



**Diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica, aprovechando el
cauce de una quebrada para la energización de un galpón ubicado en Pore,
Casanare**

Didier Antonio Bernal Millán

10451712557

Johan Sebastián Urriago Calderón

10451721921

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

Diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica, aprovechando el cauce de una quebrada para la energización de un galpón ubicado en Pore, Casanare

Bernal Millán Didier Antonio

Urriago Calderón Johan Sebastián

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

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ing. Jorge Enrique Romero Rodríguez

Línea de Investigación:

Eficiencia Energética. Grupo REM

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____ ,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____ .

Firma del Director

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	13
Abstract.....	14
Introducción	15
Capítulo I: Marco Introductorio	17
1.1 Antecedentes.....	17
1.2 Planteamiento del Problema	19
1.2.1 Pregunta de investigación.....	21
1.3 Justificación.....	21
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo general	23
1.4.2 Objetivos específicos.....	23
1.5 Alcances y limites.....	23
Capítulo II: Marco Referencial	25
2.1 Marco Teórico	25
2.1.1 Generación de Energía Hidroeléctrica	25
2.1.2 Componentes de una pequeña central hidroeléctrica	27
2.1.3 Diseño de una pequeña central hidroeléctrica	29
2.1.4 Simulación de sistemas hidroeléctricos.....	31
2.1.5 Tecnologías emergentes en la generación de energía hidroeléctrica	32
2.2 Marco Conceptual	33

2.3 Marco Contextual	35
2.4 Marco Legal.....	35
Capítulo III: Marco Metodológico	37
3.1 Tipo de investigación	37
3.2 Diseño de la investigación.....	38
3.3 Población y muestra	39
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
3.5 Análisis de datos.....	41
Capítulo IV: Resultados	42
4.1 Elementos que componen una pequeña planta hidroeléctrica.....	43
4.1.1 Características de la finca	43
4.1.2 Caracterización de la quebrada.....	48
4.1.3 Componentes	53
4.1.2 normas y estándares para el diseño de PCH'S	54
4.1.4 Esquema general de la PCH	58
4.2 Dimensiones de los componentes principales.....	61
4.3 PCH en Toolbox del software Simulink de Matlab	74
Conclusiones	76
Recomendaciones	77
Referencias.....	78

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Elementos básicos de una pequeña central hidroeléctrica.....	27
Figura 2. Ubicación de la finca Google Maps.	44
Figura 3. Temperatura máxima y mínima promedio en Municipio Pore.....	45
Figura 4. Promedio mensual de lluvia en Municipio Pore.....	46
Figura 5. Bombilla de calefacción	47
Figura 6. Galpones de la finca.....	47
Figura 7. Distancia de la quebrada a la finca.	49
Figura 8. Sección transversal de la quebrada.	50
Figura 9. Secciones de la quebrada.....	50
Figura 10. Diferencia de altura.....	52
Figura 11. Obra de captación protegida	55
Figura 12. Manguera agrícola de polietileno.	56
Figura 13. Tanque de presión con aliviadero	57
Figura 14. Diagrama general de la PCH.	59
Figura 15. Esquema general de la PCH	60

Figura 16. Diagrama de Moody	68
Figura 17. Curva característica.	71
Figura 18. Montaje general de la PCH.....	73
Figura 19. Sistema de lazo cerrado	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Marco Legal	36
Tabla 2. Diseño Metodológico.....	38
Tabla 3. Medida de la sección transversal.	50
Tabla 4. Caracterización de la quebrada.	51
Tabla 5. Modelos de turbinas	62
Tabla 6. Rugosidad absoluta	67
Tabla 7. Factor K_i	69
Tabla 8. Dimensiones de los componentes principales.....	72

Lista de tablas

	Pág.
Ecuación 1	30
Ecuación 2	63
Ecuación 3	63
Ecuación 4	64
Ecuación 5	65
Ecuación 6	65
Ecuación 7	66
Ecuación 8	68
Ecuación 9	69

Dedicatoria

Nuestro agradecimiento principalmente es para Dios quien nos ha brindado salud y sabiduría para lograr llegar hasta esta última etapa, a nuestros padres y hermanos que día a día nos han apoyado y motivado con el fin de que sigamos creciendo personal y profesionalmente.

Agradecemos a la Ingeniera Laura Sofia Hoyos por su colaboración, paciencia y esfuerzo al inicio de nuestro proyecto lo cual nos permitió lograr estructurar y desarrollar nuestra propuesta de trabajo de grado.

Por último, agradecemos a nuestros compañeros, amigos y familiares cercanos por brindarnos su apoyo para alcanzar nuestra meta como Ingenieros Mecánicos.

Agradecimientos

Nuestra dedicación de este proyecto va dirigido a todas las personas que me han apoyado inspirado a lo largo de todo este proceso profesional, a mi familia por su amor incondicional, aliento y confianza en mis habilidades. Su apoyo constante ha sido mi fuerza motriz y siempre estaré agradecido por los sacrificios que ha hecho para verme triunfar.

A la propietaria de la finca Peña Negra Nuria Millán Riscanebo por permitirnos desarrollar las actividades necesarias para cumplir con el objetivo de nuestro proyecto de grado, a nuestros amigos que han estado ahí alentándonos y aconsejándonos para seguir adelante.

A los ingenieros Laura Sofía Hoyos por encadenar el inicio de esta propuesta de proyecto y al Ingeniero Jorge Enrique Romero Rodríguez por acoger nuestra propuesta y así mismo llevarla hasta la culminación,

Finalmente, nos dedicamos este proyecto a nosotros mismos, por la determinación, la resiliencia y las innumerables horas de la noche vertidas en su creación. Este título como Ingenieros Mecánicos representa no solo la culminación de años de arduo trabajo, sino también un testimonio de mi crecimiento personal, curiosidad y compromiso con el aprendizaje permanente.

Resumen

El siguiente documento presenta un proyecto para el diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica con el fin de abastecer un galpón avícola en una finca en el municipio de Pore, Casanare. El estudio se enfoca en identificar y analizar los elementos que conforman una central hidroeléctrica, así como en dimensionar los componentes principales y simular su funcionamiento mediante el software Simulink de Matlab. La tesis concluye que la implementación de una central hidroeléctrica es viable y presenta beneficios en términos de ahorro de energía y reducción de costos en la operación del galpón. Se recomienda una cuidadosa selección de los equipos y materiales, la implementación de un sistema de monitoreo y control, y un análisis económico detallado para determinar la viabilidad del proyecto. En resumen, la tesis representa una valiosa contribución al desarrollo sostenible y a la búsqueda de alternativas energéticas renovables en la región.

Palabras claves: Central hidroeléctrica, PCH, energía renovable, simulación, diseño, dimensionamiento, ahorro de energía, desarrollo sostenible, quebrada, galpón avícola.

Abstract

The following document presents a project for the design and simulation of a small hydroelectric power plant to supply a poultry house on a farm in the municipality of Pore, Casanare. The study focuses on the identification and analysis of the elements that make up a hydroelectric power plant, as well as the sizing of the main components and the simulation of its operation using Matlab Simulink software. The thesis concludes that the implementation of a hydroelectric power plant is feasible and presents benefits in terms of energy savings and cost reduction in the operation of the plant. A careful selection of equipment and materials, the implementation of a monitoring and control system, and a detailed economic analysis are recommended to determine the feasibility of the project. In summary, the thesis represents a valuable contribution to sustainable development and the search for renewable energy alternatives in the region.

Keywords: Hydroelectric power plant, PCH, renewable energy, simulation, design, sizing, energy savings, sustainable development, stream, poultry shed.

Introducción

El acceso a energía eléctrica es un factor crítico en el desarrollo socioeconómico de cualquier región, ya que es esencial para una amplia variedad de actividades humanas. En particular, en áreas rurales, la falta de acceso a la electricidad puede limitar el acceso a servicios básicos de salud, educación y comunicación, lo que a su vez puede obstaculizar el desarrollo económico y social. La generación de energía hidroeléctrica se presenta como una alternativa limpia y sostenible que puede aprovechar el potencial energético de los cuerpos de agua y ofrecer una solución a estos desafíos. En este sentido, la presente tesis tiene como objetivo diseñar y simular una pequeña central hidroeléctrica para energizar un galpón en Pore, Casanare, y explorar la viabilidad de esta alternativa en la región. El diseño y simulación de la pequeña central hidroeléctrica se basa en el uso del cauce de una quebrada cercana al galpón para generar energía eléctrica. Esta central hidroeléctrica es capaz de cubrir la demanda energética del galpón y, en un futuro, podría ampliarse para suministrar energía a otros usuarios cercanos. La simulación del sistema se lleva a cabo utilizando el software Simulink de Matlab, una herramienta de modelado y simulación de sistemas dinámicos ampliamente utilizada en la industria y la investigación. El trabajo se organiza en varios capítulos que describen los antecedentes, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, los alcances y los límites del proyecto. Además, se incluye un marco referencial que aborda aspectos teóricos, conceptuales, contextuales y legales relacionados con la generación de energía hidroeléctrica y la simulación de sistemas hidroeléctricos. El marco metodológico se centra en la descripción del tipo de investigación, el diseño de la investigación, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y el análisis de estos. Por último, se presentan los resultados del diseño

y simulación de la pequeña central hidroeléctrica, así como las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Capítulo I: Marco Introductorio

1.1 Antecedentes

En la actualidad, la búsqueda de fuentes energéticas para la producción de electricidad va más allá de simplemente encontrar recursos abundantes. Los temas ambientales han adquirido una gran importancia, lo que ha llevado a buscar fuentes de energía renovables que contribuyan al desarrollo sostenible y reduzcan el impacto ambiental. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética, se está dando prioridad al uso de recursos renovables localmente disponibles, tanto a pequeña como a gran escala, como solución para los países en los que aún existen zonas con acceso limitado a la electricidad [1]. En Colombia, algunas poblaciones todavía no tienen acceso a la electricidad de manera constante, confiable y segura, por lo que se están implementando estrategias para solucionar esta problemática. En 2015, el gobierno colombiano publicó el Plan Energético Nacional Colombia, proyectado para el 2050, con el objetivo de generar estrategias que amortigüen la problemática de acceso a energía eléctrica en el país y promuevan el desarrollo sostenible. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (2020), este documento destaca la importancia del uso de energías renovables para aumentar la cobertura de energía eléctrica en las zonas más alejadas del país y disminuir las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes atmosféricos al sustituir los combustibles fósiles. Esta estrategia surge de la necesidad de impulsar el campo colombiano y la producción agrícola, pecuaria y avícola, siendo esta última el foco del proyecto en desarrollo. [1].

En la industria avícola, es imprescindible que el galpón cumpla con condiciones específicas para su función y para lograr un producto final de calidad. Para satisfacer estas

condiciones, se requiere el uso de energía eléctrica, sin embargo, en algunas zonas del país no es posible tener un acceso confiable y seguro a la electricidad. Por lo tanto, es fundamental encontrar soluciones sostenibles. La abundancia de recursos hídricos se convierte en una opción viable para generar electricidad. No obstante, es importante mencionar que las grandes hidroeléctricas pueden impactar negativamente la fauna y flora de las zonas donde se construyen. Para proteger el medio ambiente y aprovechar los recursos localmente disponibles, una opción viable es aprovechar el caudal de fuentes hídricas mediante pequeñas centrales hidroeléctricas, que resuelvan problemáticas energéticas de la población donde son instaladas sin afectar masivamente el ecosistema. Un ejemplo de aprovechamiento de recursos hídricos a pequeña escala es el del ingeniero Masaya Sumino, quien desarrolló en la ciudad de Gifu en Japón un mini generador que aprovecha el movimiento del agua de las acequias de las carreteras para mover una turbina y generar electricidad para iluminar un puente de la ciudad [2].

Otro proyecto fue implementado en Perú, El proyecto PUCP fue propuesto como solución de electrificación para 30 comunidades en Cusco y Huancavelica. Este proyecto aprovecha la fuerza de pequeños flujos de agua para la generación de electricidad y bombeo. La fuerza del agua mueve una turbina que acciona un generador eléctrico. Este proyecto reafirma la posibilidad de generar soluciones que aumenten la calidad de vida de las comunidades mediante energías limpias, sustituyendo las energías convencionales, y aportando al desarrollo económico, tecnológico y social en Latinoamérica [3].

La producción de energía renovable en Panamá ha tenido un importante crecimiento en los últimos años, llegando a producir alrededor de 11.000 GW/h de electricidad con fuentes renovables, lo que representa el 70% de la matriz eléctrica del país. El gobierno

panameño ha incentivado la producción y promoción de proyectos mini hidroeléctricos para aprovechar los abundantes recursos hídricos del país y suplir la demanda de energía eléctrica [4].

En Ecuador, el gobierno ha fomentado la investigación enfocada en generar ideas de diseño que permitan estudiar y analizar propuestas de desarrollo y cubrimiento a nivel energético a la población rural. Por ejemplo, un resultado es la tesis “Diseño de una minicentral hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca”, donde el estudio estuvo enfocado netamente en el diseño de dicha minicentral con el objetivo de aprovechar no solo los recursos renovables, sino la infraestructura de la zona. [5].

1.2 Planteamiento del Problema

En Colombia, el acceso al servicio de energía eléctrica es limitado en muchas zonas rurales del país. Un estudio realizado por Julián Vivas para El Tiempo en 2019 reveló que más de 1.700 localidades, con alrededor de 128.000 personas, solo tenían acceso al servicio de energía eléctrica entre 4 y 12 horas al día. Esta situación afecta negativamente a sectores productivos como el avícola, que requiere electricidad para mejorar la producción y calidad. [6].

La producción avícola en Colombia ha sido alta en los últimos años, alcanzando en 2020 un total de 2.602.681 toneladas, lo que representó el 0,6% del PIB del país en el mismo año [7]. Sin embargo, en algunas zonas del país, como el departamento de Casanare, la producción avícola aún es incipiente y requiere de mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia y reducir costos.

En este sentido, la falta de acceso a servicios básicos como la electricidad no solo afecta la productividad y eficiencia de sectores económicos clave como la producción avícola, sino que también limita el acceso a otros servicios esenciales como la educación, la salud y las comunicaciones. De acuerdo con el Banco Mundial, la falta de acceso a energía eléctrica también perpetúa la pobreza en las zonas rurales, donde las oportunidades económicas son limitadas y las condiciones de vida son precarias [8]. En este contexto, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles y asequibles se convierte en una necesidad apremiante para el desarrollo económico y social de estas comunidades rurales.

Los administradores de la finca Peña Negra, ubicada en la vereda La Jasse del municipio de Pore, Casanare, han identificado la necesidad de mejorar su galpón avícola. El galpón actual depende en un 100% del suministro de energía eléctrica comercial, lo que aumenta significativamente los costos de mano de obra y producción. [9]

Los altos costos de la energía eléctrica comercial también representan un desafío para mejorar la eficiencia y reducir costos en la producción avícola. En este sentido, surge la pregunta de cómo diseñar una propuesta que logre generar energía eléctrica a partir de procesos mecánicos para abastecer el galpón avícola de la finca Peña Negra en Pore, Casanare.

La idea es diseñar y simular una pequeña central hidroeléctrica aprovechando el cauce de una quebrada cercana al galpón avícola, con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir costos en la producción avícola en zonas rurales como la de Casanare. Una solución como esta podría no solo beneficiar a la finca Peña Negra, sino también a otras fincas

avícolas y productoras de alimentos en zonas rurales de Colombia que enfrentan desafíos similares.

En este sentido, este proyecto busca no solo mejorar la producción avícola en la finca Peña Negra, sino también contribuir al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y asequibles para la producción de alimentos en zonas rurales de Colombia. El diseño y la implementación de esta propuesta requieren de un análisis exhaustivo de los factores involucrados, incluyendo la topografía, la disponibilidad de recursos naturales, los costos de inversión y operación, entre otros.

1.2.1 Pregunta de investigación

Basado en el problema presentado, se genera la siguiente pregunta que se intentará resolver con el desarrollo de esta investigación: ¿Cómo diseñar una propuesta que logre generar energía eléctrica a partir de procesos mecánicos para abastecer el galpón avícola de la finca Peña Negra del municipio Pore de la vereda La Jasse, Casanare?

1.3 Justificación

La falta de inversión en tecnología en el agro colombiano ha sido uno de los principales obstáculos para el desarrollo económico sostenible en el sector. Según el informe de Portafolio en febrero de 2022, solo el 15% del sector agro utiliza tecnología de última generación en el país. En un mundo en constante evolución tecnológica y en busca de alternativas sostenibles, es necesario impulsar proyectos productivos que promuevan el avance del agro colombiano.

La finca Peña Negra, ubicada en la vereda Jasse, depende de una fuente de energía estable para la producción de su galpón avícola. Por esta razón, se ha identificado la necesidad de implementar una fuente de energía alternativa que reduzca la dependencia de la energía comercial y disminuya las emisiones de gases de efecto invernadero. La propuesta de diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica a partir de procesos mecánicos, a partir del estudio de la potencia generada por la fuente hídrica que atraviesa la finca, puede ser una solución viable y sostenible.

Además, en el departamento del Casanare se están implementando proyectos que contribuyen a la potenciación de la industria avícola. Para maximizar la producción, es necesario estandarizar los procesos y subprocesos para el correcto funcionamiento de los galpones. Esto puede lograrse mediante el desarrollo de tecnologías fáciles y económicas que permitan producir a gran escala sin generar inversiones que no estén al alcance del propietario.

El diseño y simulación de la pequeña central hidroeléctrica por parte del estudiante de ingeniería mecánica de la Universidad Antonio Nariño permitirá analizar problemáticas comunes y aplicar conocimientos teóricos y prácticos para generar soluciones viables y reales según la necesidad del nicho en estudio. Su pensamiento crítico e interrelación de escenarios puede tener un impacto positivo en la sociedad y contribuir al avance del agro colombiano de manera sostenible.

1.4 Objetivos

A continuación, se presentarán tanto el objetivo general del proyecto como los objetivos específicos, los cuales se han establecido con el fin de guiar y delimitar el trabajo

a realizar. El objetivo general constituye la meta principal del proyecto, mientras que los objetivos específicos se enfocan en tareas más detalladas que permitirán alcanzar la meta principal de manera efectiva y ordenada.

1.4.1 Objetivo general

Diseñar y simular una pequeña central hidroeléctrica, con el fin de abastecer el galpón avícola de la finca Peña Negra ubicada en el municipio Pore en la vereda La Jasse.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar y analizar los elementos que componen una pequeña planta hidroeléctrica.
- Dimensionar los componentes principales de la pequeña central hidroeléctrica.
- Simular la pequeña planta hidroeléctrica por medio de bloques usando los toolbox existentes del software Simulink de Matlab

1.5 Alcances y limites

Es importante destacar que este proyecto tiene alcances y limitaciones claras. En cuanto a los alcances, se espera que la central hidroeléctrica pueda generar suficiente energía eléctrica para abastecer el galpón avícola de la finca Peña Negra, lo que permitiría reducir los costos de mano de obra y producción, así como mejorar la eficiencia de la producción avícola. Además, se espera que este proyecto pueda servir como un ejemplo para otras fincas y zonas rurales en Colombia que enfrentan problemas similares de acceso limitado a la energía eléctrica.

Sin embargo, este proyecto también tiene limitaciones importantes que deben ser consideradas. En primer lugar, la generación de energía eléctrica a partir de una pequeña central hidroeléctrica está limitada por la cantidad y calidad del agua disponible en la quebrada cercana al galpón avícola. En este sentido, es importante destacar que la generación de energía eléctrica puede ser afectada por factores climáticos, como la sequía o la lluvia intensa, que pueden afectar el caudal y la calidad del agua. Además, la construcción y operación de una pequeña central hidroeléctrica también implica costos de inversión y mantenimiento que deben ser considerados.

En conclusión, este proyecto de investigación tiene el potencial de mejorar la eficiencia y reducir costos en la producción avícola en zonas rurales como la de Casanare, a través de la generación de energía eléctrica a partir de una pequeña central hidroeléctrica.

Capítulo II: Marco Referencial

El marco referencial es una sección crucial en cualquier investigación, ya que proporciona el contexto y la base teórica necesaria para el desarrollo del estudio. Este marco se compone de varios elementos, entre ellos el marco teórico, que permite al investigador explorar los conceptos y teorías relacionadas con el tema de investigación. Asimismo, el marco conceptual se enfoca en la definición de los términos y variables que se utilizarán en el estudio. Por otro lado, el marco contextual brinda información sobre el contexto geográfico, social y cultural en el que se desarrolla la investigación, mientras que el marco legal se enfoca en las normas, leyes y regulaciones relacionadas con el tema de estudio. En esta sección, se presentarán los elementos mencionados anteriormente para proporcionar una visión completa y clara del contexto en el que se desarrolla el diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica en Pore, Casanare.

2.1 Marco Teórico

En este apartado se presentará una revisión detallada de los conceptos y teorías relevantes, así como de los estudios previos relacionados con la generación de energía eléctrica a partir de fuentes hidráulicas.

2.1.1 Generación de Energía Hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es una forma de energía renovable y limpia que se genera a partir del agua en movimiento. Este proceso se lleva a cabo en centrales hidroeléctricas que aprovechan la energía cinética del agua para hacer girar las turbinas, que, a su vez, hacen girar los generadores eléctricos [10].

La generación de energía hidroeléctrica tiene numerosas ventajas, como la disponibilidad constante de agua en la mayoría de los ríos y la posibilidad de almacenar energía en embalses [11]. Además, no produce emisiones de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en una forma de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, también presenta algunos desafíos, como la necesidad de construir grandes infraestructuras y la posible alteración de los ecosistemas fluviales.

En todo el mundo, existen numerosas aplicaciones de energía hidroeléctrica, desde grandes centrales hidroeléctricas que generan miles de megavatios, hasta pequeñas centrales hidroeléctricas que suministran energía a comunidades aisladas [10]. Algunos ejemplos de aplicaciones en todo el mundo incluyen la represa de las Tres Gargantas en China, la central hidroeléctrica Itaipú en la frontera entre Brasil y Paraguay, y la central hidroeléctrica Agoyán en Ecuador.

Un factor importante legal relacionado con una PCH en Colombia es obtener los permisos y licencias necesarios para su construcción y operación. En Colombia, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) es la entidad encargada de otorgar los permisos ambientales requeridos para proyectos de generación de energía, incluyendo las PCH [12].

Según el Instructivo para la Evaluación de los Estudios de Impacto Ambiental de Proyectos de Generación de Energía con Fuentes Renovables No Convencionales (Resolución 622 de 2016), emitido por la ANLA, se establecen los requisitos y procedimientos para la evaluación de impacto ambiental de proyectos de generación de energía renovable, como las PCH. Este instructivo establece la necesidad de presentar un

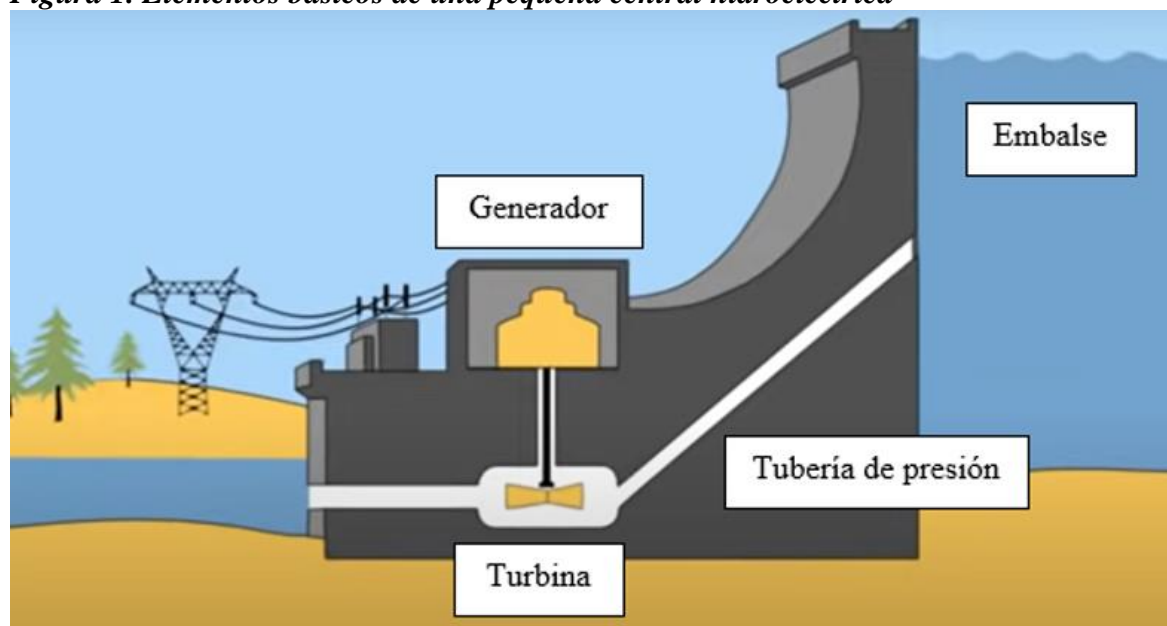
Estudio de Impacto Ambiental (EIA) que contemple aspectos como el manejo del agua, impactos sociales, ambientales y culturales, entre otros [12].

Además, es importante cumplir con la normativa técnica establecida por el Ministerio de Minas y Energía y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en Colombia. Estas normativas establecen los criterios y estándares técnicos para la construcción, operación y mantenimiento de las PCH, asegurando la seguridad y eficiencia de la planta [12].

2.1.2 Componentes de una pequeña central hidroeléctrica

Las pequeñas centrales hidroeléctricas son instalaciones que pueden generar entre dos kilovatios y diez megavatios de energía eléctrica a partir de fuentes de agua como arroyos, ríos y canales. Estas centrales hidroeléctricas generalmente constan de cuatro componentes principales: el embalse, la tubería de presión, la turbina y el generador [13].

Figura 1. Elementos básicos de una pequeña central hidroeléctrica



Nota. Tomado de [14]

El embalse es un cuerpo de agua que se encuentra aguas arriba de la central hidroeléctrica y se utiliza para almacenar agua que se liberará para generar energía. La tubería de presión es el conducto que transporta el agua desde el embalse hasta la turbina. La turbina es la pieza clave de la central hidroeléctrica, ya que transforma la energía hidráulica del agua en energía mecánica. Por último, el generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica [13].

Además de estos componentes principales, existen otros componentes importantes, como las compuertas de regulación de caudal, los sistemas de control y monitoreo, y las líneas de transmisión eléctrica. Las compuertas de regulación de caudal se utilizan para controlar la cantidad de agua que fluye hacia la turbina y, por lo tanto, la cantidad de energía que se genera. Los sistemas de control y monitoreo permiten supervisar el funcionamiento de la central hidroeléctrica y realizar ajustes en tiempo real para garantizar una operación segura y eficiente. Por último, las líneas de transmisión eléctrica son necesarias para transportar la energía generada por la central hidroeléctrica hasta los puntos de consumo [15].

Es importante mencionar que existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas. Por ejemplo, las turbinas Pelton son adecuadas para caídas de agua altas y con poca cantidad de agua, mientras que las turbinas Kaplan son más adecuadas para caídas de agua más bajas y mayores caudales [16].

En resumen, el diseño de una pequeña central hidroeléctrica requiere una serie de consideraciones técnicas y ambientales para garantizar su eficiencia y sostenibilidad. Al

implementar medidas adecuadas, se puede minimizar el impacto ambiental y aprovechar los beneficios de esta fuente de energía renovable.

2.1.3 Diseño de una pequeña central hidroeléctrica

El diseño de una pequeña central hidroeléctrica debe considerar diversos factores técnicos y ambientales para garantizar su eficiencia y sostenibilidad. Las condiciones iniciales que se deben tener en cuenta son la altura de caída disponible, el caudal del agua y la demanda de energía eléctrica a cubrir [17].

Para determinar la altura de caída disponible, se debe medir la diferencia de altura entre el nivel del agua en el embalse y el nivel del agua en el punto donde se instalará la turbina. Este cálculo se puede realizar con un nivel de agua o con un GPS de precisión [18].

Para determinar el caudal del agua, se deben medir las dimensiones del río o canal, la velocidad del agua y la sección transversal. Este cálculo se puede realizar con diversos equipos, como el molinete o la placa de impacto [19].

Para determinar la demanda de energía eléctrica a cubrir, se deben tener en cuenta los requisitos energéticos de los consumidores, ya sea una comunidad o una empresa. Esto se puede calcular mediante el consumo de energía eléctrica promedio de los consumidores y la cantidad de horas de operación de la central hidroeléctrica [20].

A partir de estas variables se pueden calcular los componentes necesarios para el funcionamiento de la central, como el tamaño del embalse, la longitud y diámetro de la tubería de presión, y el tipo y tamaño de la turbina y el generador [21].

Existen diversas fórmulas y métodos para calcular los componentes necesarios para el diseño de una central hidroeléctrica. En general, se utilizan cálculos hidráulicos y eléctricos para determinar el tamaño y capacidad de cada componente.

Por ejemplo, para el cálculo del tamaño del embalse se debe considerar el caudal de agua disponible, la demanda energética a cubrir y la altura de caída disponible. Se pueden utilizar fórmulas para el cálculo del volumen del embalse en función de estos parámetros [22]. Para el cálculo de la tubería de presión, se deben considerar la altura de caída disponible, el caudal de agua y la eficiencia de la tubería. Se pueden utilizar fórmulas para el cálculo del diámetro y la longitud de la tubería en función de estos parámetros [23].

Para el diseño de la turbina y el generador, se deben considerar la altura de caída disponible, el caudal de agua, la velocidad específica de la turbina y la eficiencia del generador. Se pueden utilizar fórmulas para el cálculo de la potencia y el tamaño de la turbina y el generador en función de estos parámetros [24]. Por ejemplo:

Ecuación 1

$$\dot{W} = Q * h * \eta$$

Donde:

\dot{W} = *Potencia hidráulica en vatios*

Q = *Caudal de agua en metros cúbicos por segundo*

h = *altura de caída disponible en metros*

η = *la eficiencia de la turbina*

En general, el diseño de una central hidroeléctrica requiere un enfoque integrado que considere tanto los aspectos hidráulicos como los eléctricos, y que busque maximizar la eficiencia y la sostenibilidad de la instalación.

2.1.4 Simulación de sistemas hidroeléctricos

La simulación de sistemas hidroeléctricos es una herramienta fundamental para el diseño y análisis de centrales hidroeléctricas. Esta herramienta permite realizar una evaluación detallada del comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación y eventos críticos, lo que ayuda a optimizar la eficiencia y la rentabilidad del proyecto [25].

Existen diversas herramientas de simulación disponibles en el mercado, como softwares específicos para la simulación de sistemas hidroeléctricos, que utilizan modelos matemáticos para representar el comportamiento del sistema. Estos modelos incluyen elementos como la turbina, el generador, la tubería de presión y el embalse, y consideran variables como el caudal de agua, la altura de caída, la eficiencia de los equipos y las demandas de energía [26].

La simulación de sistemas hidroeléctricos permite evaluar el rendimiento del sistema en diferentes escenarios, como la variación del caudal de agua, la carga de la red eléctrica, las fallas en el sistema y los eventos climáticos extremos. Además, esta herramienta es útil para determinar la capacidad de generación de la central hidroeléctrica y para evaluar el impacto ambiental y social del proyecto [27].

En la literatura técnica se pueden encontrar diversos estudios que utilizan herramientas de simulación para el diseño y análisis de sistemas hidroeléctricos. Por

ejemplo, [22] utilizó un software de simulación para el diseño de una central hidroeléctrica en México, mientras que Reyes [23] utilizó esta herramienta para analizar el comportamiento de una central hidroeléctrica en Colombia. Otro ejemplo es el estudio de González M. [24], quien utilizó la simulación para evaluar el impacto ambiental y social de una central hidroeléctrica en Chile.

2.1.5 Tecnologías emergentes en la generación de energía hidroeléctrica

La generación de energía hidroeléctrica ha evolucionado con el tiempo, y hoy en día existen tecnologías emergentes que permiten mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental de estas centrales. A continuación, se describirán algunas de estas tecnologías:

Turbinas de bajo impacto: Estas turbinas están diseñadas para reducir el impacto ambiental de las centrales hidroeléctricas, ya que permiten el paso de peces y otros organismos acuáticos a través de ellas sin causar daño. Además, estas turbinas pueden operar con caudales bajos, lo que permite aprovechar fuentes de energía hidroeléctrica que antes eran consideradas no viables [28].

Generadores de imanes permanentes: Estos generadores utilizan imanes permanentes en lugar de bobinas de cobre, lo que reduce la necesidad de mantenimiento y aumenta la eficiencia de la generación de energía. Además, al no utilizar materiales tóxicos como el cobre, estos generadores tienen un menor impacto ambiental [29].

Sistemas de almacenamiento de energía: Estos sistemas permiten almacenar la energía generada en momentos de baja demanda, para ser utilizada en momentos de alta demanda. Esto permite una mayor flexibilidad en la gestión de la energía hidroeléctrica, y

reduce la necesidad de utilizar fuentes de energía más contaminantes en momentos de alta demanda [30].

Micro hidroeléctricas: Estas centrales hidroeléctricas tienen una capacidad de generación de energía menor a 100 kW, y son ideales para comunidades remotas o áreas rurales que no tienen acceso a la red eléctrica. Estas centrales pueden ser diseñadas para utilizar fuentes de energía hidroeléctrica de bajo caudal, como ríos y arroyos, y tienen un impacto ambiental y social menor que las grandes centrales hidroeléctricas [31].

En resumen, estas tecnologías emergentes en la generación de energía hidroeléctrica permiten una mayor eficiencia y reducción del impacto ambiental de estas centrales, lo que las convierte en una opción cada vez más atractiva en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

2.2 Marco Conceptual

El marco conceptual es una sección importante en cualquier investigación, ya que permite establecer los conceptos teóricos que se utilizarán en el análisis y la interpretación de los resultados.

Energía hidroeléctrica: La energía hidroeléctrica es aquella que se genera a partir de la energía cinética del agua en movimiento. Para su generación se utilizan centrales hidroeléctricas que constan de un embalse, una tubería de presión, una turbina y un generador [32].

Potencia hidroeléctrica: La potencia hidroeléctrica se refiere a la cantidad de energía eléctrica que se puede generar a partir de una fuente de energía hidráulica. Esta

potencia depende de factores como el caudal de agua disponible y la altura de caída, y se mide en vatios (W) o kilovatios (kW) [24].

Caudal de agua: El caudal de agua se refiere a la cantidad de agua que fluye en un río, arroyo u otra fuente de agua en un período de tiempo determinado. En la generación de energía hidroeléctrica, el caudal de agua disponible es un factor clave en la determinación de la cantidad de energía eléctrica que se puede generar [22].

Altura de caída: La altura de caída se refiere a la diferencia de altura entre el nivel del agua en el embalse y el nivel del agua en el punto donde se encuentra la turbina. Esta altura es un factor clave en la generación de energía hidroeléctrica, ya que, a mayor altura de caída, mayor es la energía cinética del agua y mayor es la cantidad de energía eléctrica que se puede generar [33].

Eficiencia hidroeléctrica: La eficiencia hidroeléctrica se refiere a la relación entre la energía eléctrica generada y la energía hidráulica disponible en el sistema. Esta eficiencia depende de factores como la calidad de los equipos, la eficiencia de la tubería de presión, la eficiencia de la turbina y la eficiencia del generador [32].

Impacto ambiental: La generación de energía hidroeléctrica puede tener un impacto ambiental significativo en el ecosistema circundante, incluyendo la alteración de los caudales de agua, la modificación del hábitat de las especies acuáticas, la emisión de gases de efecto invernadero y la liberación de sedimentos y nutrientes [22]

Impacto social: La construcción de centrales hidroeléctricas puede tener un impacto social significativo en las comunidades locales, incluyendo la reubicación forzada de

personas, la pérdida de tierras y recursos naturales, y la interrupción de las actividades económicas locales [24].

2.3 Marco Contextual

La finca "Peña Negra" se encuentra ubicada en la vereda La Jasse del municipio de Pore, en el departamento de Casanare, Colombia. Casanare es un departamento ubicado en la región llanera del país, caracterizada por su vasta extensión territorial y su clima tropical de sabana. La economía de la zona se basa principalmente en la producción de petróleo, ganadería y agricultura [34].

La vereda La Jasse, donde se ubica la finca, es una zona rural del municipio de Pore. La zona se caracteriza por ser una zona de sabana, con amplias extensiones de pastizales y algunas zonas boscosas. La principal actividad económica de la zona es la ganadería, con la producción de carne y leche como principales productos [35].

La finca "Peña Negra" se encuentra en una zona elevada, con una altitud de aproximadamente 300 metros sobre el nivel del mar. La zona presenta una topografía ondulada, con algunas lomas y pequeñas quebradas. El clima en la zona es cálido y seco, con una temperatura promedio de 27°C y una precipitación anual promedio de 1.000 mm [36]

2.4 Marco Legal

En el marco legal que rige la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia, existen diversas normativas que regulan su construcción y operación. En el caso específico del sector agrario, se han establecido disposiciones que buscan fomentar el

uso de estas fuentes de energía renovable para el beneficio de las zonas rurales del país. En la Tabla 1 se presentan las normativas relevantes que se deben tener en cuenta para el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas en el sector agrario.

Tabla 1. Marco Legal

NORMA	DESCRIPCIÓN
Ley 1715 de 2014	Establece la reglamentación para la generación de energía a partir de fuentes no convencionales y la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.
Ley 142 de 1994	Establece la regulación del servicio público de energía eléctrica y la participación del sector privado en su prestación.
Ley 171 de 1961	Establece la reglamentación para la explotación de recursos hídricos en el país.
Decreto 3673 de 2008	Establece la reglamentación para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales, incluyendo la micro generación distribuida y la conexión de sistemas de generación distribuida al sistema eléctrico nacional.
Decreto 2324 de 2012	Establece la reglamentación para la construcción y operación de centrales hidroeléctricas y plantas de generación eléctrica en Colombia.
Decreto 1076 de 2015	Establece la reglamentación para la obtención de permisos, concesiones y autorizaciones ambientales para proyectos de generación de energía eléctrica y otros proyectos de infraestructura en el país.

Capítulo III: Marco Metodológico

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica con el fin de abastecer el galpón avícola de la finca Peña Negra ubicada en el municipio Pore en la vereda La Jasse. En este sentido, se describirán las diferentes etapas de la investigación, las técnicas y herramientas utilizadas para la recolección y análisis de datos, y se explicará el proceso de diseño y simulación de la central hidroeléctrica.

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación utilizado en este proyecto es experimental, ya que se busca diseñar y simular una pequeña central hidroeléctrica para abastecer un galpón avícola específico. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación experimental se define como un "diseño de investigación que permite establecer relaciones de causa y efecto entre variables" (p. 100). Esta metodología implica la manipulación de una o varias variables independientes para observar el efecto que tienen sobre una variable dependiente controlada.

En este caso, se pretende utilizar variables como la velocidad del agua, el diámetro del tubo y el número de turbinas para observar su efecto en la cantidad de energía generada por la pequeña central hidroeléctrica. Además, se utilizará el software Simulink de Matlab para simular la planta hidroeléctrica y realizar pruebas de los diferentes escenarios planteados.

De acuerdo con Bernal [37], la investigación experimental se enfoca en "establecer relaciones causa-efecto entre variables manipuladas y observadas bajo condiciones de

control rigurosamente establecidas". Por lo tanto, este tipo de investigación es adecuado para el objetivo de este proyecto, ya que se busca establecer la relación causa-efecto entre las variables manipuladas y la cantidad de energía generada por la central hidroeléctrica.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de investigación es fundamental para la realización de cualquier estudio. En el presente trabajo, se busca diseñar una investigación que permita alcanzar los objetivos planteados en el marco teórico y conceptual. En este sentido, se presentará el diseño metodológico utilizado para la obtención de los datos, la selección de la muestra, los instrumentos de recolección de datos y la técnica de análisis de datos que se empleará para dar respuesta a la problemática planteada. En la Tabla 2 se presenta el diseño que guiará el desarrollo de esta investigación.

Tabla 2. Diseño Metodológico

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	HERRAMIENTAS
Identificar y analizar los elementos que componen una pequeña planta hidroeléctrica	1. Revisión bibliográfica sobre los componentes de una pequeña planta hidroeléctrica. 2. Investigación de las normas y estándares para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas.	Bibliografía especializada y normativa vigente.
Dimensionar los componentes principales de la pequeña central hidroeléctrica	1. Cálculo de la carga de energía necesaria para el galpón avícola.	Herramientas de cálculo, software especializado de diseño como Solidworks.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	HERRAMIENTAS
Simular la pequeña planta hidroeléctrica por medio de bloques usando los toolbox existentes del software Simulink de Matlab	<ol style="list-style-type: none"> 2. Diseño y dimensionamiento de la turbina, el generador y los equipos eléctricos. 1. Adquirir conocimiento sobre el funcionamiento de Simulink. 2. Selección de bloques y simulación de la pequeña central hidroeléctrica. 	Software Simulink de Matlab, bibliografía especializada.

3.3 Población y muestra

En este proyecto, la población objetivo son las pequeñas centrales hidroeléctricas ubicadas en Colombia, en particular aquellas que son utilizadas para abastecer de energía eléctrica a zonas rurales y a pequeñas industrias. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) de Colombia, existen más de 200 pequeñas centrales hidroeléctricas en el país [38].

Para seleccionar la muestra a estudiar, se utilizará un enfoque de muestreo aleatorio simple. Esto implica que cada pequeña central hidroeléctrica en la población tendrá la misma probabilidad de ser seleccionada para el estudio. La muestra seleccionada estará compuesta por 10 pequeñas centrales hidroeléctricas ubicadas en diferentes regiones de Colombia. Se seleccionará una muestra representativa con el fin de que los resultados obtenidos puedan ser generalizados a la población en estudio. El tamaño de la muestra se basará en una fórmula

estadística que toma en cuenta la población, el nivel de confianza y el margen de error deseados. La información necesaria para seleccionar la muestra se obtendrá de bases de datos y registros de empresas que se dedican a la construcción y mantenimiento de pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En este proyecto, se utilizarán varias técnicas e instrumentos para recolectar los datos necesarios para el diseño y simulación de la pequeña central hidroeléctrica. Estas técnicas e instrumentos son los siguientes:

- Revisión de videos y material audiovisual: se recopilará material audiovisual de pequeñas centrales hidroeléctricas en funcionamiento, con el fin de observar detalladamente los componentes principales y su funcionamiento. Se revisarán videos de operación y funcionamiento de centrales hidroeléctricas similares a la que se desea diseñar y simular, para obtener información visual que complemente la revisión bibliográfica y la simulación por medio de bloques en el software Simulink.
- Simulación por medio de bloques: se diseñará y simulará una pequeña central hidroeléctrica mediante el software Simulink de Matlab, utilizando los toolbox existentes para este fin. Se ajustarán los parámetros necesarios para obtener resultados precisos y detallados sobre el rendimiento de la central, incluyendo la generación de energía eléctrica y la eficiencia del sistema.

La simulación por medio de bloques en el software Simulink de Matlab será la técnica principal utilizada para obtener resultados precisos y detallados sobre el rendimiento de la pequeña central hidroeléctrica diseñada.

3.5 Análisis de datos

El análisis de los datos recolectados se llevará a cabo mediante un enfoque de validación y comparación de cálculos de la planta hidroeléctrica diseñada, utilizando información obtenida de reportes y datos de plantas hidroeléctricas reales. Para ello, se aplicarán diversas técnicas de análisis, que se detallan a continuación:

1. Cálculo de la planta hidroeléctrica: Se realizarán los cálculos necesarios para determinar la capacidad de generación de la planta hidroeléctrica diseñada. Esto incluirá el análisis de la capacidad de captación y conducción del agua, la estimación del caudal y la altura de caída, y el cálculo de la potencia generada.

2. Simulación y validación del diseño: Se utilizará un software de simulación, como el Simulink, para realizar una simulación de la planta hidroeléctrica diseñada. Se introducirán los parámetros de entrada, como el caudal y la altura de caída, y se obtendrán los resultados de generación de energía y eficiencia del sistema. Estos resultados serán comparados con los cálculos realizados y los datos de las plantas reales, para validar la precisión de la simulación y del diseño propuesto.

Mediante este enfoque, se buscará corroborar la viabilidad y eficiencia del diseño de la planta hidroeléctrica, mediante la comparación y validación de los cálculos realizados con la simulación del sistema. Esto permitirá evaluar la efectividad de los modelos utilizados en el diseño y asegurar un funcionamiento óptimo de la planta hidroeléctrica.

Capítulo IV: Resultados

En este capítulo de resultados, se presentará una descripción detallada de los elementos que componen una pequeña planta hidroeléctrica diseñada para la finca en estudio. Se abordarán las características específicas de la finca, incluyendo las condiciones climáticas y cartográficas que influyen en el diseño de la planta. Asimismo, se analizará la funcionalidad de la finca en relación con la producción de energía eléctrica a partir de la quebrada existente en la zona.

Además, se llevará a cabo una caracterización exhaustiva de la quebrada, considerando su caudal, altura y otros parámetros relevantes para determinar su potencial energético. Se identificarán las normas y estándares pertinentes para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Colombia, asegurando el cumplimiento de los requerimientos legales y técnicos.

A continuación, se detallarán los componentes que se utilizarán en la PCH para la finca, teniendo en cuenta las características específicas del entorno y las necesidades de generación de energía. Se discutirá la selección de cada componente, considerando su eficiencia, durabilidad y adaptabilidad al contexto de la finca.

Posteriormente, se presentará un esquema general de la PCH diseñada, ilustrando la disposición y conexión de los diferentes componentes. Se proporcionarán las dimensiones y especificaciones de los componentes principales, garantizando un diseño acorde con las necesidades de la finca.

Finalmente, se mostrará la implementación de la PCH en el software Simulink de Matlab, utilizando su toolbox específico para el diseño y simulación de plantas hidroeléctricas. Se explicarán los procedimientos y parámetros utilizados en la simulación, y se analizarán los resultados obtenidos, validando así la efectividad del diseño propuesto.

En resumen, este capítulo de resultados brindará una visión integral de los elementos que componen la pequeña planta hidroeléctrica diseñada para la finca, desde las características de la finca y la quebrada, hasta los componentes seleccionados, el esquema general de la PCH y la simulación en el software Simulink de Matlab.

4.1 Elementos que componen una pequeña planta hidroeléctrica.

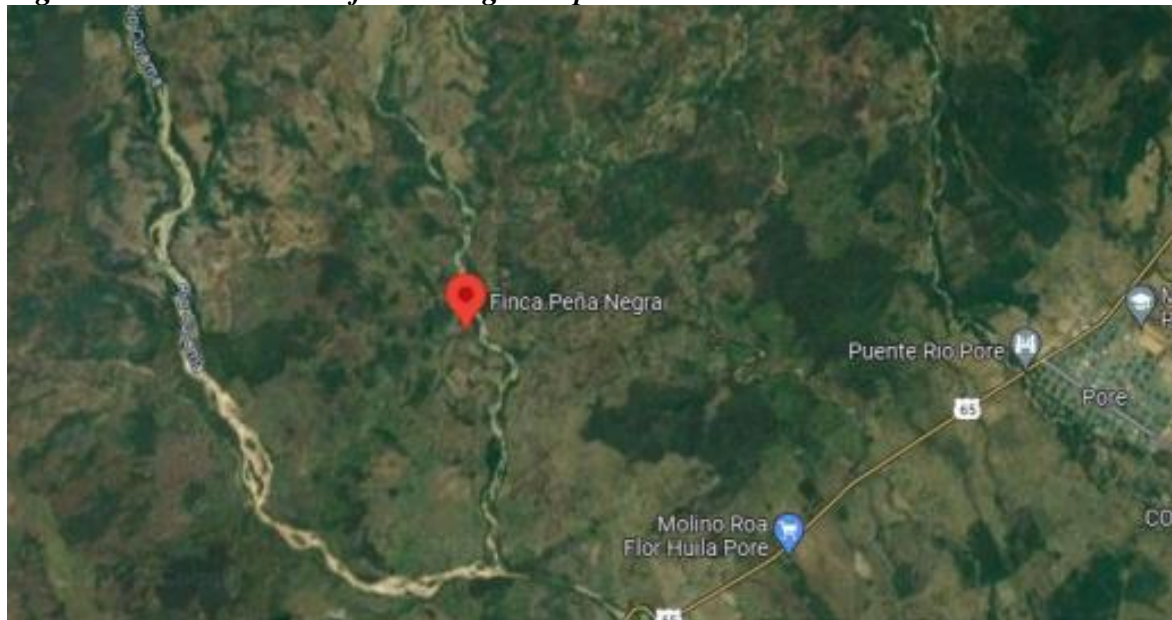
Para diseñar adecuadamente una pequeña planta hidroeléctrica (PCH), es esencial conocer las condiciones iniciales con las que se va a trabajar. Para ello, se debe realizar una detallada caracterización de la finca donde se va a ubicar la PCH, incluyendo su ubicación, la altitud a nivel del mar, el ambiente circundante y otras características relevantes. Además, se debe llevar a cabo una caracterización exhaustiva de la quebrada para seleccionar los elementos que compondrán la PCH de manera adecuada. Con esta información detallada, será posible diseñar una PCH que cumpla con los requisitos específicos de la ubicación y las condiciones hidrológicas de la zona, asegurando así su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

4.1.1 Características de la finca

- **Condiciones climáticas y cartográficas**

La finca se encuentra ubicada en el municipio Pore, Casanare como se puede observar en la Figura 2. Sus coordenadas son 5.735627849698208 de latitud y -72.05381750247265 de longitud [39], su altitud sobre el nivel del mar es de 292 m [40].

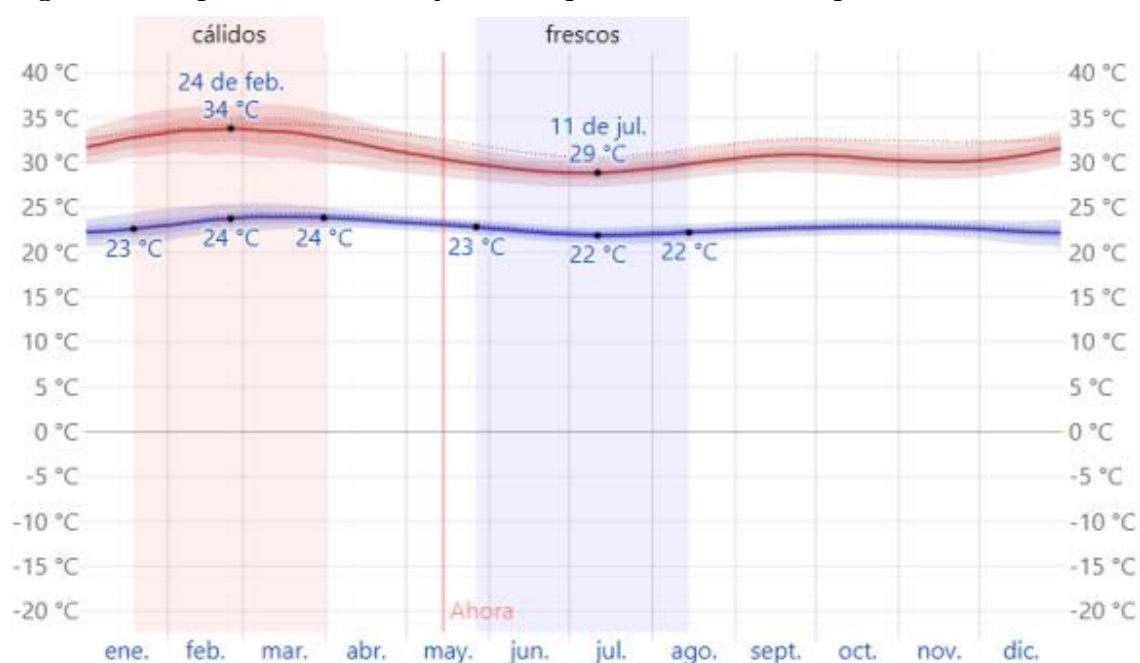
Figura 2. Ubicación de la finca Google Maps.



Nota: tomado de Google maps [39].

En la Figura 3 se pueden observar las condiciones climáticas anuales en el municipio de Pore. Este lugar se caracteriza por tener veranos cortos, cálidos, húmedos y nublados, y un invierno también corto, caluroso, opresivo, mojado y predominantemente nublado. A lo largo del año, la temperatura suele oscilar entre 22 °C y 34 °C, siendo poco común que descienda a menos de 21 °C o supere los 36 °C [40].

Figura 3. Temperatura máxima y mínima promedio en Municipio Pore.



Nota: tomado de weatherspark.com [40].

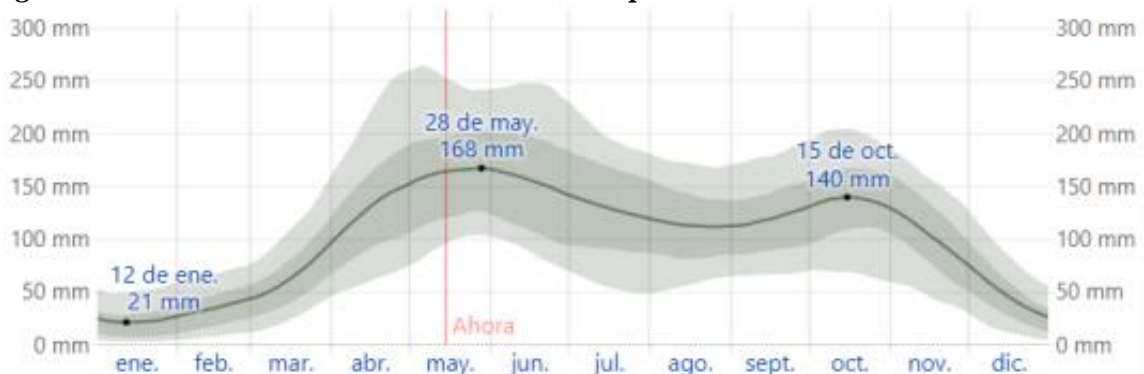
En cuanto a las estaciones del año en el municipio de Pore, la temporada calurosa abarca 2,4 meses, desde el 19 de enero hasta el 31 de marzo, con una temperatura máxima promedio superior a los 33 °C. El mes más caluroso es marzo, con una temperatura máxima promedio de 33 °C y una mínima de 24 °C [40].

Por otro lado, la temporada fresca tiene una duración de 2,6 meses, desde el 27 de mayo hasta el 14 de agosto, con una temperatura máxima promedio inferior a los 30 °C. El mes más frío es julio, con una temperatura mínima promedio de 22 °C y una máxima de 29 °C [40].

En el municipio de Pore, se presentan precipitaciones a lo largo de todo el año. El mes con mayor cantidad de lluvia es mayo, con un promedio de 165 milímetros. Por otro

lado, el mes con menos precipitaciones es enero, con un promedio de tan solo 22 milímetros de lluvia [40], como se puede observar en la Figura 4 .

Figura 4. Promedio mensual de lluvia en Municipio Pore



Nota: tomado de weatherspark.com [40]

- **Funcionalidad de la finca**

La finca tiene como actividad principal la cría de pollos, para lo cual cuenta con un galpón agrícola que aloja hasta 600 pollos, así como con un galpón más pequeño destinado a los polluelos, tal y como se puede apreciar en la Figura 6. Dado que estos animales requieren de condiciones específicas de temperatura, resulta necesario el uso de lámparas térmicas para mantener el ambiente adecuado, lo que implica un importante consumo energético.

En este caso particular, se requiere mantener una calefacción adecuada para 600 pollos. Las bombillas utilizadas para dicho propósito se pueden apreciar en la Figura 5.

Figura 5. Bombilla de calefacción



Nota: imagen tomada de MercadoLibre [41]

Cada bombilla de calefacción consume aproximadamente 300 W (vatios). En el galpón, se cuenta con un total de 5 bombillas destinadas a los pollos y 2 bombillas para los polluelos. Por lo tanto, el consumo energético total de la finca asciende a 2100 W.

Figura 6. Galpones de la finca





Considerando las características generales de la finca, se tiene una altitud de 292 metros sobre el nivel del mar, con una variación de temperatura que oscila entre los 22°C y los 34°C, siendo marzo el mes más cálido. La temporada de lluvias se presenta en mayo, mientras que enero es el mes más seco. Cabe destacar que la actividad principal en la finca es la cría de pollos en galpones.

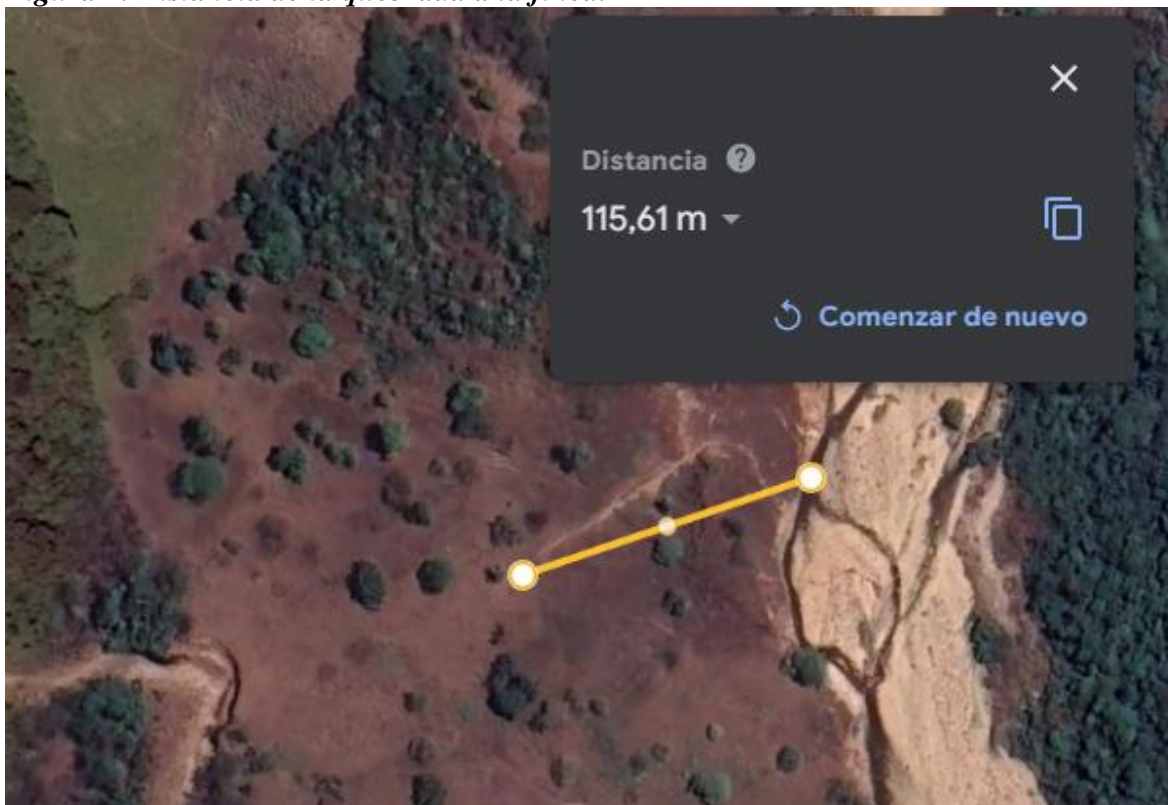
Ahora bien, es importante realizar una identificación de las características de la quebrada presente en la finca, lo que permitirá seleccionar adecuadamente los elementos que conformarán la pequeña planta hidroeléctrica (PCH).

4.1.2 Caracterización de la quebrada

La caracterización de la quebrada resulta crucial para la selección adecuada de los elementos que conformarán la PCH. En primer lugar, es importante conocer la distancia

entre el punto de captación del agua y la finca, lo cual puede obtenerse mediante herramientas como Google Maps, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Distancia de la quebrada a la finca.



Nota: tomado de Google maps [39]

El caudal de la quebrada es un dato fundamental para el diseño de la PCH, por lo que se ha utilizado una técnica específica para determinarlo. En primer lugar, se midió la profundidad de la quebrada en varios puntos transversales y se estableció una sección transversal aproximada, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Sección transversal de la quebrada.



La medida del área aproximada se obtuvo mediante sumas de áreas de secciones de trapecio como se puede apreciar en la Figura 9. En la Tabla 3 se muestran los resultados.

Figura 9. Secciones de la quebrada

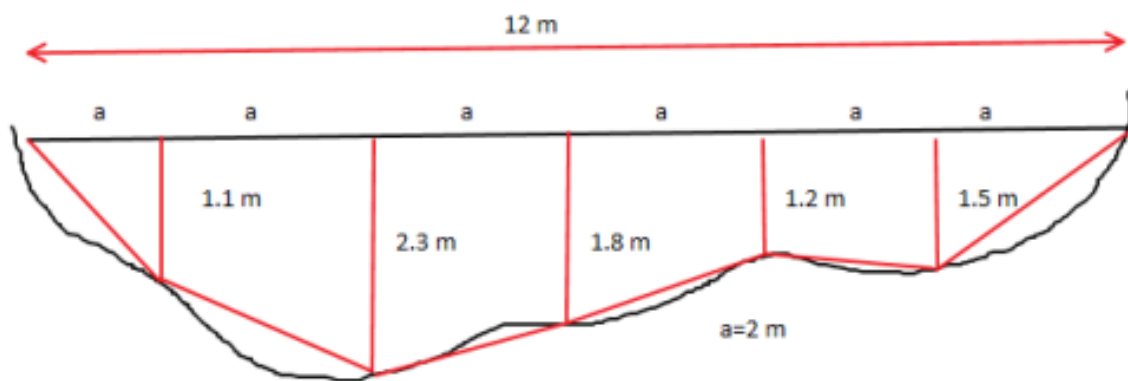


Tabla 3. Medida de la sección transversal.

SECCIÓN	ÁREA [m ²]
1	1,1
2	3,4
3	4,1
4	3
5	2,7

SECCIÓN	ÁREA [m ²]
6	1,5
Total	15,8

A continuación, se midió la velocidad del cauce mediante un dispositivo de flotación y se calculó el tiempo que tardaba en recorrer una distancia determinada. Este proceso se repitió 10 veces y se obtuvo una velocidad promedio. Posteriormente, se multiplicó esta velocidad por la sección transversal para obtener el caudal de la quebrada como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Caracterización de la quebrada.

MUESTRA	TIEMPO [s]	DISTANCIA [m]	VELOCIDAD [m/s]	ÁREA TRANSVERSAL [m ²]	CAUDAL [m ³ /s]
1	10	22	2,20	15,8	34,76
2	12	22	1,83	15,8	28,97
3	15	22	1,47	15,8	23,17
4	12	22	1,83	15,8	28,97
5	10	22	2,20	15,8	34,76
6	12	22	1,83	15,8	28,97
7	15	22	1,47	15,8	23,17
8	14	22	1,57	15,8	24,83
9	12	22	1,83	15,8	28,97
10	15	22	1,47	15,8	23,17
				PROMEDIO	27,97

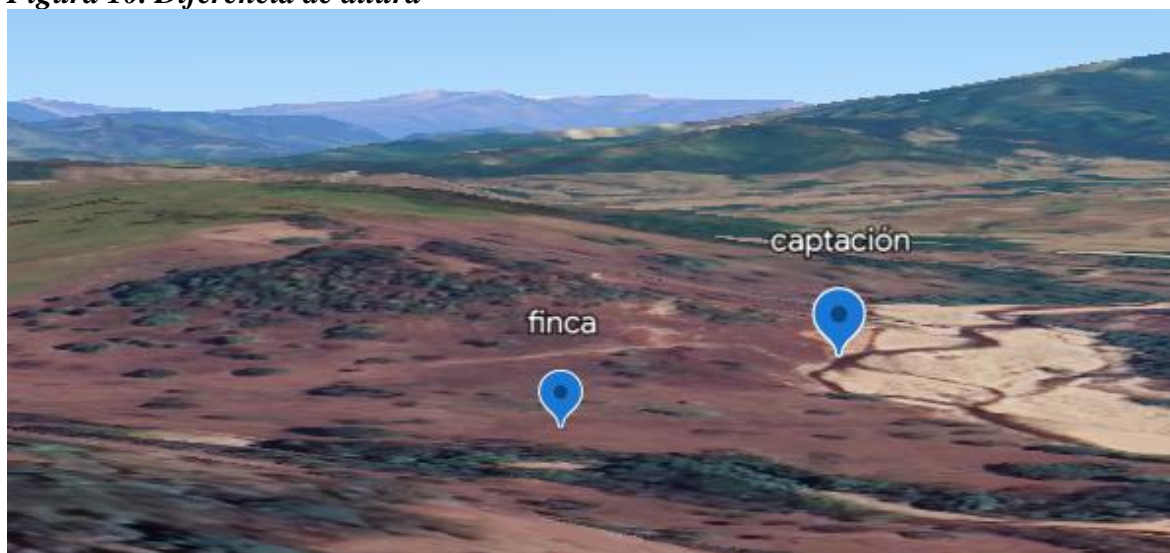
Es importante tener en cuenta que esta medición se realizó en temporada de lluvias (debido a los datos en la Figura 4), entonces para el diseño se toma el valor más crítico, en este caso en la temporada de sequía.

Para saber el caudal que se hay en temporadas de sequía se hace una regla de 3 simple, pues si en estos momentos hay una precipitación de 150 mm con un caudal de

27,9735238 [m³/s]. En temporada de sequía habrá 21 mm de precipitación por lo que se espera que el caudal disponible sea de 3.9163 [m³/s].

Otro factor a tener en cuenta es la diferencia de altura o nivel entre la finca y la captación de la quebrada, esto se puede obtener mediante la aplicación de Google earth como se puede ver en la Figura 10.

Figura 10. Diferencia de altura



Se puede observar que la zona es llana y que el desnivel entre la finca y la captación no supera los 10 metros. También es importante destacar que, aunque la corriente del agua tiene poco material particulado, se debe implementar un sistema de filtrado para mejorar la calidad del agua.

En conclusión, luego de realizar la caracterización de la quebrada, se pudo determinar que se encuentra ubicada a una distancia de 115.61 metros de la finca y una altura de 10 metros. Además, se obtuvo un caudal aproximado de 27.97 metros cúbicos por segundo para la quebrada en temporadas de lluvia y 3.9163 metros cúbicos por segundo en

temporadas de sequía. Estos datos serán fundamentales para el diseño de la pequeña planta hidroeléctrica (PCH) y la selección adecuada de los elementos que la compondrán.

Una vez caracterizada la quebrada, se procederá a identificar los elementos que conformarán la PCH.

4.1.3 Componentes

Por lo general, los elementos que conforman una pequeña central hidroeléctrica (PCH) incluyen una presa para acumular agua, un canal de conducción para transportar el agua, una tubería de presión para aumentar la presión del agua, una turbina hidráulica para convertir la energía hidráulica en energía mecánica, un generador eléctrico para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, y un sistema de control para regular el flujo de agua y la generación de energía eléctrica [42].

En cuanto a la presa, existen diferentes tipos de presas, como las presas de gravedad, las presas de arco, las presas de contrafuerte y las presas de enrocamiento, cada una con características y diseños específicos [43]. Por otro lado, el canal de conducción puede ser a cielo abierto o subterráneo, y la tubería de presión puede ser de diferentes materiales, como acero o concreto, dependiendo de las condiciones geográficas y ambientales de la zona donde se construirá la PCH [42].

La turbina hidráulica también puede ser de diferentes tipos, como la turbina Pelton, la turbina Francis y la turbina Kaplan, dependiendo del tipo de caudal y de la altura de la caída del agua (Rai, 2010). En cuanto al generador eléctrico, se pueden utilizar generadores

síncronos o asincrónicos, y el sistema de control puede ser automatizado para mejorar la eficiencia energética y la seguridad de la PCH ([42]; [44]).

4.1.2 normas y estándares para el diseño de PCH'S

En Colombia, existen normas y estándares que regulan el diseño y la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). Una de las principales normas es la Resolución 0189 de 2012 del Ministerio de Minas y Energía, la cual establece los requisitos técnicos para la construcción y operación de PCH en Colombia.

Esta resolución establece los requisitos para la construcción de la presa, el canal de conducción, la tubería de presión, la casa de máquinas, la turbina hidráulica, el generador eléctrico y el sistema de control de la PCH [45]. También establece los requisitos ambientales y sociales que deben ser considerados durante la construcción y operación de la PCH.

Además de la Resolución 0189 de 2012, existen otras normas y estándares que regulan la construcción de PCH en Colombia, como la Norma Colombiana NTC 5605, que establece los requisitos para el diseño y construcción de presas de concreto, y la Norma Colombiana NTC 5654, que establece los requisitos para el diseño y construcción de túneles y conducciones para la generación de energía hidroeléctrica [46].

Es importante tener en cuenta estas normas y estándares durante el diseño y construcción de una PCH en Colombia, para garantizar la seguridad y eficiencia de la PCH, así como para cumplir con los requisitos legales y ambientales establecidos por el gobierno.

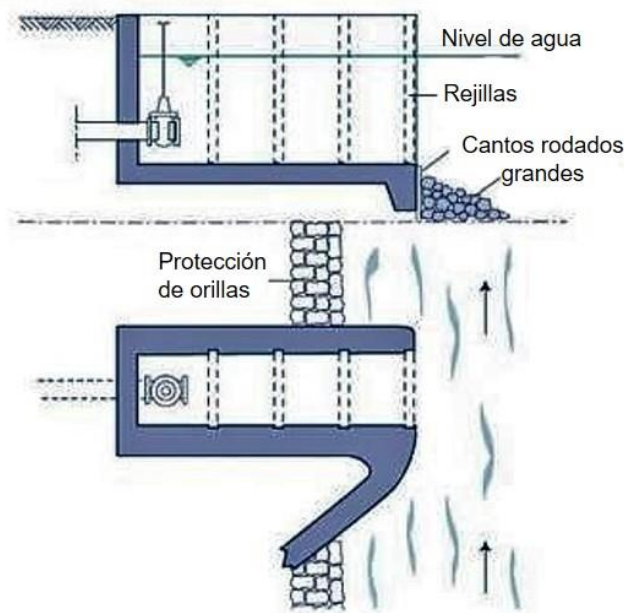
- **Componentes por utilizar en la PCH para la finca**

- **Obra de captación o bocatoma.** La obra de captación es una estructura hidráulica que permite la captación del agua del río o arroyo y su desviación hacia la central hidroeléctrica para su uso en la generación de energía eléctrica [47]. La construcción de una obra de captación debe ser cuidadosamente planificada para garantizar un suministro constante y seguro de agua para la generación de energía eléctrica [48].

Existen diferentes tipos de obras de captación, incluyendo las de tipo gravitacional y las de tipo presa. Las obras de captación de tipo gravitacional son las más comunes y utilizan la fuerza de la corriente del agua para desviar el flujo hacia la central hidroeléctrica [47]. Por otro lado, las obras de captación de tipo presa utilizan una estructura de presa para retener el agua y desviarla hacia la central hidroeléctrica [49].

En el proyecto se pretende usar una obra de captación de gravedad como se ve en la Figura 11 , debido a que estas son usadas para los sistemas rurales, sin embargo el dimensionamiento se analizará en el siguiente objetivo.

Figura 11. Obra de captación protegida



Nota: imagen tomada de [50]

- **Conducción.** Los canales de conducción son estructuras hidráulicas utilizadas para transportar agua desde una fuente de suministro hasta los puntos de consumo, como sistemas de riego, sistemas de agua potable o plantas de energía hidroeléctrica [51]. Los canales de conducción pueden ser de diferentes tamaños y formas, dependiendo de la cantidad de agua que se va a transportar y de la topografía del terreno.

Dado que la finca se encuentra a una gran distancia de la quebrada, se ha considerado el uso de manguera agrícola de alta presión (ver Figura 12) como sistema de conducción de agua. La elección de este tipo de conducción se basa en varias ventajas. En primer lugar, la manguera flexible permite adaptarse fácilmente al terreno irregular que presenta la finca. Además, al utilizar este tipo de manguera, se reduce la necesidad de utilizar numerosos accesorios, ya que la manguera se puede ajustar a cualquier curva del terreno. En resumen, la utilización de manguera agrícola de alta presión se presenta como una solución eficiente y flexible para llevar el agua desde el río hasta la finca, teniendo en cuenta las características del terreno.

Figura 12. Manguera agrícola de polietileno.



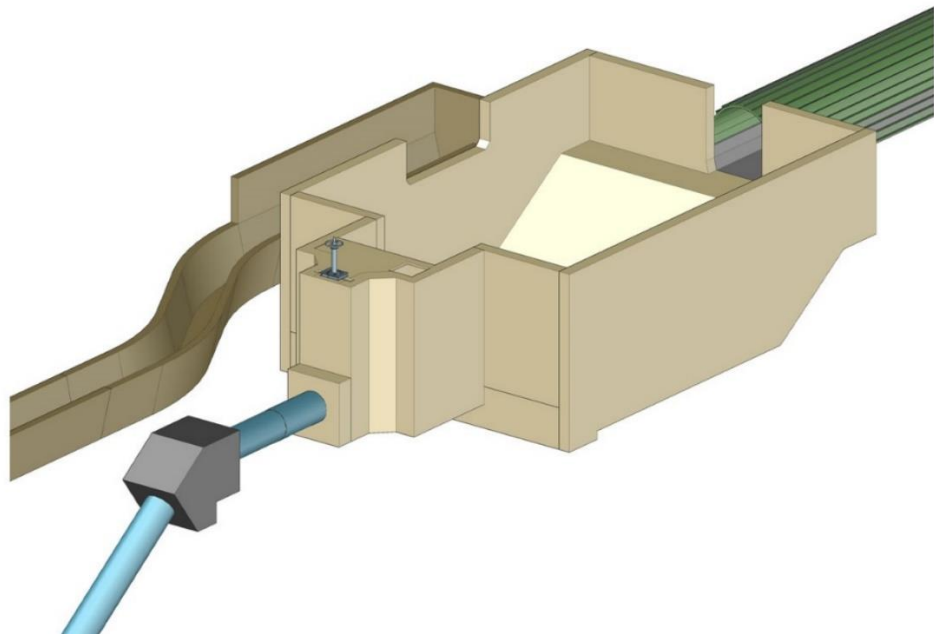
Nota: imagen tomada de MercadoLibre [52]

- **Tanque de carga o presión.** Un tanque de carga es una estructura hidráulica que se utiliza en las plantas de energía hidroeléctrica para almacenar el agua que se utilizará para generar electricidad. Estos tanques pueden ser de diferentes tamaños y formas, y su capacidad de almacenamiento depende del caudal de agua disponible y de la demanda de energía eléctrica [53].

El agua almacenada en los tanques de carga se utiliza para generar electricidad durante las horas pico de consumo, cuando la demanda de energía eléctrica es mayor. Durante las horas de menor consumo, el agua se bombea desde el tanque de carga de vuelta al embalse, donde se almacena hasta el siguiente ciclo de generación de energía [54].

Para el sistema se diseñará un tanque parecido al de la Figura 13, esto con el fin de que el mismo tanque tenga el aliviadero para mantener un nivel estable de agua y en días de lluvia el sistema no genere picos de energía

Figura 13. Tanque de presión con aliviadero



Nota: figura tomada de [55].

- **Tubería de presión.** Las tuberías de presión son un elemento fundamental en la construcción de plantas de energía hidroeléctrica, ya que se utilizan para transportar el agua desde la captación hasta la central hidroeléctrica, donde se convierte en energía eléctrica. Estas tuberías deben ser diseñadas y construidas de manera cuidadosa para soportar la alta presión del agua y garantizar la seguridad y eficiencia de la planta hidroeléctrica [56].

En el diseño del sistema, se ha seleccionado la tubería de manguera flexible de polietileno como la opción preferida para la conducción de presión. Esta elección se basa en diversos beneficios que ofrece. En primer lugar, la manguera brinda flexibilidad en el montaje, lo cual facilita su instalación y adaptación a las condiciones del terreno. Además, al ser flexible, se minimiza la necesidad de utilizar codos o uniones en el sistema, lo que reduce las posibles pérdidas por accesorios y mejora la eficiencia general del sistema.

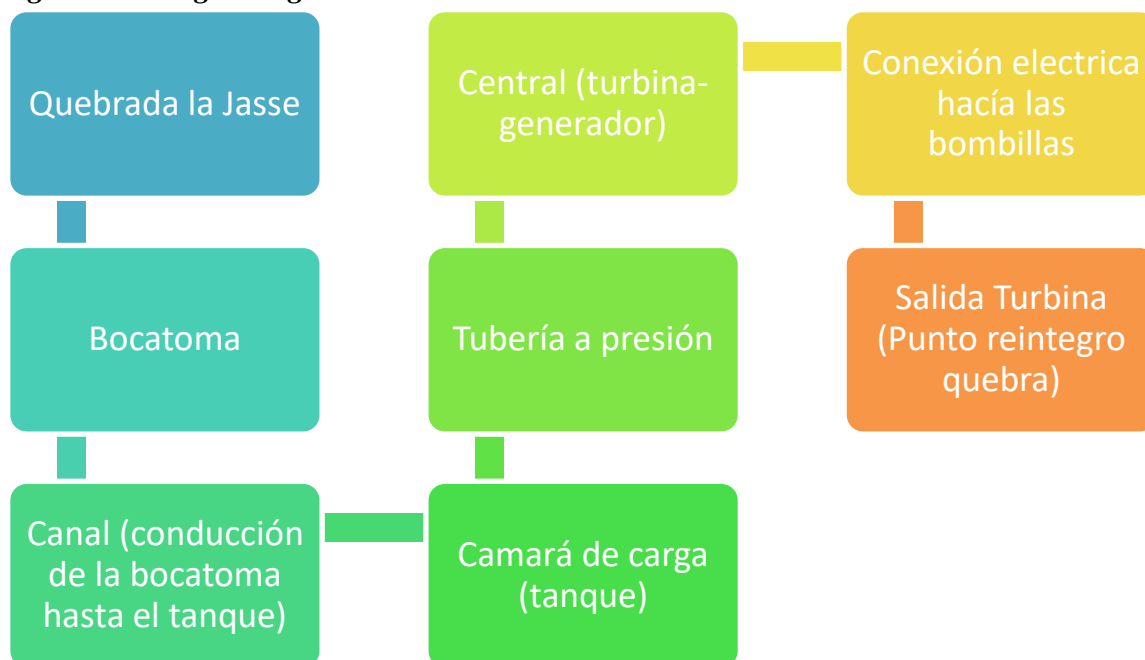
- **Turbina-generador.** Considerando la diferencia de altura existente entre la quebrada y la finca, con un desnivel de 10 metros, se ha tomado en cuenta la opción de utilizar una turbina-generador tipo Kaplan. Esta elección se basa en diversas razones fundamentadas. En primer lugar, las turbinas tipo Kaplan son adecuadas para aprovechar caídas de agua moderadas, lo cual es consistente con la altura disponible en este caso. Estas turbinas son especialmente eficientes en el uso de la energía hidráulica [57].

Por otro lado, las turbinas tipo Kaplan son conocidas por su alta adaptabilidad en una amplia gama de caudales, lo que las hace adecuadas para adaptarse a las fluctuaciones en el flujo de agua de la quebrada, además de que su instalación es versátil [57].

4.1.4 Esquema general de la PCH

Una vez seleccionados los componentes que conformarán la PCH, se presenta el diagrama general en la Figura 14 y el esquema general en la Figura 15.

Figura 14. Diagrama general de la PCH.



El diagrama mostrado en la Figura 14 ilustra el proceso de transformación de la energía hidráulica de la quebrada La Jasse en energía eléctrica utilizada por las bombillas de calefacción. Este proceso se inicia con una obra de captación o bocatoma, que se encarga de recolectar la porción necesaria del caudal de agua que se utilizará. A continuación, el agua es conducida a través de un canal hasta el tanque de almacenamiento. El tanque cumple la función de almacenar una cantidad determinada de agua que será transportada a la pequeña central hidroeléctrica mediante una tubería de presión.

En la central hidroeléctrica, el agua proveniente del tanque se dirige hacia la turbina, la cual está acoplada a un generador. En este punto, la energía hidráulica del agua se convierte en energía mecánica, haciendo que la turbina gire y genere electricidad a través del generador. La energía eléctrica producida en la central es transmitida a las bombillas de calefacción mediante una conexión eléctrica.

Es importante destacar que este proceso permite aprovechar de manera eficiente la energía hidráulica disponible en la quebrada La Jasse, transformándola en energía eléctrica utilizada para la calefacción de las bombillas en la finca. La utilización de una obra de captación, un tanque de almacenamiento, una tubería de presión, una central hidroeléctrica con turbina y generador, y una conexión eléctrica, garantiza un flujo continuo de energía eléctrica y un suministro adecuado de calor para los pollos en el galpón de la finca.

Figura 15. Esquema general de la PCH



El esquema general, nos ayuda a identificar tanto los componentes principales de la PCH como las longitudes de la tubería a presión, canal y altura o caída de agua disponible.

Es importante destacar que una vez que el agua ha pasado por la turbina en la central hidroeléctrica y ha sido utilizada para generar energía eléctrica, el caudal será devuelto al cauce original de la quebrada. Para lograr esto, se emplea una tubería de conducción que permitirá el retorno del agua al curso natural de la quebrada.

La tubería de conducción se encarga de canalizar el agua desde la salida de la turbina hasta el punto de reintegración al cauce de la quebrada. Esta tubería proporciona un medio

seguro y eficiente para el retorno del caudal, evitando cualquier interferencia con el entorno y asegurando que el agua regrese a su curso natural sin afectar el ecosistema circundante.

De esta manera, se establece un ciclo continuo en el que el agua de la quebrada es aprovechada para generar energía eléctrica, y luego es devuelta al cauce sin causar impactos negativos en el medio ambiente. El uso de una tubería de conducción garantiza que el recurso hídrico sea gestionado de manera sostenible y respetuosa con el entorno natural.

Una vez establecido el esquema general de la PCH e identificados sus componentes, el siguiente paso es dimensionar cada uno de ellos. A través de este proceso, se determinarán las especificaciones y características técnicas de cada componente, teniendo en cuenta los requerimientos de la finca y las condiciones de la quebrada.

4.2 Dimensiones de los componentes principales

Para dimensionar correctamente los componentes principales de la PCH que permitirán abastecer de energía al galpón de la finca Peña Negra, es crucial considerar el consumo energético necesario para el funcionamiento de la finca. En este caso particular, se requiere mantener una calefacción adecuada para 600 pollos y según la caracterización que se hizo, el consumo energético total del galpón es de 2.1 kW.

Con esta información, se podrá realizar el dimensionamiento preciso de los componentes de la PCH, asegurando que la planta sea capaz de generar la potencia eléctrica necesaria para abastecer la demanda energética del galpón de forma eficiente y confiable.

La potencia de una central hidroeléctrica es un factor importante para su proceso de diseño y dimensionamiento de sus principales partes, y depende de varios factores, como el

caudal de la quebrada. En el caso de la finca, la quebrada que pasa por ella es la Jasee, cuyo caudal disponible mínimo es de aproximadamente $3.9163 \text{ m}^3/\text{s}$ según la caracterización que se realizó. Este caudal puede ser un factor determinante en la potencia que se puede generar en la finca, ya que la cantidad de agua disponible influye directamente en la capacidad de producción de energía, el caudal de la quebrada proporciona una medida, pero no significa que se va a usar el total de caudal.

Otro aspecto importante para iniciar el diseño de los componentes principales es considerar los rangos de operación de la turbina seleccionada. Para este proyecto se ha elegido por la potencia a entregar a la finca, la cual es de 2.1 kW pero se añadirá un 15% más de consumo para efectos de diseño como factor de seguridad, lo cual nos da una potencia requerida de 2.4 kW y la altura entre el punto de captación y la finca que es de 10 metros. Se escogieron varios modelos de turbina tipo Kaplan que cumplen con la potencia requerida de 2.4 kW, esto se puede apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelos de turbinas

TIPO DE TURBINA	POTENCIA NOMINAL [kW]	MODELO	ALTURA NOMINAL [m]	RANGO DE FLUJO [m^3/s]	TUBERÍA DE PRESIÓN [mm]	RPM NOM	PESO [Kg]
Micro Hydro Generador de turbina Kaplan	3	GL760-LM- (18-20)	5-10	0.09-0.14	160	500-1500	40
Microturbina hidraulica casera de Vortex Power	3	XJD30-10	15-70	0,003-0,015	70	1500	45

Los datos de la tabla fueron proporcionados por el catalogo de la empresa fabricante Forward Hydro Power Equipment Co. Ltd. [58] y por el catalogo de la empresa Foster [59].

Para escoger la turbina se procede a calcular el flujo mínimo requerido debido a la potencia hidráulica máxima que puede tener el sistema.

La potencia hidráulica máxima será igual a la potencia requerida dividida entre la eficiencia que pueda tener la turbina-generador [60]. Esta eficiencia es alrededor de 90% como mínimo para las turbinas tipo Pelton [60].

Ecuación 2

$$\dot{W}_{MAX} = \frac{\dot{W}_{req}}{\eta_{turbina}}$$

Donde:

$\dot{W}_{req} = 2.4 \text{ kW}$ corresponde a la potencia requerida por las bombillas

$\eta_{turbina} = 90\%$ corresponde a la eficiencia mecánica de la turbina – generador.

Entonces la potencia hidráulica del sistema será igual a: $\dot{W}_{MAX} = 2.66 \text{ kW}$

Para calcular el flujo masico \dot{m} se utilizará la Ecuación 3 la cual determina la potencia hidráulica mediante el flujo masico, altura y gravedad

Ecuación 3

$$\dot{W}_{MAX} = \dot{m} * g * h$$

Donde:

$\dot{W}_{MAX} = 2666.66$: potencia hidráulica máxima [W]

\dot{m} : flujo másico [kg/s]

$g = 9.81$: aceleración de la gravedad [m/s^2]

$h = 10$: altura entre el tanque de presión y la turbina [m]

Aplicando la Ecuación 3 se obtiene el flujo masico el cual es de 27.183 kg/s, la densidad del agua es de 997 kg/m³ [60], dividiendo el flujo masico entre la densidad se obtiene un valor de 0.027 m³/s, el cual corresponde al valor del caudal mínimo que debe tener el sistema.

Con el valor del caudal se puede obtener las dimensiones del área de captación de la bocatoma con la Ecuación 4 la cual corresponde a la ecuación del caudal

Ecuación 4

$$Q = A * V$$

Donde:

$Q = 0.027$: caudal [m³/s]

A : área de captación de la bocatoma

$V = 1.77$ [m/s]: velocidad del cauce de la quebrada (Tabla 4)

Aplicando la Ecuación 4 se obtiene que el área de captación es igual a 0.015254 m². ahora como el caudal es constante se puede determinar el área mínima de la tubería de

conducción y de la tubería de presión mediante la Ecuación 5 la cual expresa el área de un círculo.

Ecuación 5

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2$$

Donde:

$A = 0.0154 [m^2]$: *área de la sección requerida*

d : *diámetro interno mínimo [m]*

Desarrollando se obtiene que el diámetro mínimo interno de la tubería es de 0.14 metros o 140 milímetros.

Debido a que la caída de es de 10 metros y que el diámetro de la tubería es de 140 milímetros, se elige la turbina Micro Hydro Generador de turbina Kaplan, la cual cumple con todas las características calculadas. Con las especificaciones que tiene esta turbina-generador vistos en la Tabla 5, se procedió a seguir diseñando el sistema de la PCH.

La altura nominal es de 10 metros, sin embargo existen perdidas por fricción (h_f) que se deben tener en cuenta en el montaje y diseño. Las pérdidas por fricción son de la tubería de polietileno. Estas pérdidas de por fricción son calculadas por la ecuación de Darcy (Ecuación 6)

Ecuación 6

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

Donde:

h_f : altura de pérdida por fricción (m)

f : factor de fricción de Darcy – Weisbach (adimensional)

L : longitud de la tubería (m)

D : diámetro interno de la tubería (m)

v : velocidad del fluido (m/s)

g : aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s²)

La tubería de presión debe de encajar con la tubería de la turbina, la cual tiene un diámetro interno de entrada de 150 milímetros o 0.15 metros. Aplicando la Ecuación 6 se tiene:

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

Donde el factor de fricción para el polietileno se encuentra mediante el diagrama de Moody (

Figura 16), con los valores del número de Reynolds y la rugosidad absoluta (Tabla 6). El número de Reynolds se halla con la ecuación de Reynolds (Ecuación 7)

Ecuación 7

$$Re = \frac{(\rho * v * D)}{\mu}$$

Donde:

$\rho =$ la densidad del fluido [kg/m^3]

$v =$ la velocidad del fluido [m/s]

$D =$ diámetro característico de la tubería por donde fluye el fluido [m]

$\mu =$ viscosidad dinámica del fluido [$kg/(m \cdot s)$]

Para el agua, la densidad (ρ) a 20°C es de 997 kg/m³ [60], y la viscosidad dinámica (μ) es de 0.001 Pa·s (o 0.001 kg/(m·s)) [60]. El diámetro de la tubería es de 0.15 m y la velocidad del fluido se halla con el caudal requerido por la turbina, el cual es de 0.027 m³/s, si se divide por el área transversal de la tubería la cual es de 0.0177 m², entonces obtenemos la velocidad del fluido que da un valor de 1.54 m/s. Por lo cual el número de Reynolds obtenido es de 230307. Con el número de Reynolds y la rugosidad absoluta (Tabla 6), se encuentra el factor de fricción para la tubería mediante el diagrama de Moody (

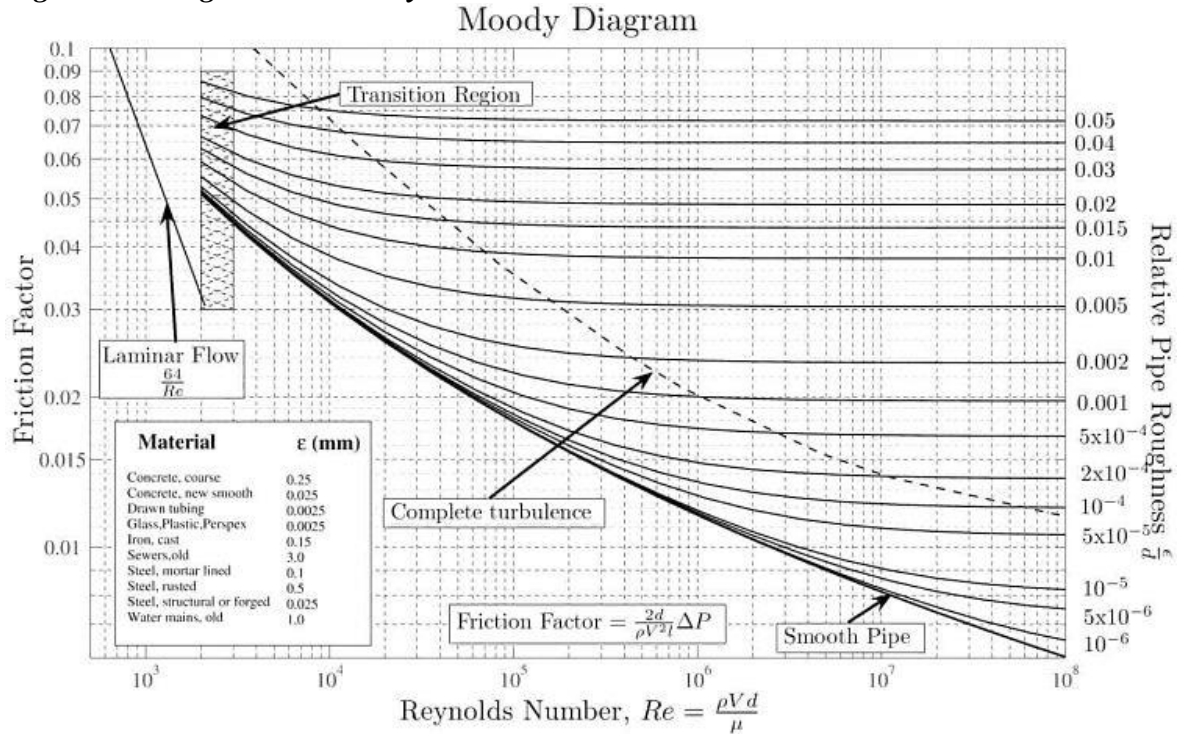
Figura 16), el cual tiene un valor de **0.09**.

Tabla 6. Rugosidad absoluta

MATERIAL	RUGOSIDAD ABSOLUTA
cobre y aluminio (nuevos)	0,001-0,002
PVC y tuberías de plástico	0,0015-0,0017
tuberías de acero comercial	0,045-0,09
acero al carbono (nuevo)	0,02-0,05
hierro galvanizado	0,025-0,15
concreto ordinario	0,3-1

Nota: elaborado por [61]

Figura 16. Diagrama de Moody



Nota: tomado de [62]

Se prosigue con el cálculo de las pérdidas por fricción, entonces el tubo tiene una longitud de 51.89 metros con un diámetro de 0.15 m, la velocidad del fluido es de 1.54 m/s, reemplazando en la Ecuación 6:

$$h_{f_{tuberia}} = 0.09 \left(\frac{21.2}{0.15} \right) * \left(\frac{1.52^2}{2 * 9.81} \right)$$

$$h_{f_{tuberia}} = 1.52 \text{ m}$$

Para las pérdidas de los accesorios, se expresan en términos del coeficiente de pérdida K_L , también llamado coeficiente de resistencia, que se define como:

Ecuación 8

$$K_l = \frac{h_L}{\frac{v^2}{2g}}$$

Donde:

h_l: es la pérdida en términos de altura

v: velocidad del flujo

g: gravedad

Ajustando la ecuación obtenemos las pérdidas menores por accesorios:

Ecuación 9

$$h_l = K_i \frac{v^2}{2g}$$

Para el diseño del sistema se cuenta con la Tabla 7 , la cual nos muestra el factor *k_l* de los accesorios que vamos a usar en nuestro diseño.

Tabla 7. Factor *K_i*

PIEZA, CONEXIÓN O DISPOSITIVO	<i>K_i</i>
Entrada a tope	0.5
Válvula globo	0,45

Nota: elaborado por [63]

Se encuentran las pérdidas por accesorios utilizando la Ecuación 9 con los valores en la Tabla 7, lo cual da unas pérdidas de

$$h_l = (0.5 + 0.45) \frac{1.52^2}{2 * 9.81} = 0.112 \text{ m}$$

Si se suman las pérdidas por accesorios y las pérdidas por fricción se tiene una pérdida total de 1.645 metros. Entonces la altura total de la caída de agua es de 8.379 metros, para verificar que se cumple con la potencia requerida se vuelve hacer el análisis con la Ecuación 3. pero ahora con la altura total

$$W_{real} = \dot{m} * g * h * \eta$$

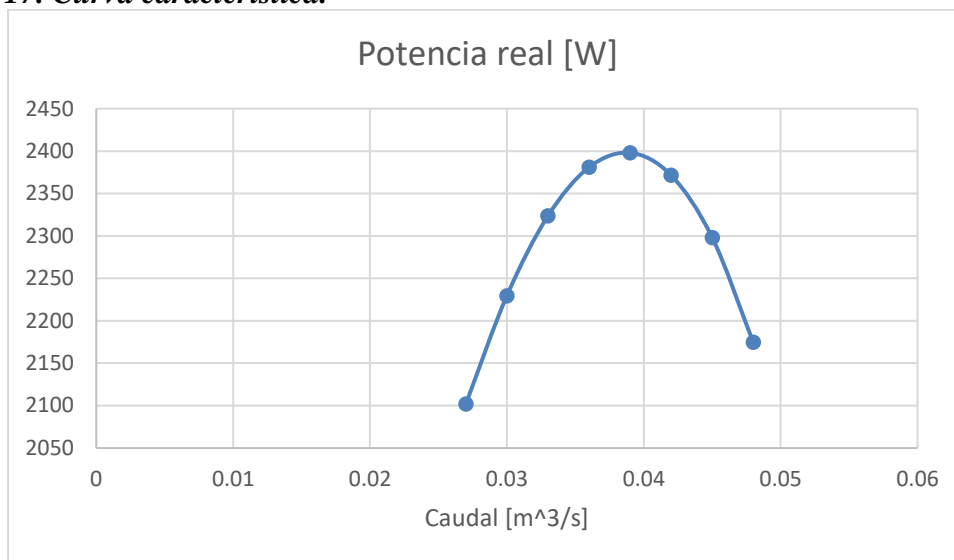
$$W_{real} = 0.027 * 997 * 9.81 * 8.379 * 0.95$$

$$W_{real} = 2101.99 \text{ W}$$

La potencia real es menor a la potencia de consumo, por lo que se debe hacer un proceso de iteración aumentando el caudal. El proceso de iteración se debe hacer debido a que las pérdidas en altura dependen del caudal indirectamente, pues el diámetro de la tubería se mantendrá constante por lo que la velocidad del fluido aumentará, aumentando las pérdidas.

Haciendo un proceso de caracterización del caudal respecto a la potencia se obtiene la siguiente curva característica de la PCH en la Figura 17.

Figura 17. Curva característica.



La potencia máxima que el sistema puede proporcionar a la finca es 2.4 kW, lo cual cumple con la potencia requerida, el caudal que se debe captar será de 0.039 [m³/s], la curva tiene esa forma debido a que cuando pasamos de ese punto máximo, las pérdidas por fricción y accesorios se vuelven críticas.



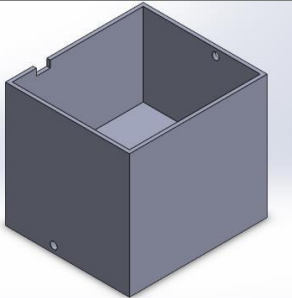
Para determinar el volumen del tanque, se realizó un cálculo simple multiplicando el caudal requerido por el tiempo en el que se desea mantener las bombillas encendidas, el cual es de 6 horas por consideración propia, pues en caso de algún siniestro que ocurra mientras se usan las bombillas, es mejor que el tanque proporcione una operación por el tiempo de uso. Este cálculo arrojó un volumen de 842 m³. Con el fin de facilitar el diseño y la construcción, se optó por utilizar un tanque cuadrado. Este tanque cuenta con un vertedero que tiene un área transversal de 0.5 m², el cual permite el paso del agua cuando el caudal de la quebrada aumenta.

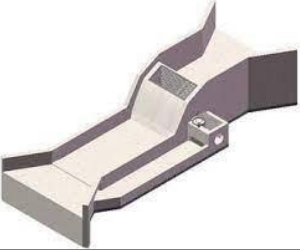

Para garantizar la resistencia y durabilidad del tanque, se decidió utilizar cemento reforzado como material de construcción. Además, se estableció un espesor de 5 cm en las

paredes del tanque para proporcionar la rigidez necesaria. Para aprovechar el terreno y mejorar la capacidad de soportar presiones, se decidió enterrar el tanque en el suelo. Esta ubicación también ayuda a proteger el tanque de posibles daños externos y contribuye a una apariencia más estética en la finca.

Las dimensiones de los componentes principales y el tipo de material de cada uno están establecidas en la Tabla 8 para una mejor comprensión.

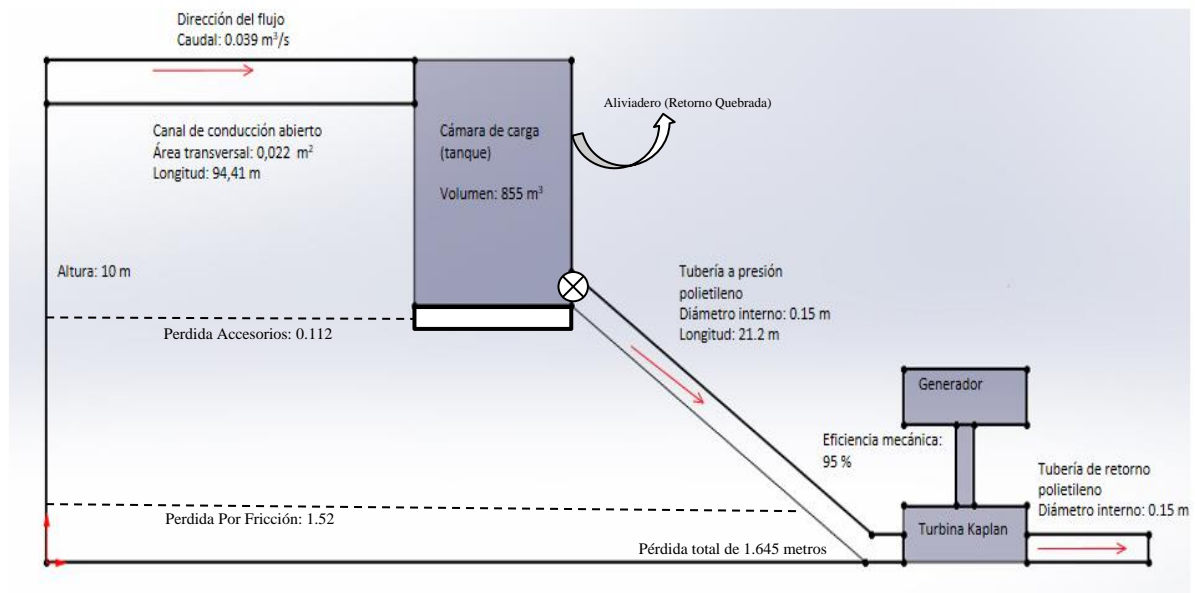
Tabla 8. Dimensiones de los componentes principales

MODELO	NOMBRE	DIMENSIONES	MATERIAL
	Tubería de presión	Diámetro interno de 0,15 m, con espesor de 11,9 mm	Polietileno DIN para altas presiones
	Canal de conducción	Área transversal mínima de 0,022033898 m ²	Cementoreforzado
	Tanque descarga convertederó	Altura x ancho x profundidad 9x10x9.5 con espesor de 5 cm	Cementoreforzado

	Bocatoma gravedad	Área de captación de 0,022033898 m ²
	Turbina - generador	Micro Hydro Generador de turbina Kaplan de cuchilla fija Diámetro de 150 mm

Terminada la Tabla 8, hemos logrado cumplir el objetivo específico de determinar el tamaño adecuado de los componentes principales de nuestra pequeña central hidroeléctrica. Para una mejor comprensión de la PCH se muestra la Figura 18

Figura 18. Montaje general de la PCH

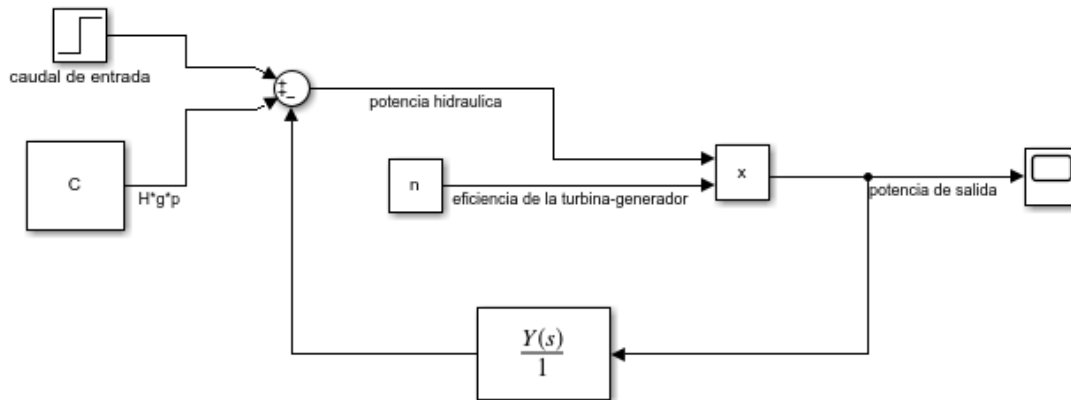


Nota: elaboración propia

4.3 PCH en Toolbox del software Simulink de Matlab

Se presenta el modelo por diagrama de bloques, cuando hay regulación de caudal mediante una válvula (sistema de lazo cerrado Figura 19)

Figura 19. Sistema de lazo cerrado



El sistema se compone de una entrada de señal, que en este caso es el caudal de entrada. Esta señal se multiplica por una constante C , que representa el valor de la multiplicación de la caída de altura (H), gravedad (g) y densidad del agua (ρ), esto corresponde a la línea llamada $H \cdot g \cdot \rho$. Esta constante es considerada como tal debido a que los valores de H , g y ρ también son constantes. La señal de salida del sistema corresponde a la potencia hidráulica, la cual se obtiene al multiplicar el caudal de entrada por la constante C . Posteriormente, esta potencia hidráulica se multiplica por la eficiencia del sistema de turbina generador, para finalmente obtener la potencia de salida de la central hidroeléctrica. En el sistema de lazo cerrado se incorpora una señal de corrección que se toma en la salida de la central hidroeléctrica. Esta señal de corrección tiene como objetivo controlar el caudal de entrada mediante una válvula, con el fin de mantener la potencia de salida dentro de un

rango de valores similares. De esta forma, se asegura que la central hidroeléctrica opere de manera estable y eficiente, y que la potencia de salida se mantenga constante ante posibles variaciones en el caudal de entrada.

Con lo expuesto, se logra cumplir el objetivo específico de simular la pequeña planta hidroeléctrica mediante el uso de bloques y herramientas disponibles en el software Simulink de Matlab. Asimismo, queda concluido el capítulo de resultados y se procede a dar las conclusiones del proyecto.

Conclusiones

En conclusión, el presente trabajo ha logrado diseñar y simular una pequeña central hidroeléctrica que utiliza el cauce de una quebrada para generar energía eléctrica y abastecer el galpón avícola de la finca Peña Negra en Pore, Casanare. La investigación realizada permitió identificar y analizar los elementos que componen una pequeña planta hidroeléctrica, lo que contribuyó a un mejor entendimiento de su funcionamiento y su relación con el medio ambiente.

Asimismo, el dimensionamiento de los componentes principales de la pequeña central hidroeléctrica permitió seleccionar adecuadamente los equipos y materiales necesarios para su construcción, lo que asegura la eficiencia y sostenibilidad de la planta. Además, la simulación de la pequeña central hidroeléctrica a través de bloques en el software Simulink de Matlab, proporcionó información valiosa sobre su comportamiento, lo que permitió hacer mejoras y optimizaciones en el diseño.

Es importante destacar que este trabajo muestra que las soluciones sustentables son una alternativa viable para el abastecimiento de energía eléctrica en áreas rurales, y que estas tecnologías pueden ser adaptadas tanto por grandes como pequeños agricultores. La implementación de soluciones sustentables como la pequeña central hidroeléctrica diseñada en este trabajo, no solo contribuye a la preservación del medio ambiente, sino que también permite a las comunidades rurales ser autosuficientes en su suministro energético

Recomendaciones

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la implementación del proyecto de diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica, aprovechando el cauce de una quebrada para la energización de un galpón ubicado en Pore, Casanare:

- Se recomienda realizar un análisis de viabilidad económica y financiera del proyecto antes de su implementación, con el fin de conocer la inversión necesaria, los costos de operación y mantenimiento, y el tiempo de retorno de la inversión.
- Se sugiere llevar a cabo un estudio detallado del cauce de la quebrada y de la topografía del terreno para garantizar que la instalación de la central hidroeléctrica no afecte el caudal del agua ni cause daños al medio ambiente.
- Es importante realizar una adecuada selección de los equipos y materiales para la construcción de la central hidroeléctrica, con el fin de garantizar su eficiencia y durabilidad.
- Se recomienda implementar un sistema de monitoreo y control de la central hidroeléctrica para asegurar su correcto funcionamiento y prevenir posibles fallas.
- Por último, se sugiere difundir y promover el proyecto como ejemplo de uso de energías renovables y desarrollo sostenible en la región, con el fin de incentivar a otras personas y empresas a implementar proyectos similares.

Referencias

- Unidad de Planeación Minero Energética, «Plan Energetico Nacional 2020-2050,» 2020. [En línea]. Available: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Busqueda.aspx?k=plan%20energ%C3%A9tico%20nacional>.
- 1] 2050,» 2020. [En línea]. Available: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Busqueda.aspx?k=plan%20energ%C3%A9tico%20nacional>.
- EcoInventos, «Generador móvil de energía hidráulica ultrapequeño, tienes agua tienes energía,» 2022. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/generador-movil-energia-hidraulica-ultrapequeno/>.
- 2] agua tienes energía,» 2022. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/generador-movil-energia-hidraulica-ultrapequeno/>.
- M. E. Ortega y M. C. Valdivia, «Electrificación rural con energías renovables en Perú: Caso de estudio del proyecto PUCP.,» *EURE (Santiago)*, 2018.
- 3] en Perú: Caso de estudio del proyecto PUCP.,» *EURE (Santiago)*, 2018.
- H. Krēmere y P. Komadina, «Mini hydro power in Latin America: Current situation and future prospects,» *Renewable Energy*, 2019.
- 4] situation and future prospects,» *Renewable Energy*, 2019.
- F. Criollo Cabrera y M. Quezada Damian, «Diseño de una minicentral hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca (Tesis de pregrado).,» *Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.*, 2011.
- 5] hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca (Tesis de pregrado).,» *Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.*, 2011.
- J. Vivas, «El mapa de 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en Colombia,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia-325892>.
- 6] Colombia,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia-325892>.

Fenavi, «Sector avícola colombiano,» 2021. [En línea]. Available:
7] www.fenavi.org.

Banco Mundial, «Acceso a la energía eléctrica,» 2021. [En línea]. Available:
8] <https://www.bancomundial.org/es/topic>.

Trejos y M. A. Pulido, «Pérdidas del subsector avícola por inadecuada
9] manipulación de hombre-ave,» *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2018.

Asociación Internacional de Hidroelectricidad, «¿Qué es la energía
10] hidroeléctrica?,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.hydropower.org/es/que-es-la-energia-hidroelectrica>. [Último acceso: 14 Marzo 2023].

Energía Limpia XXI, «Ventajas y desventajas de la energía hidroeléctrica,»
11] 2022. [En línea]. Available: <https://energialimpiaparatodos.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-hidroelectrica/>. [Último acceso: 14 Marzo 2023].

J. Barillas, «Impactos ambientales de la construcción de pequeñas centrales
12] hidroeléctricas en ríos y arroyos: una revisión de la literatura,» *Revista Internacional de Ciencias Ambientales*, vol. 5, n° 2, pp. 125-135, 2018.

APCH, «¿Qué son las pequeñas centrales hidroeléctricas?,» 2021. [En línea].
13] Available: <https://www.apch.cl/que-son-las-pequenas-centrales-hidroelectricas/>. [Último acceso: 14 Marzo 2023].

Endesa, «Central Hidroeléctrica,» 2022. [En línea]. Available:
14] <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-hidroelectrica>. [Último acceso: 14 Marzo 2023].

J. González, «Generación de energía eléctrica mediante pequeñas centrales hidroeléctricas,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2012.
15]

F. Herrera y J. Pacheco, «Diseño y simulación de una pequeña central hidroeléctrica de 5MW para la generación de energía eléctrica en la quebrada La Cristalina, Colombia,» *Revista Científica de Ingeniería*, vol. 2, n° 25, pp. 19-29, 2017.
16]

X. Maza y J. Torres, «Diseño hidráulico de pequeñas centrales hidroeléctricas,» *Ingeniería y Universidad*, vol. 21, n° 1, pp. 79-102, 2017.
17]

Khan Academy, «Centrales hidroeléctricas,» [En línea]. Available:
18] <https://es.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/work-and-energy-tutorial/a/hydroelectric-power-plants>.

GES, «Manual de centrales hidroeléctricas: Componentes de la central,»
19] 2016. [En línea]. Available: https://www.ges.es/wp-content/uploads/2018/05/manual_centrales_hidroelectricas_ges.pdf.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo, «La energía hidroeléctrica,»
20] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2016.

J. Chowdhury, M. Masud y S. Mekhilef, «Design and installation of small
21] hydropower systems for rural electrification in developing countries,» *Renewable
and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1614-1621, 2016.

J. López, «Diseño de centrales hidroeléctricas. Universidad Nacional de
22] Colombia,» *Revista Mexicana de Ingeniería Eléctrica*, vol. 7, n° 2, pp. 93-101, 2012.

R. Reyes, «Diseño hidráulico de una central hidroeléctrica. Universidad del
23] Cauca,» 2017.

A. González, «Diseño de turbinas hidráulicas y su selección para centrales
24] hidroeléctricas,» Universidad de los Andes, Bogotá D.C., 2015.

V. Singh, «Hydrology and water resources engineering,» Elsevier, 2004.
25]

V. Muralidharan y S. Ramachandran, «A review of simulation tools for
26] hydraulic and hydroelectric power systems,» *International Journal of Computer
Applications in Technology*, vol. 51, n° 2, pp. 81-88, 2015.

R. Singh y R. Ganguli, «An overview of the modeling and simulation of
27] hydroelectric power plant,» *International Journal of Engineering Research &
Technology*, vol. 6, n° 9, pp. 274-277, 2017.

I. Samora y J. Corral, «Small hydro power plant with low-impact turbine,»
28] *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 8, nº 2, pp.
159-166, 2017.

W. Chen y Z. Wu, «Review of permanent magnet generator for wind power
29] systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 476-490, 2015.

T. Tran y P. Nguyen, «Optimal planning of microgrid with energy storage
30] system for energy management under uncertainty,» *Energy*, vol. 174, pp. 195-204,
2019.

M. Farid y A. Boudghene, «A review on hydrokinetic energy conversion
31] systems and technologies for application in small-scale rural areas,» *Journal of
Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, nº 5, p. 053102, 2019.

M. García, L. Álvarez y J. Martínez, «Evaluación técnica y económica de
32] centrales hidroeléctricas de bajo impacto ambiental,» *Revista Científica
Agroecosistemas*, vol. 8, nº 1, pp. 37-45, 2020.

J. Reyes, «Análisis de la eficiencia de una central hidroeléctrica mediante
33] simulación numérica,» *Revista Colombiana de Ingeniería Eléctrica, Electrónica,
Automática y Telecomunicaciones*, vol. 18, nº 2, pp. 24-33, 2017.

DANE, «Casanare,» 2021. [En línea]. Available:
34] <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/geografia-division-politica-y-censal/regiones-y-divisiones-politicas/departamentos/casanare>.

Alcaldía Municipal de Pore, «Municipio de Pore,» [En línea]. Available:
35] <https://pore-casanare.gov.co/>.

Gobernación de Casanare, «Características del departamento de Casanare,»
36] [En línea]. Available: <https://www.casanare.gov.co/index.php/el-departamento/caracteristicas>.

C. Bernal, Metodología de la investigación: para administración, economía,
37] humanidades y ciencias sociales (4ª ed.), Pearson Educación, 2018.

DNP, «Planeación Nacional para el Desarrollo Sostenible,» 2021. [En línea].
38] Available: <https://www.dnp.gov.co/Plan-Nacional-de-Desarrollo/Paginas/Planeacion-Nacional-para-el-Desarrollo-Sostenible.aspx>.
[Último acceso: 20 Marzo 2023].

Google maps, «Google maps,» 2023. [En línea]. Available:
39] <https://www.google.com/maps/place/Finca+Pe%C3%B1a+Negra/@5.7375106,-72.072517,13200m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e6b8d2319aad41d:0x1df3e2a61e1b974a!8m2!3d5.7329579!4d-72.0523804!16s%2Fg%2F11td05fc32?hl=es>.
[Último acceso: 2023].

- Weather spark, «El clima y el tiempo promedio en todo el año en Municipio Pore Colombia,» 2023. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/25264/Clima-promedio-en-Municipio-Pore-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#:~:text=En%20Municipio%20Pore%2C%20los%20veranos,m%C3%A1s%20de%2036%20%C2%B0C..> [Último acceso: 2023].

- Mercado Libre, «Termostato De Lámpara De Calentamiento De Cultivo Para Pollo,» 2023. [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1274182269-termostato-de-lampara-de-calentamiento-de-cultivo-para-pollo-_JM?matt_tool=41189921&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14635129573&matt_ad_group_id=144675972959&matt_match_type=&matt_network=.](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1274182269-termostato-de-lampara-de-calentamiento-de-cultivo-para-pollo-_JM?matt_tool=41189921&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14635129573&matt_ad_group_id=144675972959&matt_match_type=&matt_network=) [Último acceso: 2023].

- M. K. Das, Hydroelectric Power Plants: Design and Operation, CRC Press, 2014.

- G. Rai, Hydropower Engineering, Khanna publishers, 2010.

- B. P. Singh, Hydropower Engineering Handbook, Wiley, 2014.

- Ministerio de Minas y Energía, Resolución número 0189 de 2012, 2012.

ICONTEC, Normas técnicas colombianas, 2018.

46]

Hiltunen, Palola y Huttunen, «Assessing the effects of hydropower plant intake on fish populations: A review,» *Ecological Engineering*, 2018.

47]

A. Nourbakhsh, «Designing and constructing hydropower tunnels and underground powerhouses,» *New York: Springer.*, 2016.

48]

S. Choudhury, «Review of Hydro Power Plant and Its Components,» *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2019.

49]

J. SMET y C. WIJK, «Small Community Water Supplies: Technology, People and Partnership: Surface Water Intake and Small Dams - Chapter 11. Technical Paper Series 40.,» *Delft (The Netherlands): International Water and Sanitation Centre (IRC)*, 2002.

50]

N. A. Hassan, A. El-Sadek y M. Abou Zeid, «Design and analysis of a rectangular open channel for different flow rates using numerical methods.,» *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 2015.

51]

mercado libre, «Manguera Riego Agrícola 2 Pulgadas Para Alta Presión.,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-610831030-manguera-riego-agricola-2-pulgadas-para-alta-presion-_JM?matt_tool=50518818&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id

52]

=14633851659&matt_ad_group_id=150884578011&matt_match_type=&matt_net
work=g&matt_de. [Último acceso: 2023].

R. Sethi, K. C. Patra y P. Mohapatra, «Optimal operation of hydroelectric
53] power plants under uncertain inflow conditions: A multi-objective approach.,»
Journal of Cleaner Production, 2016.

A. Gupta, A. Ranjan y R. Srivastava, «Design optimization of concrete gravity
54] dam with various arrangements of spillway and outlet using genetic algorithm.,»
Journal of Structural Engineering, 2016.

HYDROPLUS GLOBAL S.A.C., «CH SEÑOR DE MAYO II,» 2021. [En
55] línea]. Available: <https://hydroplusglobal.com/project/ch-senor-de-mayo-ii/>.

P. Sahu y R. Behera, «Design and analysis of penstock pipe used in hydro
56] power plant,» *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2019.

Area Tecnologia, «TURBINAS HIDRAULICAS,» 2020. [En línea].
57] Available: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>.
[Último acceso: 2023].

Forward Hydro Power Equipment Co. Ltd. , «microhydro turbine catalog,»
58] 2019.

Foster, «Pequeño 1KW 3KW 5KW Micro Hydro Generador de turbina
59] Kaplan de cuchilla fija para el hogar o la granja,» 2021. [En línea]. Available:

<https://www.fstgenerator.com/es/small-kaplan-turbine-product/>. [Último acceso: 05 2023].

Y. A. Cengel y J. M. Cimbala., «MECÁNICA DE FLUIDOS, 60] FUNDAMENTOS Y APLICACIONES,» MCGRAW-HILL INTERAMERICANA, 2006.

N. CONNOR, «¿Qué es el factor de fricción de Darcy? Definición,» 2019. 61] [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-factor-de-friccion-de-darcy-definicion/>.

La librería del ingeniero, «El Factor de Fricción de Darcy y las Pérdidas de 62] Energía por Fricción,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.libreriaingeniero.com/2022/01/el-factor-de-friccion-de-darcy-y-las-perdidas-de-energia-por-friccion.html#:~:text=El%20factor%20de%20fricci%C3%B3n%20de%20Darcy%20depende%20primeramente%20de%20la,de%20la%20viscosidad%20del%20fluido> ..

CONAGUA, «Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos 63] de sistemas de riego parcelario,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.hidraulicafacil.com/2017/07/perdida-de-carga-localizada-o-en.html>.

J. Zúñiga, (2018). 64]

Y. T. & K. C. S. Chong, «Small-scale hydropower: Technology and current
65] status,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 407-425, 2018.

M. González, «Impacto ambiental y social de la construcción de una central
66] hidroeléctrica,» *Ingeniería Energética*, vol. 36, nº 2, pp. 145-156, 2015.

R. Hernández Sampieri, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la
67] investigación (6ª ed.)*, Ciudad de México: McGraw Hill, 2014.

E. Henao, «Pequeñas Centrales Hidroeléctricas,» *ACIEM*, 2015.
68]

VOITH, «M-Line – Línea modular para soluciones Small Hydro en Voith,»
69] 2023. [En línea]. Available: <https://voith.com/corp-en/hydropower-components/hycomplete.html?103840%5B%5D=0>.

E. Hernández-Castro, R. H. Lira-Saldivar y C. Godínez, «Estudio de azudes
70] rurales en la cuenca baja del río Cutzamala,» *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2017.

Martínez-Montenegro y et-al, «Hydraulic performance of fixed-crest weirs in
71] terms of energetic, environmental and hydraulic efficiency.,» *Journal of Cleaner Production*, 2019.

AMARILLA y GALLEGOS, «INTA (Instituto Nacional de Tecnología
72] Agropecuaria),» 2020. [En línea]. Available:
<https://inta.gob.ar/documentos/%C2%BFque-es-un-azud>.

J. J. Alarcón, F. Cisneros y M. A. Ibáñez, «Optimal design of an irrigation
73] canal using a genetic algorithm approach,» *Computers and Electronics in
Agriculture*, 2017.

Facultad de Agronomía, «conducción de agua por canales,» 2012. [En línea].
74] Available: <http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Canales2012.pdf>.

R. Oliveira, L. Coelho y L. de Andrade, «Stress analysis in hydroelectric
75] power plant pipelines using finite element method,» *Journal of Mechanical
Engineering and Sciences*, 2019.

N. Khan, M. Ali, M. Umar y N. A. Khattak, «Investigation of the performance
76] of a hydraulic jump energy dissipator for free overfall spillway,» *Journal of
Hydrology*, 2020.

W. Liu, X. Zhang, G. Chen y Y. Zhou, « Structural design and stability
77] analysis of a spillway system for a pumped storage power station,» *Journal of
Hydrology*, 2019.

B. Turgut y H. Sezen, «Design and construction of hydropower tunnels and
78] powerhouse structures,» *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017.

X. Zhang, W. Liu, Y. Zhou y X. Guo, «Structural design and analysis of a
79] hydropower station powerhouse with a semi-underground type,» *Journal of
Hydrology*, 2019.

R. B. Martins, J. A. D. Barbosa Filho, P. V. Rosa y J. A. Araújo, «Evaluation
80] of energy consumption of broiler houses in the state of Goiás, Brazil,» *Engenharia
Agrícola*, 2016.

IDEAM, «RECURSOS HIDROGRAFICOS,» 2013.
81]

SIKLA, «Tuberías de presión,» 2013.
82]