14
3.6.4 Central de acumulamiento por bombeo.....	15
3.7 Marco legal.....	16
3.8 Contexto y variables.....	17
3.9 Línea de investigación.....	21
4. Marco Metodológico.....	22
4.1 Diagnóstico de las condiciones de la zona	22
4.2 Determinación de la bomba hidráulica.....	22
4.3 Diseño de la PCH.....	22
4.1 Ubicación geográfica.....	24
4.4 Determinación de parámetros para la PCH	24
4.4.1 Caudal.....	24
4.5 Condiciones y ubicación de la comunidad JEPUKAJAT	25
4.5.1 Altura del salto	26
4.5.2 Cálculo de duración de potencia.....	27
4.6. Captación de agua	29
4.6.1 Cálculo de la bocatoma y velocidad del agua	29
4.7. Cálculo de la tubería.....	31
4.7.1. Diámetro de la tubería	31

4.8	Cálculo del tipo de flujo	34
4.8.1	Número de Reynolds	34
4.8.2	Coefficiente de fricción (λ).....	35
4.10	Cálculo de pérdidas	36
4.10.1	Pérdidas en accesorios por turbulencia.....	36
4.10.2	Cálculo de pérdida total.....	38
4.10.3	Pérdida porcentual.....	38
4.11	Cálculo de la altura neta	38
4.12	Cálculo de la potencia	39
4.13	Diseño y selección de la turbina.....	40
4.13.1	Velocidad específica	40
4.14	Curva característica	43
4.14	Dimensionamiento de la turbina Francis.....	44
4.14.1	Tamaño del rodete	45
4.14.2	Tamaño de la carcasa o caracol.....	48
4.14.3	Tamaño del tubo de aspiración.....	50
4.15	Selección del generador	56
4.16	Subestación eléctrica	59
4.17	Cálculos de conductores	60
4.18	Diseño de transmisión	61
4	Resultados y análisis.....	63
4.18	Presupuesto.....	64
5.2	Análisis de Viabilidad.....	65
5	Conclusiones.....	67
6	Recomendaciones.....	68
	Anexos	69
	Anexo A. Carta de empresa prestadora del servicio ASAA, donde muestra datos requeridos para el dimensionamiento de la PCH en la comunidad indígena.	69
	Anexo B. Diseño en 3D y vista explosionada de los componentes que conforman la PCH.	70
	Anexo C. Diseño del la turbina renderizada con los diferentes componentes.....	71
	Referencias Bibliográficas.....	72

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 3-1: Algunas PCH instaladas en Colombia.	9
Figura 3-2: Explotación y producción nacional de recursos energéticos primarios.	11
Figura 3-3: Esquema de central hidroeléctrica.	13
Figura 3-4: Central de agua fluyente.	14
Figura 3-5: Corte de una central hidroeléctrica del embalse.	15
Figura 3-6: Central de acumulación por bombeo.	16
Figura 3-7: Capacidad instalada y potencial de PCH en el mundo.	18
Figura 3-8: Distribución de generación eléctrica en Colombia.	20
Figura 4-1: Flujo grama de actividades.	23
Figura 4-2: Ubicación satelital comunidad JEPUKAJAT.	26
Figura 4-3: Altura neta para PCH.	27
Figura 4-4: Accesorios de la PCH.	36
Figura 4-5: Diagrama de carga de diseño vs Ns.	42
Figura 4-6: Turbina Francis.	44
Figura 4-7: Dimensiones del Rodete turbina Francis.	45
Figura 4-8: Turbina Francis Dimensiones del rodete.	46
Figura 4-9: Dimensiones del rodete de una turbina tipo Francis.	47
Figura 4-10: Dimensiones de Carcaza turbina Francis vista frontal.	48
Figura 4-11: Dimensiones de carcaza turbina Francis vista Superior.	49
Figura 4-12: Dimensiones del tubo de aspiración turbina Tipo Francis.	53
Figura 4-13: Plano de taller turbina Francis.	54
Figura 4-14: Planos del rodete- Turbina tipo Francis.	55
Figura 4-15: Generador WEG. Línea G- Plus.	58
Figura 4-16: Sistema general de cada una de las etapas del proceso.	62
Figura 4-17: Diagrama Unifilar comunidad JEPUJAKAT.	61
Figura 4-18: Esquema de la PCH.	62

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Clasificación de las centrales hidroeléctricas.	8
Tabla 3-2: Clasificación de las PCH, según la CREG.	9
Tabla 3-3: Clasificación de PCH según la OLADE.	10
Tabla 3-4: Leyes, decretos y resoluciones para la implementación de una PCH.	17
Tabla 3-5: Descripción de las variables.	21
Tabla 4-1: Cálculo de potencia promedio y energía año.	29
Tabla 4-2. Tipos de materiales de tubería para transporte de agua.	33
Tabla 4-3 Coeficiente de pérdidas en accesorios.	37
Tabla 4-4. Selección de turbina según la velocidad específica N_s	42
Tabla 4-5. Cuadro de carga de una vivienda.	56
Tabla 4-6: Tabla de selección de generador sincrónico WEG. (WEG, 2022)	58
Tabla 4-7: Característica de la subestación.	59
Tabla 5-1. Diagnóstico del caudal	63
Tabla 5-2: Determinación parámetros del sistema.	63
Tabla 5-3: Diseño de equipo y sistema.	64
Tabla 5-4: Presupuesto general de la PCH.	64

Preliminares

(Dedicatoria)

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios por darme fortaleza, salud y los recursos necesarios para poder lograr este objetivo; a mi esposa e hijas, que sin su apoyo y cariño no me habrían impulsado a seguir adelante, por motivarme y mantener vivas las ganas de cumplir mis objetivos; a mi familia y a mis padres por haberme acompañado y brindado una guía de vida, a mis profesores y compañeros quienes me aconsejaron y siempre han creído en mí.

Agradecimientos

Luego de transcurrir un largo tiempo, hoy cuento con el gusto de escribir este apartado de agradecimientos para dar como concluido mi trabajo de grado. A mi familia: a mis padres Wilson Blanchar y Leticia López por los principios que me han inculcado.

A mi esposa Rosa Ofelia Salazar por acompañarme, apoyarme incondicionalmente y animarme siempre a seguir adelante a pesar de las adversidades, a mis hijas Angélica León y Jenny Guzmán, por ser la motivación principal que me impulsa a crecer como persona y profesional y por quienes me esfuerzo a diario para verlas algún día como unas grandes e importantes personas en la sociedad.

A la profesora Deisy Johana Cala Morales, quien me ha guiado y brindado las herramientas necesarias para poder llevar a cabo este proyecto de grado. Finalmente, y no menos importante a las personas que se han visto involucradas directa o indirectamente en el desarrollo de la presente actividad, ofreciendo ayuda y diferentes elementos de los que he requerido a lo largo de todo este trayecto.

Resumen

Este trabajo de grado propone el diseño de una PCH para la generación de energía eléctrica en un punto de la red de abastecimiento de agua a Riohacha, que permita la recuperación de energía hidroeléctrica y posibilite el suministro de energía eléctrica a las comunidades Wayuu aledañas. El cálculo del diseño de la PCH arrojó como resultado un número específico de revoluciones N_s de 86,87 que permite tomar como referencia los rangos de valores de las diferentes turbinas, para este caso el valor de N_s se encuentra entre 50 y 150, permitiendo seleccionar una turbina tipo Francis lenta. La PCH puede satisfacer el consumo diario de cada hogar ubicado en 1634 W/h la generación de energía es de 240 kW/h. El trabajo se desarrolló bajo el tipo de investigación descriptiva planteada en tres fases: sistemas de recuperación energéticas en redes hidráulicas, diseño de un sistema hidráulico y evaluación del sistema.

Palabras clave: Minihidráulicas, PCH, generación eléctrica, energía, turbina.

Abstract

This degree work proposes the design of a SHP for the generation of electric energy in a point of the water supply network of Riohacha, which allows the recovery of hydroelectric energy and enables the supply of electric energy to the surrounding Wayuu communities. The calculation of the design of the SHP resulted in a specific number of revolutions N_s of 86.87 that allows to take as a reference the range of values of the different turbines, for this case the value of N_s is between 50 and 150, allowing to select a slow Francis type turbine. The PCH can satisfy the daily consumption of each household located in 1634 W/h, the energy generation is 240 kW/h. The work was developed under the type of descriptive research proposed in three phases: energy recovery systems in hydraulic networks, design of a hydraulic system and evaluation of the system.

Keywords: Mini-hydro, PCH, electricity generation, energy, turbine.

Introducción

Debido a los pronósticos del fin de las reservas petroleras en el mundo, la contaminación producida por la generación de las energías más utilizadas y en consecuencia, la necesidad de cuidado, reparación y conservación del medio ambiente, en la última década se ha venido impulsando la investigación, estudio y desarrollo de propuestas tecnológicas para la obtención de nuevas y mejores formas de generación energética. Estas propuestas, a menudo denominadas energías alternativas, buscan complementar los sistemas tradicionales y dar paso a la llamada generación distribuida [1] y sustituir fuentes contaminantes o poco eficientes. Dichas propuestas deben garantizar que, en un futuro cercano, se cuente con soluciones energéticas sencillas, que perduren en el tiempo, con un mínimo impacto ambiental, bajos costos y en cantidades que satisfagan la creciente demanda energética que se genera con el desarrollo económico e industrial [2].

En la actualidad, el sistema de abastecimiento de agua a Riohacha distrito turístico y cultural, cuenta con una zona de captación y una planta de tratamiento de agua potable con capacidad de producir 500 litros de agua por segundo a orillas del río Tapias, ubicado en el corregimiento de Tomarrazón, a 46 kilómetros de Riohacha y con una línea de conducción que atraviesa una zona de alta producción agrícola y ganadera. En la zona urbana se dispone de aproximadamente 300 km de redes de acueducto y en materia de saneamiento trabajan con cinco estaciones de bombeo de aguas residuales.

Este trabajo propone el diseño de una PCH para la generación de energía eléctrica, aprovechando un punto de la red de abastecimiento de agua a Riohacha, que permita la recuperación de energía hidroeléctrica para el autoconsumo o que posibilite el suministro de energía eléctrica a las comunidades wayuu aledañas. A través de la elaboración de un

diagnóstico del caudal, altura topográfica, y demás datos necesarios para el diseño del sistema como la caracterización de la bomba hidráulica y sistema de generación eléctrica. El trabajo se llevó a cabo bajo una investigación descriptiva definida en tres fases: fase una, sistemas de recuperación energéticas en redes hidráulicas, fase dos, diseño de un sistema hidráulico y fase tres, evaluación del sistema.

El desarrollo de este trabajo de grado inicialmente presenta la introducción, objetivos y justificación. Seguidamente está estructurado en cinco capítulos fundamentales; el capítulo tres comprende todo lo concerniente al marco teórico, antecedentes, conceptos de los diferentes tipos de PCH, su composición y principios de funcionamiento, en el capítulo cuatro el marco metodológico. El capítulo cinco presenta los resultados y análisis. Finalmente, el capítulo seis muestra las conclusiones y el siete las recomendaciones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar una pequeña central hidroeléctrica aprovechando el sistema de abastecimiento de agua a Riohacha.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la demanda de energía eléctrica, la máxima potencia teórica de diseño de una PCH, caudal, cotas topográficas, presión y otras características de la conductora para la localidad seleccionada.
- Determinar y seleccionar el tipo de PCH a utilizar teniendo en cuenta el tipo de captación, generador eléctrico y controlador de velocidad a utilizar.
- Diseñar el sistema de transmisión de movimiento entre la turbina y el generador, las obras civiles y auxiliares necesarias para el funcionamiento de la PCH.
- Analizar la normatividad y el cumplimiento del diseño planteado.
- Elaborar una evaluación económica del sistema PCH a través de un análisis costo – beneficio.

2. Justificación

La energía hidroeléctrica fue una de las primeras formas usadas para producir electricidad, en la actualidad es la segunda fuente y la forma más generalizada para la obtención de energía eléctrica. Con esta fuente energética se aprovecha la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un nivel superior, en energía cinética al fluir a un nivel inferior, para generar trabajo sin causar mayores efectos contaminantes, con un recurso renovable como es el agua [2].

Dentro de sus principales desventajas está la dependencia de niveles de agua dados por condiciones meteorológicas de lluvia y sequía, el alto impacto ecológico en algunos casos y los altos costos por la necesidad de construcciones de obras civiles como represas, embalses y los estudios previos de factibilidad usualmente efectuados para las grandes centrales [2]. La existencia de presiones muy superiores a la requeridas en las redes de transporte y distribución para el abastecimiento de agua es frecuente. En la actualidad, la evolución de la tecnología en sistemas para obtener energía eléctrica a través de estas redes esta aumenta la posibilidad de contar con este vital servicio en zonas aisladas que no cuentan con el mismo o es deficiente [3]. Este trabajo pretende realizar un estudio para la instalación de una pequeña hidroeléctrica en las redes de abastecimiento de agua a Riohacha distrito turístico y cultural, principalmente para el autoconsumo y la alimentación de equipos básico en una comunidades indígenas aledañas a la red que no cuentan con el servicio de energía eléctrica.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes

En la revisión documental se toma como referencia el trabajo del grupo de iXUÉ semillero de investigación barión, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, el cual presenta un documento guía que permite conocer y evaluar el potencial energético respecto a Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en la Región Central y desarrolla la unificación y regionalización de la información respecto a este potencial energético [4]. La información del anterior trabajo, es relevante para el trabajo, ya que vincula un factor importante para el diseño de las PCH como lo es el potencial energético.

De la misma forma, C. Morales Acevedo y F. Saavedra Martínez, “diseñaron una pequeña central hidroeléctrica para el Municipio de Pisba, Boyacá, donde presenta un proceso cualitativo y cuantitativo del desarrollo de la ingeniería conceptual de una Pequeña Central Hidráulica” [5]. Con este estudio se apoya la proyección del diseño y definir el proceso del trabajo.

Por otro lado, Morales S., Corredor L., J. Paba y L. Pacheco, realizan una “revisión y análisis contextual y de requerimientos básicos a tener en cuenta para implementar proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, para lo cual realizaron una recopilación de información y una revisión bibliográfica que permitió conocer la situación actual de la técnica a nivel nacional e internacional, así como las tecnologías más eficientes y aptas para su implementación. Por último, plantearon unas etapas y estudios de ingeniería a seguir para lograr con éxito el desarrollo de un proyecto de PCH” [6]. La importancia que

muestra esta investigación de algunos temas específicos apoya este trabajo de grado, principalmente conocer los requerimientos básicos para una PCH.

3.2 Bases teóricas

Las micro hidroeléctricas, en conjunto con los pequeños generadores eólicos y fotovoltaicos pueden ser sistemas económicamente atractivos, en comparación con la extensión de redes para facilitar el acceso a la electricidad en pequeñas aldeas remotas [7]. Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de embalse así: de agua fluyente, de embalse, de bombeo y mareomotrices. Según la altura de la fuente o cabeza hidráulica: en pequeñas cuando el salto es menor a 15 metros, medianas cuando el salto está entre 15 y 50 metros y grandes cuando es de más de 50 metros. Y según la cantidad de energía hidroeléctrica han sido clasificadas en grandes, medianas y pequeñas centrales (Tabla 3-1) [2].

Tabla 3-1: Clasificación de las centrales hidroeléctricas.

Potencia	Tipo
0,1 – 0,999 MW	Pequeñas centrales PCH
1 – 9,99 MW	Medianas
> 10 MW	Pequeña central

Fuente: [2].

En Colombia, gracias a sus características hidrográficas, el sistema interconectado de generación eléctrica tiene cerca de 10.000 MW de capacidad instalada de generación, con una composición de 80% en plantas hidroeléctricas y 20% en plantas termoeléctricas [8] y en las diferentes regiones del país se encuentran montajes de PCH en los cuales se

han instalado turbinas hidráulicas en pequeñas derivaciones (Figura 3-1), sobre los cauces de los ríos, se han implementado en las redes de distribución (PCH Santa Ana del Acueducto de Bogotá) [2]. Ver Figura 3-1.

Figura 3-1: Algunas PCH instaladas en Colombia.



Fuente: [9].

Las pequeñas centrales PCH que a su vez se subdividen en pico, micro, mini y pequeña generación, tienen unos rangos que pueden variar según el país y la organización ya que no se ha establecido un criterio único para la subdivisión [2]. En Colombia los intervalos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas-CREG son los siguientes (Tabla 3-2).

Tabla 3-2: Clasificación de las PCH, según la CREG.

Potencia	Tipo
0 – 100 kW	Microcentral
100 – 1000 kW	Minicentral
1000 – 10000 kW	Pequeña Centra

Fuente: [2].

En la Tabla 3-3 se presentan los rangos utilizados por la Organización Latinoamericana de Energía OLADE.

Tabla 3-3: Clasificación de PCH según la OLADE.

Potencia	Tipo	Salto		
		Bajo	Medio	Alto
0.5 – 5 kW	Picocentral	N. A.		
5 – 50 kW	Microcentral	< 15	15-50	>50
50 – 500 kW	Minicentral	< 20	20-100	>100
500 – 5000 kW	Pequeña Centra	< 25	25-130	>130

Fuente: [2].

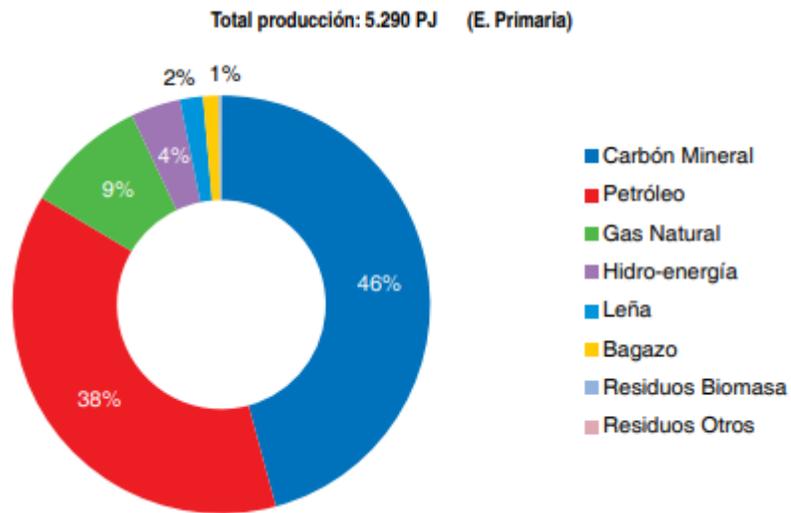
3.3 Contexto internacional

Aproximadamente el 81% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles, mientras que el 19% restante proviene de fuentes renovables. Actualmente, estas últimas se encuentran asociadas principalmente con el uso tradicional de la biomasa en aplicaciones como la leña para cocción de alimentos y calentamiento de espacios, y la hidroenergía para generación eléctrica [8]. En una menor medida, se aprovecha la energía proveniente de fuentes como el sol, la geotermia y la biomasa para su conversión en energía térmica a través del uso de tecnologías relativamente modernas, seguidas de estas y otras fuentes como la eólica para la generación de energía eléctrica.

3.4 Contexto nacional

“Colombia es un país que goza de una matriz energética relativamente rica tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables. Actualmente, la explotación y producción energética del país está constituida a grandes rasgos en un 93% de recursos primarios de origen fósil, aproximadamente un 4% de hidroenergía y un 3% de biomasa y residuos” [8] tal como se muestra en la Figura 3-2.

Figura 3-2: Explotación y producción nacional de recursos energéticos primarios.



Fuente: [8].

3.5 Elementos que componen una PCH

Los elementos que componen una PCH son [10]:

- Bocatoma

Es la obra mediante el cual se toma el caudal que se requiere para obtener la potencia de diseño; su construcción es sólida ya que debe soportar las crecidas del río [10].

- Obra de conducción

Se encarga de conducir el caudal desde la bocatoma hasta el tanque de carga; posee una pequeña pendiente; en la mayoría de los casos suele ser un canal, aunque también puede ser un túnel y/o una tubería [10].

- Desarenador

Es necesario que las partículas en suspensión que lleva el agua sean decantadas, por ello al final de la obra de conducción se construye un tanque de mayores dimensiones que el canal, para que las partículas pierdan velocidad y sean decantadas [10].

- Tanque de carga

En esta obra la velocidad del agua es prácticamente cero, empalma con la tubería de presión; sus dimensiones deben garantizar que no ingresen burbujas de aire en la tubería de presión; permitir el fácil arranque del grupo turbina – generador y amortiguar el golpe de ariete [10].

- Aliviadero

Con esta obra se regresa al cauce del aprovechamiento el caudal de exceso que se presenta en la bocatoma y en el tanque de carga [10].

- Tubería de presión

A través de ella se conduce el caudal de diseño hasta la turbina; está apoyada en anclajes que le ayudan a soportar la presión generada por el agua y la dilatación que le ocurre por variación de temperatura [10].

- Casa de maquinas

En ella se encuentran la turbina y el generador, encargado de transformar la energía potencial en mecánica y está en eléctrica para atender la demanda [10].

- Otros elementos

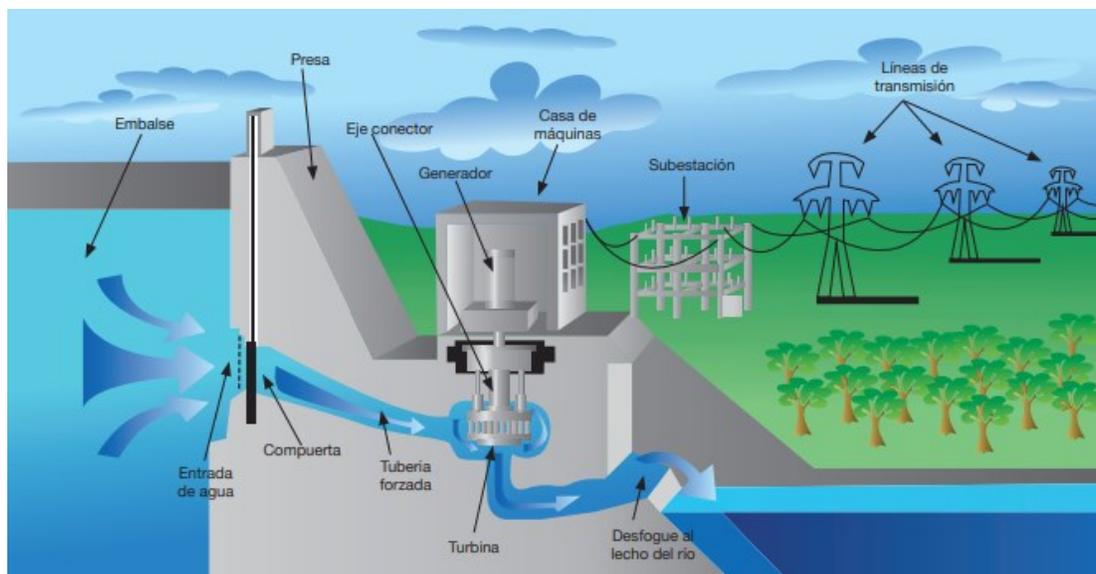
Válvulas, reguladores, volantes, tablero de medida y protecciones, subestación, barraje, etc. [10].

3.6 Funcionamiento de los diferentes sistemas de PCH

3.6.1 Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a generadores. Después de este proceso, el agua se devuelve al río en las condiciones en que se tomó, de modo que se puede volver a usar por otra central situada aguas abajo o para consumo (UPME, pág. 26). Como se muestra representado en la Figura 3-3.

Figura 3-3: Esquema de central hidroeléctrica.

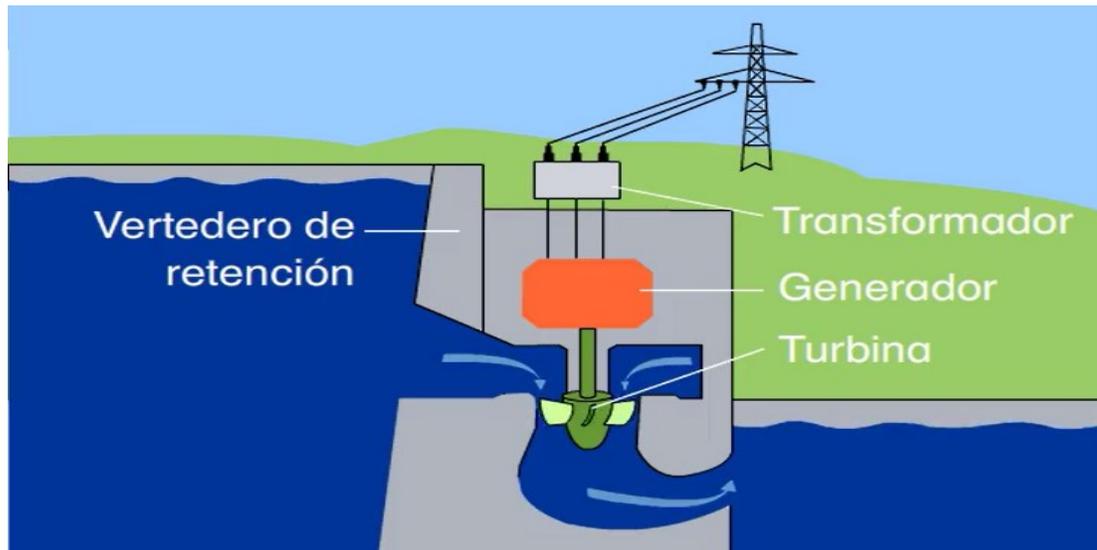


Fuente: [11].

3.6.2 Central de agua fluyente

Este tipo de sistema no cuenta con embalse, el agua se utiliza en las turbinas o se derrama por el aliviadero de la central. Son las más frecuentes y entre ellas se encuentran las centrales de más potencias. Son centrales de llanuras y se caracterizan por gran caudal y poca altura (MATAIX, 2010, págs. 449-450). Tal como se muestra en la Figura 3-4.

Figura 3-4: Central de agua fluyente.

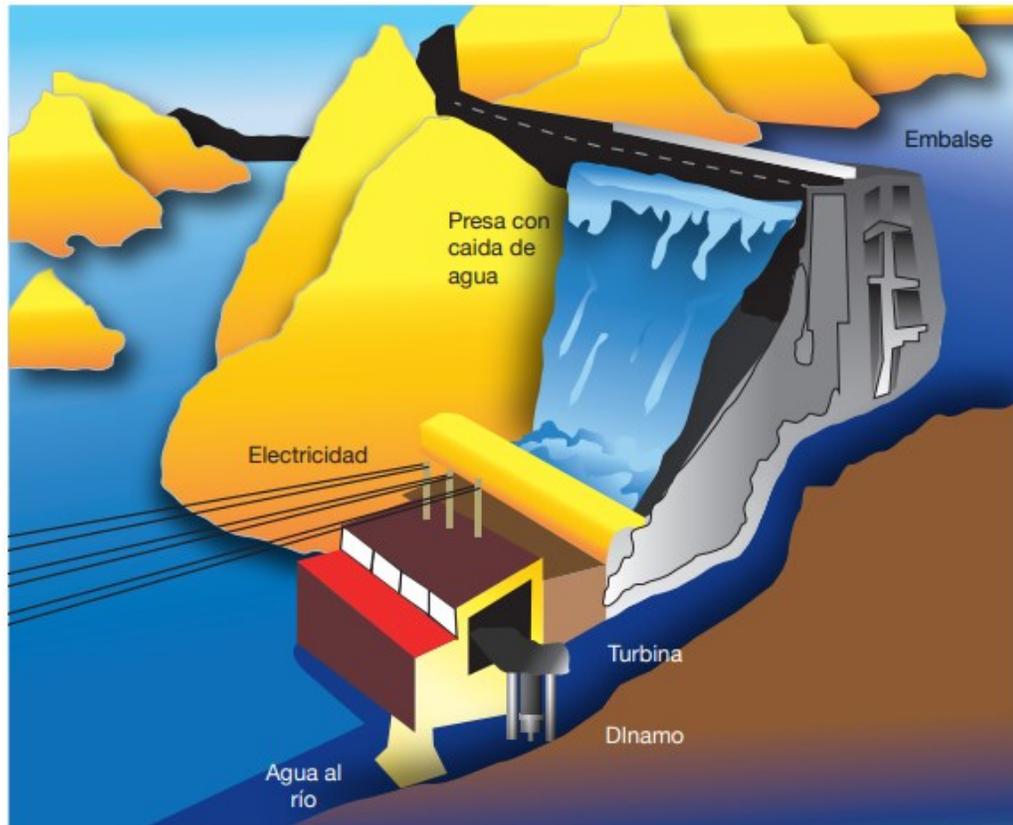


Fuente: [12].

3.6.3 Central con embalse o de regulación

En este tipo de centrales se embalsa un volumen considerable de agua mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales; el embalse permite regular la cantidad de agua que pasa por las turbinas, con el fin de unificar las variaciones temporales de los caudales afluentes en el río. Las centrales con almacenamiento o regulación exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de filo de agua, pero facilitan el incremento de la producción energética, disminuyendo el costo de la energía generada. (UPME, pág. 27). Tal como se muestra en la Figura 3-5.

Figura 3-5: Corte de una central hidroeléctrica del embalse.



Fuente: [11].

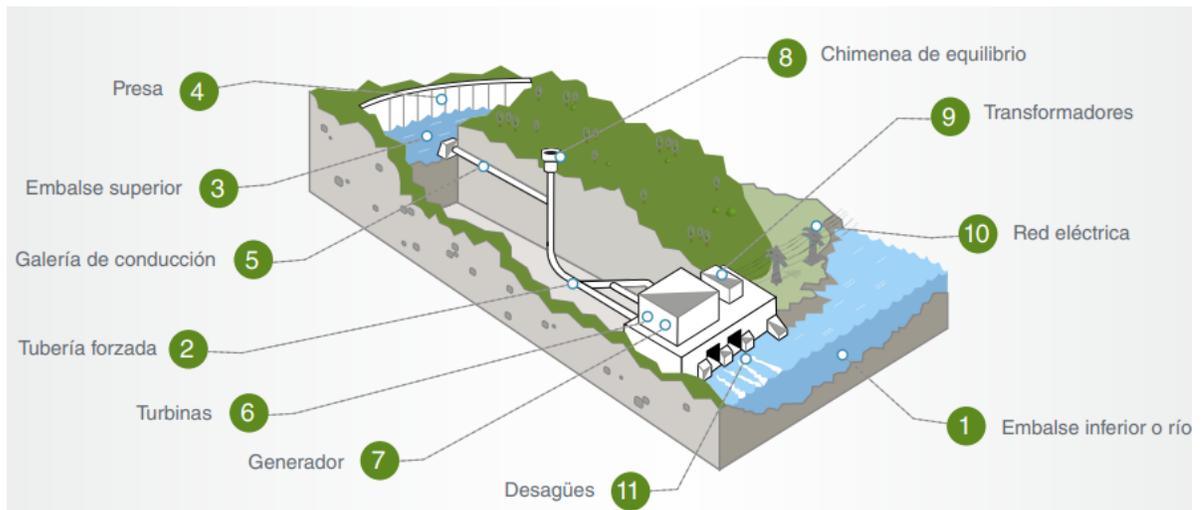
3.6.4 Central de acumulación por bombeo

Disponen de dos embalses situados a diferente nivel, cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, el agua almacenada en el embalse superior hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador funcionando como una central convencional generando energía. Después el agua queda almacenada en el embalse inferior.

Durante las horas del día en las que la demanda es menor el agua se bombea al embalse superior para que inicie nuevamente el ciclo productivo. Para ello la central dispone de un grupo de motores-bomba o alternativamente sus turbinas son reversibles de

manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores (UPME). Tal como se muestra en la Figura 3-6.

Figura 3-6: Central de acumulación por bombeo.



Fuente: [13].

3.7 Marco legal

En la Tabla 3-4 se puede observar de manera resumida las leyes, decretos y resoluciones que se establecen en Colombia para la implementación de una PCH.

Tabla 3-4: Leyes, decretos y resoluciones para la implementación de una PCH.

Leyes
Ley 1715 del 13 de marzo de 2014: “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.”
Ley 373 del 6 de junio de 1997: “Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.”
Decretos
Decreto número 2143: “Por el cual se adiciona el decreto único reglamentario del sector administrativo de minas y energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el capítulo 111 de la ley 1715 de 2014.”
Decreto Ley 2811 de 1974: Código de los recursos naturales renovables y protección al medio ambiente.
Resoluciones
Resolución CREG no. 025 de 1995: “Por la cual se establece el código de redes, como parte del reglamento de operación del sistema interconectado nacional”, anexo denominado código de redes define, entre otros, los criterios de planeamiento del STN y los requisitos técnicos mínimos para el diseño, construcción, montaje, puesta en servicio, operación y mantenimiento que todo usuario debe cumplir por o para su conexión.”
Resolución CREG 030 de 1996: “Por la cual se complementan los procedimientos generales para la asignación de puntos de conexión a los sistemas de transmisión nacional, sistemas de transmisión regional o sistemas de distribución local.”
Resolución 086 de 1996: “Por la cual se reglamenta la actividad de generación con plantas menores de 20 MW que se encuentra conectado al sistema interconectado nacional (SIN)”.
Resolución CREG 070 de 1998: establece el reglamento de distribución de energía eléctrica, el cual en el numeral 4.5 señala: “en el caso de generadores, plantas 34 menores, auto generadores o cogeneradores que proyecten conectarse al sistema de energía, el procedimiento para la conexión se rige en lo que aplique a lo dispuesto en las resoluciones CREG 025 de 1995 y CREG 030 de 1996 y demás normas que las modifiquen o sustituyan.
Resolución no.082 del 2002, “Por la cual se aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los sistemas de Transmisión regional y distribución local”.
Resolución no. 181462 de noviembre 10 de 2004: “Por medio de la cual se modifica el artículo 1° de la resolución 18 1401 del 29 de octubre de 2004. Que mediante la resolución 1811401 del 29 de octubre de 2004 se adoptó el factor de emisión de gases de efecto invernadero para los proyectos de generación de energía con fuentes renovables conectados al sistema nacional cuya capacidad Instalada sea igual o menor a 15MW”.

Fuente: [5]

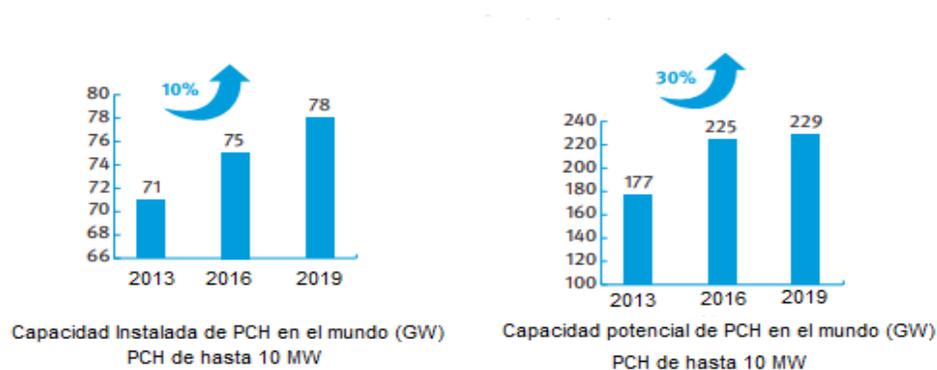
3.8 Contexto y variables

Las centrales hidroeléctricas surgieron de la necesidad de obtener energía eléctrica por la gran demanda existente en la población, estas centrales suplen en gran parte la demanda del consumo energético mundial y a su vez tiene como principal característica

que hacen parte de las energías limpias, y generan pocas emisiones de CO2 al medio ambiente.

Se estima que la capacidad mundial instalada de PCH de 10 MW suma un total de 78 GW en el 2019, esto indica un aumento de aproximadamente el 10% en comparación con los datos del 2013 y del 4,7% en comparación con los datos del 2016 como se muestra en la Figura 3-7. Además, desde la publicación del informe en 2013 se descubrió que el potencial de la PCH ha incrementado en un notable 30%. El mayor aumento de la capacidad instalada de PCH se registra en el continente asiático y europeo, con un 5,2 por ciento cada uno. En América se ha registrado una ligera disminución debido a un aporte de información actualizada sobre PCH de hasta 10 MW. Oceanía registra una disminución que se debe a actualizaciones y catástrofes naturales. África experimentó un aumento de solamente el 1,5% en comparación con la edición anterior del informe. A pesar del atractivo y los beneficios de las soluciones de PCH, gran parte del potencial mundial de PCH sigue sin aprovecharse (66%) [14].

Figura 3-7: Capacidad instalada y potencial de PCH en el mundo.



Fuente: [14].

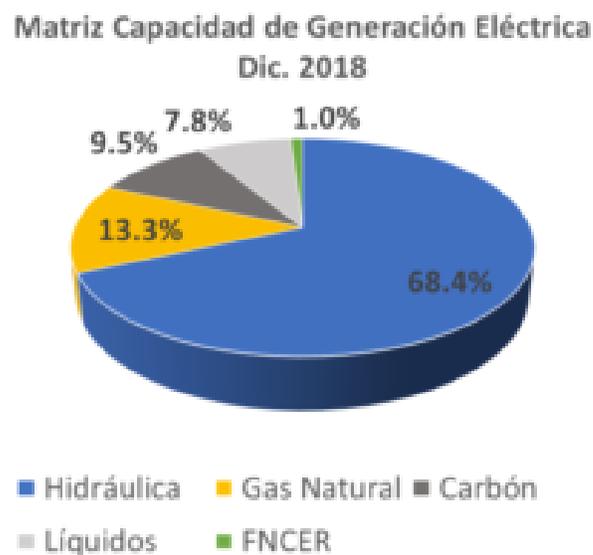
En Colombia a través de los años se han venido impulsando y ejecutando diferentes proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) a lo largo del territorio Nacional. El panorama actual respecto al uso de fuentes de generación para el abastecimiento energético plantea incluir las fuentes de energía renovables, dando entrada a las PCH como un mecanismo que permite aprovechar el potencial hídrico del país. Colombia está posicionada como uno de los países con mayor riqueza hídrica tanto a nivel global como en Latinoamérica con una superficie de 1,141.748 km² de tierras emergidas. Actualmente Colombia tiene un potencial hídrico considerable para suplir las demandas generadas a su alta población, la capacidad efectiva neta del al año 2015 fue de 16,420 Mega Watts según la UPME.

En comparación con el año siguiente 2014 tuvo un crecimiento en 931 MW, esto corresponde a un 6%. Este aumento obedece principalmente a la puesta en marcha de varias centrales hidroeléctricas como: El Quimbo, Carlos Lleras, Cucuana, San Miguel, Bajo Tuluá, Providencia y las centrales térmicas Gecelca 3 y tasajero. “En la región andina colombiana, donde está ubicada la mayor parte de la generación hidráulica, presenta niveles de lluvia que van desde los 1500 mm anuales en los valles interandinos hasta los 4000 mm al año en los altiplanos y bosques”. “Unido a lo anterior, la geografía montañosa que facilita la construcción de embalses, ha propiciado que el desarrollo del sistema eléctrico se base en generación hidráulica” (UPME, 2013).

A continuación, en la Figura 3-8 se muestra la matriz de capacidad de generación eléctrica en Colombia en cuanto el uso de diferentes sistemas de producción de la misma. Colombia tiene una de las matrices de generación eléctrica más limpias del mundo. A diciembre de 2018, la capacidad instalada de generación en el Sistema Interconectado

Nacional fue de 17.312 Mega-watts (MW). “De esta capacidad instalada, el 68,4% correspondió a generación hidráulica, casi el 30% a generación térmica (13,3% con Gas Natural, 7,8% con combustibles líquidos y 9,5% con carbón) y aproximadamente el 1% con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) (eólica, solar, y biomasa)” [15].

Figura 3-8: Distribución de generación eléctrica en Colombia.



Fuente: [15].

El departamento de la Guajira es especial, cuenta con diferentes zonas como la baja, media y alta Guajira que tiene importantes fuentes hídricas como el río Tapias y ranchería, donde han desarrollado proyectos de grandes represas para la generación de energía, y que abastecen en gran medida el departamento de la Guajira. Con el desarrollo del proyecto donde se propone realizar un diseño de una PCH, aprovechando el caudal constante del río Tapias que atraviesa por tuberías que bajan por gravedad se busca suministrar energía eléctrica a una comunidad que no está interconectada a la red debido a

su difícil acceso. Uno de muchos asentamientos indígenas es la comunidad de JEPUJAKAT, que tiene familias morando por muchos años sin el fluido eléctrico, esta fuente de energía no llega hasta la comunidad ubicada a pocos metros de donde atraviesa una tubería madre proveniente del río principal.

Se propone una solución por la falta de fluido eléctrico en esta comunidad y mejorar la calidad de vida de los indígenas Wayuu a través del diseño de una PCH. En la Tabla 3-5 se presenta la descripción de las variables planteadas.

Tabla 3-5: Descripción de las variables.

	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADOR
Variable independiente	Cantidad de kw/h producidos	Comunidad beneficiada por el fluido eléctrico	Número de familias con servicio de energía
Variable dependiente	Red de distribución de energía eléctrica	Interconexión de la comunidad a un sistema de red eléctrica	Mejora en la calidad de vida de los pobladores de la comunidad de JEPUJAKAT

Fuente: Elaboración Propia.

3.9 Línea de investigación

La línea de investigación en la cual se encuentra inmerso este trabajo de grado y según las estipuladas por la Universidad Antonio Nariño corresponde a las Energías renovables y alternativas.

4. Marco Metodológico

El presente trabajo de grado se desarrolla bajo el tipo de investigación descriptiva, en el que a través de una revisión de tipo documental e información de campo se puede establecer de manera clara respuestas a los objetivos formulados. El proyecto se desarrolla en las fases y actividades descritas a continuación:

4.1 Diagnóstico de las condiciones de la zona

- Identificar los diferentes puntos de aprovechamiento hidráulico del sistema de abastecimiento de agua a Riohacha distrito turístico y cultural.
- Revisar diferentes proyectos actuales de PCH.
- Analizar el funcionamiento de los diferentes tipos de sistemas PCH.
- Determinar los datos de caudal, presiones, potencia y altura.
- Calcular el aprovechamiento energético.

4.2 Determinación de la bomba hidráulica

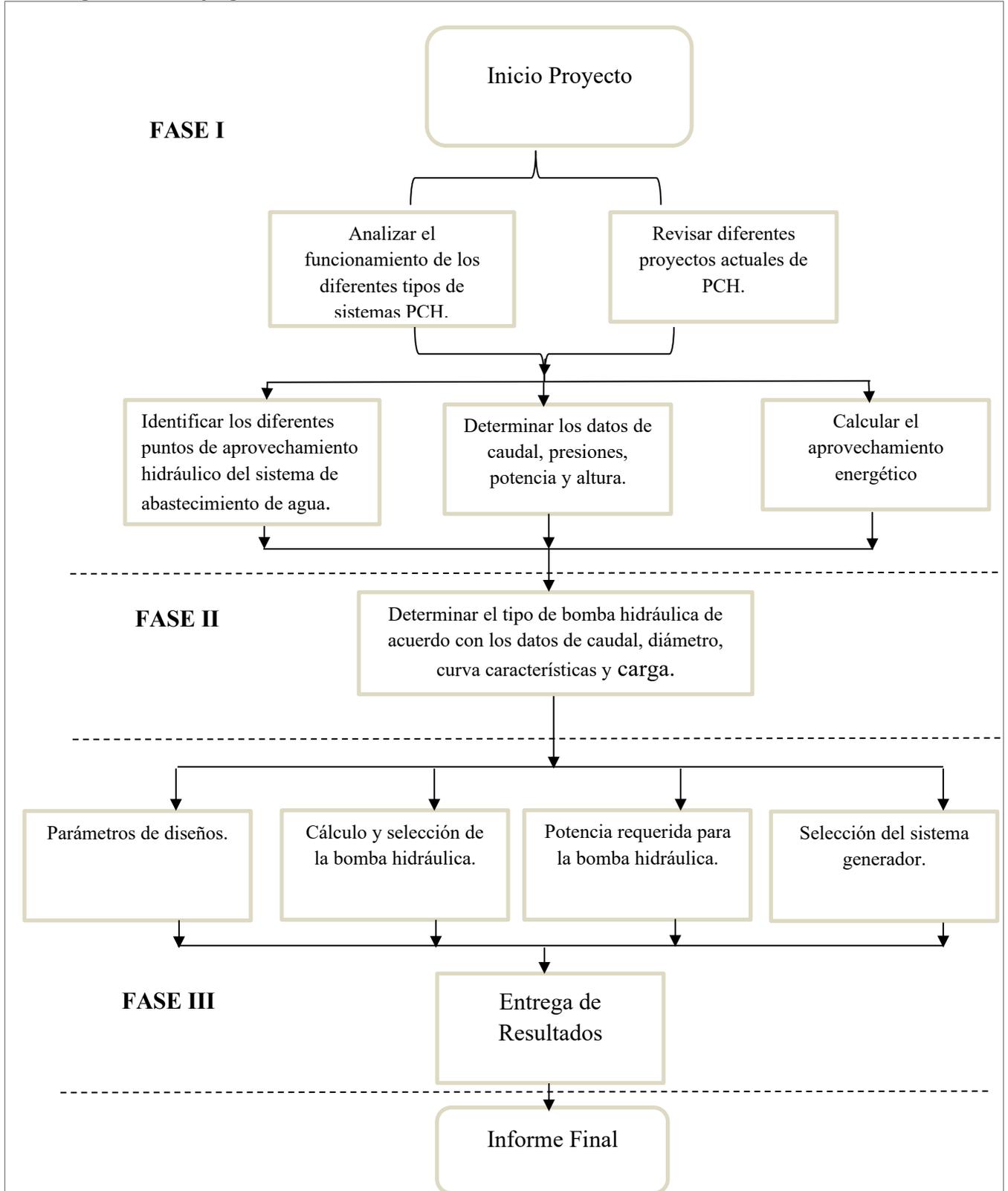
- Determinar el tipo de bomba hidráulica de acuerdo con los datos de caudal, diámetro, curva características y carga.

4.3 Diseño de la PCH

- Parámetros de diseños.
- Cálculo y selección de la bomba hidráulica.
- Potencia requerida para la bomba hidráulica.
- Selección del sistema generador.

La secuencia de las fases y sus respectivas actividades se presentan a continuación, por medio de la Figura 4-1.

Figura 4-1: Flujo grama de actividades.



Fuente: Elaboracion propia.

4.1 Ubicación geográfica

En la actualidad, el sistema de abastecimiento de agua a Riohacha distrito turístico y cultural, cuenta con una zona de captación y una planta de tratamiento de agua potable con capacidad de producir 500 litros de agua por segundo a orillas del río Tapias, ubicados en el corregimiento de Tomarrazón, a 46 kilómetros de Riohacha y con una línea de conducción que atraviesa una zona de alta producción agrícola y ganadera. En la zona urbana se dispone de aproximadamente 300 km de redes de acueducto y en materia de saneamiento trabajan con cinco estaciones de bombeo de aguas residuales [16].

4.4 Determinación de parámetros para la PCH

Para la determinación de los parámetros de la PCH se tiene en cuenta los siguientes ítems:

4.4.1 Caudal

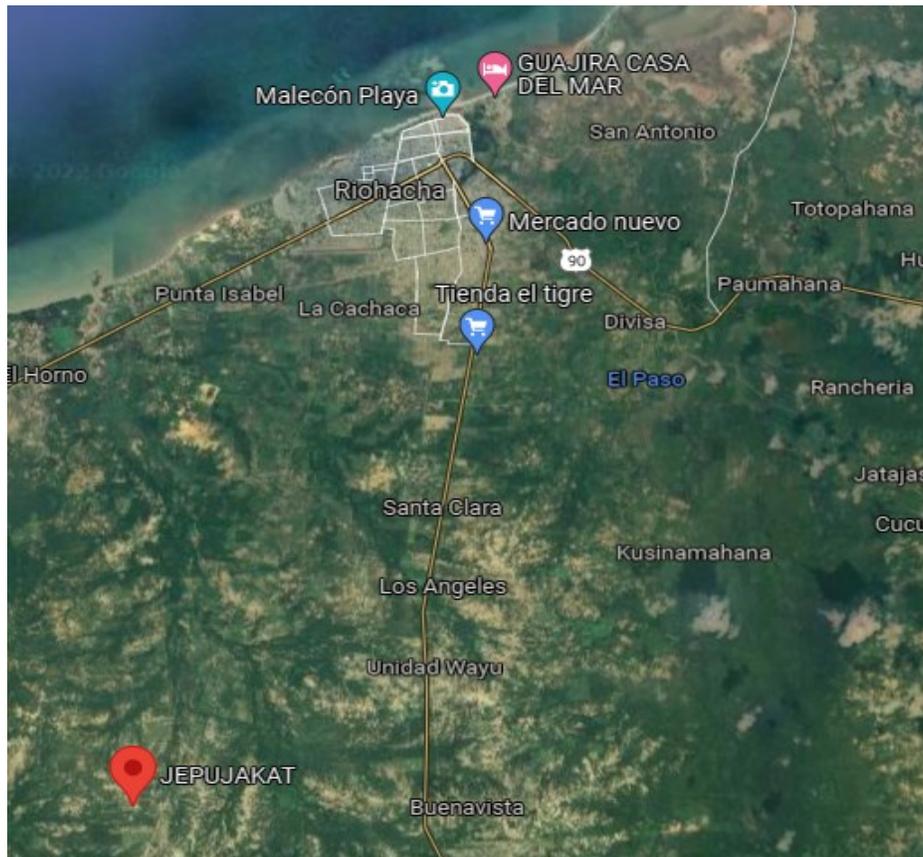
Para el cálculo del caudal necesario en el río Tapias, se obtuvieron datos directamente de la fuente confiable como el IDEAM, el cual muestra que se viene presentando caudales fluctuantes en promedio de 3600 l/s, caudal que se reduce en época de verano y que baja hasta los 2500Lt/s. Los datos anteriores son permanentes durante los últimos 5 años. El caudal de 3600Lt/s según información de la empresa prestadora de servicio de suministro de agua del departamento de la Guajira (ASAA) y Corpoguajira corroboran esa información que presenta el instituto de hidrología, meteorología de estudios ambientales de Colombia. Ver anexo A.

Para el diseño de la bocatoma la empresa ASAA tomo parámetros ambientales de tal manera que no afectara el curso normal del desarrollo de río Tapias, por lo tanto solo tomo un porcentaje del caudal del río, para esta caso tomo entre un 13- 16% del caudal total del río, con el objetivo de garantizar un flujo constante en la tubería que transporta el fluido hasta la planta de tratamiento en el municipio de Riohacha la Guajira, es decir un caudal de 0,5 m³/s constante independientemente de las estaciones del año (invierno - verano).

4.5 Condiciones y ubicación de la comunidad JEPUKAJAT

Para obtener las dimensiones del sistema propuesto para la PCH se considera la información de conexión a red en el municipio, donde muestra que la comunidad de JEPUKAJAT no cuenta con fluido eléctrico y por años padece del servicio. Esta comunidad se encuentra ubicada al sur del municipio de Riohacha a pocos kilómetros de la zona urbana como se muestra en la Figura 4-2.

Figura 4-2: Ubicación satelital comunidad JEPUKAJAT.



Fuente: Elaboración propia con Google MAPS.

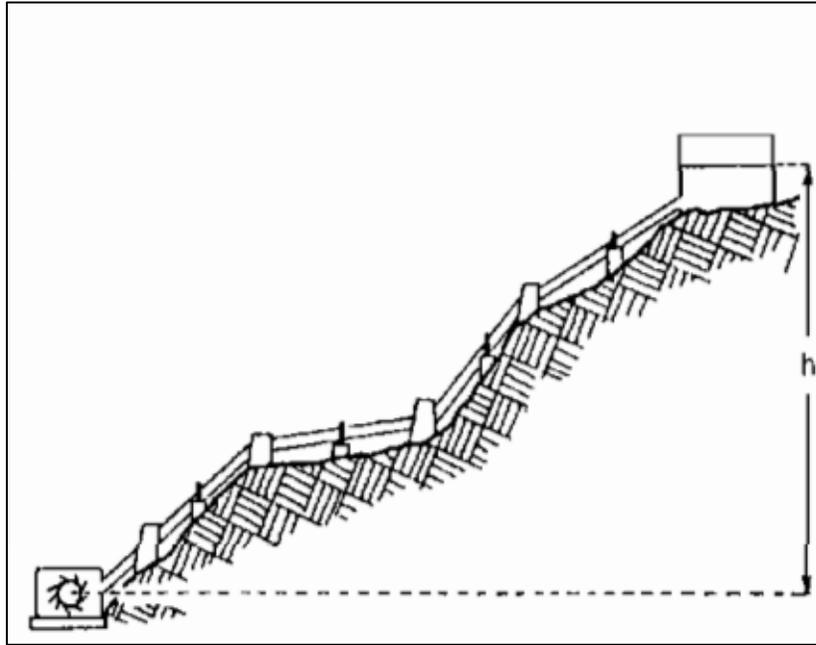
Para dar solución a esta problemática que presenta la comunidad mencionada anteriormente y que cuenta con 10 viviendas, se busca alimentar las misma con un voltaje constante de 110 VAC y una corriente promedio por casa de 150 amperios, es decir, se requiere un diseño de carga de 100kVA para satisfacer la necesidad de energía eléctrica.

4.5.1 Altura del salto

Para el cálculo de la altura necesaria del diseño de la PCH, se utiliza GPS registrando diferentes puntos desde el nacimiento del rio con el cual se pudo determinar

que está a una altura de 70 m hasta el punto de ubicación de la PCH y 100 metros hasta su desembocadura. La altura neta se evidencia en la Figura 4-3.

Figura 4-3: Altura neta para PCH.



Fuente: [17].

4.5.2 Cálculo de duración de potencia

Con los datos entregados por la empresa prestadora del servicio se calcula la energía a diferentes alturas de caída de agua con un caudal constante, donde se puede determinar el promedio durante doce meses. Es indispensable tener claro la cantidad de energía que se va a generar considerando los valores de caudal antes mencionado, y determinar la cantidad de energía que se produce durante un año (kWh). Al multiplicar la potencia por la duración se obtiene la energía total generada al año para los caudales del diseño establecido.

El Cálculo de potencia relativa se obtiene mediante la ecuación 5.1

$$P_r = Q * H * \gamma * Duración (kW) ; \quad Ec \quad 5.1$$

Donde,

P_r = Calculo de potencia relativa

Q: caudal (m^3/s) que pasa por la tubería

H: Altura (m)

γ : Peso específico del agua ($9,8 \text{ kN}/m^3$)

$$P_r = \left(0,5 \text{ m}^3/s * 70 \text{ m} * 9,8 \text{ kN}/m^3 * 0,7 \right)$$

$$P_r = 240 \text{ kW}$$

La energía útil que va a la red se calcula considerando la altura y el caudal como se muestra en la ecuación 5.2

$$Energia = \frac{P_r * Duración * 8760}{1000} [kWh/año] ; \quad Ec. 5.2$$

$$Energia = \frac{240kW * 0,7 * 8760}{1000} = 1472,29 [kWh/año]$$

En la Tabla 4-1 se muestra el valor de la potencia y energía año a diferentes alturas referentes a la máxima, el caudal del rio es constante garantizando sobre la tubería un flujo constante durante los doce meses del año, empresa operadora de servicios publicos indican que aunque hay tiempo de verano el caudal que fluye por la tubería no varia, por que mantiene ese flujo hasta una altura de 100 metros como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4-1: Cálculo de potencia promedio y energía año.

Altura (m)	Caudal m ³ /s	Potencia (KW)	Duración (%)	Potencia Promedio (KW)	Energía año(kWh)
10	0,5	49	70%	34,3	210,33
20	0,5	98	70%	68,6	420,66
30	0,5	147	70%	102,9	630,98
40	0,5	196	70%	137,2	841,31
50	0,5	245	70%	171,5	1051,64
60	0,5	294	70%	205,8	1261,97
70	0,5	343	70%	240,1	1472,29
80	0,5	392	70%	274,4	1682,62
90	0,5	441	70%	308,7	1892,95
100	0,5	490	70%	343	2103,28

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 4-1 se observa que el caudal es constante por lo que se toma el promedio de 0,5 m³/s, con este dato y con la altura de caída neta 70 m se evidencia que la potencia es de 240,1kW.

4.6. Captación de agua

4.6.1 Cálculo de la bocatoma y velocidad del agua

La procedencia de donde se va a tomar el afluente para el diseño de la PCH en la comunidad JEPUJAKAT es el río tapia que, cuenta con un caudal promedio antes mencionado de 3600 m³/s suficiente para producir energía requerida para suplir las necesidades básicas para la comunidad. La toma del fluido es un porcentaje del total del caudal del río y se diseña considerando algunos datos importantes y considerando una autonomía de 24 horas. La empresa prestadora del servicio ASAA facilito los siguientes datos:

- La dimensión del ancho de captación de agua es de 3,5 metros
- Caudal

Se debe tener en cuenta que la entrada de toma del recurso cuente con accesorios que bloquee objetos de gran tamaño como rocas y otros, es decir, debe tener un desarenador y una rejilla que proteja de taponamientos la entrada.

$$H_{Bocatoma} = \left(\frac{Q}{1,84L}\right)^{2/3} \quad \text{Ec; } 5.3$$

Donde $H_{Bocatoma}$ = Altura bocatoma en (metros)

Q = Caudal de diseño (m^3/s)

L = Ancho de la bocatoma (metros)

$$H_{Bocatoma} = \left(\frac{0,5 \text{ m}^3/s}{1,84 * 3,5 \text{ m}}\right)^{2/3} = 0,181 \text{ m}$$

Con la altura se calcula la velocidad del agua en ese punto.

$$v_{Bocatoma} = \left(\frac{Q}{L * H_{Bocatoma}}\right) \quad \text{Ec. } 5.4$$

$$v_{Bocatoma} = \left(\frac{\frac{0,5 \text{ m}^3}{s}}{3,5 \text{ m} * 0,181 \text{ m}}\right) = 0,78 \text{ m/s}$$

Con el resultado obtenido se evidencia que está en el rango de 0,3 m/s y 3 m/s de tal manera que puedan ser aplicadas las ecuaciones para determinar el ancho del canal de aducción, por lo tanto, para las consideraciones del diseño propuesto. Para el cálculo del ancho del canal colector se utilizan las ecuaciones del alcance del chorro de agua y de esta

manera obtener el valor teórico, el cual se compara con el real entregado por la empresa de acueducto del municipio.

- Para el alcance de filo superior se tiene:

$$x_{superior} = (v_{Bocatoma})^{2/3} + (0,6H)^{4/7} \quad \text{Ec. 5.5}$$

$$x_s = (0,78 \text{ m/s})^{2/3} + (0,6 * 0,18 \text{ m})^{4/7} = 1,12 \text{ m}$$

- Para el alcance de filo inferior se tiene:

$$x_{inferior} = (v_{Bocatoma})^{4/7} + (0,6H)^{3/4} \quad \text{Ec. 5.6}$$

$$x_{inferior} = (0,78 \text{ m/s})^{4/7} + (0,6 * 0,18 \text{ m})^{3/4} = 1,056 \text{ m}$$

- El ancho del colector viene dado por:

$$B = x_s + 0,1 \quad \text{Ec. 5.7}$$

$$B = 1,12 \text{ m} + 0,1 = 1,22 \text{ m}$$

Con este calculo, se confirman los datos suministrados por la empresa ASAA, sobre el valor del ancho del colector, con lo que permite que se continúe con el diseño y desarrollo del proyecto de la PCH en la comunidad JEPUKAJAT.

4.7. Cálculo de la tubería

4.7.1. Diámetro de la tubería

Para el cálculo de la tubería es necesario considerar las formulas para calcular conocidos como Bresse y Fahlbusch.

- La fórmula de Bresse relaciona directamente el diámetro de la tubería con el caudal. La fórmula es la siguiente [18].

$$D = 1,5\sqrt{Q} \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde;

D= diámetro de la tubería.

Q= caudal (m^3/s)

$$D = 1,5\sqrt{0,5 m^3/s} = 1,06 m$$

Con este resultado se evidencia que el diámetro de la tubería es de 39 pulgadas. Al calcular la velocidad del fluido se obtiene:

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 5.9}$$

$$v = \frac{0,5 m^3/s}{\frac{\pi * (1,06m)^2}{4}} = 0,56m/s$$

La fórmula de Fahlbusch, relaciona el diámetro con la altura y la potencia, se tiene entonces:

$$D = 0,52 * H^{-1,14} (P/H)^{0,42} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Donde la potencia calculada anteriormente a la altura se encuentra la bocatoma es 50 metros y la potencia es de 245kW.

$$D = 0,52 * (70m)^{-0,14} (343kW/70)^{0,42} = 0,559 m$$

$$v = 2,03 \text{ m/s}$$

Al utilizar la última ecuación de Fahlbusch, que con más claridad relaciona de alguna u otra manera el cálculo requerido de la PCH, es ideal para el desarrollo del proyecto, sin embargo, la empresa ASAA decide a su criterio, argumentando en su momento que como la ciudad está en pleno crecimiento y que se requerirá mayor demanda del fluido, por lo tanto, se seleccionaron los resultados de las dos ecuaciones, cuyos valores se encuentran entre 0,60 m y 1,06 m. El cálculo del promedio fue de 0,83 m que aproximando al sistema inglés es de $\varnothing 32''$.

Se determino, en su momento utilizar tubería de acero galvanizado de 32'' de diametro que puede soportar altas presiones de 32 bares, optimos para pequeñas centrales hidroelectricas a columnas de aguas superiores a los 250-300 metros, esta a su vez puede transportar agua a una velocidad máxima de 3,7 y 3,9 m/s. a continuación se muestra la selección del material para transporte de agua potable. Ver Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Tipos de materiales de tubería para transporte de agua.

Tipo	Ventaja	Desventaja
Acero inoxidable	Resieten la corrosion	Alto costo dificles de conseguir.
cobre	Resietnte a la corrosion	Elevado costo
PVC	Livianas y resistentes	A altas temperaturas pueden deformarse
Galvanizadas	Ayudan a evitar la oxidacion e incrementan la resistencia a la corrosion	Por su robustes el compuesto del material es pesada para transportar.

Fuente: Elaboración propia (Con datos de HIDROTEC 2021).

Los cálculos arrojaron que la velocidad para el diseño propuesto es de 2,03 m/s, valor aceptable para el diseño de la PCH en la comunidad JEPUKAJAT.

4.8 Cálculo del tipo de flujo

Para determinar el tipo de flujo hay que realizar el cálculo del número de Reynold con el cual se puede decir si el flujo es máximo o turbulento.

4.8.1 Número de Reynolds

El número de reynolds es un criterio de similitud hidrodinamica de un fluido vizcoso, relaciona las fuerzas de inercia y de fricción viscosa. Si este número es de gran cantidad indica que tiene un flujo de viscosidad pequeño y viceversa, La ecuación esta definida de la siguiennte manera [17].

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \text{Ec. 5.11}$$

V= velocidad m/s

D= Diámetro de la tubería (Ø m)

ν = Viscosidad cinemática del agua $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re = \frac{1,76 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,81\text{m}}{1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1429120$$

Por lo tanto es un flujo con poca viscosidad y es turbulento por que se encuentra $Re > 2500$.

4.8.2 Coeficiente de fricción (λ)

Para el cálculo del coeficiente de fricción (λ) en un flujo de régimen turbulento hay que mencionar la ecuación de Blassius.

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad Ec. \quad 5.12$$

$$\lambda = \frac{0,316}{1419120^{1/4}} = 0,009$$

A continuación se calcula la pérdida de carga en las paredes de la tubería (h_f)

$$h_f = 0,08 * \frac{\lambda * H * Q}{D^5}: \quad Ec. \quad 5.13$$

Donde;

λ = Coeficiente de fricción

L=distancia altura (m)

D= diametro

$$h_f = 0,08 * \frac{(0,009) * (70m) * (0,5 \text{ m}^3/s)}{0,812m^5} = 0,892 \text{ m}$$

Las pérdidas de carga por fricción en las paredes son de 0,892 metros

4.9 Cálculo de la velocidad en la tubería

Con los valores ya obtenidos como los de el diámetro y el caudal, se procede a calcular la velocidad del fluido que pasa por la tubería de acero.

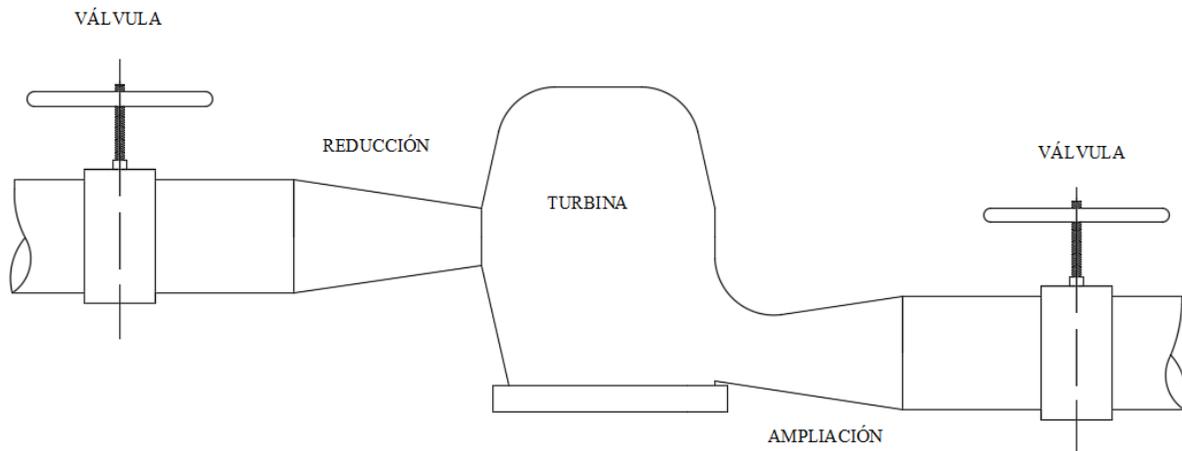
$$velocidad = \frac{Q}{\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{0,5 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * \frac{0,812 \text{ m}^2}{4}} = 0,96 \text{ m/s}$$

4.10 Cálculo de pérdidas

4.10.1 Pérdidas en accesorios por turbulencia

Para el desarrollo del diseño se requiere hacer una reducción desde el tubo madre de 30" hasta un diámetro de 20". De esta manera se aumenta la velocidad del fluido que va a ingresar por una tobera hasta que este llegue a las aspas del mecanismo generador y una vez hace su trabajo se vuelve a aumentar el diámetro con el objetivo de mantener el caudal en el tramo como se evidencia en la Figura 4-4.

Figura 4-4: Accesorios de la PCH.



Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas por tubería vienen dada por la ecuación 5.14, los valores del coeficiente de pérdidas típicos para accesorios (k) son tomados de las Tabla 4-3 que muestra los diferentes diámetros de la tubería. El sistema tiene tres codos de 90° y dos válvulas y una

reducción y una ampliación. Estos accesorios generan pérdidas en el sistema que se requiere tener en cuenta para evitar pérdidas de caudal, presión y velocidad en el diseño de la PCH.

$$h_t = \frac{V^2}{2g} * \sum (k_1 + k_2 + \dots k_n); \quad Ec. 5.14$$

Tabla 4-3 Coeficiente de pérdidas en accesorios.

Diámetro nominal (pulgadas)	ROSCADO O SOLDADO				CON BRIDA				
	1/2"	1"	2"	4"	1"	2"	4"	8"	20"
VÁLVULA TOTALMENTE ABIERTA									
Válvula de Globo	14	8,2	6,9	5,7	13	8,5	6	5,8	5,5
Válvula de compuerta	0,3	0,24	0,16	0,11	0,8	0,25	0,16	0,07	0,03
RETENCIÓN DE DISCO									
Oscilante	5,1	2,9	2,1	2	2	2	2	2	2
Ángulos	9	4,7	2	1	4,5	2,4	2	2	2
CODOS									
45° estándar	0,39	0,32	0,3	0,29					
45° radio largo					0,21	0,2	0,19	0,16	0,14
90° Estándar	2	1,5	0,95	0,64	0,6	0,39	0,3	0,26	0,21
90° radio largo	1	0,72	0,41	0,23	0,4	0,3	0,19	0,15	0,1
180° estándar	2	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,3	0,25	0,2
180° Radio Largo					0,4	0,3	0,21	0,15	0,1
TEES									
Flujo directo	0,9	0,9	0,9	0,9	0,24	0,19	0,14	0,1	0,07
Flujo Lateral	2,4	1,8	1,4	1,1	1	0,8	0,64	0,58	0,41

Fuente: [19].

$$h_t = \frac{(0,96 \text{ m/s})^2}{2 * (9,8 \text{ m/s}^2)} * \sum 5(0,21 + 5,5) = 1,342 \text{ m}$$

4.10.2 Cálculo de pérdida total

El cálculo de pérdida total relaciona las pérdidas generadas por la fricción más la pérdida generada por los accesorios.

$$h_p = h_t + h_f \quad Ec. \quad 5.15$$

$$h_p = 1,342m + 0,892 m = 2,23m$$

4.10.3 Pérdida porcentual

Este tipo de pérdidas es debido a la fricción generada en el sistema, relacionando la pérdida total entre altura total como se muestra en la ecuación 5.16.

$$Pérdidas \% = \frac{h_p * 100}{H} \quad Ec. \quad 5.16$$

h_p = calculo de perdidas total

H = altura de caida de 70m

$$Pérdidas \% = \frac{2,23 m * 100}{70 m} = 3,18\%$$

Este valor de pérdidas en porcentaje se encuentra en el rango deseado de 3% - 11%, inclusive si se reduce hasta un diámetro menor, este se mantendria en el rango deseado para el diseño [17].

4.11 Cálculo de la altura neta

Para la obtención de la altura real del sistema, se toma la ecuación 5.17 como referencia.

$$H_n = H - \left[\lambda \frac{H}{D} + \sum k_n \right] * \frac{V^2}{2g} \quad Ec. \quad 5.17$$

$\lambda =$ coeficiente de fricción

$k_n =$ Perdida por accesorios (total)

$V =$ Velocidad

$g =$ gravedad

$$H_n = 70m - \left[0,009 \frac{70m}{0,996m} + \sum 5(5,5 + 0,21) \right] * \frac{(0,95 \text{ m/s})^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$H_n = 69,169 \text{ m}$$

Con el cálculo de la altura neta real se toma como 69 metros, para el diseño de la PCH que se ubicara en la comunidad antes mencionada.

4.12 Cálculo de la potencia

El cálculo de la potencia se determina con los parámetros obtenidos como la altura neta, el caudal y las propiedades del fluido. Según la ecuación 5.18.

$$P = \gamma * Q * H_n * \eta \quad Ec. \quad 5.18$$

Donde :

$\gamma =$ Gravedad específica del fluido

$\eta =$ Eficiencia de la turbina

La eficiencia de la turbina para el caso del diseño de la PCH se estima de 80%, con esta eficiencia se pretende que la energía generada pueda suplir la demanda en la comunidad de JEPUKAJAT.

$$P = 9806 \frac{N}{m^3} * 0,5 \frac{m^3}{s} * 69 m * 0,8$$

$$P = 270,6456 kW \quad ; \quad 367,97 CV$$

Con la potencia real generada se suple la necesidad de la comunidad JEPUKAJAT, donde pueden tener acceso al fluido eléctrico y hacer uso de electrodomesticos como TV, radio, nevera entre otras dando un voltaje de 110 V en cada una de las casas. La energía será constante debido a que se tiene garantizado un caudal constante sobre la tubería principal, invierno o verano la empresa de servicios públicos de acueducto del departamento siempre mantendra el flujo constante.

4.13 Diseño y selección de la turbina

Para el diseño y selección de la turbina se debe tener en cuenta algunos criterios que permitan tomar la mejor solución, teniendo en cuenta los parámetros como la conducción de presión, eficiencia entre otras que se mencionan a continuación.

4.13.1 *Velocidad específica*

Cada turbina se caracteriza por sus diferentes variables de diseño, una conocida como velocidad específica (Ns) ó también llamada número específico de revoluciones que operan en condiciones hidráulicas muy similares La ecuación 5.19 y 5.20 permite calcular la velocidad en unidades del sistema internacional [20].

$$N_s = N(P_t)^{0.5}(H)^{-1.25} ; \quad Ec. 5.19$$

Donde;

N_s : Velocidad específica

P_t : Potencia

H : Salto neto de la central

Q : Caudal que fluye por la turbina (m^3/s)

Para poder calcular la velocidad específica y el número específico de revoluciones es necesario conocer la velocidad de giro de la turbina (N) expresada en rpm, hay que tener en cuenta que la mayoría de estas máquinas hidráulicas accionan alternadores y esta relacionada con la corriente y la frecuencia como indica la ecuación 5.20.

$$N = \frac{60 * f}{Z} ; \quad Ec. 5.20$$

Donde;

f = frecuencia

Z = numero de polos

Para este caso se tomará un valor de Z de 4 polos y una frecuencia entre 57-63 Hz, esto puede soportar condiciones de velocidad altas, de igual manera hay que tener un sistema de control de velocidad para evitar daños en la misma [21].

$$N = \frac{60*60}{4} = 900 \text{ rpm}$$

$$N_s = 900 \text{ rpm}(367,97 \text{ CV})^{0.5}(69m)^{-1.25} = 86,8 \text{ rpm}$$

$$N_s = 86,8 \text{ rpm}$$

Una clasificación del tipo de turbina esta dada utilizando la potencia en caballos de fuerza (CV), por lo tanto los rangos para la selección con relación a la velocidad específica según los rangos mostrados en la Tabla 4-3 serian:

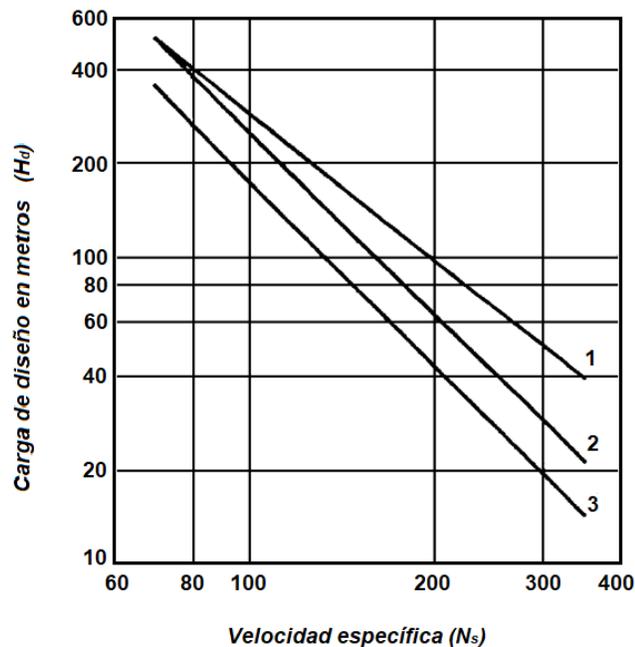
Tabla 4-4. Selección de turbina según la velocidad específica N_s .

<i>Tipo De Turbina</i>	$\eta_s \text{ Min}$	$\eta_s \text{ Max}$
Pelton con 1 inyector	5	30
Pelton con varios inyectores	30	50
Francis lenta	50	100
Francis normal	100	200
Francis rapida	200	400
Francis extrapida y ruedas - helice	400	700
Kaplan	500	1000

Fuente: [17].

La Figura 4-5 muestra el incremento de la velocidad específica para una carga de diseño establecida, como función de la fecha de fabricación, donde se muestra la condición de aumentar la velocidad específica (N_s) para reducir el tamaño en unidades.

Figura 4-5: Diagrama de carga de diseño vs N_s .



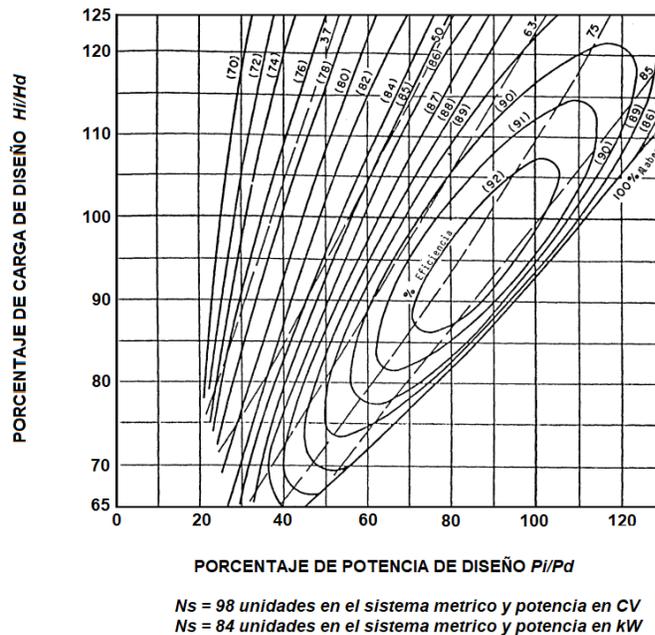
Fuente: [13].

Conociendo el rango de la N_s se toma la turbina tipo francis por los datos arrojados, a continuación se dimensionará la misma.

4.14 Curva característica

Hay que considerar varios parámetros para el flujo de agua a través de la turbina. En la turbina tipo Francis, hay que considerar la carga neta de diseño (H_d), la velocidad en rpm (N) y la apertura de los alabes del distribuidor principal, estos son anillos perimetrales con alabes móviles que controlan la entrada del gasto del rodete. La curva característica representa la relación entre los parámetros a tener en cuenta mencionados anteriormente y esta curva permite predecir el comportamiento de una turbina. En la Figura 4-6 se evidencia la curva característica de la turbina Francis que relaciona potencia de diseño y porcentaje de carga de diseño.

Figura 4-6: Turbina Francis.



Fuente:[20].

4.14 Dimensionamiento de la turbina Francis

Para el dimensionamiento de la turbina tipo Francis, hay que calcular las características de cada uno de sus componentes y sus diferentes accesorios como el tamaño del rodete, el tamaño de la carcaza, diámetros de succión como descarga. Se hicieron estudios para el cálculo de la velocidad periférica y se evidenció una pendiente positiva en los datos obtenidos por lo que se hace necesario utilizar métodos de regresión lineal para obtener finalmente una ecuación que facilita el cálculo. El cálculo también es mencionado en la revista “Water power and Dam construction”, donde se analiza minuciosamente las diferentes turbinas contruidas alrededor del mundo en los últimos años [20].

4.14.1 Tamaño del rodete

Las leyes de similitud aplicadas para turbinas hidráulicas dan a conocer que con la velocidad específica y el coeficiente de velocidad del fluido por las periferia de esta permanece constante y se define como se muestra en la ecuación 5.21.

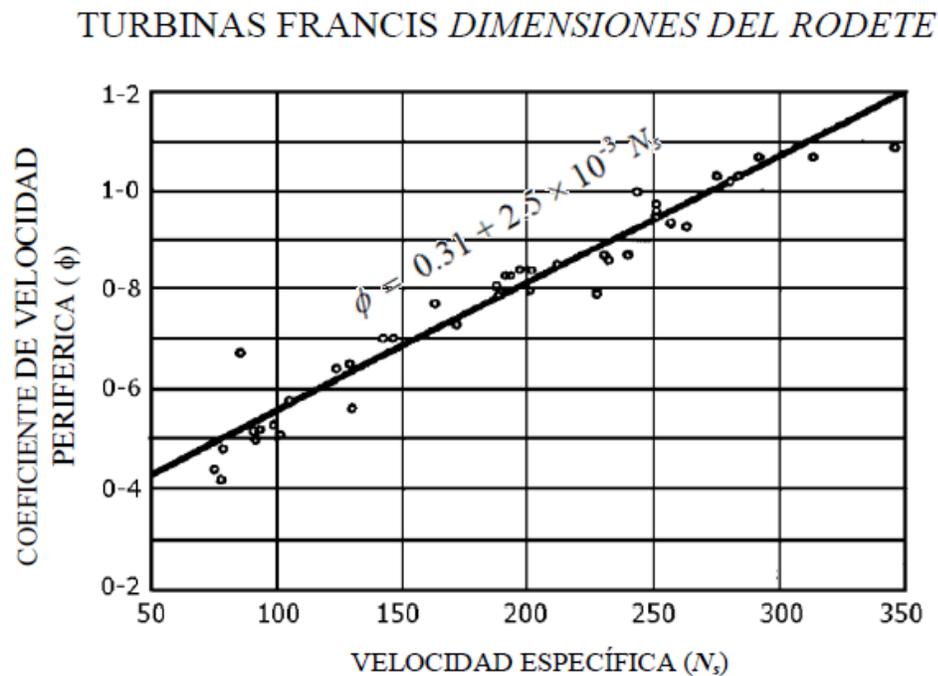
$$\phi = D_3 * N * \frac{\pi}{60} * \sqrt{2 * g * H_d} \quad Ec. \quad 5.21$$

Donde,

D_3 = Diámetro del rodete de la carcasa.

Esta razón de la variación de la velocidad periférica ϕ con respecto a la velocidad específica N_s , se interpola del gráfico ϕ vs N_s de la Figura 4-7.

Figura 4-7: Dimensiones del Rodete turbina Francis.



Fuente: [20].

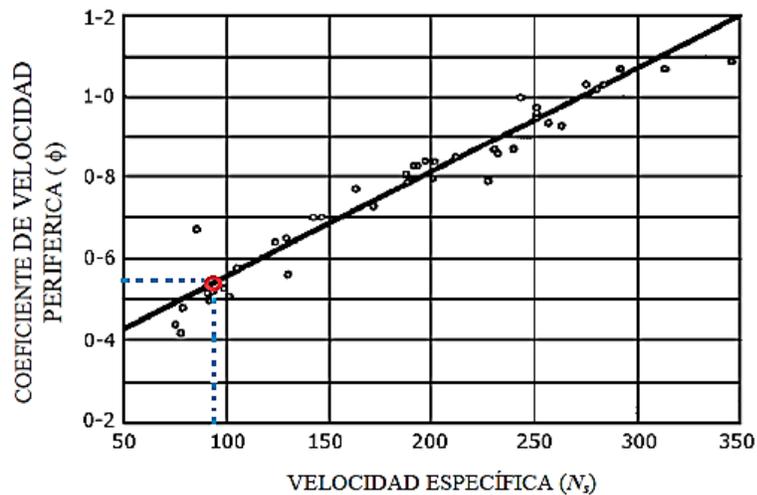
Del gráfico, al realizar la regresión lineal se obtiene como resultado la ecuación 5.22.

$$\phi = 0.31 + 2,5 \times 10^{-3} N_s \quad Ec. \quad 5.22$$

$$\phi = 0.31 + 2,5 \times 10^{-3} * 86,8 = 0,527 m$$

La gráfica de regresión lineal muestra el punto donde se encuentra el coeficiente de velocidad específica para las turbinas Francis. (Ver Figura 4-8).

Figura 4-8: Turbina Francis Dimensiones del rodete.



Fuente:[20].

El valor del diámetro de descarga se obtiene a partir de la ecuación 5.23 que indica (Garcia Gutierrez & Nava Mastache, 2014).

$$D_3 = 84,5 * \phi * \frac{\sqrt{H_d}}{N} \quad Ec. \quad 5.23$$

Donde;

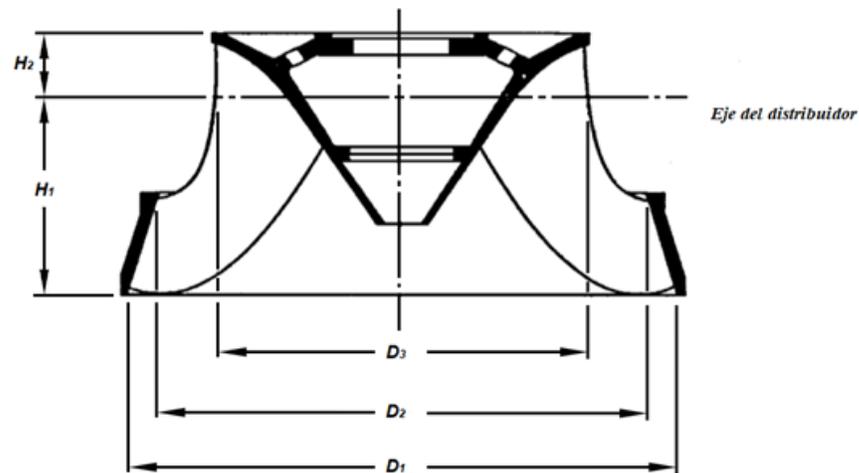
H_d = altura de diseño

N = rpm

$$D_3 = 84,5 * 0,527 * \frac{\sqrt{69m}}{900 \text{ rpm}} = 0,411 \text{ m}$$

En la Figura 4-9, muestra el dimensionamiento del rodete de la turbina Francis.

Figura 4-9: Dimensiones del rodete de una turbina tipo Francis.



Fuente: [20]

Las siguientes expresiones permiten obtener el dimensionamiento del rodete, todo en función de N_s y D_3 [20].

Diámetro de entrada (D_1): $D_1/D_3 = 0,4 + 94,5/N_s$

$$D_1 = 0,611m$$

Diámetro medio (D_2): $D_2/D_3 = 1/(0,96 + 0,00038 * N_s)$

$$D_2 = 0,42 \text{ m}$$

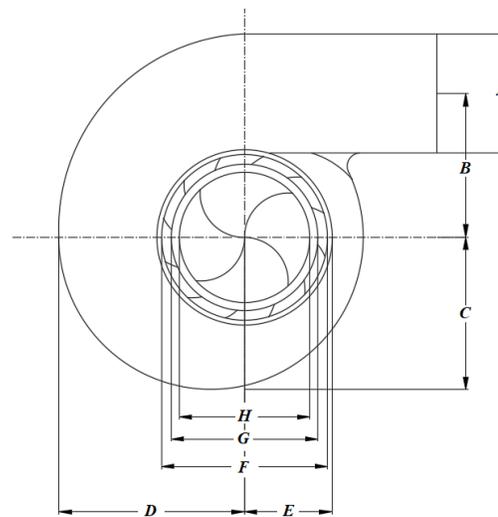
4.14.2 Tamaño de la carcasa o caracol

Las dimensiones de la carcasa se muestran a continuación considerando las siguientes condiciones:

- La velocidad del agua a la entrada de la carcasa es: $V_e = 0,22(2 * g * H_d)^{0,5}$, sin que este exceda 10,7m/s [20].
- El diámetro de entrada será menor o igual que el de la tubería a presión.
- La velocidad tangencial en secciones sucesivas permanece constante.

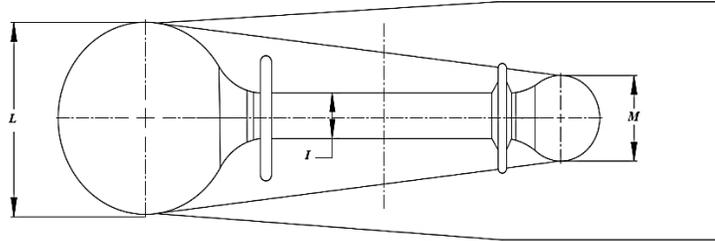
Con las consideraciones anteriores se toman las expresiones para el dimensionamiento de la carcasa según la Figura 4-10 y 4-11.

Figura 4-10: Dimensiones de Carcasa turbina Francis vista frontal.



Fuente: [20].

Figura 4-11: Dimensiones de carcasa turbina Francis vista Superior.



Fuente: [20]

$$\frac{A}{D_3} = 1,2 - \frac{19,56}{N_s} = 0,408 \text{ m}$$

$$\frac{B}{D_3} = 1,1 + \frac{54,8}{N_s} = 0,72 \text{ m}$$

$$\frac{C}{D_3} = 1,32 + \frac{49,25}{N_s} = 0,79 \text{ m}$$

$$\frac{D}{D_3} = 1,5 + \frac{48,8}{N_s} = 0,86 \text{ m}$$

$$\frac{E}{D_3} = 0,98 + \frac{63,6}{N_s} = 0,71 \text{ m}$$

$$\frac{F}{D_3} = 1,0 + \frac{131,4}{N_s} = 1,05 \text{ m}$$

$$\frac{G}{D_3} = 0,89 + \frac{96,5}{N_s} = 0,838 \text{ m}$$

$$\frac{H}{D_3} = 0,79 + \frac{81,75}{N_s} = 0,72 \text{ m}$$

$$\frac{I}{D_3} = 0,1 + 0,00065N_S = 0,156 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D_3} = 0,88 + 0,00049N_S = 0,92 \text{ m}$$

$$\frac{M}{D_3} = 0,60 + 0,00015N_S = 0,6 \text{ m}$$

4.14.3. *Tamaño del tubo de aspiración*

El tubo de aspiración de la turbina Francis viene dado por las siguientes expresiones en función del diámetro (D_3) que muestran la relación del tamaño del rodete con la velocidad absoluta de succión de entrada del fluido hacia la turbina. Ver Figura 5-12.

$$\frac{N}{D_3} = 1,54 + 203,5/N_S = 1,59 \text{ m}$$

$$\frac{T}{D_3} = 1,50 + 0,00019N_S = 0,62 \text{ m}$$

$$\frac{P}{D_3} = 1,37 - 0,00056/N_S = 0,563 \text{ m}$$

$$\frac{U}{D_3} = 0,51 + 0,0007N_S = 0,23 \text{ m}$$

$$\frac{Q}{D_3} = 0,58 + 22,6/N_S = 0,34 \text{ m}$$

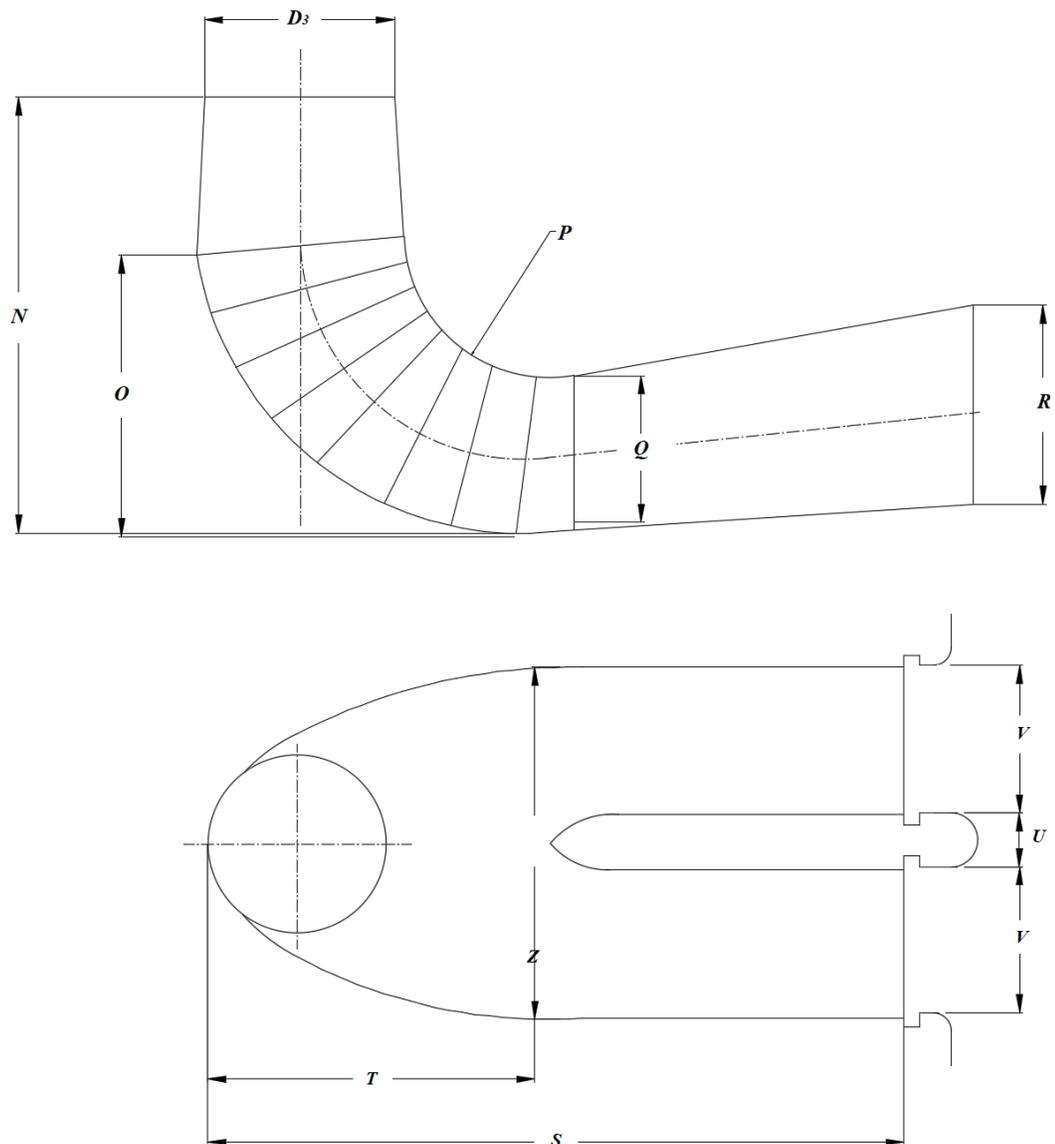
$$\frac{V}{D_3} = 1,10 + 53,7/N_S = 0,7 \text{ m}$$

$$\frac{R}{D_3} = 1,6 - 0,0013/N_S = 0,65 \text{ m}$$

$$\frac{Z}{D_3} = 2,63 + 33,8/N_S = 1,2 \text{ m}$$

$$\frac{S}{D_3} = N_S/(-9,28 + 0,25 N_S) = 2,8 \text{ m}$$

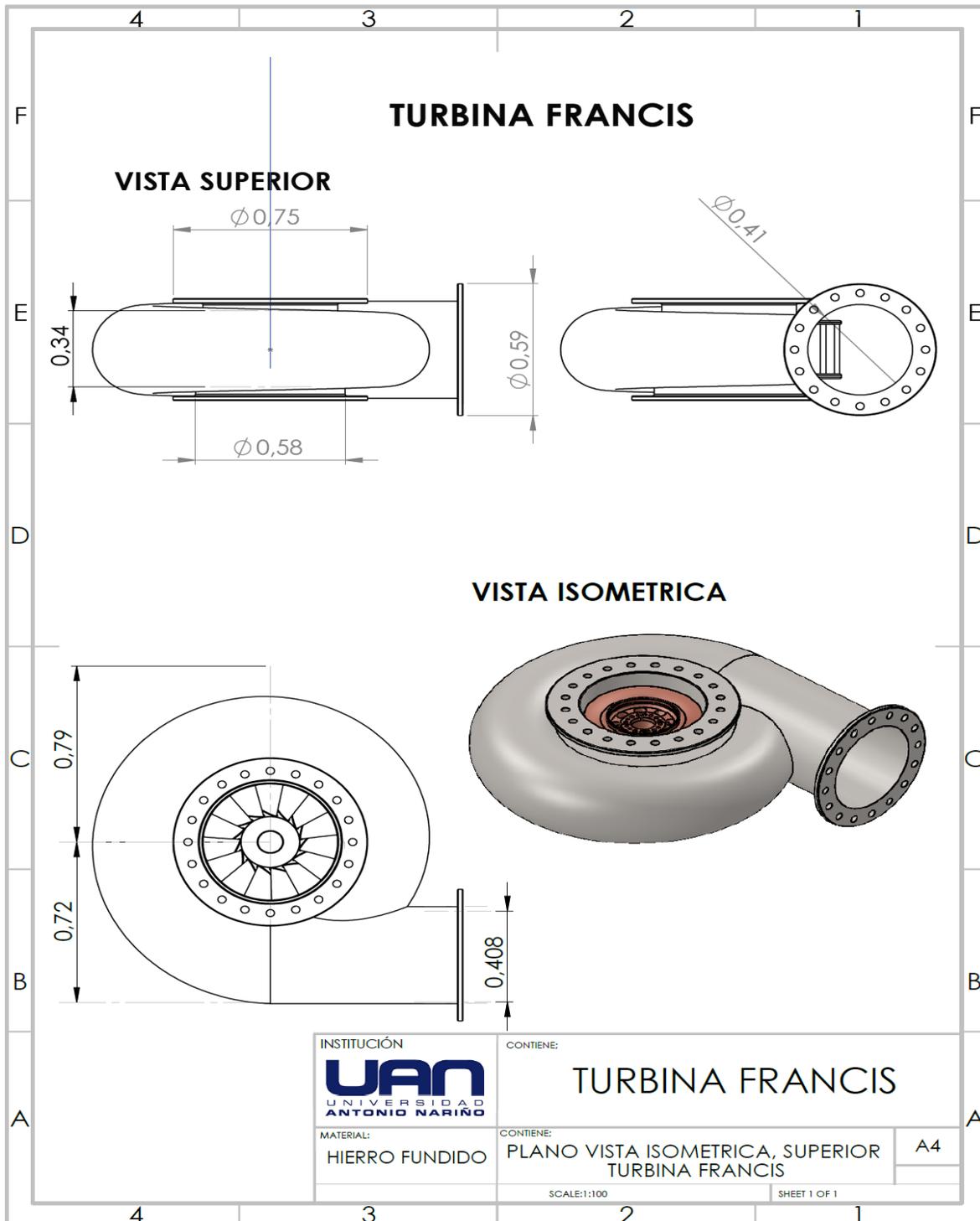
Figura 4-12: Dimensiones del tubo de aspiración turbina Tipo Francis.



Fuente: Elaboración propia [20].

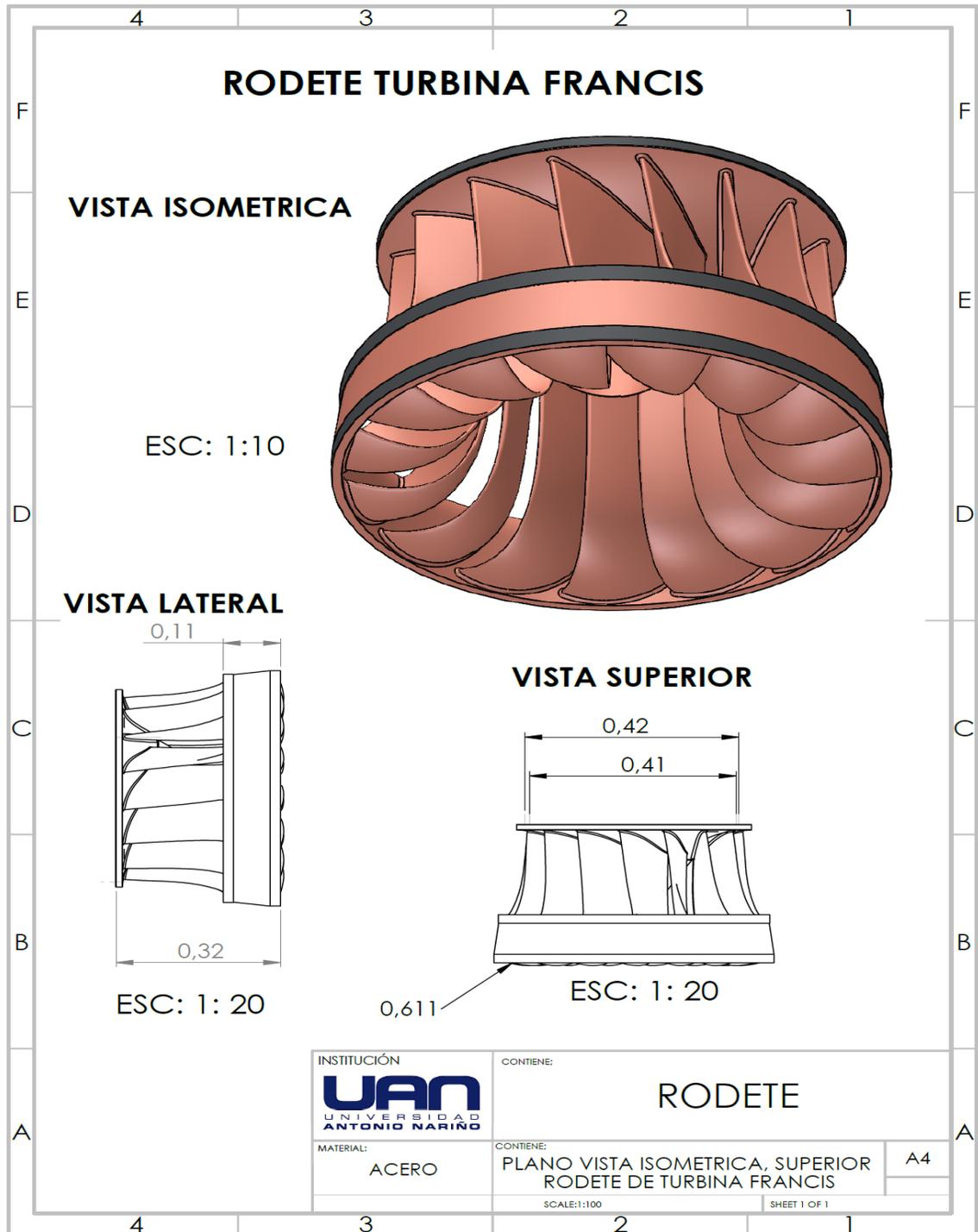
A continuación, en las Figuras 4-13 y 4-14 se muestra el diseño de la turbina Francis con las dimensiones en un plano de taller.

Figura 4-13: Plano de taller turbina Francis.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-14: Planos del rodete- Turbina tipo Francis.



Fuente: Elaboración propia.

4.15 Selección del generador

Para la selección del generador se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se quiere generar una energía eléctrica a frecuencia estandar de 60Hz, por lo que hay que seleccionar un generador con la potencia requerida y que pueda soportar velocidades de giro de 900 rpm.
- El generador debe estar diseñado para suministrar energía básica a la comunidad JEPUKAJAT que cuenta con 12 unidades residenciales. Para esto se tiene un cálculo del consumo de una casa de la siguiente manera:

Tabla 4-5. Cuadro de carga de una vivienda.

Equipo	Cantidad	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
Lámparas	5	2	12	120
Ventilador	3	2	120	180
Televisor LCD	1	0,83	120	99,6
Nevera	1	7	120	640
Computador	1	2,5	120	300
Equipo de sonido	1	1,5	110	80
Celular	3	0,75	3,75	15
Total promedio Potencia				1354,6

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de la tabla son tomados de electrodomésticos reales. Las lámparas comerciales consumen un voltaje de 12 Voltios [22]. Para el caso de los ventiladores comunes entre 90Kw [23]. Los televisores LCD que dependen del tamaño esta entre 90-200 W/h [24]. Las neveras que dependen de la capacidad o volumen de esta y la clasificación de que va desde la clase C hasta la A++, se toma un volumen promedio por hogar y este consumo va desde 640- 175 W [25].

Con la potencia promedio consumida por una vivienda se multiplica el valor obtenido por el numero de viviendas aledañas a la PCH, para este caso es de 12 viviendas para un consumo total de 16255,2 W de potencia que son 16,255 kW, por lo que la potencia que genera la PCH de 240,1 kW es suficiente para satisfacer la necesidad basicas de fluido electrico de la comunidad como grande beneficiaria del proyecto propuesto.

$$P_{Potencia\ total} = Total\ de\ potencia\ promedio * numero\ de\ viviendas$$

$$P_{Potencia\ total} = 1354,6 * 12 = 16255,2\ W$$

Los generadores se seleccionan según los requerimientos y la marca del fabricante y catalogos amplios de equipos. Estan los generadores marca WEG linea G plus que son reconocidos a nivel mundial por su alta confiabilidad y eficiencia, del catalo de la marca mencionada se selecciona el generador que cumpla con la potencia requerida, para el caso de la comunidad JEPUKAJAT se requiere uno que pueda estar por encima de los 20 kW y la capacidad de la turbina Francis, por lo que se seleccionó uno que maneje temperatura ideal de 40°C como el modelo 201AHV DE 31Kw hasta 44.4 Kw con una frecuencia de 60 Hz y hasta 220V como se muestra en la Tabla 4-5.

Tabla 4-6: Tabla de selección de generador sincrónico WEG. (WEG, 2022)

200 / 240 V (60 Hz) | 190 / 200 V (50 Hz) | Cosφ 1,0

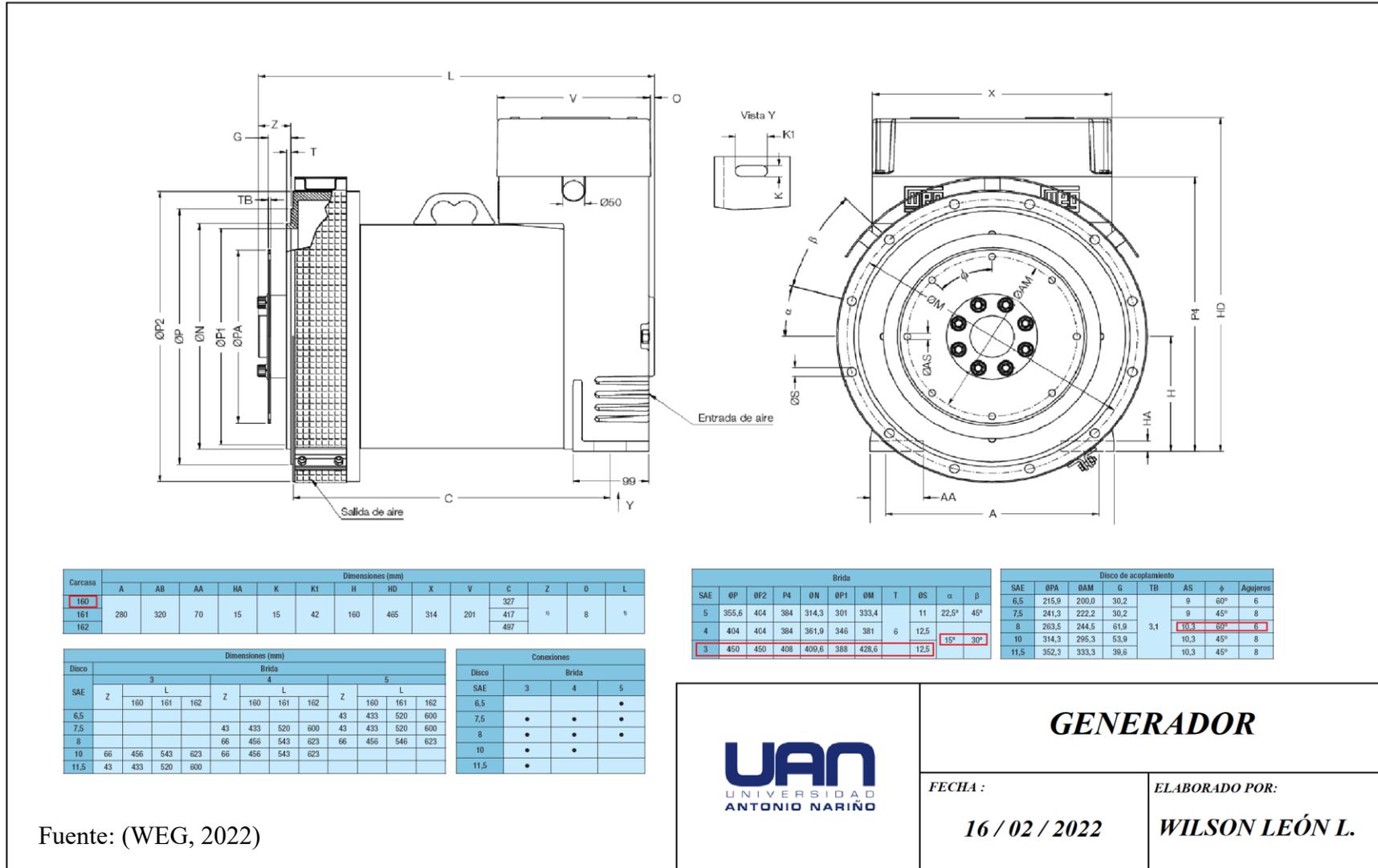
Línea	Modelo	ΔT	60 Hz / 200 - 240 V ¹⁾					50 Hz / 190 - 200 V ¹⁾				
			80 °C	105 °C	125 °C	150 °C	163 °C	80 °C	105 °C	125 °C	150 °C	163 °C
G PLUS	161AISR	kVA	6,5	7,5	8,5	9,0	9,5	4,5	5,5	6,1	6,5	6,5
	161AIHS	kVA	8,0	9,0	10,1	11,0	11,5	6,0	7,0	8,1	8,5	9,0
	161AIHH	kVA	9,0	10,5	11,6	12,5	13,0	7,0	8,0	8,8	9,5	10,0
	161AIHI	kVA	11,0	13,0	14,3	15,5	16,0	8,0	9,5	10,5	11,0	11,5
	161AIHJ	kVA	12,0	13,5	15,0	16,0	17,0	10,0	11,5	12,7	13,5	14,0
	162AVD	kVA	18,0	21,0	23,1	25,0	26,0	12,0	14,0	15,6	17,0	19,0
	201AIHS	kVA	23,9	27,4	29,9	32,8	34,1	18,9	21,7	23,7	25,9	27,0
	201AIHV	kVA	31,0	35,5	38,8	42,5	44,3	23,3	26,7	29,2	31,9	33,3
	201AIHB	kVA	37,7	43,1	47,1	51,6	53,8	26,4	30,2	33,0	36,1	37,7
	201AIHE	kVA	38,7	44,4	48,4	53,0	55,3	32,3	36,9	40,4	44,3	46,1
	202AVS	kVA	48,0	55,0	59,0	65,0	66,0	39,3	45,0	47,9	52,0	54,0
	202AVJ	kVA	62,0	71,1	77,5	85,0	88,6	46,2	52,9	57,7	63,2	65,9
	251AIHD	kVA	77	88	96	105	110	62	71	77	84	88
251AIHE	kVA	99	113	124	135	141	74	85	92	101	105	
AG10	250SI10AJ	kVA	108	125	135	144	150	97	111	121	133	139
	250SI20AJ	kVA	135	155	169	182	188	115	132	144	150	160
	250MI00AJ	kVA	148	169	188	200	219	127	146	159	168	173
	250MI10AJ	kVA	174	199	218	238	260	150	172	188	202	208
	250MI20AJ	kVA	203	233	254	275	292	166	190	208	211	222
	280MI20AJ	kVA	219	254	274	297	308	185	212	231	248	260
	280MI30AJ	kVA	238	280	297	323	340	196	225	245	257	266
	280MI40AJ	kVA	263	300	329	346	375	231	265	289	306	318
	315MI10AJ	kVA	277	325	346	372	387	254	291	318	329	341
	315MI15AJ	kVA	306	349	381	419	444	277	317	346	375	396
	315MI20AJ	kVA	346	404	433	469	487	300	344	375	413	427
	315MI30AJ	kVA	388	445	485	531	553	346	397	433	474	494
315MI40AJ	kVA	443	508	554	589	612	370	423	462	499	514	

Notas: 1) Tensiones para conexión monofásica zigzag paralelo o monofásica triángulo doble.
ΔT = 163 °C, temperatura ambiente = 27 °C. Para los demás ΔT, temperatura ambiente = 40 °C.

Fuente: [26].

En la Figura 4-15 se muestra las dimensiones detalladas del generador marca WEG, este plano de taller muestra las distancias de tres tipos de generadores de la línea G plus de la marca antes mencionada. Con este generador se garantiza la potencia requerida y la proyectada para 12 unidades de vivienda en la comunidad.

Figura 4-15: Generador WEG. Línea G- Plus.



4.16 Subestación eléctrica

Para la subestación es necesario tener consideraciones que permitan principalmente la seguridad de la transmisión de energía a cada uno de los hogares de la comunidad, una subestación que se encuentre protegida del ambiente, factores atmosféricos como la lluvia, sol, ventilación necesaria, entre otros que generan el deterioro de la misma. Esta debe estar cercana al cuarto de máquinas para la instalación de los diferentes accesorios como son: el tablero de alimentación de baja tensión, medidor, transformador entre otros elementos. Todo lo anterior basado en las normas estandarizadas conocidas por la empresa prestadora del servicio del municipio de Riohacha, es decir ASAA. E.S.P. En la Tabla 4-6 se muestra las características de la subestación.

Tabla 4-7: Característica de la subestación

Potencia nominal	25 KVA
Relación de transformación estándar	440-256/13200V
Frecuencia	60 Hz
Tipo	Cubierta o encapsulada
Seccionamiento	Remoto, manual

Fuente: Elaboración propia.

4.17 Cálculos de conductores

Para el cálculo de la corriente nominal del primario y secundario se considera la ecuación 5-24 que expresa [27]:

$$I_{nominal} = \frac{S}{V_{(alta \text{ ó } baja)} * \sqrt{3}}$$

$$I_{nominal} = \frac{31 \text{ KVA}}{13200V * \sqrt{3}} = 1,3 \text{ A}$$

$$I_{nominal} = \frac{31 \text{ KVA}}{440V * \sqrt{3}} = 122 \text{ A}$$

Los elementos conductores de baja tensión generalmente se dimensionan con un factor de seguridad de 1,5 según el amperaje nominal que este genera 112 A, con este valor se selecciona uno por encima de la capacidad con un gradiente alto de protección por bajo amperaje. Para corriente de alta de 1,3A con el mismo factor de seguridad se selecciona un conductor estándar de cobre (Cu) calibre N°2 AWG y aluminio ACSR N°1/0 para la distribución de red aérea, basados en la normas y especificaciones del operador ASSA.E.S.P. A continuación, en la Figura 4-16 se muestra el diagrama unifilar del circuito.

En la Figura 4-16 se muestra el diseño esquemático de la PCH con cada uno de los componentes y se muestra el nivel del agua. Del esquema se puede analizar que en el momento que se lleve a cabo el proyecto se debe tener en cuenta el mantenimiento de la tubería de acero y como el ambiente con niveles de altura cercanos al mar la salinidad es alta y podría generar corrosión en esta. En el anexo B se muestra una vista explosionada de los componentes de la PCH.

4.18 Diseño de transmisión

La transmisión de la red viene establecida por la capacidad de generación de la PCH, el objetivo es que esta pueda llegar a cada uno de los hogares censados. Las condiciones de diseño de los equipos de conexión a la red deben cumplir como mínimo los siguientes aspectos:

Sincronización del generador a la red existente.

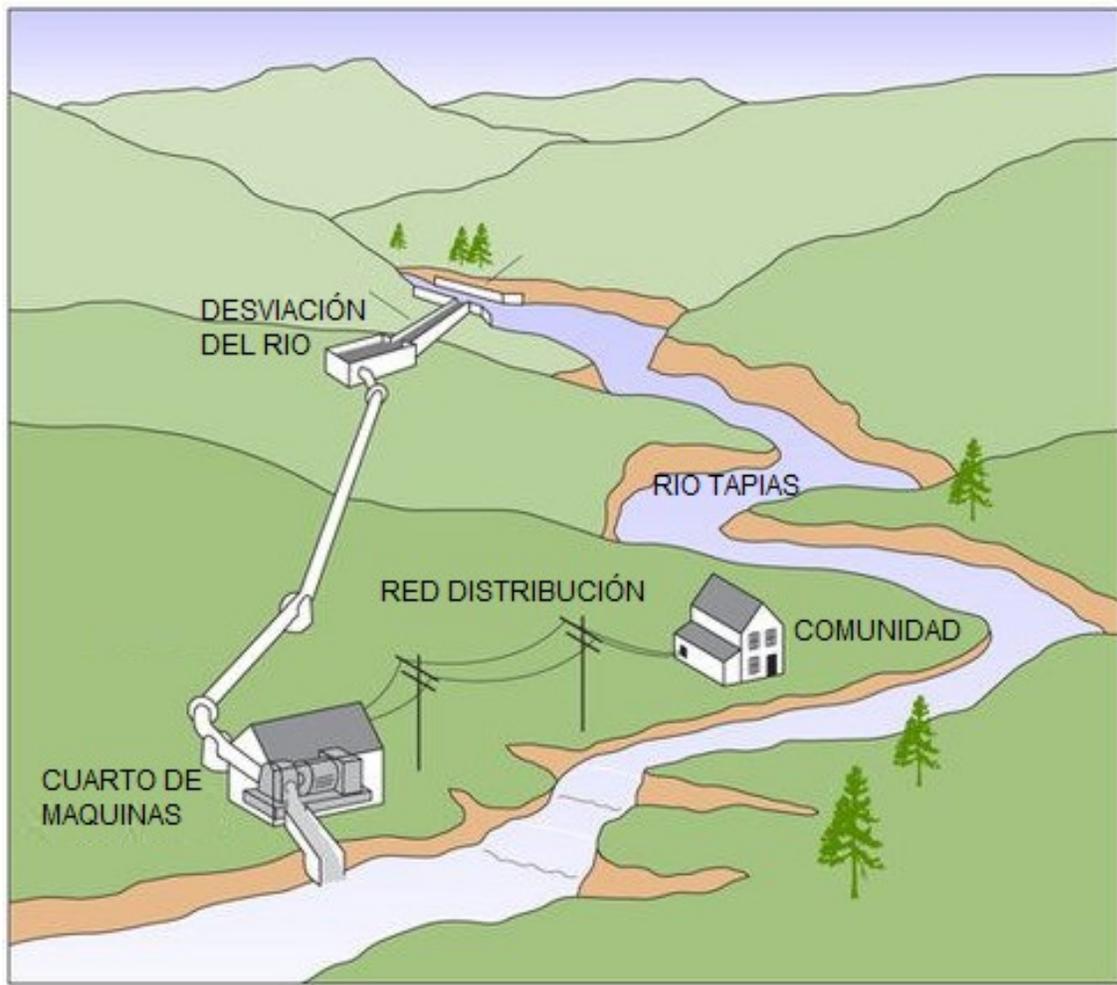
- Medición de energía entregada.
- Conexión a la red y desconexión para mantenimiento de equipos.
- Voltaje entregado por el generador 480V, voltaje salida 13,2 kV.

La red de transmisión va desde la subestación hasta una vivienda aledaña cerca de la PCH en la red del transformador de 13,2 kV, la estructura de la red debe ser aérea las líneas de transmisión en alambre ASCR Raven, sobre poste de concreto tipo 1050, la extensión de la red es de 8 km debe ser diseñada cumpliendo los requisitos de las normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica de la empresa AIRE-E, quienes administran la red del municipio de Riohacha. El diseño de red cumple con niveles mínimos de regulación de voltaje permitidos por operador de red, así como con mínimos de pérdidas de potencia y energía en redes de media tensión en zonas rurales.

La determinación del alcance debe realizarse de acuerdo a los parámetros anteriores, Para efectos de la cuantificación de la subestación en el presupuesto general del proyecto se tomará como un equipo global, donde las características principales del diseño de la PCH serán las mencionadas anteriormente, el proceso de obtención del valor se realiza por medio de la solicitud de ofertas económica a proveedores de estos equipos. Basados en las

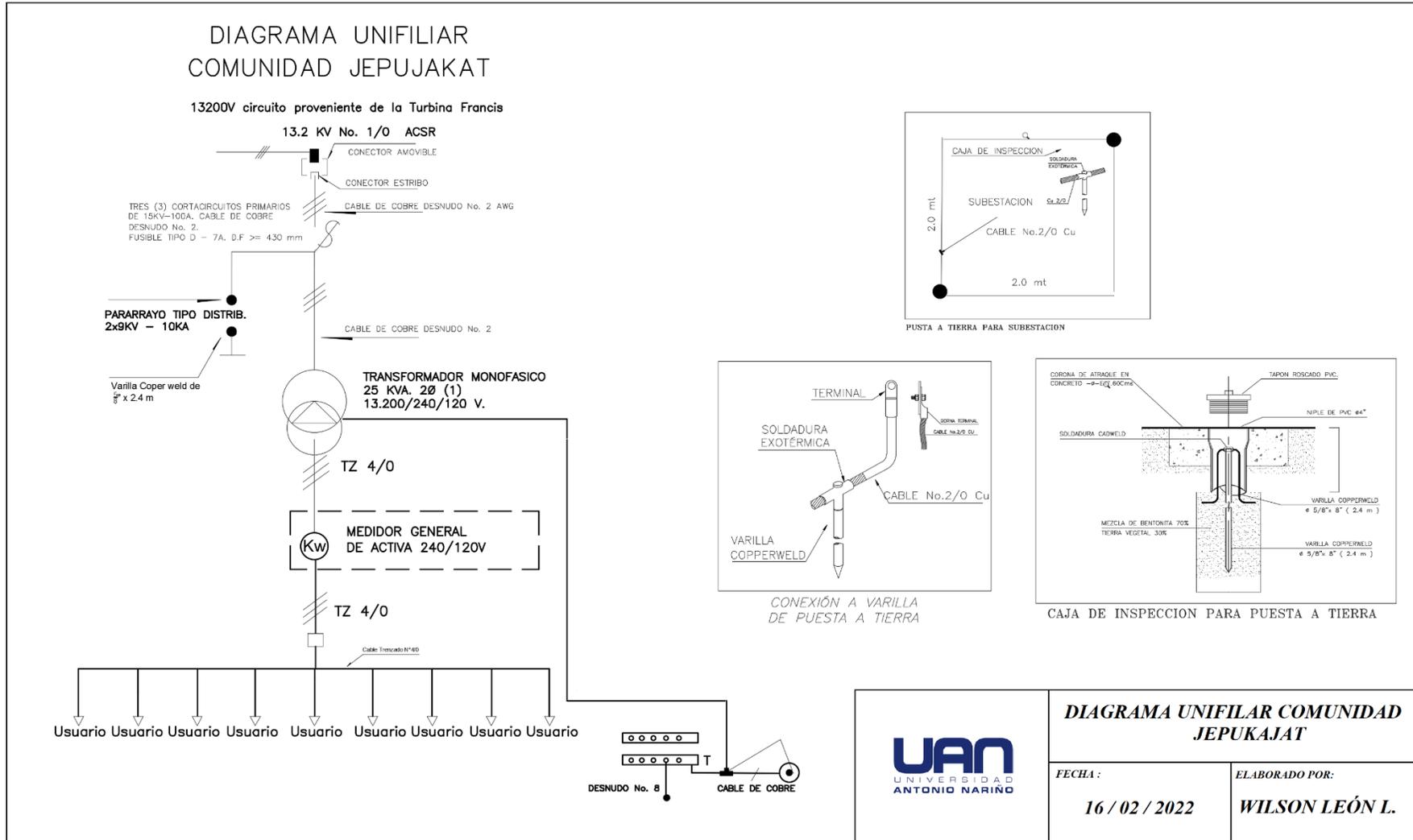
recomendaciones del ministerio de minas y energías la guía de diseño de PCH se le asigna un peso del 30% del valor de la obra eléctrica del proyecto. En la Figura 4-16 se muestra el sistema general de cada una de las etapas del proceso.

Figura 4-16: Sistema general de cada una de las etapas del proceso.



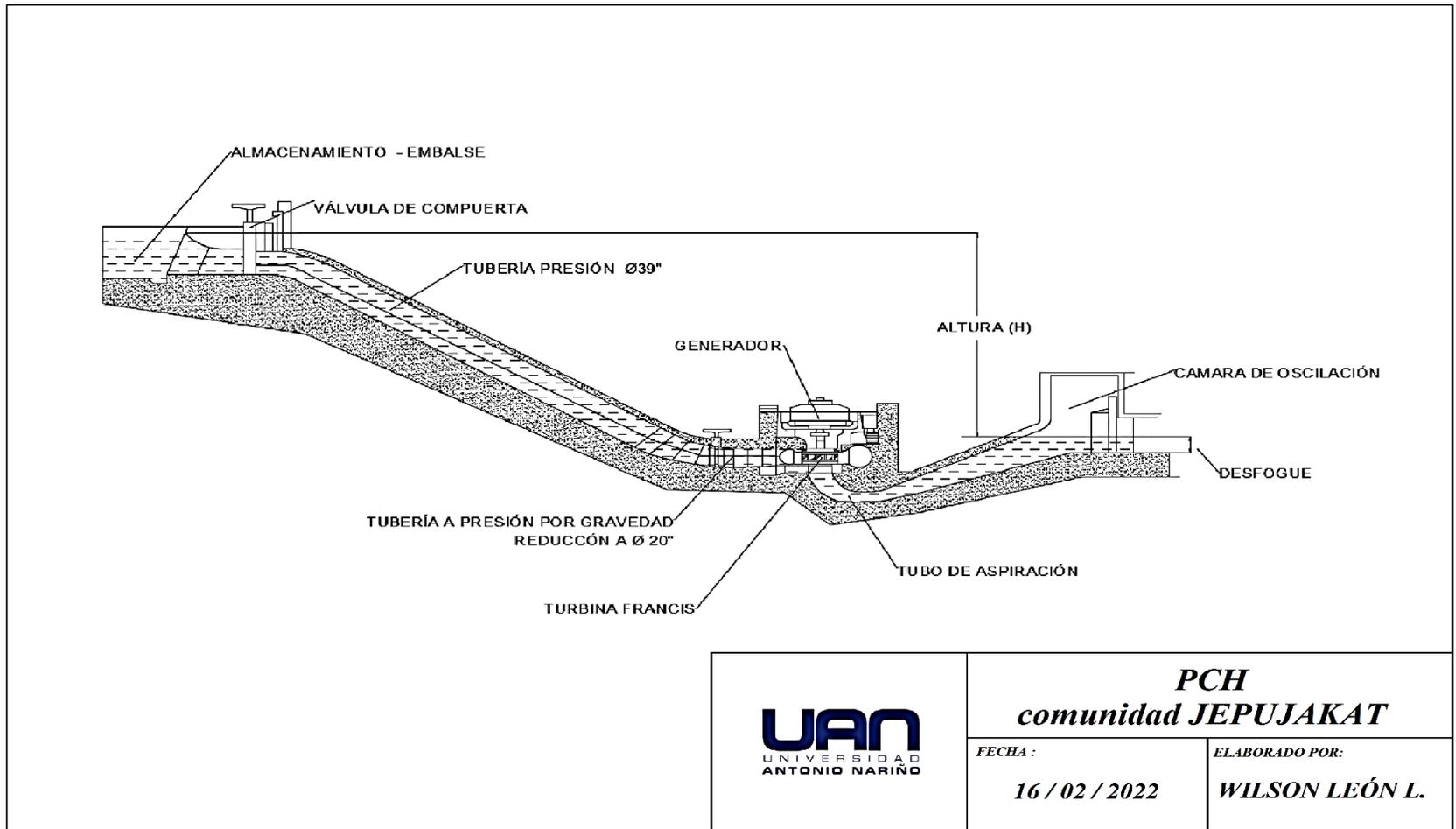
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-17: Diagrama Unifilar comunidad JEPUKAJAT.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-18: Esquema de la PCH.



Fuente: Elaboración propia.

4 Resultados y análisis

Los resultados obtenidos permiten tomar decisiones importantes sobre la viabilidad de hacer realidad este proyecto, a continuación, en la Tabla 5-1, se muestra el diagnóstico del caudal, la Tabla 5-2 se observa los parámetros del sistema y la 5-3 los datos de diseño y equipo del sistema de la PCH en la comunidad JEPUJAKAT.

Tabla 4-1. Diagnóstico del caudal

Ubicación	JEPUJAKAT comunidad del municipio de Riohacha, departamento de La Guajira.
Coordenada Geográfica	11,412415,- 72,965797
Rio	Tapias
Caudal de entrada a la bocatoma	0,5 m ³ /s
Altura	70 m

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-2: Determinación parámetros del sistema

Potencia	240 kW
Dimensión de la bocatoma	1,2 x 1,167 x 0,995
Diámetro de la tubería	Ø 30"
Nº de Reynolds	1429120
Velocidad en la tubería	0,96 m/s
Pérdidas totales Hp	2,23 m
Altura de Diseño (Neta)	69,1 m
Potencia kW	270,64 kW ó 367,97 CV

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-3: Diseño de equipo y sistema.

Número específicos de revoluciones Ns	86,8 rpm
Tipo de turbina	Francis Lenta
Dimensiones del rodete de la carcaza	D ₁ = 0,611 ; D ₂ = 0,42 ; D ₃ =0,411
Generador	Sincrónica, marca WEG referencia 201AHV DE 31kW – 44,4kW con 60 Hz hasta 220 V
Transformador	13200 V convencional 25 Kva 60 Hz

Fuente: Elaboración Propia.

4.18 Presupuesto

Con los datos de los cálculos realizados se proyecta un presupuesto como se muestra en la Tabla 5-4. Lo anterior basados en la capacidad que se va a instalar en cuanto a la potencia del la PCH. La UPME tiene modelos de costos que sirven para obtener un presupuesto muy cercano al real teniendo en cuenta el kWh y costos de obras civiles.

Tabla 4-4: Presupuesto general de la PCH.

PRESUPUESTO DISEÑO DE UNA PCH EN LA COMUNIDAD JEPUJAKAT					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDADES	CANTIDAD	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL
Equipo PCH					
1	Turbina Francis	UN	1	\$ 40.000.000	\$ 40.000.000
2	Generador	UN	1	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000
3	Transformador	UN	1	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
4	Tubería	UN	1	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000
5	Válvulas	UN	3	\$ 2.000.000	\$ 6.000.000
6	Uniones	UN	3	\$ 1.200.000	\$ 3.600.000
Obras Civiles					
1	Montaje tubería	ML	70	\$ 200.000	\$ 14.000.000
2	Mampostería	M2	50	\$ 500.000	\$ 25.000.000
3	Bocatoma	M2	28	\$ 200.000	\$ 5.600.000
Costos de administración					
1	Diseño de turbina		1	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
2	Estudios		1	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000
3	Permisos		1	\$ 30.000.000	\$ 30.000.000
Valor total sin IVA					\$ 161.352.000
VALOR TOTAL					\$ 199.200.000

Fuente Elaboración Propia.

Los valores antes mencionados están sujetos a cambios, otros valores adicionales como transporte, no se contemplan por lo que este trabajo su alcance solo permite llegar hasta los equipos de la PCH y cada uno de sus componentes.

5.2 Análisis de Viabilidad

El desarrollo del proyecto generará impacto positivo a la comunidad JEPUJAKAT, dándole la posibilidad de que tengan energía y por ende calidad de vida para los residentes de este asentamiento indígena. Otros beneficios de la PCH, es que genera energías limpias que no contaminan, y por ende tienen la posibilidad de recibir beneficios económicos, todo esto referenciado a los acuerdos internacionales sobre la reducción de gases invernaderos. Se podrá comercializar la energía generada, que permitirán ser invertidas en la comunidad y en el retorno de la inversión de la PCH.

Con la capacidad producida y diseñada tendrá un aprovechamiento de la constante del caudal durante todo el año de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en la tubería de la bocatoma, suficiente para generar 240kW promedio año, el porcentaje constante es de aproximadamente 90% y se garantiza una disponibilidad durante todo el año, datos entregados por operador de servicios públicos que está generando en promedio 20.000.000 metros cúbicos al año teniendo en cuenta las horas de mantenimiento del equipo generador. Considerando que el kWh generado tiene un costo de COP \$ 267,41 y unos valores de transmisión respectivamente de \$ 43,6 y \$ 122,87 se obtiene un retorno de la inversión en el tiempo de un año. Para el valor estaría estipulado en \$ 433,88 total. El sistema estará disponible aproximadamente 6000 horas al año es decir, que se producirá 1'480.000kWh año. Si este valor se multiplica por el valor del kWh se obtiene un recaudo de \$ 642'142.400.

$$\text{\$ } kWh_{generados} = 433,88 \text{ pesos Colombianos}$$

$$\text{\$ } transmision_{energia} = 128,87 \text{ pesos Colombianos}$$

$$Retorno_{inversion} = \text{\$ } kWh_{generados} * kW_{generados}$$

$$Retorno_{inversion} = 1'480.000 * 433,88 \text{ pesos} = \text{\$ } 642'142.400 \text{ pesos Colombianos}$$

Con los valores calculados se observa que el valor de la inversion se retorna al primer año, considerando que el valor del Kw hora no varíe, las obras de líneas de mantenimiento estarán a consideración del distrito de riohacha, quienes aportaran para la construcción de líneas de transporte y mantenimiento por un año de funcionamiento que a su vez realizaran un estudio de factibilidad para considerar su inversión. Esto deja ganancias considerables de inversión de unos 400 millones pesos colombianos. Otro valor agregado es que para centrales hidroeléctricas el valor estimado de CO2 es de 0,471 Kg por 16 USD\$.

5 Conclusiones

Con el caudal constante del río Tapias se puede generar energía eléctrica para suplir las necesidades de la comunidad JEPUJAKAT de manera continua, es decir, que se puede generar una potencia de 240kWh, de manera ininterrumpida, dando solución a la carencia que por más de 70 años lleva esta comunidad asentada en este territorio. El cálculo del diseño de la PCH arrojó como resultado un número específico de revoluciones N_s de 86,87, que permite tomar como referencia según la tabla 5-3 los rangos de valores de las diferentes turbinas, para este caso el valor de N_s se encuentra entre 50 y 100, lo que permite seleccionar una turbina tipo Francis lenta.

El número de Reynolds calculado permitió analizar que el flujo que ingresa a la tubería es turbulento, que es un fluido con poca viscosidad y está en un rango donde $Re > 2500$. Los cálculos y las condiciones del caudal del río Tapias, permite afirmar que es posible instalar una PCH que genere la energía necesaria para las comunidades aledañas sin que se interrumpa el fluido eléctrico. La PCH puede satisfacer el consumo diario de cada hogar, el cual está en 1634 W/h y que la capacidad de diseño de la generación de energía está en los 240 kW/h por la demanda se suple sin inconvenientes. Se concluye que el desarrollar este tipo de proyecto no se afecta el medio ambiente, que las emisiones de CO₂ son muy bajas. Por lo tanto no representa riesgos a la naturaleza. Se evidencia que al hacer el estudio de costos con respecto a la inversión, el proyecto es viable y que el retorno de la inversión se da en un año, si provee energía a red el valor obtenido puede ser reinvertido en obras sociales para la comunidad que requiere de urgencia de un puesto de salud y una escuela para los niños, que por el lugar remoto donde están la mayoría no están estudiando y los pocos que lo hacen tiene que caminar horas para llegar a sus colegios.

6 Recomendaciones

- Se recomienda la realización de estudios científicos sobre las estructuras de materiales de ingeniería para mejorar y obtener nuevas aleaciones que se comporten de forma favorable al ambiente salino y sobre todo cada uno de los diferentes componentes desde la bocatoma hasta la entrega de la energía generada en la comunidad. Las obras civiles son otros factores a estudiar en cuanto al presupuesto de la subestación que incluye detalles relevantes.
- Evaluar detalles del terreno desde donde inicia la caída de agua (bocatoma) para medir en detalle la longitud exacta para los tramos de tuberías a utilizar debido al desnivel del terreno y las difíciles condiciones topográficas.
- En cuanto accesorios fundamentales como son las válvulas que dan apertura o las que bloquean el paso de fluido, analizar el sistema de tal manera que en temporada invernal donde se incrementa el caudal no colapse el sistema y que estos accesorios puedan soportar la sobrepresión y se tenga un sistema de alivio para dichas eventualidades, evitando lo que se conoce como el golpe de ariete, perjudicial para el sistema de generación en la PCH.
- Regular el consumo de energía generada en la comunidad y analizar la viabilidad de inyectar a la red para recibir ingresos que sean invertidos en la comunidad.
- Con el diseño de la PCH, se recomienda a la comunidad JEPUJAKAT que el desarrollo del proyecto contribuye como una solución definitiva a la carencia del fluido eléctrico. También se sugiere implementar o realizar estudios principalmente de concertación con la comunidad.

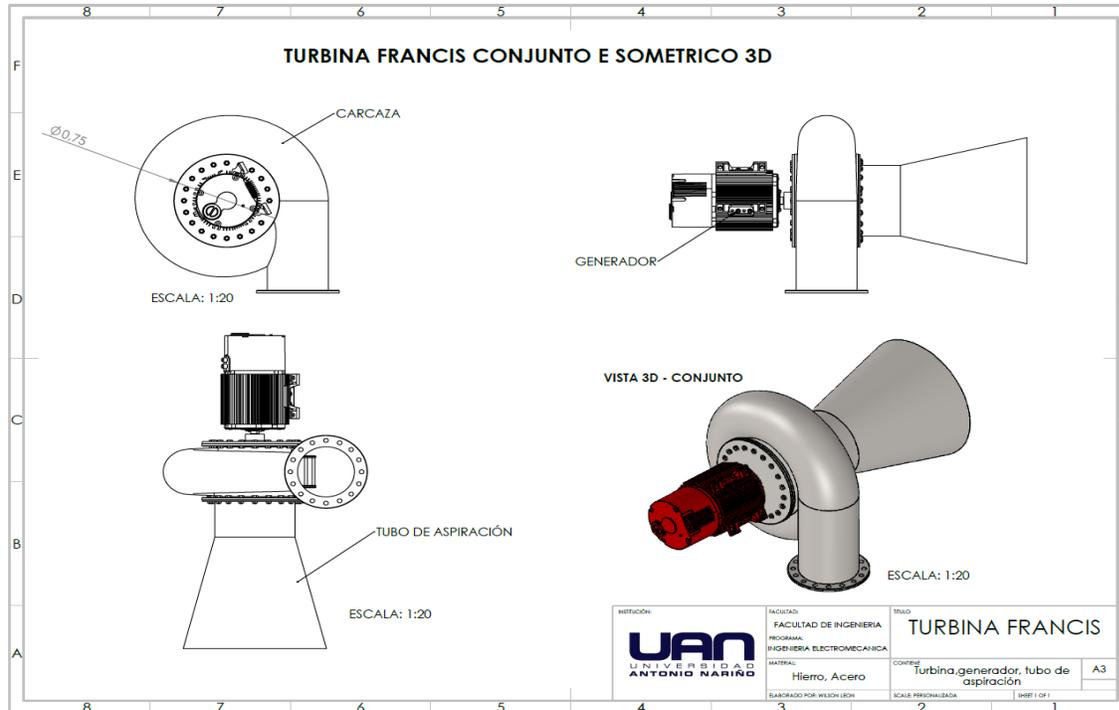
Anexos

Anexo A. Carta de empresa prestadora del servicio ASAA, donde muestra datos requeridos para el dimensionamiento de la PCH en la comunidad indígena.

 <p>avanzadas soluciones de acueducto y alcantarillado s.a. e.s.p.</p>	<p>(605) 7286950 avanzadassoluciones@asaa.com.co www.asaa.com.co Carrera 7 No. 21 -15 - Riohacha, La Guajira</p>
AS-0061-2022	
Riohacha, 28 de enero de 2021.	
Señor: WILSON BLADIMIR LEÓN LÓPEZ Correo electrónico: blacholeon@hotmail.com Tel: 3174868052	
Asunto: Respuesta solicitud Wilson León López. Radicado Asaa: AS-0138-2022	
Cordial Saludo:	
Con el objeto de colaborar en su proyecto de grado y ampliar o esclarecer sus inquietudes, nos permitimos remitir información suministrada por el Ing. Cesar Brochero, según sus inquietudes manifestadas en la reunión sostenida en la empresa el día martes 25 de enero del 2022 a las 9 de la mañana.	
<ul style="list-style-type: none">• Ubicación geográfica con coordenadas del río: 11.165014 N , 72983781 S• Altura máxima del punto del río a Riohacha: 100 metros• Caudal de la tubería durante el año: 20.000.000 de metros cúbicos• Presión de la tubería: 25 -30 psi• Diámetro de la tubería: 30 pulgadas• Ancho de la captación del agua: 3.5 metros• Profundidad: 1.2 metros• Ancho del canal colector: 1.2 metros	
Atentamente,	
	
HERNANDO DE JESÚS MARTINEZ DURAN Coordinador Jurídico	



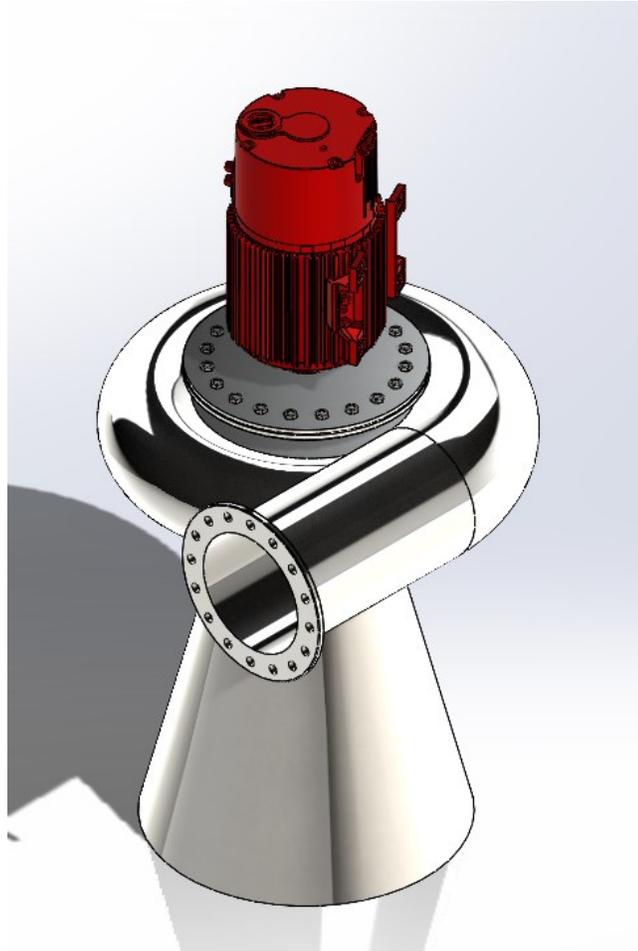
Anexo B. Diseño en 3D y vista explosionada de los componentes que conforman la PCH.



Fuente: Elaboración propia. Diseñado en el programa SolidWorks ®

Anexo C. Diseño del la turbina renderizada con los diferentes componentes.

Figura. Anexo C. Conjunto turbina Francis



Fuente: Elaboración propia. Diseñado en el programa SolidWorks ®

Referencias Bibliográficas

- [1] S. G. K., “Self-excited induction generator research—a survey,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 69, no. 2–3, pp. 107-114.-0378-7796., 2004.
- [2] F. E. Sierra Vargas, A. F. Sierra Alarcón, and C. A. Guerrero Fajardo, “Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica.,” *Inf. Técnico*, vol. 75, pp. 8–11, 2011, doi: 10.23850/22565035.22.
- [3] M. A. Prats, D. G. Omnium, P. C. Fuertes, and E. Ruiz, “Aprovechamiento de la energía de la red mediante turbinación . Experiencia en Global Omnium,” pp. 54–61, 2018.
- [4] A. Patarroyo *et al.*, “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH ’ S),” pp. 1–98, 2020, [Online]. Available: <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-12/ar9.pdf>.
- [5] M. A. Carlos Julian and S. M. Fabian David, “DISEÑO DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA EL MUNICIPIO DE PISBA, BOYACÁ,” UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, 2017.
- [6] S. Morales, L. Corredor, J. Paba, and L. Pacheco, “Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación,” *DYNA*, vol. 81, no. 184, pp. 178–185, 2014, doi: 10.15446/dyna.v81n184.39757.
- [7] N. M.R., “Providing electricity access to remote areas in India: Niche areas for decentralized electricity supply,” *Renew. Energy. - India*, vol. 34, no. 2, pp. 430-434.-0960-1481., 2009.
- [8] González, *Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia*. 2015.
- [9] EAAB, “Proyectos De Reduccion De Emisiones De Gei De La Empresa De Acueducto, Alcantarillado Y Aseo De Bogota,” pp. 14–15, 2015.
- [10] A. Pino Collazos, V. H. Sánchez Barón, and R. Ortiz Flórez, *Microcentrales hidroeléctricas con aplicación de máquinas reversibles*, Universida. Colombia, 2015.
- [11] U. de P. M. E. UPME, “Capitulo 1. Hidroenergía,” *Atlas Potencial Hidroenergético Colomb.*, pp. 25–36, 2015, [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/Documents/Atlas/Atlas_p25-36.pdf.
- [12] MediaHouse GmbH, “Central eléctrica de agua fluyente,” *Centro de Recursos Educativos Abiertos*, 2018. <https://crea-portaldemedios.siemens-stiftung.org/central-electrica-de-agua-fluyente-102359>.
- [13] Iberdrola, “CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO,” *Iberdrola*, 2022. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/central-hidroelectrica-bombeo>.
- [14] eds. (2019). LIU, D., LIU, H., WANG, X., and Kremere, E., “Informe Mundial sobre el Desarrollo de la Pequeña Central Hidroelectrica 2019,” pp. 17–19, 2019, doi: 10.1787/agr_outlook-2018-3-es.
- [15] M. A. Planas Marli and J. C. Cárdenas, “La matriz energética de Colombia se renueva,” *Energía para el Futuro*, 2019. <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz->

- energetica-de-colombia-se-renueva/#:~:text=De esta capacidad instalada%2C el,%2C solar%2C y biomasa).
- [16] ASAA, “Quienes Somos,” *ASAA*, 2020. http://www.asaa.com.co/?page_id=281.
- [17] F. Coz *et al.*, “Manual De Mini Y Microcentrales Hidráulicas.” p. 191, 1995.
- [18] G. Imaz, “Actividad Individual : Cálculos De La Tubería Forzada De Un Central Hidroeléctrico,” 2016.
- [19] J. Arapa Quispe, “Modelamiento de redes de agua a presión,” *es.slideshare.net*, 2013. <https://es.slideshare.net/alucarddns/modelamiento-de-redes-de-agua-a-presin>.
- [20] A. Nava Mastache and H. García Gutiérrez, “Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas,” *Univ. Auton. Mex. Fac. Ing.*, p. 121, 2014, [Online]. Available: http://www.ingenieria.unam.mx/~deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECYDIMENSIONAMIENTOdeTURBINAS.pdf.
- [21] I. Final and C. Oppe-uc, “LIMITES DE FRECUENCIA EN TURBINAS,” no. 55, pp. 1–15, 2009.
- [22] L. S. Moreno, J. Sosa, and J. Gudiño, “Análisis técnico-económico de las ventajas y desventajas de las lámparas incandescentes y las lámparas fluorescentes compactas,” vol. 37, 2016.
- [23] Chcenergia.es/blog, “¿Cuánta luz consume un ventilador?,” *chcenergia.es/blog*, 2021. <https://chcenergia.es/blog/cuanta-luz-consume-un-ventilador/#:~:text=Los ventiladores de piso consumen,de 60 kW cada hora>.
- [24] vidasostenible.org, “¿Cómo ha cambiado nuestra huella ecológica?,” *vidasostenible.org*, 2020. <https://www.vidasostenible.org/como-ha-cambiado-nuestra-huella-ecologica/>.
- [25] Es.calcuworld.com, “¿Cuántos watios consume una nevera?,” 2022. <https://es.calcuworld.com/cuantos/cuantos-watios-consume-una-nevera/>.
- [26] WEG, “Alternadores Sincrónicos Línea G Plus y AG10 Alternadores Sincrónicos Línea G Plus y AG10,” [Online]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h86/hd8/WEG-alternadores-sincronicos-linea-g-plus-y-ag10-50057921-catalogo-espanol.pdf>.
- [27] C. Ramos Montero, “TRANSFORMADOR CALCULO,” pp. 2–31, 2011, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11353/Transformador.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [11] COES- SINAV. (s.f.). *Limite de frecuencia en turbinas*. Recuperado el 08 de Febrero de 2022, de <http://contenido.coes.org.pe/alfrescostruts/download.do?nodeId=a389f8ea-e250-4ad4-9abe-d8960c095199#:~:text=Se%20puede%20decir%20que%20normalmente,operaci%C3%B3n%20continua%20a%20frecuencia%20anormal>.
- [12] Coz, F., Sanchez, T., & Viani, B. (1995). *Manual de mini y microcentral hidroeléctrica: Una guía para el desarrollo de proyectos*. Lima: ITDG-PERÚ.
- [13] Davis, & Sorensen. (1966). *Handbook Applied of Hydraulic*.

- [14] EL HERALDO. (13 de 02 de 2019). *Baja nivel del caudal en el río Tapia* . Obtenido de <https://www.elheraldo.co/la-guajira/baja-nivel-del-caudal-en-el-rio-tapia-por-el-fenomeno-del-nino-597260>
- [15] Garcia Gutierrez, H., & Nava Mastache, A. (2014). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. Mexico D.F.: UNAM.
- [16] GOIKOETXEA IMAZ, H. (15 de Noviembre de 2016). *CÁLCULOS DE LA TUBERÍA FORZADA DE UN CENTRAL HIDROELECTRICO*. Madrid: Universidad Europea .
- [17] MATAIX, C. (2010). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Mexico: Alfaomega.
- [18] Scribd. (12 de OCTUBRE de 2021). *Hidráulicas de tuberías a presión* . Obtenido de <https://es.slideshare.net/alucarddns/modelamiento-de-redes-de-agua-a-presin>
- [19] UPME. (s.f.). ENERGIA ELECTRICA- ATLAS. En UPME. Bogota : upme.
- [20] WEG. (2022). ALTERNADORES SINCRONICOS . *CATALOGO WEG LINEA G PLUS Y AG10*, 52.