

**Estudio de prefactibilidad de una microcentral hidroeléctrica con fuentes secundarias en el
municipio de Anorí, Antioquia.**

Keny Pérez Piedrahita

Luis Hernando Arenas Jiménez

Sebastián de Jesús Hernández Suárez

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA (REGIONALIZACIÓN)
MEDELLÍN
2025**

NOMBRE DEL TDG

Keny Pérez Piedrahita
Luis Hernando Arenas Jiménez
Sebastián de Jesús Hernández Suárez

**Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Sistemas de Generación y
Distribución de Energía**

Asesor Técnico:

Juan David Velásquez Gómez
PhD (c) Docencia e Innovación, Msc. en Gerencia de Proyectos

Asesor Metodológico:

Arley Fernando Villa Salazar
Msc. Ingeniería

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA (REGIONALIZACIÓN)
MEDELLÍN
2025**

Contenido

1 Planteamiento del Problema	13
1.1 Descripción	13
1.2 Formulación	13
2 Justificación	14
3 Objetivos	15
3.1 Objetivo general	15
3.2 Objetivos específicos	15
4 Estado del arte	16
4.1 Energía y desarrollo territorial	16
4.2 Sistemas de generación hidroeléctrica	20
4.3 Estudios técnicos preliminares	21
4.4 Operación y mantenimiento en sistemas hidroeléctricos	23
5 Metodología	25
6 Resultados	28
6.1 Estudios preliminares para el análisis de viabilidad de un proyecto de generación hidroeléctrica	28
6.1.1 Información socioambiental del proyecto	28
6.1.2 Estudios técnicos	31
6.2 Prediseño técnico de la microcentral hidroeléctrica	35
6.3 Manual técnico de operación y mantenimiento del proyecto	1
7 Conclusiones	1
8 Referencias	1

Lista de figuras

Figura 1. Modelo metodológico propuesto para la obtención y desarrollo de los objetivos	25
Figura 2. Localización del municipio de Anorí dentro del departamento de Antioquia	29
Figura 3. Municipios de la zona de influencia del proyecto.	30
Figura 4. Descripción gráfica del método del flotador	32
Figura 5. Pruebas en los tramos de la quebrada	33
Figura 6. Mapa topográfico del municipio de Anorí	34
Figura 7. Ubicación de la zona de captación y casa de máquinas del proyecto	36
Figura 8. Perfil de elevación del proyecto	36
Figura 9. Registro fotográfico de la ubicación de las obras de captación y casa de máquinas del proyecto.	37
Figura 10. Gráfica para selección de tipo de turbina de acuerdo con caudal y cota	40
Figura 11. Diámetro interno y externo de la turbina tipo pelton	41
Figura 12. Dimensiones del cangilón	42
Figura 13. Dimensiones del distribuidor	42

Lista de tablas

Tabla 1. Energéticos específicos de Anorí	19
Tabla 2. Datos empleados para el prediseño del proyecto	35
Tabla 3. Resultados de generación en kWh	39

Lista Anexos

[Anexo 1. Manual de operación y mantenimiento](#)

[Anexo 2. Profundidad de la quebrada y cálculo del caudal](#)

Resumen

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA CON FUENTES SECUNDARIAS EN EL MUNICIPIO DE ANORÍ, ANTIOQUIA

Kenny Pérez Piedrahita - Luis Hernando Arenas Jiménez - Sebastián de Jesús Hernández Suárez

Este trabajo de grado abordó el problema del acceso limitado a energía eléctrica en zonas rurales del municipio de Anorí, Antioquia, donde muchas comunidades no cuentan con un servicio confiable ni continuo. El propósito del proyecto fue desarrollar un estudio de prefactibilidad para la implementación de una microcentral hidroeléctrica utilizando fuentes secundarias, como alternativa sostenible para mejorar la calidad de vida de la población y contribuir al desarrollo territorial.

La metodología consistió en revisar información secundaria sobre las condiciones topográficas, hidrológicas, geológicas y geotécnicas del área, realizar un prediseño técnico de la central hidroeléctrica y planear un manual de operación y mantenimiento. Como resultado, se encontró que la zona cuenta con condiciones favorables para un sistema de generación de baja escala. Lo más relevante fue: la validación técnica del sitio a partir de datos reales (objetivo 1), la estimación de parámetros clave de diseño como caudal y altura (objetivo 2), y la estructuración de un manual que facilita la operación y el mantenimiento en contextos rurales (objetivo 3).

Este trabajo abre la puerta a futuras investigaciones que profundicen en estudios de impacto ambiental, análisis financieros más detallados, y diseños constructivos que puedan ser implementados por instituciones públicas o privadas interesadas en la electrificación rural sostenible. Además, puede servir de base para proyectos pilotos en otras regiones con características similares.

Palabras clave:

Anorí, energía hidráulica, estudio de prefactibilidad, generación distribuida, microcentrales, sostenibilidad, zonas rurales.

Abstract

This graduate work addressed the problem of limited access to electricity in rural areas of the municipality of Anorí, Antioquia, where many communities do not have reliable and continuous service. The purpose of the project was to develop a pre-feasibility study for the implementation of a micro hydroelectric power plant using secondary sources, as a sustainable alternative to improve the quality of life of the population and contribute to territorial development.

The methodology consisted of reviewing secondary information on the topographic, hydrological, geological and geotechnical conditions of the area, making a technical pre-design of the hydroelectric plant and planning an operation and maintenance manual. As a result, it was found that the area has favorable conditions for a low-scale generation system. The most relevant aspects were: the technical validation of the site based on real data (objective 1), the estimation of key design parameters such as flow and head (objective 2), and the structuring of a manual that facilitates operation and maintenance in rural contexts (objective 3).

This work opens the door to future research that will delve deeper into environmental impact studies, more detailed financial analysis, and construction designs that can be implemented by public or private institutions interested in sustainable rural electrification. In addition, it can serve as a basis for pilot projects in other regions with similar characteristics.

Keywords: Anorí, hydropower, pre-feasibility study, distributed generation, micro plants, sustainability, rural areas.

Glosario

A continuación se presenta el vocabulario asociado con el proyecto de investigación (EPM, 2025).

Capacidad efectiva neta: máxima capacidad de potencia neta (expresada en valor entero en megavatios, MW) que puede suministrar una planta o unidad de generación en condiciones normales de operación. Se calcula como la Capacidad Nominal menos el Consumo Propio de la planta o unidad de generación. Artículo 2º, Resolución CREG 128/1996.

Capacidad nominal: es la rata continua a plena carga de una unidad o planta de generación bajo las condiciones especificadas según diseño del fabricante. Es la capacidad usualmente indicada en una placa mecánicamente vinculada al dispositivo de generación. Artículo 2º, Resolución CREG 128/1996.

Capacidad o potencia instalada: es la carga instalada o capacidad nominal que puede soportar el componente limitante de una instalación o sistema eléctrico.

Captación: estructura hidráulica que capta el agua desde una fuente (río, arroyo, canal o lago) para usarla en la generación de energía eléctrica o en el abastecimiento de agua potable.

Casa de máquinas: también se denomina central. Es una estructura construida para alojar los equipos electromecánicos de generación, y puede estar localizada sobre la tierra (casa a cielo abierto), o enterrada a varios cientos de metros (caverna).

Caudal: cantidad de agua que alimenta una central hidroeléctrica proveniente del curso de un río o de un embalse.

Minicentral: pequeña unidad hidroeléctrica, normalmente de potencia inferior a 10 MW (en Europa), inferior a 4 MW en algunos países de América según la Organización Latinoamericana de Energía, OLADE.

Kilovatio- Kw: igual a mil vatios, se usa habitualmente para expresar la potencia de motores, y la potencia de herramientas y máquinas.

Kilovatio-Hora (kWh): unidad de energía equivalente a la potencia de un kilovatio absorbida o desarrollada durante una hora. Es la unidad típica en la que se mide la producción o el consumo de energía eléctrica.

El kilovatio-hora se usa generalmente para la facturación de energía eléctrica, ya que es más fácil de utilizar que la unidad de energía del sistema internacional de unidades, el julio, la cual corresponde a un vatio-segundo (W•s). El julio es, por tanto, una unidad demasiado pequeña, lo que obligaría a emplear cifras demasiado grandes.

kV: Kilovoltio = 1.000 voltios.

kVA: Kilo Volt Ampere. Es la potencia aparente.

kWh: Kilowatt-hora. Unidad de energía utilizada para registrar los consumos. (Ver Energía eléctrica).

Mantenimiento: conjunto de acciones que se ejecutan en las instalaciones y redes de los servicios públicos para prevenir daños y repararlos cuando se produzcan.

Mantenimiento predictivo: comprende las intervenciones realizables a una unidad generadora en estado de operación o servicio (on line).

Mantenimiento preventivo: intervenciones y acciones de tipo preventivo que se le hacen a una unidad generadora. Para ejecutarlas se requiere que el equipo esté fuera de servicio (off line).

Megavatio (MW): unidad de potencia eléctrica que equivale a un millón de vatios.

Niveles de tensión: la variación de las tarifas por energía y potencia está dada por el nivel de tensión (Voltios V) o voltaje al cual se conectan los equipos de medida en la instalación. Para la industria se aplican los cuatro niveles de tensión. Para el sector comercial y oficial se aplican los tres primeros niveles. Para el sector oficial se aplican los dos primeros niveles. Los Sistemas de Transmisión regional y Distribución Local se clasifican por niveles en función de la tensión nominal así:

Nivel 1: sistemas con tensión nominal menor a 1 KV. Suministrado por la modalidad de trifásica o monofásica.

Nivel 2: sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 Kv. y menor de 30 kv. Suministrado por la modalidad de trifásica o monofásica.

Nivel 3: sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 kv. y menor de 62 kv. Suministrado por la modalidad de trifásica.

Nivel 4: sistemas con tensión nominal mayor o igual a 62 kv. Suministrado por la modalidad de trifásica o monofásica.

Potencia: la capacidad que tiene un equipo eléctrico cualquiera para desarrollar trabajo, a mayor potencia más trabajo. Se mide en vatios (W) de manera que, por ejemplo, un bombillo de 100 W ilumina más que una de 50 W; una bomba de agua de 8kW tiene mayor capacidad de bombeo que una de 4Kw. EPM provee potencia a clientes con grandes demandas de energía, generalmente industriales o comerciales, Es decir pone a su disposición la capacidad eléctrica suficiente para satisfacer la demanda del cliente.

Potencia activa: valor medio en un periodo de la potencia instantánea que absorbe un multipolo de una red eléctrica sinusoidal. Su unidad es el vatio, de símbolo W.

Potencia aparente: módulo de la potencia compleja que absorbe o entrega un multipolo de una red eléctrica sinusoidal. Su unidad es el voltio amperio, de símbolo VA.

Transformador: máquina encargada de subir o bajar la tensión que proviene de los conductores.

Turbina pelton: máquina hidráulica de acción (se mueve por presión de caída del caudal sobre sus aspas) empleada para generar energía eléctrica donde existan saltos grandes y presiones elevadas. Está dotada de un rodete con cucharas (cangilones) dispuestas convenientemente para recibir un chorro de agua regulado y convertir la energía del agua en energía mecánica rotacional.

Vatio: en inglés, watt, en honor a James Watt. Símbolo: W.

Voltios: miden la fuerza o tensión que origina la corriente.

Voltaje: trabajo eléctrico que se realiza para transportar una carga entre dos puntos.

Pérdidas técnicas: energía consumida por los equipos propios de los sistemas de generación, transmisión y distribución.

Introducción

Este trabajo de grado tiene como tema central el desarrollo de un estudio de prefactibilidad para una microcentral hidroeléctrica en el municipio de Anorí, Antioquia, con el propósito de contribuir al acceso a energía eléctrica en comunidades rurales que actualmente enfrentan deficiencias en el suministro. La investigación se realiza en el marco del programa de Tecnología en Generación y Distribución de Energía, con un enfoque práctico y aplicado, que busca vincular el conocimiento técnico con una necesidad real del entorno. El trabajo está pensado como una propuesta que combine el análisis de campo, la revisión documental y la planificación técnica, para sentar las bases de un proyecto viable desde múltiples dimensiones.

El método empleado se basa en una revisión de información secundaria, una caracterización básica del sitio, y un prediseño técnico ajustado a las condiciones del entorno y del mercado. Se complementa con la elaboración de un manual preliminar de operación y mantenimiento. Las principales limitaciones del trabajo están asociadas a la disponibilidad de datos técnicos en campo, la ausencia de simulaciones avanzadas, y la imposibilidad de realizar estudios detallados por fuera del alcance de un trabajo académico de nivel tecnológico.

Como antecedentes relevantes, se destacan experiencias de implementación de microcentrales en zonas rurales de Colombia y América Latina, donde este tipo de sistemas ha demostrado ser una alternativa efectiva para la electrificación rural. Así mismo, el Plan Energético Nacional y políticas de transición energética promueven el uso de energías renovables y descentralizadas, abriendo oportunidades para proyectos como el que se plantea. Estos antecedentes respaldan la pertinencia de estudiar la viabilidad técnica, económica, ambiental y social de una solución energética adaptada al contexto de Anorí.

1 Planteamiento del Problema

A continuación se presenta el planteamiento del problema.

1.1 Descripción

Durante esta investigación se busca dar solución al problema del acceso limitado y poco confiable a la energía eléctrica en zonas rurales del municipio de Anorí, Antioquia, lo cual afecta directamente la calidad de vida y las oportunidades de desarrollo de sus comunidades. A pesar del potencial hídrico presente en la región, no se ha explorado de forma estructurada la posibilidad de implementar una microcentral hidroeléctrica como solución técnica viable, adaptada a las condiciones geográficas y socioeconómicas del territorio.

El problema se encuentra en un contexto rural, con baja cobertura energética y condiciones de difícil acceso, donde las soluciones centralizadas no son eficientes ni económicamente viables. Esta situación es relevante desde una perspectiva tecnológica, al requerir soluciones descentralizadas e innovadoras; desde lo científico, al integrar criterios técnicos de prediseño y evaluación de viabilidad; y desde lo práctico, al buscar un impacto directo en la comunidad. La investigación tendrá un enfoque práctico, al proponer un estudio de prefactibilidad técnica ajustado al contexto y al nivel de formación tecnológica, mediante el cual se espera aportar una solución parcial al problema, sentando las bases para la futura implementación del proyecto.

1.2 Formulación

¿Cómo diseñar un estudio de prefactibilidad técnica para una microcentral hidroeléctrica en Anorí, Antioquia, que permita evaluar su viabilidad como solución de acceso energético para comunidades rurales del municipio?

2 Justificación

La presente investigación es importante porque aborda una necesidad real de comunidades rurales del municipio de Anorí, Antioquia, que presentan limitaciones en el acceso a energía eléctrica confiable y continua. Realizar un estudio de prefactibilidad para una microcentral hidroeléctrica permite explorar una solución sostenible y técnicamente viable que contribuya al desarrollo local, aprovechando fuentes secundarias de energía aún no utilizadas.

Este proyecto es conveniente porque permite integrar conocimientos técnicos adquiridos durante la formación en la Tecnología en Generación y Distribución de Energía, aplicándolos en un caso real que responde a problemáticas del entorno. Además, promueve una formación centrada en la solución de problemas desde una perspectiva práctica, contextualizada y sostenible.

A nivel práctico, la investigación permite estructurar una propuesta que puede ser implementada en el futuro, generando impacto directo en la calidad de vida de la población beneficiaria al mejorar el acceso a servicios básicos que dependen de la energía. En el ámbito social, contribuye a la inclusión energética y al cierre de brechas entre zonas urbanas y rurales, promoviendo la equidad territorial.

Desde la perspectiva tecnológica, la investigación permite aplicar conceptos de diseño, dimensionamiento, selección de equipos y evaluación de sistemas de generación eléctrica con recursos renovables, fortaleciendo competencias propias del perfil ocupacional del tecnólogo. Ambientalmente, promueve el uso de fuentes limpias, reduce la dependencia de combustibles fósiles y fomenta la gestión sostenible del recurso hídrico local.

3 Objetivos

A continuación, se puede encontrar el objetivo general y los objetivos específicos para el desarrollo del trabajo de grado.

3.1 Objetivo general

Desarrollar un estudio de prefactibilidad para un sistema de generación de energía hidroeléctrica mediante fuentes secundarias, evaluando su viabilidad técnica, económica, ambiental y social en el municipio de Anorí, Antioquia.

3.2 Objetivos específicos

- Revisar la información asociada con los estudios preliminares necesarios (topografía, hidrología, geología y geotecnia) que sirven como base para el análisis de viabilidad del proyecto.
- Realizar el prediseño técnico de la central hidroeléctrica, incluyendo las características principales del sistema de generación.
- Planear un manual técnico que contemple las pautas de operación y mantenimiento del proyecto de generación.

4 Estado del arte

A continuación se presenta el estado del arte del proyecto de investigación.

4.1 Energía y desarrollo territorial

El acceso a la energía es crucial para el desarrollo territorial, influyendo directamente en la calidad de vida, la equidad social y el crecimiento económico. En áreas rurales, donde los servicios públicos son limitados, la energía eléctrica es vital para la salud, educación, seguridad, comunicación, productividad y la sostenibilidad ambiental. Aunque Colombia ha mejorado la cobertura energética, persisten disparidades significativas en el acceso en zonas rurales y dispersas, especialmente en regiones históricamente marginadas o de difícil acceso geográfico como la Amazonía, el Pacífico, la Orinoquía, y subregiones del Caribe y los Andes, incluyendo partes de Antioquia (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2024b).

Acceso a la Energía en Zonas Rurales de Colombia

Hacia 2023, se estimaba que más de 8,4 millones de personas en Colombia se encontraban en condición de pobreza energética, muchas de ellas ubicadas en zonas rurales dispersas fuera del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Estas poblaciones, que habitan en aproximadamente 1.600 centros poblados rurales y comunidades aisladas, enfrentan limitaciones en el acceso continuo y de calidad al servicio eléctrico debido a factores como la dispersión geográfica, la topografía compleja, la falta de infraestructura de red, los altos costos de expansión del SIN, y las secuelas del conflicto armado y el abandono institucional (Promigas, Fundación Promigas & Inclusión SAS, 2023; IPSE, 2023).

El acceso a la energía genera impactos positivos en:

Educación: Mejora la iluminación y el acceso a tecnologías.

Salud: Asegura el funcionamiento de centros de salud y la conservación de medicamentos.

Economía rural: Facilita proyectos productivos y microempresas.

Cohesión social y equidad: Reduce desigualdades y fortalece la integración territorial.

Sostenibilidad: Permite el uso de fuentes renovables descentralizadas, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. (Ministerio de Minas y Energía, 2025; UPME, 2025).

Brechas de Acceso a la Energía en Colombia

Situación Nacional

A pesar de una cobertura nacional promedio del 96%, existen profundas desigualdades. Cerca de 500.000 hogares, especialmente en Zonas No Interconectadas (ZNI) como Amazonas, Chocó y Guainía, carecen de servicio eléctrico o lo tienen de forma intermitente y costosa, a menudo dependiendo del diésel. Las causas son la baja densidad poblacional, altos costos de expansión de redes, poca rentabilidad para operadores, conflictos sociales y débil articulación institucional (UPME, 2022; UPME, 2024b).

Marco Normativo y de Política Pública

Colombia ha implementado diversas políticas para reducir estas brechas, como la Ley 1715 de 2014 para promover energías renovables, el CONPES 4075 de 2022 para el acceso universal en ZNI, el PEN 2020-2050 de la UPME para una transición energética territorializada, y los Planes de Energización Rural Sostenible (PERS) con enfoque comunitario (Departamento Nacional de Planeación, 2022; Ministerio de Minas y Energía, 2025; UPME, 2024b).

Brechas Energéticas en Antioquia

Antioquia, a pesar de su potencial hidroeléctrico, presenta disparidades en la cobertura energética. Las subregiones más afectadas incluyen el Bajo Cauca y Nordeste, el Urabá antioqueño, el Suroeste y Magdalena Medio, y algunas áreas del Norte y Occidente. Estas zonas sufren de baja cobertura, infraestructura deficiente, y restricciones por minería ilegal o conflicto armado. El Plan Energético de Antioquia 2020-2030 estima que cerca del 3% de la población departamental, especialmente en áreas rurales dispersas, vive en exclusión energética (Antioquia.gov.co, 2025a; Departamento Nacional de Planeación, 2022).

Políticas Públicas e Iniciativas de Cierre de Brechas

A nivel nacional, programas como el PRONE, el FAZNI, el Plan Nacional de Electrificación Rural (2022-2031) y la Ley 2099 de 2021 buscan expandir el acceso energético con énfasis en renovables. En Antioquia, el Plan Energético Departamental 2020-2030, el programa Antioquia LED y Energía para la Vida, y proyectos de micro-centrales hidroeléctricas comunitarias impulsan la cobertura y la transición energética en zonas rurales (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2025; Departamento Nacional de Planeación, 2022; Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, 2025b; UPME, 2025b; Antioquia.gov.co, 2025b).

Retos y Oportunidades

Los principales retos incluyen los altos costos logísticos para llegar a zonas dispersas, la falta de información catastral y energética, la persistencia del conflicto armado y la limitada capacidad técnica local para operar y mantener sistemas renovables. Sin embargo, existen oportunidades gracias al avance tecnológico (sistemas solares y baterías), la participación comunitaria en la autogestión energética, la cooperación internacional y las alianzas público-privadas, y la inclusión de un enfoque étnico y diferencial en los proyectos (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2025; Departamento Nacional de Planeación, 2022; Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, 2025b; UPME, 2025b).

Brechas Energéticas en el Municipio de Anorí

Anorí, en el Nordeste antioqueño, es un municipio con gran riqueza natural pero importantes rezagos en infraestructura y acceso a servicios básicos, incluyendo la energía eléctrica. Su población de aproximadamente 18.000 habitantes, con un 70% viviendo en zonas rurales dispersas de difícil acceso y economía basada en agricultura y minería artesanal, lo convierte en un municipio PDET (Programa de Desarrollo con Enfoque Territorial).

La electrificación rural en Anorí es crucial para superar rezagos en salud, educación, seguridad y conectividad; apoyar actividades productivas sostenibles; garantizar el arraigo rural; y promover la reintegración de excombatientes. Muchas veredas no están conectadas al SIN y dependen de métodos precarios (plantas diésel, velas, sistemas solares improvisados), con servicio intermitente y de baja calidad. Las causas son la alta dispersión geográfica, la escasa inversión pública, la destrucción de redes por el conflicto armado, el bajo incentivo para operadores y la debilidad en la sostenibilidad de las soluciones instaladas (Antioquia.gov.co, 2025b; Empresas Públicas de Medellín, 2025; UPME, 2024b; Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2025).

Iniciativas en Marcha y Oportunidades en Anorí

Se han implementado proyectos piloto de micro-centrales hidroeléctricas comunitarias, aprovechando la topografía montañosa y fuentes hídricas, aunque enfrentan desafíos de sostenibilidad. La energía solar fotovoltaica también se ha expandido con la entrega de kits solares a viviendas rurales, beneficiando a unas 320 en ZNI de Anorí entre 2021 y 2023, aunque su capacidad es limitada y requiere mejor mantenimiento y capacitación local (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 2025; Empresas Públicas de Medellín, 2025; Ministerio de Minas y Energía, 2025; UPME, 2024b).

Tabla 1. Energéticos específicos de Anorí

Categoría	Descripción
Cobertura	Alta desigualdad entre casco urbano y rural. Cobertura rural estimada en menos del 55%.
Confiabilidad	Servicios intermitentes, sin respaldo técnico.
Tecnología	Predominio de tecnologías no convencionales, sin integración regional.
Capacidades locales	Débil capacitación para operación/mantenimiento de sistemas renovables.
Enfoque territorial	Proyectos desarticulados de los planes de desarrollo rural.

Fuente: (Antioquiadatos, 2022).

Propuesta de Enfoques Sostenibles para la Electrificación Rural en Anorí

Se propone desarrollar sistemas híbridos (solar-hidráulico) con operación comunitaria, crear asociaciones energéticas rurales, ofrecer capacitación técnica local con enfoque en jóvenes rurales, fortalecer la planificación energética municipal, acceder a fondos como FAER y FAZNI con enfoque PDET, e integrar la electrificación a proyectos productivos sostenibles como el turismo ecológico y la apicultura (Antioquiadatos.gov.co, 2022; Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 2025; Departamento Nacional de Planeación, 2022; Empresas Públicas de Medellín, 2025; Ministerio de Minas y Energía, 2025; UPME, 2024b).

4.2 Sistemas de generación hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica transforma la energía potencial del agua en energía eléctrica a través de turbinas y generadores. Este proceso es altamente eficiente en Colombia debido a su topografía y pluviosidad. La potencia generada depende del caudal del agua (Q) y la altura neta (H), junto con la eficiencia del sistema. El proceso implica la captación del agua, su conducción a la turbina a través de tuberías forzadas, la rotación de la turbina para generar energía mecánica, la conversión de ésta en electricidad por un generador, y finalmente, el retorno del agua al río (UPME, 2020).

Tipos de Centrales Hidroeléctricas

Existen tres tipos principales de centrales hidroeléctricas:

Convencionales (con embalse):

Utilizan presas para almacenar agua y regular el caudal, permitiendo la generación continua o según la demanda, como Hidroituango.

Centrales de Paso (Run-of-River):

Operan sin grandes embalses, aprovechando el caudal natural del río. Su impacto ambiental es menor, pero la generación depende directamente de la disponibilidad de agua.

Microcentrales Hidroeléctricas:

Instalaciones pequeñas (< 1 MW), ideales para electrificación rural y comunidades remotas. Son sostenibles, de bajo costo y fácil instalación, cruciales para las ZNI.

(Ministerio de Minas y Energía, 2025a; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2025).

Componentes Principales de una Microcentral Hidroeléctrica

Una microcentral hidroeléctrica se compone de:

1. Presa o captación: Desvía el agua del río.
2. Canal de conducción: Transporta el agua a la turbina.
3. Cámara de carga: Estabiliza el flujo antes de la turbina.
4. Tubería forzada (penstock): Conduce el agua a presión.
5. Turbina hidráulica: Convierte la energía del agua en mecánica (Pelton, Francis o Kaplan).
6. Generador eléctrico: Transforma la energía mecánica en eléctrica.
7. Casa de máquinas: Alberga turbina, generador y controles.
8. Canal de descarga: Retorna el agua al río. (Fundación Endesa, 2025; Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, 2025b).

Parámetros Técnicos Clave

Los parámetros fundamentales para calcular la potencia son:

Caudal (Q): Volumen de agua por segundo (m^3/s).

Altura Neta (H neta): Diferencia de altura efectiva entre la entrada y la turbina, menos las pérdidas.

Potencia Hidráulica (P): Potencia teórica obtenible, calculada por la fórmula:

$P = g \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q \cdot H \cdot \rho$, donde $\eta_t \cdot \eta_g$ es la eficiencia del sistema, ρ la densidad del agua, g la gravedad, Q el caudal y H la altura neta. La potencia se mide en Watts (W). (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2025; UPME, 2025b).

4.3 Estudios técnicos preliminares

Los estudios preliminares son fundamentales para la planificación de proyectos hidroeléctricos, proporcionando información crucial para el diseño, costos y tiempos de

ejecución. Incluyen análisis de topografía, geología, geotecnia, hidrología, ingeniería hidráulica, ingeniería de construcción y evaluación de impacto ambiental y social.

Diversas entidades en Colombia brindan información para estos estudios: IDEAM para hidrología y climatología; SGC para geología y amenazas geológicas; e IGAC para cartografía y catastro (Sio Ingeniería, 2025; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2025a; Servicio Geológico Colombiano, 2025; IGAC, 2025).

Estudios Ambientales y Sociales

Ambientales: La ANLA se encarga de las licencias y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible define políticas y metodologías para asegurar el cumplimiento ambiental.

Sociales y Comunitarios: El DNP proporciona información socioeconómica y guías de participación, mientras que el SISBEN y el DANE ofrecen datos demográficos y de vulnerabilidad para análisis sociales y de población. (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2025; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2025; Departamento Nacional de Planeación, 2025; Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2025; Sisbén, 2025).

Resumen de Inicio y Fin de un Proyecto Hidroeléctrico

La topografía del terreno es un factor determinante en el diseño de una planta hidroeléctrica, ya que afecta la eficiencia, los costos y la sostenibilidad. Aspectos como la altitud, el desnivel, las pendientes, la accesibilidad y los riesgos geológicos son críticos para maximizar la carga hidráulica y minimizar los costos de construcción y mantenimiento. Según la topografía, se diseñan diferentes tipos de plantas: de embalse (en valles profundos), de paso (en grandes inclinaciones) o de bombeo. Una planificación topográfica adecuada garantiza mayor eficiencia, menores costos, menor impacto ambiental y mayor durabilidad (Renovables.blog, 2025).

Después del estudio topográfico, se definen los criterios de localización, considerando aspectos abióticos, bióticos y técnicos. Luego, se realizan estudios detallados de hidrología, geología, cartografía, geotecnia, hidráulica, mecánica y vías. Una vez completados estos estudios, se inician los trámites para obtener los permisos necesarios. La fase de campo incluye el reconocimiento de accesos, encuestas a pobladores, inventario de fuentes de agua, toma de

muestras (agua y suelo) y caracterización de la cobertura vegetal (Sio Ingeniería, 2025).

4.4 Operación y mantenimiento en sistemas hidroeléctricos

La operación y el mantenimiento (O&M) son fundamentales para la eficiencia y vida útil de las centrales hidroeléctricas. Una buena gestión de O&M optimiza la generación, previene fallas costosas y garantiza la seguridad.

Tareas de Operación

Las tareas diarias incluyen el monitoreo y control de equipos (turbinas, generadores), ajuste de parámetros para optimizar la producción, comunicación constante sobre el estado del equipo, y documentación detallada de todas las actividades (NextPlay, 2025; UNIDO, 2019).

Tipos de Mantenimiento

Se aplican varios tipos de mantenimiento:

a. Mantenimiento Preventivo

Se realiza a intervalos regulares para prevenir fallas. Incluye inspecciones periódicas de componentes, lubricación y limpieza (especialmente en turbinas Crossflow), ajustes y calibración de equipos, y pruebas funcionales de válvulas y empaques.

(CEUPE, 2019; Prezi, 2025; CINK Hydro - Energy, 2025; Lufilsur, 2023; NextPlay, 2025).

b. Mantenimiento Predictivo

Se basa en el monitoreo continuo de parámetros para predecir fallas y actuar antes de que causen daños mayores. Incluye análisis de vibraciones (para detectar daños en cojinetes, rotores, etc.), análisis de aceites (para diagnosticar el estado del lubricante y el desgaste), y monitoreo de temperatura y presión y pruebas eléctricas.

(Predictiva21, 2020; CEUPE, 2019; SciELO, 2021; SlideShare, 2020).

c. Mantenimiento Correctivo

Se aplica una vez que la falla ya ha ocurrido, implicando la reparación o reemplazo de equipos. Un alto índice de este tipo de mantenimiento indica deficiencias en el preventivo y predictivo (NextPlay, 2025).

Retos y Consideraciones Específicas

Zonas No Interconectadas (ZNI): La O&M es más compleja por falta de personal técnico cualificado y dificultades logísticas. La capacitación local es fundamental (NextPlay, 2025; UNIDO, 2019; SlideShare, 2020; CFE, 2017; Prezi, 2025; CINK Hydro - Energy, 2025; Repositorio Universidad Técnica de Ambato, 2020; CREG, 2010)..

Tipos de turbinas: Las turbinas Pelton requieren mantenimiento regular de inyectores y rodetes. Las Francis necesitan control continuo por fisuras y monitoreo de aceite y vibraciones. Las Crossflow son de bajo mantenimiento, con revisiones periódicas y lubricación mensual.

Gestión de la seguridad: Es vital contar con procedimientos de seguridad estrictos y notificación de accidentes.

Costos de AOM: Los gastos de administración, operación y mantenimiento son clave para la viabilidad económica, especialmente en microcentrales.

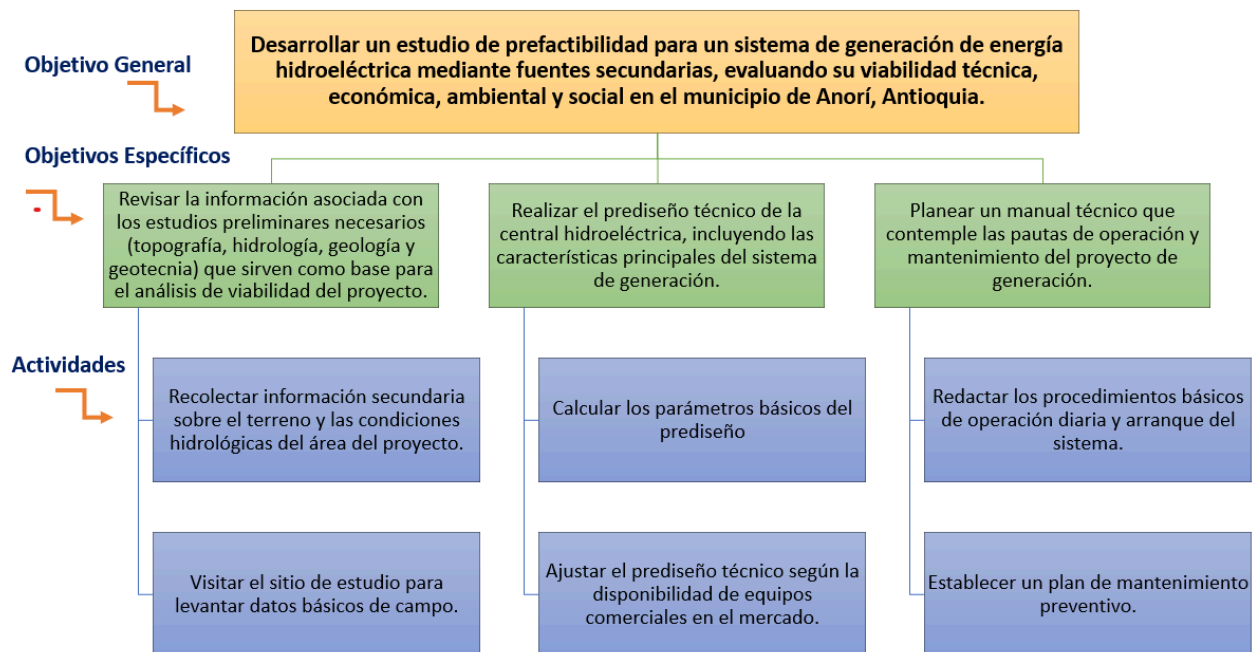
Implementar un plan de mantenimiento robusto, enfocado en la confiabilidad (RCM), es esencial para maximizar la disponibilidad y la vida útil de los equipos hidroeléctricos.

5 Metodología

A continuación se presenta la metodología propuesta con el procedimiento para lograr los objetivos asociada al proyecto de investigación.

A continuación, se presenta una metodología para el desarrollo del proyecto que toma como punto de partida los objetivos a alcanzar. Partiendo del objetivo general, se desglosan los objetivos específicos y se detallan las actividades necesarias para cumplir con cada uno de ellos. Cada actividad se apoya en una serie de tareas que facilitan su ejecución efectiva. En la siguiente figura, se muestra un modelo metodológico que sintetiza la propuesta.

Figura 1. Modelo metodológico propuesto para la obtención y desarrollo de los objetivos



Fuente: Elaboración propia.

Objetivo específico 1: Revisar la información asociada con los estudios preliminares necesarios (topografía, hidrología, geología y geotecnia) que sirven como base para el análisis de viabilidad del proyecto.

Entregable: Resumen técnico con mapas e información del terreno, clima e hidrología del sitio de estudio.

Actividad 1: Recolectar información secundaria sobre el terreno y las condiciones hidrológicas del área del proyecto.

Tareas:

- Consultar la información disponible asociada con mapas topográficos e hidrológicos del municipio de Anorí.
- Consultar estudios previos y artículos académicos sobre geología y geotecnia en bases de datos como Scielo o Google Scholar.

Actividad 2: Visitar el sitio de estudio para levantar datos básicos de campo.

Tareas:

- Realizar un recorrido en el área propuesta para tomar fotografías, registrar altitudes y puntos de interés.

Objetivo específico 2: Realizar el prediseño técnico de la central hidroeléctrica, incluyendo las características principales del sistema de generación.

Entregable: Borrador estructurado del prediseño de la central hidroeléctrica.

Actividad 1: Calcular los parámetros básicos del prediseño

Tareas:

- Estimar el caudal con base en datos históricos y/o mediciones de campo simples.
- Selección de cotas aproximadas para el prediseño de las obras.
- Aplicar las fórmulas asociadas con el prediseño para calcular la capacidad de generación y principales parámetros asociados.

Actividad 2: Ajustar el prediseño técnico según la disponibilidad de equipos comerciales en el mercado.

Tareas:

- Investigar opciones de equipos hidroeléctricos disponibles comercialmente que se adapten a las características técnicas del sistema prediseñado.
- Modificar los parámetros del prediseño para que sean compatibles con los equipos seleccionados y sus especificaciones técnicas.

Objetivo específico 3: Planear un manual técnico que contemple las pautas de operación y mantenimiento del proyecto de generación.

Entregable: Borrador estructurado del manual de operación y mantenimiento del sistema.

Actividad 1: Redactar los procedimientos básicos de operación diaria y arranque del sistema.

Tareas:

- Consultar manuales existentes de sistemas hidroeléctricos similares para identificar rutinas comunes.
- Escribir instrucciones para la puesta en marcha y apagado del sistema.

Actividad 2: Establecer un plan de mantenimiento preventivo.

Tareas:

- Crear una tabla con actividades de mantenimiento, frecuencia y responsables.

6 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el proyecto de grado.

6.1 Estudios preliminares para el análisis de viabilidad de un proyecto de generación hidroeléctrica

En el presente informe, se relacionan aspectos asociados con la geografía, hidrología, geología, geotecnia y topografía de la zona de influencia del proyecto, se hacen recomendaciones para la intervención ambiental y social que impactaran el desarrollo de aspectos técnico económicos del proyecto con el objetivo de establecer la viabilidad de este y una descripción de las principales obras y equipos requeridos.

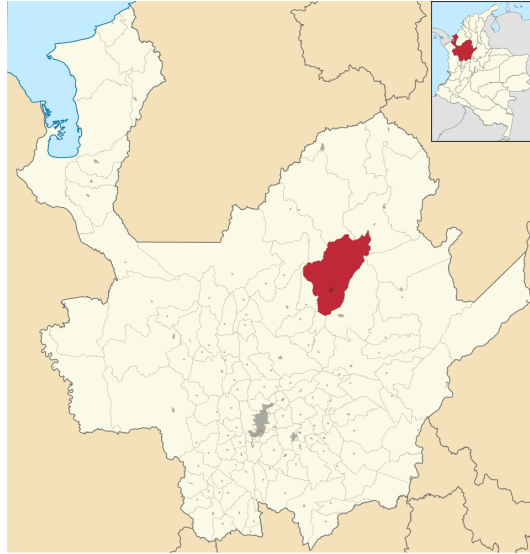
6.1.1 Información socioambiental del proyecto

Se presenta a continuación, información relacionada con la zona de influencia del proyecto, así como los riesgos y recomendaciones a tener en cuenta para la adecuada gestión social y ambiental de este.

Zona de influencia del proyecto

El proyecto se desarrollará en el Municipio de Anorí del departamento de Antioquia, este cuenta con una población de 18.321 habitantes y tiene una densidad de población de 12.7 hab./km², tiene como aeropuertos cercanos el Aeropuerto de Amalfi (22.8 km), Aeropuerto Otú (48.2 km) y Aeropuerto el Tomin (69.1 km), la superficie del municipio es de 144.700 hectáreas (1447.00 km²), tiene una altitud de 1518 msnm y sus coordenadas geográficas son Latitud: 7° 4' 25" Norte, Longitud: 75° 8' 49" Oeste (Municipio.com.co, 2025) y cuya localización dentro del municipio de Antioquia puede ser observada en la siguiente figura:

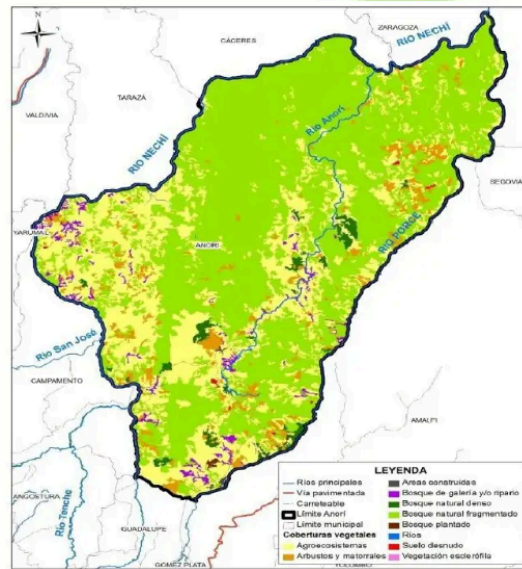
Figura 2. Localización del municipio de Anorí dentro del departamento de Antioquia



Fuente: (Alcaldía de Anorí, 2025)

En la Figura 3, se muestra un fragmento cartográfico del noreste antioqueño, centrado en el municipio de Anorí, donde se propone implementar una microcentral hidroeléctrica en la vereda La Tirana. Este mapa permite identificar la localización geográfica del municipio en relación con otros centros poblados cercanos, como Amalfí, Campamento, Yarumal, Segovia, Remedios y Vegachí, los cuales pueden considerarse parte de la zona de influencia ampliada por su cercanía y vinculación territorial, económica y vial.

Figura 3. Municipios de la zona de influencia del proyecto.



Fuente: (Alcaldía de Anorí, 2025)

Gestión social recomendada para el proyecto

A continuación se presenta un conjunto de recomendaciones que pueden contribuir a una adecuada gestión social del proyecto y priorizar la inversión con la comunidad del municipio de Anorí y sus alrededores:

- Vías terciarias en mal estado lo que dificulta que los campesinos transporten sus productos a otras áreas. Se recomienda realizar rieles o una pavimentación no compacta con tierra, cemento y afirmado entre otros para que estas tengan mayor duración y contribuir al desarrollo de las veredas
- Realizar un censo entre los ganaderos y agricultores para identificar la población que requiera mejorar la calidad de sus tierras y tecnificar sus formas de cultivo asociados con café, caña de azúcar y ganadería que son de mayor impacto en la región, así como realizar convenios con instituciones tecnológicas de educación superior como el SENA y la

Institución Universitaria Pascual Bravo de la ciudad de Medellín para promover uso eficiente de la producción y adecuado manejo técnico administrativo de estos.

- Implementar centros de salud en las veredas o corregimientos alejadas del municipio ya que se identificó que en estos lugares no se cuenta con servicios de respuestas inmediata y las vías son de difícil acceso lo que presenta a la población en general.
- Construir más centros educativos en las zonas rurales que faciliten el acceso a los niños y jóvenes a la educación ya que en algunos lugares queda muy remoto el centro educativo.
- Invertir en la construcción de placas deportivas para promover el deporte en la región.

Gestión ambiental recomendada para el proyecto

A continuación se presenta un conjunto de recomendaciones que pueden contribuir a una adecuada gestión ambiental del proyecto y priorizar la inversión del municipio de Anorí y sus alrededores:

Lo primero que se debe buscar es la concientización de los mineros del municipio de Anorí, ya que como se ve reflejado Anorí es un territorio rico en oro tanto a cielo abierto como subterráneo, pero las comunidades contaminan las aguas con mercurio y otros químicos para la purificación del oro, esto conlleva a que los ríos Anorí y Nechí estén contaminados.

Otra problemática que se ve reflejada es la deforestación para la siembra de cultivos ilícitos lo cual conlleva a la tala de bosques nativos y los suelos por tantos químicos con el pasar del tiempo quedan infértiles.

Concientizar a la población sobre el manejo de las basuras, enseñándoles la correcta separación de los residuos ya que con esto contribuye a que la vida útil del relleno sanitario se extiende, al separar los residuos se pueden generar ingresos para la población en general y se evita enfermedades y plagas.

6.1.2 Estudios técnicos

Hidrología

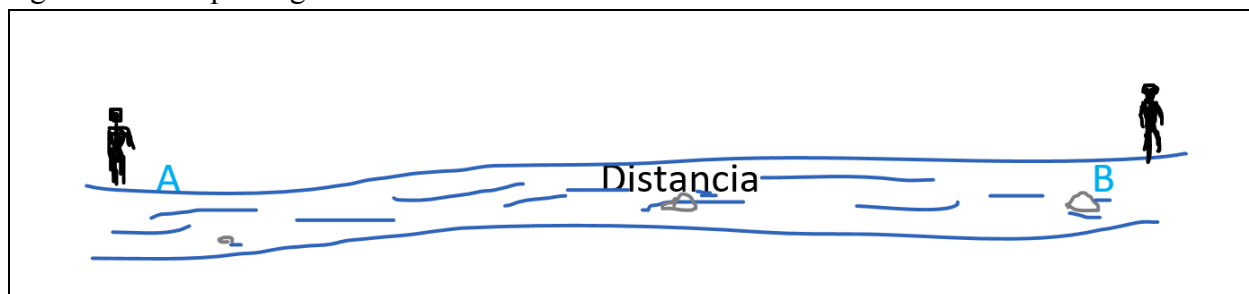
Para el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico, el estudio hidrológico es fundamental, ya que determina la disponibilidad del recurso hídrico, pilar esencial para la viabilidad técnica y

económica del sistema de generación. En el municipio de Anorí, Antioquia, caracterizado por un régimen de precipitaciones bimodal y una rica oferta hídrica gracias a su topografía montañosa, la Quebrada La Tirana presenta las condiciones morfológicas y de caudal que la posicionan como una fuente potencial para el aprovechamiento energético. Si bien la obtención de datos directos de caudal para quebradas menores puede ser limitada a través de estaciones de monitoreo permanentes del IDEAM (IDEAM, 2025a), este estudio de prefactibilidad complementa la información secundaria con cálculos preliminares realizados en campo, los cuales se detallan a continuación.

En la vereda La Tirana del municipio de Anorí, se llevó a cabo un estudio hidrológico inicial para la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) propuesta. La primera fase de este estudio consistió en el cálculo del caudal de la quebrada La Tirana utilizando el método del flotador, el cual se basa en la fórmula $Q=A \cdot V$, donde Q es el caudal, A es el área transversal de la sección del agua y V es la velocidad media del flujo.

El método del flotador implica determinar la velocidad del agua con objetos flotantes; en este estudio, se utilizaron esferas. El procedimiento consistió en que un observador se ubicó en un punto A y otro en un punto B, aguas abajo de la quebrada, habiendo medido previamente la distancia entre ambos puntos.

Figura 4. Descripción gráfica del método del flotador



Fuente: elaboración propia.

Se hicieron dos pruebas en dos tramos diferentes de la quebrada.

Figura 5. Pruebas en los tramos de la quebrada



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de estas mediciones empíricas, aunque preliminares, son suficientes para el prediseño y la evaluación inicial del potencial energético del proyecto. Estos datos sientan las bases para futuras campañas de aforos y estudios hidrológicos más detallados, que permitirán validar los parámetros y optimizar la configuración definitiva del sistema de generación.

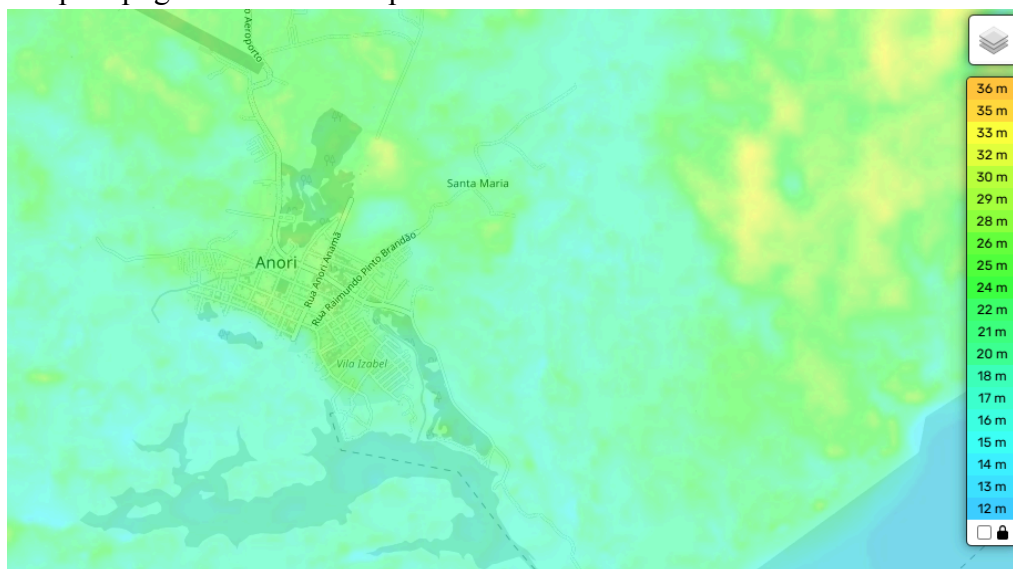
Topografía

Anorí se caracteriza por su topografía abrupta, con variaciones extremas de altitud en un radio de 3 kilómetros, donde se registra un cambio máximo de 460 metros y una altitud promedio sobre el nivel del mar de 884 metros. En un radio de 16 kilómetros, las variaciones extremas de altitud alcanzan los 1.731 metros, mientras que en un radio de 80 kilómetros se llega a los 2.979 metros.

En cuanto a la cobertura del terreno, en un radio de 3 kilómetros, el área está compuesta por árboles (75 %), pradera (14 %) y arbustos (11 %). En un radio de 16 kilómetros, la cobertura arbórea aumenta al (92 %). En un radio de 80 kilómetros, la cobertura arbórea es del (80 %).

La siguiente figura muestra el mapa topográfico de Anorí, acompañado de información sobre mapas topográficos gratuitos que, aunque no contienen curvas de nivel detalladas, son adecuados para el nivel de estudio requerido.

Figura 6. Mapa topográfico del municipio de Anorí



Fuente: (Topographic-Map.com, 2025)

Geología y geotecnia

En cuanto a la caracterización geológica y geotécnica del sitio propuesto para la microcentral hidroeléctrica en Anorí, se realizó una revisión documental a partir de fuentes secundarias, ya que no fue posible efectuar estudios de campo detallados dentro del alcance del presente trabajo. La información recopilada no evidenció riesgos geológicos significativos que impidan el desarrollo del proyecto, aunque se resalta la necesidad de realizar estudios geotécnicos específicos en etapas posteriores, particularmente en las zonas de captación y casa de máquinas. Esta recomendación es especialmente relevante dado que la topografía del municipio de Anorí es abrupta, con variaciones altitudinales significativas que podrían influir en la estabilidad del terreno (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2025; Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2025).

La información geotécnica detallada será fundamental para validar la viabilidad estructural de las obras proyectadas, incluyendo la evaluación de suelos, análisis de estabilidad de taludes y capacidad portante en las áreas críticas. Según las buenas prácticas en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos, este tipo de estudios debe integrarse en la fase de ingeniería de detalle para garantizar la seguridad operativa a largo plazo y reducir riesgos asociados a asentamientos diferenciales o fallas estructurales (Sio Ingeniería, 2025; UPME, 2020).

En conclusión, aunque la geología del área no representa impedimentos aparentes para la ejecución del proyecto, se recomienda realizar campañas de sondeo, análisis de laboratorio y modelaciones geotécnicas como parte esencial del desarrollo técnico en fases futuras. Estos estudios permitirán confirmar la estabilidad del sitio y ajustar el diseño según las condiciones reales del terreno, asegurando así la sostenibilidad del sistema de generación planteado.

6.2 Prediseño técnico de la microcentral hidroeléctrica

Para el prediseño técnico de la microcentral hidroeléctrica, se tomó como referencia bibliográfica los textos Pequeñas centrales hidroeléctricas del profesor Ramiro Ortiz Flórez de la universidad del Valle (Ediciones de la U, 2025) y el documento Memorias del curso de centrales hidráulicas de la universidad de Antioquia (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

En la siguiente tabla se presentan los datos asumidos para los cálculos del prediseño.

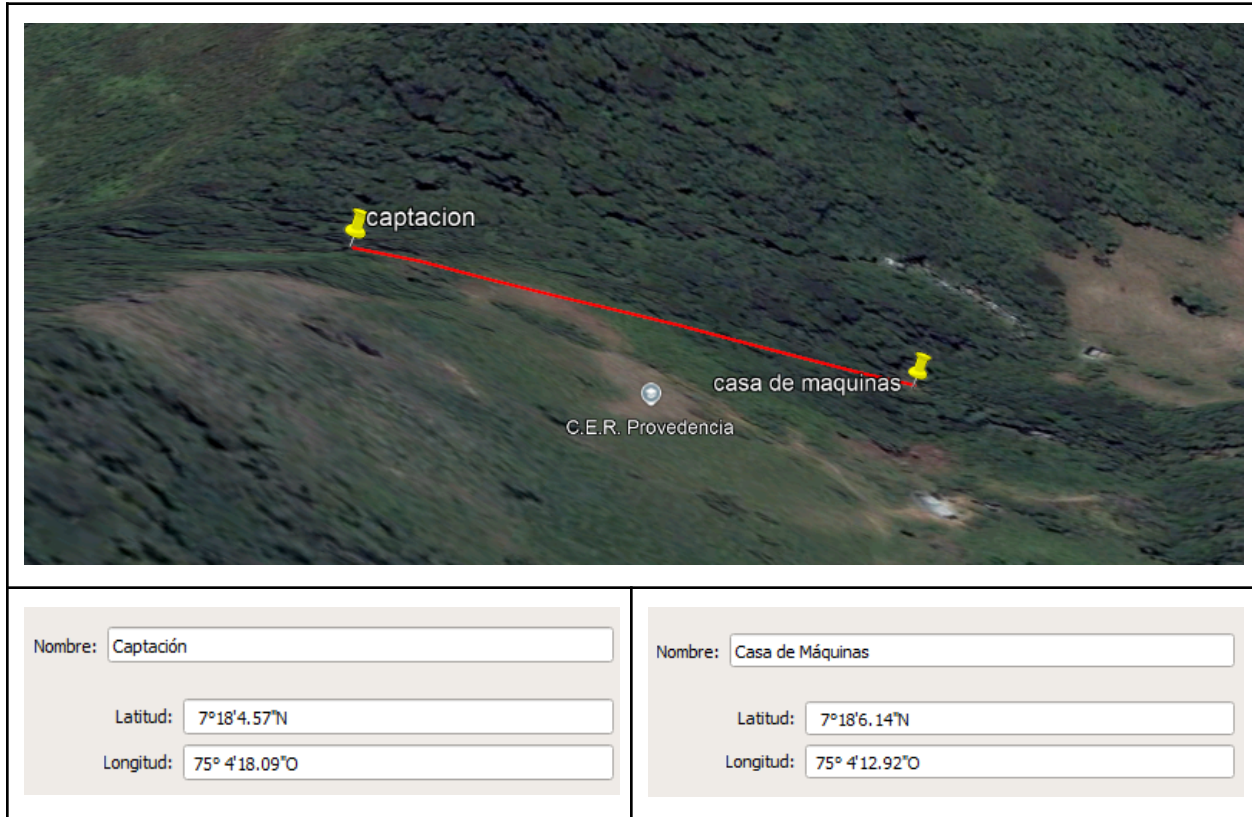
Tabla 2. Datos empleados para el prediseño del proyecto

Dato	Valor
Q de diseño (m ³ /s)	0.2
Altura de captación (H captación msnm)	517
Coordenadas de captación	7°18'4.57"N ; 75° 4'18.09"O
Altura de turbina (H casa de máquinas msnm)	454
Coordenadas de casa de máquinas	7°18'6.14"N ; 75° 4'12.92"O
Gravedad (g)	10
Eficiencia de los equipos (η)	0.88
Coefficiente de pérdidas en la rejilla circular (ξ_R)	1.8
Coefficiente de pérdidas en la entrada (ξ_E)	0.5
Coefficiente de pérdidas para codos de 30° (ξ_R)	0.165
Velocidad del río (m/s)	0.78
φ Coeficiente de la tobera	0.98
ρ del Agua (1000 kg/m ³)	1000

Fuente: elaboración propia y con base en (Ediciones de la U, 2025) (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

A continuación se muestra en google earth con la ubicación de la zona de captación y casa de máquinas del proyecto, así como su perfil de elevación.

Figura 7. Ubicación de la zona de captación y casa de máquinas del proyecto



Fuente: elaboración propia con la ayuda de google earth

Figura 8. Perfil de elevación del proyecto



Fuente: elaboración propia con la ayuda de google earth

Figura 9. Registro fotográfico de la ubicación de las obras de captación y casa de máquinas del proyecto.



Zona de captación



Zona de casa de máquinas

Fuente: elaboración propia con la ayuda de google earth.

A continuación se describen los pasos y ecuaciones utilizados para los cálculos:

Paso 1: Cálculo de la potencia bruta (sin pérdidas)

Para el cálculo de la potencia bruta se hizo uso de la ecuación (1) (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

$$P_{Bruta} = g * \eta * Q * H_{bruta} * \rho \quad (1)$$

$$\text{Donde } H_{bruta} = H_{Captación} - H_{casa de máquinas} \quad (2)$$

$$H_{Bruta} = 63 [m]$$

$$P_{Bruta} = 110 [kW]$$

Paso 2: Cálculo de la potencia neta (con pérdidas)

Para el cálculo de la potencia neta se hizo uso de la ecuación (3) (Ediciones de la U, 2025).

$$P_{neta} = g * \eta * Q * H_{neta} * \rho \quad (3)$$

$$\text{Donde } H_{bruta} = H_{Captación} - H_{casa de máquinas} - h_{totales} \quad (4)$$

donde $h_{totales}$ son las pérdidas totales del sistema.

$$h_{\text{totales}} = h_{\text{rejilla}} + h_{\text{entrada}} + h_{10 \text{ codos}} + h_{\text{válvula}} \quad (5)$$

Donde h_r son las pérdidas en la rejilla a la entrada de la tubería

Donde h_e son las pérdidas en la la entrada de la tubería

Donde h_c son las pérdidas causadas por los cambios de dirección en los codos de la conducción.

- **Cálculo de pérdidas en la rejilla**

$$h_r = \xi_R \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

Donde V es la velocidad del río; g la gravedad y ξ_R el coeficiente de pérdidas de la rejilla.

$$h_{\text{rejilla}} = 0.05 [m]$$

- **Cálculo de pérdidas en la entrada**

$$h_E = \xi_E \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

Donde V es la velocidad del río; g la gravedad y ξ_E el coeficiente de pérdidas en la entrada de la tubería.

$$h_{\text{Entrada}} = 0.02 [m]$$

- **Cálculo de pérdidas en los codos**

$$h_{c1} = \xi_c \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

Donde V es la velocidad del río; g la gravedad y ξ_c el coeficiente de pérdidas de un codo de 30° .

$$h_{1 \text{ codo}} = 0.1 [m]$$

Como se presupuesta que la conducción tenga aproximadamente 10 codos de 30° de acuerdo a lo revisado en campo.

$$h_{10 \text{ codos}} = 10 (h_c) \text{ se tienen que } h_{10 \text{ ct}} = 0.05 [m]$$

- **Cálculo de pérdidas en la válvula**

$$h_{v\acute{a}lvula} = \xi_v \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

Donde V es la velocidad del ría; g la gravedad y ξ_v el coeficiente de pérdidas de una válvula de tipo esférica.

$$h_{v\acute{a}lvula} = 0.03 [m]$$

De acuerdo con la ecuación (5)

$$h_{totales} = 0.12 [m]$$

De acuerdo con la ecuación (4)

$$H_{neta} = 62.88 [m]$$

Finalmente de acuerdo con la ecuación (3)

$$P_{Neta} = 109.78 [kW]$$

Paso 3: Generación (kw)

De acuerdo con las ecuaciones (9), (10) y (11)

$$\text{GENERACIÓN DIARIA} = P_{neta} (kW) * 24 \text{ horas} \quad (10)$$

$$\text{GENERACIÓN MENSUAL} = G_{Diaria} (kW) * 30 \text{ días} \quad (11)$$

$$\text{GENERACIÓN ANUAL} = G_{Mensual} (kW) * 12 \text{ meses} \quad (12)$$

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3. Resultados de generación en kWh

Generación	Valor (kWh)
Diaria	2635
Mensual	79044
Anual	948524

Paso 4: diámetro de la tubería de conducción

Para el cálculo del diámetro de la tubería se hizo uso de la fórmula de FAHLBUSCH y cuya ecuación se presenta a continuación (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

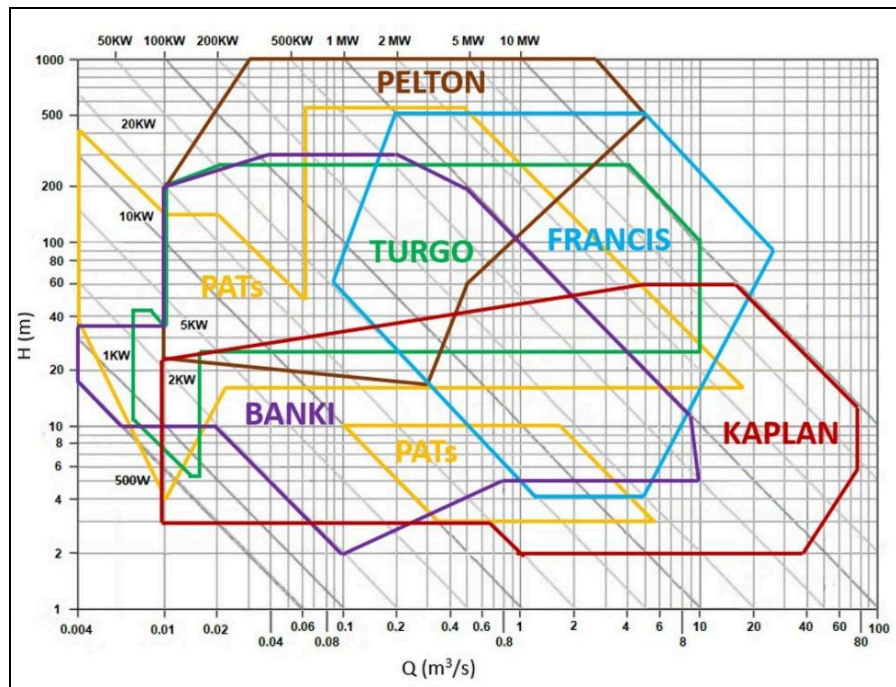
$$D = 0.52 H^{(-1/7)} \left(\frac{P_{neta}}{H_{neta}} \right)^{(3/7)} [m] \quad (13)$$

$$D = 0.4 [m]$$

Paso 5: Preselección de la turbina

De acuerdo con los datos obtenidos de caudal y altura neta, se selecciona una turbina tipo pelton con base en la figura mostrada a continuación.

Figura 10. Gráfica para selección de tipo de turbina de acuerdo con caudal y cota



Fuente: (Rodríguez-Pérez, Pulido-Calvo, & Cáceres-Ramos, 2021)

Paso 6: Cálculo del diámetro del chorro (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

$$D_j = \sqrt{\frac{P_{Neta}}{9.81 * \eta * H_{Neta} * \pi * \varphi * \sqrt{2 * g * H_{Neta}}}} [m] \quad (13)$$

Donde:

η es la eficiencia conjunta de los equipos (Generador * Turbina * transformador)

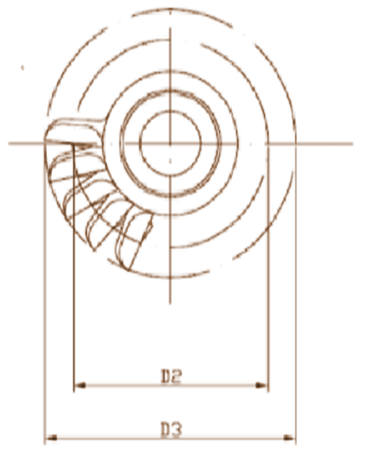
H_{Neta} = es la altura neta; φ = es el coeficiente de la tobera; g = gravedad = 10

$$D_j = 0.043 \text{ [m]}$$

Paso 7: Cálculo del diámetro interno y externo de la turbina (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

En esta sección calcularemos el diámetro interno (D_2) y externo (D_3) de la turbina tipo pelton como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11. Diámetro interno y externo de la turbina tipo pelton



Cálculo de diámetro interno (D_2) de la turbina

$$D_2 = \frac{D_j [250.74 - (1.796 * \eta_{SJ})]}{\eta_{SJ}} \text{ [m]} \quad (14)$$

Donde η_{SJ} = *Velocidad específica por chorro*

$$\eta_{SJ} = 85.49 H_{Neta}^{(-0.243)} \text{ y } \eta_{SJ} = 31.3 \quad (15)$$

Reemplazando (15) en (14) obtenemos que $D_2 = 0.27 \text{ [m]}$

Cálculo de diámetro externo (D_3) de la turbina

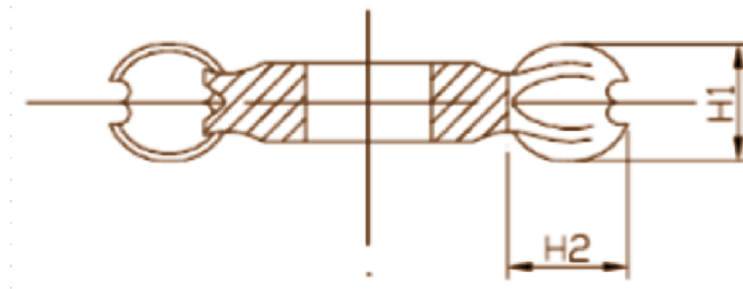
$$D_3 = D_2 [1.028 + (0.137 * \eta_{SJ})] \text{ [m]} \quad (16)$$

$$D_3 = 0.39 [m]$$

Paso 8: Cálculo de las dimensiones del cangilón (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

En esta sección calcularemos las dimensiones Alto (H_1) y ancho (H_2) del cangilón como se muestra en la siguiente figura.

Figura 12. Dimensiones del cangilón

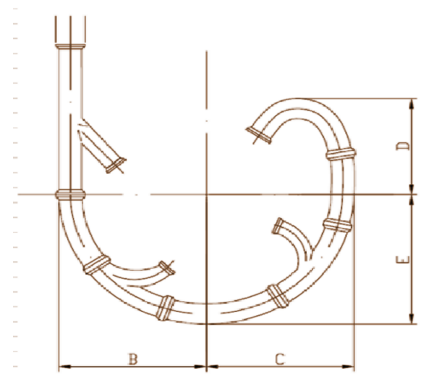


Fuente: (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

Paso 9: Cálculo de las dimensiones del distribuidor (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

En esta sección calcularemos las dimensiones B, C, D, E del distribuidor como se muestra en la siguiente figura.

Figura 13. Dimensiones del distribuidor



Fuente: (Valencia Betancourt & Moncada Medina, 2007).

$$B = 0.595 + (0.694 * L)$$

$$C = 0.362 + (0.68 * L)$$

$$D = (-0.219) + (0.70 * L)$$

$$E = 0.43 + (0.7 * L)$$

$$\text{Donde } L = 0.78 + (2.06 * D_3)$$

De acuerdo con las anteriores fórmulas se tiene que:

$$B = 1.69m ; C = 1.44m ; D = 0.89 m ; E = 1.5m \text{ teniendo } L = 1.59m$$

6.3 Manual técnico de operación y mantenimiento del proyecto

Como resultado del tercer objetivo específico, se elaboró el Manual de mantenimiento para la PCH La Tirana – Anorí, Antioquia, documento técnico que define las pautas y procedimientos necesarios para garantizar la operación segura, eficiente y prolongada de una pequeña central hidroeléctrica con turbina Pelton vertical. Este manual contempla directrices para el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, así como la planificación anual de actividades en los sistemas eléctricos, hidráulicos y de control.

Incluye normas generales de operación, perfiles del personal requerido, protocolos de seguridad (LOTO, EPP, EPC), indicadores de desempeño (KPIs), y una guía detallada de mantenimiento por subsistemas como generador, transformadores, SCADA, UPS, baterías y tableros eléctricos. También se abordan aspectos regulatorios y normativos, alineados con RETIE, ISO 45001, ISO 50001, NTC 2050 y las recomendaciones del fabricante.

El documento servirá como herramienta base para la implementación operativa del proyecto, aportando al cumplimiento de los estándares técnicos y ambientales requeridos para este tipo de infraestructura en el contexto rural de Anorí.

Este manual se adjunta como Anexo 1 del presente trabajo de grado.

7 Conclusiones

- La revisión de los estudios preliminares de topografía, hidrología, geología y geotecnia, a partir de fuentes secundarias y la información disponible para Anorí, ha permitido establecer las bases técnicas esenciales para el análisis de viabilidad del proyecto de microcentral hidroeléctrica. Se identificó que las características topográficas del Nordeste antioqueño, específicamente en Anorí, ofrecen desniveles y cursos de agua favorables para el aprovechamiento hidroeléctrico. Los datos hidrológicos disponibles son suficientes para estimar caudales potenciales, y la información geológica y geotécnica preliminar no reveló impedimentos insuperables, aunque sí resaltó la necesidad de consideraciones detalladas en fases posteriores para garantizar la estabilidad de las obras. Esta recopilación de información valida el potencial inicial del sitio y sienta un precedente sólido para el prediseño y la evaluación del proyecto
- El prediseño técnico de la microcentral hidroeléctrica, basado en los parámetros hidrológicos y topográficos identificados, ha permitido dimensionar los componentes clave del sistema de generación. Se determinaron las características principales de la captación, el canal de conducción, la tubería forzada, la cámara de carga, la turbina hidráulica (posiblemente tipo Pelton o Francis, dadas las condiciones), el generador eléctrico y el canal de descarga. Este prediseño conceptual valida la posibilidad de instalar una solución energética en el municipio de Anorí, proporcionando una estimación de la potencia hidráulica aprovechable y delineando la configuración general de la planta, lo cual es fundamental para las etapas subsiguientes de ingeniería de detalle y evaluación económica.
- Se ha desarrollado un manual técnico exhaustivo que detalla las pautas de operación y mantenimiento para el proyecto de microcentral hidroeléctrica. Este manual aborda los diferentes tipos de mantenimiento (preventivo, predictivo y correctivo), establece procedimientos de seguridad, especifica la secuencia de actividades de mantenimiento en sistemas eléctricos y describe las normas específicas para la operación y el cuidado de los equipos, incluyendo turbinas y generadores. La creación de este manual es crucial para la sostenibilidad a largo plazo del proyecto, ya que proporciona una guía clara para el personal local y las comunidades, asegurando el funcionamiento eficiente, la prolongación de la vida

útil de los equipos y la prevención de fallas, elementos vitales para el éxito de una iniciativa energética en Zonas No Interconectadas.

- El estudio de prefactibilidad para un sistema de generación de energía hidroeléctrica en el municipio de Anorí, Antioquia, basado en fuentes secundarias, ha demostrado la **viabilidad técnica y potencial ambiental y social** del proyecto. La revisión de estudios preliminares confirmó la disponibilidad de recursos hídricos y condiciones topográficas favorables, permitiendo un prediseño técnico coherente con el potencial energético identificado. Asimismo, la elaboración de un manual de operación y mantenimiento subraya un compromiso con la sostenibilidad a largo plazo y la apropiación local del proyecto. Si bien este estudio preliminar sugiere un escenario prometedor para abordar las brechas energéticas en Anorí, la confirmación de la viabilidad económica dependerá de un análisis financiero más profundo que considere los costos de inversión y operación detallados, así como los mecanismos de financiación y tarifas aplicables a la región. En resumen, este trabajo establece una base sólida para avanzar hacia fases más detalladas de ingeniería, con el potencial de transformar el acceso a la energía y contribuir significativamente al desarrollo territorial sostenible en el municipio.

8 Referencias

- Antioquia.gov.co. (2025a). Plan Energético de Antioquia 2020-2030. Recuperado de <https://www.antioquia.gov.co/>
- Antioquia.gov.co. (2025b). Programas y Proyectos de Energía en Antioquia. Recuperado de <https://www.antioquia.gov.co/>
- Antioquiadatos.gov.co. (2022). Indicadores de Cobertura Energética en Antioquia. Recuperado de <http://www.antioquiadatos.gov.co/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2025). Información sobre Licenciamiento y Estudios de Impacto Ambiental. Recuperado de <https://www.anla.gov.co/>
- CEUPE. (2019). Mantenimiento Predictivo y Preventivo de Centrales Hidroeléctricas. Recuperado de <https://www.ceupe.com/blog/mantenimiento-predictivo-y-preventivo-de-centrales-hidroelectricas.html>
- CFE. (2017). Manual de Operación y Mantenimiento de Centrales Hidroeléctricas.
- CINK Hydro - Energy. (2025). Crossflow Turbine - Operation and Maintenance. Recuperado de <https://www.cink.cz/cross-flow-turbine-operation-and-maintenance/>
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA). (2025). Proyectos Ambientales y Energéticos en Antioquia. Recuperado de <https://www.corantioquia.gov.co/>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2010). Resolución CREG 103 de 2010. Por la cual se adoptan los Costos de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) para el cargo por confiabilidad.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2025). Proyecciones de Población de Colombia. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022). CONPES 4075 de 2022. Política para el acceso universal a la energía eléctrica en Zonas No Interconectadas. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2025). Información Socioeconómica y Metodologías de Evaluación Social. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/>
- Ediciones de la U. (2025). Pequeñas centrales hidroeléctricas: Construcción paso a paso. <https://edicionesdelau.com/producto/pequenas-centrales-hidroelectricas-construccion-paso-a-paso>
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2025). Proyectos de Generación y Distribución de Energía en Antioquia. Recuperado de <https://www.epm.com.co/>

Fundación Endesa. (2025). Componentes de una Central Hidroeléctrica. Recuperado de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/componentes-central-hidroelectrica>

EPM. (2025). Diccionario de Servicios Públicos. Recuperado de <https://www.epm.com.co/institucional/sobre-epm/quienes-somos/diccionario-de-servicios-publicos/>

IDEAM. (2025). *Bases de datos hidrológicas y climatológicas*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.ideam.gov.co/>

IGAC. (2025). Información Geográfica y Catastral de Colombia. Recuperado de <https://www.igac.gov.co/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2025a). Bases de Datos Hidrológicas y Climatológicas. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2025b). Principios de Hidrología Aplicada a Proyectos Energéticos.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2025a). Bases de Datos Hidrológicas y Climatológicas. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/datos-hidrometeorologicos>

Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE). (2025b). Electrificación Rural en Zonas No Interconectadas. Recuperado de <https://ipse.gov.co/>

IPSE. (2023). Boletín de cobertura energética en Zonas No Interconectadas. Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas.

Lufilsur. (2023). Mantenimiento Correctivo, Preventivo y Predictivo: diferencias y ventajas. Recuperado de <https://lufilsur.com/blog/mantenimiento-correctivo-preventivo-predictivo-diferencias-ventajas/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2025). Política Nacional Ambiental y Gestión de Recursos Naturales. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/>

Ministerio de Minas y Energía. (2025). Acceso a la Energía en Zonas Rurales de Colombia. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/>

Ministerio de Minas y Energía. (2025a). Proyectos Hidroeléctricos en Colombia. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/>

Municipio.com.co. (2025). Municipio de Anorí (Antioquia). <https://www.municipio.com.co/municipio-anori.html>

NextPlay. (2025). Trabajos en una central hidroeléctrica. Recuperado de <https://nextplay.es/trabajos-en-una-central-hidroelectrica/>

Predictiva21. (2020). Análisis de Vibraciones en Turbinas Hidráulicas. Recuperado de <https://predictiva21.com/analisis-de-vibraciones-en-turbinas-hidraulicas/>

Prezi. (2025). Mantenimiento en Centrales Hidroeléctricas. Recuperado de <https://prezi.com/p/0v9jrvf96q9m/mantenimiento-en-centrales-hidroelectricas/>

Promigas, Fundación Promigas, & Inclusión SAS. (2023). Índice Multidimensional de Pobreza Energética – IMPE Colombia 2023. <https://www.promigas.com/publicaciones/Indice-de-pobreza-energetica>

Renovables.blog. (2025). La importancia de la topografía en la construcción de una planta hidroeléctrica. Recuperado de <https://renovables.blog/la-importancia-de-la-topografia-en-la-construccion-de-una-planta-hidroelctrica/>

Repositorio Universidad Técnica de Ambato. (2020). Diseño de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para la central hidroeléctrica Agoyán. Recuperado de https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/31411/1/Tesis_Mecatr%C3%B3nica_2020_293.pdf

SciELO. (2021). Metodología para el monitoreo de temperatura en sistemas eléctricos. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-69922021000100067

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2025). Información Geológica y de Amenazas. Recuperado de <https://www.sgc.gov.co/>

Sio Ingenieria. (2025). Estudios Preliminares de Ingeniería para Proyectos Hidroeléctricos. Recuperado de <https://sioingenieria.com/estudios-preliminares/>

Sisbén. (2025). Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales. Recuperado de <https://www.sisben.gov.co/>

SlideShare. (2020). Mantenimiento de Turbinas Hidráulicas. Recuperado de <https://es.slideshare.net/mobile/karlamontero03/mantenimiento-de-turbinas-hidraulicas>

Rodríguez-Pérez, Á. M., Pulido-Calvo, I., & Cáceres-Ramos, P. (2021). A computer program to support the selection of turbines to recover unused energy at hydraulic networks. *Water*, 13(4), 467. <https://doi.org/10.3390/w13040467>

Topographic-Map.com. (2025). Anorí [Mapa topográfico]. <https://es-co.topographic-map.com/map-p7kxmt/Anori/?center=-3.74684%2C-61.65184&zoom=14>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2020). Guía para el Desarrollo de Proyectos Hidroeléctricos.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2022). Plan de Abastecimiento de Energía Eléctrica para Zonas No Interconectadas.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2024b). Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050. Recuperado de <https://www.upme.gov.co/>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2025). Balance Energético Nacional. Recuperado de <https://www.upme.gov.co/>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2025b). Parámetros Técnicos para Proyectos de Generación. Recuperado de <https://www.upme.gov.co/>

UNIDO. (2019). Mini Hydro Power Plant: A Guide for Decision Makers.

Valencia Betancourt, W., & Moncada Medina, J. A. (2007). Memorias del curso de centrales hidráulicas [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica.