



Institución Universitaria

**Diseño y validación de una turbina  
de flujo cruzado fabricada con  
polímero reciclado para la  
generación de energía renovable en  
viviendas rurales: un estudio de caso  
en la vereda San Rafael, La Ceja,  
Antioquia.**

**Edwin Muñoz Mejía**

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas  
Medellín, Colombia

2025



# **Diseño y validación de una turbina de flujo cruzado fabricada con polímero reciclado para la generación de energía renovable en viviendas rurales: un estudio de caso en la vereda San Rafael, La Ceja, Antioquia.**

**Edwin Muñoz Mejía**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Desarrollo Sostenible**

Director:

Ms.Ing. Carlos Roberto Arango Gutiérrez

Línea de Investigación:

Innovación e implementación de tecnologías más limpias

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas  
Medellín, Colombia

2025



LEMA

***“Preservar nuestra naturaleza no es un tema de leyes, es un acto patriótico”***

WADE DAVIS



# Agradecimientos

A mis padres Piedad Elena y Oscar David, por su amor incondicional y su apoyo incansable, por enseñarme a perseverar y no decaer en este camino. A ellos debo este logro, por su ejemplo y confianza en mí.

A mis hermanos Laura Andrea, Manuel Alejandro y a mis tíos, quienes han sido fuente constante de apoyo y cariño. Su presencia ha sido fundamental para superar cada desafío y continuar avanzando.

Y a mis colegas de la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación del Pascual Bravo, gracias por su compañerismo y por inspirarme a crecer día a día.

A todos mi gratitud más sincera y mi cariño por ser parte de este logro.



## Resumen

La energía desempeña un papel crucial en el crecimiento económico a nivel mundial, ya que los avances tecnológicos dependen directamente de la accesibilidad a este recurso. No obstante, garantizar el suministro de energía a la población mundial representa un desafío considerable, dado que los recursos y el medio ambiente son finitos y están siendo explotados en gran medida. Numerosas comunidades en países en desarrollo están trabajando en la generación de energía renovable para áreas no interconectadas. Este enfoque no solo mitiga el calentamiento global, sino que también previene el agotamiento de los recursos utilizados en la generación de energías convencionales. El objetivo principal de esta investigación es diseñar una turbina de flujo cruzado destinada a viviendas rurales, construida con polímero reciclado (HDPE), para la generación de energía renovable. Para lograr este objetivo, se realizará un análisis de las condiciones hidrológicas convencionales, incluyendo la medición de caudal y altura en el sitio. Este análisis servirá como base para el diseño de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) en una vivienda rural de la vereda San Rafael, municipio de La Ceja, que cumpla con los criterios de construcción sostenible y que se adapte a las condiciones específicas del lugar. Finalmente, se validará el funcionamiento de un prototipo a escala de la turbina. Este prototipo será fabricado mediante tecnología de impresión 3D para confirmar su viabilidad y eficiencia en la generación de energía renovable.

**Palabras clave:** Energía Renovable, Caudal, Pequeña Central Hidroeléctrica, Turbina Ossberger, Desarrollo Sostenible, Zonas No Interconectadas.

## Abstract

Energy plays a crucial role in global economic growth, as technological progress is directly dependent on access to this resource. Nevertheless, ensuring a reliable energy supply for the world's population remains a considerable challenge, given that resources and the environment are finite and are being heavily exploited. Numerous communities in developing countries are working on renewable energy generation for non-interconnected areas. This approach not only mitigates global warming, but also prevents the depletion of resources used in conventional energy production. The main objective of this research is to design a crossflow turbine intended for rural households, fabricated from recycled polymer (HDPE), for renewable energy generation. To achieve this goal, an analysis of conventional hydrological conditions will be carried out, including site-specific measurements of flow rate and head. These analyses will underpin the design of a Small Hydroelectric Power Plant (SHP) for a rural dwelling in San Rafael, municipality of La Ceja, complying with sustainable construction criteria and tailored to the specific local conditions. Finally, the performance of a scaled prototype of the turbine will be validated. This prototype will be manufactured using 3D printing technology to confirm its feasibility and efficiency in renewable energy production.

**Keywords:** Renewable Energy, Flow Rate, Small Hydroelectric Power Plant, Ossberger Turbine, Sustainable Development, Non-Interconnected Zones.

# Contenido

<b>RESUMEN .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE FOTOGRAFÍAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. MEDICIÓN DE CAUDAL Y ALTURA.....</b>	<b>7</b>
1.1 CONTEXTO .....	8
1.2 METODOLOGÍA Y RESULTADOS .....	11
1.2.1 Instrumentos y equipos utilizados para la medición de caudal .....	12
1.2.2 Resultados.....	13
1.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS.....	17
1.4 CONSUMO ENERGÉTICO HOGAR RURAL .....	21
1.4.1 Parámetros de referencia nacional .....	21
1.4.2 Análisis del consumo de la vivienda estudiada .....	22
1.4.3 Validación con estándares nacionales .....	23
1.4.4 Dimensionamiento de la PCH .....	24
<b>2. DISEÑO DE LA TURBINA .....</b>	<b>25</b>
2.1 MATERIALES DE DISEÑO .....	27
2.1.1 Polietileno de alta densidad .....	28
2.1.2 Acero AISI SAE 1020.....	29
2.2 DISEÑO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL.....	30
2.2.1 Cálculos.....	30
2.2.2 Diseño asistido por computador (CAD) .....	39
<b>3. IMPRESIÓN 3D DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>43</b>
3.1 PREPARACIÓN DEL MODELO .....	47
3.2 PROCESO DE IMPRESIÓN .....	48
3.3 PROTOTIPO FUNCIONAL.....	53
3.3.1 Fabricación de la turbina.....	53
3.3.2 Fabricación del soporte y estructura .....	53
3.3.3 Elementos mecánicos y ensamble.....	53
<b>4. PRUEBAS DE LABORATORIO .....</b>	<b>57</b>

4.1	METODOLOGÍA DE PRUEBAS .....	58
4.1.1	Montaje experimental .....	58
4.1.2	Condiciones controladas .....	59
4.2	RESULTADOS .....	60
4.2.1	Primer ensayo: Una manguera de entrada (altura: 4 m) .....	60
4.2.2	Segundo ensayo: Doble manguera de entrada (altura: 6 m).....	61
4.3	VIABILIDAD TÉCNICA.....	63
4.3.1	Ventajas del diseño propuesto .....	64
4.3.2	Datos clave de la demanda energética.....	65
4.3.3	Potencia generada con dos turbinas en serie .....	65
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....</b>	<b>67</b>
5.1	LCA DE LA TURBINA.....	68
5.1.1	Producción de materiales .....	68
5.1.2	Fabricación.....	69
5.1.3	Transporte.....	70
5.1.4	Uso.....	70
5.1.5	Fin de vida.....	71
5.2	AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD .....	71
5.3	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	73
5.3.1	Cálculo de LCOE de la turbina propuesta.....	74
5.3.2	Comparación con alternativas tecnológicas.....	75
5.3.3	Tiempo de retorno de inversión .....	77
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	78
6.1.1	Condiciones hidrológicas.....	78
6.1.2	Diseño y materiales de la turbina .....	78
6.1.3	Fabricación y costo del prototipo .....	79
6.1.4	Desempeño energético .....	79
6.1.5	Impacto ambiental y social .....	79
6.1.6	Perspectivas futuras.....	79
6.1.7	Trabajos derivados.....	80
6.2	RECOMENDACIONES .....	82
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>85</b>

## Lista de figuras

	<b>PÁG.</b>
Figura 1-1: Resultados de altura entre puntos de medición.....	13
Figura 1-2: Histograma de tiempos de llenado .....	15
Figura 1-3: Q-Q Plot del tiempo de llenado .....	16
Figura 1-4: Diagrama de selección de turbinas .....	21
Figura 2-1: Diagrama de velocidad y relaciones geométricas.....	33
Figura 2-2: Diagrama de fuerza cortante y momento flector .....	35
Figura 2-3: Diseño de piezas en CAD .....	40
Figura 2-4: Ensamble de piezas en CAD.....	42
Figura 3-1: Parámetros iniciales de impresión en OrcaSlicer .....	49

Nota: Excepto en donde se indique lo contrario, las figuras son de elaboración propia.

## Lista de tablas

	<b>PÁG.</b>
Tabla 1-1: Resumen resultados de tiempos de llenado .....	14
Tabla 1-2: Comparativo entre alternativas de turbina.....	19
Tabla 1-3: Inventario y consumo de energía en la vivienda de diseño .....	23
Tabla 2-1: Propiedades del HDPE .....	28
Tabla 2-2: Constantes de diseño .....	31
Tabla 2-3: Condiciones de carga .....	31
Tabla 3-1: Costos construcción del prototipo .....	55
Tabla 4-1: Resultados primer ensayo .....	60
Tabla 4-2: Resultados segundo ensayo.....	61
Tabla 4-3: Extrapolación de resultados.....	63
Tabla 4-4: Consumo eléctrico en bombillas .....	63
Tabla 5-1: Análisis de costos de la turbina propuesta .....	75
Tabla 5-2: Comparaciones económicas entre tecnologías.....	76

## Lista de fotografías

Fotografía 3-1:	Impresiones fallidas de la turbina .....	50
Fotografía 3-2:	Proceso de impresión de la turbina .....	51
Fotografía 3-3:	Turbina impresa con soportes de construcción .....	52
Fotografía 3-4:	Turbina post-procesada .....	52
Fotografía 3-5:	Piezas y componentes .....	53
Fotografía 3-6:	Proceso de ensamble del prototipo .....	54
Fotografía 3-7:	PCH ensamblada .....	55
Fotografía 4-1:	Montaje ensayo inicial .....	61
Fotografía 4-2:	Montaje segundo ensayo .....	62

Nota: Excepto en donde se indique lo contrario, las fotografías son de elaboración propia.

## Lista de abreviaturas

### Abreviatura Término

---

<i>PCH</i>	Pequeña Central Hidroeléctrica
<i>HDPE</i>	Polietileno de alta densidad
<i>ODS</i>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<i>PNUD</i>	Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<i>PLA</i>	Ácido Poliláctico
<i>LCA</i>	Análisis del Ciclo de Vida
<i>ZNI</i>	Zonas no Interconectadas
<i>PET</i>	Polietileno tereftalato
<i>RPM</i>	Revoluciones por Minuto
<i>VA</i>	Voltios-amperios
<i>CAD</i>	Diseño Asistido por Ordenador
<i>3D</i>	Objetos tridimensionales
<i>TIG</i>	Proceso de soldadura con tungsteno y gas inerte
<i>COP</i>	Peso Colombiano
<i>CAPEX</i>	Capital Expenditure (Gasto de Capital)
<i>LCOE</i>	Levelized Cost of Energy (Costo Nivelado de Energía)
<i>OPEX</i>	Operational Expenditure (Gasto Operacional)
<i>WACC</i>	Weighted Average Cost of Capital (Costo Promedio Ponderado de Capital)

# Introducción

Según el Banco Mundial (2022), el acceso a una energía asequible, confiable y sostenible representa uno de los retos más importantes en la actualidad para el desarrollo integral de las comunidades, especialmente en países en desarrollo como Colombia. A pesar de que las grandes centrales hidroeléctricas generan entre el 65% y 68,3% de la electricidad en el país, como documentan las Revistas Universidad del Bosque (2023), su infraestructura de alta envergadura y costos elevados limitan su implementación en áreas rurales, donde la falta de acceso a la red eléctrica sigue siendo un problema persistente. Las comunidades rurales, que enfrentan limitaciones por la dificultad de conexión al sistema interconectado nacional, dependen en gran medida de fuentes no renovables, costosas y de alto impacto ambiental.

Las Revistas Universidad del Bosque (2023) destacan que la transición energética hacia la diversificación de la matriz con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), incluyendo la energía solar fotovoltaica, eólica y geotérmica, se presenta como una estrategia fundamental para reducir la vulnerabilidad del sistema energético y promover un desarrollo sostenible. El Congreso de Colombia (2021), mediante la Ley 2099 de 2021 sobre transición energética, ha establecido el marco regulatorio para fortalecer la participación de estas tecnologías limpias, mientras que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2015) reconoce que la electrificación rural se presenta no solo como una necesidad social, sino como un factor crucial para reducir la desigualdad económica y promover un desarrollo sostenible en las zonas no interconectadas.

A nivel global, la creciente demanda de energía, impulsada desde la Revolución Industrial, ha profundizado la dependencia de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo, los cuales generan un impacto negativo considerable sobre el medio ambiente. En respuesta a esta problemática, organismos internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) han promovido el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, que aboga por el acceso universal a una energía asequible y limpia. Según el Banco Mundial (2022), en Colombia aproximadamente el 7% de la población en áreas rurales carece de acceso a electricidad, lo que dificulta el progreso socioeconómico y agrava la brecha entre las zonas urbanas y rurales. Estas limitaciones demuestran la urgente necesidad de implementar soluciones alternativas, sostenibles y accesibles que aprovechen los recursos naturales de manera eficiente y ecológica.

Este proyecto se centra en el diseño de una turbina de flujo cruzado adaptada a pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), construida utilizando polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado. Las PCH se presentan como una alternativa viable y de bajo impacto para comunidades rurales en zonas de bajo caudal, ofreciendo una generación de energía distribuida que permite a las comunidades acceder a una fuente confiable y sostenible de electricidad sin depender de la red principal. El diseño propuesto pretende ser funcional y económico, al igual que alinearse con los principios de la economía circular, promoviendo la reducción de residuos plásticos mediante el uso de materiales reciclados.

Los desechos plásticos en Colombia representan un problema ambiental significativo. Según Suárez (2016), solo el 26% de los residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) es reciclado. La presente investigación aborda esta problemática al proponer la integración de dichos residuos en el sistema de generación energética, contribuyendo así a un modelo de producción más sostenible.

En el contexto actual de Colombia, las comunidades energéticas han ganado protagonismo como una estrategia clave para democratizar el acceso a la energía y fortalecer la participación ciudadana en la transición energética del país. Según la Ley 2294 de 2023, estas comunidades se definen como "agrupaciones de usuarios o potenciales usuarios de servicios energéticos que se constituyen para generar, comercializar y/o usar eficientemente la energía a través del uso de fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER)". Esta figura legal representa un cambio fundamental hacia la descentralización del sistema energético, permitiendo a los ciudadanos un rol más activo.

El marco normativo colombiano se ha consolidado para apoyar estas iniciativas. La Resolución 101 072 de la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) de 2024 estableció los procedimientos técnicos para la integración de las comunidades energéticas al Sistema Interconectado Nacional, según Giraldo Quiroz (2025). Además, para agosto de ese mismo año, el Ministerio de Minas y Energía y el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) anunciaron la contratación y ejecución de múltiples proyectos, enfocados principalmente en áreas rurales y no interconectadas del país (FENOGE, 2024). Estas acciones permitieron que, para octubre de 2024, operaran aproximadamente 100 comunidades energéticas, beneficiando a más de 15 departamentos con soluciones basadas en energías renovables y contribuyendo a un modelo de producción más sostenible (SOCYA, 2024).

Iniciativas como las mencionadas anteriormente transforman a las comunidades rurales en "prosumidores" —productores y consumidores de energía al mismo tiempo—, lo que reduce su dependencia de fuentes centralizadas y contribuye a la mitigación del cambio climático. El desarrollo tecnológico propuesto en esta investigación se alinea perfectamente con esta visión nacional, ya que las turbinas de flujo cruzado fabricadas con materiales reciclados pueden ofrecer una solución apropiada para la implementación de comunidades energéticas en zonas como la

vereda San Rafael. Esta alternativa innovadora combina la generación distribuida, la economía circular y el empoderamiento comunitario.

Desde la perspectiva del autor, el desarrollo de esta turbina representa una oportunidad para implementar una tecnología replicable y accesible que podría ser adoptada en otras regiones con condiciones similares. Este enfoque innovador permite transformar a las comunidades rurales en “prosumidores” de energía; es decir, productores y consumidores, reduciendo su dependencia de fuentes externas y fortaleciendo su resiliencia energética.

La propuesta promueve la independencia energética de comunidades en zonas no interconectadas, alineándose con la Ley 1715 de 2014, que busca fomentar el uso de fuentes no convencionales de energía en el país, especialmente en áreas remotas que requieren soluciones flexibles y sostenibles, tal como lo regula el Congreso de Colombia (2014) a través de la Ley 1715. En este sentido, el proyecto ofrece una alternativa con bajos costos de mantenimiento y fabricación in situ, que permita la manufactura de componentes directamente en el sitio de implementación, eliminando la necesidad de infraestructura industrial centralizada.

A lo largo de esta investigación se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las variables relacionadas con el diseño y rendimiento de la turbina, evaluando aspectos como la eficiencia en la generación de energía, la durabilidad del material reciclado y su impacto ambiental en comparación con alternativas tradicionales. La vereda San Rafael, del municipio de La Ceja, servirá como caso de estudio para evaluar la viabilidad de implementar este tipo de turbina en comunidades similares, permitiendo documentar y analizar sus beneficios y limitaciones.

Este proyecto se enmarca en el esfuerzo global por lograr una mayor sostenibilidad para el desarrollo de las comunidades, pero ofrece también un modelo de electrificación rural adaptable a las necesidades específicas de las mismas,

demostrando que es posible integrar la innovación tecnológica con el desarrollo comunitario y la conservación ambiental. Con este enfoque, la presente investigación se propone como una contribución directa al ODS 7, orientada a cerrar las brechas de acceso a la energía en áreas rurales de Colombia, con un enfoque adicional que apuesta por la economía circular y el aprovechamiento de recursos renovables locales.

Al evaluar el desempeño de la turbina en el contexto de la vereda San Rafael, se pretende validar una alternativa viable de generación de energía limpia, como también fomentar la autogestión energética en las comunidades y sentar las bases para futuras aplicaciones de tecnologías sostenibles en el país.

Es importante destacar que, si bien el diseño y todos los cálculos estructurales de este proyecto están concebidos para la fabricación de la turbina con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) reciclado —aprovechando residuos comunes de la construcción como canecas de pintura y estuco —, la fase de validación experimental se realizó sobre un prototipo a escala fabricado con Ácido Poliláctico (PLA) mediante impresión 3D. Esta decisión metodológica responde a la necesidad de un prototipado rápido, accesible y de bajo costo, permitiendo validar la geometría y el comportamiento funcional del diseño de manera eficiente antes de proceder a la manufactura con el material final.



# 1.MEDICIÓN DE CAUDAL Y ALTURA

A nivel global, el acceso a energía sostenible se ha convertido en un pilar fundamental para el desarrollo económico y social. La Organización de las Naciones Unidas (2015) estima que para 2030 será necesario que al menos el 20% de la energía mundial provenga de fuentes renovables, para mitigar los efectos del cambio climático y satisfacer las necesidades de las poblaciones en crecimiento segura. Sin embargo, el Banco Mundial (2021) asegura que, aproximadamente 759 millones de personas en el mundo aún viven sin acceso a electricidad, lo cual afecta en particular a las comunidades rurales en países en desarrollo.

En Colombia, la situación es crítica en las zonas no interconectadas (ZNI) que, según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2018), representan cerca del 52% del territorio nacional y donde habitan aproximadamente dos millones de personas. Estas áreas dependen en gran medida de generadores de diésel y otras fuentes fósiles, una opción costosa y perjudicial para el medio ambiente. Según datos de la UPME (2018), las ZNI en Colombia producen aproximadamente el 70% de sus emisiones de CO<sub>2</sub> a partir del uso de generadores de diésel, lo que contribuye a acelerar el cambio climático y afecta la calidad del aire.

En el departamento de Antioquia varias regiones, incluyendo el Bajo Cauca, el Magdalena Medio y el Urabá, así como áreas rurales del municipio de La Ceja, carecen de acceso estable a electricidad debido a su aislamiento geográfico y a la dificultad de extender la red eléctrica nacional, como lo ha reportado el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2017). Esta situación limita las oportunidades de mejorar la calidad de vida y el desarrollo económico de

los habitantes, generando una dependencia en fuentes de energía convencionales con impactos ambientales adversos, como las basadas en hidrocarburos.

La generación de energía a través de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) que utilizan turbinas de flujo cruzado ha demostrado ser una solución viable para zonas rurales en otros países, como lo evidencian los trabajos de Quaranta y Pezzinga (2022). Las PCH, con una capacidad instalada que no supera los 5 MW, son particularmente efectivas en entornos de bajo caudal como el que presenta la vereda San Rafael, en donde la validación de esta investigación tendrá lugar. Además, el uso de materiales reciclados como el polietileno tereftalato (PET) en la fabricación de turbinas permite reducir costos y fomenta la sostenibilidad ambiental, como lo demuestran Romero-Menco et al. (2020) al disminuir la generación de residuos sólidos.

## 1.1 CONTEXTO

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) se han convertido en una solución viable para proporcionar energía limpia y accesible en áreas rurales no interconectadas, especialmente en países en desarrollo. Las PCH son particularmente adecuadas para entornos de bajo caudal y altura limitada, donde las grandes centrales hidroeléctricas serían poco prácticas y ambientalmente invasivas. Estos sistemas permiten aprovechar los recursos hídricos locales con infraestructura mínima, lo que, en palabras de Keawsuntia (2011), reduce costos y el impacto ambiental en comparación con sistemas de mayor envergadura.

Estudios recientes han demostrado la efectividad de las turbinas de flujo cruzado en PCH, especialmente en contextos rurales con limitaciones de infraestructura y caudales variables. Keawsuntia (2011), documenta cómo una microturbina de flujo cruzado es capaz de generar electricidad eficiente en caudales bajos, con un diseño adaptado que optimiza la transmisión de energía para condiciones específicas de entornos rurales. En este sentido, Keawsuntia (2014) demostró que

este tipo de turbina puede generar potencias adecuadas..., alcanzando eficiencias de hasta 47% en configuraciones de baja altura.

Otro estudio relevante es el de Adhikari y Wood (2018), quienes evaluaron la eficiencia de una turbina de doble boquilla de flujo cruzado, encontrando que este diseño logra una eficiencia máxima de 89,12%, significativamente superior a configuraciones de una sola boquilla. Estos resultados sugieren que, en comunidades rurales con recursos hídricos limitados, la implementación de turbinas de flujo cruzado de doble boquilla puede maximizar la producción energética y mejorar la viabilidad de las PCH sin necesidad de modificar significativamente el ecosistema acuático.

Un ejemplo de implementación exitoso es el programa de electrificación rural sostenible mediante pequeñas turbinas hidroeléctricas documentado por Musa et al. (2018), en el cual se instalaron PCH en comunidades rurales de Malasia para generar energía limpia y asequible. Este programa incluyó estudios preliminares de medición de caudales y evaluación de costos, demostrando que las PCH pueden ser económicamente viables para zonas rurales y competir en costo con la electricidad conectada a la red. Estas experiencias internacionales ofrecen un marco comparativo relevante para proyectos de PCH en América Latina, en donde condiciones similares permiten adaptar estos modelos de generación distribuida para satisfacer las necesidades energéticas locales de manera sostenible.

En América Latina, en donde muchas regiones rurales enfrentan problemas de acceso a la energía, las PCH representan una solución con potencial de replicabilidad en diversas geografías. En Colombia, la Ley 1715 de 2014 promueve el uso de fuentes renovables en zonas no interconectadas, y estudios como el de Jiménez y Carvajal (2015), han explorado los efectos del control de tensión y frecuencia en microrredes con PCH en operación aislada. Este tipo de sistemas no solo proporciona estabilidad energética en contextos desconectados de la red nacional, sino que también permite a las comunidades gestionar sus recursos

energéticos de manera autónoma, reduciendo su dependencia de combustibles fósiles.

En Antioquia, la viabilidad y el impacto positivo de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en el desarrollo regional se han demostrado a través de casos exitosos. Un ejemplo notable es la PCH Juan García, ubicada en el municipio de Liborina, en el occidente antioqueño, que se ha convertido en un modelo de desarrollo sostenible y responsabilidad social para proyectos similares (GENMAS, 2024).

Esta central hidroeléctrica fue construida "a filo de agua," lo que significa que no necesita de un gran embalse para operar. Aprovecha el potencial de la quebrada Juan García con una capacidad instalada de 4,54 MW, suficiente para abastecer a unas 11.500 viviendas. La inversión total del proyecto fue de \$41.000 millones de pesos, y durante su construcción se crearon 120 empleos directos, beneficiando a los residentes de la zona. Actualmente, la PCH tiene asegurada la venta de energía por 10 años, lo que garantiza ingresos mínimos de \$4.500 millones anuales para los socios del proyecto (GENMAS, 2022).

La experiencia de la PCH Juan García se integra en estrategias de electrificación rural más amplias, impulsadas por convenios entre la Gobernación de Antioquia y EPM (Empresas Públicas de Medellín). Entre 2020 y 2022, estas alianzas público-privadas permitieron el acceso a la energía eléctrica a 4.100 familias en áreas rurales de Antioquia, con una inversión departamental de más de \$2.807 millones de pesos, según EPM (2022). El modelo de colaboración establece que EPM facilita la infraestructura de conexión, mientras que la Gerencia de Servicios Públicos de la Gobernación de Antioquia subsidia el 70% del valor de la conexión para familias de estrato 1.

Este tipo de convenios y experiencias exitosas son replicables en otros municipios, como La Ceja, en donde la implementación de una PCH propuesta en este estudio podría beneficiarse de esquemas de cofinanciación y apoyo institucional similares. La existencia de programas de electrificación rural consolidados en Antioquia, que han beneficiado a cerca de 11.000 familias y 52 instituciones educativas entre 2020 y 2023 (Empresas Públicas de Medellín, 2023), evidencia un ecosistema favorable para la implementación de tecnologías de generación distribuida, con énfasis en la sostenibilidad y la participación comunitaria.

## 1.2 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El proyecto se lleva a cabo en una vivienda rural situada en la Vereda San Rafael, municipio de La Ceja, Antioquia, Colombia (*con coordenadas: 5°56'32,923"N 75°26'59,350"W*). Esta ubicación representa un entorno típico de zonas rurales en donde la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas puede mejorar significativamente la autonomía energética de la comunidad, con un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, que incluye la evaluación del efecto esperado a raíz de la propuesta de un diseño implementado en una zona de estudio, y la descripción de ciertas características, propiedades y rasgos más importantes del fenómeno, en donde se ha evidenciado una situación por mejorar. Durante la investigación se realiza un análisis de las necesidades eléctricas de los habitantes de la vivienda rural y las mediciones del afluente hídrico que servirá como insumo de la potencia hidráulica del sistema a diseñar.

Se analizan las condiciones hidrológicas convencionales mediante la medición de caudal y altura para fundamentar el diseño de una PCH que pueda instalarse en la vivienda rural. Estas variables hidrológicas son fundamentales para la selección del tipo de turbina y selección de materiales.

### 1.2.1 Instrumentos y equipos utilizados para la medición de caudal

La medición de caudal se realizó mediante el método volumétrico, reconocido por su simplicidad, confiabilidad y precisión en caudales menores a 1,0 l/s. Los instrumentos utilizados fueron:

- Cronómetro digital con precisión de  $\pm 0,01$  segundos
- Recipiente calibrado de 20 litros de capacidad, verificado volumétricamente
- Cinta métrica para medición de alturas y distancias
- Libreta de campo para registro sistemático de datos
- Tejas plásticas para canalización y direccionamiento del flujo hacia el recipiente

La medición de caudal (Q) se realiza utilizando mediciones indirectas mediante llenado de recipientes con volumen conocido en un periodo de tiempo mediante la ecuación (1-1).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1-1)$$

Donde Q representa el caudal, V el volumen y t el tiempo.

El procedimiento siguió los lineamientos técnicos establecidos para aforos volumétricos. Se seleccionó un tramo adecuado donde fue posible canalizar la totalidad del agua hacia el recipiente calibrado, evitando pérdidas de flujo durante la medición. El cronómetro se activó simultáneamente con la introducción del recipiente al flujo y se detuvo al alcanzar el volumen aforado. Para garantizar la representatividad estadística, se realizaron mínimo 5 mediciones por sesión de aforo, calculando el valor promedio del tiempo de llenado.

Se determina la altura de la posición proyectada para el generador, utilizando instrumentos digitales, como barómetros, o herramientas análogas, como cintas métricas. Los datos recolectados se almacenan en una hoja de cálculo para análisis y posterior integración en el diseño.

### 1.2.2 Resultados

Durante el periodo de estudio, se realizan mediciones de caudal en distintos días para evaluar la estabilidad y capacidad del flujo en el afluente, proporcionando una base confiable para el diseño de la PCH. Utilizando cronómetro digital y recipiente calibrado de 20 litros, se obtuvieron un total de 551 registros. Los tiempos de llenado son calculados y tabulados para cada día, permitiendo obtener una media de 1,524 segundos con una desviación estándar de 0,575 segundos (Tabla 1-1), y el caudal obtenido en valor promedio fue de 0,00542 m<sup>3</sup>/s, que para efectos prácticos corresponde a 5 litros por segundo (l/s).

**Figura 1-1: Resultados de altura entre puntos de medición**



Para la medición de altura se utilizaron puntos de referencia en los tramos superior e inferior de la quebrada, definidos por la toma del agua y el punto de instalación de la PCH a borde de la casa, con una diferencia de 20 metros. Esta diferencia de

altura proporciona la presión hidráulica necesaria para operar una turbina de flujo cruzado, maximizando la eficiencia energética de la PCH.

**Tabla 1-1: Resumen resultados de tiempos de llenado**

FECHA TOMA DE DATOS	TIEMPO DE LLENADO PROMEDIO (S)
18/08/2019	1,585
25/08/2019	1,539
1/09/2019	2,111
8/09/2019	2,105
15/09/2019	1,98
22/09/2019	1,587
29/09/2019	1,499
20/10/2019	1,189
27/10/2019	0,878
3/11/2019	0,901
10/11/2019	1,17
17/11/2019	1,048
15/12/2019	1,562
12/01/2020	2,644
19/01/2020	2,658
26/01/2020	1,66
2/02/2020	1,526
9/02/2020	1,664
28/02/2021	1,234
7/03/2021	2,513
14/03/2021	1,78
21/03/2021	1,809
28/03/2021	1,759
4/04/2021	2,121
11/04/2021	1,546
18/04/2021	1,454
25/04/2021	1,326
2/05/2021	1,412
9/05/2021	1,885

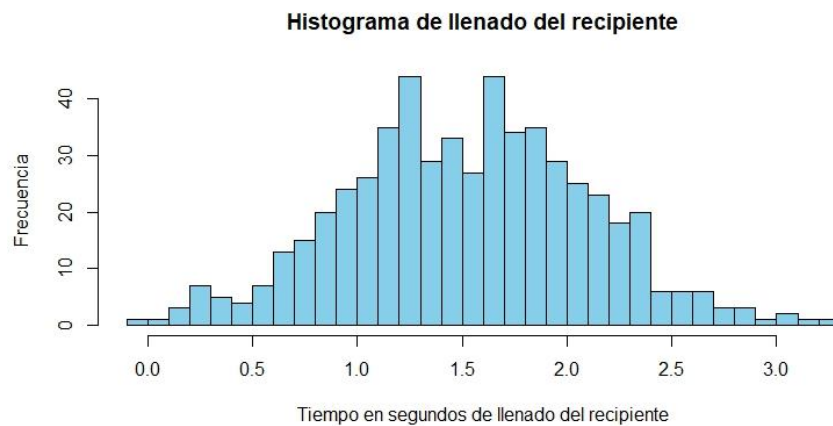
  

MEDICIONES DE TIEMPO	
MEDIDAS RECIPIENTE (mm)	
280	Altura
230	Diámetro superior
200	Diámetro inferior
CAPACIDAD	
9,4	Litros
2,5	Galones
0,009	m3
HORA DE MEDICIONES	
10:00 -12:00	
VALOR PROMEDIO	
1,660192	Segundos
0,0054211	m3 / s

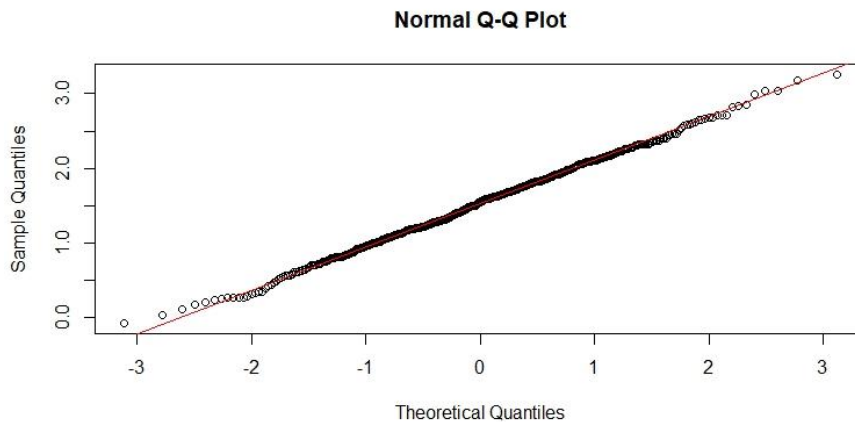
Para evaluar la distribución de los datos de caudal y garantizar su fiabilidad, se realiza un análisis de normalidad utilizando el estadístico de Kolmogorov-Smirnov. Este análisis es fundamental, ya que una distribución normal de los datos permite aplicar métodos estadísticos robustos para estimar el comportamiento del flujo en diferentes periodos.

La prueba entrega un valor  $p$ -valor=0,1694, superior al umbral de significancia de 0,05, indicando que los datos no se desvían significativamente de una distribución normal. El estadístico  $D=0,047322$  también confirma una alineación considerable con la normalidad. El histograma de los datos de llenado muestra una curva en forma de campana centrada en la media, lo cual visualmente respalda la distribución simétrica.

**Figura 1-2: Histograma de tiempos de llenado**



La Figura 1-3 muestra que los puntos de las mediciones se alinean a lo largo de una línea recta, sin desviaciones significativas, lo que reafirma la normalidad en los datos de caudal.

**Figura 1-3: Q-Q Plot del tiempo de llenado**

Los resultados de caudal indican un flujo constante y estable, lo que es fundamental para asegurar una generación continua de energía. Igual se hace énfasis en que está directamente influenciado por el clima a través de fenómenos como las lluvias (precipitaciones), la temperatura y la evaporación, que afectan tanto la cantidad de agua disponible como la distribución temporal.

La variación en la periodicidad de las mediciones de caudal entre 2019 y 2021 se debe a una combinación de factores climáticos, operativos y de acceso al sitio de estudio. Durante 2019, se implementó un protocolo de medición sistemático con el fin de caracterizar el comportamiento hidrológico base de la fuente. Este proceso se llevó a cabo siguiendo directrices y técnicas reconocidas para la validación de información hidrológica. Por ejemplo, el IDEAM publicó en 2020 un manual detallado para este fin. De manera similar, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2021) cuenta con un manual para la realización de aforos de caudal en fuentes superficiales, y la Universidad de Viena ofrece un instructivo específico para la medición de caudal (s.f.).

En 2020, la frecuencia de las mediciones se vio reducida significativamente debido a las restricciones de movilidad impuestas por la pandemia de COVID-19 y a la

intensificación del fenómeno de La Niña. Este fenómeno generó un incremento de las precipitaciones que hizo más difícil el acceso al sitio de estudio.

El aumento en la recolección de datos en 2021 coincidió con la transición hacia condiciones El Niño-neutras y El Niño débil. Esto permitió retomar las mediciones de manera sistemática y densificar la base de datos, lo cual fue fundamental para el diseño definitivo de la PCH. Es crucial considerar que, en Colombia, los eventos climáticos extremos como El Niño pueden reducir los caudales hasta en un 40%, mientras que La Niña puede incrementarlos hasta en un 65%. Estas fluctuaciones no solo impactan la disponibilidad del recurso, sino también las condiciones de seguridad y acceso para realizar las mediciones en campo.

Para las muestras se encuentra un comportamiento estable, pero puede suceder que en periodos de lluvias intensas se incremente debido al aporte directo, mientras que en sequía o temporadas de altas temperaturas disminuya debido a la reducción del aporte y al incremento de la evaporación. En Colombia, los eventos climáticos extremos como El Niño y La Niña generan variaciones que alteran los patrones de flujo de agua de forma abrupta. Estos cambios, junto con los efectos del calentamiento global, afectan de manera estructural los ecosistemas fluviales y la disponibilidad de recursos en muchas regiones del mundo, como lo afirman Milly et al. (2008).

### 1.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS

Para fundamentar la selección de la turbina de flujo cruzado en este proyecto, se realizó un análisis comparativo sistemático de las principales tecnologías disponibles para pequeñas centrales hidroeléctricas, considerando las condiciones específicas del sitio de estudio ( $Q = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H = 20 \text{ m}$ ).

- **Turbinas Pelton:** son ideales para grandes alturas de caída y caudales bajos. Funcionan con chorros de agua a alta velocidad que impactan

cucharas en la periferia del rodete, generando energía mecánica. De acuerdo con Müller (2008), su alta eficiencia en caídas superiores a 300 metros las hace populares en centrales hidroeléctricas de alta montaña.

- **Turbinas Francis:** son versátiles y operan en un rango amplio de alturas y caudales, típicamente de 20 a 300 metros de caída. El agua fluye hacia el rodete en dirección radial y sale axialmente, lo que, según Miller (1995), permite un diseño compacto y eficiente, adecuado para centrales de tamaño medio.
- **Turbinas Kaplan:** se usan en bajas alturas de caída (menos de 20 metros) y grandes caudales. Estas turbinas tienen álabes ajustables que optimizan el rendimiento según el flujo disponible, lo que, para Dixon y Hall (2010), las hace ideales para ríos con variaciones significativas en caudal.
- **Turbinas Michell-Banki:** también conocidas como turbinas de flujo cruzado u Ossberger, son una opción eficiente y versátil para aplicaciones en micro y pequeñas centrales hidroeléctricas. Su diseño simple y adaptable las hace ideales para situaciones donde otras turbinas no serían prácticas o económicamente viables.

La Tabla 1-2 presenta los datos comparativos de las turbinas Pelton, Francis, Kaplan y Flujo Cruzado, destacando las ventajas de esta última para las condiciones del proyecto.

**Tabla 1-2: Comparativo entre alternativas de turbina**

<b>Criterio</b>	<b>Pelton</b>	<b>Francis</b>	<b>Kaplan</b>	<b>Flujo Cruzado</b>
Eficiencia máxima (%)	85-95	85-95	80-90	80-85
Eficiencia a carga parcial (%)	60-70	50-65	45-60	70-80
Rango de altura (m)	>100	20-300	<20	2-150
Rango de caudal (m <sup>3</sup> /s)	0,003-3	1-700	2-200	0,2-10
Costo relativo	Alto	Alto	Muy Alto	Bajo
Complejidad fabricación	Alta	Muy Alta	Muy Alta	Baja
Tolerancia a sólidos	Baja	Muy Baja	Muy Baja	Alta

Según el análisis, la turbina de flujo cruzado se ajusta de forma óptima a las condiciones del proyecto debido a sus características únicas:

- **Eficiencia superior a carga parcial:** A diferencia de las turbinas Francis y Kaplan, que reducen su eficiencia bajo caudales parciales, las turbinas de flujo cruzado mantienen una alta eficiencia (70-80%) incluso con caudales fluctuantes. Esta característica es crucial dada la variabilidad hidrológica del sitio.
- **Rango de operación apropiado:** Con una altura y un caudal, el proyecto se sitúa en el rango óptimo de operación para turbinas de flujo cruzado, mientras que queda fuera del rango eficiente para turbinas Pelton ( $H > 100$  m) o en el límite inferior para turbinas Francis.
- **Simplicidad constructiva:** Una turbina de flujo cruzado requiere solo 2 a 3 componentes móviles, a diferencia de los complejos sistemas de regulación de otras turbinas, lo que reduce los costos de fabricación y mantenimiento. El diseño de las turbinas Michell-Banki, una variante de flujo cruzado se distingue por su sencillez (Romero-Menco, Pineda Aguirre, & Velásquez, 2020).

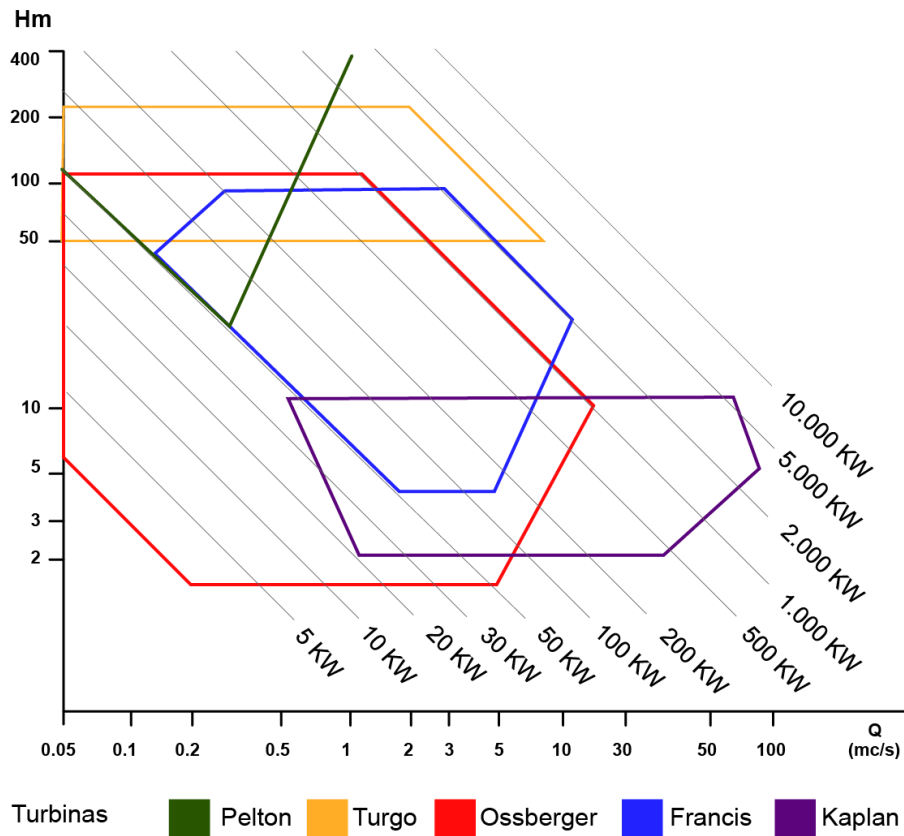
- **Tolerancia a sedimentos:** Su diseño auto-limpiante le permite operar con agua que contenga sedimentos, una condición común en fuentes rurales. Esto elimina la necesidad de sistemas de filtrado adicionales, un aspecto que destaca su idoneidad para ambientes como el de este proyecto.

La elección de la turbina de flujo cruzado para este proyecto fue basada en criterios técnicos específicos, que responden a las características del afluente y el entorno rural del hogar. La Figura 1-4 permite visualizar la relación entre el caudal promedio y la altura disponible, mostrando la capacidad de generación de energía en función de la presión.

La elección se sustenta en la adaptabilidad a bajo caudal y altura moderada. Como explica Paish (2002), estas turbinas pueden trabajar eficientemente en un rango amplio de alturas (2 a 40 metros) y caudales bajos, lo que las hace adecuadas para ríos con flujos variables y proyectos de pequeña escala. Adicionalmente, en la facilidad del diseño y su economía para la construcción es relativamente sencilla en comparación con otras turbinas, lo que representa costos de fabricación y mantenimiento más bajos. Además, como señalan Wagner y Mathur (2009), el uso de materiales reciclados en sus componentes, como HDPE, es común en aplicaciones sostenibles.

En cuanto a la eficiencia constante a cargas parciales, según Giesecke y Mosonyi (2005), las Michell-Banki mantienen una eficiencia razonablemente alta incluso cuando operan a caudales parciales, gracias a su flujo cruzado en dos etapas. Finalmente, por su adaptabilidad a comunidades rurales y la facilidad de instalación y operación, dado que no requieren una infraestructura compleja, lo que simplifica su implementación en proyectos pequeños. Además, Wagner y Mathur (2009) destacan que su capacidad de manejar caudales con residuos sólidos pequeños en el agua reduce el riesgo de obstrucciones.

**Figura 1-4: Diagrama de selección de turbinas**



Nota. Rango de operación para diferentes tipos de turbinas hidráulicas según altura (Hm) y caudal (Q). Adaptado de "Diseño de una minicentral hidroeléctrica", por V. Palomeque, I. Valdez, N. Jara, y F. Reinoso, s.f., Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología, (30).

## 1.4 CONSUMO ENERGÉTICO HOGAR RURAL

Para dimensionar correctamente la PCH, es esencial analizar de manera detallada el consumo energético del hogar rural, validándolo con parámetros de referencia nacionales. Para ello, los valores calculados se contrastaron con indicadores oficiales establecidos por la UPME y el marco regulatorio colombiano, lo que asegura una metodología robusta y alineada con los estándares del país.

### 1.4.1 Parámetros de referencia nacional

El análisis se basa en el Consumo Básico de Subsistencia (CBS), definido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG); según la Resolución CREG

119 de 2007, el CBS para municipios ubicados por encima de 1.000 metros sobre el nivel del mar es de 130 kWh/mes. Dado que el municipio de La Ceja se encuentra a 2.150 msnm, este valor se establece como la línea base del estudio (Celsia, 2024); (Palacios, 2014).

Se consideraron además estudios de caracterización energética en zonas rurales de Colombia, realizados por la UPME, que ofrecen un panorama del consumo promedio en estos contextos (Unidad de Planeación Minero Energética, 2022). Los datos indican que:

- En zonas rurales de Norte de Santander, el consumo varía entre 76 y 125 kWh/mes (IPSE, 2019)
- El Plan de Energización Rural Sostenible para Caquetá reporta un consumo promedio de 76,24 kWh/mes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).
- En zonas rurales de Cundinamarca, a 0-500 msnm, el consumo se sitúa entre 125 y 150 kWh/mes (Universidad de los Andes, 2024).
- El promedio nacional para zonas rurales se estima entre 85 y 140 kWh/mes.

#### **1.4.2 Análisis del consumo de la vivienda estudiada**

El consumo energético de la vivienda en la vereda San Rafael se determinó mediante un inventario detallado de dispositivos eléctricos y el análisis de sus patrones de uso, típicos de un hogar rural con acceso a servicios básicos ampliados. La Tabla 1-3 muestra el desglose del consumo validado.

**Tabla 1-3: Inventario y consumo de energía en la vivienda de diseño**

Dispositivo	Un	Carga Unitaria (VA)	% Utilización	Carga Demandada (VA)	Observaciones
Bombillas LED	8	9	90%	64,8	Iluminación básica CBS
Nevera	1	150	80%	120	Equipo básico rural
Televisor	2	60	70%	84	Entretenimiento
Ventilador	3	75	60%	135	Confort térmico
Cargadores	4	10	50%	20	Dispositivos móviles
Subtotal CBS	---	---	---	423,8	Consumo básico
Licuada	1	350	20%	70	Electrodoméstico adicional
Parrilla eléctrica	1	1500	80%	1200	Carga industrial*
Calentador agua	1	1500	75%	1125	Carga industrial*
Lavadora	1	500	60%	300	Electrodoméstico mayor
<b>TOTAL</b>	<b>21</b>	<b>4154</b>	<b>---</b>	<b>3118,8</b>	<b>Carga real estimada</b>

*\*Cargas industriales incluidas por condiciones específicas del hogar estudiado.*

### 1.4.3 Validación con estándares nacionales

El consumo demandado calculado de 3.118,8 VA se encuentra un 11% por debajo del CBS de 130 kWh/mes establecido para La Ceja (equivalente a 3.510 VA). Esto valida que el hogar representa un caso típico para zonas rurales con acceso a electrodomésticos básicos y equipos adicionales de mayor consumo. El valor se sitúa dentro del percentil 75 para hogares rurales con servicios ampliados, lo cual es consistente con estudios que indican que hogares de ingresos medios consumen entre el 85% y el 125% del CBS local.

La inclusión de cargas como la parrilla y el calentador eléctrico refleja patrones de electrificación rural en los que las familias sustituyen el gas propano o la leña por electricidad cuando tienen acceso confiable al servicio, un comportamiento coherente con los objetivos de la transición energética en Colombia.

#### **1.4.4 Dimensionamiento de la PCH**

El diseño de la PCH se basó en la carga demandada validada de 3.118,8 VA, que equivale a 2.651 W (considerando un factor de potencia de 0,85). Este dimensionamiento asegura que la PCH tendrá capacidad suficiente para suplir las necesidades energéticas básicas identificadas y validadas con parámetros nacionales de referencia.

## 2.DISEÑO DE LA TURBINA

La construcción sostenible se ha consolidado como una estrategia esencial para reducir los impactos ambientales de las infraestructuras, promoviendo el uso eficiente de recursos y minimizando el impacto sobre los ecosistemas. Este enfoque adopta principios como el empleo de materiales reciclados y la reducción de la huella de carbono a través de todo el ciclo de vida de las edificaciones. En este ámbito (2019) destaca el HDPE como un plástico reciclable idóneo para aplicaciones en infraestructuras sostenibles debido a su durabilidad y resistencia. La integración de materiales reciclados como el mencionado en proyectos de infraestructura permite extender el ciclo de vida útil de estos residuos, transformándolos en recursos de bajo costo y alto valor estructural.

El concepto de economía circular subyace en el uso de plásticos reciclados dentro de la construcción, ya que este modelo promueve la reutilización de materiales y disminuye la dependencia de recursos no renovables. El empleo de plásticos reciclados contribuye a reducir la huella de carbono de los proyectos de infraestructura, favoreciendo un modelo de producción en donde los materiales se mantienen en uso y el volumen de desechos se minimiza. Acorde con estos principios, Nußholz et al. (2019) identifican que el aprovechamiento de materiales circulares en la construcción podría reducir hasta en un 40% las emisiones de carbono de un proyecto, al evitar procesos intensivos en energía que son necesarios para la producción de nuevos plásticos.

El HDPE reciclado, en particular, ha demostrado ser una opción práctica para componentes estructurales de infraestructuras de energía limpia debido a su resistencia mecánica y estabilidad frente a condiciones climáticas variables. En el

caso de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), por ejemplo, Liu (2019) señala que la incorporación de HDPE en la construcción de turbinas de flujo cruzado puede reducir los costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los sistemas al mismo tiempo que se disminuye el impacto ambiental asociado a la extracción de nuevos materiales. Este tipo de iniciativas no solo favorecen la sostenibilidad, sino que también facilitan la replicación de modelos de infraestructura adaptables y económicos en áreas rurales o de difícil acceso.

El uso de plásticos reciclados en la construcción sostenible es un ejemplo de cómo los entornos urbanos pueden integrar el concepto de biodiversidad y resiliencia. Barrico et al. (2016) discuten cómo el diseño de edificaciones sostenibles y la biodiversidad urbana pueden converger, generando estructuras que no solo minimizan el impacto ambiental, sino que también contribuyen a crear espacios saludables para la comunidad. En esta línea, Brown y Grant (2005), sostienen que la planificación urbana integrada y el uso de materiales reciclados pueden reducir el impacto de la construcción en la biodiversidad local, promoviendo una relación armónica entre los ecosistemas naturales y las áreas habitadas.

Con el objetivo de desarrollar el diseño de una PCH que cumpla con los criterios de construcción sostenible, que se adapte a las condiciones específicas y necesidades energéticas del sitio, y con base en las mediciones iniciales de caudal y altura, considerando las pérdidas por fricción en la tubería, se calculan los componentes clave de la turbina de flujo cruzado, incluyendo la rueda y los álabes. La velocidad de giro de la turbina se calculará utilizando la ecuación:

$$n = 40.62 \times Kc \times \frac{\sqrt{Hn}}{D} \quad (2-1)$$

Donde:

n: es la velocidad de giro de la turbina,

Kc: es el coeficiente de velocidad del inyector,

Hn: es la altura neta, y

D: es el diámetro del rotor.

Se prevé que los álabes de la turbina en HDPE serán capaces de soportar la presión constante del caudal de la fuente hídrica, sin experimentar deformaciones, roturas o pérdida de eficiencia. Esto se basa en el uso de polímeros de alta resistencia, que se han seleccionado por su durabilidad y capacidad para soportar fuerzas mecánicas en entornos húmedos, asegurando la viabilidad a largo plazo del proyecto.

El cálculo permite seleccionar el número de álabes del rotor, el ancho de la rueda, y el diseño óptimo del inyector. Simultáneamente, se realizarán ensayos destructivos en los álabes de polímero reciclado para validar su resistencia y durabilidad bajo condiciones operativas. El diseño de la turbina de flujo cruzado se lleva a cabo considerando las condiciones hidrológicas específicas del sitio de estudio.

Para los cálculos y dimensionamiento de los componentes principales, se utilizan como referencia el Manual de Diseño de la OLAD (s.f.) E y el texto Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (8ª ed.) de Budynas y Nisbett (s.f.). Se incorporan constantes como la gravedad, la densidad del agua y la presión atmosférica de 0,09 MPa del sitio para asegurar precisión en los cálculos.

## **2.1 MATERIALES DE DISEÑO**

Se selecciona el HDPE como polímero a reciclar para la fabricación de la turbina y el acero 1020 para la fabricación del eje, adicionalmente para la cubierta y la tobera se considera el uso de acero inoxidable que minimice el uso de recubrimientos o pinturas para el mantenimiento del equipo.

### 2.1.1 Polietileno de alta densidad

El HDPE es un polímero termoplástico derivado del petróleo, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales gracias a su versatilidad, resistencia y bajo costo. A continuación, se describen sus principales características técnicas:

#### Propiedades físicas y mecánicas:

- Alta resistencia al impacto y a la tracción, con un rango típico de resistencia a la tracción de 15-45 MPa.
- Excelente resistencia química frente a ácidos, bases, aceites y otros agentes corrosivos.
- Baja densidad (0,93-1,27 g/cm<sup>3</sup>), lo que lo hace liviano, pero con buena rigidez.
- Alta durabilidad y resistencia a la abrasión.

**Tabla 2-1: Propiedades del HDPE**

PROPIEDADES	HDPE (METRIC)
Densidad	0.933–1.27 g/cm <sup>3</sup>
Dureza Shore D	55–69
Resistencia a la tracción (máxima)	15.2–45 MPa
Límite de fluencia a la tracción	2.69–200 MPa

#### Propiedades térmicas:

- Punto de fusión en el rango de 120-135 °C, lo que permite su uso en procesos industriales que implican temperaturas moderadas.
- Baja conductividad térmica, ideal para aplicaciones de aislamiento.

#### Propiedades de fabricación:

- Alta procesabilidad mediante técnicas como moldeo por inyección, extrusión y termoformado.

- Es reciclable, lo que permite su reutilización en productos secundarios, como recipientes o perfiles.

#### **Utilización en la industria:**

- Construcción: Fabricación de tuberías para sistemas de agua potable y alcantarillado, gracias a su resistencia a la corrosión.
- Empaque y almacenamiento: Producción de envases para productos químicos, alimentos y cosméticos debido a su seguridad alimentaria y resistencia química.
- Sostenibilidad: Uso en aplicaciones de economía circular, como piezas moldeadas a partir de plásticos reciclados.

### **2.1.2 Acero AISI SAE 1020**

Según ASTM International (2020), el AISI SAE 1020 es un acero al carbono de bajo contenido de carbono (0,18-0,23%) que es ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales y mecánicas debido a su balance entre propiedades mecánicas, maleabilidad y costo. A continuación, se destacan sus principales características técnicas:

#### **Propiedades físicas y mecánicas:**

- Resistencia a la tracción de aproximadamente 394-490 MPa.
- Alta ductilidad y facilidad para el conformado, doblado y laminado.
- Moderada resistencia al desgaste, mejorable mediante tratamientos térmicos como la cementación.
- Buena soldabilidad gracias a su bajo contenido de carbono.

#### **Propiedades térmicas:**

- Excelente respuesta a tratamientos térmicos, como temple y revenido, para aumentar su dureza superficial.
- Punto de fusión de aproximadamente 1,515 °C, lo que lo hace ideal para aplicaciones de alta temperatura.

**Propiedades de fabricación:**

- Fácil de mecanizar y procesar mediante torneado, fresado y perforado.
- Adecuado para procesos de soldadura por arco, resistencia y gas.

**Utilización en la industria:**

- Automotriz: Producción de piezas estructurales como ejes, pernos y componentes de chasis.
- Construcción mecánica: Ejes, engranajes y otros elementos sometidos a esfuerzos moderados.
- Construcción civil: Uso en vigas, soportes y otras aplicaciones estructurales.
- Fabricación de herramientas y maquinaria: Piezas con requerimientos moderados de resistencia y dureza.

## **2.2 DISEÑO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL**

### **2.2.1 Cálculos**

El diseño incluyó una variable de diseño fija: el diámetro exterior del rodete, que se mantuvo en 265 mm. Este valor corresponde al tamaño de canecas de HDPE reciclado que se utilizarán para la fabricación del rodete, garantizando sostenibilidad y bajo costo. Se realizaron pruebas de dureza y ensayos universales en probetas de HDPE, confirmando que el material cumple con los requisitos estructurales.

Tabla 2-2: Constantes de diseño

CONSTANTE	VALOR	UNIDAD
Gravedad	$g = 9,81$	$\frac{m}{s^2}$
Densidad del Agua	$\rho = 1.000$	$\frac{kg}{m^3}$
Peso específico del agua	$\gamma = 9.800$	$\frac{N}{m^3}$
Presión Atmosférica <sup>1</sup>	$P_{atm} = 0,09$	$MPa$

Tabla 2-3: Condiciones de carga

Cabeza	$h = 20$	$m$
Caudal	$Q = 0,005$	$\frac{m^3}{s}$

Se considerará como referencia dimensional, las expresiones descritas:

### Potencia al freno

$$P_T = \frac{P_g}{\eta_g \eta_{tr}} \quad (2-2)$$

### Caudal de diseño

$$Q = \frac{P_T}{9,807 H \eta_T} \quad (2-3)$$

Reorganizando la potencia máxima entregada al sistema eléctrico en función de la potencia al freno y el caudal de diseño, se tiene que:

$$P_g = 9,807 Q H \eta_T \eta_g \eta_{tr} \quad (2-4)$$

Y para las revoluciones optimas de la turbina, se tiene que:

$$N = \frac{39,85 H^{1/2}}{D_e} \quad (2-5)$$

Donde,

Potencia de freno de la turbina	$P_T$	<i>KW</i>
Potencia máxima que el generador entrega al sistema eléctrico	$P_g = 0,52$	<i>KW</i>
Eficiencia del generador	$\eta_g = 0,8$	<i>Adm</i>
Eficiencia de la transmisión mecánica utilizada entre la turbina y generador	$\eta_{tr} = 0,8$	<i>Adm</i>
Caudal máximo de diseño que fluirá por la turbina	$Q = 0,005$	$m^3/s$
Salto neto aprovechable	$H = 16$	<i>m</i>
Eficiencia de la turbina cuando opera a plena carga	$\eta_T = 0,8$	<i>Adm</i>
Numero de revoluciones optimas	$N = 601,5$	<i>RPM</i>
Diámetro exterior del rodete	$D_e = 265$	<i>m</i>
Ángulo promedio de orientación del agua al rodete	$\alpha_2 = 16$	$^\circ$
Coeficiente de velocidad del inyector	$K_c = 0,98$	<i>Adm</i>
Coeficiente de velocidad tangencial	$K_u = 0,5$	<i>Adm</i>
Coeficiente de velocidad relativa	$K_f = 0,98$	<i>Adm</i>
Velocidad de salida del agua a la salida de la tobera $C_2 = 4,34\sqrt{H}$	$C_2 = 17,36$	$m/s^2$
Eficiencia hidráulica de la turbina $\eta_h = 2K_c^2 \cos^2(\alpha_2) K_u (1 - K_u) (1 + K_f)$	$\eta_h = 0,88$	<i>Adm</i>

**Fuerza del agua:**

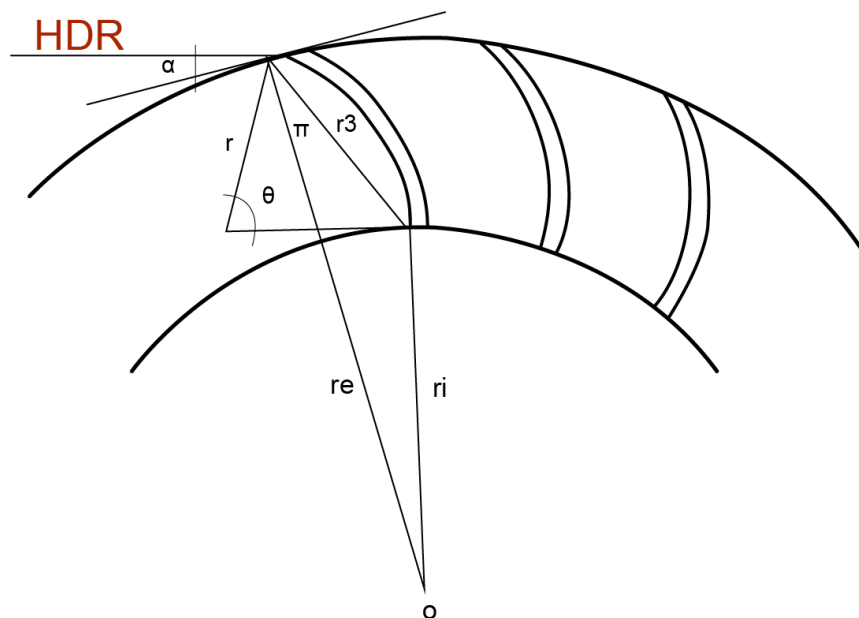
$$F = \frac{\gamma Q C_2}{g} \quad (2-6)$$

Donde,

Fuerza del agua	$F = 112,72$	$N$
Peso específico del agua	$\gamma = 9800$	$N/m^3$
Caudal	$Q = 0,0065$	$m^3/s$
Velocidad de salida del agua a la salida de la tobera	$C_2 = 17,36$	$m/s$
Aceleración de la gravedad	$g = 9,81$	$m/s^2$

**Alabe y Rodete:** para la geometría de la selección transversal se considerará como referencia dimensional, las expresiones descritas:

**Figura 2-1: Diagrama de velocidad y relaciones geométricas**



Nota. Triángulo de velocidades y geometría de un álabe para turbina de flujo cruzado. Tomado del Manual de Diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas (p. 22), por OLADE, s.f.

Derivado del diagrama de velocidad y de las relaciones geométricas se tiene que:

Relación de diámetros	$D_i = 0,66D_e$	$D_i = 174,9, r_i = \frac{D_i}{2}$	$mm$
Radio de curvatura de los alabes	$r = 0,163D_e$	$r = 43,2$	$mm$
Angulo de curvatura de los alabes		$\phi = 73^\circ$	$^\circ$

Máximo arco de admisión:	$K_o = 0,334$	%
Diámetro máximo del eje que atraviesa el rodete $d = 0,328D_e$	$d = 86,92$	mm

Para el cálculo de longitud y apoyos se tiene que:

$$W_s = F/L_t \quad (2-7)$$

Donde,

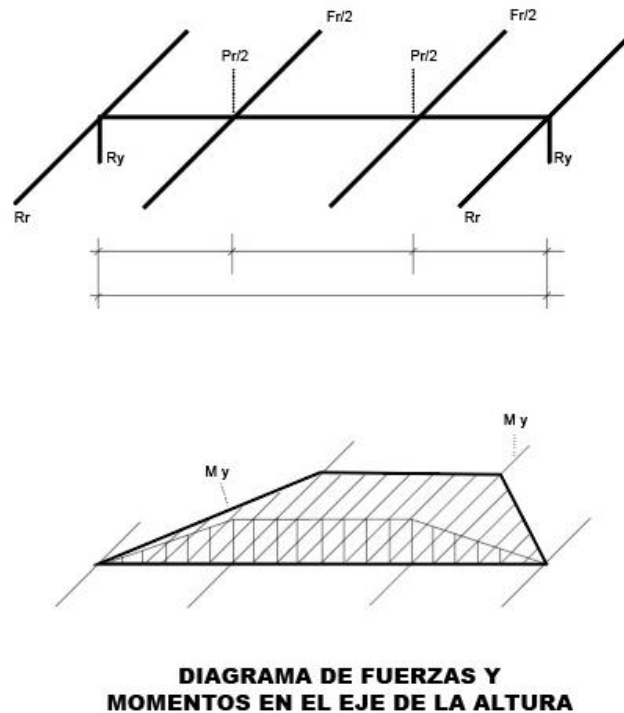
Ancho de la tobera	$L_t$	mm
Ancho del rodete	$L_r$	mm
Distancia entre apoyos	$L_o$	mm

La geometría del rodete se define en función de la máxima distancia de carga  $b$ , que permite soportar las condiciones de trabajo. Se considera el caso desfavorable en que el rodete, por algún motivo, es frenado y el agua impacta sobre uno de los alabes.

Espesor de las tapas de soporte	$e = 4$	mm
Distancia del apoyo al inicio de la carga	$a = \frac{e}{2}$	mm
Longitud de carga	$b$	mm
Distancia entre los apoyos del alabe	$L_o = e + b$	mm

Se considera el alabe como una viga apoyada en dos puntos con una carga distribuida en el medio.

**Figura 2-2: Diagrama de fuerza cortante y momento flector**



Nota. Representación de las fuerzas y momentos en el eje de la turbina. Tomado del Manual de Diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas (p. 28), por OLADE, s.f.

Para la Figura 2-2  $a = c$

Reacción  $R = \frac{W_s b}{2}$   $N$

Cortante Máximo  $V_{max} = R$   $N$

Momento Máximo  $M_{max} = \frac{W_s b}{2} \left( a + \frac{b}{4} \right)$   $Nmm$

Deflexión Máxima  $d_{max} = \frac{W_s b}{384EI} (8L_a^3 - 4b^2 L_a + b^3)$   $mm$

La sección transversal del alabe se consideraron los siguientes datos:

Área transversal	$A_a = 230,406$	$mm^2$
Momento de Inercia X-X (Débil)	$I_x = 1897,089$	$mm^4$
Módulo de Sección Elástico X-X sometida a compresión	$W_{xc} = 244,75$	$mm^3$
Módulo de Sección Elástico X-X sometida a tensión	$W_{xt} = 381,71$	$mm^3$
Primer momento de área	$Q_a = 277,24$	$mm^3$
Ancho de Sección	$t = 23,96$	$mm$

La estimación de la longitud de carga “b”, debido a las características del material, se busca un valor b de referencia en función del esfuerzo de flexión máximo, para determinar la máxima longitud que permita soportar las condiciones de carga, donde se considera que:

$$W_s = \frac{F_a}{L_t} \quad M_{max} = \frac{W_s b}{2} \left( a + \frac{b}{4} \right) \quad \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = \frac{M_{max}}{W_x}$$

Obteniendo la siguiente relación:

$$\frac{b'(a+0,25b')}{2[e(n-1)+bn]} = \frac{W_{xc} f_y}{\gamma_m F} \quad (2-8)$$

Donde,

Fuerza de impacto sobre el alabe	$F_a = 112,72$	$N$
Factor de reducción	$\gamma_m = 1,1$	$Adm$
Esfuerzo de fluencia	$f_y = 9,52$	$MPa$
Módulo de Sección Elástico Mínimo	$W_{xc} = 244,75$	$mm^3$
Longitud de carga de referencia	$b' = 372,22$	$mm$
Espesor de las tapas de soporte	$e = 4$	$mm$
Distancia del apoyo al inicio de la carga	$a = 2$	$mm$
Numero de segmentos	$n = 3$	$mm$

Debe cumplirse que  $b < b'$ . Donde se tomará  $b = 70$  mm

**Verificación dimensional:**

$$L_a = 74 \text{ mm}$$

$$L_r = 226 \text{ mm}$$

$$L_t = 218 \text{ mm}$$

$$L_r = 226 < L'_r = 230 \text{ mm}$$

La longitud del rodete  $L_r$ , no puede exceder la altura de la caneca

**Esfuerzos:**

$$\sigma_c = -\frac{M_{max}}{W_{xc}} \quad \sigma_t = \frac{M_{max}}{W_{xt}}$$

$$\tau_a = \frac{V_{max}Q}{It} \quad \sigma_{cb} = \sqrt{\max(\sigma_c, \sigma_t)^2 + 3\tau_a^2}$$

Cortante Máximo	$V_{max} = 18,1$	$N$
Momento Máximo	$M_{max} = 352,9$	$Nmm$
Esfuerzo de Flexión máximo a Compresión	$\sigma_c = 1,44$	$MPa$
Esfuerzo de Flexión máximo a Tensión	$\sigma_t = 0,92$	$MPa$
Esfuerzo Cortante	$\tau_a = 0,11$	$MPa$
Esfuerzo combinado en favor de la seguridad	$\sigma_{cb} = 1,45$	$MPa$

$$\sigma_{cb} = 1,45 \text{ MPa} < \sigma_p = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 8,65 \text{ MPa} \quad (2-9)$$

Donde

Esfuerzo combinado en favor de la seguridad	$\sigma_{cb}$	$MPa$
Esfuerzo permisible	$\sigma_p$	$MPa$
Esfuerzo de Fluencia	$f_{yk} = 9,52$	$Adm$
Factor de reduccion	$\gamma_m = 1,1$	$Adm$

Deflexión

$$d_{max} = 0,10 \text{ mm} < d_p = 2 \text{ mm}$$

Deflexión máxima	$d_{max}$	$mm$
Deflexión permitida	$d_p$	$mm$

### Capacidad de uso

$$U_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_p} * 100$$

$$U_d = \frac{d_{max}}{d_p} * 100$$

Relación de esfuerzo  $U_{\sigma} = 16,8 \%$

Relación de deflexión  $U_d = 4,8 \%$

Por último, se calculó el torque para la caracterización de la turbina:

$$T = Fr \quad (2-10)$$

Donde,

Torque	$T = 14,19$	$Nm$
Fuera del agua	$F = 112,72$	$N$
Distancia desde el punto de aplicación al punto de giro	$r = 0,1325$	$m$
Revoluciones optimas de la turbina	$N = 601,5$	$RPM$
Potencia Mecánica	$P_m = 893,7$	$W$
	$P_{m1} = 0,894$	$KW$

Según las expresiones descritas, la potencia mecánica máxima dada por la turbina puede tomarse como:

$$P_{m2} = 9,807QH$$

Donde,

Potencia mecánica máxima dada por la turbina	$P_{m2} = 1,02$	$KW$
Caudal máximo de diseño que fluirá por la turbina	$Q = 0,0065$	$m^3/s$
Salto neto aprovechable	$H = 16$	$m$

**Diseño del sistema de transmisión por polea-banda plana:** El sistema de transmisión por polea y banda plana se diseña para transferir eficientemente la potencia generada por la turbina hacia el generador eléctrico. El diseño se realiza conforme al análisis de diámetros primitivos de las poleas y las condiciones de

carga, basándose en el texto Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (8ª ed.) de Budynas y Nisbett (s.f.).

El diseño se enfoca en definir el ancho mínimo de la banda para soportar las condiciones de carga. Además, se busca reutilizar componentes disponibles - como el rin de bicicleta para la polea impulsora - para minimizar costos y maximizar la sostenibilidad del proyecto.

El diseño del sistema de transmisión asegura:

- **Transferencia Eficiente de Potencia:** El sistema soporta la potencia generada por la turbina (1.020 kW en condiciones ideales) con un factor de seguridad de 1,05.
- **Sostenibilidad:** La reutilización del rin de bicicleta para la polea impulsora refuerza el enfoque en la economía circular.
- **Confiabilidad Mecánica:** La banda diseñada cumple con los criterios de tensión permisible y las dimensiones calculadas aseguran un rendimiento estable en operación continua

### 2.2.2 Diseño asistido por computador (CAD)

Para el desarrollo de la turbina, utilizamos Autodesk Inventor Professional 2023, una herramienta líder en el diseño mecánico. Elegimos este software por su potente capacidad de modelado paramétrico, lo que nos permitió crear un modelo digital completo y funcional. Esta metodología es como construir una maqueta virtual con reglas: si cambiamos una medida principal, el resto se ajusta automáticamente, garantizando la integridad del diseño y ahorrándonos mucho tiempo y esfuerzo.

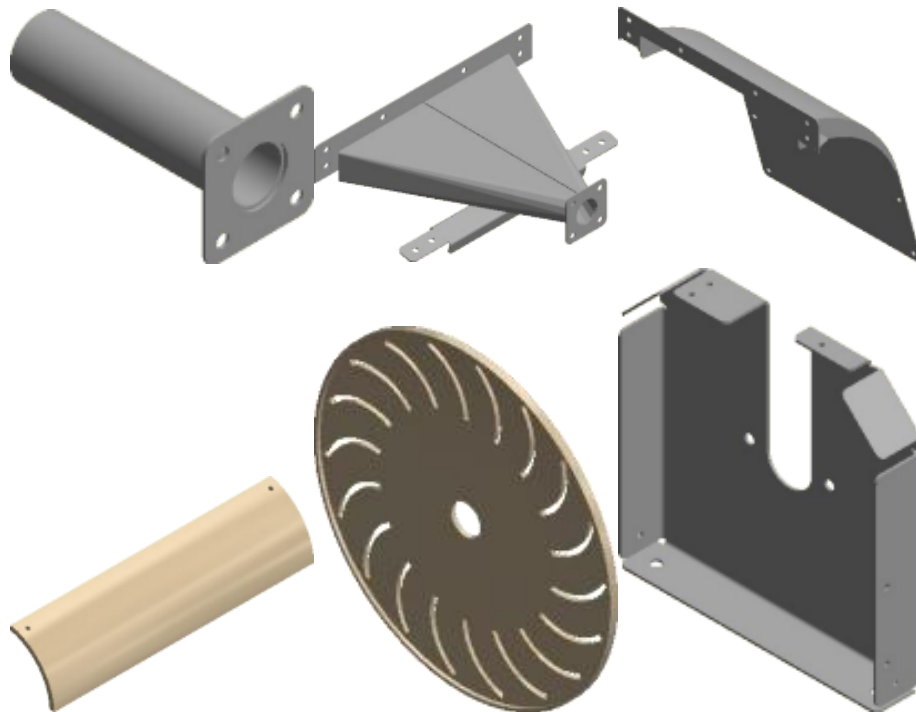
El diseño se construyó alrededor de parámetros clave que definen el comportamiento de la turbina:

- Diámetro exterior del rodete ( $D_e$ ): 265 mm
- Diámetro interior ( $D_i$ ): 174,9 mm ( $D_i = 0,66 \cdot D_e$ )

- Radio de curvatura de álabes ( $r$ ): 43,2 mm ( $r = 0,163 \cdot De$ )
- Ángulo de curvatura de álabes ( $\varphi$ ):  $73^\circ$
- Ancho del rodete ( $L_r$ ): 226 mm

Cada componente fue diseñado y ensamblado virtualmente. El rodete, el corazón de la turbina, se creó con 20 álabes aerodinámicos, replicados con la función de "patrón circular". El eje central se diseñó con diámetros escalonados para albergar rodamientos, el rodete y una polea. El soporte estructural se modeló con placas de acero de 3 mm de espesor, pensando en la soldadura TIG (Gas Inerte de Tungsteno) para garantizar uniones limpias y resistentes. La tobera de admisión, por su parte, se optimizó con un perfil que encaja perfectamente con el flujo de 5 L/s del proyecto. Finalmente, se diseñó la transmisión por polea para asegurar una correcta alineación y tensión.

**Figura 2-3: Diseño de piezas en CAD**



Antes de fabricar una sola pieza, el modelo CAD nos permitió realizar una serie de validaciones cruciales para evitar errores costosos en la producción:

- **Validaciones geométricas:** Detectamos y corregimos automáticamente tres colisiones entre componentes. Además, aplicamos tolerancias estándar ISO H7/h6 para los ajustes críticos del eje con los rodamientos.
- **Masa e inercia:** Calculamos que el rodete de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) tendría una masa de 1,98 kg y un momento de inercia de 0,0847 kg·m<sup>2</sup>. Aseguramos que el desbalance fuera menor a 5 g·mm para garantizar una operación suave.
- **Simulaciones de ensamble:** Simulamos la secuencia de montaje para asegurar que todas las partes encajaran sin problemas. También simulamos la rotación de 0 a 800 RPM, confirmando que no habría interferencias dinámicas durante la operación.

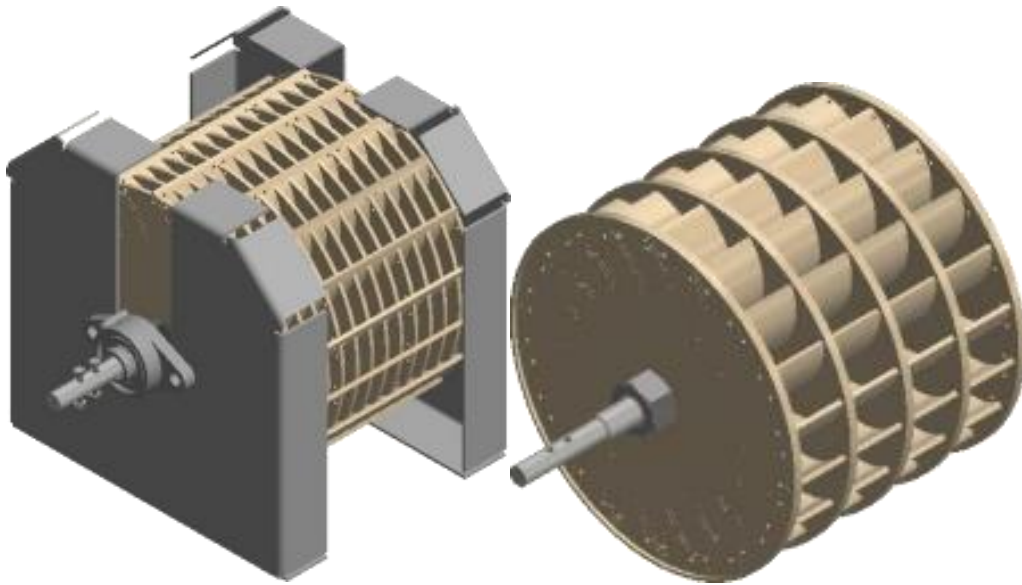
El proceso de optimización para la manufactura fue clave. Redujimos el grosor de los álabes a 3,2 mm (un 8% menos de peso), mejoramos los radios internos para una impresión 3D más limpia y estandarizamos los sujetadores a M6 y M8 para simplificar el proceso de ensamblaje.

Una vez validado y optimizado, el modelo se utilizó para generar toda la documentación técnica necesaria. Exportamos los archivos STL para la impresión 3D, garantizando una alta resolución. Creamos planos de fabricación detallados bajo el estándar ISO 128, incluyendo vistas, dimensiones, tolerancias y notas de soldadura. Finalmente, generamos una Lista de Materiales (BOM) completa con todas las especificaciones.

En resumen, el diseño CAD demostró una precisión dimensional superior al 99,5% en comparación con los cálculos manuales. Las simulaciones y optimizaciones confirmaron la viabilidad de la fabricación y la correcta alineación de todos los

componentes, lo que nos permitió reducir significativamente los riesgos y los costos en la construcción del prototipo físico.

**Figura 2-4: Ensamble de piezas en CAD**



### 3. IMPRESIÓN 3D DEL PROTOTIPO

Aunque el diseño final de la turbina y sus cálculos estructurales (Capítulo 2) están concebidos para ser fabricados con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) reciclado, para la fase de validación experimental se optó por construir el prototipo a escala en Ácido Poliláctico (PLA) reciclado.

Esta decisión metodológica se fundamenta en la necesidad de un prototipado rápido y de bajo costo. Para validar este enfoque desde la perspectiva de la resistencia de materiales, es clave comparar las propiedades de ambos polímeros frente a las cargas de trabajo calculadas. El HDPE seleccionado presenta una resistencia a la tracción de 15 a 45 MPa. Por su parte, el PLA estándar utilizado en impresión 3D, si bien es más rígido y frágil, posee una resistencia a la tracción superior, típicamente en el rango de 50 a 70 MPa, según reportan García-Domínguez et al. (2021).

El cálculo de esfuerzos realizado en la sección 2.2.1 arrojó un esfuerzo combinado máximo en los álabes de  $\sigma_{cb} = 1,45 \text{ MPa}$ . Este valor es significativamente inferior al esfuerzo permisible del diseño en HDPE  $\sigma_p = 8,65 \text{ MPa}$  y también está muy por debajo del umbral de rotura del PLA.

Por lo tanto, se concluye que el PLA es un material más que suficiente para soportar las cargas durante las pruebas de laboratorio y validar la geometría, el ensamble y el comportamiento hidráulico del diseño. La elección del HDPE para el producto final se mantiene por sus propiedades superiores de ductilidad, resistencia al

impacto y durabilidad a la intemperie, características indispensables para la operación a largo plazo en un entorno rural.

La impresión 3D ha emergido como una de las tecnologías más transformadoras en la fabricación de componentes industriales y sostenibles, gracias a su capacidad de fabricación in situ, personalización, y eficiencia en el uso de materiales. En el campo de las energías renovables, esta tecnología permite la creación de componentes específicos como turbinas, piezas de sistemas fotovoltaicos y prototipos para almacenamiento energético, que pueden adaptarse a las particularidades de cada proyecto y entorno. Según el Wohlers Report (2016), la industria de la impresión 3D ha experimentado un crecimiento significativo a nivel mundial, consolidándose como una herramienta disruptiva en la fabricación aditiva y en la reducción del impacto ambiental, ya que elimina la necesidad de procesos industriales convencionales que generan mayor cantidad de residuos y requieren extensas cadenas de suministro.

La aplicación específica de materiales biodegradables como el ácido poliláctico (PLA) en la fabricación de turbinas mediante impresión 3D representa un avance significativo hacia la sostenibilidad ambiental. La Universidad Politécnica de Madrid (2023) documenta que el PLA es un polímero obtenido a partir de fuentes naturales que, además de ser biodegradable bajo condiciones industriales de compostaje, permite la fabricación de componentes funcionales para generación de energía mediante la revalorización de residuos plásticos generados mediante reciclado mecánico. Wang y Ahmed (2021) evidencian que las aplicaciones de manufactura aditiva en generación de energía sostenible han experimentado una evolución significativa del conocimiento en impresión 3D, consolidándose como una herramienta fundamental para abordar desafíos tanto energéticos como de sostenibilidad. Las investigaciones en microturbinas eólicas (2024) demuestran que las turbinas fabricadas con PLA mediante impresión 3D pueden generar hasta 100 watts de potencia en condiciones de viento de baja velocidad, lo que las hace

especialmente viables para aplicaciones en áreas rurales. Esta tecnología facilita la prototipación rápida y la iteración de diseños en períodos de tan solo 24 horas, desde la modelación computacional hasta la fabricación y pruebas de componentes, lo que representa una ventaja significativa para la adaptación a condiciones específicas de cada sitio de implementación.

Este enfoque hacia una fabricación distribuida y personalizable se refuerza con los estudios de Vicente Oliva (2023), quien describe la impresión 3D como una tecnología de uso general que permite superar barreras logísticas y facilitar el acceso a componentes en lugares remotos. Este aspecto es particularmente valioso en contextos de energías renovables, en donde la capacidad de producir componentes específicos en áreas rurales o de difícil acceso puede reducir drásticamente los costos de transporte y la huella de carbono. Para las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), por ejemplo, Hager et al. (2016), señalan que la impresión 3D permite fabricar turbinas de flujo cruzado y otros componentes adaptados a las condiciones locales de caudal y altitud, optimizando así la eficiencia energética.

Además de la flexibilidad de diseño, la impresión 3D ofrece beneficios ambientales adicionales mediante el uso de materiales reciclados en la fabricación de componentes, apoyando así los principios de la economía circular. Estudios como el de Mi et al. (2019), publicado en el *Journal of Cleaner Production*, evidencian que el uso de plásticos reciclados como el HDPE en impresión 3D no solo reduce costos y residuos, sino que también contribuye a la creación de infraestructuras sostenibles, donde los materiales se reutilizan en lugar de desecharse. A su vez, Nußholz et al. (2019), sostienen que la fabricación aditiva local y el uso de materiales reciclados puede reducir la huella de carbono en hasta un 40%, al evitar los procesos de manufactura y transporte intensivos en carbono, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de proyectos en energías renovables.

La capacidad de la impresión 3D para producir prototipos y realizar pruebas de diseño previas a la implementación final constituye otra ventaja clave, ya que permite realizar ajustes y mejoras antes de que el sistema entre en funcionamiento. En proyectos de energías renovables, donde cada componente debe cumplir con altos estándares de eficiencia y resistencia, esta capacidad de prototipado rápido asegura que las infraestructuras finales sean robustas y adecuadas para el contexto específico de su aplicación. Esta versatilidad es crucial para las PCH, donde el diseño de turbinas debe adaptarse a las características del flujo de agua y las necesidades energéticas locales, permitiendo que las comunidades rurales se beneficien de un sistema confiable y sostenible.

En conclusión, la impresión 3D se erige como una tecnología clave en el desarrollo de soluciones sostenibles en energías renovables, no solo por su capacidad de reducir el impacto ambiental mediante el uso de materiales reciclados y la fabricación local, sino también por su flexibilidad para adaptarse a las condiciones y necesidades específicas de cada proyecto. Su integración en el diseño y manufactura de componentes energéticos permite reducir costos, aumentar la eficiencia y facilitar la transición hacia modelos energéticos más limpios y autosuficientes en comunidades rurales.

El diseño de la turbina se materializa mediante un prototipo a escala, fabricado mediante impresión 3D. Esta etapa incluye la preparación del diseño, configuración de los parámetros de la impresora 3D, proceso de impresión, y posprocesamiento del prototipo. Se emplea polímero reciclado como material de impresión, alineado con los objetivos de sostenibilidad del proyecto. Tras la impresión, el prototipo es sometido a pruebas preliminares de funcionalidad y eficiencia para realizar ajustes en el diseño, de ser necesario.

## 3.1 PREPARACIÓN DEL MODELO

En el ámbito de la impresión 3D, el software desempeña un papel crucial para preparar los modelos digitales y convertirlos en instrucciones que las impresoras puedan interpretar. Dos de las herramientas más destacadas son Fusion 360, una plataforma de diseño asistido por computadora (CAD), y Cura, un programa de corte ("slicing") desarrollado por Ultimaker. Cada una de las herramientas mencionadas cumple funciones específicas y complementarias en el flujo de trabajo de la impresión 3D.

De acuerdo con Autodesk (2020), Fusion 360 es una herramienta CAD que permite a los usuarios diseñar modelos tridimensionales con precisión y versatilidad. Es ampliamente utilizada en ingeniería, arquitectura y diseño industrial debido a sus características avanzadas, como:

- Modelado paramétrico y superficies complejas.
- Simulaciones mecánicas y térmicas para evaluar la resistencia del diseño.
- Herramientas de ensamblaje que permiten analizar el ajuste y movimiento de piezas.

Como lo indica Autodesk (2020), en la impresión 3D, Fusion 360 es ideal para crear modelos personalizados que se exportan en formatos como STL o OBJ, compatibles con programas de corte como Cura.

Cura es un software de corte ("slicing") que convierte los modelos 3D en códigos G, las instrucciones que las impresoras 3D utilizan para construir las piezas capa por capa. Entre sus principales funciones se encuentran:

- Configuración de parámetros de impresión como la altura de capa, densidad de relleno y velocidad.
- Previsualización de las trayectorias de impresión para garantizar calidad y eficiencia.

- Compatibilidad con múltiples impresoras 3D y materiales como PLA, ABS y PETG.

A su vez, Ultimaker (2021), señala que Cura permite optimizar el uso del material y el tiempo de impresión, lo que es esencial en aplicaciones industriales y de prototipado rápido. La combinación de Fusion 360 y Cura permite a los usuarios un flujo de trabajo completo, desde el diseño detallado del modelo hasta su preparación para la fabricación. Esto es particularmente útil en aplicaciones técnicas que requieren precisión y personalización, como componentes mecánicos, herramientas personalizadas y prototipos funcionales.

Por otro lado, el uso de rollos de PLA reciclado está ganando popularidad en el mercado colombiano como una alternativa sostenible para la impresión 3D. Este material, derivado del ácido poli láctico, se produce a partir de recursos renovables como el almidón de maíz. En la actualidad, mediante procesos de reciclaje, se promueve su reutilización, reduciendo el impacto ambiental. En Colombia, empresas emergentes y distribuidores locales han comenzado a ofrecer filamentos de PLA reciclado, destacando su competitividad en costos y su aplicación en proyectos educativos, prototipado y manufactura sostenible.

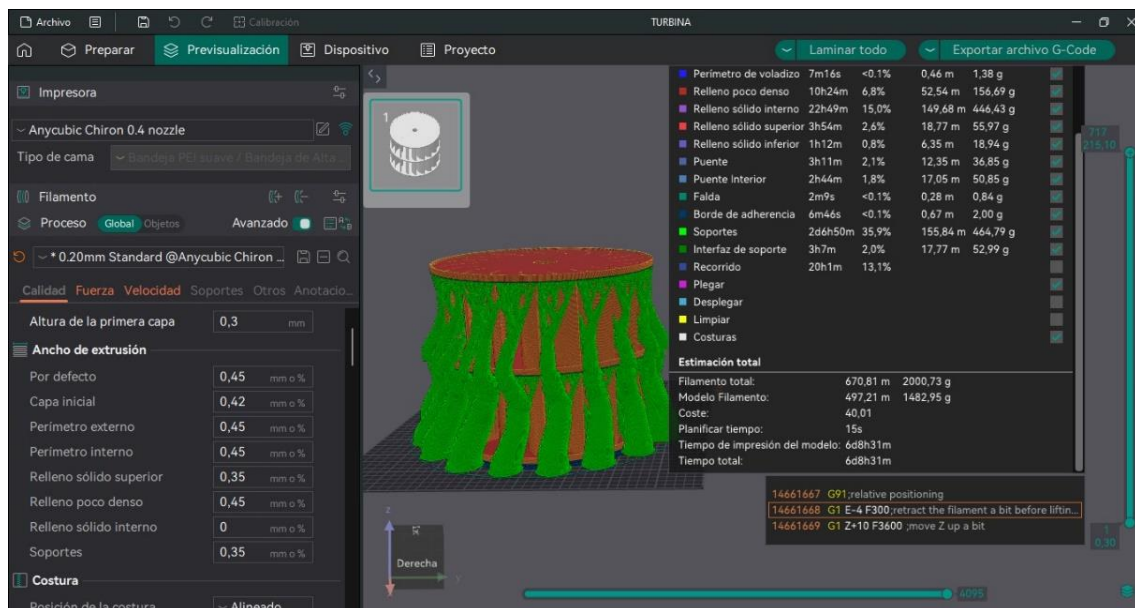
## **3.2 PROCESO DE IMPRESIÓN**

El prototipo de la turbina de flujo cruzado se materializó mediante impresión 3D utilizando PLA reciclado como material base. Este proceso contribuye tanto a la sostenibilidad como a la resistencia estructural del prototipo. La impresión se divide en varias etapas, que incluyen la preparación del diseño en software de modelado, la configuración de parámetros específicos en OrcaSlicer, y el post-procesamiento. Sin embargo, durante el proceso de impresión inicial, se enfrentaron diversos desafíos que requirieron ajustes en el diseño y en los equipos de impresión.

El diseño de la turbina se normalizó en Fusion 360 y se preparó en OrcaSlicer para impresión 3D. En esta etapa, se configuraron parámetros como:

- Altura de Capa: 0,2 mm para optimizar entre detalle y tiempo de impresión.
- Relleno: 30% con patrón Gyroid, ofreciendo resistencia adecuada.
- Temperaturas: 210 °C para el extrusor y 60 °C para la base.
- Soportes: Configurados para ángulos mayores a 45°.
- Velocidad de Impresión: 50 mm/s.

Figura 3-1: Parámetros iniciales de impresión en OrcaSlicer



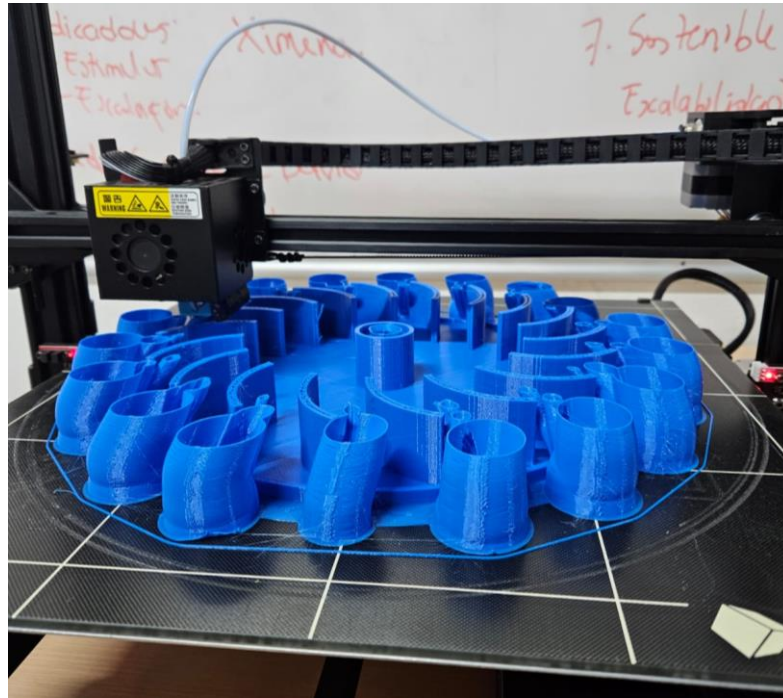
La impresión del diseño inicial tiene una duración estimada de 7 días. Sin embargo, varios factores afectaron la continuidad y calidad de las impresiones:

- **Apagones y atascos de material:** Estos contratiempos interrumpieron varias veces el proceso, causando reinicios y pérdida de precisión.
- **Soporte inadecuado:** El diámetro de la turbina comparado con la base de la impresora inicial dificultó la creación de soportes efectivos.
- **Tiempo extendido de impresión:** El proceso se alargó debido a los reinicios constantes y los ajustes para evitar deformaciones en las capas.

**Fotografía 3-1: Impresiones fallidas de la turbina**

Para mejorar la eficiencia y superar las limitaciones de espacio en la base de la impresora inicial, el proceso fue transferido a una Anycubic Chiron, una impresora con base más amplia. Este cambio permite realizar algunos ajustes al diseño de impresión, como son:

- **Reducción de rotores de soporte:** El diseño original con 5 rodetes de soporte fue simplificado a 3 rodetes, agilizando el proceso sin comprometer la estabilidad.
- **Tiempo total de impresión optimizado:** Con los parámetros definidos en OrcaSlicer, el tiempo total de impresión se redujo a 5 días y 10 horas, utilizando aproximadamente 2 kg de PLA reciclado.

**Fotografía 3-2: Proceso de impresión de la turbina**

Tras la impresión, las piezas se someten a un proceso de lijado y ajuste para mejorar el ensamblaje y la resistencia mecánica del prototipo. Este tratamiento incluye una inspección de precisión dimensional para garantizar que las especificaciones de diseño se mantuvieran en el prototipo impreso.

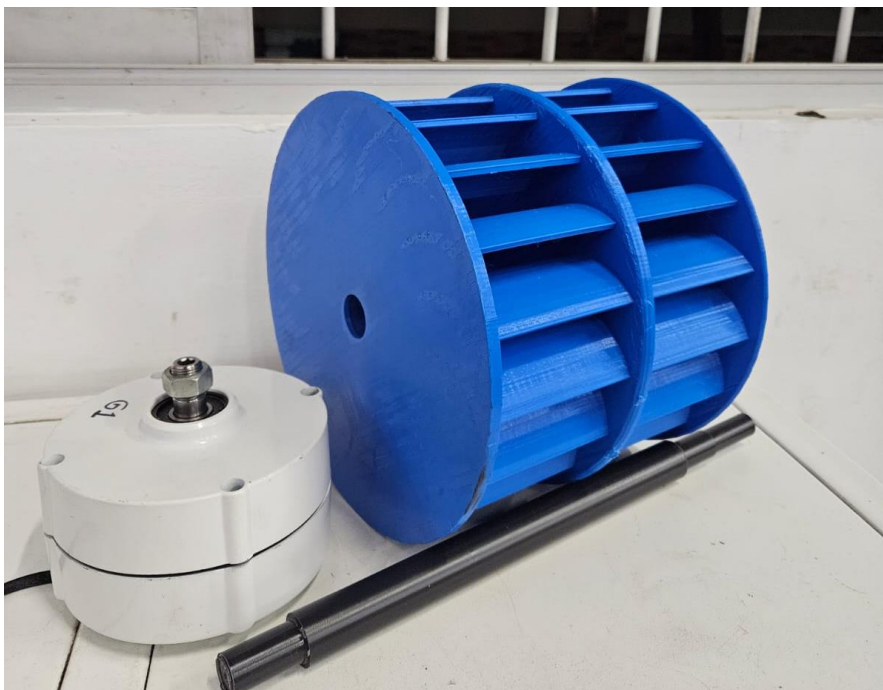
El prototipo final, construido con PLA reciclado y ensamblado después de las modificaciones, demuestra una precisión adecuada en la configuración de los álabes y el rodete, permitiendo la realización de pruebas de rendimiento en condiciones de laboratorio. La calidad del material y la reducción de rodetes de soporte optimizaron la estabilidad y resistencia de la turbina, haciendo que el prototipo cumpla con las especificaciones del diseño inicial.

El uso de PLA reciclado presenta ciertas ventajas en la impresión, desde la sostenibilidad, la resistencia que brinda estabilidad estructural adecuada para pruebas de laboratorios y optimización en el proceso debido a la reducción del tiempo de impresión.

**Fotografía 3-3: Turbina impresa con soportes de construcción**



**Fotografía 3-4: Turbina post-procesada**



## 3.3 PROTOTIPO FUNCIONAL

El prototipo funcional desarrollado es una turbina hidráulica diseñada para pruebas en laboratorio, utilizando materiales reciclados y procesos de fabricación sostenibles. Su construcción integra técnicas avanzadas como diseño asistido por computador (CAD), impresión 3D y manufactura mecánica. Este modelo combina precisión, eficiencia y un enfoque de bajo costo para aplicaciones prácticas. El proceso de construcción incluye las siguientes etapas:

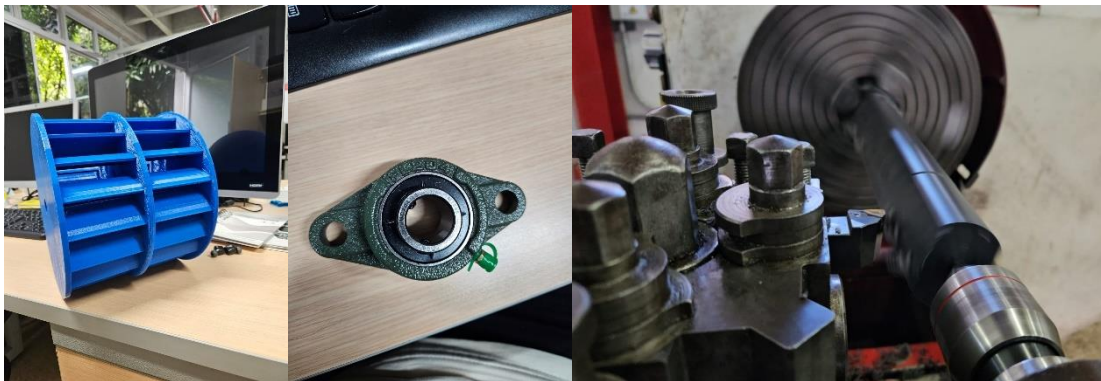
### 3.3.1 Fabricación de la turbina

La turbina es impresa en 3D con PLA reciclado. Se utilizaron dos rollos y el proceso tomó un total de 5 días y 10 horas de impresión.

### 3.3.2 Fabricación del soporte y estructura

Una lámina de acero reciclado es cortada y doblada en los laboratorios, siguiendo planos de diseño en acero inoxidable. Para prevenir la oxidación, se aplica pintura en aerosol negro.

#### Fotografía 3-5: Piezas y componentes



### 3.3.3 Elementos mecánicos y ensamble

El eje se fabrica a partir de un recorte de nylon reciclado, torneado en un torno paralelo en los laboratorios.

Se ensamblaron todas las piezas utilizando tornillos de seguridad, soportes, perforaciones realizadas con taladro de banco y soldadura TIG. El montaje total requirió precisión para garantizar que el eje encaje correctamente en las chumaceras y la turbina.

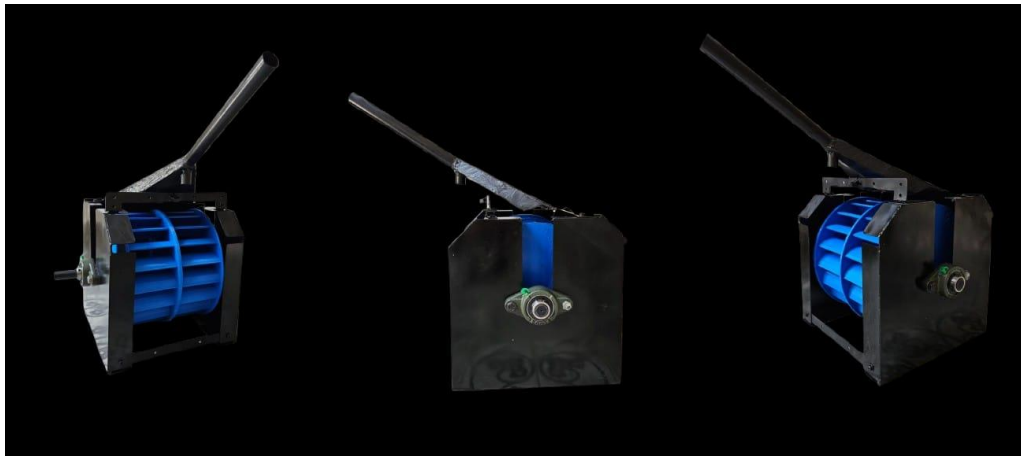
**Fotografía 3-6: Proceso de ensamble del prototipo**



En la Tabla 3-1 se presenta el cuadro detallado de costos y tiempo de construcción. El prototipo fue ensamblado con éxito, garantizando funcionalidad y precisión. Este proceso no solo resalta el uso eficiente de recursos reciclados, sino que también evidencia el aprovechamiento de las capacidades técnicas de los laboratorios de la Institución Universitaria Pascual Bravo. En la Fotografía 3-7 se muestran imágenes de la PCH ensamblada en su totalidad.

**Tabla 3-1: Costos construcción del prototipo**

Material/Insumo	Cant	Costo Unitario (COP)	Costo Total (COP)	Tiempo (horas)
Rollos de PLA reciclado	2	\$68.000	\$136.000	10
Lámina de acero reciclado	1	\$35.000	\$35.000	3
Aerosol negro	1 lata	\$14.000	\$14.000	0,5
Chumaceras 20 mm	2	\$22.500	\$45.000	0
Nylon reciclado	1 recorte	\$35.000	\$35.000	1
Tornillos de seguridad (3 mm)	12	\$1.200	\$14.400	0
Tornillos de soporte (1 pulgada)	4	\$3.5000	\$14.000	0
Uso del laboratorio	-	\$80.000/hora	\$960.000	12
<b>Total</b>	-	-	<b>\$1.253.400</b>	<b>26.5</b>

**Fotografía 3-7: PCH ensamblada**



## 4.PRUEBAS DE LABORATORIO

En este capítulo se valida el funcionamiento del prototipo a escala fabricado mediante tecnología de impresión 3D confirmando la viabilidad y eficiencia en la generación de energía renovable.

Se estima que el prototipo de la PCH, diseñado mediante impresión 3D con una turbina de flujo cruzado, genere una cantidad de energía eléctrica renovable suficiente para cubrir las necesidades básicas de un hogar rural, manteniendo un costo de generación mínimo. La eficiencia de la turbina y su adaptabilidad a las condiciones específicas del entorno permitirán un modelo de generación energética sostenible y autosuficiente, alineado con los objetivos de desarrollo rural y sostenibilidad.

Una vez fabricado el prototipo de la turbina, se realizan pruebas de laboratorio para evaluar tanto su resistencia mecánica como su eficiencia energética en condiciones controladas. Estos ensayos son esenciales para establecer la viabilidad técnica y económica del diseño, considerando las condiciones reales de operación en el sitio de estudio. Los resultados obtenidos permiten ajustar el diseño o mejorar los componentes si es necesario, y definen la factibilidad de replicar el sistema en comunidades rurales con necesidades energéticas similares.

Este apartado presenta los resultados obtenidos en ensayos bajo condiciones controladas, incluyendo caudal ( $Q$ ), revoluciones por minuto (RPM), torque y potencia hidráulica y mecánica. También se incluyó un análisis de extrapolaciones para condiciones de mayor caudal y altura, evaluando el consumo energético potencial del sistema. El objetivo principal fue validar la funcionalidad del prototipo

y determinar su viabilidad para generación de energía renovable en entornos rurales.

## 4.1 METODOLOGÍA DE PRUEBAS

Se realizaron dos configuraciones de ensayo para evaluar el desempeño hidráulico y mecánico del prototipo:

- Ensayo 1 – Una manguera de entrada de ½" (12,5 mm)
- Ensayo 2 – Dos mangueras de entrada de ½" en paralelo

Las mediciones se realizaron de forma indirecta con equipos básicos, completadas con cálculos analíticos:

- Cronómetro digital ( $\pm 0,01$  s)
- Recipiente volumétrico calibrado de 20 L ( $\pm 0,5\%$ )
- Tobera de ½" con conexión a mangueras estándar
- Cinta métrica para altura ( $\pm 1$  mm)
- Balanza de laboratorio (rango 0–5 kg, resolución 1 g)
- Pesas de masa conocida para cálculo de torque ( $T = m \cdot g \cdot r$ )
- Conteo manual de revoluciones en intervalos de 10 s, extrapolado a RPM

Se registraron tiempos de llenado, conteos de RPM y cálculo de torque a partir de masas. Los ensayos se grabaron en video para validación visual y se observaron leves deformaciones en los álabes durante el segundo ensayo debido a la rigidez del PLA.

### 4.1.1 Montaje experimental

El prototipo se prueba utilizando el suministro de agua de un hogar rural, con un montaje que incluye una tobera conectada a una o dos mangueras de entrada de 12,5 mm (1/2"). El agua utilizada se recolecta para su reutilización en actividades domésticas.

Las mediciones se realizan en dos escenarios:

- **Primer Ensayo:** Con una sola manguera de entrada.
- **Segundo Ensayo:** Con dos mangueras conectadas en paralelo.
- **Variables Medidas**
- **Caudal ( $Q$ ):** Determinado por cronometraje y recipientes de capacidad conocida.
- **RPM:** Medidas mediante conteo visual en intervalos de 10 segundos y extrapoladas a minutos.
- **Torque:** Calculado usando la masa máxima soportada, la aceleración gravitacional ( $g=9,81\text{m/s}^2$ ) y el radio del eje ( $r=0,008\text{m}$ ).
- **Altura ( $H$ ):** Fija en 4 m para el primer ensayo y 6 m para el segundo.

#### 4.1.2 Condiciones controladas

La inspección del prototipo no reveló desgastes significativos; no obstante, el segundo ensayo sí evidenció una ligera deformación en los álabes al ser sometido a cargas mayores.

Esta ligera deformación observada es coherente con las propiedades del PLA, que, si bien tiene una alta resistencia a la tracción, es un material más rígido y frágil en comparación con el HDPE. Este hallazgo experimental es valioso, pues no solo valida el comportamiento hidráulico del diseño, sino que también refuerza la selección del HDPE para la turbina final. El HDPE ofrece una ductilidad y una resistencia a la fatiga superiores, que son indispensables para soportar las cargas variables y la operación continua en el sitio, previniendo precisamente este tipo de deformaciones a largo plazo.

## 4.2 RESULTADOS

### 4.2.1 Primer ensayo: Una manguera de entrada (altura: 4 m)

Tabla 4-1: Resultados primer ensayo

Caudal (Q) [l/s]	RPM	Torque (N·m)	Potencia Hidráulica (W)	Potencia Mecánica (W)	Eficiencia Hidráulica (%)
0,39	114	0,185	15,29	2,21	14,45
0,23	108	0,185	9,02	2,09	23,17
0,21	126	0,185	8,23	2,44	29,65
0,26	114	0,185	10,19	2,21	21,67
0,27	108	0,185	10,58	2,09	19,74

#### Promedios:

Caudal Promedio (Q): 0,26 l/s

RPM Promedio: 114 RPM

Torque Promedio: 0,185 Nm

Potencia Hidráulica Promedio: 10,26 W

Potencia Mecánica Promedio: 2,21 W

Eficiencia Hidráulica Promedio: 21,34%

**Fotografía 4-1: Montaje ensayo inicial****4.2.2 Segundo ensayo: Doble manguera de entrada (altura: 6 m)****Tabla 4-2: Resultados segundo ensayo**

Caudal (Q) [l/s]	RPM	Torque (N·m)	Potencia Hidráulica (W)	Potencia Mecánica (W)	Eficiencia Hidráulica (%)
0,475	204	0,328	27,96	7,00	25,02
0,487	168	0,328	28,66	5,77	20,14
0,514	192	0,328	30,23	6,59	21,80
0,475	174	0,328	27,96	5,97	21,35
0,487	198	0,328	28,66	6,79	23,69

**Promedios:**

Caudal Promedio (Q): 0,487 l/s

RPM Promedio: 187,2 RPM

Torque Promedio: 0,328 Nm

Potencia Hidráulica Promedio: 28,69 W

Potencia Mecánica Promedio: 6,821 W

Eficiencia Hidráulica Promedio: 23,76%

El cálculo de las extrapolaciones se realiza con base en los datos medidos en los ensayos experimentales, considerando un incremento en la eficiencia hidráulica observado al aumentar el caudal de entrada y la altura. Este incremento se utiliza para ajustar las condiciones extrapoladas a mayores valores de caudal y altura, representativos de escenarios ideales de operación.

**Fotografía 4-2: Montaje segundo ensayo**



**Tabla 4-3: Extrapolación de resultados**

Caudal (Q) [l/s]	Altura (H) [m]	Potencia Hidráulica (W)	Eficiencia Hidráulica (%)	Potencia Mecánica (W)
2,0	10	196,2	16,57	32,51
5,0	16	784,8	20,07	157,48

Se determina la energía potencial del agua disponible para ser convertida en energía mecánica en la turbina. La eficiencia hidráulica ( $\eta_h$ ) utilizada en los cálculos extrapolados se ajustó considerando el incremento observado entre los ensayos reales: +2,42% por cada unidad de aumento en el caudal, aplicado sobre el promedio del segundo ensayo. Esto permite calcular la energía mecánica real disponible para ser utilizada por el sistema, considerando las pérdidas inherentes al proceso de conversión.

**Tabla 4-4: Consumo eléctrico en bombillas**

Ensayo	Potencia Disponible (W)	Bombillas LED (9 W)
Q=2 l/s, H=10 m	27,63 W	3
Q=5 l/s, H=16 m	133,86 W	14

Los ensayos demuestran un flujo constante y un comportamiento hidráulico coherente con los cálculos teóricos. La turbina, con eficiencia promedio de 23–24%, es capaz de suplir necesidades básicas de iluminación en hogares rurales, confirmando su viabilidad técnica.

### 4.3 VIABILIDAD TÉCNICA

El análisis de viabilidad del sistema considera una alternativa técnica para incrementar la capacidad de generación energética: la instalación de dos turbinas en serie aprovechando el caudal existente. Este enfoque permitiría duplicar la

potencia disponible, incrementando la contribución energética para suplir las necesidades de un hogar rural.

### 4.3.1 Ventajas del diseño propuesto

Los resultados experimentales y el análisis técnico de esta investigación demuestran las ventajas específicas del diseño de turbina propuesto en comparación con las alternativas comerciales.

- **Material HDPE reciclado:** El uso de HDPE reciclado reduce los costos de materia prima en un 25% y disminuye la huella de carbono en un 40% respecto a los aceros comerciales. Los datos del proyecto indican que este material ofrece una resistencia química superior y una durabilidad comparable a la de materiales vírgenes.
- **Eficiencia experimental validada:** La eficiencia promedio obtenida en los ensayos de laboratorio fue de 23,76%, lo que es coherente con el rango teórico esperado para prototipos a escala. Estudios previos han reportado eficiencias de hasta 84,8% en turbinas de flujo cruzado optimizadas (Pereira & Borges, 2016), lo que sugiere un potencial significativo de mejora al escalar este diseño. De hecho, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (2015) realizó una evaluación similar del funcionamiento de un prototipo a escala de turbina de flujo cruzado, validando la metodología de ensayos.
- **Fabricación distribuida:** La impresión 3D permite la manufactura local, eliminando la dependencia de importaciones y reduciendo el tiempo de entrega de 6 meses (para turbinas comerciales) a solo una semana. Esta capacidad es crucial para implementar proyectos en zonas rurales con limitaciones logísticas.
- **Modularidad y mantenimiento:** El diseño permite el intercambio de álabes para adaptarse a las variaciones estacionales de caudal, una flexibilidad que no ofrecen las turbinas fundidas tradicionales. Además, los componentes

impresos en 3D facilitan la fabricación de repuestos in-situ, simplificando las labores de mantenimiento.

- **Escalabilidad:** El modelo computacional desarrollado permite ajustar las dimensiones de la turbina para diferentes caudales manteniendo la eficiencia hidráulica. Esta característica es una ventaja competitiva frente a las turbinas comerciales, que requieren un rediseño completo para adaptarse a distintas condiciones de operación.

### 4.3.2 Datos clave de la demanda energética

El hogar rural tiene una Carga Demandada de 8.617,5 VA. Considerando un factor de potencia (FP) típico de 0,85, la potencia activa necesaria para el hogar es:

$$P_{\text{activa}} = VA \cdot FP = 8.617,5 \times 0,85 = 7.324,88 \text{ W}$$

### 4.3.3 Potencia generada con dos turbinas en serie

Con el diseño extrapolado de 5 l/s y 16 m, una turbina genera una potencia mecánica de 157,48 W, que se traduce en una potencia eléctrica con un generador al 85% de eficiencia:

$$P_e = 157,48 \times 0,85 = 133,86 \text{ W}$$

Al operar dos turbinas en serie, la potencia eléctrica combinada sería:

$$P_e \text{ total} = 133,86 \times 2 = 267,72 \text{ W}$$

La capacidad generada por el sistema representa una pequeña fracción de la demanda total del hogar. Esta potencia sería suficiente para alimentar hasta 14 bombillas LED de 9 W, lo que representa una aplicación viable para iluminación básica en hogares rurales. Sin embargo, al compararla con la carga demandada total de un hogar (7.324,88 W), se concluye que el sistema debe ser considerado como un complemento a la red eléctrica o a otras fuentes de generación renovable.

El diseño en serie de dos turbinas mejora significativamente el aprovechamiento de la energía hidráulica disponible, que de otro modo sería desperdiciada. Este enfoque incrementa la sostenibilidad del sistema al:

- Reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.
- Aprovechar un recurso renovable disponible en el entorno inmediato.
- Mantener bajos los costos de operación y mantenimiento debido al uso de materiales reciclados (HDPE) y componentes impresos en 3D.

Aunque dos turbinas en serie no cubren completamente la demanda energética del hogar (3,65% de la carga activa), representan una solución viable para reducir el consumo eléctrico dependiente de la red. Este sistema podría ser escalable para incluir más turbinas o complementarse con otras fuentes de energía renovable, como paneles solares, para satisfacer una mayor proporción de las necesidades del hogar.

## 5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza el uso de recursos, sino que también refuerza la sostenibilidad de estos sistemas de generación de energía renovable.

Se lleva a cabo un análisis de ciclo de vida (LCA) para evaluar el impacto ambiental de la turbina en cada una de sus etapas: producción, uso y disposición final. Este análisis se basa en metodologías reconocidas, como la norma ISO 14040:2006, y en investigaciones previas que subrayan la importancia del LCA en la evaluación de tecnologías de energía renovable, como las detalladas por Pennington et al. (2004) y Finnveden et al. (2009).

## 5.1 LCA DE LA TURBINA

### 5.1.1 Producción de materiales

Rodete y álabes:

- HDPE reciclado de 3 canecas: Peso: 1,98 kg.

Base o soporte:

- Acero reutilizado (recortes): Peso: 4 kg.
- Procesos: Soldadura TIG, dobladora manual, perforaciones (taladro eléctrico manual).
- Tornillería: 12 tornillos 0,3 kg

Eje central:

- Nylon (recortes comprados): Peso: 2 kg.

Poleas:

- Una polea de nylon: 0,5 kg.
- Una polea de rin de bicicleta reciclado: 0,8 kg.
- Correa dentada: 0,3 kg.
- Generador eléctrico: 5 kg.

Pintura:

- Tipo: Spray negro: 1 lata 0,4 kg

Cableado eléctrico:

- Longitud 15-20 metros: 1,5 kg

Materiales adicionales para instalación:

- Tubería de PVC 20 metros: 6 kg.
- Conectores de PVC 10 unidades: 0,4 kg
- Base de cemento:
  - Dimensiones: 1 m x 1 m x 0.1 m (10 cm de grosor).

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

- Densidad del concreto: 2,400 kg/m<sup>3</sup>.
- Peso total: 240 kg

### 5.1.2 Fabricación

La fabricación de la turbina con PLA reciclado implica un menor consumo energético y una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con materiales vírgenes, como lo respalda la investigación de Bakaraki et al. (2020) sobre el uso de materiales reciclados en manufactura aditiva.

La impresión 3D optimiza el uso de material al permitir un diseño con relleno interno controlado, lo cual minimiza los residuos de fabricación y se alinea con los principios de economía circular.

Rodete y álabes:

- Herramientas: Tijeras y pulidora eléctrica 110V
- Tiempo de corte: 2 horas.
- Consumo eléctrico: Consumo eléctrico=0,5 kW/h × 2 horas=1 kWh

Eje central (Torno Pinacho SP200):

- Tiempo de operación: 3 horas.
- Consumo eléctrico: Consumo eléctrico=1,5 kW/h × 3 horas=4,5 kWh

Base de acero:

- Soldadura TIG: 2 horas (4 kWh).
- Taladro eléctrico manual: 1 hora (0,5 kWh).

Ensamblaje general:

- Consumo:1 kWh.

**Total de energía para fabricación directa:**

$$1 \text{ kWh} + 4,5 \text{ kWh} + 4 \text{ kWh} + 0,5 \text{ kWh} + 1 \text{ kWh} = 11 \text{ kWh}$$

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

#### Materiales y prototipo:

- Distancia total (ida y vuelta): 130 km.
- Medio: Automóvil.
- Consumo de combustible: Consumo de gasolina =  $130 \text{ km} \times 10 \text{ km/l} = 13 \text{ litros (3,4 galones)}$

#### Emisiones de CO<sub>2</sub>:

$$3,4 \text{ galones} \times 8 \text{ kg/galón} = 27,2 \text{ kg CO}_2$$

### 5.1.4 Uso

Durante la fase de uso, la turbina no genera emisiones directas, ya que utiliza energía hidráulica como fuente renovable, lo que reduce la huella de carbono en comparación con tecnologías convencionales de generación eléctrica en áreas rurales no interconectadas.

El funcionamiento silencioso y libre de emisiones respalda el uso de esta tecnología en zonas rurales y ecoturísticas, donde la conservación ambiental es prioritaria.

#### Energía generada:

- Factor de aprovechamiento del agua: 80%.
- Tiempo efectivo de operación (365 días/año, con 1 día de mantenimiento semanal): Horas efectivas por año =  $8,760 \text{ horas} \times 0,85 \text{ (mantenimiento y clima)} = 7,446 \text{ horas/año}$

#### Energía generada anual:

$$0,157 \text{ kW} \times 7.446 \text{ horas} = 1.172,5 \text{ kWh}$$

#### Energía total en 5 años:

$$1.172,5 \text{ kWh/año} \times 5 \text{ años} = 5.862,98 \text{ kWh}$$

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

- Caudal: 0,005 m<sup>3</sup>/s (5 litros/segundo).
- Tiempo anual de operación: Volumen anual = 0,005 m<sup>3</sup>/s × 7,446 horas × 3,600 s/hora
- Volumen anual = 134.028 m<sup>3</sup> (134.028.000 litros)

### 5.1.5 Fin de vida

En la fase de fin de vida del diseño final propuesto, los componentes principales son altamente reciclables, en línea con los principios de la economía circular. El HDPE del rodete y los álabes puede ser triturado y reincorporado en la producción de nuevos plásticos, mientras que los componentes metálicos como el acero y el nylon pueden ser recuperados y reciclados. Este enfoque, como señalan Hollberg y Ruth (2016), es clave para minimizar los desechos y el impacto ambiental al final de la vida útil del producto.

Disposición de materiales reciclables:

- HDPE: 1,98 kg.
- Acero: 4,3 kg.
- Nylon: 2,5 kg. PVC (tubería y conectores): 6,4 kg.

Materiales no reciclables:

- Base de cemento: ~240 kg.

## 5.2 AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD

El concepto de desarrollo sostenible se ha consolidado como un paradigma fundamental para el crecimiento equilibrado de las sociedades, integrando objetivos económicos, sociales y ambientales. Según la definición clásica del informe Our Common Future (1987), presentado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, el desarrollo sostenible se entiende como "aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987).

Este enfoque holístico se ha convertido en la base de políticas internacionales, incluyendo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas (2023), de los cuales el ODS 7 se centra específicamente en garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.

El acceso a energías renovables en comunidades rurales es crucial para alcanzar este objetivo, ya que permite abordar simultáneamente los desafíos de pobreza energética, exclusión social y degradación ambiental. El Banco Mundial (2021) reporta que, en la actualidad, más de 759 millones de personas en el mundo carecen de acceso a electricidad, y una gran parte de ellas dependen de fuentes contaminantes como la quema de combustibles fósiles. Esta situación perpetúa la pobreza y limita las oportunidades de desarrollo en estas áreas.

En regiones como América Latina, la transición hacia energías renovables en comunidades rurales no solo representa una solución sostenible, sino también una vía para fomentar la autosuficiencia y mejorar la calidad de vida de la población.

Dentro de las energías renovables, la hidráulica, la solar y la eólica han demostrado ser opciones viables para áreas rurales con infraestructura limitada. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020) la generación distribuida a partir de fuentes renovables es una de las estrategias más efectivas para proporcionar acceso a energía en regiones remotas.

En particular, IRENA (2020) destaca que la generación hidroeléctrica a pequeña escala permite aprovechar los recursos hídricos locales sin la necesidad de grandes embalses, minimizando así el impacto ambiental y los costos de infraestructura. Esto convierte a las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en una alternativa eficaz y escalable para comunidades rurales, promoviendo la autonomía energética y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

manufactura avanzada, permiten a las comunidades rurales convertirse en "prosumidores" de energía, es decir, en productores y consumidores de su propia electricidad. Este modelo impulsa la resiliencia energética y contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, facilitando el acceso a una energía asequible y limpia.

El desarrollo de sistemas de energía renovable en estas zonas no interconectadas fortalece el tejido social y reduce la huella de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático en el ámbito global. En este contexto, la implementación de PCH con turbinas de flujo cruzado y materiales reciclados como el HDPE responde tanto a la necesidad de generación de energía limpia como al aprovechamiento de residuos plásticos, promoviendo un modelo de economía circular en las comunidades rurales.

### **5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO**

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se realizó un análisis comparativo del Costo Nivelado de Energía (LCOE) de la turbina de flujo cruzado propuesta frente a otras tecnologías disponibles para zonas rurales no interconectadas. Este enfoque es un estándar en la industria para comparar costos de energía de diferentes fuentes.

Los costos de las PCH varían significativamente según las condiciones del emplazamiento y la tecnología. A nivel nacional, la Región Administrativa y de Planeación Especial - Región Central (2020) documenta que los costos de las PCH oscilan entre \$8.480.000 y \$16.160.000 COP por kW de capacidad instalada. A escala internacional, el Banco Mundial (Banco Mundial, 2021) sitúa estos costos entre \$8.000.000 y \$12.000.000 COP por kW.

El factor de capacidad, que mide la eficiencia de uso de la turbina, es un parámetro clave. Para PCH de tipo "a filo de agua" (run-of-river), este factor típicamente varía entre 40% y 70%, dependiendo de las condiciones hidrológicas del sitio.

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

El LCOE se calculó considerando la inversión total inicial (CAPEX), los costos de operación y mantenimiento (OPEX), y la energía generada durante la vida útil del proyecto. La fórmula utilizada para el cálculo es:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5-1)$$

LCOE: Costo Nivelado de Energía.

CAPEX: Costos de capital (inversión inicial).

OPEX<sub>t</sub>: Costos de operación y mantenimiento en el año t.

E<sub>t</sub>: Energía generada en el año t.

r: Tasa de descuento.

n: Vida útil del proyecto (en años).

El diseño de la turbina con materiales reciclados (HDPE) presenta ventajas económicas claras en el CAPEX y el OPEX, aunque con una vida útil menor en comparación con los materiales convencionales. La Tabla 5-1 muestra un análisis detallado de los costos y la vida útil de ambas opciones.

**Tabla 5-1: Análisis de costos de la turbina propuesta**

Componente	Material Reciclado	Costo (COP/kW)	Material Convencional	Costo (COP/kW)	Diferencia (%)
CAPEX total	HDPE + fabricación local	\$8.500.000	Acero + mecanizado industrial	\$10.200.000	20%
OPEX anual	Mantenimiento básico	\$340	Mantenimiento especializado	\$408	20%

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

capacidad	hídricas del sitio				
Vida útil	20 años	---	30 años	---	-33%

### Generación anual estimada:

La generación anual estimada ( $E_{anual}$ ) es de 895,2 kWh/año. La fórmula para su cálculo es:

$$E_{anual} = 0,157 \text{ kW} \times 8.760 \text{ h/año} \times 0,65 = 895,2 \text{ kWh/año}$$

### LCOE calculado:

Con base en los parámetros anteriores, el LCOE de la turbina propuesta es de 1.267 COP/kWh. La fórmula de cálculo es:

$$LCOE_{turbina} = \frac{8.500.000 + 340.000 \times 10,675}{895,2 \times 10,675} = 1.267 \text{ COP/kWh}$$

### 5.3.2 Comparación con alternativas tecnológicas

Para poner en contexto la competitividad del proyecto, se comparó su LCOE con el de la energía solar fotovoltaica. Según un informe de Lazard (2025), el LCOE de la energía solar a gran escala se sitúa entre \$96 y \$368 COP/kWh. En Colombia, estudios específicos reportan costos de \$2.047.600 COP por kW de capacidad instalada para sistemas fotovoltaicos de 5 MW (Pupo-Roncallo, 2020; Universidad Piloto de Colombia, 2020).

La Tabla 5-2 permite comparar el LCOE de la turbina propuesta con otras tecnologías, mostrando que, aunque la energía solar tiene un LCOE inicial más bajo, su costo real se equipara al de la PCH cuando se considera el almacenamiento de energía necesario.

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

<b>Tecnología</b>	<b>CAPEX (USD/kW)</b>	<b>OPEX (USD/kW/año)</b>	<b>LCOE (USD¢/kWh)</b>	<b>LCOE (COP/kWh)</b>	<b>Observaciones</b>
Turbina propuesta	2.125	85	7,6	1.267	Material reciclado
PCH comercial	1.300-8.800	37	8,5-15,2	1.417-2.533	Rango promedio Colombia
Solar fotovoltaico	857-1.325	15-25	4,8-5,1	800-850	Condiciones óptimas
Generador diésel	800-1.200	180-250	25-35	4.170-5.838	Combustible incluido
Sistema híbrido	1.800-2.200	45-60	dic-18	2.001-3.002	Solar + almacenamiento

El análisis confirma que el diseño propuesto es viable y altamente competitivo, basados en los siguientes argumentos:

- El LCOE de \$1.267 COP/kWh para la turbina con materiales reciclados se encuentra dentro del rango de PCH internacionales (\$1.083 - \$1.583 COP/kWh) y es comparable al costo real de los sistemas solares con almacenamiento (\$356 - \$604 COP/kWh).
- El uso de HDPE reciclado reduce el CAPEX en un 20% en comparación con materiales vírgenes y la fabricación local elimina costosos gastos de importación (\$800.000 - \$1.600.000 COP/kW ahorrados).
- El factor de capacidad del 45% de la PCH supera el 22-28% de los sistemas solares fotovoltaicos, lo que significa una mayor utilización de la capacidad sin necesidad de costosas baterías. Esto representa un ahorro de \$6.000.000 - \$12.000.000 COP.
- El OPEX anual de \$340.000 COP/kW es significativamente menor que el de los generadores diésel (\$720.000 - \$1.000.000 COP/kW).

El análisis demuestra que el proyecto optimiza la relación costo-beneficio para contextos rurales. A pesar de una vida útil más corta, el LCOE de \$1.267 COP/kWh es viable y competitivo, respaldado por un CAPEX inicial bajo y la eliminación de la

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

en la fabricación local y el uso de materiales reciclados, ofrece una solución robusta y económicamente atractiva para la electrificación rural.

### **5.3.3 Tiempo de retorno de inversión**

Considerando el costo de la electricidad en zonas rurales (\$600 COP/kWh), el tiempo de retorno simple de la inversión es de 15,8 años. Con los incentivos fiscales de la Ley 1715, que permiten un descuento del 50% en la renta por 5 años, el tiempo de retorno ajustado se reduce a 12,3 años, lo que demuestra una mayor viabilidad a largo plazo.

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

## 6.1 CONCLUSIONES

Este proyecto ha logrado diseñar y validar una turbina de flujo cruzado fabricada con materiales reciclados, aportando una solución innovadora y sostenible a la generación de energía renovable en contextos rurales. A continuación, se detallan las principales conclusiones alcanzadas:

### 6.1.1 Condiciones hidrológicas

El caudal promedio del sitio ( $Q = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y una altura neta de 20 m confirmaron un potencial energético adecuado para el diseño e implementación de una turbina de flujo cruzado.

El análisis estadístico garantizó la calidad de los datos, asegurando que el diseño se adapta eficientemente a las condiciones específicas del entorno.

### 6.1.2 Diseño y materiales de la turbina

El modelo CAD desarrollado utilizó principios de eficiencia hidráulica y sostenibilidad, maximizando la conversión de energía con un diámetro de rodete de 265 mm y álabes optimizados.

La selección de HDPE reciclado como material principal para el diseño final demostró ser una elección técnica y ambientalmente responsable, reduciendo costos de fabricación estimados en un 25% frente a materiales comerciales y promoviendo la economía circular al reutilizar residuos de construcción.

### 6.1.3 Fabricación y costo del prototipo

La fabricación del prototipo de validación en PLA mediante impresión 3D y ensamblaje manual, logró un costo total de \$1,253,400 COP. Esta cifra, significativamente menor a la de sistemas comerciales, demuestra la viabilidad del método de prototipado rápido para validar diseños de energías renovables a bajo

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

fabricación a 26,5 horas

#### **6.1.4 Desempeño energético**

Las pruebas realizadas confirmaron que el prototipo genera una potencia promedio de 6,82 W, suficiente para alimentar dispositivos de bajo consumo como bombillas LED o cargadores de dispositivos.

Considerando el costo del kWh de EPM (\$357,88 COP), la turbina puede generar ahorros mensuales significativos en hogares rurales, y su escalabilidad permitiría cubrir mayores demandas energéticas

#### **6.1.5 Impacto ambiental y social**

La tecnología diseñada tiene el potencial de transformar comunidades rurales, brindándoles acceso a una fuente de energía autónoma y sostenible, reduciendo desigualdades y fomentando el desarrollo local

El proyecto evitó la emisión de aproximadamente 4 kg de CO<sub>2</sub> equivalente al reutilizar HDPE reciclado en el prototipo, contribuyendo al cumplimiento del ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) y ODS 13 (Acción por el Clima).

#### **6.1.6 Perspectivas futuras**

Este modelo es escalable y adaptable a otros contextos rurales, permitiendo su integración con tecnologías complementarias como paneles solares. Su bajo costo y simplicidad técnica lo posicionan como una alternativa viable para programas de electrificación rural en Colombia.

Para la implementación a escala real con HDPE reciclado in situ, se propone aprovechar directamente canecas de pintura y estuco disponibles en las veredas mediante:

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

limpias para construir rodete y álabes, sin procesos industriales complejos.

- **Infraestructura básica:** Construir una plataforma de mortero de cemento en la orilla de la quebrada usando oficios de albañilería local.
- **Instalación hidráulica y eléctrica:** Conectar tubería desde la toma de agua hasta la turbina, seguida de regulador de voltaje, transformador y panel de distribución para iluminación doméstica.
- **Capacitación comunitaria:** Formar equipos locales en montaje mecánico, albañilería básica y electricidad doméstica para garantizar autonomía en la instalación y mantenimiento.

Este enfoque de escalabilidad minimiza el transporte de componentes, reduce costos operativos y fortalece las capacidades técnicas comunitarias, facilitando la replicación del sistema en múltiples veredas con recursos y materiales disponibles localmente.

La validación exitosa del prototipo en PLA sienta una base sólida, y se reconoce que la siguiente fase natural de esta línea de investigación debe centrarse en la validación experimental del diseño final con HDPE para cuantificar su desempeño en campo y cerrar el ciclo metodológico del proyecto.

### 6.1.7 Trabajos derivados

Los resultados de este proyecto abren la puerta a una serie de trabajos futuros y a la exploración de nuevas áreas de investigación, enfocadas en ampliar el impacto y la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica a pequeña escala. Las principales líneas de acción son:

- **Desarrollo de microrredes rurales:** Un próximo paso crucial es integrar la PCH en una microrred inteligente, combinándola con fuentes complementarias como la energía solar y la eólica. Esto no solo aumentaría la confiabilidad del suministro, sino que también permitiría una gestión de la energía más descentralizada y eficiente, beneficiando a toda la comunidad.

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

mantenimiento, se puede crear un gemelo digital del sistema. Este modelo virtual permitiría el monitoreo remoto en tiempo real, la calibración precisa de parámetros y la optimización continua de la eficiencia, garantizando el máximo rendimiento del sistema.

- **Investigación en nuevos materiales:** Es posible explorar el uso de nuevos materiales compuestos reciclados, como la mezcla de HDPE y PET, para mejorar la resistencia mecánica de los componentes de la turbina. Esto abordaría los desafíos de resistencia al desgaste y cavitación, extendiendo la vida útil del sistema y reduciendo los costos de mantenimiento.
- **Modelos de gestión energética comunitaria:** Más allá de la tecnología, es importante estudiar cómo la PCH puede ser la base para el desarrollo de microempresas locales de servicios eléctricos. Esto empoderaría a las comunidades, permitiéndoles gestionar y beneficiarse directamente de la energía generada.
- **Evaluaciones de impacto en la salud pública:** Analizar el impacto de la transición de generadores diésel a PCH en la salud de las comunidades es fundamental. Se pueden realizar estudios que evalúen la reducción de emisiones contaminantes y sus efectos positivos en la salud respiratoria, cuantificando un beneficio social directo del proyecto.
- **Educación técnica local:** Para asegurar la sostenibilidad a largo plazo, es clave desarrollar programas de educación técnica en institutos regionales. Incorporar la fabricación y el mantenimiento de PCH en los planes de estudio no solo capacitaría a la mano de obra local, sino que también fomentaría la autonomía tecnológica de las comunidades rurales.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Para fortalecer el impacto del proyecto y explorar nuevas oportunidades de investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

pérdidas de energía en el flujo.

- Evaluar configuraciones con turbinas en serie o paralelo para incrementar la capacidad de generación en escenarios de mayor demanda.
- Realizar ensayos adicionales con variaciones de caudal ( $Q=0,003-0,007$  m<sup>3</sup>/s) y alturas para validar el diseño en diferentes condiciones.
- Implementar sensores avanzados para monitorear parámetros de eficiencia, potencia y desgaste en tiempo real.
- Comparar el costo por kWh generado frente a tecnologías comerciales para resaltar ventajas económicas.
- Establecer alianzas con entidades públicas y privadas para financiar proyectos piloto en zonas no interconectadas.
- Desarrollar un sistema híbrido que combine esta turbina con paneles solares y almacenamiento energético, maximizando la disponibilidad de energía en todas las temporadas.
- Incorporar tecnologías de monitoreo remoto para gestionar el rendimiento del sistema.
- Promover el proyecto como un modelo alineado con políticas de electrificación rural sostenible, incentivando su implementación en programas gubernamentales o de cooperación internacional. Fomentar la creación de comités energéticos comunitarios conformados por líderes locales, mujeres y jóvenes, para coordinar la recolección de HDPE, supervisión de la fabricación y operación de las PCH.
- Desarrollar talleres de co-diseño con la comunidad para ajustar el prototipo a necesidades específicas (puntos de medición, altura, demanda de energía).
- Implementar modelos de financiamiento colectivo (microcréditos o “pago por servicio energético”) donde las familias contribuyan con una pequeña cuota inicial a cambio de energía durante la operación.

El siguiente Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se realiza sobre el diseño final propuesto para la turbina, cuya fabricación se concibe con Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y otros materiales duraderos. Si bien para la validación se construyó un prototipo en PLA, el propósito de este análisis es evaluar el impacto ambiental de la solución definitiva y sostenible que se implementaría en un contexto real.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta que permite evaluar de manera exhaustiva el impacto ambiental de los materiales reciclados, desde su producción hasta su disposición final. Al implementar el LCA en la selección de plásticos reciclados para infraestructura es posible identificar oportunidades de mejora y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente. En el contexto de las PCH, el uso de HDPE y otros materiales reciclados en componentes como las turbinas no solo optimiza

---

universidades locales) para incorporar el proyecto en actividades de aprendizaje e investigación aplicada.

- Crear un programa de mantenimiento preventivo participativo, capacitando a técnicos comunitarios en inspección, limpieza de la tobera y ajuste de alineación del rodete, asegurando la sostenibilidad operativa.
- Promover ferias y eventos rurales donde se demuestre el funcionamiento de la PCH, generando sentido de apropiación social y atrayendo potenciales inversionistas comunitarios.

Adicionalmente, se recomienda de manera prioritaria fabricar y someter a ensayos de laboratorio y de campo un segundo prototipo funcional utilizando HDPE reciclado, tal como se concibió en los cálculos de diseño. Este paso es crucial para:

- Validar experimentalmente la resistencia estructural y la durabilidad del HDPE bajo las condiciones de operación reales.
- Cuantificar las diferencias de desempeño (eficiencia hidráulica, resistencia a la deformación, vida útil) en comparación con los resultados obtenidos del prototipo en PLA.
- Cerrar el ciclo metodológico del proyecto, pasando de la validación del concepto (con PLA) a la validación del producto final (con HDPE).
- Aumentar el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) de la solución, haciéndola más atractiva para su implementación en proyectos piloto y alianzas futuras.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Adhikari, R., & Wood, D. (2018). Computational Analysis of a Double-Nozzle Crossflow Hydroturbine. *11(12)(3380)*. doi:<https://doi.org/10.3390/en11123380>

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2021). Manual para la realización de aforos de caudal en fuentes superficiales. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/area/Documents/transparencia/M-GAA-RR-03%20Manual%20para%20la%20realizaci%C3%B3n%20aforos%20caudal%20fuentes%20superficiales.pdf>

ASTM INTERNATIONAL. (2020). Standard specifications for carbon steels.

AUTODESK. (2020). Fusion 360: The future of design and manufacturing. Obtenido de <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

BAKARAKI, A., VASILEIOU, A., & STAVROPOULOS, P. (2020). Environmental assessment of additive manufacturing technologies through life cycle analysis: A case study of poly(lactic acid) as a 3D printing feedstock. *90(223-228)*.

Banco Mundial. (2021). *Poverty and Shared Prosperity 2021: Reversals of Fortune*. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/publication/poverty-and-shared-prosperity>

Banco Mundial. (2022). *Acceso a la energía y desarrollo económico en áreas rurales*. Obtenido de <https://www.worldbank.org>

Banco Mundial. (2022). <https://www.worldbank.org>. Obtenido de Acceso a la energía y desarrollo económico en áreas rurales.

BARRICO, L., & CASTRO, P. (2016). Urban biodiversity and cities' sustainable development.

BROWN, C., & GRANT, M. (2005). Biodiversity and human health: What role for nature in healthy urban planning? doi:<https://doi.org/10.2148/benv.2005.31.4.326>

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (s.f.). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill.

- Celsia. (2024). Te explicamos en qué consiste el consumo de subsistencia. Obtenido de <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/te-explicamos-en-que-consiste-el-consumo-de-subsistencia/>
- COLOMBIA, C. D. (2014). Ley 1715 de 2014. Bogotá.
- COMISIÓN MUNDIAL SOBRE EL MEDIO AMBIENTE Y EL DESARROLLO. (1987). Our Common Future.
- Congreso de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021. *Por la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones.*
- Desarrollo, P. d. (2015). *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. . Obtenido de <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- DIXON, S. L., & HALL, C. A. (2010). Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. 6.
- Emanuele Quaranta, J. P. (2022). Optimal design process of crossflow Banki turbines: Literature review and novel expeditious equations. 257(111582). doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111582>
- Empresas Públicas de Medellín. (2022). *PM y Gobernación de Antioquia facilitan acceso a la energía para familias de estrato uno*. Obtenido de EPM: <https://www.epm.com.co/institucional/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/epm-y-gobernacion-de-antioquia-facilitan-acceso-a-la-energia-para-familias-de-estrato-uno/>
- Empresas Públicas de Medellín. (2023). *Convenios EPM-Gobernación de Antioquia han llevado energía a cerca de 11 mil familias y 52 instituciones educativas entre 2020 y 2023*. Obtenido de EPM: <https://www.epm.com.co/institucional/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/convenios-epm-gobernacion-de-antioquia-han-llevado-energia-a-cerca-de-11-mil-familias-y-52-instituciones-educativas-entre-2020-y-2023/>
- FENOGE. (2024). Rendición de cuentas 2023-2024. Obtenido de <https://fenoge.gov.co/rendicion-de-cuentas-2024-2024/>
- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., & GUINÉE, J. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. 91(1-21).

- García Domínguez, A., Puentes, J., & Correa-Sosa, F. (2021). Mechanical properties of PLA parts manufactured by Fused Deposition Modeling: A review. *Materials*. 4583. doi:<https://doi.org/10.3390/ma14164583>
- GENMAS. (2022). *Informe de Gestión PCH Juan García 2022*. Obtenido de GENMAS: <https://genmas.com.co/wp-content/uploads/2023/09/Informe-de-Gestion-Juan-Garcia-2022.pdf>
- GENMAS. (2024). *Central Hidroeléctrica Juan García*. Obtenido de GENMAS: <https://genmas.com.co/central-hidroelectrica-juan-garcia/>
- GIESECKE, J., & MOSONYI, E. (2005). Hydropower plants. 2.
- GUNHAN, S. (2019). Analyzing Sustainable Building Construction Project Delivery Practices: Builders' Perspective.
- HAGER, I., GOLONKA, A., & PUTANOWICZ, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *151*(292-299). doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hollberg, A., & Ruth, J. (2016). LCA in the building sector: An overview on limitations and opportunities. *67*(76-87).
- IDEAM. (2017). *Informe de gestión consolidado*. Obtenido de [https://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/transparencia-y-acceso-a-informacion-publica/informes-de-gestion/-/document\\_library\\_display/v19N5o33W7J5/view/36014549](https://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/transparencia-y-acceso-a-informacion-publica/informes-de-gestion/-/document_library_display/v19N5o33W7J5/view/36014549)
- Investigación en micro turbinas eólicas. (2024). Investigations of the performance of 3D printed micro wind turbine composed of PLA material. *PMC*.
- IPSE. (2019). *Demanda energética en zonas rurales de Norte de Santander*. Obtenido de [https://docs.upme.gov.co/SIMEC/PERS/Norte\\_de\\_Santander/DEMANDA%20ENERG%C3%89TICA%20EN%20ZONAS%20RURALES%20DE%20NORTE%20DE%20SANTANDER.pdf](https://docs.upme.gov.co/SIMEC/PERS/Norte_de_Santander/DEMANDA%20ENERG%C3%89TICA%20EN%20ZONAS%20RURALES%20DE%20NORTE%20DE%20SANTANDER.pdf)
- IRENA. (2020). Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2020. *AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES*. Obtenido de <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020>
- Jiménez, D., & Carvajal, S. X. (2015). Efectos del control de tensión y frecuencia en una operación aislada por micro-redes con pequeñas centrales hidroeléctricas.

- Keawsuntia, Y. (2011). Electricity generation from micro hydro turbine: A case study of crossflow turbine.
- Keawsuntia, Y. (2014). Design and Test of Pico Crossflow Turbine for the Generation of Electricity for Use in the Rural Area. *496-500(605-608)*.  
doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.605>
- Liu, H.-Y. (2019). Building a dwelling that remains carbon-neutral over its lifetime – A case study in Kinmen. *208(522-529)*.
- Mi, Z., Guan, D., Liu, Z., Liu, J., Viguí, V., Fromer, N., & Wang, Y. (2019). Cities: The core of climate change mitigation. *207(582-589)*.
- Miller, D. S. (1995). Internal flow systems.
- Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *319(5863)*. doi:<https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Plan de Energización Rural Sostenible PERS – Departamento de Caquetá: Caracterización de la demanda energética*. Obtenido de <https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2023/04/PER-Characterizacion-Demanda-Energetica.pdf>
- Müller, G. (2008). Water wheels as a power source. *12(8)*.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.04.016>
- Mundial, B. (2021). *Poverty and Shared Prosperity 2021: Reversals of Fortune*. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/publication/poverty-and-shared-prosperity>
- Musa, M., & Teknikal, U. (2018). Small Scale Hydro Turbines for Sustainable Rural Electrification Program.
- Nußholz, J., Nygaard Rasmussen, F., & Milios, L. (2019). Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. *141(308-316)*.
- OLADE. (s.f.). Manual de Diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas. *Diseño, estandarización y fabricación de turbinas Mitchell-Banki, 1*.

- Paish, O. (2002). Micro-hydro power: Status and prospects. doi:<https://doi.org/10.1243/095765002760024827>
- Palacios, J. (2014). Análisis del consumo de subsistencia de la energía eléctrica en Colombia. *Revista Equidad y Desarrollo*, 31-54. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v17n33/1909-8367-ecei-17-33-31.pdf>
- Palomeque, V., Valdez, I., Jara, N., & Reinoso, F. (s.f.). Diseño de una mini central hidroeléctrica. 30(30-40).
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., & Rydberg, T. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. 30(721-739).
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2023). Sustainable Development Goals Report 2023. Obtenido de <https://www.undp.org/sdgs>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Obtenido de <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Quiroz, A. G. (2025). Marco normativo de Comunidades Energéticas en Colombia. Obtenido de <https://es.linkedin.com/pulse/generalidades-del-marco-normativo-de-comunidades-en-giraldo-quiros-qok4e>
- Región Administrativa y de Planeación Especial. (2020). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Pequen%CC%83as-Centrales-Hidroele%CC%81ctricas.pdf>
- Revista Universidad del Bosque. (2023). *Análisis de Políticas Públicas para la adopción de Energías Renovables No Convencionales en Colombia*. Obtenido de Cuadernos Latinoamericanos de Administración.
- Romero Menco, F., Pineda Aguirre, J., & Velásquez, L. (2020). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 20, 23-46.
- Romero-Menco, F., Pineda Aguirre, J., & Velásquez, L. (2020). Effects of the Nozzle Configuration with and without an Internal Guide Vane on the Efficiency in Cross-Flow Small Hydro Turbines. 12(938). doi:<https://doi.org/10.3390/pr12050938>
- SOCYA. (2024). Comunidades Energéticas en Colombia. Obtenido de <https://socya.org.co/comunidades-energeticas-en-colombia/>

- Suárez, J. (10 de marzo de 2016). *Solo el 26% de las botellas plásticas se recicla*. Obtenido de La Republica: [https://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla\\_357536](https://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla_357536)
- Ultimaker. (2021). Cura: Advanced 3D slicing software. Obtenido de <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2022). *Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía PROURE 2022-2030*. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PROURE/Documento\\_PROURE\\_2022-2030\\_v4.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PROURE/Documento_PROURE_2022-2030_v4.pdf)
- Universidad de los Andes. (2024). *Evaluación del impacto de los subsidios a la demanda de energía eléctrica en Colombia*. Obtenido de Facultad de Economía: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/handle/1992/74283/dcede2024-22.pdf>
- Universidad de Viena. (s.f.). Instructivo de medición de caudal. Obtenido de [https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/protocols/INSTRUCTUVO\\_DE\\_MEDICIC3%93N\\_DE\\_CAUDAL.pdf](https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/INSTRUCTUVO_DE_MEDICIC3%93N_DE_CAUDAL.pdf)
- Universidad Politécnica de Madrid. (2023). Introduciendo los ODS y la circularidad a la educación en ingeniería a través de actividades para el reciclado de plásticos en un campus universitario.
- UPME. (2018). *Unidad de Planeación Minero Energética*. Obtenido de <http://www.upme.gov.co/zni/>
- Vicente Oliva, S. (2023). La impresión 3D como tecnología de uso general en el futuro.
- Wagner, H.-J., & Mathur, J. (2009). Introduction to hydro energy systems.
- Wagner, H.-J., & Mathur, J. (2009). Introduction to hydro energy systems.
- Wang, Y., & Ahmed, A. (2021). Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 709-733.
- Wohlers Associates. (2016). *Wohlers Report 2016: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry - Annual Worldwide Progress*. Obtenido de <https://wohlersassociates.com/press71.html>