

Manual de lógica aplicada en el modelo

Versión 4

Assessment of the Small-scale hydropower potential in Colombia

13 febrero 2026

Contenido

1. Introducción	5
2. Alcance del modelo	5
3. Marco metodológico	5
4. Datos de entrada.....	5
5. Filtros y restricciones	6
5.1. Consideraciones ambientales restrictivas.....	6
5.2. Capas informativas, no restrictivas	7
5.3. Criterios de dimensionamiento hidráulico.....	7
6. Filtros y restricciones	8
6.1. Metodología de selección	8
6.2. Zonas de aplicación por tipo de turbina.....	8
7. Cálculo de potencia.....	9
7.1. Fórmula de potencia aprovechable.....	9
7.2. Eficiencias por tipo de turbina	9
7.3. Dimensionamiento según demanda (VSS).....	10
6. Cálculo de Costos.....	11
7.4. Estructura de Costos.....	11
7.4.1. Partida 1: Turbina y Generador.....	11
7.4.2. Partida 2: Otros Equipos	12
7.4.3. Partida 3: Instalación y Puesta en Marcha	16
7.4.4. Partida 4: Obra Civil.....	16
7.4.4.1. Tubería a presión	18
7.4.5. Partida 5: Línea de conexión eléctrica.....	24
7.4.6. Partida 6: Costos ambientales.....	29
7.4.7. Partida 7: Costo transporte.....	30
7.4.8. Partida 8: Otros Costos	34

7.5.	CAPEX Total.....	34
7.6.	OPEX Anual.....	34
7.7.	Indicador CAPEX/VSS.....	35
8.	Sistema de priorización.....	35
8.1.	Criterios de selección.....	35
8.2.	Curva de eficiencia marginal.....	36
8.3.	Filtros adicionales.....	36
9.	Funcionalidades adicionales.....	37
9.1.	Exportación de datos.....	37
9.2.	Parametrización.....	37
9.3.	Análisis multiescenario.....	37
10.	Conclusiones y escalabilidad.....	38
10.1.	Utilidad para la UPME.....	38
10.2.	Escalabilidad futura.....	38

Tablas

Tabla 1:	Ejemplos atributos.....	6
Tabla 2:	Capas no restrictivas.....	7
Tabla 3:	Zonas de aplicación turbinas.....	9
Tabla 4:	Eficiencias turbinas.....	9
Tabla 5:	Costos CAPEX turbinas.....	11
Tabla 6:	Complejidad turbinas.....	16
Tabla 7:	Datos generales dimensionamiento obra civil.....	17
Tabla 8:	Selección turbina.....	18
Tabla 9:	Anclaje hormigón.....	18
Tabla 10:	Caseta de maquinas.....	19
Tabla 11:	Presupuesto obras captación.....	19
Tabla 12:	Presupuesto obras conducción.....	20

Tabla 13: Presupuesto obras caseta de maquinas	20
Tabla 14: Resumen costos obra civil	21
Tabla 15: Cuadrilla tipo	23
Tabla 16: Contingencias 25%	23
Tabla 17: Comparativa valores referencia	23
Tabla 18: Parámetros dimensionamiento Línea conexión eléctrica	25
Tabla 19: Calibres conductor ACSR.....	25
Tabla 20: especificaciones técnicas.....	26
Tabla 21: Presupuesto materiales	26
Tabla 22: Presupuesto mano de obra.....	27
Tabla 23: Resumen Presupuesto.....	27
Tabla 24: Costos indirectos	28
Tabla 25: Comparativa costos por km.....	29
Tabla 26: Tramos transporte.....	30
Tabla 27: variables Costo transporte.....	31
Tabla 28: valores coeficiente	32
Tabla 29: Componentes Costo fijo	32
Tabla 30: Multiplicador turbina.....	33
Tabla 31: Multiplicador región	34

1. Introducción

El presente documento describe la lógica técnica y económica implementada en el modelo de identificación y priorización de potencial hidroeléctrico para Colombia. Su objetivo es proporcionar una comprensión completa de los criterios, fórmulas y metodologías utilizadas, permitiendo a los usuarios entender las bases de cada cálculo y decisión del sistema.

Este manual está dirigido al equipo de la UPME que requieran comprender la lógica del modelo, así como a desarrolladores que necesiten mantener o extender el sistema.

2. Alcance del modelo

El modelo Hydro.py es una herramienta de análisis geoespacial que permite:

- Visualizar puntos de potencial hidroeléctrico sobre un mapa interactivo de Colombia
- Aplicar filtros ambientales y técnicos para identificar ubicaciones viables
- Determinar automáticamente los tipos de turbina aplicables según las condiciones hidráulicas
- Calcular Costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) desglosados por partidas
- Priorizar proyectos según criterios de Costo-beneficio social
- Exportar resultados en formatos CSV y Word para análisis posterior

3. Marco metodológico

La metodología implementada se basa en los criterios definidos en el informe de la Actividad 2: "Metodología de dimensionamiento y costos del sistema", específicamente en el apartado "Desarrollo de una metodología para definir la configuración óptima del sistema". Los parámetros técnicos de turbinas provienen del benchmark realizado en la Actividad 1: Investigación y análisis tecnológico.

4. Datos de entrada

El modelo utiliza como entrada principal un archivo shapefile que contiene los puntos de potencial hidroeléctrico. Cada punto incluye los siguientes atributos:

Atributo	Unidad	Descripción
Caudal_med	m³/s	Caudal medio multianual de la corriente
Pendiente	decimal	Pendiente media del tramo de río
Caida_hidr	metros	Caída hidráulica aprovechable (salto bruto)
Potencia_k	kW	Potencia teórica del punto
VSS	viviendas	Viviendas Sin Servicio eléctrico en el km²
Region	texto	Región de Colombia donde se ubica el punto
Zona_clima	texto	Zona climática (afecta demanda por vivienda)

TABLA 1: EJEMPLOS ATRIBUTOS

5. Filtros y restricciones

5.1. Consideraciones ambientales restrictivas

El modelo aplica restricciones espaciales que excluyen automáticamente los puntos ubicados dentro de áreas donde el desarrollo de infraestructura hidroeléctrica es inviable o extremadamente complejo. Se han definido dos capas restrictivas, cuyo detalle se expone a continuación y también aparece en el capítulo 5.3 del informe de la actividad 2: Metodología de dimensionamiento y costos del sistema":

- Parques Nacionales Naturales (PNN)

Fuente: Delimitación del Sistema de Parques Nacionales Naturales sobre cartografía oficial IGAC a escala 1:100.000.

Justificación: La normativa de los PNN se fundamenta en la Constitución Política, la Ley 99 de 1993 (creación del Ministerio del Medio Ambiente), y decretos clave como el 3572 de 2011 (creación de la Unidad Administrativa Especial Parques Nacionales Naturales de Colombia) y el 1313 de 2020 (que modifica su estructura), además de políticas como el CONPES 4050 para el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP).

Esta amplia legislación y normativa administrativa, junto con los convenios internacionales suscritos por Colombia, hacen extremadamente compleja y costosa la sustracción de un área dentro de un PNN para el desarrollo de cualquier proyecto de infraestructura.

- Parques Arqueológicos

Fuente: Parques Arqueológicos de Colombia del Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Justificación: La normativa para Parques Arqueológicos en Colombia es robusta y está centrada en la protección del patrimonio cultural, amparada bajo la Constitución Política (Artículos 63 y 72), la Ley 397 de 1997 (Ley General de Cultura) y decretos clave como el 1080 de 2015 (modificado por el 138 de 2019).

Estas normas establecen la propiedad de la Nación sobre el patrimonio arqueológico, la obligación de registro, la gestión de programas de arqueología preventiva (PAP) y la regulación

de usos, con sanciones por incumplimiento, buscando la investigación, conservación y divulgación del pasado precolombino.

Nota: Aunque técnicamente la legislación permite ciertos desarrollos, la complejidad administrativa y los Costos asociados hacen que estas áreas se consideren no viables para el alcance de este modelo.

5.2. Capas informativas, no restrictivas

Adicionalmente, el modelo descarga y visualiza otras 8 capas geográficas de la siguiente URL: https://sig.cicolombiaenaccion.org/server/rest/services/Hosted/biodiversidad_ci_vista/FeatureServer que, aunque no excluyen puntos automáticamente, proporcionan información relevante para la toma de decisiones:

Capas
Tierras de Comunidades Negras
Resguardos Indígenas
Complejos de Páramo
Áreas de Protección Local/Regional
Reservas Naturales (RNSC)
Áreas Protegidas (RUNAP)
Reservas Forestales

TABLA 2: CAPAS NO RESTRICTIVAS

5.3. Criterios de dimensionamiento hidráulico

El modelo aplica filtros iniciales basados en criterios técnicos de diseño hidráulico, donde se definen en el capítulo: 5.4 del informe de la actividad 2: Metodología de dimensionamiento y costos del sistema", donde se expresa lo siguiente:

- Condición 1: Rango de caudal

$$0,15 \text{ m}^3/\text{s} < \text{Caudal}_{\text{med}} < 0,50 \text{ m}^3/\text{s}$$

Justificación del límite inferior (0,15 m³/s):

- Considerando un caudal de diseño para generación del 20% del caudal medio, se obtienen caudales de diseño de 0,03 m³/s.
- Esto permite encontrar sitios para aprovechar potencias mínimas de 5 kW.
- Garantiza un factor de planta alto, es decir, una generación constante que asegure el suministro eléctrico la mayor cantidad del tiempo.

Justificación del límite superior (0,5 m³/s):

- Los caudales medios multianuales implican caudales máximos instantáneos (período de retorno de 100 años) del orden de 30 veces mayores.
 - Para 0,50 m³/s de caudal medio, esto equivale a aproximadamente 15 m³/s de caudal de diseño de captación.
 - Limitar a este valor busca proyectos con obra civil moderada, evitando estructuras de gran envergadura.
- Condición 2: Pendiente mínima

Pendiente > 5%

Justificación: Una pendiente mínima del 5% garantiza una caída hidráulica suficiente para la generación de energía. Pendientes menores requerirían tramos de conducción muy largos para acumular el salto necesario, encareciendo significativamente la obra civil.

Notal: El caudal de diseño para generación (20% del caudal medio) optimiza el rendimiento energético y el factor de planta. El caudal de diseño de captación (caudal máximo de 100 años) asegura la seguridad hidráulica y estructural frente a avenidas extremas.

6. Filtros y restricciones

6.1. Metodología de selección

Una vez que un punto cumple los filtros ambientales e hidráulicos, el modelo determina automáticamente qué tipos de turbina son técnicamente viables. Para ello, se ha parametrizado el diagrama estándar de selección de turbinas, definiendo polígonos de aplicación según el caudal y la caída hidráulica. Dicho diagrama se muestra en el apartado 2.5.2 del informe de la actividad 1: Investigación y análisis tecnológico.

El proceso de selección convierte las unidades del shapefile (m³/s y metros) de los valores “Caudal_med” y “Caída_hidr” a las unidades del diagrama estándar (pies³/s y pies), ya que dicho diagrama se encuentra en estas unidades.

$$\text{Caudal (cfs)} = \text{Caudal (m}^3\text{/s)} \times 35.3147 \quad (1)$$

$$\text{Caída (ft)} = \text{Caída (m)} \times 3.28084$$

6.2. Zonas de aplicación por tipo de turbina

Los polígonos de aplicación definen los rangos operativos de cada turbina, a continuación, se muestran los vértices de los polígonos de aplicación de turbinas de cada turbina, donde (x, y) (Caudal, caída hidráulica). Dichos valores se encuentran en (pies³/s y pies). Se añade también la conversión a m³/s, m.

Turbina	Vértices de los polígonos (cfs,ft)	Vértices de los polígonos (m³/s, m)
PAT	(1,30) (1.2,550) (7, 550) (15,400) (13, 30)	(0.03, 9.14) (0.33, 167.64) (0.19, 167.64) (0.42, 121.92) (0.36, 9.14)
Pelton	(1,200) (1, 3000) (40, 3000) (70, 2000) (70, 1600) (30, 200) (10, 100)	(33.98, 0.30) (36.81, 12.19) (84.95, 21.33) (56.63, 21.33) (45.30, 9.14) (8.49, 6.09) (0.28, 30.48)
Cross Flow	(10,10) (10, 800) (20, 800) (300, 40) (300, 10)	(0.28, 3.04) (0.28, 243.84) (0.56, 243.84) (8.49, 12.19) (8.49, 3.04)
Francis	(15, 200) (35, 1150) (120, 1150) (800, 170) (500, 30) (80, 30)	(0.42, 60.96) (0.99, 350.52) (3.39, 350.52) (22.65, 51.81) (14.15, 9.14) (2.26, 9.14)
Kaplan	(1, 10) (1, 80) (80, 200) (700, 200) (1800, 80) (1800, 25) (1300, 10)	(0.023, 3.04) (0.03, 24.38) (2.26, 60.96) (19.82, 60.96) (50.97, 24.38) (50.97, 7.62) (36.81, 3.04)
Turgo	(1, 180) (1, 900) (35, 900) (350, 180)	(0.023, 54.86) (0.03, 274.32) (0.99, 274.32) (9.91, 54.86)
Deriaz	(50, 100) (50, 260) (140, 260) (5000, 460) (17500, 100) (10500, 100)	(1.41, 30.48) (1.41, 79.24) (3.96, 79.24) (141.58, 140.20) (495.54, 30.48) (297.32, 30.48)
Bulbo	(106, 100) (14000, 100) (25000, 33) (7000, 16) (106, 16)	(3.00, 30.48) (396.43, 30.48) (707.92, 10.05) (198.21, 4.87) (3.00, 4.87)

TABLA 3: ZONAS DE APLICACIÓN TURBINAS

Nota: Un mismo punto puede ser apto para múltiples tipos de turbina. El modelo calcula los Costos para cada opción, permitiendo la comparación.

7. Cálculo de potencia

7.1. Fórmula de potencia aprovechable

Para cada tipo de turbina viable, el modelo calcula la potencia máxima aprovechable aplicando correcciones por pérdidas hidráulicas y eficiencia de conversión:

$$\text{Potencia (kW)} = \text{Potencia}_k \times 0.9 \times \eta \quad (2)$$

Donde:

- Potencia_k: Potencia teórica del punto según el shapefile (kW)
- 0.9: Factor de corrección por pérdidas de carga hidráulica (10% del salto bruto), donde aparece en el capítulo 5.3 del informe de la actividad 2: Metodología de dimensionamiento y costos del sistema":
- η : Eficiencia de la turbina según su tipo

7.2. Eficiencias por tipo de turbina

Las eficiencias utilizadas provienen del benchmark realizado en la Actividad 1: Investigación y análisis tecnológico.

Tipo de Turbina	Eficiencia (η)
Francis	92%
Pelton, Bulbo y Deriaz	90%
Kaplan	89%
Turgo	87%
PAT	86%
Cross Flow	70%

TABLA 4: EFICIENCIAS TURBINAS

7.3. Dimensionamiento según demanda (VSS)

El modelo considera las Viviendas Sin Servicio (VSS) del km² donde se ubica cada punto para dimensionar la potencia realmente necesaria:

$$\text{Potencia_abastecer_VSS} = \text{VSS} \times \text{Potencia_pico_por_vivienda} \quad (3)$$

La potencia pico por vivienda depende de la zona climática del punto, considerando que zonas más cálidas tienen mayor demanda por refrigeración. Dicha información aparece en el apartado 3.2.1 del informe de la actividad 1.

Zona climática	Energía mensual [kWh-mes]	Energía diaria [kWh-día]	Potencia pico [W]
TIPO 1 - FRÍO	95	3,2	1002
TIPO 2 - TEMPLADO	90	3,0	1002
TIPO 3 - CÁLIDO SECO	110	3,7	1002
TIPO 4 - CÁLIDO HÚMEDO	145	4,8	1339

Tipo	Energía diaria [kWh/día]	Potencia media consumida [kW]	Potencia pico consumida [kW]	Potencia pico requerida* [kW]
1	3.20	0.13	1.00	1.54
2	3.00	0.13	1.00	1.54
3	3.70	0.15	1.00	1.54
4	4.80	0.20	1.34	2.06

* Considerando 65% de factor de planta
 ** Datos por vivienda

Se presentan dos escenarios:

1. Caso normal: Si la potencia máxima aprovechable \geq potencia abastecer, se dimensiona para abastecer todas las VSS.
2. Caso híbrido: Si la potencia máxima aprovechable $<$ potencia abastecer se dimensiona a la potencia máxima y se calcula cuántas VSS pueden abastecerse.

6. Cálculo de Costos

7.4. Estructura de Costos

El modelo calcula el CAPEX desglosado en 8 partidas y OPEX, cada una con su justificación técnica y fórmula específica, todos los Costos son en USD:

7.4.1. Partida 1: Turbina y Generador

$$\text{Coste turbina} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Costos CAPEX (tipo de turbina)} \left(\frac{\text{USD}}{\text{KW}}\right) \quad (4)$$

Turbina	USD/kW
PAT	\$150
Cross Flow	\$250
Pelton	\$400
Kaplan	\$600
Francis	\$950
Turgo	\$400
Deriaz	\$550
Bulbo	\$400

TABLA 5: COSTOS CAPEX TURBINAS

Justificación del uso del valor alto del rango:

Los Costos unitarios provienen del benchmark de la Actividad 1, donde se identificaron rangos de precios según la potencia instalada. El modelo utiliza deliberadamente los valores del extremo superior de cada rango por las siguientes razones:

1. Economías de escala: El Costo por kW de una turbina no es lineal. Los proyectos de menor potencia tienen Costos unitarios significativamente más altos porque los Costos fijos de fabricación (diseño, moldes, certificaciones, logística mínima) se reparten entre menos kW.
2. Curva de Costos decreciente: A medida que aumenta la potencia, el Costo por kW se "aplana". Por ejemplo, una turbina PAT de 5 kW puede costar \$150/kW, mientras que una de 50 kW puede costar \$100/kW. Dado que este modelo se enfoca en PCH, es más representativo usar el valor alto.
3. Enfoque conservador: Para la planificación presupuestaria, es preferible sobreestimar ligeramente los Costos que subestimarlos. Usar el valor alto del rango proporciona un margen de seguridad en las estimaciones.
4. Contexto colombiano: Los precios del benchmark corresponden a mercados internacionales. En Colombia, factores como Costos de importación, aranceles y logística pueden incrementar el precio final, acercándolo al extremo superior del rango.

7.4.2. Partida 2: Otros Equipos

El Costo correspondiente a la partida Otros Equipos se estima a partir del Costo del conjunto turbina–generador, aplicando un factor obtenido mediante el análisis comparativo de proyectos de referencia.

La expresión utilizada es la siguiente:

$$\mathbf{Coste\ equipos = Coste\ Turbina \times 2,1} \quad (5)$$

Justificación del factor 2,1

Este factor se ha determinado a partir del análisis de dos proyectos reales:

- PCH Violetas, con una potencia instalada de 0,9 MW
- PCH Renacer, con una potencia instalada de 1,5 MW

Para cada uno de estos proyectos se ha procedido de la siguiente manera:

1. Se han extraído las partidas correspondientes a:
 - Equipo eléctrico y de control
 - Transformador de potencia
 - Transformador de servicios auxiliares
2. Se ha calculado el sumatorio eléctrico de cada proyecto:

$$\begin{aligned} \sum \text{Otros violetas} &= \text{Equipo eléctrico y de control} + \text{Transformador de potencia} \\ &+ \text{Transformador de servicios auxiliares} \\ &= 178.754 + 21.233,89 + 3.806,06 = 203.793,95 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sum \text{Otros Renacer} &= \text{Equipo eléctrico y de control} + \text{Transformador de potencia} \\ &+ \text{Transformador de servicios auxiliares} \\ &= 270.010 + 49.086,7 + 3.054,44 = 322.151,14 \end{aligned} \quad (7)$$

3. Este sumatorio se ha comparado con el Costo total de equipos mecánicos de cada proyecto, obteniendo un factor individual mediante la siguiente relación:

$$\text{Factor comparativo Violetas} = \frac{\text{Coste equipos mecanicos}}{\Sigma \text{Otros}} = \frac{386.003}{203.793,95} = 1,89 \quad (8)$$

$$\text{Factor comparativo Renacer} = \frac{\text{Coste equipos mecanicos}}{\Sigma \text{Otros}} = \frac{767715}{322.151,14} = 2,38 \quad (9)$$

4. Finalmente, se calcula el factor medio entre ambos proyectos:

$$\text{Factor medio} = \frac{\text{Factor V} + \text{Factor R}}{2} = \frac{1,89 + 2,38}{2} \approx 2,1 \quad (10)$$

Aplicación en el modelo

El valor resultante 2,1 se adopta como factor de cálculo para estimar el Costo de la partida Otros Equipos a partir del Costo del conjunto turbina–generador. No obstante, este factor queda definido como un parámetro ajustable dentro del modelo, permitiendo su modificación en función de nuevos datos o criterios de diseño.



**PROYECTOS PCH'S LAS VIOLETAS Y PCH RENACER
CUADROS DE CANTIDADES Y PRECIOS**

PCH LAS VIOLETAS

BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN EXTRANJERO

HOJA DE PRECIOS - 1. EQUIPOS MECANICOS

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
1.1.	TURBINA	1	EUR 208.500,00	EUR 208.500,00
1.2.	GENERADOR	1	EUR 107.030,00	EUR 107.030,00
1.3.	VALVULA MARIPOSA	1	EUR 25.715,00	EUR 25.715,00
1.4.	SISTEMA OLEOHIDRAULICO	1	EUR 31.275,00	EUR 31.275,00
1.5.	DOCUMENTACION	1	EUR 4.865,00	EUR 4.865,00
1.6.	HERRAMIENTAS ESPECIALES EQUIPOS OPCIONALES	1	EUR 8.618,00	EUR 8.618,00
1.7.	FRENO DE DISCO	1	EUR 10.425,00	
1.8.	VALVULA DE MARIPOSA PARA PROTECCION TUBERIA DE CARGA	1	EUR 49.067,00	
1.9.	PARTES DE REPUESTO	1	EUR 43.090,00	
1.10.	RODete DE REPUESTO	1	EUR 55.600,00	
1.11.	SISTEMA DE DRENAJE Y DESAGÜE	1	EUR 10.425,00	
1. EQUIPOS MECANICOS				EUR 386.003,00

HOJA DE PRECIOS - 2. EQUIPO ELECTRICO Y DE CONTROL

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
2.1.	SISTEMA DE CONTROL DE GENERADOR Y PROTECCION	1	EUR 56.990,00	EUR 56.990,00
2.2.	SISTEMA DE SERVICIOS AUXILIARES	1	EUR 8.340,00	EUR 8.340,00
2.3.	EQUIPO DE BAJA TENSION DEL GENERADOR	1	EUR 16.819,00	EUR 16.819,00
2.4.	CELDA DE MEDIA TENSION	1	EUR 62.550,00	EUR 62.550,00
2.5.	SISTEMA MEDICION DE NIVEL DE AGUA EN TANQUE DE CARGA	1	EUR 6.116,00	EUR 6.116,00
2.6.	CABLES DE CONTROL Y POTENCIA	1	EUR 23.074,00	EUR 23.074,00
2.7.	DOCUMENTACION EQUIPOS OPCIONALES	1	EUR 4.865,00	EUR 4.865,00
2.8.	PARTES DE REPUESTO	1	EUR 25.715,00	
2.9.	SISTEMA SCADA	1	EUR 19.209,80	
2. EQUIPO ELECTRICO Y DE CONTROL				EUR 178.754,00

HOJA DE PRECIOS - 3. TRANSPORTES Y EMBAJE

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
3.1.	TRANSPORTE Y EMBALAJE DE EQUIPOS MECANICOS	1	EUR 32.665,00	EUR 32.665,00
3. TRANSPORTES Y EMBAJE				EUR 32.665,00

HOJA DE PRECIOS - 4. SUPERVISION, ENTRENAMIENTO Y COMISIONAMIENTO

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
4.1.	INSPECCION DE LA SUPERVISION, INSTALACION Y COMISIONAMIENTO	1	EUR 41.700,00	EUR 41.700,00
4. SUPERVISION, ENTRENAMIENTO Y COMISIONAMIENTO				EUR 41.700,00

TOTAL DE PRECIOS BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN EXTRANJERO

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO TOTAL EUR
1	EQUIPOS MECANICOS	1	EUR 386.003,00
2	EQUIPOS ELECTRICOS Y DE CONTROL	1	EUR 178.754,00
3	TRANSPORTES Y EMBALAJE	1	EUR 32.665,00
4	INSPECCION DE LA SUPERVISION, INSTALACION Y COMISIONAMIENTO	1	EUR 41.700,00
TOTAL BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN EXTRANJERO			EUR 630.122,00

TOTAL DE PRECIOS BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN NACIONAL

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO TOTAL EUR
5.1.	TRANSFORMADOR DE POTENCIA	1	EUR 21.233,80
5.2.	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS AUXILIARES	1	EUR 3.806,06
5.3.	MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA	1	EUR 59.745,00
SUBTOTAL IVA			EUR 84.784,86
TOTAL DE PRECIOS BIENES Y SERVICIOS ORIGEN NACIONAL			EUR 16.109,00

VALOR TOTAL OFERTA PCH VIOLETAS

EUR 740.015,86



PCH RENACER				
BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN EXTRANJERO				
HOJA DE PRECIOS - 1. EQUIPOS MECANICOS				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
1.1.	TURBINA	1	EUR 302.250,00	EUR 302.250,00
1.2.	GENERADOR	1	EUR 335.885,00	EUR 335.885,00
1.2.1	CIRCUITO DE ENFRIAMIENTO	1	EUR 27.280,00	EUR 27.280,00
1.2.2	FRENO DE DISCO	1	EUR 11.625,00	EUR 11.625,00
1.3.	VALVULA MARIPOSA	1	EUR 36.115,00	EUR 36.115,00
1.4.	SISTEMA OLEOHIDRAULICO	1	EUR 39.525,00	EUR 39.525,00
1.5.	DOCUMENTACION	1	EUR 5.425,00	EUR 5.425,00
1.6.	HERRAMIENTAS ESPECIALES	1	EUR 9.610,00	EUR 9.610,00
	EQUIPOS OPCIONALES			
1.7.	REPUESTOS REQUERIDOS	1	EUR 55.025,00	
1. EQUIPOS MECANICOS				EUR 767.715,00
HOJA DE PRECIOS - 2. EQUIPO ELECTRICO Y DE CONTROL				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
2.1.	SISTEMA DECONTROL DE GENERADOR Y PROTECCION	1	EUR 70.370,00	EUR 70.370,00
2.2.	SISTEMA DE ESTACION DE SERVICIO	1	EUR 14.260,00	EUR 14.260,00
2.3.	SISTEMA MEDICION DE NIVEL DE AGUA EN TANQUE DE CARGA	1	EUR 6.820,00	EUR 6.820,00
2.4.	SISTEMA SCADA	1	EUR 23.405,00	EUR 23.405,00
2.5.	CUBICULO DE NEUTRO A TIERRA GENERADOR	1	EUR 12.865,00	EUR 12.865,00
2.6.	CELDA DE MEDIA TENSION	1	EUR 83.080,00	EUR 83.080,00
2.7.	CABLES DE CONTROL Y POTENCIA	1	EUR 35.185,00	EUR 35.185,00
2.8.	INGENIERIA Y DOCUMENTACION	1	EUR 24.025,00	EUR 24.025,00
2. EQUIPO ELECTRICO Y DE CONTROL				EUR 270.010,00
HOJA DE PRECIOS - 3. TRANSPORTES Y EMBALAJE				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
3.1.	TRANPORTE Y EMBALAJE DE EQUIPOS MECANICOS	1	EUR 44.950,00	EUR 44.950,00
3. TRANSPORTES Y EMBALAJE				EUR 44.950,00
HOJA DE PRECIOS - 4. SUPERVISION, ENTRENAMIENTO Y COMISIONAMIENTO				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
4.1.	INSPECCION DE LA SUPERVISION, INSTALACION Y COMISIONAMIENTO	1	EUR 114.700,00	EUR 114.700,00
4. SUPERVISION, ENTRENAMIENTO Y COMISIONAMIENTO				EUR 114.700,00
TOTAL DE PRECIOS BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN EXTRANJERO				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
1	EQUIPOS MECANICOS	1	EUR	767.715,00
2	EQUIPOS ELECTRICOS Y DE CONTROL	1	EUR	270.010,00
3	TRANSPORTES Y EMBALAJE	1	EUR	44.950,00
4	INSPECCION DE LA SUPERVISION, INSTALACION Y COMISIONAMIENTO	1	EUR	114.700,00
TOTAL				EUR 1.197.375,00
TOTAL DE PRECIOS BIENES Y SERVICIOS DE ORIGEN NACIONAL				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD N°	PRECIO UNITARIO EUR	PRECIO TOTAL EUR
5.1.	TRANSFORMADOR DE POTENCIA	1	EUR	49.086,70
5.2.	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS AUXILIARES	1	EUR	3.054,44
5.3.	MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA	1	EUR	151.575,00
SUBTOTAL				EUR 203.716,15
I/A				EUR 38.706,00
TOTAL DE PRECIOS BIENES Y SERVICIOS ORIGEN NACIONAL				EUR 242.422,15
VALOR TOTAL OFERTA PCH RENACER				EUR 1.439.797,15
VALOR TOTAL OFERTA PCH'S LAS VIOLETAS Y RENACER				EUR 2.179.813,01

7.4.3. Partida 3: Instalación y Puesta en Marcha

$$\text{Coste instalación} = (\text{Coste equipos} + \text{Coste turbina}) \times \text{Complejidad instalación} \quad (11)$$

Turbina	Complejidad	Factor	Justificación
PAT	Baja	10%	Instalación simple
Cross Flow	Media	15%	Complejidad media
Francis, Pelton, Kaplan, Bulbo, Deriaz, turgo	Alta	20%	Alta precisión

TABLA 6: COMPLEJIDAD TURBINAS

Dicho factor de complejidad se basa en los valores obtenidos del benchmark de PCH de la actividad 1, donde a cada turbina se le asigna una complejidad y posteriormente se extrapola a un factor porcentual.

7.4.4. Partida 4: Obra Civil

Para estimar el Costo de obra civil asociado a la implantación de PCH en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, se ha realizado un dimensionamiento técnico preliminar de una central hidroeléctrica de pasada tipo ¹, con el objetivo de obtener un valor medio aproximado aplicable a los proyectos objeto del estudio.

El dimensionamiento se ha desarrollado considerando los siguientes parámetros de referencia:

- Caudal de captación: 50 L/s (0,05 m³/s)
- Desnivel bruto disponible: 30 m
- Longitud de tubería a presión: 500 m
- Potencia eléctrica estimada: ~10 kW

La obra civil contemplada incluye: obra de captación lateral con reja y compuertas, desarenador con válvula de purga, aliviadero de excesos, tubería de conducción forzada en PEAD, anclajes de hormigón, caseta de control y todos los trabajos de mano de obra y transporte asociados.

El presupuesto ha sido elaborado bajo un escenario de optimización de Costos aplicable a proyectos de desarrollo rural y autogestión comunitaria, maximizando el uso de recursos locales y considerando precios unitarios del mercado colombiano.

Los valores aquí presentados representan una estimación razonable basada en precios de mercado colombiano y podrán ser ajustados en una fase de diseño definitivo, con base en estudios topográficos, geotécnicos, hidrológicos y ambientales específicos de cada sitio.

El Costo de obra civil se ha estructurado en tres partidas principales, aplicando un factor de contingencias del 25% para cubrir administración, imprevistos y utilidades, según la siguiente fórmula:

¹ Se entiende por "central hidroeléctrica de pasada tipo" una configuración de referencia basada en centrales hidroeléctricas de pasada (o a filo de agua), caracterizadas por aprovechar el caudal natural del río con almacenamiento mínimo o inexistente y sin embalses de regulación significativa.

$$\text{Coste obra civil} = \text{Costes}_{\text{Captación+Conducción+Caseta}} \times 1,25 \quad (12)$$

A continuación, se presenta el detalle del dimensionamiento hidráulico y el desglose presupuestario que justifica un Costo estimado de 30.350 USD para la partida de obra civil.

1. Datos generales de dimensionamiento

Parámetro	Valor
Tipo de central	Hidroeléctrica de pasada
País / Ubicación	Colombia - ZNI zona rural montañosa
Caudal máximo instantáneo del río	1.500 L/s (1,50 m³/s)
Caudal máximo de captación	50 L/s (0,05 m³/s)
Desnivel bruto disponible	30 m
Longitud de tubería a presión	500 m
Material de tubería	PEAD / HDPE PE100 PN6
Potencia hidráulica teórica	≈ 12,3 kW ($\eta=0,85 \rightarrow 10,4$ kW eléctricos)

TABLA 7: DATOS GENERALES DIMENSIONAMIENTO OBRA CIVIL

2. Obra de captación y aliviadero

Se adopta una captación lateral, adecuada para centrales de pasada con caudales moderados, que permite derivar únicamente el caudal de diseño y evacuar los excesos directamente al cauce natural. Este tipo de captación es el más utilizado en PCHs por su simplicidad constructiva y bajo costo de mantenimiento.

- Componentes principales
 - Reja de protección contra sólidos flotantes
 - Abertura de toma con compuerta/orificio regulado
 - Canal corto de aducción
 - Desarenador con válvula de purga
 - Aliviadero de excesos tipo vertedero rectangular

- Dimensionamiento del aliviadero

Parámetro	Valor
Caudal de diseño del aliviadero	1,45 m³/s
Tipo	Vertedero rectangular de cresta ancha
Longitud de cresta	3,5 m
Carga hidráulica de diseño	0,40 m

El aliviadero garantiza la evacuación segura de los caudales no captados, protegiendo la obra frente a crecientes súbitas.

7.4.4.1. Tubería a presión

- Selección hidráulica

La selección del diámetro se realizó considerando una pérdida por fricción menor al 10% del desnivel bruto, utilizando la ecuación de Hazen-Williams con $C=150$ para PEAD. Este criterio es estándar en el diseño de PCHs y garantiza un aprovechamiento eficiente del salto disponible.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño	0,05 m ³ /s (50 L/s)
Longitud total	500 m
Diámetro exterior	250 mm (10")
Diámetro interior	≈ 226 mm
Velocidad del flujo	≈ 1,3 m/s
Pérdida por fricción	≈ 2,1 m (7% del desnivel)
Altura neta disponible	≈ 27,9 m

TABLA 8: SELECCIÓN TURBINA

- Clase de presión y justificación

Presión estática por 30 m de carga: ≈ 2,94 bar (≈ 3 bar)

Clase seleccionada: PN 6 (6 bar) - Factor de seguridad 2,0

La selección PN6 es técnicamente viable bajo los siguientes supuestos:

- Operación controlada con arranque y parada gradual
- Válvulas de cierre lento (tiempo de cierre > 10 segundos)
- Instalación de ventosas en puntos altos del perfil
- Ausencia de golpe de ariete significativo

3. Anclajes de hormigón y caseta de máquinas

- Anclajes de hormigón

Para absorber los esfuerzos por empuje hidráulico en los cambios de dirección de la tubería, se proyectan dados de anclaje en concreto reforzado:

Parámetro	Valor
Número de anclajes	3 unidades
Dimensiones típicas por bloque	1,0 × 1,0 × 0,5 m
Volumen unitario	0,50 m ³
Volumen total de concreto	1,50 m ³

TABLA 9: ANCLAJE HORMIGÓN

- Caseta de máquinas

Se considera una caseta de apoyo para albergar la turbina, el generador, el sistema de control, válvulas e instrumentación básica. La caseta proporciona protección contra la intemperie y seguridad para los equipos electromecánicos.

Parámetro	Valor
Dimensiones en planta	3,0 × 3,0 m (9 m ²)
Altura libre interior	2,5 m
Sistema constructivo	Mampostería en bloque con cubierta metálica

TABLA 10: CASETA DE MAQUINAS

4. Presupuesto detallado y justificación de Costos

El presupuesto se ha elaborado con base en análisis de precios unitarios del mercado colombiano, considerando un escenario realista de PCH con instalación mayoritariamente superficial de la tubería.

Tipo de cambio de referencia: 1 USD = 3.700 COP (enero 2026)

- Obras de captación (captación, desarenador y aliviadero)

Descripción	Unid.	Cant.	P. Unit USD	Subtotal
Excavación manual en material común	m ³	16	USD 15	USD 240
Concreto f'c=21 MPa para estructuras	m ³	8,2	USD 280	USD 2.296
Acero de refuerzo fy=420 MPa	kg	240	USD 2,5	USD 600
Reja de protección acero galvanizado	und	1	USD 320	USD 320
Compuerta deslizante tipo canal 0,4×0,4 m	und	1	USD 350	USD 350
Válvula de purga 3"	und	1	USD 120	USD 120
Mampostería en piedra para muros	m ³	3,5	USD 75	USD 263
Encofrado (fabricación local en madera)	m ²	22	USD 12	USD 264
Material granular para filtros	m ³	2	USD 35	USD 70
Protección con piedra pegada	m ³	1,5	USD 65	USD 98
Mano de obra (maestro + cuadrilla)	gbl	1	USD 1.179	USD 1.179
SUBTOTAL OBRAS CAPTACIÓN				USD 5.800

TABLA 11: PRESUPUESTO OBRAS CAPTACIÓN

- Obras de conducción (tubería a presión, accesorios y anclajes)

Descripción	Unid.	Cant.	P. Unit USD	Subtotal
Tubería PEAD PE100 PN6 Ø250mm	m	500	USD 19	USD 9.500
Accesorios PEAD (codos, reducciones, uniones)	gbl	1	USD 720	USD 720
Válvula de mariposa Ø250mm	und	1	USD 620	USD 620
Ventosa doble efecto 2"	und	2	USD 130	USD 260
Junta Dresser / acople universal	und	3	USD 80	USD 240
Excavación en tramos críticos (20%)	m³	35	USD 15	USD 525
Relleno compactado	m³	25	USD 12	USD 300
Silletas de apoyo (fabricación local)	und	20	USD 14	USD 280
Concreto f'c=21 MPa para anclajes	m³	1,5	USD 280	USD 420
Acero de refuerzo para anclajes	kg	35	USD 2,5	USD 88
Pernos de anclaje y abrazaderas	jgo	3	USD 65	USD 195
Mano de obra (maestro + cuadrilla)	gbl	1	USD 3.052	USD 3.052
SUBTOTAL OBRAS CONDUCCIÓN				USD 16.200

TABLA 12: PRESUPUESTO OBRAS CONDUCCIÓN

- Caseta de máquinas

Descripción	Unid.	Cant.	P. Unit USD	Subtotal
Cimentación en concreto ciclópeo	m³	0,8	USD 150	USD 120
Mampostería en bloque + pañete	m²	20	USD 28	USD 560
Cubierta metálica con estructura	m²	9	USD 48	USD 432
Puerta metálica	und	1	USD 140	USD 140
Piso en concreto simple	m²	9	USD 25	USD 225
Instalaciones eléctricas básicas	gbl	1	USD 150	USD 150
Mano de obra (maestro + cuadrilla)	gbl	1	USD 653	USD 653
SUBTOTAL CASETA DE MAQUINAS				USD 2.280

TABLA 13: PRESUPUESTO OBRAS CASETA DE MAQUINAS

- Resumen general de Costos

Concepto	Valor USD	Valor COP
Obras de captación (C_captación)	USD 5.800	\$ 21.460.000
Obras de conducción (C_conducción)	USD 16.200	\$ 59.940.000
Caseta de máquinas (C_caseta)	USD 2.280	\$ 8.436.000
SUBTOTAL COSTOS DIRECTOS	USD 24.280	\$ 89.836.000
Contingencias (25%)	USD 6.070	\$ 22.459.000
TOTAL COSTO OBRA CIVIL	USD 30.350	\$ 112.295.000

TABLA 14: RESUMEN COSTOS OBRA CIVIL

$$\text{Coste obra civil} = (5.800 + 16.200 + 2.280) \times 1,25 = 24.280 \times 1,25 = \mathbf{30.350 USD} \quad (13)$$

5. Justificación de Costos y estrategia de optimización

- Premisas del escenario optimizado

El presupuesto ha sido elaborado bajo un escenario de optimización de Costos aplicable a proyectos de desarrollo rural, autogestión comunitaria o programas de electrificación de ZNI, donde se maximiza el uso de recursos locales. Las premisas fundamentales son:

1. Compra directa de materiales: Adquisición de tubería y accesorios directamente a fabricantes o distribuidores mayoristas, eliminando intermediarios. Esto permite ahorros del 15-20% respecto a precios de ferretería.
2. Mano de obra local: Contratación de personal de la zona, reduciendo Costos de transporte y alojamiento. Los jornales corresponden a tarifas rurales colombianas vigentes.
3. Instalación mayoritariamente superficial: La tubería PEAD permite instalación sobre terreno con silletas de apoyo, reduciendo excavaciones al 20% del trazado (solo tramos críticos como cruces de vías o zonas inestables).
4. Fabricación local de elementos: Encofrados en madera de la zona, silletas de apoyo fabricadas in situ, aprovechamiento de piedra local para mampostería y protecciones.
5. Diseño simplificado: Estructuras funcionales sin sobredimensionamiento, optimizando cantidades de concreto y acero al mínimo técnicamente aceptable según normas colombianas.
6. Modelo de autogestión: Factor de contingencias del 25% (vs 30-40% típico comercial) al tratarse de proyectos con supervisión propia y sin márgenes comerciales elevados.

- Análisis de precios unitarios principales

Concreto $f'c=21$ MPa (USD 280/m³):

Precio para concreto elaborado en obra con dosificación 1:2:3 (cemento:arena:grava). Incluye: cemento Portland (USD 12/bulto \times 7 bultos/m³ = USD 84), agregados pétreos locales (~USD 45/m³), agua, mezclado manual y vaciado. En zonas rurales con acceso a materiales de río, este precio es alcanzable. No incluye encofrado (presupuestado aparte). El rango de mercado colombiano para concreto elaborado en obra es de USD 250-400/m³.

Acero de refuerzo $f_y=420$ MPa (USD 2,5/kg):

Precio puesto en obra incluyendo corte, figurado y amarre. Corresponde al rango bajo del mercado colombiano (USD 2,40-3,20/kg) logrado mediante compra por volumen a distribuidores mayoristas como Ferrasa, Aceros Diaco o similares. Se considera 5% de desperdicio incluido en las cantidades.

Tubería PEAD PE100 PN6 Ø250mm (USD 19/m):

Este precio corresponde a compra directa a fabricante nacional (Pavco, Tigre, o equivalente) con descuento por volumen (≥ 500 m). El precio de lista es aproximadamente USD 22-25/m, pero la negociación directa y el volumen permiten obtener USD 19/m. Incluye certificación de calidad NTC y garantía del fabricante. La tubería PEAD se selecciona por su resistencia a la corrosión, flexibilidad, facilidad de instalación y vida útil superior a 50 años.

Excavación manual (USD 15/m³):

Corresponde a excavación en material común (tierra, arcilla) sin presencia de roca. Un ayudante puede excavar 2-3 m³/día, lo que a USD 12-14/día de jornal rural representa USD 4-6/m³ de mano de obra directa. El precio de USD 15/m³ incluye herramienta, rendimientos conservadores y acarreo interno del material dentro del sitio de obra.

Válvula de mariposa Ø250mm (USD 620/und):

Válvula de mariposa de hierro dúctil con disco de acero inoxidable, apta para servicio de agua. El precio corresponde al rango de mercado colombiano para válvulas de esta especificación (USD 550-750). Se selecciona válvula de mariposa por su menor peso y costo comparado con válvulas de compuerta del mismo diámetro.

- Justificación de la mano de obra

La mano de obra se ha distribuido proporcionalmente entre las tres partidas principales según el esfuerzo estimado para cada una. El total de mano de obra representa aproximadamente el 20% del Costo directo, lo cual está dentro del rango típico (18-25%) para este tipo de proyectos.

- o Estructura de cuadrilla tipo:

Categoría	Jornal/día (USD)	Días estimados	Total (USD)
Maestro de obra	USD 32	45	USD 1.440
Oficiales (2 personas)	USD 20	90	USD 1.800
Ayudantes (3 personas)	USD 14	120	USD 1.680
TOTAL MANO DE OBRA			USD 4.920

TABLA 15: CUADRILLA TIPO

Los jornales corresponden a tarifas rurales de Colombia (zona Andina/Pacífica). El jornal de ayudante (USD 14/día \approx \$52.000 COP) equivale aproximadamente a 1,3 SMLDV. El plazo estimado de 45 días es factible con la cuadrilla propuesta trabajando en paralelo en diferentes frentes.

- o Justificación del factor de contingencia (25%):

El factor de contingencias del 25% aplicado sobre los Costos directos cubre los siguientes conceptos, según práctica estándar del sector de la construcción en Colombia:

Concepto	%	Justificación
Administración	8%	Gastos de oficina, supervisión técnica, coordinación logística, seguros y garantías, papelería, comunicaciones, gestiones ante entidades.
Imprevistos	10%	Contingencias por variaciones de precios de materiales, condiciones climáticas adversas, dificultades de acceso no previstas, ajustes de cantidades de obra, retrasos en suministros.
Utilidad	7%	Margen de beneficio reducido para proyectos de cooperación, ONGs, programas gubernamentales o autogestión comunitaria. No aplica utilidad comercial convencional (10-15%).
TOTAL	25%	Factor aplicado sobre Costos directos

TABLA 16: CONTINGENCIAS 25%

Nota: El factor de contingencias del 25% es significativamente menor al rango comercial típico en Colombia (30-40%), lo cual es coherente con un modelo de ejecución comunitaria, programas de electrificación rural o proyectos con apoyo de cooperación internacional donde no se busca rentabilidad comercial.

- Comparativo con valores de referencia del sector

Concepto	%	Justificación
Costo obra civil por kW instalado	USD 1.800 - 4.000/kW	~USD 3.000/kW ✓
Costo tubería PEAD instalada	USD 22 - 40/m	~USD 32/m ✓
Costo captación + desarenador	USD 3.500 - 12.000	USD 5.800 ✓
Costo por m ³ concreto colocado	USD 250 - 400/m ³	USD 280/m ³ ✓
Mano de obra como % del Costo directo	18 - 25%	~20% ✓
Contingencias como % del Costo directo	20 - 40%	25% ✓

TABLA 17: COMPARATIVA VALORES REFERENCIA

Todos los indicadores se encuentran dentro de los rangos típicos para PCHs ejecutadas con criterios de optimización en zonas rurales de Colombia y países andinos.

6. Conclusión

El proyecto analizado demuestra que es técnicamente viable captar 50 L/s con un desnivel de 30 m, utilizando infraestructura sencilla y económicamente eficiente, para generar aproximadamente 10 kW de potencia eléctrica.

Con una inversión en obra civil de aproximadamente USD 30.350 (\$ 112.295.000 COP), el esquema propuesto constituye una referencia válida para la estimación de Costos de obra civil en proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas en las Zonas No Interconectadas de Colombia.

El Costo se obtiene aplicando la fórmula:

$$\text{Coste obra civil} = \text{Costes}_{\text{Captación+Conducción+Caseta}} \times 1,25 \quad (14)$$

Donde el factor de 1,25 (25% de contingencias) cubre administración (8%), imprevistos (10%) y utilidad (7%), según práctica estándar para proyectos de desarrollo rural y electrificación de ZNI.

7.4.5. Partida 5: Línea de conexión eléctrica

Para estimar el Costo de la línea eléctrica de conexión entre las pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en ZNI de Colombia, se ha realizado un dimensionamiento técnico a partir de los siguientes supuestos:

- Potencia por transportar: 10 kW
- Tensión nominal: 220 V (monofásico/bifásico)
- Longitud máxima de línea: 0,5 km (500 metros)

Se considera que todas las VSS se encuentran alineadas a una distancia máxima de 0,5 km desde el punto de generación, utilizándose una única línea de distribución que alimenta secuencialmente a todos los usuarios.

El dimensionamiento contempla la selección del conductor (ACSR 4/0 AWG), el número de postes de madera inmunizada requeridos, los sistemas de protección y puesta a tierra, así como los Costos de instalación y certificación según la normativa RETIE vigente en Colombia.

A continuación, se presenta el detalle del cálculo técnico y económico que justifica un Costo estimado de 10.124 USD para esta partida de línea eléctrica de conexión.

Parámetro	Valor
Potencia a transportar	10 kW
Tensión nominal	220 V (Monofásico/Bifásico)
Longitud de línea	0.5 km (500 metros)
Tipo de construcción	Aérea con postes de madera inmunizada
Ubicación	Colombia
Normativa aplicable	RETIE 2013 y NTC 2050

TABLA 18: PARÁMETROS DIMENSIONAMIENTO LÍNEA CONEXIÓN ELÉCTRICA

1. Cálculos técnicos

- o Corriente de diseño

$$I = P / (V \times fp) = 10,000 \text{ W} / (220 \text{ V} \times 0.9) = 50.51 \text{ A} \quad (15)$$

Se considera un factor de potencia (fp) de 0.9 y un factor de demanda de 1.0 para diseño.

- o Caída de tensión

Para redes de distribución en baja tensión, el RETIE permite una caída máxima del 5%.

$$\Delta V \text{ permitida} = 220 \text{ V} \times 5\% = 11.0 \text{ V} \quad (16)$$

- o Selección del conductor

IMPORTANTE: Una línea de 1 km a 220V con 10 kW presenta un desafío técnico significativo debido a la caída de tensión.

Análisis con diferentes calibres de conductor ACSR:

Conductor ACSR	Resistencia (Ω /km)	Caída Tensión	% Caída
2/0 AWG (Quail)	0.532	26.9 V	12.2%
4/0 AWG (Penguin)	0.335	16.9 V	7.7%
336.4 MCM (Linnet)	0.168	8.5 V	3.9%
477 MCM (Hawk)	0.119	6.0 V	2.7%

TABLA 19: CALIBRES CONDUCTOR ACSR

Conductor seleccionado: ACSR 4/0 AWG (Penguin)

Justificación: Se selecciona ACSR 4/0 considerando que:

- Se instalará un regulador de voltaje o se implementará compensación.
- El conductor cumple con la capacidad de corriente (319 A > 50.5 A).
- Se recomienda evaluar sistema en media tensión para proyectos definitivos.

- o Espaciamiento entre postes

Vano promedio: 60 metros (típico para redes rurales en baja tensión)

Número de postes: $500 \text{ m} / 60 \text{ m} + 1 = 9$ postes (incluye inicial y final)

2. Especificaciones técnicas

Componente	Especificación
Conductor	ACSR 4/0 AWG (Penguin) - Aluminio con alma de acero
Postes	Madera inmunizada clase B, 9 m altura, carga 510 kgf mín.
Aisladores	Tipo pin polimérico 15 kV, ANSI 55-4
Crucetas	Madera inmunizada 2.4 m × 4" × 5"
Puesta a tierra	Varilla Cu 5/8" × 2.4 m, cada poste (< 25 Ω)
Protecciones	Pararrayos 220V, cortacircuitos fusible

TABLA 20: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

3. Presupuesto detallado

Tasa de cambio utilizada: 1 USD = 3.700 COP (enero 2026)

- o Materiales

Descripción	Unid.	Cant.	P. Unit COP	Subtotal COP
Cable ACSR 4/0 AWG	m	1100	\$ 7.500	\$ 8.250.000
Poste madera inmunizada 9m	und	9	\$ 580.000	\$ 5.220.000
Aislador tipo pin 15kV	und	27	\$ 35.000	\$ 945.000
Cruceta de madera 2.4m	und	9	\$ 78.000	\$ 702.000
Herrajes de retención	jgo	18	\$ 82.000	\$ 1.476.000
Pararrayos 220V	und	4	\$ 105.000	\$ 420.000
Cortacircuitos fusible	und	3	\$ 155.000	\$ 465.000
Puesta a tierra (varilla Cu)	und	9	\$ 88.000	\$ 792.000
Cable Cu desnudo #4 AWG	m	45	\$ 11.500	\$ 517.500
Conectores y accesorios	gbl	1	\$ 450.000	\$ 450.000
Cimentación postes	und	9	\$ 210.000	\$ 1.890.000
SUBTOTAL MATERIALES:				\$ 21.127.500

TABLA 21: PRESUPUESTO MATERIALES

o Mano de obra e instalación

Descripción	Unid.	Cant.	P. Unit COP	Subtotal COP
Instalación de postes	und	9	\$ 285.000	\$ 2.565.000
Tendido de conductor	m	1100	\$ 2.350	\$ 2.585.000
Montaje herrajes y aisladores	und	9	\$ 130.000	\$ 1.170.000
Sistema puesta a tierra	und	9	\$ 105.000	\$ 945.000
Pruebas y certificación RETIE	gbl	1	\$ 2.100.000	\$ 2.100.000
SUBTOTAL MANO DE OBRA:				\$ 9.365.000

TABLA 22: PRESUPUESTO MANO DE OBRA

o Resumen de costos

Concepto	Valor COP	Valor USD
Materiales	\$ 21.127.500	USD 5,710.14
Mano de obra	\$ 9.365.000	USD 2,531.08
Subtotal costos directos	\$ 30.492.500	USD 8,241.22
Administración (10%)	\$ 3.049.250	USD 824.12
Imprevistos (5%)	\$ 1.524.625	USD 412.06
Utilidad (5%)	\$ 1.524.625	USD 412.06
IVA 19% (sobre AIU)	\$ 869.036,25	USD 234.87
TOTAL GENERAL	\$ 37.460.036,25	USD 10,124.33

TABLA 23: RESUMEN PRESUPUESTO

4. Justificación de costos

o Análisis de materiales principales

Cable conductor ACSR 4/0 AWG:

El cable ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) calibre 4/0 AWG se seleccionó por su relación óptima entre capacidad de corriente (319 A nominales), resistencia mecánica y costo. El precio unitario de \$7,500 COP/m corresponde al promedio del mercado colombiano para este tipo de conductor según cotizaciones de distribuidores como Centelsa/Nexans, InterEléctricas y proveedores regionales. Se requieren 1,100 metros considerando las tres fases más un 10% de reserva para empalmes y conexiones.

Postes de madera inmunizada:

Se optó por postes de madera inmunizada clase B de 9 metros en lugar de postes metálicos galvanizados, lo que representa un ahorro significativo (aproximadamente 75% menos por unidad). El precio de \$580,000 COP por poste incluye el tratamiento de inmunización con sales CCA (Cromo, Cobre, Arsénico) o similares que garantizan una vida útil mínima de 25 años. Este precio está dentro del rango de mercado de \$500,000 a \$700,000 COP para postes clase B con certificación RETIE.

Aisladores tipo pin 15kV:

Aunque la tensión de operación es 220V, se especifican aisladores para 15kV por razones de seguridad, disponibilidad en el mercado y cumplimiento normativo RETIE. El precio de \$35,000

COP corresponde a aisladores poliméricos ANSI 55-4, que ofrecen mejor desempeño en ambientes contaminados comparados con los de porcelana tradicional. Se requieren 3 aisladores por poste (27 unidades total).

5. Justificación de mano de obra

Instalación de postes (\$285,000/und):

Este valor incluye: transporte del poste al sitio de instalación, excavación manual o mecánica del hueco (profundidad mínima 1.5m), izaje con equipo o cuadrilla, plomado, compactación y resane. El rendimiento promedio es de 2 a 3 postes por día con una cuadrilla de 4 personas.

Tendido de conductor (\$2,350/m):

Comprende: desenrollado del conductor, tendido con tensión controlada, flechado según tablas de regulación, amarre en aisladores y empalmes. El precio por metro considera que se tienden múltiples conductores (fases y neutro) simultáneamente. Los valores de mercado oscilan entre \$2,000 y \$3,500 COP/m dependiendo de la accesibilidad del terreno.

Pruebas y certificación RETIE (\$2,100,000):

Este rubro es obligatorio según la normativa colombiana e incluye: inspección visual de la instalación, medición de resistencia de aislamiento, pruebas de continuidad, medición de resistencia de puesta a tierra ($<25\Omega$), verificación de distancias de seguridad, elaboración del dictamen de inspección y emisión del certificado RETIE por un organismo acreditado ante ONAC.

6. Análisis de costos indirectos (AIU)

Concepto	%	Justificación
Administración	10%	Gastos de oficina, supervisión técnica, coordinación logística, seguros y garantías, papelería y comunicaciones.
Imprevistos	5%	Contingencias por variaciones de precios, condiciones climáticas adversas, dificultades de acceso no previstas, retrasos en suministros.
Utilidad	5%	Margen de beneficio del contratista. Se aplica un porcentaje conservador considerando la competitividad del mercado.
IVA	19%	Impuesto sobre el valor agregado aplicado únicamente sobre Administración + Utilidad, según normativa tributaria colombiana para contratos de obra.

TABLA 24: COSTOS INDIRECTOS

7. Comparativo de costos por kilómetro

Para validar la razonabilidad del presupuesto, se presenta un comparativo con valores de referencia del sector eléctrico colombiano:

Tipo de línea	Costo/km (USD)	Fuente
Línea BT rural poste madera (referencia)	USD 15,000 - 25,000	CREG / OR's
Línea BT rural poste metálico	USD 25,000 - 40,000	CREG / OR's
Este proyecto (0.5 km extrapolado)	USD 20,249/km	Calculado

TABLA 25: COMPARATIVA COSTOS POR KM

El costo por kilómetro de este proyecto (USD 20,249/km) se encuentra dentro del rango típico para líneas de baja tensión rural con postes de madera, validando la coherencia del presupuesto con los estándares del mercado colombiano.

8. Factores que inciden en el costo

El costo total del proyecto está influenciado por los siguientes factores:

- Longitud de la línea (500 m): Determina directamente la cantidad de conductor y el número de estructuras requeridas.
- Tipo de poste seleccionado: La elección de madera inmunizada vs. metálico galvanizado representa la mayor diferencia de costo (ahorro ~75%).
- Calibre del conductor: El ACSR 4/0 es el mínimo recomendado para mantener la caída de tensión en niveles aceptables a esta distancia.
- Certificación RETIE: Requisito legal obligatorio que representa aproximadamente el 5.6% del costo total.
- Condiciones del terreno: Se asume terreno con accesibilidad normal. Terrenos difíciles pueden incrementar costos de mano de obra hasta en un 30%.

7.4.6. Partida 6: Costos ambientales

Para el cálculo de los Costos ambientales de las PCH en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, se ha adoptado un enfoque paramétrico basado en la experiencia acumulada y en el análisis de proyectos de referencia documentados en la Actividad 2 "Metodología de dimensionamiento y costos del sistema".

Tras revisar los Costos ambientales reportados en dichos proyectos que incluyen estudios de impacto ambiental, planes de manejo ambiental, licencias, compensaciones y medidas de mitigación, entre otros se observa que estos representan típicamente entre el 1,5% y el 3% del Costo total de inversión, dependiendo de la escala del proyecto y la sensibilidad ambiental de la zona de implantación. Por ello, para este tipo de proyectos, se adopta un factor del 2% como valor representativo para la estimación de los Costos ambientales. Este valor de 2%, podrá ser parametrizado en el modelo y podrá cambiarse.

$$\text{Coste ambiental} = \left(\begin{array}{l} \text{Coste turbina} + \text{Coste equipos} + \text{Coste transporte} \\ + \text{Coste línea} + \text{Coste obra civil} \end{array} \right) \times 2\% \quad (17)$$

7.4.7. Partida 7: Costo transporte

El transporte de equipos y materiales hacia las ZNI de Colombia representa uno de los componentes más significativos del CAPEX, alcanzando típicamente entre el 30% y el 40% del Costo total de inversión. Esta proporción, muy superior al 5-10% habitual en zonas interconectadas, se debe a la ausencia de infraestructura vial, la necesidad de transporte multimodal (terrestre-fluvial-manual) y las limitadas ventanas operativas por condiciones climáticas.

El análisis de proyectos ejecutados revela que existe un Costo fijo dominante en cualquier operación logística a ZNI, independientemente del tamaño del proyecto. Este "Costo de entrada" incluye coordinación logística, movilización mínima de embarcaciones, embalaje especializado, seguros y permisos. A continuación, se justifica la formulación y valores utilizados:

1. Problemática de transportar por ZNI
 - o Factores que incrementan los costos de transporte

El transporte de equipos y materiales a las ZNI enfrenta múltiples factores que incrementan significativamente los costos respecto a las zonas interconectadas:

- o Ausencia de infraestructura vial

La mayoría de las ZNI carecen de vías terrestres transitables durante todo el año. Según el Inventario Vial del INVÍAS (2023), menos del 15% de las vías terciarias en departamentos como Chocó, Vaupés y Amazonas se encuentran en condiciones aceptables de transitabilidad.

- o Transporte multimodal obligatorio

El acceso a las comunidades en ZNI típicamente requiere la combinación de múltiples modos de transporte:

Tramo	Modo típico	Características
Tramo 1	Terrestre (camión)	Desde origen hasta puerto fluvial o fin de vía
Tramo 2	Fluvial mayor (lancha, bongo)	Por ríos principales navegables
Tramo 3	Fluvial menor (canoas, potrillo)	Por ríos secundarios de bajo calado
Tramo 4	Terrestre final (mulas, manual)	Desde punto de desembarque hasta sitio del proyecto

TABLA 26: TRAMOS TRANSPORTE

- o Costos fijos elevados independientes del tamaño

Un hallazgo fundamental del análisis de proyectos ejecutados es que existe un costo fijo muy significativo asociado a cualquier operación de transporte a ZNI, independientemente del tamaño del proyecto. Este costo fijo incluye:

- Coordinación logística y negociación con operadores locales
- Movilización mínima de embarcaciones (costo fijo por viaje)
- Embalaje especializado para condiciones tropicales
- Seguros de transporte (prima mínima por operación)
- Acompañamiento técnico obligatorio
- Permisos y documentación

2. Metodología de cálculo propuesta

- Estructura de la fórmula

La metodología propuesta se basa en una fórmula paramétrica que reconoce la preponderancia del costo fijo en operaciones de transporte a ZNI. La estructura incluye:

- Un costo fijo dominante que representa los costos mínimos irreducibles de cualquier operación logística a ZNI
- Un componente variable por potencia que captura el costo adicional asociado al peso de los equipos
- Un componente variable por distancia que refleja el costo incremental del recorrido
- Multiplicadores de ajuste según región geográfica y tipo de equipamiento

$$\text{Coste transporte} = (C_{fijo} + \alpha \times P + \beta \times D_{real}) \times M_{Región} \times M_{Turb} \quad (18)$$

- Definición de variables

Tramo	Modo típico	Características
C_transporte	USD	Costo total de transporte a ZNI
C_fijo	USD	Costo fijo de movilización (componente dominante). Representa los costos mínimos irreducibles de coordinación, embalaje, seguros, permisos y movilización base.
α (alfa)	USD/kW	Coefficiente de costo marginal por potencia. Refleja el costo adicional por el peso y volumen de equipos asociado a cada kW adicional.
P	kW	Potencia instalada del proyecto de generación.
β (beta)	USD/km	Coefficiente de costo marginal por distancia. Representa el costo incremental por kilómetro de transporte multimodal.
D_real	km	Distancia real de transporte = Distancia en línea recta \times 1.45 (factor de sinuosidad).
M_región	Adimensional	Multiplicador regional que ajusta según la dificultad logística de la zona (1.0 - 1.8).
M_turb	Adimensional	Multiplicador por tipo de turbina según complejidad de transporte (2.0 - 5.0).

TABLA 27: VARIABLES COSTO TRANSPORTE

- o Valores de los coeficientes

Los coeficientes fueron calibrados mediante análisis de proyectos ejecutados en ZNI, buscando que el costo de transporte se mantenga en el rango típico observado de un 30-40% del CAPEX total para proyectos de PCHs. Dichos valores en el modelo podrán ser ajustados a criterio de la UPME.

Coeficiente	Valor adoptado	Justificación
C_fijo	USD 8,000	Costo mínimo irreducible de operación logística a ZNI.
α (alfa)	USD 60/kW	Costo marginal por kW. Valor bajo porque el costo fijo ya captura la mayor parte del transporte.
β (beta)	USD 6/km	Costo marginal por km. Valor moderado que refleja el promedio ponderado del transporte multimodal.

TABLA 28: VALORES COEFICIENTE

3. Justificación técnica de los coeficientes

- o Costo fijo C_fijo = USD 8,000

El costo fijo representa el mínimo requerido para ejecutar cualquier operación de transporte a ZNI, independientemente del tamaño del proyecto. Este valor elevado refleja la realidad operativa de las ZNI donde existe un "costo de entrada" significativo.

Componente del costo fijo	Valor (USD)	Justificación detallada
Coordinación logística y planificación	1,200	Identificación de operadores, negociación de fletes, programación, coordinación con comunidades. Honorarios ~60 horas a USD 20/hora.
Movilización mínima de embarcación	1,800	Costo fijo de flete fluvial independiente de la carga. Una embarcación tipo bongo cobra tarifa mínima por viaje. Datos: operadores río Atrato, San Juan.
Embalaje especializado (base)	1,000	Guacales de madera, plástico, espuma, silica gel, protección anticorrosión. Costo mínimo para proteger cualquier equipo contra humedad tropical.
Seguros de transporte (póliza mínima)	800	Prima mínima de póliza todo riesgo para transporte a ZNI. Cotizaciones de Sura, Allianz para rutas de alto riesgo.
Acompañamiento técnico (1 viaje)	1,100	Pasajes ida/vuelta Bogotá-ZNI (~USD 500) + viáticos 6 días (~USD 100/día). Necesario para supervisar manipulación de equipos.
Permisos y documentación	600	Permisos de carga, documentación fluvial (Capitanía), guías de movilización, certificados.
Bodegaje temporal en tránsito	500	Almacenamiento en puertos intermedios mientras se coordina siguiente tramo. Tarifa ~USD 80/día x 6 días promedio.
Contingencia operativa (10%)	1,000	Provisión para imprevistos: demoras climáticas, sobrecostos de última milla, trámites adicionales.
TOTAL COSTO FIJO (C_fijo)	8,000	Suma de componentes mínimos irreducibles

TABLA 29: COMPONENTES COSTO FIJO

- o Coeficiente α = USD 60/kW

El coeficiente alfa representa el costo marginal adicional por cada kW de potencia instalada. Su valor relativamente bajo (USD 60/kW) refleja que la mayor parte del costo de transporte es fijo y no depende significativamente del tamaño del proyecto.

- o Coeficiente β = USD 6/km

El coeficiente beta representa el costo marginal adicional por cada kilómetro de distancia. Su valor moderado refleja que gran parte del costo de transporte es independiente de la distancia (costos fijos de movilización).

- o Factor de sinuosidad = 1.45

La distancia real de transporte se calcula aplicando un factor de corrección de 1,45 a la distancia en línea recta. Dicho factor se obtuvo a partir del análisis de 43 puntos, para los cuales se tomaron sus coordenadas geográficas y se calculó, en primer lugar, la distancia en línea recta hasta la capital más cercana. Posteriormente, se determinó la distancia real de transporte entre esos mismos puntos utilizando Google Maps.

Al comparar ambas distancias, se calculó el valor medio, observándose que, de promedio, la distancia real de transporte es un 45 % superior a la distancia en línea recta. Por ello, se adopta el factor de corrección mencionado.

$$D_{real} = Dist_{capital_km} \times 1,45 \quad (19)$$

4. Tabla de Multiplicadores

Multiplicadores por tipo de turbina, estos valores son sacados del benchmark y poniendo un valor razonable de multiplicador por tipo de turbina:

Turbina	M_turbina	Dificultad
PAT, Pelton	2.0	Nivel 1 - Fácil
Cross Flow, Bulbo	2.5	Nivel 2 - Medio
Francis, Kaplan, otras	3.0	Nivel 3 - Difícil

TABLA 30: MULTIPLICADOR TURBINA

Multiplicadores por región de Colombia:

Región	M_región		Sobrecosto
Caribe, Llanos, Orinoquía baja	1.0	Base	Mejor infraestructura. Acceso terrestre posible. Ríos navegables de gran calado.
Centro Oriente	1.2	+20%	Topografía montañosa. Vías terciarias en regular estado.
Centro Sur	1.3	+30%	Piedemonte amazónico. Vías en mal estado. Transporte fluvial parcial.
Eje Cafetero - Antioquia	1.4	+40%	Topografía quebrada. Vías estrechas. Alta incidencia de derrumbes.
Región Pacífico	1.6	+60%	Ausencia de vías. Solo acceso fluvial/marítimo. Alta pluviosidad.

TABLA 31: MULTIPLICADOR REGIÓN

7.4.8. Partida 8: Otros Costos

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Suma parcial} \\
 & = (\textbf{coste turbina} + \textbf{coste equipos} + \textbf{coste obra civil} \\
 & + \textbf{coste instalacion} + \textbf{coste linea} + \textbf{coste ambiental} \\
 & + \textbf{coste transporte}) \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\textbf{Otros Costes} = \textbf{Suma parcial} \times 0,05 \quad (21)$$

Justificación: En base a nuestra experiencia del equipo y observando los Costos identificados en el informe de la actividad 2, el 5% adicional cubre contingencias, imprevistos, ingeniería de detalle, supervisión de obra y gastos administrativos del proyecto.

7.5. CAPEX Total

$$\textbf{CAPEX total} = \textbf{Suma parcial} + \textbf{Otros Costes} \quad (22)$$

7.6. OPEX Anual

$$\textbf{OPEX} = \textbf{CAPEX total} \times 3\% \quad (23)$$

Justificación: El 3% anual del CAPEX es un valor típico para operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidroeléctricas, cubriendo:

- Personal de operación
- Mantenimiento preventivo y correctivo
- Repuestos y consumibles
- Seguros anuales
- Tasas y permisos recurrentes

7.7. Indicador CAPEX/VSS

$$CAPEX_{VSS} = \frac{CAPEX \text{ total}}{VSS \text{ abastecidas}} \quad (22)$$

Este indicador representa el Costo de inversión por cada vivienda que sería abastecida por el proyecto. Es fundamental para la priorización, ya que permite comparar proyectos de diferentes tamaños en términos de su eficiencia social.

8. Sistema de priorización

8.1. Criterios de selección

La priorización aplica una lógica de filtrado y ordenamiento diseñada para identificar los proyectos con mejor relación Costo-beneficio social:

Criterio 1: Tipo de turbina

Solo se consideran para priorización los puntos donde son viables las turbinas PAT o Cross Flow. Esta decisión se fundamenta en los resultados del benchmark de la Actividad 1, donde estas tecnologías obtuvieron las mejores puntuaciones globales considerando:

- Menor Costo de inversión por kW
- Facilidad de instalación y mantenimiento
- Disponibilidad de repuestos
- Menor requerimiento de mano de obra especializada
- Adecuación a contextos rurales remotos

Criterio 2: Ordenamiento por CAPEX/VSS

Los puntos se ordenan de menor a mayor valor de CAPEX/VSS. Este criterio prioriza proyectos donde cada peso invertido beneficia a más viviendas.

Justificación: Un proyecto con menor CAPEX absoluto no necesariamente es mejor si solo abastece pocas viviendas. La ratio CAPEX/VSS normaliza la comparación y favorece proyectos con mayor impacto social por unidad de inversión.

Criterio 3: Selección de turbina para ranking

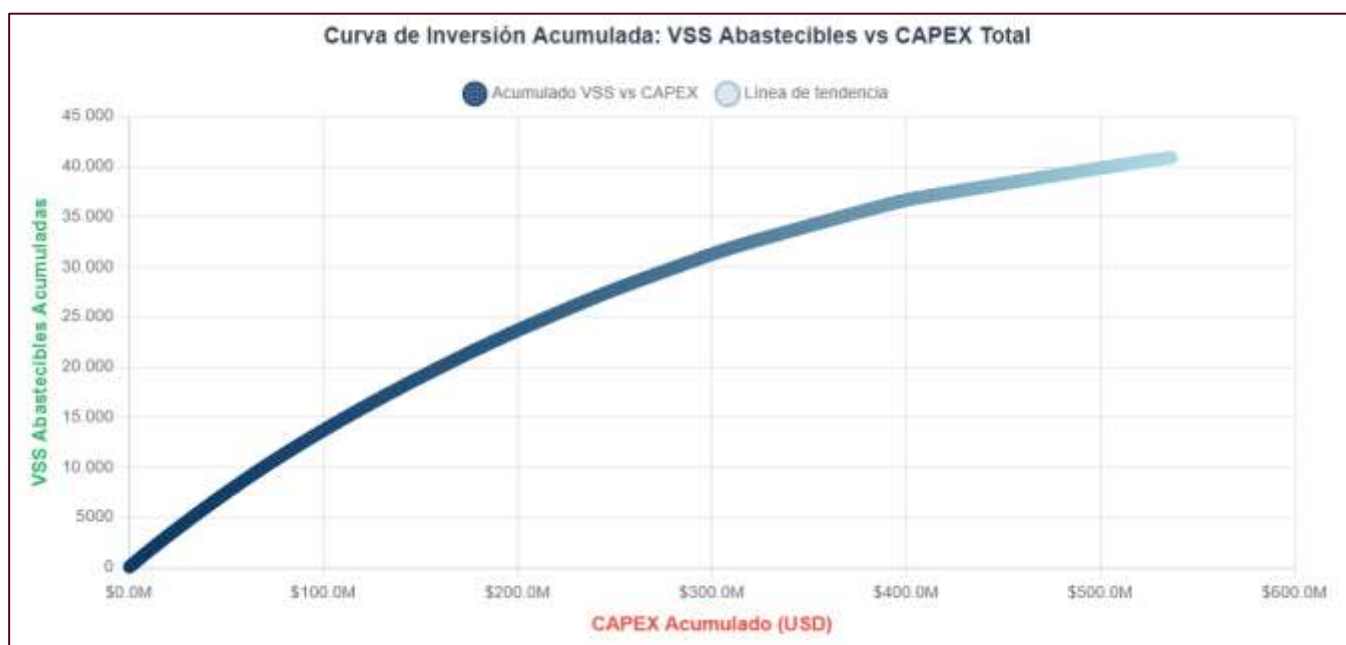
Cuando un punto tiene viabilidad para ambas turbinas (PAT y Cross Flow), el modelo selecciona para el ranking aquella con menor valor de CAPEX/VSS. Esto garantiza que cada punto esté representado por su mejor opción tecnológica.

8.2. Curva de eficiencia marginal

Al graficar los puntos priorizados (VSS acumuladas vs CAPEX acumulado), se observa típicamente una curva con forma de "S" acostada:

- Zona inicial: Con poca inversión se abastecen muchas viviendas (proyectos de alta eficiencia).
- Zona media: Relación proporcional entre inversión y cobertura.
- Zona final: Rendimientos decrecientes, mucha inversión para pocas viviendas adicionales.

Esta curva es una herramienta de decisión para la UPME, permitiendo identificar el "punto óptimo" de inversión según el presupuesto disponible.



8.3. Filtros adicionales

El sistema de priorización incluye filtros opcionales:

- Top N: Mostrar solo los N mejores proyectos del ranking.
- Budget máximo: Establecer un presupuesto límite y mostrar los proyectos que caben dentro de él, acumulando CAPEX desde el ranking 1.

9. Funcionalidades adicionales

9.1. Exportación de datos

El botón "Descargar datos visibles" genera un archivo CSV con toda la información de los puntos actualmente visibles en el mapa, incluyendo:

- Ranking de priorización
- Coordenadas geográficas
- Parámetros hidráulicos (caudal, pendiente, caída)
- Tipos de turbina viables
- Potencias calculadas
- Costos desglosados y totales
- VSS y ratio CAPEX/VSS

9.2. Parametrización

El modelo permite ajustar diversos parámetros sin modificar el código:

Tasa de cambio (COP)

Permite actualizar la conversión de dólares a pesos colombianos. Al modificar este valor y aplicar los cambios, todos los Costos se recalculan automáticamente.

Parámetros de Costos

Los coeficientes de las fórmulas de Costos pueden modificarse desde el panel de parametrización, incluyendo:

- Eficiencias de cada tipo de turbina
- Costos unitarios por kW
- Coeficientes de las fórmulas de cada partida
- Multiplicadores regionales y por tipo de turbina

9.3. Análisis multiescenario

El botón de análisis multiescenario genera una gráfica interactiva de VSS acumuladas vs CAPEX acumulado, permitiendo visualizar la curva de eficiencia marginal y tomar decisiones informadas sobre niveles de inversión.

10. Conclusiones y escalabilidad

10.1. Utilidad para la UPME

Este modelo constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la identificación y priorización de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala en zonas no interconectadas de Colombia. Sus principales aportes son:

- Sistematización de criterios técnicos, ambientales y económicos
- Visualización geográfica de oportunidades
- Priorización basada en impacto social por unidad de inversión
- Flexibilidad para ajustar parámetros según nuevas condiciones

10.2. Escalabilidad futura

El modelo ha sido diseñado con una arquitectura que permite futuras ampliaciones:

Nuevas fuentes de generación

La estructura modular permite incorporar otras tecnologías de generación (solar, eólica, biomasa) añadiendo sus respectivos criterios de viabilidad y fórmulas de Costos.

Criterios de priorización adicionales

Se pueden añadir nuevos criterios como:

- Priorización por regiones vulnerables o con mayor índice de pobreza
- Consideración de población indígena o afrodescendiente
- Integración con planes de desarrollo territorial
- Criterios de sostenibilidad ambiental

Capas de información

Es posible incorporar nuevas capas geográficas como:

- Proyecciones de crecimiento poblacional
- Mapas de riesgo (inundación, deslizamiento)
- Infraestructura eléctrica existente
- Zonas de conflicto o posconflicto

En conclusión, este modelo representa una base sólida para la planificación energética rural en Colombia, con capacidad de evolucionar según las necesidades institucionales de la UPME y los avances en la política de electrificación rural del país.

Tech for impact