

**Acceso a Energía Sostenible en Zonas Rurales de Colombia: Implementación de una
Pequeña Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Rio Grande, Antioquia**

Elaborado por:

Lina Yiseth Guarín Salazar

Carlos Oswaldo Caicedo Ramírez

Anderson Giovanni Caipa Jurado

Paolo Andres Machado Cogollo

Universidad Ean

Especialización en gerencia de proyectos

Seminario de Investigación de Postgrado

Bogotá

05/11/2024

Contenido

Resumen	3
Problema de Investigación	3
Objetivos.....	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Justificación	6
Marco Teórico.....	8
Ventajas y desventajas de las PHC.....	11
Ventajas de las PCH	11
Desventajas de las PCH.....	11
Normatividad	13
Marco Legal Complejo	13
Concesión de Agua	14
Permisos de Construcción	14
Impacto socioeconómico de las PCH	15
Impactos económicos	15
Impactos sociales.....	16
Impactos ambientales	16
Gestión de las PCH en Zonas Rurales.....	17
Marco institucional.....	18
Misión y Visión:.....	18
Nichos de Mercado.....	19
Estructura Organizacional:.....	19
Relaciones con Stakeholders:	20
Metodología	21
Enfoque, alcance y diseño de la investigación.....	21
Definición de Variables	21
Población y Muestra	23
Segundo nivel	24
Selección de métodos o instrumentos para recolección de información	24
Técnicas de análisis de datos	25
Perfil altimétrico de Rio grande	28
Longitud del cauce principal	31
Pendiente media de la cuenca.....	32
Curva hipsométrica.....	33
Hidrología	34
DIMENSIONAMIENTO	37
PRESUPUESTO.....	45
CONCLUSIONES.....	48
Lista de referencias.....	49

Resumen

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) han emergido como una alternativa viable y sostenible para diversificar la matriz energética de Colombia. Estas instalaciones ofrecen una solución prometedora para satisfacer las crecientes demandas energéticas, al tiempo que preservan la integridad de los ecosistemas locales. En regiones remotas y rurales, como la Cuenca del Río Grande en Antioquia, las PCH permiten un aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos. Antioquia, con su extensa cadena montañosa, es una de las regiones con mayor generación de energía eléctrica en el país, lo que facilita el desarrollo de este tipo de proyectos, que no solo aportan energía sostenible, sino también información relevante sobre la situación energética en Colombia y los aspectos técnicos de las PCH.

Problema de Investigación

En Colombia aún existen zonas que no cuentan con acceso constante a la energía eléctrica, según datos suministrados por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas no Interconectadas (IPSE), lo que hace evidente la problemática con la que aun cuentan miles de personas ubicadas en zonas rurales (1). Si bien Colombia ha avanzado en establecer los lineamientos, las hojas de rutas y las metas para el desarrollo del sector energético, con miras a lograr una transición sostenible, dentro de la cual las energías no convencionales son protagonistas, todavía hay desafíos y barreras por superar (2). Entre los cuales se encuentran la necesidad de garantizar la sostenibilidad ambiental de los proyectos, mitigar los impactos sociales y ambientales negativos, superar barreras regulatorias y financieras.

Actualmente, Colombia es uno de los países con mayor generación de energía limpia del mundo, con la inserción de nuevas fuentes de generación de energía, principalmente

apalancada por los proyectos de generación solar, generación eólica y en mayor medida pequeñas centrales hidroeléctricas, lo que apalanca diversificación de la matriz energética del país. Esta diversificación y adopción de más fuentes de energía sostenibles ayudará a que el país pueda seguir fortaleciendo las crecientes necesidades de la actividad económica, pues como muestran los datos de XM en los últimos años la demanda de energía en el país ha crecido a la par de la economía, sin embargo, aún existe una crisis energética mundial, por lo cual es importante potenciar las energías renovables y mejorar la eficiencia energética, es importante mencionar que, las energías renovables pueden ayudar a los países a mitigar el cambio climático, generar resiliencia frente a la volatilidad de los precios y reducir los costos de la energía. Cabe mencionar que Las PCH en Colombia las PCH se iniciaron 1889 con la puesta en marcha de algunas plantas en Bogotá, Bucaramanga y Cúcuta y han experimentado un fuerte crecimiento a nivel nacional por el hecho de ser una fuente de energía renovable que no requiere una alta inversión, como si lo exigen otros proyectos destinados a la generación de energía, a su vez, una PCH trae consigo efectos positivos sobre el entorno en el que opera, como lo son la generación de empleo, la conexión de poblaciones alejadas a la red eléctrica del país, la mejora de la confiabilidad del sistema eléctrico en todo el territorio nacional.

Colombia es un país con un fuerte potencial para la creación de PCH debido a que cuenta con 742.725 cuencas hidrográficas, un caudal multianual de 52.075 m³ /s, ríos que desembocan en los océanos Atlántico y Pacífico y una región oriental con descargas de recursos hídricos equivalentes a 104.631 L/s/km² , factores que permiten establecer que se cuenta con un potencial de generación de 25.000 MW de los 660.45 MW que se están utilizando, es decir, que tan solo se está aprovechando un 2.64 % de la capacidad nacional.

Por lo tanto, se plantea el ¿Como los territorios y zonas no interconectadas, como Rio Grande, Antioquia pueden acceder a la energía eléctrica por medio de fuentes de energía sostenibles PCH?

Objetivos

Objetivo general

- Determinar la viabilidad técnica y económica de una Pequeña Central Hidroeléctrica ubicada en Rio Grande Antioquia, teniendo en cuenta la normativa actual y los cambios ambientales en la zona de influencia.

Objetivos específicos

- Examinar los retos económicos y financieros que enfrentan los proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas ante los requisitos y exigencias ambientales y regulatorias.
- Identificar los desafíos técnicos y operativos que enfrentan las pequeñas centrales hidroeléctricas para adaptarse a los cambios ambientales y regulatorios.
- Investigar como el cambio climático afectan la generación de energía por medio de PCH.
- Analizar los principales cambios y tendencias en la normativa y regulación ambiental que afectan el desarrollo y operación de las pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia.

Justificación

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son una opción fundamental para Antioquia, ya que nos permiten abordar el cambio climático y maximizar el uso de nuestros recursos energéticos. Al aprovechar la energía de nuestros ríos, las PCH se constituyen en una alternativa sostenible y eficiente que asegura un suministro eléctrico constante y ayuda a reducir nuestra huella de carbono.

Las PCH contribuyen a mitigar el cambio climático son un oxígeno al planeta. Al aprovechar la fuerza del agua, reducimos la necesidad de quemar carbón y gas, que contaminan nuestro aire y dañan nuestros bosques. Es poder darle un respiro a la naturaleza reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, los embalses que están vinculados a las PCH son una solución inteligente para gestionar de una manera sostenible el agua en tiempos difíciles. Cuando el clima se vuelve más extremo y las sequías son más frecuentes, estos embalses nos ayudan a mantener nuestros ríos llenos y a garantizar el agua para todos, desde las personas hasta la naturaleza, las PCH son una apuesta por un futuro más verde, ya que nos ayuda a reducir la huella de carbono y promover energías limpias y renovables.

Colombia ha dependido históricamente de las grandes hidroeléctricas para el suministro eléctrico. Las PCH permiten diversificar la matriz energética, reduciendo la dependencia de grandes proyectos y mitigando el riesgo asociado con fenómenos climáticos extremos, el fenómeno de El Niño y el cambio climático son factores que se están intensificando en la región de Antioquia. Las sequías prolongadas causadas por El Niño, agravadas por el calentamiento global, ponen en peligro nuestros bosques y recursos hídricos. Asimismo, el cambio climático actúa como un catalizador de estos eventos

extremos, contribuyendo al deterioro de los ecosistemas y dando lugar a sequías e incendios forestales.

Al educar a la población sobre el funcionamiento de las PCH y su importancia para el desarrollo sostenible, estamos empoderando a las comunidades para que sean agentes activos en la conservación del medio ambiente.

Esta investigación puede contribuir a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las pequeñas hidroeléctricas, asegurando un suministro eléctrico estable y respetuoso con el medio ambiente. Además, a identificar y abordar los desafíos técnicos, operativos, económicos y financieros. Las PCH pueden ser una fuente importante de desarrollo para las regiones rurales y menos desarrolladas. Su construcción y operación pueden generar empleos locales y fomentar el desarrollo económico en áreas que, de otro modo, podrían estar menos conectadas con la economía nacional.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y las centrales hidroeléctricas son la base de generación de energía eléctrica en Colombia, esto debido a que el país tiene un gran potencial hídrico y cadenas montañosas que le permiten aprovechar al máximo este recurso. En Colombia se tienen alrededor de 90 pequeñas centrales hidroeléctricas las cuales en su mayoría se encuentran en el departamento de Antioquia. El problema de acceso a energía eléctrica en territorios vulnerables es una combinación de aislamiento geográfico, pobreza y recursos limitados, infraestructura insuficiente, desastres naturales, falta de políticas y regulaciones eficientes y conflictos sociales o políticos (4). Para términos de esta investigación se estará evaluando la viabilidad de implementación de una PCH a filo de agua de la cuenca Rio Grande en el departamento de Antioquia.

Marco Teórico

La energía eléctrica es uno de los pilares mas importantes en un país en desarrollo pues ayuda a el desarrollo de la industria y el comercio y en menor medida llega a los usuarios residenciales. El estado juega un papel importante pues es este quien desarrolla políticas, regulaciones, planes de expansión y promoción de fuentes no convencionales de energías renovables, entre otros, con el único fin de garantizar el servicio a todos los usuarios interconectados al sistema nacional.

Es así como las energías limpias aquellas que provienen de fuentes naturales que no tienen ningún efecto contaminante en sus procesos de generación ayudan en el proceso de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), la electricidad se genera a partir de la fuerza que genera el agua, el cual es un recurso renovable y con bastante abundancia en Colombia. A diferencia de otras centrales térmicas las cuales generan contaminación y queman combustibles fósiles, las (PCH) contribuyen a generar beneficios económicos y ambientales. Las energías limpias al trabajar en conjunto con la economía circulares generan un impacto significativo en la sostenibilidad ambiental, social y económica de la región.

En la búsqueda de la eficiencia, generación y distribución de las energías limpias tiene como propósito optimizar los procesos, lo cual conlleva a la reducción del consumo de recursos y producción de residuos contaminantes, para ello el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector de las energías limpias permite aprovechar de manera óptima los recursos disponibles.

Beneficios Ambientales de las PCHs

Los principales beneficios ambientales en un país como Colombia derivan principalmente de la naturaleza renovable de la energía hídrica y como está se produce. Al generar electricidad a partir de fuentes renovables como el agua las (PCH) reducen la dependencia de combustibles lo que ayuda a mantener una baja emisión de gases de invernadero lo que afecta el

calentamiento global, la construcción de las (PCH) contribuyen a la conservación de las fuentes hídricas contribuyendo a la conservación y sostenibilidad del ecosistema evitando la tala de árboles, protegiendo los bosques, protegiendo la biodiversidad biológica creando un hábitat más limpio para las especies acuáticas.

Es fundamental señalar que los beneficios ambientales que conlleva las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) están relacionadas en la forma como fueron diseñadas y como operan. Si no se implementan las medidas adecuadas para minimizar los impactos que se tienen previstos, las (PCH) pueden causar daños ambientales los cuales serían difíciles de reparar.

Colombia actualmente se encuentra en un proceso de diversificación de la matriz energética, realizando inversiones en proyectos de energías renovables y evaluando nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector eléctrico, esto debido a que la principal fuente de generación del país es la hidroelectricidad con grandes centrales hidroeléctricas las cuales representan un aproximado de 70% de la generación total del país continuando con la termoelectricidad la cual representa un 15% de la generación y finalmente con las energías renovables no convencionales que actualmente se encuentra en desarrollo. Las implementaciones de estas fuentes no convencionales son cruciales para apoyar la infraestructura actual de la red de transmisión y distribución del país debido a que este es desarrollado aun se encuentran desafíos relacionados con la expansión y el mantenimiento en regiones remotas y poco accesibles.

La energía hidroeléctrica es una de las fuentes de generación de energía mas utilizadas en el país, esto gracias al alto potencial hidroeléctrico y las prominentes montañas con las que se cuenta en el país. La energía hidroeléctrica, se basa en el uso de la energía cinética que lleva el agua en movimiento, para esto se requiere una construcción civil donde el agua fluye a través de una tubería hasta la casa de maquinas donde se encuentran las turbinas generadoras, la energía del agua en movimiento hace girar las turbinas y este movimiento se

convierte en electricidad a través de un generador. Las hidroeléctricas son una fuente de generación de energía limpia esto debido a es una fuente de energía renovable, tienen bajas emisiones de gases efecto invernadero en comparación con otros tipos de generación de energía, entre otros beneficios que posee la implementación de este tipo de energías.

En Colombia las principales plantas de generación hidroeléctrica son la: Central hidroeléctrica de Guatapé, Central hidroeléctrica el Guavio, Central hidroeléctrica de San Carlos, en su mayoría ubicadas en el departamento de Antioquia.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas: son una fuente de generación muy atractiva de implementación para los inversionistas gracias a que estas no son tan costosas en comparación con las grandes centrales hidroeléctricas que su estructura física civil y eléctrica son superiores. Las pequeñas centrales hidroeléctricas son centrales generadoras que no superan los 20MW y dependen de la caída del caudal de caída libre, estas PCHs no requieren una estructura civil robusta por lo que no es necesario generar un embalse, sino que por el contrario se aprovecha el flujo del agua “a filo de agua”, una vez esta agua pasa por las turbinas generadoras en casa de maquinas es devuelta al caudal continuando con su flujo normal.

Ventajas y desventajas de las PHC

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) como se ha mencionado son una opción de energía renovable que al igual que la solar, eólica o geotérmica tiene sus pros y contras:

Ventajas de las PCH

- Mínimo impacto ambiental ya que no requieren de embalses grandes
- Generación de energía continua, las PCH pueden producir electricidad de manera más constante siempre que haya suficiente flujo de agua, esto hace más predecible que la energía solar o eólica las cuales dependen del clima.
- Requieren poco mantenimiento de los equipos comparada con otras tecnologías renovables, como los paneles solares.

Desventajas de las PCH

- Limitación geográfica, las PCH requieren de un flujo adecuado de agua por ende en lugares donde no se cuente con ríos o su caudal no sea lo suficiente frente a esto es poco viable el desarrollo del proyecto.
- Los periodos de sequía o cambios climáticos que alteren el normal curso de las fuentes hídricas pueden afectar la generación de energía.

La construcción de una pequeña central hidroeléctrica es un proceso complejo que involucra varias etapas, desde la planificación hasta la puesta en marcha de la planta para esto se requiere el desarrollo de las siguientes etapas:

1. Estudio de factibilidad: En este se analiza el recurso hídrico disponible, un estudio geológico de los suelos, la evaluación ambiental del proyecto y el análisis económico. Con este estudio se define la factibilidad del proyecto, si es o no adecuada la implementación de esta planta.

2. Diseño: este componente nos indica cual será el diseño hidráulico (turbina, conductos y de más), diseño estructural (casa de maquinas tuberías, entre otras), diseño eléctrico (equipo generador, transformadores, etc.) y diseño electromecánico (integración de la hidráulica y eléctrica)
3. Permisos y licencias: en esta etapa se envían a los entes pertinentes los estudios ambientales y de construcción a la espera de aprobación para su posterior construcción. Finalizando esta etapa ya se tiene la viabilidad para la construcción civil, eléctrica y electromecánica del proyecto.
4. Construcción: Obra civil que incluye preparación del terreno, instalación de tuberías, construcción de casa de máquinas e instalación de equipos electromecánicos y de la bahía de transmisión.
5. Puesta en marcha: realización de pruebas de funcionamiento de los equipos, sincronización con la red (si es interconectada la red de transmisión nacional) y el inicio de la generación.

Normatividad

La implementación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) como fuente de energía renovable en zonas rurales requiere una gestión integral que abarque tanto aspectos técnicos como regulatorios y ambientales. Sin embargo, su implementación requiere una gestión meticulosa de las implicaciones regulatorias y ambientales, las cuales deben ser evaluadas y atendidas de manera integral a lo largo del proyecto. Dentro de las principales normatividades del sector, se encuentran los reglamentos técnicos como el RETIE, RETILAP, RETIQ, RETSIT, resoluciones y demás actos administrativos que buscan que el servicio eléctrico sea confiable, seguro y constante. La comisión de regulación de energía y gas (CREG) es el organismo que se encarga de regular el sector eléctrico colombiano, direccionando y estableciendo las normas y tarifas relacionadas con todo el tema de la energía, asegurando que todos los actores que intervienen en el proceso cumplan con las prácticas necesarias para su funcionamiento y sostenibilidad. Las PCH se encuentran reglamentadas por las resoluciones 086 de 1996, 24 de 1995, CREG 055 de 1994 y CREG 116 de 1996 o sus derogaciones.

Marco Legal Complejo

Las reglas para construir y operar pequeñas centrales hidroeléctricas son muy diferentes según el país y la región. Hay muchas leyes que hay que seguir, desde conseguir los permisos para usar el agua hasta conectar la planta a la red eléctrica. Entender bien todas estas normas es fundamental para que todo funcione bien. Debe estar clara la normativa vigente tanto a nivel nacional como local ya que de eso dependerá todos los requisitos legales que se deben llevar a cabo la implementación de una PCH.

Concesión de Agua

El marco regulatorio hídrico establece los requisitos específicos que deben cumplirse para utilizar el recurso agua. Demostrar el cumplimiento de estos requisitos es fundamental para obtener las autorizaciones necesarias y evitar futuros conflictos legales.

Permisos de Construcción

Se requieren permisos de construcción los cuales son otorgados por los entes territoriales, donde se encuentran los permisos para utilización del suelo, y de alguna estructura que se llegue a necesitar, es importante contar también con los permisos de la empresa o el ente regulador del sector eléctrico ya que se requiere energía para hacer funcionar la PCH.

Impacto socioeconómico de las PCH

La implementación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), puede traer consigo una serie de impactos socioeconómicos positivos que pueden favorecerán el desarrollo sostenible de la región:

Impactos económicos

- Generación de empleo: Durante las etapas de diseño, construcción, implementación y ejecución de las (PCH), se generarán empleos tanto directos como indirectos.
- Aumento de ingresos para la región: Los impuestos provenientes de las (PCH), pueden incrementar los ingresos de la región, lo que permitirá invertir en los diferentes proyectos que se tengan establecidos en la región.
- Fomento de industria local: La necesidad de bienes y servicios para colocar en marcha las (PCH) puede ayudar a estimular un crecimiento significativo del comercio local, al generar oportunidades para proveedores, clientes y así fomentar la creación de nuevos empleos en la región.
- Aumento del valor de la tierra: La proximidad a las (PCH) puede elevar el valor de las propiedades lo que genera beneficios para los propietarios locales de tal manera que pueden vender o arrendar sus propiedades a mejores valores.
- Inversión: Contar con una pequeña central hidroeléctrica puede atraer a inversionistas que vean en la región un alto potencial de desarrollo, como turismo, negocios o agricultura.
- Disminución de costos energéticos: La energía generada por la (PCH) ayudara a disminuir los costos energéticos que actualmente a la comunidad llevándola ser más competitiva entre las regiones.

Impactos sociales

- **Infraestructura:** La construcción de las (PCH) ayuda al desarrollo de la región, mejorando la conectividad, estimulando la economía y elevando la calidad de vida de los habitantes, a través de construcción de malla vial y mejoras en áreas locativas de la región.
- **Conocimiento:** Con la llegada de las (PCH) a la región se abre un mundo de oportunidades de crecimiento lo que ayuda al fortalecimiento de las capacidades locales y fomenta el desarrollo de nuevas habilidades para la comunidad.
- **Organizaciones comunitarias:** Fomentar la participación de las comunidades a través de actividades que van enmarcadas en el impacto que puede generar la implementación de las (PCH) en la región.
- **Calidad de vida:** Incremento en ingresos, acceso a más servicios públicos, generación de oportunidades laborales pueden elevar considerablemente la calidad de vida de los habitantes de la región.
- **Desarrollo del turismo:** La puesta en marcha de las (PCH) en la región puede ser un atractivo que motive al turista a viajar y conocer el proyecto, generando ingresos a la región.

Impactos ambientales

- **Conservación de los recursos:** Gestión eficiente de los recursos hídricos garantiza la sostenibilidad de las (PCH).
- **Protección de la biodiversidad:** A través de iniciativas que preserven áreas naturales, rios, humedales. Inversión en proyectos encaminados a la reforestación y restauración de bosques que puedan contribuir a la protección de la biodiversidad.

- Reducción utilización combustibles fósiles: La necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles y de avanzar en la producción de energía limpia y sostenible.

Gestión de las PCH en Zonas Rurales

Para mitigar los impactos negativos y maximizar los beneficios de las PCH en zonas rurales, es fundamental adoptar una gestión integral que considere los siguientes aspectos:

- Participación ciudadana: Es esencial involucrar a las comunidades locales en todas las etapas del proyecto, desde la planificación hasta la operación, para garantizar su aceptación y minimizar los conflictos sociales.
- Evaluación ambiental estratégica: Se deben realizar evaluaciones ambientales estratégicas para identificar los potenciales impactos ambientales y sociales de los proyectos y definir medidas de mitigación y compensación.
- Diseño y construcción sostenibles: Las PCH deben diseñarse y construirse utilizando tecnologías y materiales que minimicen los impactos ambientales y sociales.
- Monitoreo y seguimiento: Es necesario establecer sistemas de monitoreo y seguimiento para evaluar el cumplimiento de las medidas de mitigación y los efectos a largo plazo de los proyectos.
- Adaptación al cambio climático: Los proyectos de PCH deben ser diseñados para adaptarse a los efectos del cambio climático, como la variabilidad en los patrones de precipitación y el aumento de eventos extremos.
- Fortalecimiento institucional: Es fundamental fortalecer las capacidades institucionales para gestionar los proyectos de PCH, asegurando una aplicación efectiva de la normativa y una coordinación adecuada entre las diferentes entidades involucradas.

Marco institucional

Ubicación: La PCH Rio Grande está situada en la Cuenca del Río Grande, en el municipio de Anorí, departamento de Antioquia, Colombia. Este lugar se caracteriza por su geografía montañosa y su acceso a abundantes recursos hídricos, lo que lo hace ideal para la generación de energía hidroeléctrica.

Sector de la Economía: La PCH Rio Grande forma parte del sector de Generación de Energía Eléctrica, con un enfoque en energías renovables. Según la clasificación CIU, la organización está inscrita en la categoría 3510, que corresponde a la producción y distribución de energía eléctrica.

Historia de la Organización: La PCH Rio Grande fue establecida como parte de un proyecto de desarrollo sostenible en zonas rurales de Colombia, con el objetivo de proporcionar acceso a energía eléctrica en regiones no interconectadas. Desde su fundación, la organización ha trabajado en estrecha colaboración con el gobierno local y nacional, así como con diversas ONGs, para asegurar un suministro energético constante y limpio.

Misión y Visión:

- Misión: Proporcionar energía eléctrica sostenible y confiable a comunidades rurales, contribuyendo al desarrollo socioeconómico y mejorando la calidad de vida de los habitantes de la Cuenca del Río Grande.
- Visión: Ser un modelo de excelencia en la generación de energía renovable en Colombia, impulsando el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente en zonas rurales.

Nichos de Mercado

El principal mercado objetivo de la PCH Rio Grande son las comunidades rurales de Antioquia, específicamente aquellas que no están conectadas a la red eléctrica nacional. Estas comunidades, que enfrentan desafíos significativos en términos de acceso a infraestructura y servicios básicos, se benefician directamente de la energía proporcionada por la central.

Productos y Procesos: La PCH Rio Grande genera electricidad utilizando un sistema a "filo de agua", aprovechando el flujo natural del río sin necesidad de embalses grandes. Este método permite una generación constante de energía con un impacto ambiental mínimo. Además de la generación de electricidad, la central está involucrada en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que optimicen el uso de recursos hídricos y minimicen el impacto ecológico.

Estructura Organizacional:

- Dirección General: Lidera la organización, tomando decisiones estratégicas y asegurando el alineamiento con la misión y visión de la empresa.
- Área Técnica: Encargada de la operación y mantenimiento de los equipos de generación, así como de la gestión de la infraestructura hídrica.
- Área Administrativa y Financiera: Maneja todos los aspectos relacionados con la gestión financiera, contabilidad, recursos humanos y cumplimiento regulatorio.
- Área de Seguridad y Medio Ambiente: Implementa y supervisa políticas de seguridad laboral y protección ambiental, asegurando que todas las operaciones cumplan con las normativas vigentes.
- Área de Relaciones Comunitarias: Actúa como un puente entre la central y las comunidades locales, gestionando proyectos de responsabilidad social y atendiendo a las necesidades y preocupaciones de los habitantes.

- Entorno Competitivo: La PCH Rio Grande opera en un sector altamente regulado y competitivo, donde la capacidad para innovar y mantener costos bajos es crucial para el éxito. La organización enfrenta competencia tanto de grandes generadores de energía hidroeléctrica como de otras fuentes renovables emergentes como la solar y la eólica.

Relaciones con Stakeholders:

La PCH Rio Grande mantiene relaciones estrechas con diversas partes interesadas, incluyendo:

- Gobierno Local y Nacional: Colabora en proyectos de desarrollo y en la implementación de políticas energéticas.
- Comunidades Locales: Participa activamente en el desarrollo comunitario y en iniciativas de mejora de la infraestructura local.
- Proveedores y Socios Técnicos: Trabaja con proveedores de tecnología y servicios para asegurar la eficiencia operativa y la sostenibilidad.

Metodología

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

Para alcanzar los objetivos de este proyecto, se investigará sobre las principales características técnicas de una PCH. Para enfatizar, este trabajo en el caso Rio Grande Antioquia, se analizará la hidrología de la cuenca, el perfil altimétrico para definición de mejor ubicación de la PCH y demás información técnica e hidráulica que dan cuenta al dimensionamiento de una PCH para Rio grande, Antioquia.

Definición de Variables

Una PCH se encuentra construida sobre un afluente hídrico o cerca de él, y tiene diferentes etapas para su funcionamiento: el azud, la captación, los tanques desarenadores, la conducción a flujo libre y a presión, casa de máquinas, canal de descarga y las líneas de transmisión. El dimensionamiento de los anteriores elementos depende directamente del caudal (medido en centímetros cúbicos) que circulen por el afluente, lo cual determina directamente la capacidad de generación de una PCH en megavatios (MW). Es así como se determina cuál es la capacidad de la PCH y qué condiciones técnicas deberá tener para su funcionamiento.

Para un correcto diseño de una pequeña central hidroeléctrica, es necesario realizar inicialmente un estudio hidrológico el cual determina la viabilidad de la implementación de una PCH y cual sería la ubicación esperada en donde se podrá aprovechar de mejor manera el caudal y la caída en determinada cuenca.

El perfil altimétrico y la variación de caudales nos indica donde puede ser mejor aprovechado el caudal y esto nos ayudará a identificar en que lugar del cause principal del rio se ubicaran las principales obras civiles de este proyecto, la captación y casa de máquinas.

Para el dimensionamiento de la turbina y su correcta elección es necesario realizar el cálculo de velocidad específica, esto con el fin de validar el tipo de turbina, la cantidad de pistones en caso de requerirse Pelton o cual es el tipo de turbina Francis que se utilizaría. En la clasificación se deben mostrar las principales características, especificaciones y dimensiones generales de las turbinas, buscando la mejor opción desde el punto de vista del funcionamiento hidráulico ligado con el conjunto obra de toma, conducción, turbina y desfogue. Lo anterior considerando la economía del proyecto teniendo en cuenta el mejoramiento de las eficiencias de la turbomáquina.

La presa derivadora está conformada por un azud de concreto. Esta estructura funciona como vertedero de crecientes, de tal forma que pueda evacuar de forma segura un caudal correspondiente a la creciente de 100 años de período de retorno. El azud es una pequeña presa y su función es regular ligeramente las aguas para poder hacer su captación. La toma de aguas se realiza mediante una captación de fondo con rejilla metálica con barrotes. La función de la reja será impedir la entrada de material grueso hacia el sistema de conducción.

Al inicio del canal de aducción, este dispone de una estructura para retener y almacenar las gravas que no puedan ser atrapadas en la reja de captación, esta estructura tiene un canal de limpieza que consiste en dar apertura de una compuerta deslizante y un canal de evacuación con una pendiente tal que garantice condiciones de auto limpieza. Aguas abajo de la trampa de gravas continúa el canal de aducción, conformado por una estructura de sección rectangular que tiene la capacidad para conducir el líquido correspondiente hasta el desarenador.

Hacia el final del canal de aducción se dejará una abertura que servirá como vertedero lateral de excesos para evacuar el caudal que capte la toma de fondo por encima del caudal de diseño durante la ocurrencia de crecientes, adicional se debe tener presente el caudal

ecológico que se debe respetar al cauce. Para evitar que los sedimentos que arrastra agua generen problemas en las tuberías o las máquinas, se dispone de un tanque desarenador de tres celdas paralelas conectado a la captación por un canal de aducción.

El caudal de diseño es aquel que determina la capacidad máxima para la cual deben ser diseñados los equipos electromecánicos. La determinación de este caudal depende de la relación entre factores hidrológicos, hidráulicos y económicos.

Población y Muestra

Los estudios del proyecto se realizarán en el departamento de Antioquia, Colombia. Se trabajará la cuenca de Rio Grande, el cual nace en el Alto de San Bernardo, en Santa rosa de Osos y desemboca en el embalse Rio grande 2 propiedad de EPM. Rio grande atraviesa en su recorrido por los municipios de Santa Rosa, Entreríos y Don Matías y uno de sus principales afluentes es el río Chico de Belmira. Se tomó como punto de aforo la estación “La Y” de EPM, desde la cual se obtuvo un área de la cuenca de 329,36 Km².



Ilustración 1 Delimitación Cuenca Rio Grande

Dentro de las poblaciones cercanas a la implementación de esta PCH, se encuentran San Pedro de los Milagros con una población aproximada de 25.000 habitantes, Santa Rosa de Osos con una población de 40.000 habitantes, Don Matías con población aproximada de 20.000 habitantes, entre otras

Segundo nivel

Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

El presente proyecto se basará inicialmente en datos obtenidos de los diferentes medios información, como lo son datos recolectados a través de otros estudios de universidades, el instituto metrológico, los datos almacenados por puntos de medición EPM y demás canales que nos ayudaran a validar la viabilidad del proyecto a ejecutar.

Técnicas de análisis de datos

La cuenca Rio grande se dividió en 72 subcuencas para determinar la curva de variación de caudales.

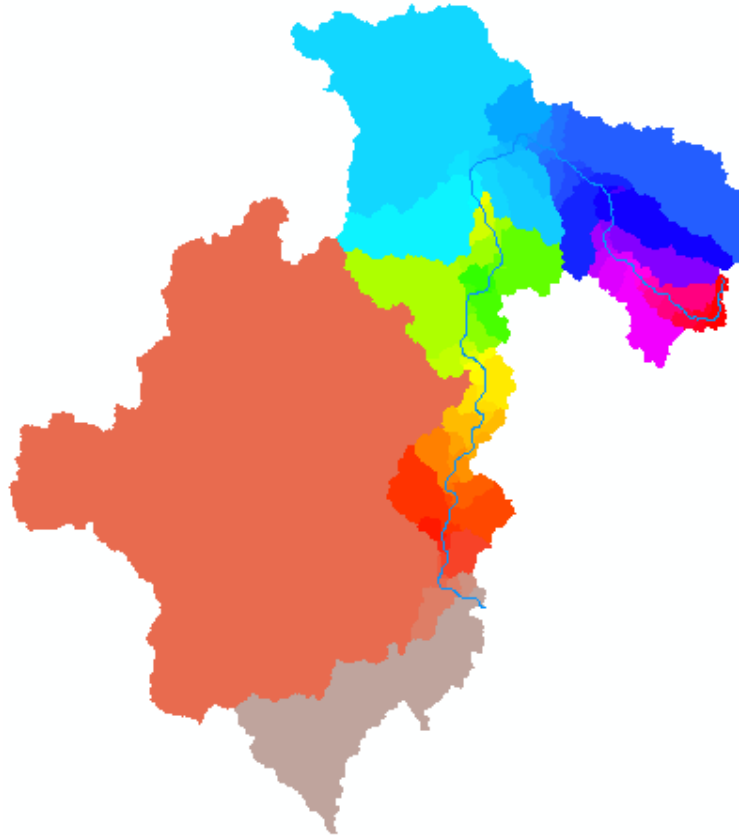


Ilustración 2 Subcuencas de Rio Grande

En la siguiente tabla se puede observar la variación de áreas, longitudes y caudales de las subcuencas, con estos se puede identificar donde serían las posibles ubicaciones de la captación y ubicación de casa de máquinas, nos da idea del comportamiento del río a través del cauce principal.

Tabla 1 Subcuencas de Rio Grande

Subcuencas	Longitud acumulada	Area [km ²]	Caudal acumulado [m ³ /s]
72	500	0,013512	0,000201247
71	1000	0,171719	0,002758817
70	1500	0,117997	0,004516255
69	2000	0,214686	0,007713772
68	2500	0,330167	0,012631255
67	3000	0,363521	0,01804551
66	3500	0,470753	0,02505687
65	4000	0,003877	0,025114613
64	4500	1,773616	0,051530718
63	5000	0,411172	0,057654683
62	5500	0,277401	0,061786272
61	6000	0,313407	0,066454133
60	6500	3,514073	0,118792473
59	7000	1,130093	0,135623994
58	7500	0,501809	0,1430979
57	8000	0,427683	0,149616718
56	8500	3,613518	0,203436185
55	9000	0,00037	0,203441695
54	9500	0,081295	0,204652497
53	10000	5,541813	0,287191846
52	10500	4,079903	0,347957616
51	11000	0,238369	0,351507866
50	11500	0,839481	0,364011033
49	12000	16,169369	0,604836407
48	12500	1,118981	0,621502426
47	13000	0,605437	0,63051976
46	13500	0,118515	0,632284913
45	14000	3,325133	0,681309196
44	14500	0,202419	0,684824009
43	15000	1,437355	0,706231867
42	15500	3,915536	0,764549568
41	16000	36,430012	1,307135444
40	16500	0,584116	1,315835224
39	17000	9,361547	1,455265405
38	17500	0,243599	1,45889355
37	18000	0,181004	1,46158941
36	18500	0,836485	1,474047955

35	19000	0,083035	1,475284672
34	19500	1,330559	1,495101919
33	20000	0,005118	1,495178146
32	20500	4,643712	1,564341245
31	21000	0,783409	1,57600928
30	21500	0,071595	1,577075611
29	22000	1,673884	1,602006314
28	22500	0,132644	1,603981904
27	23000	0,907692	1,617501001
26	23500	9,34147	1,756632157
25	24000	1,194375	1,774421089
24	24500	0,241243	1,778014144
23	25000	0,386416	1,783769395
22	25500	0,258033	1,787612519
21	26000	1,686158	1,812726031
20	26500	0,750926	1,823910266
19	27000	0,19828	1,826863434
18	27500	0,001308	1,826882915
17	28000	1,61634	1,850956562
16	28500	0,366143	1,856409869
15	29000	0,341426	1,861495042
14	29500	0,694734	1,871842358
13	30000	1,741327	1,897777552
12	30500	0,138699	1,899843325
11	31000	1,065123	1,915707187
10	31500	2,619072	1,95471545
9	32000	3,85607	2,012147468
8	32500	0,55074	2,020350149
7	33000	0,210556	2,023486154
6	33500	1,820403	2,0505991
5	34000	0,142597	2,052722929
4	34500	164,5274	4,503181758
3	35000	1,932956	4,53197106
2	35500	0,424303	4,538290598
1	36000	24,646351	4,905371507
Cuenca principal	36100,1827	0,002253	4,905405063
Suma		329,3561	

De aquí se puede obtener la gráfica perfil altimétrico Vs. Variación de caudales.

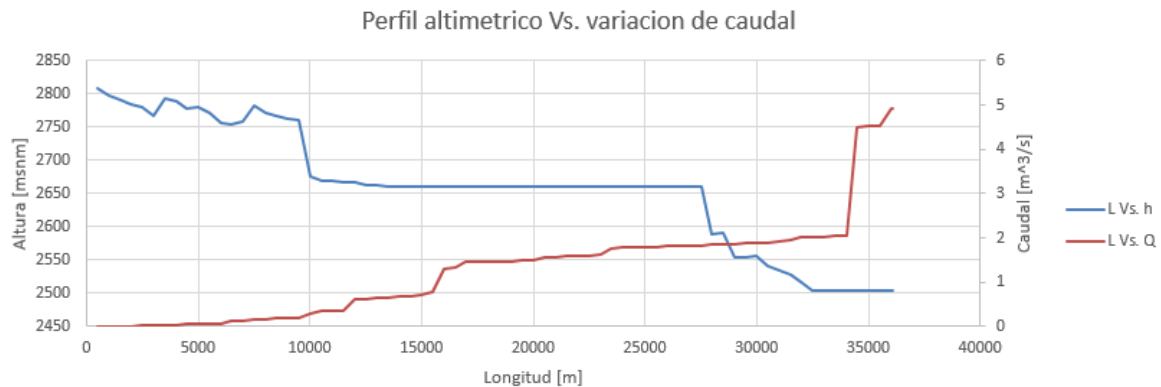


Ilustración 3 Perfil altimétrico Vs. Caudal rio grande

Perfil altimétrico de Rio grande

El perfil altimétrico ayuda a observar cómo se distribuye altiméricamente la cuenca a través de la longitud cauce principal. En la siguiente imagen se puede observar el perfil altimétrico del rio realizado con ArcGIS (Software de información geográfica), este en vez de ser un perfil suave tiene picos que se pueden deber a un error en la compilación de datos del DEM ya que los picos en el son ilógicos, por eso fue necesario la elaboración del perfil altitudinal en la herramienta Excel con el fin de depurar la información errónea.

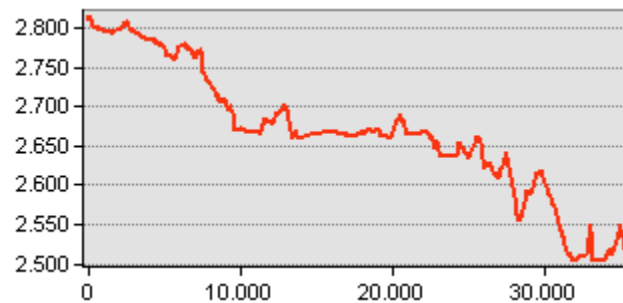


Ilustración 4 Perfil altimétrico Rio grande

La siguiente imagen (Ilustración 5) se muestra el perfil altímetro ya depurado.

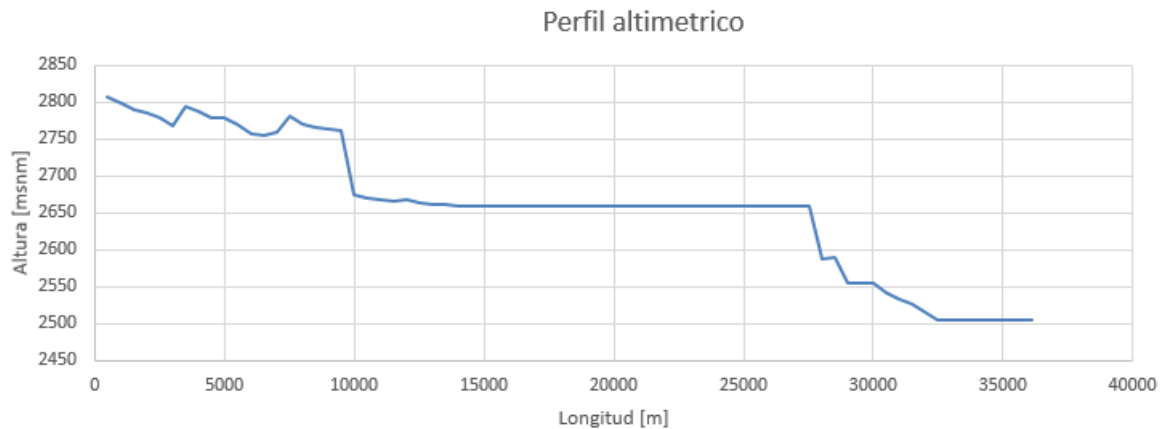


Ilustración 5 Perfil altimétrico Rio grande

En el perfil altimétrico podemos observar que la zona tiene varias zonas con buenas caudas hídricas, tanto en su comienzo como entre los 27 y 33 kilómetros. Debido a lo anterior se decidió la ubicación de la captación y casa de máquinas en las siguientes zonas.

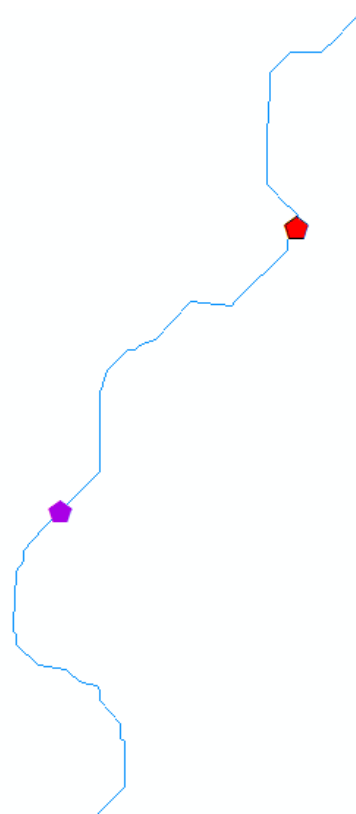


Ilustración 6 Sitio de captación y casa de máquinas desde el cauce principal

El punto rojo indica dentro del cauce principal el sitio de captación de la pequeña central hidroeléctrica “Angeles” y el punto morado indica dentro del mismo cauce, el sitio donde se encontrará ubicada la casa de máquinas del proyecto.



Ilustración 7 Esquema de la PCH

El anterior es el esquema de las obras de la PCH, en donde el punto amarillo ubicado a la izquierda de la imagen es donde se situará el sitio de captación y tanque desarenador (círculo azul) y el círculo morado ubicado al lado derecho de la misma representa la zona en donde se ubicará la casa de máquinas de esta central.

A continuación, se presentan algunas propiedades geomorfológicas de la cuenca en estudio como lo son: el área, perímetro, cotas y datos generales de la red hídrica.

Tabla 2 Parámetros de la cuenca Rio grande

Descripción	Unidades	Valor
De la Superficie		
Área de la cuenca	Km2	329,35609
Perímetro de la cuenca	Km	175,62500
Cotas		
Máxima	m.s.n.m	3310
Mínima	m.s.n.m	2504
Altitud		
Altitud media	m.s.n.m	2870,529
Altitud mas frecuente	m.s.n.m	2671,917
Altitud de frecuencia media	m.s.n.m	2802,052
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	9,21
De La Red Hídrica		
Orden de la red hídrica	und	8
Longitud de la cuenca	km	21,481
Longitud del cauce principal	km	35,606
Longitud de la red hídrica	km	1701,778

Longitud del cauce principal

La importancia de clasificar la longitud del cauce principal radica en que ésta es la medida del escurrimiento principal de la cuenca, por lo tanto, da idea de la forma y el tamaño de ella.

Por lo anterior también es importante entender que la longitud está estrechamente relacionada con los tiempos de respuesta de la cuenca, puesto que, entre mayor sea la longitud del cauce principal más tiempo le tomará a una crecida desplazarse y como consecuencia tarda más en reflejarse en la desembocadura de la cuenca y viceversa.

En la siguiente tabla se observa la clasificación del cauce principal de acuerdo con su longitud que, para este caso es de 35,606 km, es decir, se clasifica como largo.

Rangos de Longitud (Km)	Clases de longitud del Cauce
1,69 – 4,17	Corto
4,18 – 6,65	Mediano
6,66 – 9,13	Largo

Ilustración 8 Clasificación del cauce principal

Pendiente media de la cuenca

Este parámetro representa la pendiente promedio de las zonas topográficas de la cuenca y condiciona también la velocidad con que se da el escurrimiento superficial. Para este caso la pendiente promedio de la cuenca es de 9,21%, por lo tanto y según la siguiente tabla, se concluye que los terrenos son accidentados medios.

Pendiente media (%)	Terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: Pérez, 1979

Ilustración 9 Clasificación de la pendiente media

Curva hipsométrica

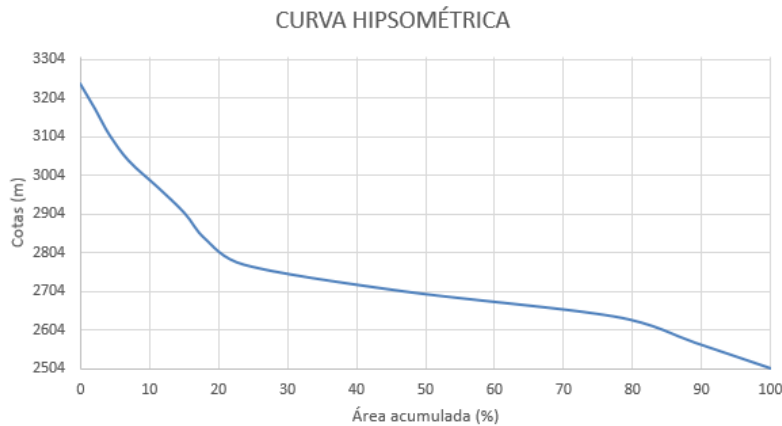
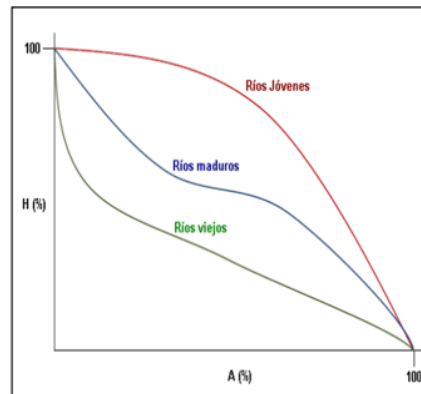


Ilustración 10 Curva hipsométrica Río grande

Esto permite observar cómo se distribuye el área a lo largo de la cuenca dependiendo de la elevación, así, se puede analizar su relieve. Además, normalizando los datos obtenidos calculando el porcentaje de altura total VS el área relativa de la cuenca, se puede observar también su estado de desarrollo y la madurez de sus ríos.



<https://riunet.upv.es>

Ilustración 11 Estado de desarrollo cauce principal

Como se observa en la figura anterior, la curva de la función adimensional se asemeja a la curva de los ríos viejos, ya que posee una forma cóncava lo cual indica que una gran parte de

la superficie de la cuenca se encuentra en altitudes bajas, lo que a su vez significa que la cuenca tiene un poco potencial erosivo.

Hidrología

En la siguiente grafica se enseñarán lo caudales medio intermensuales multianuales de la cuenca de Rio grande.

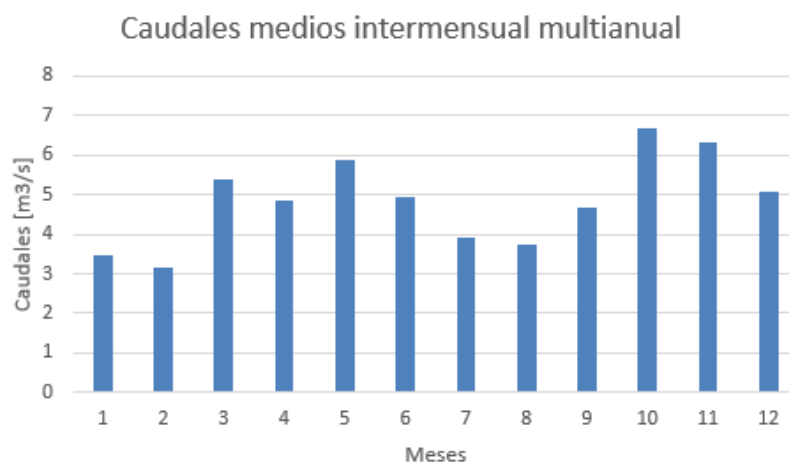


Ilustración 12 Caudales medios intermensuales multianuales

Se puede observar que, en todos los años de la serie, los meses con caudales más altos fueron octubre y noviembre ($6,67 \text{ m}^3/\text{s}$ y $6,32 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente), meses en los cuales se tiene normalmente mayores lluvias; mientras que los meses que tuvieron menores caudales, son enero y febrero ($3,44 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3,16 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente), periodo más seco.

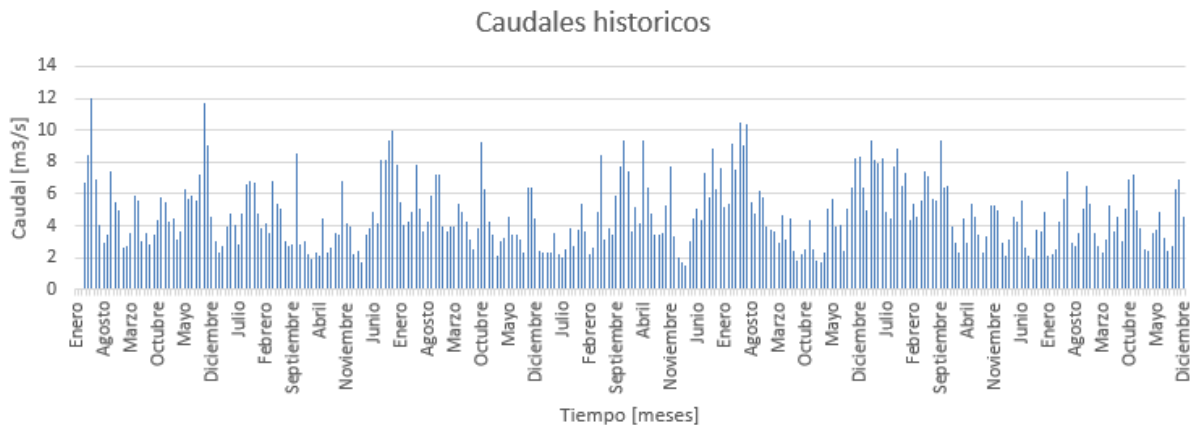


Ilustración 13 Caudales históricos

Esta gráfica contiene los caudales medios de todos los meses de cada año, desde 1982 hasta 2005. Se pueden observar dos grandes picos en la gráfica, en donde se tuvo un caudal mayor al resto de tiempo, los cuales son de mayo de 1982 y octubre de 1984 (11,98 m³/s y 11,71 m³/s, respectivamente).

A continuación, se mostrarán las rachas históricas de periodos niño y periodos niña

Tabla 3 Racha histórica periodos Niño y Niña

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1982			6,715	8,446	11,98	6,891	4,091	2,96	3,432	7,377	5,442	4,927
1983	2,636	2,77	3,587	5,885	5,558	3,083	3,526	2,866	3,441	4,401	5,787	5,45
1984	4,246	4,452	3,125	3,611	6,265	5,733	5,872	5,571	7,178	11,71	9,072	4,592
1985	3,018	2,303	2,704	3,973	4,747	4,057	2,863	4,756	6,604	6,856	6,705	4,758
1986	3,829	4,114	3,506	6,788	5,425	5,036	3,032	2,772	2,826	8,525	2,819	3,051
1987	2,23	1,969	2,304	2,086	4,505	2,306	2,608	3,524	3,493	6,815	4,114	3,984
1988	2,205	2,46	1,725	3,431	3,903	4,831	4,146	8,119	8,187	9,348	9,991	7,828
1989	5,455	4,07	4,285	4,892	7,871	5,084	3,674	4,262	5,91	7,197	7,195	3,97
1990	3,614	3,966	3,999	5,404	4,911	4,278	3,182	2,535	3,863	9,295	6,339	4,255
1991	3,453	2,105	2,994	3,204	4,555	3,473	3,408	3,189	2,298	6,361	6,354	4,483
1992	2,404	2,344	2,36	2,297	3,552	2,209	2,002	2,549	3,849	2,702	3,764	5,401
1993	3,646	2,276	2,594	4,838	8,478	3,144	3,873	3,446	5,943	7,694	9,326	7,413
1994	3,669	5,169	4,18	9,405	6,443	4,792	3,491	3,491	3,571	5,295	7,705	3,376
1995	2,004	1,706	1,503	3,05	4,512	5,091	4,351	7,362	5,83	8,83	6,338	7,576
1996	5,157	5,368	9,155	7,536	10,44	9,036	10,37	5,501	4,745	6,18	5,751	3,967
1997	3,768	3,694	2,963	4,715	3,118	4,437	2,41	1,799	2,178	2,537	4,337	2,532
1998	1,81	1,714	2,341	5,107	5,67	3,966	4,038	2,481	5,049	6,39	8,247	8,293
1999	6,434	4,976	9,408	8,101	7,971	8,217	4,89	4,446	7,736	8,884	6,502	7,278
2000	4,353	5,436	4,604	5,573	7,396	7,113	5,662	5,553	9,336	6,448	6,531	3,99
2001	2,933	2,358	4,455	2,944	5,343	4,541	3,493	2,378	3,325	5,31	5,256	5,006
2002	2,905	2,126	3,17	4,556	4,259	5,541	2,664	2,1	1,894	3,734	3,653	4,86
2003	2,153	2,205	2,509	4,272	5,679	7,429	2,973	2,695	3,594	5,034	6,459	5,395
2004	3,529	2,728	2,333	3,133	5,272	3,686	4,554	3,038	5,101	6,962	7,223	5,01
2005	3,896	2,571	2,462	3,514	3,743	4,839	3,252	2,437	2,746	6,313	6,863	4,535

Los periodos Niño son los que se encuentran con color verde, y los Niña se encuentran con color rosado. Los periodos Niño se determinaron como aquellos que tuvieron

caudales menores del 70% de la media histórica intermensual multianual persistentes durante al menos tres meses consecutivos; y los periodos Niña se determinaron como aquellos que tuvieran caudales mayores del 115% de la media histórica intermensual multianual persistentes durante al menos tres meses consecutivos. De lo cual se obtuvo que hubieron 14 periodos de niña (Abril – junio 1982, mayo – julio 1984, septiembre – noviembre 1984, septiembre – noviembre 1985, agosto – diciembre 1988, septiembre – noviembre 1989, septiembre – diciembre 1993, agosto – diciembre 1995, marzo – julio 1996, octubre – noviembre 1998, marzo – junio 1999, septiembre – diciembre 1999, mayo – julio 2000 y septiembre – noviembre 2000) y 18 periodos niño (enero – marzo 1985, julio – septiembre 1986, noviembre – abril 1987, enero – abril 1988, febrero – abril 1991, julio – septiembre 1991, enero - abril 1992, junio – agosto 1992, diciembre – abril 1995, julio – octubre 1997, diciembre – marzo 1998, enero – marzo 2002, julio – septiembre 2002, enero – marzo 2003, febrero – abril 2004 y julio – septiembre 2005).

En la siguiente grafica se muestran los caudales medio de cada uno de los 23 años de la serie. Se observa que el año que obtuvo un caudal medio más alto fue el de 1999 con un caudal medio anual de $7,07\text{m}^3/\text{s}$.

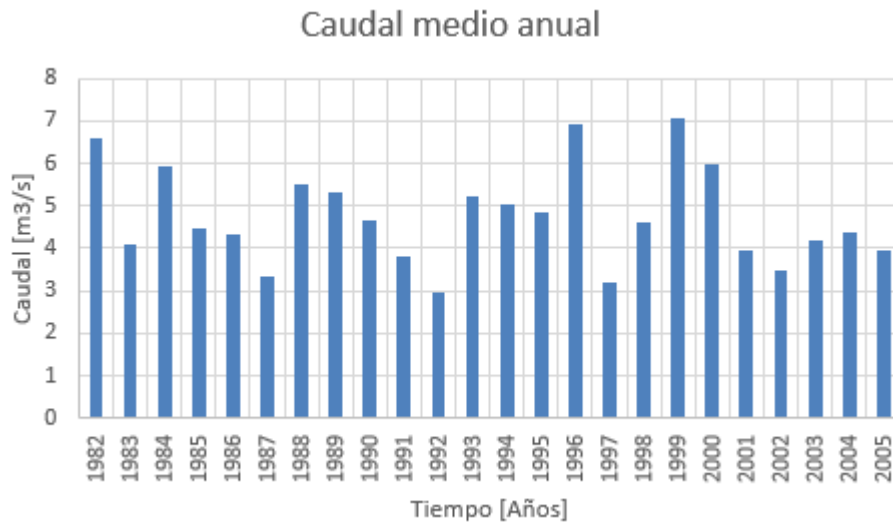


Ilustración 14 Caudal medio anual

DIMENSIONAMIENTO

Con el análisis hidrológico anteriormente enseñado se realizaron los estudios pertinentes con el fin de definir el tipo de turbina y la cantidad de estas, esto se definió con la velocidad específica como se muestra a continuación.

Turbina	Vel específica	(1 y 2 Jet) (lenta y normal)	(4 y 5 Jet) (rápida)	6 Jet
Pelton	27,5263809	Pelton 2 Jet	FALSO	FALSO
Francis	189,271909	FALSO	Francis rápida	
Kaplan	82,8199745	FALSO		

Tabla 4. Velocidad específica

Posteriormente, se definieron factores de diseño con el fin de observar la variación del porcentaje de caudal turbinado, esto se realizó para una y dos turbinas como se muestra a continuación:

F.d	Q _d [m ³ /s]	Q _{min_Turb} [m ³ /s]	Q _{Turbinado}	%Qd	γ ef (Fracis)	P _{max} [kW]	Energía Real [GWh/año]	Energía Maxima [GWh/año]	Factor de planta
0,7	2,879	1,152	2,534	88%	8,635	2610,481	19,925	22,868	0,871307733
0,8	3,291	1,316	2,763	84%	8,651	2988,932	21,701	26,183	0,828824668
0,9	3,702	1,481	2,961	80%	8,653	3363,348	23,216	29,463	0,787966075
1	4,113	1,645	3,082	75%	8,632	3728,189	24,165	32,659	0,739926106
1,1	4,525	1,810	3,202	71%	8,593	4082,509	25,080	35,763	0,701294330
1,2	4,936	1,974	3,292	67%	8,533	4422,489	25,752	38,741	0,664734012
1,3	5,347	2,139	3,381	63%	8,463	4751,459	26,377	41,623	0,633711024
1,4	5,759	2,303	3,411	59%	8,359	5054,095	26,581	44,274	0,600365534
1,5	6,170	2,468	3,445	56%	8,248	5343,497	26,781	46,809	0,572126217

Tabla 5. Factores de diseño y factores de planta con **una** turbina

Se eligió el factor de diseño en 1,2 esto porque es uno de los factores comúnmente utilizados en este tipo de proyectos, adicionalmente se puede observar en la hilera amarilla el caudal mínimo turbinado es de 1,974 m³/s esto puede ser un caudal alto para el caudal mínimo turbinado, adicionalmente, el porcentaje de caudal de diseño es de un poco más del 50%.

F.d	Q _d [m ³ /s]	Q _{min_Turb} [m ³ /s]	Q _{Turbinado}	%Qd	γ ef (Fracis)	P _{max} [kW]	Energía Real [GWh/año]	Energía Maxima [GWh/año]	Factor de planta
0,7	2,879	1,152	2,553	89%	8,631	2609,332	20,115	22,858	0,880
0,8	3,291	1,316	2,807	85%	8,647	2987,607	22,126	26,171	0,845
0,9	3,702	1,481	3,032	82%	8,654	3363,682	23,899	29,466	0,811
1	4,113	1,645	3,229	79%	8,650	3735,697	25,432	32,725	0,777
1,1	4,525	1,810	3,401	75%	8,634	4101,810	26,764	35,932	0,745
1,2	4,936	0,987	3,539	72%	8,604	4459,093	27,820	39,062	0,712
1,3	5,347	2,139	3,658	68%	8,561	4806,666	28,711	42,106	0,682
1,4	5,759	2,303	3,776	66%	8,512	5146,993	29,627	45,088	0,657
1,5	6,170	2,468	3,845	62%	8,441	5468,552	30,140	47,905	0,629

Tabla 6. Factores de diseño y factores de planta con **dos** turbinas

En el caso de dos turbinas se puede observar que el porcentaje de caudal de diseño es mayor, esto significa que el 72% del caudal de diseño de la PCH es turbinado por las maquinas.

Una vez definido el número de turbinas a utilizar en la PCH se empieza a realizar el dimensionamiento de está definiendo los siguientes datos del proyecto y parámetros de entrada.

Proyecto		
Qd	4,93587738	m3/s
hd-Qd	2,942	m
Q_ecoMax	1,0316943	m3/s
Hn	105	m
# Unidades	2	
# Celdas	3	
Turbina	Francis rapida	
Fsp Pelton	20%	
Fsp Francis	40%	
Densidad del agua	997	kg/m3
Gravedad	9,81	m/s2

Tabla 7. Datos del proyecto

Parametros de entrada		
Qeco	0,792173913	m3/s
QminTurb	0,987175476	m3/s
Vadm,concreto	3,5	m/s
Pendiente (S)	0,25%	
Rugosidad (n)	0,013	
b c.adc	2	
Gama s (Ys)	2,65	kg/m3
Gama agua (Yh2o)	1	kg/m3
Viscosidad cinematica (y)	0,00000101	m2/s
Diametro particula pelton (ds)	0,0002	m
Diametro particula francis (ds)	0,0003	m
Ca	1,660728699	
Hds	3	m
Espacio libre entre barras	0,04	m
Espesor barra	0,00953	m
Espaciamento entre barras	0,04953	m
Kb (factor correccion rectangular)	0,62	
Fc	0,894	si alpha =10°
Factor de taponamiento F_tap	30%	

Tabla 8. Parámetros de entrada

Una vez definidos estos parámetros se inició con el dimensionamiento del orificio de caudal ecológico, cumpliendo con las condiciones de orificio.

Orificio del caudal ecologico				
Area	0,23	m2	Validacion-Orificio	VERDADERO
b=h	0,48	m	Orificio pequeño	0,792173913
hm	1,73	m	Orificio grande	0,791550792
h1	1,97	m		

Tabla 8. Dimensionamiento del orificio de caudal ecologico

Como indica la tabla 8 el área total del orificio será de 0,23 m², con una altura y un ancho de 0,48, una altura del suelo a la lámina de 1,97 metros.

Canal de aduccion				
h c.adc (Qdiseño)	1,47	m	Condición >1,25	VERDADERO
A c.adc	2,95	m2	Qc.adc>Qd	VERDADERO
Pmojado	4,95	m		
Rh	0,30			
Q c.adc	5,05	m3/s		
h c.adc (Qmintur)	0,50	m		
h c.adc (Qdiseño)	1,47	m		
h1-hc.adc	1,47	m		

Tabla 9. Dimensionamiento canal de aducción

Se definió el ancho del canal de aducción como parámetro de entrada como 2 metros, con los parámetros establecidos anteriormente se realiza el cálculo de: la altura del canal de aducción con el caudal de diseño, el área del canal de aducción, el perímetro mojado.

Desarenador						
Vs-Allen	0,10	m/s	Criterio vel de resuspension	VERDADERO	Vh-Allen (sup)	0,1036
Re	30,77		Criterio de tiempo de residencia	VERDADERO	Re (sup)	30,7722772
Velocidad de resuspension	0,33	m/s			Ca	1,6607287
bds	4,94	m				
tiempo de sedimentacion	28,93	s				
Lds	16,96	m				
tiempo de residencia tr	101,84	s				
hza	0,57	m				
Purga hp	0,5	m				
Qcelda	2,47	m3/s				

Tabla 9. Dimensionamiento del desarenador

Para el dimensionamiento del desarenador fue necesaria la iteración del Reynolds, esto para hallar las diferentes dimensiones del mismo, es de suma importancia tener en cuenta la velocidad de resuspension, el tiempo de sedimentación y el tiempo de residencia, pues la correcta implementación de estos evitan la entrada de partículas al tanque de carga y posteriormente a la tubería y maquinaria la cual podría dañarse, es por esto que se verifica el cumplimiento de los criterios de resuspension y tiempo de residencia.

Tanque de carga				
Velocidad tanque de carga	3,5	m/s	Sumergencia de knauss	1,806011016
Diametro tp	1,34	m		
Diametro comercial	1,4	m		
Fr	0,65			

Tabla 10. Dimensionamiento tanque de carga

Se define sumergencia según el número de fr, es definido el diámetro de la tubería del proyecto y posteriormente se define el diámetro comercial.

Captación			Fondo o lateral	Fondo
Angulo de reja	10	°		
Cd	0,47			
b_azud	20	m		
b_reja	16,15	m		
L_reja	1,11	m		
Q_v	5,967571681	m ³ /s		
haz	0,30	m		
hhr	0,18	m		
Q_reja	6,533423287	m ³ /s		
L_rejaCorregida	1,44	m		
Alpha	1,3			
bcc	1,44	m		
Y_critica	1,31	m		
h2	1,87	m		
Scc	3%			
h1	1,88	m		
hc_cap	2,13	m		
Delta y	0,60	m		
hcc_dw	2,73	m		
S	0,007		Qcc>Q	VERDADERO
h3	0,013056658	m		
K1	0,798080403			
K2	0,975359758			
Km	0,886720081			
Qcc	5,967656389	m ³ /s		

Tabla 11.

Dimensionamiento captación

Se define la forma de captación según el caudal de diseño, con esto se definió la captación de fondo, posterior a esto se definió el parámetro de ancho del azud y con esto ya establecido se prosiguió a hallar el ancho de la reja, el largo y el caudal, además se estableció la altura de la lámina encima de la reja.

Conducción		
Captacion cota	2660	msnm
Captacion Aps	27500	m
Casa de maquinas cota	2555	msnm
Casa de maquinas Aps	29500	m
PN6	600000	Pa
PN10	1000000	Pa
PN 16	1600000	
Δh1	43	m
Δx1	819	m
Δh2	30	m
Δx2	571	m
Δh3	29	m
Δx3	610	m
S cap-mq	5%	
Diametro min tubería	1,340	m
Diametro comercial tubería	1,4	m
Salto neto	102	m

Tabla 12. Dimensionamiento conducción

Para el cálculo de la conducción fue necesario tener claro las cotas donde se encuentra captación y casa de máquinas, ese proceso fue realizado anteriormente en el análisis hidrológico, se obtuvieron los datos de cotas y abscisas adicionalmente se tomaron las presiones nominales para definir las alturas y las longitudes para cada presión.

Casa de maquinas			Tipo de valvula	Mariposa
Sala de equipos				
Valvula de admisión				
Vel_Valvula admision	6	m/s		
Area_neta	1,539	m ²		
Q_uni_gen	9,236	m ³ /s		
Caracol turbina francis				
n	952,685	rpm	900	
Pot unidad	2156,304	kw		
ns	124,340			
ku	0,621		Coefficiente de velocidad prisferica	
D3	0,565	m		
A	0,589	m		
B	0,870	m		
C	0,969	m		
D	1,069	m		
E	0,843	m		
N	1,795	m		
O	1,108	m		
P	0,735	m		
R	0,747	m		
Coefficiente de cavitación	0,068			
Sumergencia (S)	100992,135			
V_des	2,5	m/s		
α	15			
D_des	2,169	m		
Lt_asp	0,263	m		
L_tran	0,150	m		
Lccl	2,324	m		
Hccl	2,134	m		
Generador				
P _{kVA}	4954,55	kVA		
Codigo	1			
Velocidad	952,685	rpm		
Tamaño de carcasa	8			
Largo min	3,4	m		
Largo max	4,8	m		
Ancho	2	m		
Alto	2	m		
Dimensiones sala de equipos				
Bcm	7,82	m		
Lug	9,08	m		
Lsala_equipos	18,16	m		
Hcm	8,93	m		
Dimensiones sala de desmontaje				
Ancho	5,00	m		
largo	7,82	m		
Area sala_equ+desmon	181,19267	m ²		

Tabla 13. Dimensionamiento casa de maquinas

Posteriormente, se realizó el dimensionamiento de la casa de máquinas definiendo inicialmente el tipo de válvula de admisión a utilizar, las dimensiones del caracol de la turbina, las especificaciones y dimensiones del generador y los demás equipos. El área total de la sala de equipo y desmontaje es de 182 m² aproximadamente.

Con los datos de la longitud de tubería se realizó el cálculo del número total de acoples necesario para cada presión nominal y la cantidad de tramos de tubería de 6 metros requeridos los cuales arrojaron los siguientes valores:

Cantidad	Tubería			Acoples		
	PN6	PN10	PN16	PN6	PN10	PN16
	819	571	610	137	96	102

Tabla

14. Cantidad de tubería y acoples

Luego de definidos la cantidad tramos de tuberías y cantidad de acoples se procede a definir el diámetro eficiente con el fin de disminuir perdidas sin aumentar demasiado el costo de la tubería, esto se logra haciendo un análisis costo beneficio.

Diametro [m]	% perdidas	Pot perdida/ Año	Energia perdida /Año	Costo perdida año	Costo a perpetuidad
1,3	18%	803,3273891	5011977,2	\$ 927.215.782	\$ 11.397.858.414,10
1,4	13%	575,2958774	3589283,597	\$ 664.017.465	\$ 8.162.476.526,54
1,5	10%	422,3801117	2635238,781	\$ 487.519.174	\$ 5.992.860.165,88
1,6	7%	317,0324463	1977972,386	\$ 365.924.891	\$ 4.498.154.780,48
1,7	6%	242,4569335	1512694,126	\$ 279.848.413	\$ 3.440.054.250,73
1,8	4%	188,5616209	1176440,088	\$ 217.641.416	\$ 2.675.370.821,75
1,9	3%	148,8155779	928463,6546	\$ 171.765.776	\$ 2.111.441.623,80
2	3%	119,0398244	742692,0752	\$ 137.398.034	\$ 1.688.973.987,94
2,1	2%	96,34258223	601083,4836	\$ 111.200.444	\$ 1.366.938.469,20
2,2	2%	78,81069651	491701,6641	\$ 90.964.808	\$ 1.118.190.631,22
2,3	1%	65,09559728	406132,8592	\$ 75.134.579	\$ 923.596.545,10
2,4	1%	54,24332861	338425,3169	\$ 62.608.684	\$ 769.621.187,79
2,5	1%	45,56841679	284302,3518	\$ 52.595.935	\$ 646.538.845,49

Tabla

15. Costos pérdidas anuales

Con estos datos se realizó una gráfica (figura 15) en la cual se puede observar mucho mejor el aumento de los costos de pérdidas a medida que se aproxima al diámetro calculado anteriormente a diferencia de los diámetros mayores donde se puede observar que las perdidas disminuyen pues el área de contacto del agua con la tubería disminuye.

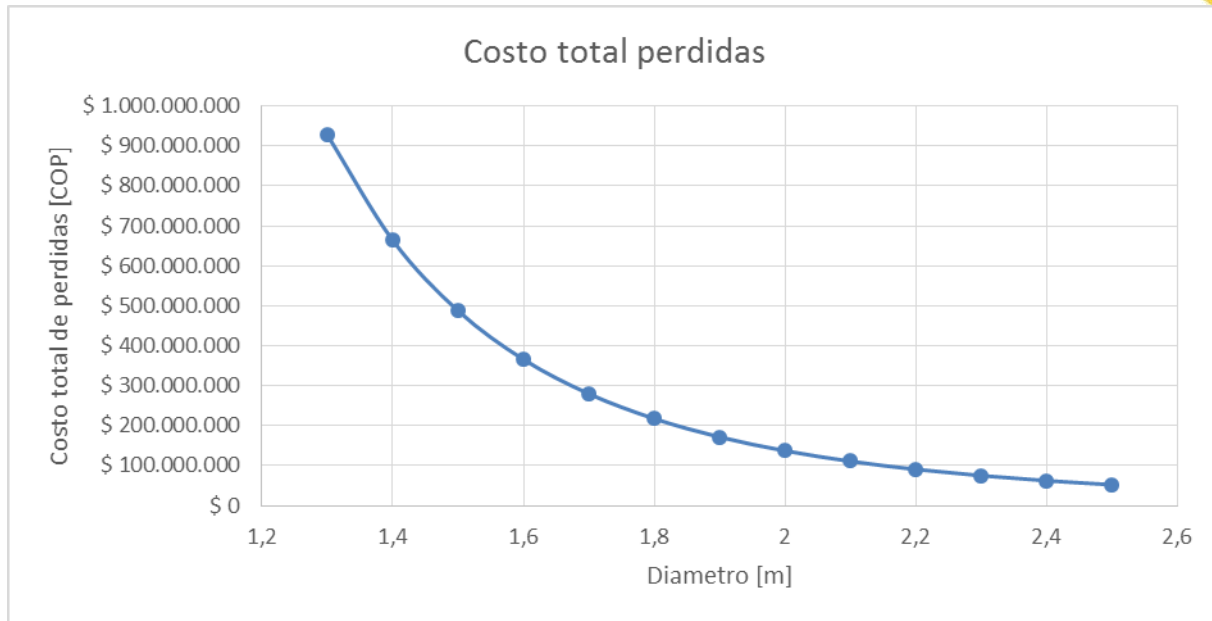


Figura 15. Costo total pérdidas

La definición del diámetro eficiente fue realizada mediante la optimización de presupuesto, teniendo en cuenta los costos totales de la tubería y las pérdidas a perpetuidad. El diámetro eficiente para este caso se encuentra resaltado con verde.

Diámetro [m]	Costo tubería [COP]			Costo acoples [COP]			Costo total [COP]	Costo total tubería + pérdidas a perpetuidad [COP]
	PN6 [\$]	PN10 [\$]	PN16 [\$]	PN6 [\$]	PN10 [\$]	PN16 [\$]		
1,3	\$ 664.761.825	\$ 472.145.625	\$ 540.612.500	\$ 100.345.650	\$ 74.920.800	\$ 85.521.900	\$ 1.852.786.400	\$ 13.250.644.814
1,4	\$ 727.497.225	\$ 517.011.950	\$ 593.972.250	\$ 105.013.925	\$ 82.262.400	\$ 94.643.250	\$ 2.025.757.750	\$ 10.188.234.277
1,5	\$ 800.142.525	\$ 569.272.725	\$ 655.490.750	\$ 116.227.375	\$ 86.536.800	\$ 101.811.300	\$ 2.227.670.175	\$ 8.220.530.341
1,6	\$ 909.458.550	\$ 645.829.550	\$ 745.557.250	\$ 136.294.450	\$ 101.112.000	\$ 119.844.900	\$ 2.538.251.800	\$ 7.036.406.580
1,7	\$ 1.019.736.900	\$ 719.417.175	\$ 828.380.000	\$ 143.599.975	\$ 106.884.000	\$ 128.252.250	\$ 2.818.018.050	\$ 6.258.072.301
1,8	\$ 1.151.268.300	\$ 812.047.650	\$ 934.459.000	\$ 182.816.225	\$ 129.072.000	\$ 154.048.050	\$ 3.209.663.175	\$ 5.885.033.997
1,9	\$ 1.249.507.350	\$ 879.968.100	\$ 1.011.639.250	\$ 193.618.675	\$ 142.785.600	\$ 170.783.700	\$ 3.477.518.975	\$ 5.588.960.599
2	\$ 1.445.739.750	\$ 1.017.550.550	\$ 1.167.646.750	\$ 199.958.350	\$ 150.609.600	\$ 180.027.450	\$ 3.981.505.000	\$ 5.670.478.988
2,1	\$ 1.538.593.875	\$ 1.082.887.225	\$ 1.243.866.250	\$ 214.428.975	\$ 166.723.200	\$ 198.741.900	\$ 4.246.499.525	\$ 5.613.437.994
2,2	\$ 1.703.683.800	\$ 1.198.814.500	\$ 1.377.227.500	\$ 227.443.975	\$ 173.344.800	\$ 206.404.650	\$ 4.680.514.575	\$ 5.798.705.206
2,3	\$ 1.900.612.350	\$ 1.337.124.975	\$ 1.534.165.250	\$ 241.280.975	\$ 186.784.800	\$ 226.939.800	\$ 5.199.968.350	\$ 6.123.564.895
2,4	\$ 2.120.411.475	\$ 1.491.694.675	\$ 1.705.758.250	\$ 264.694.275	\$ 204.988.800	\$ 247.829.400	\$ 5.787.547.475	\$ 6.557.168.663
2,5	\$ 2.414.289.150	\$ 1.713.271.225	\$ 1.952.472.750	\$ 282.418.650	\$ 238.440.000	\$ 302.600.850	\$ 6.600.891.775	\$ 7.247.430.620

Tabla 16. Costos totales tubería y acoples + pérdidas a perpetuidad

Gráficamente se puede observar el punto eficiente como el punto mínimo, en este punto se dice que el costo de la tubería y las pérdidas convergen para encontrar el mínimo costo del proyecto.

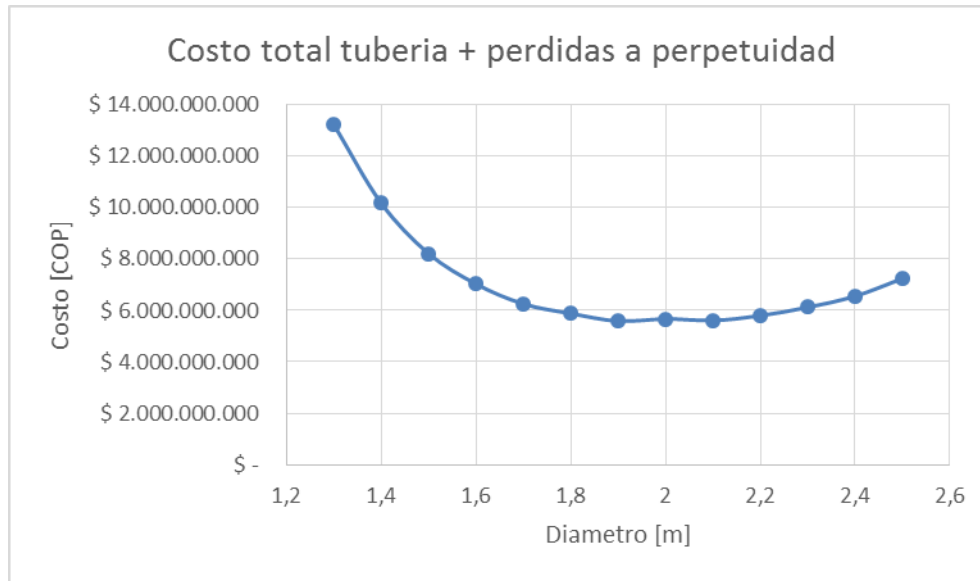


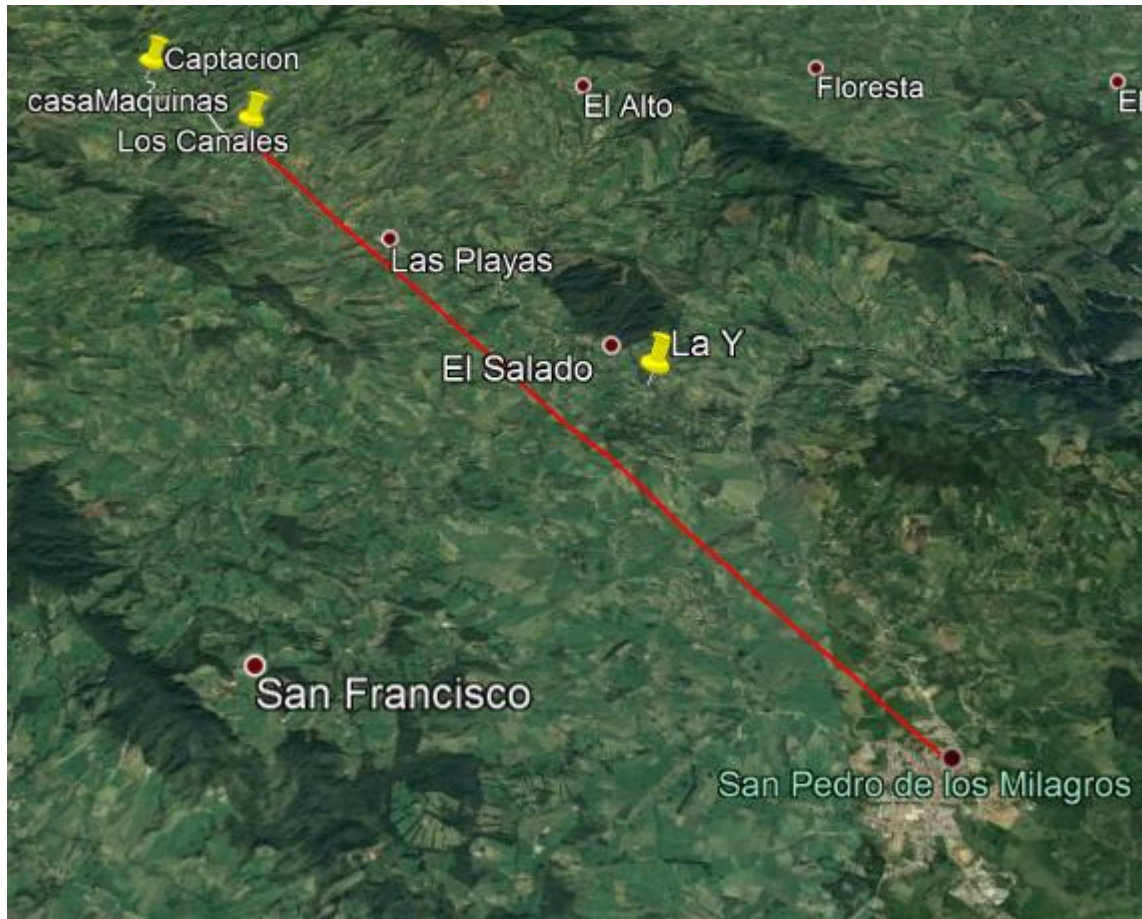
Figura 16. Costo total tubería + pérdidas a perpetuidad

PRESUPUESTO

Para el cálculo del presupuesto es necesario tener los siguientes datos del proyecto, pues dependiendo de la variación de estos el presupuesto puede aumentar o disminuir. La potencia, caudal, tipo de captación y tipo de turbina, etc. se definieron en el dimensionamiento de la PCH, los predios se definen mirando por donde cruza la tubería y en general donde se encuentra la obra, el voltaje de la línea de transmisión lo define la línea a la cual se piensa conectar para entregar la energía generada y la longitud de la línea de transmisión se define dependiendo del lugar donde se desee conectar, teniendo en cuenta las restricciones de la línea, entre otras. El presente proyecto se piensa conectar a la subestación del pueblo de san pedro de los milagros.

PROYECTO		
Potencia	4312,608587	kW
Caudal	4,91	m ³ /s
Captación	Fondo	
Turbina	Francis rapida	
Predios	10,00	ha
Longitud conducción tubería	2000	m
Longitud de canal de aducción	16,96	m
Voltaje línea de transmisión	44	kV
Longitud línea de transmisión	10,0	km
Tasa de cambio	\$ 3.000	\$

Tabla 17. Datos proyecto presupuesto



Figura

17. Línea de transmisión a San Pedro de los Milagro

En la siguiente tabla se encuentra el presupuesto calculado del proyecto desglosado por: predios, captación, conducción, descarga, vías y depósitos para la obra civil y equipos electromecánicos, diseño, gerencia y planes de manejo.

LOTE	Por ítem	Por lote	Participación %
Predios	230.000.000	230.000.000	0,85%
Captación		2.408.378.228	8,95%
Desvío			
Captación	1.275.405.316		
Canal de aducción	250.000.000		
Desarenador	882.972.911		
Tanque de carga			
Conducción		7.265.648.778	26,99%
Sumnistro tubería	5.588.960.599		
Instalación tubería	1.676.688.180		
Descarga		645.000.000	2,40%
Casa de máquinas	600.000.000		
Canal de descarga	45.000.000		
Vías y depósitos		842.000.000	3,13%
Vías	553.000.000		
Depósitos	289.000.000		
Otros		1.520.000.000	5,65%
Obras de estabilización			
Cerramiento			
Cercha	1.520.000.000		
Imprevistos		1.455.037.203	5,40%
Obra civil (15%)	1.063.809.961		
Tubería (7%)	391.227.242		
AIU (35%)		2.991.486.264	11,11%
TOTAL OBRA CIVIL		17.127.550.473	63,62%
EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS			
Equipos EEM	6.000.000.000		22,29%
Línea de transmisión	800.000.000		
Equipos hidromecánicos	380.000.000		
Imprevistos (5%)	359.000.000		
TOTAL EQUIPOS EEM		7.539.000.000	28,00%
DISEÑOS, GERENCIA-INTERVENTORÍA Y			
Estudios y diseños	900.000.000		
Interventoría y gerencia	900.000.000		
Plan de manejo amb y social	225.390.000		
TOTAL DISEÑO, GERENCIA Y PLANES DE		2.025.390.000	7,52%
PRESUPUESTO TOTAL		26.921.940.473	

Tabla 18. Presupuesto total

CONCLUSIONES

- Una vez realizado el estudio técnico y económico de una PHC se puede evidenciar que la inversión en este tipo de proyectos es realmente grande, por lo cual se requiere un patrocinador que tenga capital suficiente para la finalización de este tipo de proyecto.
- Las exigencias regulatorias y ambientales por las cuales este tipo de proyectos deben cumplir, los estudios medioambientales y de conexión hacen que estos se retrasen y aumenten los costos de implementación, por moras en los procesos, que para el caso colombiano son realmente demorados.
- La generación de energía a través de centrales hidroeléctricas es común en un país como Colombia que el 70% de la generación se realizado por medio de este tipo de generación, sin embargo, con los cambios medioambientales que cada vez se están volviendo más y más fuertes, el país sufre la dependencia que se tiene a este recurso “renovable”. En la cuenca que Rio Grande Antioquia no es posible en el momento, validar el tipo de afectación que ha sufrido, debido a que los datos de caudales son insuficientes, ya que el cambio climático se ha venido endureciendo a partir del 2010 y los datos recolectados son de años anteriores.
- Los principales cambios regulatorios están mas enfocados al cumplimiento de la normativa ambiental, realizando estudios más rigurosos de la afectación de este tipo de proyectos al medio ambiente.
- Analizar los principales cambios y tendencias en la normativa y regulación ambiental que afectan el desarrollo y operación de las pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia

Lista de referencias

1. Santos, C. (2023). Mercado energético en Colombia: Avances, dificultades y tensiones en la transición. Data Center Dynamics. Recuperado de <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/mercado-energ%C3%A9tico-en-colombia-avances-dificultades-y-tensiones-en-la-transici%C3%B3n/>
2. Torres, A. (2022). Seis Retos de la industria de energías renovables en Colombia. Revista contacto. Recuperado de <https://revistacontacto.uniandes.edu.co/especial/seis-retos-de-la-industria-de-energias-renovables-en-colombia/>
3. Duque, E.A., González, J.D., Restrepo, J.C. (2016). Desarrollo de infraestructura sostenible para pequeñas centrales hidroeléctricas mediante mecanismos de desarrollo limpio en Colombia. Ingeniería de Procedía 145, pp. 224 a 233
4. González, L. (2022). Desafíos del acceso a energía eléctrica en comunidades vulnerables. Revista de Energía y Desarrollo Sostenible, 15(3), 45-60. Recuperado de
5. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (n.d.). Acceso a la energía: Estrategia para la reducción de la pobreza. <https://www.undp.org/es/colombia/discursos/acceso-energia-estrategia-para-reduccion-de-pobreza>
6. Banco Mundial. (2023, 6 de junio). Basic energy access lags amid renewable opportunities, new report shows. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/06/06/basic-energy-access-lags-amid-renewable-opportunities-new-report-shows>
7. EAFIT, Repositorio EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/24b29e1a-16c0-4521-8cca-a40504c744af/content>

8. Sánchez, L. (2014). El impacto de la educación en el desarrollo económico: Un estudio en Colombia. *Revista Colombiana de Estadística*, 37(2), 203-220.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000200024&script=sci_arttext
9. Ministerio de Minas y Energía. (n.d.). Energía eléctrica.
<https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/>
10. Unidad de Planeación Minero Energética. (2024, abril). Boletín NODO (6ª ed.).
https://www1.upme.gov.co/Documents/Boletin_NODO_6ta_edicion_Abril_2024.pdf
- Arbeláez, A., & Rojas, C. (2014). Estudio de la dinámica de la pobreza en Colombia y sus determinantes. *Revista Colombiana de Estadística*, 37(2), 203-220.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000200024&script=sci_arttext
11. Barón Sánchez, A., & Medina Naranjo, C. F. (2020). Análisis de volatilidad del flujo de caja utilizando el enfoque de opciones reales para la construcción de la pequeña central hidroeléctrica-PCH Vequedo ubicada en el departamento de Antioquia Colombia.
12. Pacheco Garzón, N. H., & Torres Quintero, J. E. (2021). Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca, Colombia.
13. Hernández Cuadros, L. V. (2024). Plan de Proyecto para la Implementación del Diseño y Construcción de una Pequeña Central Hidroeléctrica Comunitaria en el Municipio de Litoral del Bajo San Juan, Chocó, Colombia.
14. Pacheco Garzón, N. H., & Torres Quintero, J. E. Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca, Colombia Pre-feasibility Study of a Small Hydroelectric Plant in El Sisga Reservoir, Cundinamarca, Colombia.
15. Chaparro, D. N., & Benítez, M. I. (2016). ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RIO CAUCA CON UNA POSTERIOR EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA PCH PATICO LA CABRERA. *Universidad Católica de Colombia, Bogotá*.

16. Toro Álvarez, C. (2015). Estudios de pre factibilidad para desarrollo de PCH'S en Colombia basados en la normatividad vigente, la ley 1715 y el mecanismo de desarrollo limpio, proyecto Río Claro, Jardín-Antioquia.
17. Grisales, E. A. D., Ruíz, J. D. G., Restrepo, J. C. R., & Gómez, L. D. V. (2016). Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas como Alternativa para el Mecanismo de Desarrollo Limpio en Antioquia, Colombia. *Revista ESPACIOS| Vol. 37 (Nº 11) Año 2016*.
18. Gil Zapata, M. M., Smith Quintero, R. A., & Angel Robledo, W. (2004). Análisis de inversión en pequeñas centrales hidroeléctricas. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
19. Jimenez Toro, J. A. (2022). *Revisión de pequeñas centrales hidroeléctricas para electrificar zonas no interconectadas de Colombia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
20. Osorio, A. M., & Cifuentes, L. (2020). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en el Oriente del departamento de Caldas. "Impactos ambientales y resistencias sociales en el posconflicto". *Jurídicas*, 17(2), 180-198.
21. Duque Ramírez, H. A. (2021). *Análisis de los impactos sociales de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en las comunidades del oriente antioqueño: caso PCH el popal, municipio de Cocorná* (Master's thesis, Universidad de Medellín).
22. Grisales, E. A. D., & Vásquez, L. A. (2016). Alternativa de las pequeñas centrales hidroeléctricas de Antioquia en el mecanismo de desarrollo limpio. *Revista Ciencias Estratégicas*, 24(35), 73-100.
23. González Hernández, J. C. (2015). Planeación estratégica de una pequeña central hidroeléctrica.

24. Rodríguez Becerra, P. G., & Rodríguez Rocha, G. C. (2022). Actualización de una Guía de Diseño para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHs) en Colombia, En Las Áreas De Cartografía, Topografía, Estructuras Hidráulicas y Gestión Ambiental.
25. Morales Acevedo, C. J., & Saavedra Martínez, F. D. (2017). Diseño de una pequeña central hidroeléctrica para el municipio de Pisba, Boyacá.
26. Castaño Gamboa, N., & Morales Rodríguez, V. O. Desarrollo de un estudio de viabilidad técnica, administrativo, legal, ambiental y financiera de una pequeña central hidroeléctrica en la quebrada San José-Tolima.
27. De la Peña, Y., Bordeth, G., Campo, H., & Murillo, U. (2018). Energías limpias una oportunidad para salvar el Planeta. *IJMSOR: International Journal of Management Science & Operation Research*, 3(1), 21-25.
28. Cortés, S., & Londoño, A. A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista ciencias estratégicas*, 25(38), 375-390.
29. Cortolima. (n.d.). Diagnóstico de aspectos biofísicos de la cuenca de Panelas. https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS_BIOFISICOS.pdf
30. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2020). Guía para la identificación y evaluación de proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Colombia. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co>
31. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). (2021). Estudio técnico de la cuenca del Río Grande, Antioquia: Caracterización hídrica y climática. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co>
32. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). Censo Nacional de Población y Vivienda: Resultados para Antioquia. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.dane.gov.co>

33. Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2020). Estudio de impacto ambiental para la instalación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en Antioquia. Medellín, Colombia. Recuperado de <https://www.epm.com.co>
34. García, J., & Rodríguez, A. (2018). Impacto socioeconómico de la instalación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en comunidades rurales de Colombia. *Revista de Energías Renovables*, 14(2), 125-145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.002>
35. UNESCO Water Resources Programme. (2022). Hydrological and environmental considerations for small hydropower plants: Global best practices. París, Francia. Recuperado de <https://www.unesco.org/water>
36. Martínez Aza, R. A. (2020). Análisis de viabilidad de implementación de proyectos de energías renovables.
37. MORALES, B. D. R., & PINZÓN, J. S. E. Análisis de la aplicación de las medidas ambientales en el marco de la licencia ambiental del proyecto hidroeléctrico ituango y su relación con el incidente en el año 2018.
38. RAMOS-CÁRDENAS, M. C., HERNÁNDEZ-CIPAMOCHA, D. C., PÉREZ-ARENAS, H. Y., & SIERRA-CÁRDENAS, E. R. I. K. A. (2022). Análisis y perspectivas de la implementación de tecnologías limpias para la generación de energía en Colombia. *I3+*, 4(2).
39. Bacca-García, J. O., & Toro, J. (2021). Análisis de la vulnerabilidad de la hidroelectricidad en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 24(Supl2), 27-45.
40. ARÉVALO, J. J. G. PEQUEÑAS CENTRALES HIDRÁULICAS A FILO DE AGUA.
41. Barrera Galvis, C. P. (2019). Licencias ambientales para proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas.
42. Daza Vargas, M. A. (2023). Los proyectos hidroeléctricos y su aporte a la matriz de generación de energía en Colombia.

43. Cárdenas Domínguez, R. F., & Carvajal Polaina, J. D. (2020). Formulación de indicadores para la evaluación de los impactos ambientales y sociales en la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas que generan entre 10 MW y menos de 100 MW.
44. Pinzón-González, J. P., & Quevedo-Orjuela, J. D. (2019). Análisis de impactos ambientales provocados por el aprovechamiento de recursos naturales renovables, reconociendo metodologías que desarrollan nuevas fuentes generadoras de energía en Panamá y Colombia.
45. Garcia, H., Nava, A. (2014). Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas.