

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 1 de 59



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA**

**REVISIÓN DE PEQUEÑAS CENTRALES
HIDROELÉCTRICAS PARA ELECTRIFICAR ZONAS NO
INTERCONECTADAS DE COLOMBIA**

JULIAN ANDRÉS JIMÉNEZ TORO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA - SISTEMAS ENERGÉTICOS

DIRECTORA:

PH.D. YRIS OLAYA

DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y LA DECISIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE MEDELLÍN

2022



Agradecimientos

A mi tutora, Ph.D. Yris Olaya. Por su paciencia y apoyo. Formó parte esencial en mi proceso de formación y en todo el tiempo que estuve en la UNAL. Muchas gracias por las palabras de aliento, por su paciencia y por ser mi tutora.

A mi familia, quienes siempre me apoyaron en esta decisión de vida.

A mis compañeros de carrera, con los cuales compartí muchísimas noches de trabajo juntos. Cerramos estos dos años y no puedo dejar de agradecerles su apoyo. Gracias por estar siempre allí.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 3 de 59

Resumen

La energía eléctrica es el motor del crecimiento económico y social en un país. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados, existen aún zonas en el territorio colombiano que no cuentan con un suministro de electricidad económico, constante y no contaminante. Estas zonas son las llamadas Zonas No Interconectadas, y tienen la característica de estar aisladas, de tener baja continuidad en su servicio eléctrico y poseer tarifas eléctricas elevadas. Este trabajo busca recopilar la información actualizada del año 2022 sobre estas zonas y plantear la implementación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas como mecanismo para suministrar electricidad en estos poblados. Para ello, se revisaron los proyectos que actualmente están en funcionamiento en el territorio colombiano (tanto en el Sistema Interconectado Nacional como en las Zonas No Interconectadas) para orientar futuros proyectos de electrificación nacional.

Palabras clave: Energía, Zonas No Interconectadas, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Sistema Interconectado Nacional, Electrificación nacional.



Abstract

TITLE: REVIEW OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS TO ELECTRIFY NON-INTERCONNECTED AREAS OF COLOMBIA

Electric power is the engine of economic and social growth in a country. However, despite the efforts made, there are still areas in the Colombian territory that do not have an economical, constant and non-polluting energy supply. These zones are called Non-Interconnected Zones, and they have the characteristic of being isolated, of having low continuity in their electrical service and having high electricity rates. This work seeks to collect current information for the year 2022 on these areas and propose the implementation of Small Hydroelectric Power Plants as a mechanism to supply electricity in these towns. For this, the projects that are currently in operation in the Colombian territory (both in the National Interconnected System and in the Non-Interconnected Zones) were reviewed to guide future national electrification projects.

Keywords: Energy, Non-Interconnected Zones, Small Hydroelectric Power Plants, National Interconnected System, National Electrification.



MAPA DE CONTENIDO

1	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	10
2	INTRODUCCIÓN	10
3	MARCO TEÓRICO	11
3.1	Revisión bibliográfica	12
4	OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO	15
4.1	Objetivo general.....	15
4.2	Objetivos específicos	16
5	PANORAMA ENERGÉTICO COLOMBIANO.....	16
5.1	Matriz energética colombiana.....	16
5.2	Panorama del Sistema Interconectado Nacional (SIN)	16
5.2.1	Líneas de transmisión de energía eléctrica	16
5.2.2	Plantas de generación eléctrica integradas al SIN	17
5.2.3	Cobertura geográfica del sistema eléctrico SIN.	17
5.3	Demanda de energía eléctrica colombiana.....	18
5.3.1	Peores coberturas eléctricas por departamento.....	18
5.3.2	Peores coberturas energéticas por municipio.	19
5.4	Potencial hidro energético de los departamentos con peor cobertura eléctrica.	19
5.4.1	Principales ríos en los departamentos con peor cobertura eléctrica:	20
5.4.2	Cálculo de potencial hidro energético	20
5.4.3	Topografía de los departamentos con peor cobertura eléctrica en Colombia.	21
6	PANORAMA DE LAS ZNI	21
6.1	Panorama actual de las ZNI en Colombia.....	21
6.1.1	Nivel de ingresos y densidad poblacional en las ZNI	22
6.2	Sustitutos energéticos en las ZNI de Colombia	23
6.3	Marco normativo aplicable a las ZNI colombianas.....	24
6.3.1	Legislación aplicable a las ZNI.....	26
6.3.2	Beneficios e impactos de las FNCER en las ZNI.....	28
6.3.3	Fondos de financiación para proyectos de energización	29
7	PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (PCH)	30
7.1	Tamaño de las Centrales Hidroeléctricas en Colombia.....	30
7.2	Obras civiles requeridas en una PCH.....	31
7.3	Ventajas y desventajas de las PCH	31
7.3.1	Ventajas y desventajas económicas de una PCH.....	32
7.3.2	Ventajas y desventajas sociales de una PCH.....	32



7.3.3	Ventajas y desventajas ambientales de una PCH	32
7.4	Tecnologías para la construcción de una PCH.....	32
7.4.1	Nuevas Tecnologías para construcción de PCH.....	35
8	PANORAMA ACTUAL DE LAS PCH EN COLOMBIA	37
8.1	Total, de PCH en Colombia (capacidad instalada en MW)	37
8.2	Proceso de entrada en operación PCH en Colombia.....	39
8.3	COSTO DE UNA PCH.....	39
8.3.1	Costos de inversión	39
8.3.2	Costos indirectos	41
8.3.3	Costos periódicos	41
8.4	Costos promedios de una central hidroeléctrica menor a 20MW.....	41
8.5	Costos de las PCH en las ZNI.....	42
8.6	Costo de una PCH conectada y no conectada al SIN	42
8.6.1	Economía de escala en la inversión de una PCH.....	43
8.7	Costos de la PCH en el Parque Juan Curí. (Estudio de caso).....	44
8.7.1	LCOE (Parque Juan Curí)	44
8.8	Tecnologías alternas de generación eléctrica.....	45
8.8.1	Sistema híbrido vs PCH (Juan Curí)	46
9	BARRERAS Y OPORTUNIDADES DE LAS PCH EN COLOMBIA	46
10	ANÁLISIS DE RIESGOS	47
11	CONCLUSIONES	49
12	BIBLIOGRAFÍA.....	50
13	ANEXO 1.....	56
14	ANEXO 2.....	59



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Distribución porcentual de la matriz energética colombiana. (ACOLGEN, 2022.).....	16
Figura 2. Total, de tipo de plantas de generación eléctrica integrada al SIN 2021. (XM. 2021a)	17
Figura 3. Distribución territorial del Sistema Interconectado Nacional. (UPME. 2019a)	18
Figura 4. Cambios porcentuales en la demanda de energía en colombiana. (XM. 2021b.).....	18
Figura 5. Ríos y afluentes hídricos en los departamentos con la peor cobertura eléctrica en Colombia. (UPME. 2019a.).....	20
Figura 6. Total, porcentual de sustitutos energéticos para la cocción de alimentos en las ZNI. (IPSE. 2021.)	23
Figura 7.. Total, porcentual de sustitutos energéticos para la iluminación del hogar en las ZNI. (IPSE. 2021.)	23
Figura 8. Entidades vinculadas en el sistema energético colombiano. (SIMEC. 2021)	24
Figura 9. Legislación colombiana aplicada a las ZNI. (SGS, 2022).....	26
Figura 10. PCH de desvió al filo del agua. (CASTRO. 2006).....	30
Figura 11. Turbina tipo Paltón.(LÓPEZ, 2011).....	33
Figura 12. Turbina tipo Banki (FREEPNG. 2015.)	33
Figura 13. Turbina tipo Turgo. (MOHADED, 2018)	33
Figura 14. Turbina de hélice. (GTRONIC, 2017.).....	34
Figura 15. Turbina tipo Francis. (DE LA TORRE MORENO, 2016).....	34
Figura 16. Turbina de reacción cinética. (LANIYI. 2018)	34
Figura 17. Tornillo de Arquímedes. (GEXIQ. 2016)	35
Figura 18. Diagrama de selección ideal de turbina. (OKOT, 2013)	35
Figura 19. Diagrama de diseño, turbina vórtice. (LIU. 2019)	36
Figura 20. Diagrama de turbina de vórtice. (VERREYDT ET AL. 2020)	36
Figura 21. Total, de potencia generada por las PCH interconectadas en el SIN. (Construcción propia).....	37
Figura 22. Aporte energético de las PCH por departamento (Construcción propia).	38
Figura 23. Paso a paso para la implementación de una PCH (aplica para el SIN & ZNI). (ESCOBAR DÍAZ ET AL., 2018)	39
Figura 24. Principales rubros en los costos de inversión. (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017)	40
Figura 25. Distribución porcentual en la inversión de una PCH. (OGAYAR Y VIDAL, 2009).....	40
Figura 26. Costos de inversión en PCH, discriminados en áreas que pertenecen al SIN y áreas no interconectadas. (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017)	43
Figura 27. Costo de inversión en PCH, mediante economías de escala (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017)...	43

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 8 de 59

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Revisión bibliográfica de artículos aplicados al territorio colombiano (Construcción propia).	13
Tabla 2. Revisión bibliográfica de artículos aplicados fuera del territorio colombiano (Construcción propia)	14
Tabla 3. Los 5 departamentos con peor cobertura de energía eléctrica en Colombia. (DANE, 2018).	19
Tabla 4. Los 5 municipios con peor cobertura de energía eléctrica. (DANE, 2018).	19
Tabla 5. Potencial hidroenergético total por departamento. (UPME. 2015).....	21
Tabla 6. Ventajas y desventajas económicas de las PCH. (OKOT, 2013)	32
Tabla 7. Ventajas y desventajas sociales de las PCH. (OKOT, 2013).....	32
Tabla 8. Ventajas y desventajas medioambientales de las PCH. (OKOT, 2013)	32
Tabla 9. Parámetros de diseño turbina de vórtice. (VERREYDT ET AL. 2020)	36
Tabla 10. Parámetros técnicos PCH en las ZNI. (GENSA. 2019).....	37
Tabla 12. Inversiones totales de las PCH colombianas (Construcción propia)	41



LISTA DE ABREVIATURAS.

Abreviatura	Significado
• COP	Colombia Pesos
• CREG	Comisión de regulación de energía y gas
• FAER	Fondo para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas
• FAZNI	Fondo para la Energización de las Zonas No Interconectadas
• FENOGÉ	Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía
• FNCER	Fuentes no convencionales de energía renovable
• GEI	Gases de efecto invernadero
• IPSE	Instituto para la planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas
• KW	Kilovatio
• MCH	Micro central hidroeléctrica
• mCH	minicentral hidroeléctrica
• MME	Ministerio de minas y energía
• MW	Megavatio
• ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
• PCH	Pequeña central hidroeléctrica
• PRONE	Programa de normalización de redes eléctricas
• ρCH	Pico centrales hidroeléctricas
• RSU	Residuos sólidos urbanos
• SIN	Sistema interconectado nacional
• SISFV	Sistemas Solares Fotovoltaicos Individuales
• UN	Naciones unidas (<i>UNITED NATIONS</i>)
• UPME	Unidad de planeación minero-energética
• XM	Expertos en mercado
• ZNI	Zonas no interconectadas

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 10 de 59

1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

El presente trabajo de grado se desarrolla con la finalidad de realizar una revisión de temática y consolidar la literatura actualizada en el año 2022. Esta revisión abarca las principales tecnologías para el montaje y funcionamiento de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), así como el contexto y panorama actual de estas PCH en Colombia. Además, se revisa el contexto actual de las Zonas No Interconectadas (ZNI) y la legislación colombiana referente a la electrificación de estas zonas. Finalmente se obtiene es un documento consolidado que sirve de orientación a futuras implementaciones de tecnologías PCH en las ZNI colombianas.

2 INTRODUCCIÓN

En Colombia, debido al limitado alcance geográfico que tiene el Sistema interconectado Nacional (SIN), existen zonas que están fuera del SIN, llamadas Zonas No Interconectadas (ZNI) y cuyo suministro de electricidad proviene principalmente de soluciones aisladas y que funcionan generalmente con Diésel. Esta tecnología Diésel, se caracteriza por ser una fuente confiable; sin embargo, los costos por transporte de combustible y el mantenimiento de las plantas utilizadas en las ZNI, hacen que esta fuente energética sea una opción costosa y contaminante que genera Gases de Efecto Invernadero (GEI). Estos factores se reflejan en un elevado el precio del servicio energético. Adicionalmente, en Colombia las plantas diésel cuentan con un promedio de 8 horas de servicio al día y una eficiencia de la generación del 26%. (GONZÁLEZ ET AL, 2018)

Para potenciar la industria, la economía y el agro del país, se debe contar con un suministro energético confiable, disponible las 24 horas, económico y de poco impacto ambiental. (GARZÓN Y SAAVEDRA, 2017). Es por lo anterior que se han evaluado diversas soluciones para electrificar las ZNI, como la instalación de microturbinas de gas en el Casanare y el Meta, en donde se busca potenciar el uso de tecnologías de amplio uso comercial y fácil de usar basadas en el consumo de Gas Licuado de Petróleo, Gas Natural y el Diésel. Esta solución, viable financieramente, se encuentra con la generación de GEI por el consumo del combustible (ROMERO SÁNCHEZ, 2020). También se ha evaluado el aprovechamiento de la biomasa forestal en las ZNI del departamento de Nariño, en donde se pretende aprovechar la amplia disponibilidad de biomasa forestal en estas zonas, como fuente de producción energética a través de quema directa o de generación de gas de síntesis. Esta solución viable técnicamente, se basa en la quema y generación de GEI (CASTILLO MUÑOZ, 2019) y se han evaluado implementaciones de sistemas híbridos de paneles solares con gasificación de biomasa en el Choco (ASPRILLA MOSQUERA, 2016). En comparación, esta propuesta estudia las posibilidades en la implementación de PCH, debido a que esta tecnología es ampliamente conocida y baja en emisiones.



3 MARCO TEÓRICO

El 25 de septiembre de 2015, se plantearon los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Del total de los 17 ODS presentados por las Naciones Unidas, se encuentra el 7° ODS llamado “Energía asequible y no contaminante”. En este ODS se busca brindar un acceso a *energía eléctrica estable, confiable, económicamente viable y que no generen gases de efecto invernadero*. Se estima que aproximadamente el 13% de la población mundial al año 2022 aún no cuentan con acceso a energía eléctrica (aproximadamente 3000 millones de personas o una de cada 5 personas), este grupo poblacional aún depende de fuentes tradicionales como la madera o el carbón vegetal para cocinar e iluminar su hogar (U.N, 2017).

En el contexto energético colombiano, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) está conformado por todas las líneas de transmisión de energía y subestaciones del país y que van desde las centrales de generación hasta los pueblos y ciudades en donde es consumida. El SIN se encuentra regulado por la CREG y en el 2021 transportó aproximadamente 74,116.91 GWh/año al 95% de los colombianos. Esta distribución de energía se da en un estimado del 35% del territorio. El otro 65% del territorio del país se encuentran las llamadas Zonas No Interconectadas (ZNI). Estas zonas se caracterizan por tener una baja densidad poblacional y encontrarse lejos de los centros poblados y ciudades capitales (IPSE, 2021).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas aprovechan el caudal y la cabeza hidrostática de los afluentes hídricos para producir energía eléctrica, este tipo de plantas generalmente se encuentran cerca al lugar del consumo y son sistemas con capacidades de potencia que van de los rangos de unos cuantos KW hasta un máximo de 20 MW (GONZÁLEZ ET AL, 2011).

El flujo o caudal es la cantidad de agua que pasa por un punto determinado durante un período de tiempo determinado, esta cantidad se expresa en dimensiones de volumen por unidad de tiempo como metros cúbicos por segundo (m^3/s). El caudal se calcula principalmente con los métodos del balde y el método del área del río. La cabeza hidrostática es otro parámetro fundamental para el cálculo de diseño de una PCH, esta es la distancia vertical que desciende el agua y representa toda la energía mecánica por unidad de peso del fluido en el sistema y esta dimensionada con unidades de longitud como en metros (m), para calcular la cabeza solo se requiere medir el punto más alto del afluente en comparación con la posición de la turbina. La potencia hidrostática teórica producida por una PCH depende totalmente del caudal del agua, la cabeza hidrostática a la que cae el agua, la densidad del agua y la aceleración de la gravedad. (PASALLI Y REHIARA, 2014).

En caso de que se tenga la densidad del agua en unidades de kilogramo por metro cubico (Kg/m^3), el caudal del agua en metros cúbicos por segundo (m^3/s), la cabeza hidrostática en metros (m) y la aceleración de la gravedad en metros por segundo al cuadrado (m/s^2), tendremos la potencia en watts (W) o en kilogramo por metro cuadrado sobre segundos al cubo ($Kg*m^2/s^3$) (PASALLI Y REHIARA, 2014).

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 12 de 59

Las reformas al sector eléctrico han tenido un efecto positivo en el despliegue de pequeñas centrales hidroeléctricas; esto se puede inferir no solo de la nueva capacidad que se está instalando, sino también de la rehabilitación de más de 20 MW de pequeñas centrales hidroeléctricas instaladas antes de 1960. Dado que las pequeñas centrales hidroeléctricas tienen costos operativos bajos y sus costos de capital son más bajos que los de la energía solar y eólica, son rentables al precio del mercado spot colombiano, mientras que las plantas solares y eólicas no lo son. (OLAYA ET AL, 2015).

3.1 Revisión bibliográfica

Para el desarrollo del actual trabajo, se consultaron diversas fuentes para obtener información acerca de los siguientes temas:

- **Panorama energético colombiano:** distribución de la matriz energética colombiana, infraestructura energética vigente en el país, plantas de generación energética, histórico de la demanda de energía colombiana, potencial hidro energético en las zonas con cobertura energética más baja, entre otras consultas adicionales.
- **Zonas no interconectadas:** Panorama actual en el territorio colombiano, cobertura territorial en Colombia, los municipios y departamentos con cobertura energética más baja, caracterizaciones demográficas, económicas de los pobladores de dichas zonas, marco normativo que impulsa el desarrollo de estas zonas, entre otras consultas adicionales
- **Pequeñas centrales hidroeléctricas:** descripción de las tecnologías existentes y su implementación en el territorio colombiano (En especial en las ZNI), parámetros de funcionamiento, costo para la inversión en Colombia, potencia total generada y otras consultas adicionales.

Se revisaron artículos académicos de revistas indexadas, artículos de divulgación, artículos de prensa, informes empresariales, tesis y trabajos de grado. Todos los documentos revisados se encuentran en el rango temporal de 2004 hasta el año 2022.

Todos los documentos fueron buscados utilizando las palabras clave “Pequeña Central Hidroeléctrica”, “Zonas no interconectadas”, “Matriz energética colombiana”, “Condiciones socio demográficas en Colombia”, “Fondos de apoyo a la energización colombiana”, entre otras consultas y finalmente se seleccionaron los documentos más actuales, de fuentes reconocidas y con datos aplicables al presente documento

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 13 de 59

En la Tabla 1 se presenta el resumen de las fuentes consultadas para el contexto colombiano.

Tabla 1. Revisión bibliográfica de artículos aplicados al territorio colombiano (Construcción propia).

Ref.	Título	Resumen	Uso	Ubicación
DÁVILA RUEDA, E. 2022	<u>Factores que afectan la supervivencia de los proyectos de energía eléctrica en las zonas no interconectadas.</u> <i>Universidad nacional de Colombia.</i>	Identificación de los factores que afectan la supervivencia de los proyectos de energía eléctrica en las zonas no interconectadas.	Características de las ZNI, beneficios de los proyectos en ZNI, supervivencia de los proyectos.	ZNI de Colombia
ESPINEL, ET AL. 2021	<u>Distributed electrical resources with micro hydroelectric power plants:</u> <i>Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas</i>	Diseño y construcción, PCH en Cundinamarca, evaluando aspectos técnicos y análisis económico.	Partes de una PH, Costo por kW de fórmula de la CREC,	Cachipay — Departamento de Cundinamarca - Colombia
PACHECO , TORRES. 2021	<u>Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sigsa.</u> <i>Cundinamarca, Colombia; Universidad Libre</i>	Viabilidad de instalación de una PCH en el Embalse del Sigsa.	Datos específicos de diseño de una PCH y ventajas de las PCH	municipio de Chocontá - Cundinamarca - Colombia
VERGAR A. 2020	<u>Actualización del inventario de PCH en Colombia, una herramienta computacional para visualización web.</u> <i>Universidad de la Salle</i>	Se establece el inventario actual de PCH en Colombia, mostrando su ubicación geográfica mediante el uso de un mapa georreferenciado	Listado de PCH y tecnología usada.	Territorio colombiano integrado en el SIN
ARDILA, GARAVITO. 2020	<u>Impactos acumulativos por la implementación de PCH's sobre la cuenca del río San Andrés en el municipio de San Andrés de Cuerquía.</u> <i>Universidad de Antioquia.</i>	Evaluación de los impactos medioambientales de la PCH ubicada en San Andrés de Cuerquía.	Definiciones pluviométricas	Municipio de San Andrés de Cuerquía - Antioquia - Colombia
(GONZÁLEZ ET AL. 2018)	<u>Análisis de factibilidad técnico-económico de micro redes que integran celdas de combustible en zonas no interconectadas de Colombia.</u> <i>Instituto Tecnológico Metropolitano</i>	Analizar el impacto técnico-económico de introducir celdas de combustible en la reducción de costos a lo largo del tiempo de vida de una micro red para zonas no interconectadas	Estimación de costos de una micro red	Municipio de Puerto Bolívar - La Guajira - Colombia
ZAPATA ET AL. 2018	<u>Assessing security of supply in a hydroelectricity-based system: The Colombian case.</u> <i>Universidad Nacional de Colombia.</i>	Comprensión del mecanismo de capacidad en los mercados de electricidad con participación de energía hidroeléctrica.	Mercado energético en Colombia	Territorio colombiano integrado en el SIN
ESCOBAR ET AL. 2018	<u>Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): una revisión;</u> <i>Universidad distrital de caldas;</i>	Aspectos básicos de un proyecto de PCH, con énfasis en las metodologías de formulación y un acercamiento a los equipos electromecánicos vinculados al proceso.	Partes de una PCH, etapas del diseño, descripción de turbinas y caudales.	San Carlos - Antioquia - Colombia
GARZÓN, SAAVEDRA. 2017	<u>Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas.</u> <i>Universidad Nacional de Colombia.</i>	Diseño de micro redes en zonas no interconectadas de Colombia. El diseño de la micro red se realiza siguiendo la normativa eléctrica colombiana.	Condiciones de las ZNI.	Tarao - la Guajira - Colombia
MORALES ET AL. 2015	<u>An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives.</u> <i>Universidad Autónoma de Bucaramanga.</i>	Analiza la situación actual de las PCH en Colombia, incluyendo la capacidad instalada actual y el potencial existente de los recursos hidro energéticos.	Contexto de PCH. Barreras, costos, perspectivas	Territorio colombiano integrado en el SIN
NÚÑEZ ET AL. 2015	<u>Estudio de factibilidad para la construcción de una PCH para el parque ecológico Juan Curí.</u> <i>Universidad autónoma de Bucaramanga.</i>	Viabilidad financiera para el diseño de una pequeña central hidroeléctrica.	Detalles de diseño, inversiones en las PCH	Juan Curí - Santander - Colombia
OLAYA ET AL. 2015	<u>How capacity mechanisms drive technology choice in power generation: The case of Colombia;</u> <i>Universidad nacional de Colombia;</i>	Evaluar la cuál ha sido el impacto de los mecanismos de capacidad en las elecciones tecnológicas para la generación de energía en Colombia. El enfoque es analizar la evolución de la estructura y regulación del mercado.	Historia del mercado energético colombiano y los beneficios de las PCH.	Territorio colombiano integrado en el SIN
GALLEGO . 2015	<u>Políticas para el Aprovechamiento del Potencial Hidro energético en Colombia Mediante Pequeñas Centrales.</u> <i>Universidad Nacional de Colombia.</i>	Política de tarifas para las PCH conectadas al SIN. Revisión del actual marco regulatorio colombiano.	Revisión de PCH, barreras, conclusiones.	Territorio colombiano integrado en el SIN



RESTREP O. 2011	<u>Diseño en prefactibilidad de PCH caso de estudio: cuenca del río amaga; Universidad nacional de Colombia;</u>	Diseño de una PCH en Amaga	Definiciones, Componentes de una PCH, legislación ambiental	Amaga - Antioquia - Colombia
GONZÁLEZ ET AL. 2011	<u>Pico Centrales Hidroeléctricas (pCH): una alternativa energética en zonas no interconectadas de Colombia. Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central</u>	investigación del desarrollo tecnológico en la generación de energía limpia, en las ZNI como alternativa técnica y económica para la solución del problema	Entrevistas a las comunidades de las ZNI	Orinoquia - Colombia
GÓMEZ ET AL. 2005	<u>Sustitución de fuente de energía con micro central hidroeléctrica. Caso micro central – pipintá. Universidad nacional de Colombia.</u>	Descripción de la Micro Central Hidroeléctrica – Pipintá, con las características de sus componentes.	Costos de repotenciación de una PCH	Pitinta - Antioquia - Colombia

De la revisión bibliográfica de artículos colombianos, se encuentra que varios de los documentos tratan sobre los parámetros de diseño de una PCH (Como: ESPINEL, 2021. PACHECO, 2021. ESCOBAR, 2018. NÚÑEZ, 2015. Entre otros). Panorama colombiano de las ZNI (Como: DÁVILA, 2022. GARZÓN, 2017. OLAYA, 2015. GONZÁLEZ, 2011. Entre otros). Y las barreras, legislación colombiana y beneficios jurídicos para aplicar proyectos de energías renovables en las zonas no interconectadas (Como: MORALES, 2015. RESTREPO, 2011. Entre otros).

Luego de hacer la revisión bibliográfica, se encontró que las tecnologías de las PCH son ampliamente utilizadas en el mundo y en Colombia, además de ser una tecnología confiable y que tiene una amplia proyección de uso en las ZNI colombianas. Se encontró que, en materia de suministro energético en las ZNI, los principales problemas identificados son la baja densidad poblacional y que sus pobladores poseen bajos recursos económicos. Por último, se encontró un panorama legislativo que tiene grandes beneficios jurídicos y económicos para electrificar las ZNI.

Tabla 2. Revisión bibliográfica de artículos aplicados fuera del territorio colombiano (Construcción propia)

Ref.	Título	Resumen	Uso	Ubicación
SEME ET AL. 2018	<u>Optimal Price of Electricity of Solar Power Plants and Small Hydro Power Plants – Technical and Economical Part of Investments; University of Maribor;</u>	Análisis del precio óptimo de la electricidad de PCH. Objetivo técnico y económico de la inversión en la construcción.	Comparativa inversión solar y las PCH. Aspectos técnicos de inversión PCH	Jordan - Bahrain - Greece
TIAGO ET AL. 2017	<u>Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor; Grupo de Estudos de energias Renováveis</u>	Cálculo del factor de aspecto (AF), es un parámetro basado en el método de mínimos cuadrados que representa las características físicas de una PCH.	Fórmulas para cálculo de PCH en USD/KW. Uso de fórmulas de las turbinas.	Brazil y Malaysia
CUNHA, FERREIR A. 2014	<u>A risk analysis of small-hydro power (SHP) plants investments. International Journal of Sustainable Energy Planning and Management.</u>	Desde un estudio de caso real, se aplica una evaluación de inversiones a un proyecto PCH en las condiciones actuales del mercado portugués. Los resultados muestran la vulnerabilidad de la inversión ante un cambio de tasas de interés.	Identificación de riesgos en la construcción de una PCH	Portugal
PASALLI, REHIARA. 2014	<u>Design Planning of Micro-hydro Power Plant in Hink River; University of Papua;</u>	Estudio de resultado de una PCH en el río HINK, con un caudal de 0,3 m ³ /s y una cabeza de 8,6 m	Definiciones. Equipamiento adicional de una PCH	distrito Hink - Manokwari -



				Indonesia
OKOT. 2013	<u>Review of small hydropower technology. University of Science and Technology, Uganda.</u>	Revisión de tecnología de las PCH. Principios, tipos y características.	Ventajas y desventajas, tipos de turbinas.	No definido
PUNYS ET AL. 2011	<u>Tools for Small Hydropower Plant Resource Planning and Development: A Review of Technology and Applications. Lithuanian University of Agriculture.</u>	Herramientas de software para el diseño de PCH. El énfasis está en las herramientas y metodologías informáticas de evaluación de recursos hidroeléctricos a pequeña escala.	Software para el modelado de una PCH	No definido
AGGIDIS ET AL. 2010	<u>The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. Lancaster University.</u>	Fórmulas para estimar el costo del equipo electromecánico y los costos de diferentes tipos de turbinas a través del análisis estadístico de los datos de costos de varios de fabricantes de turbinas.	Costos de equipos electromecánicos, (Pelton, Kaplan y Francis)	United Kingdom
OGAYAR ET AL. 2009	<u>Analysis of the cost for the refurbishment of small hydropower plants; University of Jaen;</u>	Estudio de viabilidad de rehabilitación de una PCH, con varias de ecuaciones basadas en la optimización económica.	Fórmulas para repotenciar una PCH, en función de la cabeza potencia y caudal	Jaén - Andalucía - España.
OGAYAR, VIDAL 2008	<u>Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant. University of Jaén.</u>	Determinación del costo del equipo electromecánico de una pequeña central hidroeléctrica	Modelos matemáticos de costeo de turbinas (Caso Europa)	Canadá, Suiza y Grecia
FOROUZB AKHSH ET AL. 2007	<u>An approach to the investment analysis of small and medium hydro-power plants. Aalborg Universitet.</u>	Evaluación económica basada en diferentes porcentajes de inversiones del sector privado y el sector público para PCH.	Diferentes tipos de costos de inversión en una PCH	No definido
KALDELLIS ET AL. 2004	<u>Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis. Technological Educational Institute of Piraeus.</u>	Viabilidad tecno económica de las PCH. Con un análisis de sensibilidad adaptado a la situación financiera del mercado local	Impacto de los subsidios europeos en montaje de PCH.	Grecia

De la revisión bibliográfica de artículos internacionales, se encuentro que varios de los textos tratan sobre las metodologías para estimar el costo de inversión en una PCH (Como: TIAGO, 2017. AGGIDIS, 2010. OGAYAR, 2008. FOROUZBAKSH, 2007. Entre otros). Las tecnologías para aplicar en proyectos hidroeléctricos (Como: SEME, 2018. PUNYS, 2011. Entre otros). Y las ventajas y desventajas para instalar PCH (Como: CUNHA & FERREIRA, 2014. OKOT, 2013. KALDELLIS, 2004. Entre otros).

Es por la anterior revisión bibliográfica, que se evidencia un gran problema en Colombia y el mundo como lo es el carecer de un suministro de energía eléctrica confiable y económicamente accesible. Por tanto, el presente trabajo busca estudiar el panorama actual de las Zonas No Interconectadas en Colombia y la posibilidad de implementar Pequeñas Centrales Hidroeléctricas para solucionar la carencia de energía eléctrica.

4 OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO.

4.1 Objetivo general

- Revisar la actualidad de las ZNI de Colombia y las tecnologías para implementar Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 16 de 59

4.2 Objetivos específicos

- Conocer el panorama actualizado de las ZNI
- Caracterizar las diferentes tecnologías para la implementación de PCH en Colombia.
- Calcular el potencial hidro energético de los departamentos con peor cobertura energética
- Revisar la legislación actual de Colombia y consolidar los beneficios para las ZNI.
- Revisión de restricciones y limitantes para implementar PCH en las ZNI de Colombia.

5 PANORAMA ENERGÉTICO COLOMBIANO

5.1 Matriz energética colombiana

La matriz de generación eléctrica Colombiana, es la sexta matriz más limpia del mundo (ACOLGEN, 2022). El 68% de la capacidad instalada proviene de fuentes renovables de energía eléctrica. La mayor proporción de la generación de energía eléctrica proviene de fuentes hídricas en un 67,58%. Posteriormente con un 31,37% se sitúan las plantas de generación eléctrica a base de la quema de combustibles fósiles (principalmente gas, petróleo y Diésel). Por último, con una participación del 1,04% se sitúan las plantas de generación eólica, solar y las plantas de cogeneración. (ACOLGEN, 2022).

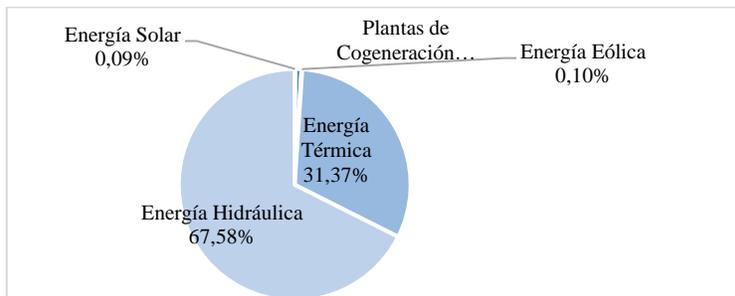


Figura 1. Distribución porcentual de la matriz energética colombiana. (ACOLGEN, 2022).

5.2 Panorama del Sistema Interconectado Nacional (SIN)

5.2.1 Líneas de transmisión de energía eléctrica

El Sistema Interconectado Nacional (SIN), está conformado por un total de 28,545.59 kilómetros de líneas de transmisión de energía eléctrica. Del total de líneas, unos 11,986.15 km corresponden al sistema de Transmisión 110 - 115 kV. Unos 15.49 km de líneas corresponden al sistema de Transmisión 138 kV, Se tienen 13,317.68 km de líneas que corresponden al sistema de Transmisión 220 - 230 kV y finalmente hay un total de 3,226.27 km de líneas corresponden al sistema de Transmisión 500 kV (XM, 2021a).



5.2.2 Plantas de generación eléctrica integradas al SIN

La media de la capacidad de generación total integrada al SIN para el mes de enero del año 2022 fue de 6276,74 GWh, con un promedio diario de 158,61 GWh de energía renovable producida (equivalente a un 78,34%) y un promedio de 43,86 GWh de energía producida por medios no renovables (equivalente al 21,66%) (XM, 2022). En el territorio colombiano contamos actualmente con 118 PCH que aportan un promedio diario de 0,887 GWh, además de contar con 54 grandes hidroeléctricas que aportan un promedio diario de 154,44 GWh. 9 generadoras solares cuyo aporte promedio diario es de 1,22 GWh. Una planta eólica cuyo promedio diario es de 0,13 GWh y 13 plantas de cogeneración cuyo promedio de generación eléctrica diaria es de 2,82 GWh. Estas plantas despachan su energía centralmente o no centralmente mediante el administrador del mercado energético en Colombia, la empresa Expertos en Mercado (XM, 2021a).

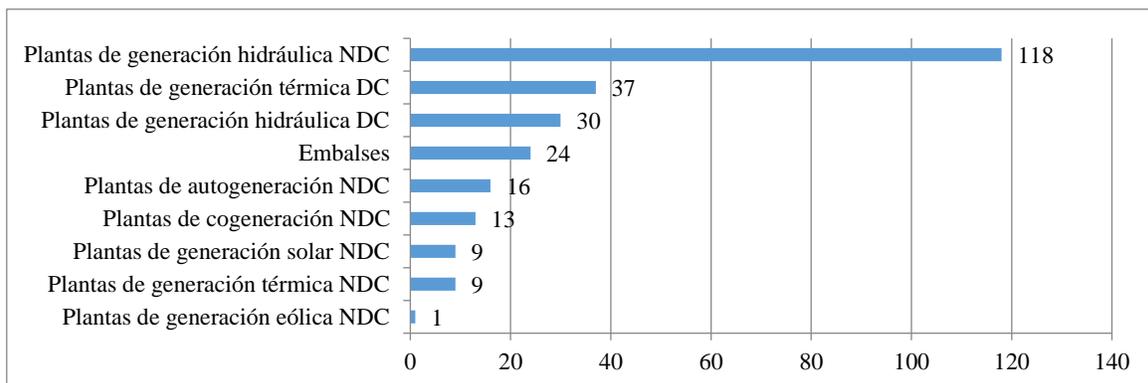


Figura 2. Total, de tipo de plantas de generación eléctrica integrada al SIN 2021. (XM, 2021a)

- NDC. No despachado centralmente
- DC. Despachado centralmente

5.2.3 Cobertura geográfica del sistema eléctrico SIN.

Por su geografía y condiciones demográficas, el territorio colombiano se encuentra distribuido en pequeños focos territoriales con alta densidad de poblacional y grandes zonas territoriales que no cuentan con una densidad poblacional significativa (UPME, 2019a). Como se observa en la figura 3, es debido a esta distribución demográfica del territorio, que el SIN principalmente se encuentra situado a lo largo de las 3 cordilleras nacionales y posee pocas conexiones en las zonas surorientales del país.



Figura 3. Distribución territorial del Sistema Interconectado Nacional. (UPME, 2019a)

5.3 Demanda de energía eléctrica colombiana.

En el 2021, el consumo total de energía eléctrica en el territorio colombiano fue de 74.116,91 GWh. La demanda de energía eléctrica del SIN aumentó 5.51% en comparación con la demanda del año 2020; Abril del 2021 fue el mes del año con mayor crecimiento de la demanda en comparación al mismo mes de 2020 con un 15.37%. Durante 2016, la demanda de energía eléctrica decreció 0.2% respecto al año anterior, con un consumo de 66,315 GWh, esta disminución es causada por la aplicación de la resolución CREG 029 de 2016, para promover el ahorro de energía, la cual, derivó en un cambio de hábitos por parte de los usuarios regulados, generando así una disminución en la demanda de energía. (XM, 2021b).

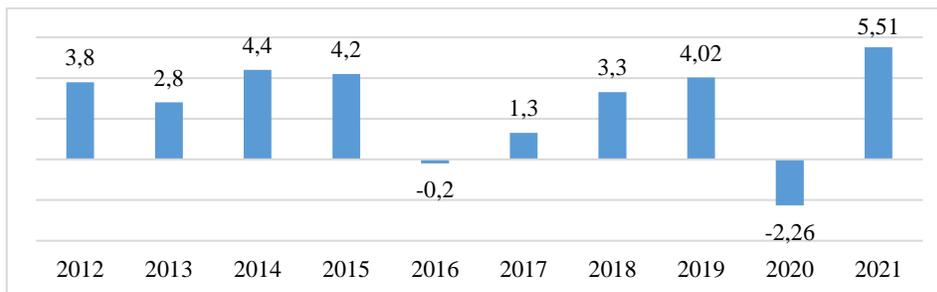


Figura 4. Cambios porcentuales en la demanda de energía en colombiana. (XM, 2021b.)

5.3.1 Peores coberturas eléctricas por departamento.

Los departamentos con peores coberturas eléctricas son los que están fuera del SIN. En la tabla 3 se resumen las coberturas de los cinco departamentos con menor cobertura energética del país. Los departamentos de Vichada, Vaupés, Guainía, Guaviare y Chocó tienen coberturas promedio que van desde los 43,5% hasta los 75,8%. Aunque la cobertura en las cabezas municipales de estos departamentos es relativamente mayor (entre un 84,7% hasta un 97,1%) que las coberturas promedio, Tenemos en las zonas rurales coberturas energéticas mucho más baja, que van desde el 11,6% en vichada hasta el 53,1% en el Chocó. (DANE, 2018).

Tabla 3. Los 5 departamentos con peor cobertura de energía eléctrica en Colombia. (DANE, 2018).

DEPARTAMENTO	% COBERTURA PROMEDIO	% COBERTURA EN LA CABECERA MUNICIPAL	% DE COBERTURA EN ZONA RURAL
VICHADA	43,49	91,1	11,66
VAUPÉS	47,58	93,64	19,06
GUAINÍA	62,17	84,69	35,44
GUAVIARE	74,3	96,75	37,66
CHOCÓ	75,82	97,08	53,1

5.3.2 Peores coberturas energéticas por municipio.

En la Tabla 4 se muestran los 5 municipios con peores cobertura promedio de servicio de electricidad en Colombia que van desde el 4,01% hasta un 8,9%, ubicados en los departamentos de Guainía y Chocó. Como se observa en la tabla, no todos los municipios registran datos de cobertura en la cabecera municipal, pero de acuerdo con la información del DANE, los municipios con peor cobertura en energía eléctrica rural tienen rangos, de un 0,5% hasta un 4,7%. (DANE, 2018).

Tabla 4. Los 5 municipios con peor cobertura de energía eléctrica. (DANE, 2018).

MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	% COBERTURA PROMEDIO	% COBERTURA CABECERA	% COBERTURA EN ZONAS RURALES
SAN FELIPE	GUAINÍA	4,01		4,01
SIPI	CHOCÓ	4,13	14,95	0,47
MORICHAL	GUAINÍA	4,62		4,62
PUERTO COLOMBIA	GUAINÍA	4,79		4,79
MEDIO ATRATO	CHOCÓ	8,9	83,33	1,76

Aparte de la baja cobertura eléctrica, la prestación del servicio en las ZNI no se entrega continuamente en los hogares, la prestación de energía eléctrica depende de la zona geográfica en la que se encuentre la comunidad, además de la cantidad de habitantes. Los rangos horarios de prestación del servicio varían desde las 4 hasta las 20 horas (FLORES, 2020).

5.4 Potencial hidro energético de los departamentos con peor cobertura eléctrica.

Una de las principales características geográficas con las que cuentan las ZNI, es de disponer de una amplia cantidad de ríos y cauces hídricos, como se observa en el siguiente mapa.



Figura 5. Ríos y afluentes hídricos en los departamentos con la peor cobertura eléctrica en Colombia. (UPME, 2019a)

5.4.1 Principales ríos en los departamentos con peor cobertura eléctrica:

- VICHADA
 - Río Orinoco, Río Guaviare, Río Meta, Río Tuparro, Río Tomo, Río Vichada
- VAUPÉS
 - Río Apaporis, Río Isana, Papunaua, Río Papurí, Río Querarí, Río Tiquié, Río Taraira, Río Vaupés
- GUAINÍA
 - Río Orinoco, Río Atabapo, Río Guaviare, Río Inírida, Río Isana, Río Negro
- GUAVIARE
 - Río Apaporis, Río Guaviare, Río Guayabero, Río Inírida, Río Vaupés
- CHOCÓ
 - Río Atrato, Río Baudó, Río San Juan

5.4.2 Cálculo de potencial hidro energético

El potencial hidro energético corresponde a los aprovechamientos de los cauces de agua, el caudal de agua y la cabeza hidráulica. Adicionalmente, los potenciales hidro energéticos varían en función de las longitudes horizontales de conducción (L_c) que son las distancias horizontales entre el punto de captación y el punto donde se ubicarían las turbinas. También los afluentes hídricos dependen del caudal, y de la cabeza hidrostática (UPME, 2015).

Para realizar el cálculo del potencial hidro energético, se implementa la siguiente ecuación.

$$\text{Potencia } (W) = \rho * Q * \Delta H \quad (\text{ec. 1}) \quad (\text{UPME, 2015})$$

ρ = Es la densidad del agua, medida en Kg/m^3

Q = Es el caudal del afluente hídrico, medido en m^3/s

ΔH = Es la caída hidrostática del afluente hídrico, medido en m



Los datos del Longitud de conducción, caudal y de cabeza hidrostática fueron tomados del primer atlas hidro energético de Colombia, que a su vez son resultado de las mediciones del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Finalmente, los resultados calculados por la UPME se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Potencial hidro energético total por departamento (UPME, 2015).

Potencial hidro energético	Lc = 0,2 km	Lc = 1 km	Lc = 5 km	Total, de kw (estimado)
Total, de kWh en Vichada	1,703,827	752,994	1,469,240	3,926,061
Total, de kWh en Vaupés	1,268,522	1,375,630	2,071,761	4,715,913
Total, de kWh en Guainía	593,849	153,344	550,396	1,297,589
Total, de kWh en Guaviare	1,310,303	760,663	1,684,546	3,755,512
Total, de kWh en Choco	967,010	1,218,746	840,618	3,026,374

5.4.3 Topografía de los departamentos con peor cobertura eléctrica en Colombia.

La topografía de los departamentos del Vichada, el Vaupés, Guainía y Guaviare están conformadas principalmente por llanuras extensas (IGAC, 2021).

- El terreno del Vichada es un área ligeramente ondulada y bien drenada.
- El departamento del Vaupés se caracteriza por tener un relieve plano, selvático, con pendientes muy bajas y algunos afloramientos rocosos. Sus principales elevaciones no superan los 300 m sobre el nivel del mar.
- El departamento del Guainía tiene un relieve poco ondulado, predominantemente plano, con algunos afloramientos rocosos que no superan los 400 metros de altura.
- El el departamento Guaviare predominan las tierras planas o ligeramente onduladas, que en su mayoría corresponden a la llanura Amazónica

En el Sudeste colombiano se presentan tierras principalmente planas de relieves ondulados y con grandes afluentes hídricos de alto potencial hidro energético (Tabla 5). Es por lo anterior que, para el aprovechamiento de este potencial hidro energético, no se plantea el desarrollo de proyectos hidroeléctricos con embalse. Sin embargo, la implementación de proyectos hidroeléctricos de flujo continuo (sin embalse), se presenta como una alternativa más atractiva al momento de considerar la electrificación territorios poco montañosos.

6 PANORAMA DE LAS ZNI

6.1 Panorama actual de las ZNI en Colombia

Actualmente el 53% del territorio colombiano se encuentra categorizado como Zona No Interconectada (ZNI), el restante 47% del territorio se encuentra acoplado en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Del total del

territorio colombiano 14 departamentos cuentan con zonas parcialmente interconectadas y zonas no interconectadas. 4 de estos 14 departamentos se categorizan exclusivamente como departamentos de ZNI (Vichada, Vaupés, Guaviare y Guainía). Del total del territorio nacional, 76 municipios se encuentran categorizados como ZNI exclusivamente, llegando a un total de 443 mil viviendas que no se encuentran conectadas al SIN (IPSE, 2022b).

La densidad poblacional de las ZNI es baja (3 habitantes/km²), factor que hace difícil la logística para ampliar la red del SIN, con altos costos unitarios de inversión y operación. (CONPES, 1999)

Del total de población que hace parte de las ZNI, solo el 33% tiene disponibilidad energética las 24 horas del día. El 4% de la población tiene disponibilidad de entre 15 a 20 horas al día. Un 2% de población tiene disponibilidad de entre 10 a 15 horas diarias. El 46% de población tiene una disponibilidad de entre 5 a 10 horas y un 15% de población tiene disponibilidad menor a 5 horas al día. Un total de 133.996 personas no cuenta con un suministro constante de energía y solo tiene acceso parcial a ella. (IPSE, 2022a)

Las ZNI actualmente tienen un 88% de energía producida por generadores diésel. El restante 12% de la energía, es producido por Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER).

De este 12% de energía total producida en las ZNI por fuentes renovables, se tiene un total de 62% de energía producida por Sistemas Solares Fotovoltaicos Individuales (SISFV), un 12% es producida por un sistema solar centralizado, el 12% es producida por quema de biomasa, el 11% es generada por *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)*, las cuales según la ley 1715 de 2014 son considerados FNCER. Y finalmente solo el 3% de esta energía es producida mediante residuos sólidos urbanos (RSU) (IPSE, 2022a).

6.1.1 Nivel de ingresos y densidad poblacional en las ZNI

Las poblaciones rurales de las ZNI destinan más recursos para el pago de la energía, en comparación con las áreas urbanas (DÁVILA RUEDA, 2022). La baja capacidad de pago de los usuarios es un gran riesgo para implementar soluciones para la energización de estas zonas y para garantizar la operación y el mantenimiento de las plantas. En Bogotá, Antioquia, Cundinamarca, Valle del Cauca y Santander, territorio donde habita el 48,6 % de la población se concentra el 63,3 % de los ingresos domésticos del país. Mientras que en Caquetá, Cauca, Chocó, Córdoba, La Guajira y Sucre, en donde vive aproximadamente el 13 % de colombianos solo se concentra el 7 % del ingreso domésticos totales (SÁNCHEZ, 2018). Estos departamentos con baja densidad poblacional tienen un costo más elevado de infraestructura en la de distribución y generación eléctrica, lo cual eleva significativamente los costos por usuario de la energía final

6.2 Sustitutos energéticos en las ZNI de Colombia

Las comunidades que se encuentran en las ZNI tienen diferentes sustitutos energéticos para realizar sus actividades diarias. Las figuras 6 y 7 muestran los datos de usos energéticos consolidados para 19563 familias encuestadas pertenecientes a las ZNI, a las cuales se les consulta cuales son los sustitutos energéticos implementados (IPSE. 2021). Como se ve en la figura 7, la leña sigue siendo el principal sustituto energético para los procesos de cocción de alimentos, esto tiene un fuerte impacto sobre el bienestar y la salud de la población en particular por los efectos de la inhalación de humo (UPME, 2019b)

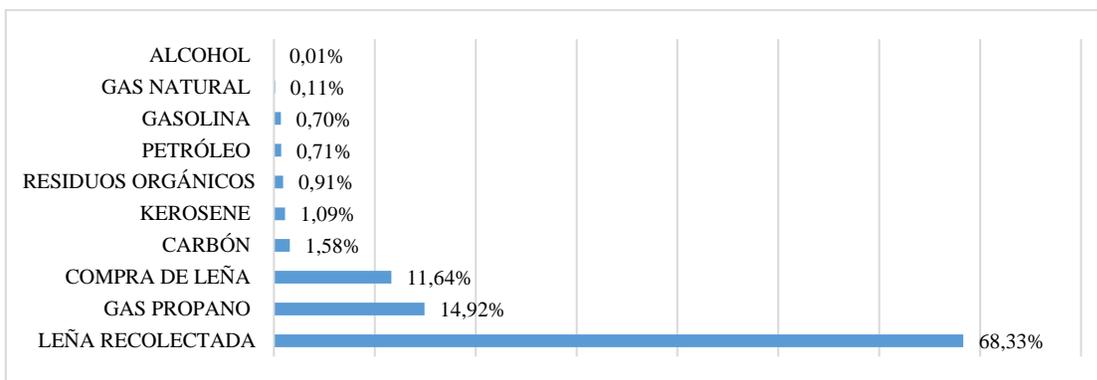


Figura 6. Total, porcentual de sustitutos energéticos para la cocción de alimentos en las ZNI. (IPSE. 2021.)

Como se observa en la figura 7, las baterías son el principal reemplazo de la electricidad en el uso de iluminación, seguidas por las velas y posteriormente por el petróleo y sus derivados.

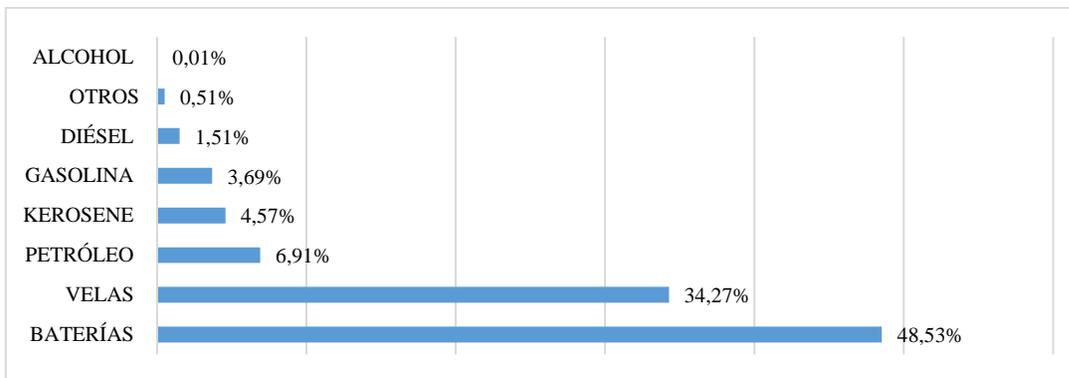


Figura 7.. Total, porcentual de sustitutos energéticos para la iluminación del hogar en las ZNI. (IPSE. 2021.)

Estos sustitutos energéticos se utilizan principalmente para realizar las actividades de cocción de los alimentos y para proporcionar la iluminación de sus hogares.

6.3 Marco normativo aplicable a las ZNI colombianas

Varias entidades de orden departamental y nacional se encargan de generar el marco normativo por el cual se establecen los parámetros de distribución, asignación de subsidios y tarifas del sistema eléctrico colombiano tanto en el SIN como en las ZNI (SIMEC, 2021).

La siguiente figura muestra cómo se interrelacionan las diferentes entidades encargadas del sistema energético colombiano.

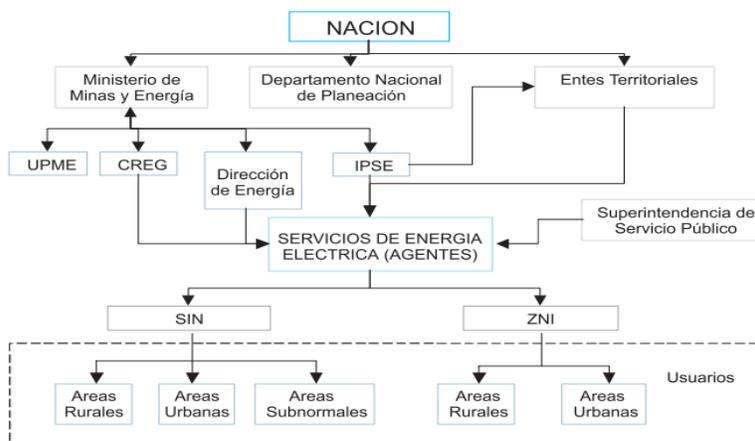


Figura 8. Entidades vinculadas en el sistema energético colombiano. (SIMEC. 2021)

Las entidades en Colombia planean, rigen, regulan, controlan, promueven, ejecutan y financian proyectos de energización. El interrelacionamiento de las diversas entidades se encuentra en la figura 8 y las funciones asignadas a cada una de las principales entidades gubernamentales, se discuten a continuación.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA: Formula, adopta, dirige y coordina la política nacional en materia de exploración, explotación, transporte, refinación, procesamiento, beneficio, transformación y distribución de minerales, hidrocarburos, biocombustibles y comercialización de energía eléctrica. Además de dirigir y coordinar la política en materia de uso racional de energía, el desarrollo de fuentes alternativas de energía y promover el uso racional y eficiente de energía. Este ministerio expide reglamentos para la exploración, explotación, transporte, refinación, distribución, procesamiento y comercialización de recursos naturales no renovables, biocombustibles, la energía eléctrica, gas combustible, transporte de crudos por oleoductos. Además de realizar las actividades relacionadas con el “conocimiento y la cartografía del subsuelo”, “divulga las políticas, planes y programas del sector” y “define los precios y tarifas de la gasolina, diésel (ACPM), biocombustibles y mezclas de los anteriores”. “Administra el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas – FAZNI, el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas – FAER, el Fondo Especial Cuota de Fomento, el Programa de Normalización de Redes

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 25 de 59

Eléctricas –PRONE, el Fondo de Energía Social -FOES”. *Se destaca la función de formular la política en materia de expansión del servicio de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas ZNI (MME, 2022).*

UPME: Establece y planea las alternativas para satisfacer los requerimientos mineros y energéticos de la población y los agentes económicos del país. También desarrolla análisis económicos de las principales variables sectoriales y evalúa el comportamiento e incidencia del sector minero y energético en la economía del país y evalúa la rentabilidad económica y social de las exportaciones e importaciones de los recursos mineros y energéticos. La UPME fomenta, diseña y establece los planes, programas y proyectos, relacionados con el uso eficiente, ahorro y conservación de la energía en todos los campos de la actividad económica y adelantar las labores de difusión necesarias. Además, elabora planes de expansión del Sistema Interconectado Nacional. Administra el Sistema de Información Minero Energético Colombiano. Revisa la formulación de proyectos financiados por el gobierno en materia de minas y energía. Emite conceptos sobre el potencial energético para proyectos hidroeléctricos y conceptos sobre las conexiones al Sistema Interconectado Nacional. *Así como elaborar y actualizar los planes nacionales de Desarrollo Minero, Energético Nacional, Expansión de los Sectores Eléctrico, Cobertura de zonas interconectadas y no interconectada.* (UPME, 2013)

CREG: según la ley 142 de 1994 la CREG, tiene la función de regular los monopolios en la prestación de los servicios públicos, promover la competencia entre quienes presten servicios públicos, además de definir los criterios de eficiencia y desarrollar indicadores y modelos para evaluar la gestión financiera, técnica y administrativa de las empresas de servicios públicos. La CREG está a cargo de expedir las regulaciones específicas para la autogeneración y cogeneración de electricidad y el uso eficiente de energía y gas, así como, fijar las tarifas de venta de electricidad y gas. Definir la metodología para el cálculo de las tarifas por el acceso y uso de las redes eléctricas, y los cargos por los servicios de despacho (CREG, 2022).

IPSE: según la resolución 0565 del 2022, el IPSE se encarga de adelantar estudios sobre la viabilidad técnica y financiera de los proyectos, y realiza estudios que definan las características técnicas y económicas de una solución energética. *El IPSE es el encargado directamente de realizar transacciones internacionales de energía para las Zonas no Interconectadas, ZNI, como parte de la promoción de las soluciones energéticas de una región. Presentar al Ministerio de Minas y Energía el presupuesto de los recursos que se requieran para otorgar los subsidios de ley para las zonas no interconectadas* (IPSE, 2022c).

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS (SSPD): Está a cargo de “las políticas, metodologías, estrategias y procedimientos para ejercer la supervisión sobre las entidades a las que les aplican las Leyes 142 y 143 de 1994”. “Vigilar, inspeccionar y controlar la correcta aplicación del régimen tarifario que fijen las Comisiones de Regulación respectivas, por parte de los prestadores de servicios públicos domiciliarios”. “Expedir normas técnicas especiales, interpretaciones y guías”. “Expedir, cuando la Nación así lo requiera para el otorgamiento de subsidios”. “Administrar, mantener y operar el Sistema Único de Información - SUI, que se

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 26 de 59

surtirá de la información proveniente de los prestadores' de servicios públicos sujetos a su control, inspección y vigilancia, para que su presentación al público sea confiable, conforme a lo establecido en el artículo 53 de la Ley 142 de 1994". Entre otras funciones (SSPD, 2020).

6.3.1 Legislación aplicable a las ZNI

La promoción de las energías renovables en las zonas no interconectadas se basa actualmente en la Ley 2099 de 2021, esta ley incentiva y promueve las nuevas fuentes de generación, permite la utilización de recursos físicos, naturales, disponibles en dichas zonas para implementar proyectos de generación energética, y así satisfacer los requerimientos energéticos de las ZNI. Las comunidades de tales zonas podrán acceder a niveles adecuados del suministro eléctrico y con ello promover mejores condiciones de vida.

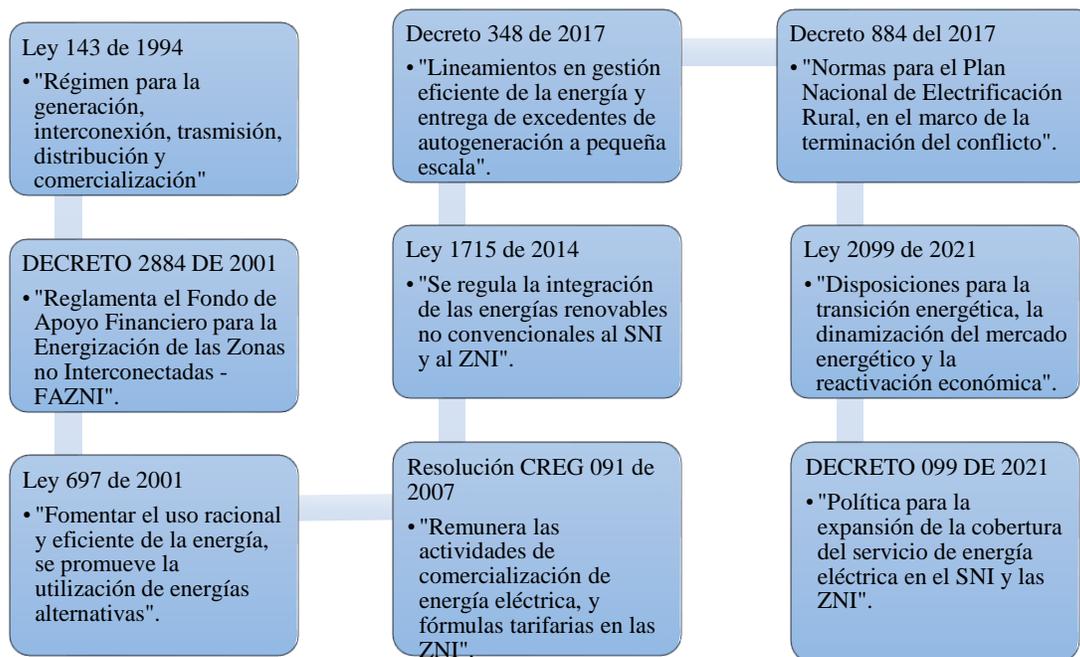


Figura 9. Legislación colombiana aplicada a las ZNI (SGS, 2022).

Las siguientes son los aportes normativos de cada una de estas leyes a la promoción, fomento, desarrollo y ejecución de proyectos para energizar las zonas no interconectadas colombianas.

Ley 143 de 1994:

ARTÍCULO 48. "El Gobierno Nacional asignará y apropiará los recursos suficientes en el Plan Nacional de Desarrollo, en el Plan Nacional de Inversiones Públicas y en las leyes anuales del presupuesto de rentas y ley de apropiaciones, para adelantar programas de energización calificados como prioritarios, tanto en las zonas interconectadas como en zonas no interconectadas".



ARTÍCULO 71. “El Gobierno Nacional por conducto del ICEL, se encargará de ejecutar directamente o a través de terceros, las actividades relacionadas con la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en zonas no interconectadas del país que no estén asignadas a otras entidades del sector eléctrico”.

Ley 697 de 2001:

ARTÍCULO 9. “Promoción del uso de fuentes no convencionales de energía. El Ministerio de Minas y Energía formulará los lineamientos de las políticas, estrategias e instrumentos para el fomento y la promoción de las fuentes no convencionales de energía, con prelación en las zonas no interconectadas”.

Ley 1715 de 2014:

ARTÍCULO 1. “La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, sistemas de almacenamiento de tales fuentes y uso eficiente de la energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y la seguridad de abastecimiento energético”.

ARTÍCULO 9. “Sustitución de generación con diésel en las zonas no interconectadas. El Gobierno Nacional implementará programas destinados a sustituir progresivamente la generación eléctrica con diésel en las ZNI con el objetivo de reducir los costos de prestación del servicio y las emisiones de gases contaminantes”.

ARTÍCULO 22. “Desarrollo de proyectos en pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. La energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos será considerada como FNCER. El Ministerio de Minas y Energía, a través de las entidades adscritas competentes continuará promocionando su desarrollo como solución energética. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible promoverá la gestión y el manejo integral y sostenible del recurso hídrico de las cuencas hidrográficas del país”.

Ley 2099 del 2021:

ARTÍCULO 29. Transferencia de activos. El Ministerio de Minas y Energía, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas en Zonas No Interconectadas y las entidades territoriales podrán transferir a título gratuito a las entidades territoriales o a las empresas prestadoras de los servicios públicos de energía o gas combustible, de carácter público o mixto, el dominio de los activos asociados a la prestación de estos servicios públicos domiciliarios, producto de proyectos desarrollados con recursos públicos, que se encuentren depreciados .



ARTÍCULO 32. El Centro Nacional de monitoreo CNM estará a cargo del seguimiento y monitoreo de la operación de los activos de generación y distribución en las Zonas No Interconectadas — ZNI. La Comisión de Regulación de Energía y Gas — CREG determinada los reglamentos de operación en ZNI

ARTÍCULO 35. Los prestadores del servicio de energía eléctrica que se comprometan a garantizar la sostenibilidad de proyectos eléctricos individuales en Zonas No interconectadas-ZNI, deberán acreditar su idoneidad, capacidad financiera y experiencia

ARTÍCULO 45. Promoción de Planes, Programas y Proyectos el IPSE, está facultado para estructurar, presentar y viabilizar ante fondos públicos que hagan inversiones en el sector eléctrico, tales como FENOGE, FONENERGIA, entre otros, planes, programas y proyectos en el Sistema Interconectado Nacional y en Zonas No interconectadas dirigidos a promover, desarrollar, implementar o ejecutar Fuentes No Convencionales de Energía y Gestión Eficiente de la Energía.

6.3.2 Beneficios e impactos de las FNCER en las ZNI

- Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta.
 - i) Artículo 11 de la Ley 1715 de 2014.
 - ii) Artículo 2.2.3.8.2.1 de la Ley 1715 de 2014.
 - Siguiendo del Decreto 2143 de 2015 (incorporado al Decreto 1073 de 2015).
- Depreciación acelerada.
 - Artículo 14 de la Ley 1715 de 2014.
 - Artículo 2.2.3.8.5.1. de la Ley 1715 de 2014
 - Decreto 2143 de 2015 (incorporado al Decreto 1073 de 2015).
- Exclusión de bienes y servicios de IVA.
 - Artículo 12 de la Ley 1715 de 2014.
 - Artículo 2.2.3.8.3.1. del Decreto 2143 de 2015 (incorporado al Decreto 1073 de 2015).
 - Ley 1715 art. 12, Decreto 2143 Artículo 2.2.3.8.3.1.
- Exención de gravámenes arancelarios.
 - Ley 1715 art. 13, Decreto 2143 de 2015 Arts. 2.2.3.8.4.1.

Las ZNI se definieron como aquellas áreas geográficas "donde no se presta el servicio público de electricidad a través del SIN" (artículo 11, Ley 143 de 1994). Los fondos FAZNI y FAER, que permiten financiar proyectos de generación eléctrica en estas zonas y abastecer el suministro de electricidad. Adicionalmente mediante la resolución 091 se establecen las tarifas y los subsidios energéticos en las ZNI. Por último, mediante la ley 2099

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 29 de 59

y el decreto 099, se establecen mecanismos de expansión de la cobertura eléctrica y promueve aumentar la cobertura (CCENERGÍA, 2016).

6.3.3 Fondos de financiación para proyectos de energización

6.3.3.1 Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas -FAZNI-

- Decreto 142 de 2015 regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional
- Decreto 1073 de 2015 Establece “El Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas (FAZNI), como una cuenta especial del Ministerio de Minas y Energía sin personería jurídica. Los recursos del FAZNI, y los rendimientos que generen la inversión temporal de sus recursos, se utilizarán con las políticas de energización que para las zonas no Interconectadas determine el Ministerio de Minas y Energía”.
- La Ley 1955 de 2019 “Expide que los recursos del Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas (FAZNI), y del Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas (FAER) se podrán utilizar para la reposición de los activos necesarios para la prestación de este servicio. El Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) podrá financiar proyectos de gestión eficiente de la energía y sistemas individuales de autogeneración con FNCE en ZNI” (UPME, 2011).

6.3.3.2 Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas – FAER -

- El Decreto 1073 de 2015 establece lineamientos para los recursos a que se refieren al artículo 105 de la Ley 788 de 2002, así como “los rendimientos generados en su inversión temporal, se utilizarán para financiar planes, programas o proyectos de inversión priorizados para la construcción e instalación de nueva infraestructura eléctrica en las zonas rurales” (UPME, 2011).

6.3.3.3 Programa de Normalización de Redes – PRONE -

- La Ley 1450 de 2011 Nivel Nacional establece que, para la financiación del Programa de Normalización de Redes, PRONE, se adicionará \$1 por kilovatio hora transportado (art. 104).
- Decreto 1073 de 2015 tendrá como objetivo la legalización de usuarios y la adecuación de las redes a los reglamentos técnicos vigentes
- Decreto 574 de 2020 “permite al Ministerio de Minas y Energía utilizar los recursos no comprometidos del Programa de Normalización de Redes Eléctricas -PRONE- con destino a asignación y ejecución de proyectos nuevos o que ya estén ejecutándose del Fondo FAER y/o el Fondo FAZNI”. (UPME. 2011)

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 30 de 59

El actual panorama de las zonas no interconectadas de Colombia muestra como las poblaciones de estas zonas carecen de un suministro energético constante y económico. Muestra también como al no disponer de este suministro energético, son forzados a utilizar sustitutos energéticos que atentan de manera directa la salud de sus pobladores y al mismo tiempo muestra un gran potencial hidro energético a explotar para beneficio de estas comunidades. Finalmente se tiene un contexto legislativo y político garantista que busca la implementación de soluciones FNCER para suministrar de energía a estas poblaciones. Es por ello que a continuación se plantea una de las tecnologías de fuente no convencional de energía renovable, plasmada en la ley 1715 del 2014, como lo son las pequeñas centrales hidroeléctricas.

7 PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (PCH)

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son centrales de generación de energía eléctrica con una baja capacidad instalada, cuyo objetivo es transformar la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica. Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), las PCH se pueden dividir en tres tipos, considerando el rango de generación de energía que tengan en el momento de su implementación (ESCOBAR DÍAZ ET AL, 2018).

- **Hidroeléctrica de embalse:** Se trata de un sistema hidroeléctrico que utiliza una presa para almacenar el agua proveniente de un río a un embalse. El agua almacenada en el depósito se utiliza luego para generar electricidad. (ESCOBAR DÍAZ ET AL, 2018)
- **Hidroeléctrica de desvío:** Es una instalación de desvío que canaliza una parte de un río a través de una tubería o canal. Este sistema puede no requerir el uso de una presa (OKOT, 2013).
- **Hidroeléctrica de pasada:** el sistema utiliza agua dentro del rango de flujo natural y requiere poco o ningún embalse. (OKOT, 2013)

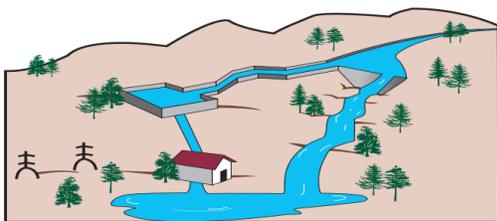


Figura 10. PCH de desvío al filo del agua (CASTRO, 2006).

7.1 Tamaño de las Centrales Hidroeléctricas en Colombia

LA siguiente es la clasificación de las hidroeléctricas colombianas que tienen una potencia inferior a los 20 MW (UPME, 2015).

- La Pico central hidroeléctrica, con una potencia que va de unos pocos KW a 0.5 MW
- La Micro central hidroeléctrica, con una potencia que va de 0.5 MW a 5 MW

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 31 de 59

- La Minicentral hidroeléctrica, con una potencia que va de 5 MW a 10 MW
- La Pequeña Central Hidroeléctrica, con una potencia que va de 10 MW a 20 MW
- La Central Hidroeléctrica, es la más grande de todas y tiene una potencia mayor a 20 MW

7.2 Obras civiles requeridas en una PCH

Las siguientes, son las obras mínimas que deberán implementarse en el diseño y montaje de una PCH (ESCOBAR DÍAZ ET AL, 2018).

- La Bocatoma, está constituida por las siguientes partes:
 - El barraje, es un dique transversal al río que logra que ingrese el agua al canal de demasías.
 - Los muros de encauzamiento sirven como defensa del río
 - La ventana de captación permite el ingreso del agua del río al canal de demasía
 - Canal de demasías está asociado a los primeros metros del canal de conducción, pero maneja dimensiones mayores que garantizan que el agua no desborde
- El Canal conduce el agua desde la bocatoma hasta la cámara de carga, se caracteriza por ser de tipo abierto y por tener una unión de material hidrófugo
- El vertedero permite la eliminación, de manera segura, del exceso de caudal de agua
- El desarenador sedimenta partículas de tierra y arena que son arrastradas a lo largo del canal, y evita su ingreso al sistema de tuberías de la planta
- La cámara de carga es un depósito situado al final del canal y antes de la entrada de la tubería que permite mantener una reserva de agua en caso de pérdida de presión en la misma; también es utilizado como último filtro para limpieza del agua de sedimentos
- La tubería de presión conduce el agua a presión desde la cámara de carga hacia la turbina, el propósito de que sea forzada es mantener las condiciones de entrada durante la transferencia.
- Casa de máquinas, protege, ubica y cimienta adecuadamente las turbinas y el equipo electromecánico además de almacenar repuestos
- Canal de descarga, Permite el retorno del agua hacia el río una vez se han generado los movimientos sobre las turbinas

7.3 Ventajas y desventajas de las PCH

Las PCH brindan la ventaja de no requerir altas caídas ni grandes caudales de agua, por lo cual no generan altos impactos en el medio ambiente, como sucede con otros métodos de generación o con las grandes centrales hidroeléctricas. Además, su versatilidad de instalación permite suministrar el servicio de energía a lugares de difícil acceso, ampliando el cubrimiento de la demanda energética (PACHECO Y TORRES, 2021).



7.3.1 *Ventajas y desventajas económicas de una PCH*

Tabla 6. Ventajas y desventajas económicas de las PCH (OKOT, 2013).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tiene bajos costos de operación. • Es una tecnología duradera y robusta • Una fuente confiable de energía. • Incluye tecnología probada. • Promueve el desarrollo regional. • Tecnología con alta eficiencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de capital • Sensibilidad ante el fenómeno de El Niño y La Niña • Requiere redes de distribución complementarias.

7.3.2 *Ventajas y desventajas sociales de una PCH*

Tabla 7. Ventajas y desventajas sociales de las PCH (OKOT, 2013).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Promueve el cuidado por los recursos hídricos. • Genera las condiciones para nuevos asentamientos humanos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere control de vectores de enfermedades transmitidas por el agua • Genera sectores de riesgo para la integridad de las personas

7.3.3 *Ventajas y desventajas ambientales de una PCH*

Tabla 8. Ventajas y desventajas medioambientales de las PCH (OKOT, 2013).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • No produce GEI • No se produce residuos. • Evita el agotamiento de los recursos de combustibles no renovables. • No afecta el cauce de los ríos • Ralentiza el cambio climático. 	<ul style="list-style-type: none"> • Obstáculo para la migración de peces y arrastre de peces. • Implica la modificación de los hábitats acuáticos. • Requiere gestión de la calidad del agua.

7.4 **Tecnologías para la construcción de una PCH.**

Hay dos categorías principales de tecnologías para la construcción de una PCH: Las turbinas de impulso y las turbinas de reacción. La selección de una de estas tecnologías se basa en la cabeza hidrostática y el caudal de agua en sitio, además de la eficiencia de la turbina y el costo (OKOT, 2013).

La turbina de impulso tipo Pelton tiene una rueda con una serie de cubos divididos (paletas) alrededor de su borde. Un chorro de agua a alta velocidad golpea tangencialmente a cada cubo individualmente. Los chorros se controlan mediante boquillas. La energía cinética del agua que sale se pierde luego de golpear los cubos. Generalmente se usan en sistemas con grandes cabezas de agua (OKOT, 2013).

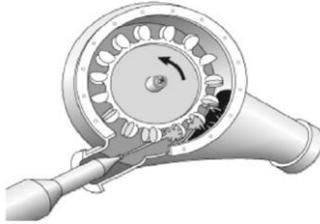


Figura 11. Turbina tipo Paltón (LÓPEZ, 2011).

Turbina de impulso de Flujo cruzado (Banki) es un rotor similar a un tambor y utiliza una boquilla alargada que se dirige contra paletas curvas en un rodete de forma cilíndrica. Su uso es más frecuente con caudales de agua grandes y cabezas bajas. En la primera etapa, el agua fluye desde el exterior de las palas hacia el interior, en la segunda etapa el agua sale por los laterales (OKOT, 2013).



Figura 12. Turbina tipo Banki (FREEPNG, 2015).

Turbina de impulso de Turgo es similar a la Pelton, pero con una forma diferente en los cubos y con el chorro golpeando el plano del rodete en un ángulo de 20° . La tasa de flujo a través de una turbina Turgo no está limitada y puede tener un rodete de menor diámetro y una mayor velocidad de funcionamiento, lo que aumenta la eficiencia y reduce el mantenimiento. Las turbinas Turgo funcionan eficazmente en sistemas con grandes cabezas de agua (OKOT, 2013).



Figura 13. Turbina tipo Turgo (MOHADED, 2018).

Turbina de reacción Hélice. Son adecuadas para sistemas con cabezas de agua bajas. Hay varios tipos de turbinas de hélice, “bulbo”, “Kaplan” y “tubo”. La turbina Kaplan tiene un paso de pala ajustable. Las turbinas de hélice se utilizan comúnmente en microsistemas hidroeléctricos donde tanto el flujo como la cabeza permanecen constantes (OKOT, 2013).

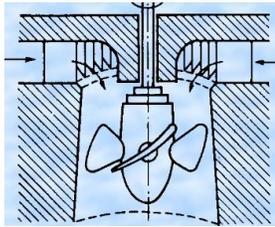


Figura 14. Turbina de hélice (GTRONIC, 2017).

Turbina de reacción Francis es el tipo más común de turbina hidroeléctrica. Esta turbina tiene un rodete de flujo radial que se monta en una carcasa en espiral con paletas de guía internas ajustables. El agua fluye radialmente hacia el interior del rodete y emerge axialmente, haciendo que gire. Las turbinas Francis se aplican en sistemas hidroeléctricos de tamaño medio y su eficiencia puede estar por encima del 90% (OKOT, 2013).

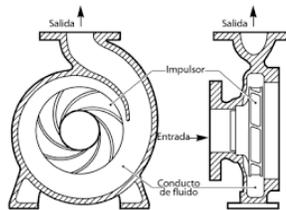


Figura 15. Turbina tipo Francis. (DE LA TORRE MORENO, 2016)

Turbina de reacción Cinética de flujo libre producen energía a partir de la energía cinética del agua que fluye. Los sistemas cinéticos utilizan la vía natural de la corriente de agua, por lo que no requieren el desvío del agua a través de canales, lechos de ríos o tuberías artificiales. Sin embargo, pueden aplicarse en conductos. (OKOT, 2013)

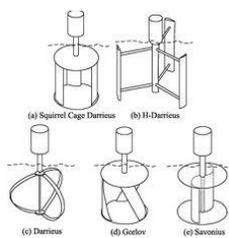


Figura 16. Turbina de reacción cinética (LANIYI, 2018).

Turbina de Tornillo de Arquímedes es determinado mediante la longitud (que aumenta a medida que sube la cabeza) y el diámetro (que aumenta cuando sube el flujo de diseño). En un tornillo de Arquímedes, el agua cae a través del tornillo y lo hace girar. El tornillo de Arquímedes opera bien para sistemas hidroeléctricos con caídas bajas (2–10 m) y gran caudal. (GEXIQ, 2016).

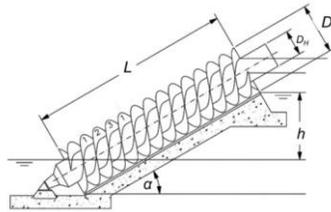


Figura 17. Tornillo de Arquímedes (GEXIQ, 2016).

Debido a la gran variedad de turbinas disponibles para el diseño de una PCH, se muestra en la figura 18 el tipo recomendado de tecnología a implementar y que depende de la cabeza de agua, el caudal del afluente y la cantidad de energía que se espera generar (OKOT, 2013).

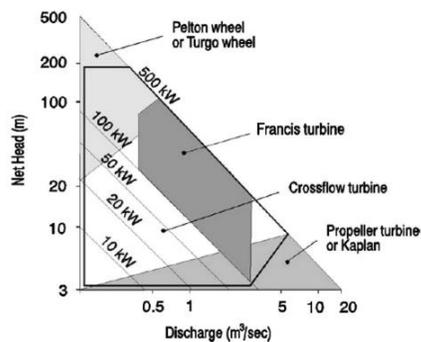


Figura 18. Diagrama de selección ideal de turbina (OKOT, 2013).

7.4.1 Nuevas Tecnologías para construcción de PCH

Las tecnologías para el montaje e instalación de las PCH vienen transformándose a lo largo del tiempo. Una de las grandes innovaciones es la instalación de PCH para los canales de agua con una cabeza y caudal bajo, es el diseño de las “turbinas turbulentas” (Turbinas de vórtice). Este tipo de tecnología está basada en el principio de “vórtice libre natural” de Rankine y es ampliamente utilizado en arroyos, permitiendo que los peces y los desechos pasen libres por sus conductos, lo que repercute también en un bajo mantenimiento (LIU, 2019).

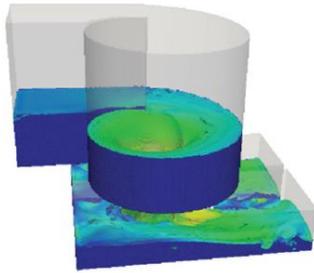


Figura 19. Diagrama de diseño, turbina vórtice (LIU, 2019).

Este tipo de tecnología de flujo turbulento (Turbinas de vórtice) ha sido ampliamente utilizado alrededor del mundo, con algunos de estos casos de éxito (VERREYDT ET AL, 2020):

- **Bali, Indonesia:** Escuela ubicada junto al río Ayung en Bali. Posee una Turbina de vórtice de 13 kilovatios que beneficia a más de 700 estudiantes. Fue diseñada para no producir contaminación acústica ni vibraciones, la recuperación de la inversión es en 4 años.
- **Ylang, Taiwán:** Micro central hidroeléctrica en Taiwán. Genera 600 KW de energía continua a partir de unidades centrales separadas instaladas en el río Annong.
- **Suez, Versalles, Francia:** La turbina proporciona electricidad a una planta de tratamiento de aguas residuales en Versalles. Posee una turbina de 5 kilovatios y proporciona energía a 85 hogares.

Las turbinas de Vórtice cuentan con rotores hidrodinámicos aptos para no lastimar a los peces, con un diseño sumergido compacto de bajo ruido y con un funcionamiento medio de más de 25 años. Todas las partes del rotor y la carcasa están hechas de acero inoxidable, las piezas de acero al carbono tienen un revestimiento resistente a los impactos y la abrasión. (VERREYDT ET AL. 2020)

Tabla 9. Parámetros de diseño turbina de vórtice. (VERREYDT ET AL. 2020)

Modelos	Unidad	15 kW	30 kW	50 kW	70 kW
Salida hidráulica de la turbina	kW	17.4	34.9	56.8	79.5
caudal nominal	m ³ /s	1.5	2.2	3.1	3.8
Altura nominal	m	2	2.8	3.25	3.7
Diámetro del impulsor	mm	1140	1200	1300	1500
Altura del rotor	mm	550	580	625	730
Peso del núcleo de la turbina Vortex	kg	275	300	360	475
Peso del generador	kg	350	600	950	1200

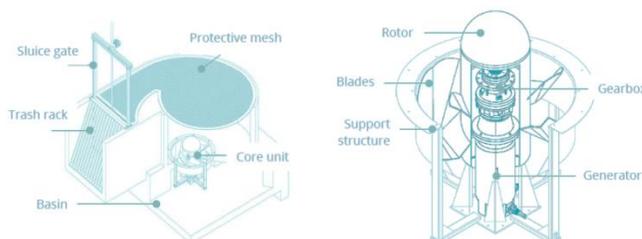


Figura 20. Diagrama de turbina de vórtice. (VERREYDT ET AL. 2020)



8 PANORAMA ACTUAL DE LAS PCH EN COLOMBIA

8.1 Total, de PCH en Colombia (capacidad instalada en MW)

A la fecha se tienen un total de **118** PCH operativas en el SIN colombiano (VERGARA. 2020). Adicionalmente a las 118 PCH que se encuentran en el SIN, tenemos en el territorio colombiano **3** PCH que actualmente se encuentran en Zonas no interconectadas, estas son las PCH ubicadas en los municipios de Mitú en Vaupés, Bahía solano y Cupica en el Choco y que cuentan con los siguientes parámetros de operación.

Tabla 10. Parámetros técnicos PCH en las ZNI (GENSA, 2019).

Pequeña Central Hidroeléctrica	Mitú (Vaupés)	Cupica (Choco)	Bahía Solano
Potencia instalada (kW)	7.052	597	1.875
Potencia FNCER* (kW)	2.000	400	1.61
Demanda máxima (kW)	2.451	165	
Número de usuarios atendidos (Número)	2.769	1.230	1010
Factor de Servicio (Horas/año)	8.758	719	6.570
Factor de Servicio (%)	99,98	81,15	78%
Número de Trabajadores (Número)	23	7	18

Del total de PCH colombianas, se tienen principalmente implementadas las tecnologías de turbinas Pelton y turbinas Francis (Variando los tamaños y modificaciones particulares). Teniendo en la actualidad un total de 52 turbinas tipo Pelton, 90 turbinas tipo Francis y 1 turbina tipo Kaplan.

A continuación, mostramos como ha sido la evolución de la entrada en operación de estas de PCH en el territorio colombiano en comparación con la potencia total entregada por ellas. El total de las 118 PCH del país, su entrada en operación y la potencia total de diseño se encuentra en el ANEXO 1.

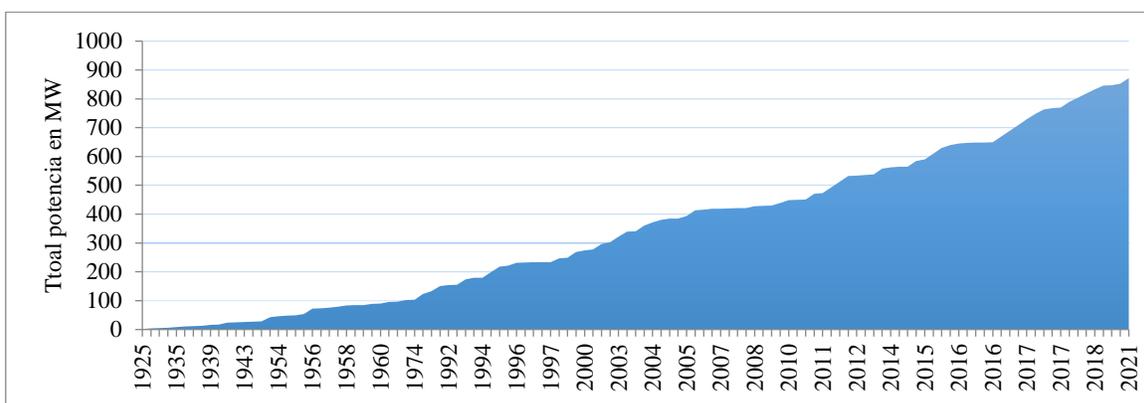


Figura 21. Total, de potencia generada por las PCH interconectadas en el SIN. (Construcción propia)

Todas las PCH del país, difieren en el diseño, de las condiciones pluviométricas del entorno y las condiciones geográficas específicas de su ubicación. En la actualidad la mayoría de las PCH del país se encuentran en



departamentos con condiciones topográficas más favorables. Es por lo anterior que en la figura 21 se muestra el recuento de la potencia total generada por todas las PCH operativas por departamento.

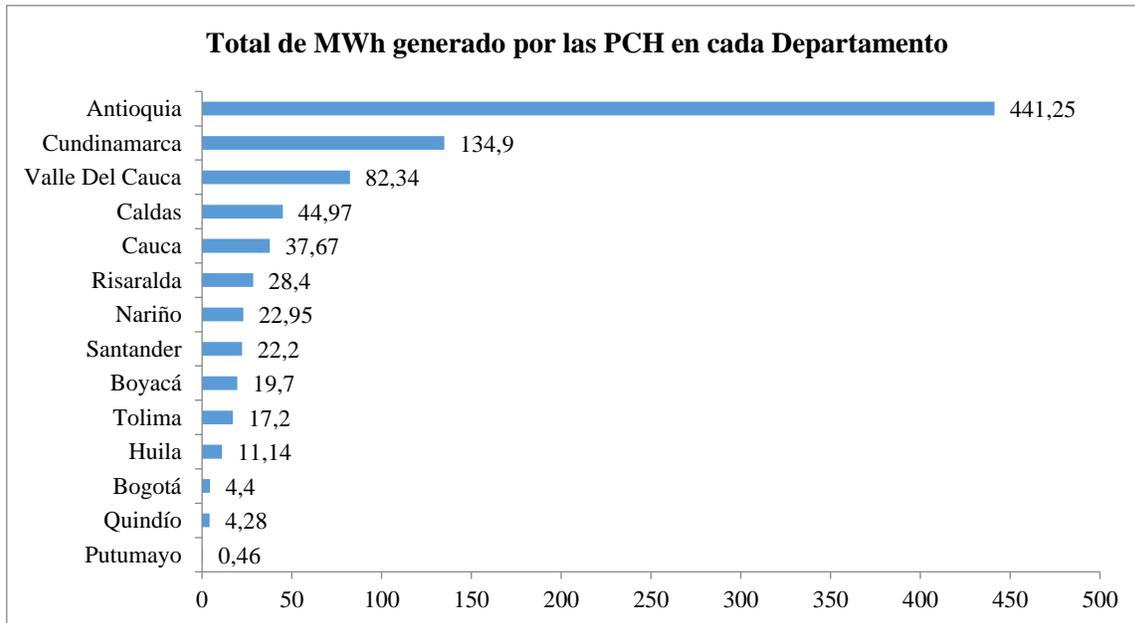


Figura 22. Aporte energético de las PCH por departamento (Construcción propia).

Finalmente, el registro de la primera PCH en el territorio colombiano fue la PCH “Rio Cali”, entrando en operación en el año 1925 y cuya potencia instalada inicial fue de 0.6 MWh (ahora repotenciada a 1.8 MWh), luego entró en operación la PCH de “San Cancio en Manizales” en 1929 con una potencia inicial de 0.8 MWh (ahora repotenciada a 2 MWh). Con una media de entrada de 4 PCH por año en el territorio colombiano, se tiene que la última PCH registrada es “las violetas” con una potencia de 0.945 MWh y que entró en marzo del año 2022. El total de energía eléctrica entregada al SIN por las PCH es de **887.3 MWh**.

8.2 Proceso de entrada en operación PCH en Colombia

La Figura 23 resume los pasos del proceso para que una PCH entre en operación en Colombia

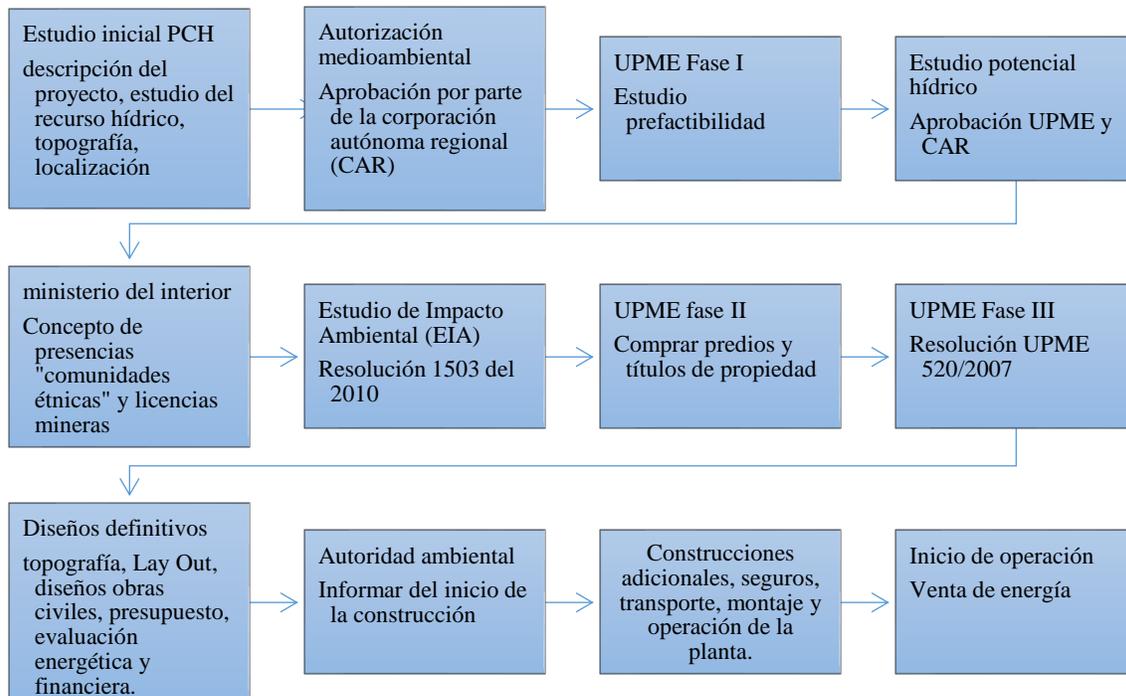


Figura 23. Paso a paso para la implementación de una PCH (aplica para el SIN & ZNI). (ESCOBAR DÍAZ ET AL., 2018)

8.3 COSTO DE UNA PCH

El Costo de inversión para instalar una PCH depende del lugar de instalación final. Dicho costo también depende de la infraestructura existente en el sitio, la capacidad de producción energética final y la topografía en el lugar donde se implementa la hidroeléctrica. Adicionalmente el costo de una PCH depende directamente de las características de caudal del afluente hídrico, de la cabeza hidrostática y de la potencia esperada de generación. El costo de inversión total se divide en los costos de inversión, los costos indirectos y costos periódicos o administrativos (FOROUZBAKHS ET AL., 2007).

8.3.1 Costos de inversión

La correcta estimación de los costos de inversión es clave para el éxito en la implementación de una PCH. Estos costos cubren rubros tan estratégicos como la infraestructura perimetral, los estudios de diseño, las adecuaciones civiles, las turbinas, los generadores, las compuertas, el sistema de control, las subestaciones de potencia, los



equipos auxiliares eléctricos, las líneas de transmisión de energía, las obras civiles de la red, el sistema de cableado, los convertidores de potencia y otras adicionales (FOROUZBAKHSHE ET AL. 2007)

8.3.1.1 Subcategorías en los costos de inversión

El diseño, la instalación y operación de cualquier PCH, requiere una gran lista de actividades, compras e hitos a desarrollar. Es por lo anterior que según ARIAS-GAVIRIA (2017), dichos costos de inversión se pueden distribuir de la siguiente manera

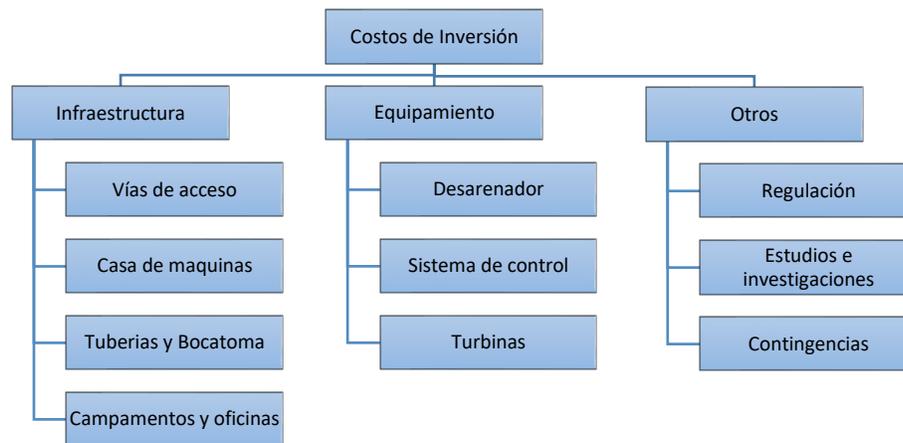


Figura 24. Principales rubros en los costos de inversión. (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017)

8.3.1.2 Distribución costos de inversión

De acuerdo con OGAYAR (2009), el coste de los equipos electromecánicos (turbina, alternador y regulador) supone un alto porcentaje del costo de inversión en una PCH (alrededor del 30% y 40% del importe total). De ahí la importancia de la selección adecuada del tipo de turbina a utilizar y el tipo de obras civiles a desarrollarse. El restante 30% del valor total final del proyecto se compone de costos administrativos y equipos eléctricos de regulación y control (OGAYAR Y VIDAL, 2009).

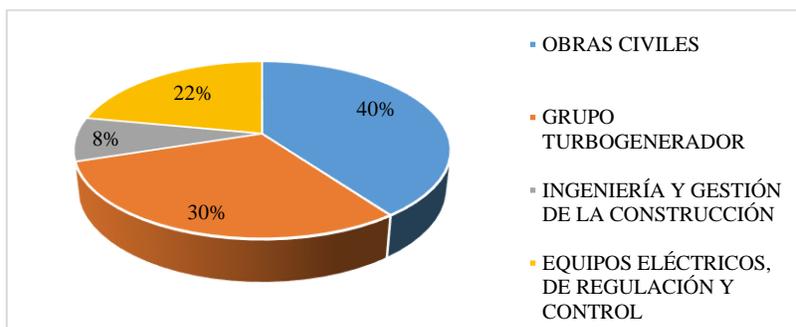


Figura 25. Distribución porcentual en la inversión de una PCH. (OGAYAR Y VIDAL, 2009).



8.3.2 Costos indirectos

- Costos asociados a la supervisión y administración, así como los costos adicionales de inflación durante el período de construcción de la PCH. (FOROUZBAKHS ET AL. 2007)

8.3.3 Costos periódicos

- Depreciación de la maquinaria y los equipos, depende de la metodología de depreciación seleccionada por el operador (Depreciación acelerada o regular)
- Costos de operación y mantenimiento incluyen los sueldos del personal, la mano de obra, los seguros, impuestos, aranceles, el paisajismo y los materiales consumibles
- Costos de reemplazo y renovación de la maquinaria, para el generador, los rodetes de turbina y otras partes móviles (FOROUZBAKHS ET AL. 2007)

8.4 Costos promedios de una central hidroeléctrica menor a 20MW.

El costo de instalación y operación de una PCH difiere sustancialmente por su diseño, los equipos utilizados y la disposición final de la hidroeléctrica (OGAYAR Y VIDAL, 2009).

A continuación, en la tabla 12 se resume un estimado de inversión real de cada una de las hidroeléctricas menores a 20 MW que se encuentran en el territorio colombiano. En el ANEXO 2 se puede consultar la lista completa de proyectos usados para esta estimación y la información. Los valores, en pesos colombianos, se llevaron a pesos de 2022 usando la ecuación 2 y los valores de IPC del Banco de la república colombiana. Las hidroeléctricas están diferenciadas por su tamaño de generación de energía. Los valores mostrados a continuación, se encuentran en Billones de pesos colombianos (Billones de COP) y representan una escala da 1.000.000.000 \$ COP

Tabla 11. Inversiones totales de las PCH colombianas (Construcción propia)

	Potencia	Total, en Colombia	\$ Promedio (Billones COP) / Central	\$ Max (Billones COP) / Central	\$ Min (Billones COP) / Central
PCH	10 MW a 20 MW	37	245,92 \$	337,85 \$	171,47 \$
Mini CH	5 MW a 10 MW	13	63,72 \$	88,28 \$	50,94 \$
micro CH	0.5 MW a 5 MW	60	24,11 \$	49,93 \$	14,30 \$
ρ CH	Pocos KW a 0.5 MW	8 (Registradas SIN)	0,15 \$	0,22 \$	0,10 \$

Los valores anteriormente mostrados se encuentran en Billones de COP (1.000.000.000 COP), y están ajustados al IPC del año 2022. Estos valores reflejan la inversión total en la moneda local “pesos colombianos (COP)” para el año 2022 de los diferentes tipos de PCH. La fórmula para hacer el ajuste económico del valor de inversión de la PCH, llevado al 2022 es.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 42 de 59

$$Valor_{2022} = Valor_{Año\ x} \times \frac{IPC_{2022}}{IPC_{Año\ x}} \quad (ec. 2)$$

$Valor_{Año\ x}$ = La inversión total de la PCH en el año de entrada

IPC_{2022} = El valor del IPC (Índice de precios al consumidor de Colombia) para el año 2022

$IPC_{Año\ x}$ = El valor del IPC (Índice de precios al consumidor de Colombia) para el año de entrada de la PCH

8.5 Costos de las PCH en las ZNI

- **La PCH de Bahía Solano**, queda ubicada en el Departamento del Chocó, en predios del parque natural de Utría, sobre la quebrada Mutatá, afluente del río Boroboro a una distancia de 5 kilómetros al este de la ensenada de Utría. La PCH de bahía solano cuenta con un caudal de 3,125 m³/s, un factor de carga de 0.55, una capacidad instalada total de 2.2 MW y finalmente una cabeza hidrostática de 365 m. La PCH cuenta con 5 unidades Pelton (GAITÁN, 1998). La inversión total de esta PCH fue de 1,38 \$ Billones de COP corrientes para el año 2007 (MME, 2007).
- **La PCH de Mitú**, ubicada al suroriente del país, en zona fronteriza con el Brasil, a 30 kilómetros al oriente de Mitú, sobre la orilla derecha del río Vaupés en la cachivera (raudal) de Santacruz. Actualmente opera con una cabeza de 8 m y con un caudal de 1.3 m³/s, y cuenta con una turbina Pelton (RODRÍGUEZ ZABALA, 2022). La inversión total de esta PCH se registró en 36 \$ Billones de COP corrientes del año 2022
- **La MCH de Cupica** se encuentra ubicada en la parte occidental del departamento del choco, sobre la cercanía de Baudó en el salto del río Cupica, aproximadamente a 13 kilómetros de su desembocadura, donde aprovecha la caída de agua para generar energía. La PCH tiene un caudal total es de 2.2 m³/s y una cabeza hidrostática de 5 m y cuenta con 2 unidades Pelton. El valor final de inversión para esta PCH fue de 2,3 \$ Billones de COP corrientes del año 2007 (PRESIDENCIA, 2007).

8.6 Dispersión en los costos de una PCH

De acuerdo con ARIAS-GAVIRIA (2017), el costo total para el montaje y el funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica, comparándola con otra hidroeléctrica de condiciones similares de operación, tiende a permanecer en rangos establecidos con dispersiones relativamente bajas. Comparativamente, los costos totales de algunas hidroeléctricas que no se encuentran interconectadas al SIN, tienden a tener valores de dispersión relativamente mayores a las hidroeléctricas que si están interconectadas al SIN. Lo siguiente se evidencia en la figura 26.

En general, las zonas que se encuentran fuera del SIN poseen una deficiente, y en algunos lugares inexistente, infraestructura de movilización y transporte, agravada por las condiciones políticas y socioeconómicas de las

regiones (SSPD. 2018). Esta coyuntura, aporta en gran medida las condiciones para que los valores de las PCH no interconectadas al SIN, varíen tanto en costo como en dispersión con el grupo de hidroeléctricas de condiciones similares pero que si están interconectadas al SIN. Se observa que el grupo principal de datos se encuentra en el rango entre 1.000 y 8.000 USD/Kw

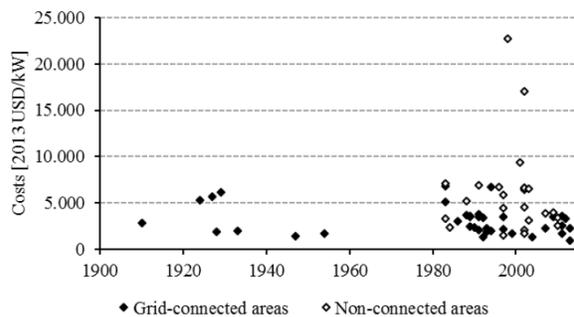


Figura 26. Costos de inversión en PCH, discriminados en áreas que pertenecen al SIN y áreas no interconectadas. (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017)

8.6.1 Economía de escala en la inversión de una PCH

Los efectos de las economías de escala describen la relación entre el nivel de producción y los costos de producción asociados. Las economías de escala existen cuando a un aumento en el tamaño de la planta eléctrica se traduce en una reducción de los costos de inversión específicos. (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017).

De una muestra de 37 PCH's del territorio colombiano, se evidencia en la figura 27 como a medida que se incrementa la capacidad instalada de las diversas hidroeléctricas, se observa como decrecen los costos totales, los costos de equipamiento y los costos de infraestructura medidos en USD/kW. Este es un comportamiento típico de las economías de escala, que permite extrapolar dicha tendencia y pronosticar condiciones más favorables para futuras instalaciones de pequeñas centrales hidroeléctricas

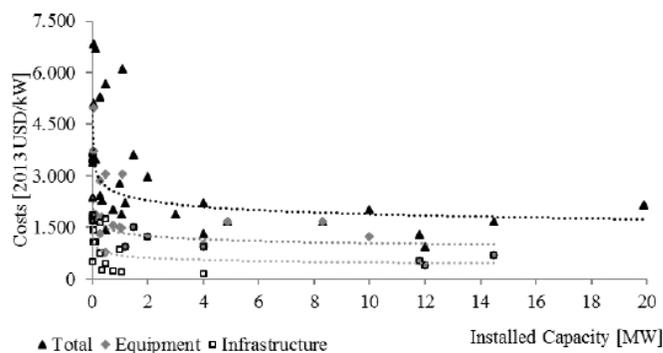


Figura 27. Costo de inversión en PCH, mediante economías de escala (ARIAS-GAVIRIA ET AL., 2017)

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 44 de 59

8.7 Costos de la PCH en el Parque Juan Curí. (Estudio de caso)

El siguiente estudio de caso está ubicado en el departamento del Santander y evidencia un panorama real en donde el diseño y construcción de una PCH es viable tanto técnica, como financieramente. Este estudio de caso (CADENA et al, 2015) presenta los requerimientos energéticos de una zona específica que no cuenta con interconexión al SIN y adicionalmente modela una vida útil y un retorno de inversión a 10 años. Esta PCH se encuentra en el parque ecológico Juan Curí, ubicado a 22 km del municipio de San Gil en Santander, este parque cuenta con 2 grandes cabañas para recibir huéspedes (una cabaña para 15 personas y otra cabaña para 20 personas) y un restaurante con capacidad para 50 personas, zona de camping, sistema integrado de televisión (CCTV) e iluminación interna y externa de las instalaciones. Los requerimientos energéticos a suplir por la PCH se estiman en un total de 193 kWh / día (CADENA et al, 2015).

El montaje de una PCH en el parque ecológico de la cascada (municipio del Páramo en Santander), opera con un caudal de 0,05 m³/s en la sección de la bocatoma y una cabeza hidrostática de 72 m. Se utiliza una turbina Pelton que gira a 3600 RPM en su punto máximo y cuenta con un factor de potencia de 0,8.

El coste total de construir la PCH para el parque ecológico Curí, se estimó inicialmente en aproximadamente 100.000.000 \$ COP para el año 2013, unos 151.593.234 \$ COP en el año 2022. (Este costo total no cuenta con estimaciones de factores externos, ni recursos por externalidades, además de contar con una ingeniería básica de instalación y diseño):

- Costos directos al año 2013: (Diseño, Tubería y accesorios, Obras civiles, Generador, Cables, Montaje eléctrico y Montaje hidráulico), valor estimado total de 93.504.438 \$ COP
- Costos indirectos al año 2013: (Asesorías profesionales, Gastos administrativos, Transporte materiales, Combustible), valor estimado total de 5.668.000 \$ COP
- Otros costos al año 2013: (Software, Medios magnéticos, Gastos de servicios), valor estimado total de 733.000 \$ COP

El coste promedio de la energía eléctrica en la ubicación del proyecto, según la ELECTRICADORA DE SANTANDER es de 456 \$/kWh (Valor al año 2013). Debido a los materiales, depreciación y calidad de los equipos usados, ubicación del proyecto y estimaciones de retorno de inversión, se estima que la vida útil del proyecto es de 10 años, con un punto de equilibrio financiero estimado en el año 6 (CADENA et al, 2015).

8.7.1 LCOE (Parque Juan Curí)

LEVELIZED COST OF ELECTRICITY (Conocido por sus siglas en inglés como “LCOE”) es el costo nivelado de electricidad, y es una de las métricas más comúnmente utilizadas para realizar análisis económicos en los sistemas de generación de energía. Este método en su interpretación más simple busca estimar el costo total promedio de construir y operar una planta de generación de electricidad durante toda su vida útil, y luego

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 45 de 59

dividido por su producción total de energía durante este tiempo (SHEN ET AL., 2020). El LCOE expresado matemáticamente es:

$$LCOE = \frac{\sum(LifeTime\ plant\ Cost)}{\sum(LifeTime\ electricity\ production)} \quad (\$/kWh) \quad (ec. 3)$$

Varios factores afectan el cálculo del LCOE, tales como las economías de escala (estas disminuyen los costos del sistema) debido a la alta automatización en la producción eléctrica. Otro problema es que el LCOE no considera la variación diaria de la oferta y la demanda, los impuestos y subsidios y las externalidades como los impactos ambientales del proyecto, que afectan significativamente la viabilidad de las diferentes tecnologías de generación. (SHEN ET AL., 2020).

Es por lo anterior que, para realizar una estimación aproximada del costo nivelado del Parque Juan Curí, realizaremos las siguientes suposiciones, como la no fluctuación de los costos de inversión y mantenimiento en el transcurso de la vida útil del proyecto. Además de suponer la no existencia de nuevos gastos imprevistos al proyecto y la suposición de una demanda estable y constante a lo largo del tiempo por parte del personal del Parque. Utilizando la ecuación 3.

$$LCOE_{Juan_Curí} = \frac{(100.000.000_{COP-Inv.}) + (32.224.500 M_{COP-Mant.} * 10_{años})}{193kWh/día * 3650_{días/10 años}}$$

$$LCOE_{Juan_Curí} = 599,4_{\$COP/kWh} \approx 600_{\$COP/kWh} \approx 0,3_{\$USD/kWh} \left[TRM_{Año-2013} \approx 2000_{COP/USD} \right]$$

Luego de considerar algunas suposiciones y con la información detallada del proyecto, tenemos un Costo nivelado de energía aproximado de 0,3 \$USD/ kWh (Calculado con los datos del año 2013).

8.8 Tecnologías alternas de generación eléctrica

Las energías renovables se plasman como una alternativa energética que busca mitigar los GEI. Estos sistemas tienen la ventaja de reponerse constantemente y no agotarse en el corto plazo. Los principales sistemas de generación de energía renovable son: Los sistemas fotoeléctricos, sistemas eólicos, sistemas de cogeneración, sistemas de aprovechamiento de la biomasa, la energía geotérmica, la energía hidroeléctrica y sistemas híbridos de energía renovable. (ALRIKABI, 2014)

Los sistemas híbridos de energía renovable (HRES por sus siglas en inglés), consisten principalmente en sistemas de generación de energía eléctrica basados en sistemas renovables como fuente primaria y apoyados por sistemas de baterías y/o generadores diésel como respaldo. Estos sistemas híbridos se implementan para superar la naturaleza fluctuante de las energías renovables. Los sistemas híbridos de energía renovable por su respaldo y naturaleza variable pueden optimizar el tamaño de los componentes del sistema, lo que favorece a

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 46 de 59

reducir los costos de operación e incrementa la confiabilidad general del sistema (COME-ZEBRA ET AL, 2021).

8.8.1 Sistema híbrido vs PCH (Juan Curí)

La energía solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica y de biomasa son las tecnologías de generación eléctrica más comunes en los sistemas híbridos de energías renovables (HRES). Una de las principales agencias encargadas de recopilar y analizar información de costos para las diferentes soluciones energéticas renovables, es la Agencia Internacional de Energía Renovable (Por sus siglas en inglés, IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY) (SHEN ET AL, 2020).

IRENA presenta estimaciones periódicas de los LCOE para diferentes tecnologías. Por ejemplo, se calculó que el LCOE para la energía solar fotovoltaica se encontrara entre los 0,15 \$USD/kWh y 0,25 \$USD/kWh en el año 2015. Sin embargo, las tecnologías híbridas de sistemas hidráulicos se presentan como una de las tecnologías que presentan menores costos de generación. Estas tecnologías híbridas / hidroeléctricas implican un alto costo de capital, pero tienen costos de operación y mantenimiento bajos. La Alianza para la Electrificación Rural (Que, por sus siglas en inglés, ARE - ALLIANCE FOR RURAL ELECTRIFICATION) calculó el LCOE de sistemas híbridos diésel con diferentes configuraciones en un pueblo ubicado en Ecuador (isla de Bellavista). En el mencionado lugar se encontró que el sistema híbrido de pequeña central hidroeléctrica / diésel fue el más rentable en comparación con otras tecnologías. El valor final calculado del LCOE para el sistema híbrido hidráulico / diésel fue de 0,22 \$USD/ kWh. (Dicho sistema híbrido generó unos 26,8 kWh con un caudal de 80 l/h) (SHEN ET AL, 2020).

Comparando el valor estimado por la ARE en el sistema híbrido hidráulico / diésel de la isla de Bellavista. 0,22 \$ USD / kWh y el valor calculado para la PCH del Parque Juan Curí de unos 0,3 \$ USD / kWh, se identifica un menor LCOE para el sistema híbrido. Una reducción de casi el 27% del LCOE entre un sistema puramente hidroeléctrico o un sistema hidroeléctrico / Diesel, aun cuando el sistema híbrido tiene una capacidad energética de producción menor al 20%.

9 BARRERAS Y OPORTUNIDADES DE LAS PCH EN COLOMBIA

En las áreas rurales, las tecnologías que son propiedad y operadas por las comunidades locales han mostrado ser efectivas en suministrar la energía y contribuir en el desarrollo de la comunidad, pero los factores técnicos, económicos y sociales dificultan la supervivencia de estos proyectos. Hoy muchos de los proyectos de energía de las ZNI operan por menos de un año, esto debido a problemas relacionados con falta de habilidades y conocimientos para mantener la operación de la planta y realizar los mantenimientos requeridos y bajas habilidades en la gestión de los recursos de estas plantas (DÁVILA RUEDA, 2022).

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 47 de 59

En Colombia, los proyectos de PCH al ser FNCER (Fuente no convencional de energía renovable) cuentan con varios beneficios y extensiones tributarias en pago de IVA, deducciones en el impuesto de la renta, deducción para la importación y compra de equipos e insumos y depreciación acelerada en sus equipos. Al igual que existe el mecanismo de aplicar depreciación acelerada de todos los equipos usados, la maquinaria y las obras civiles de estos proyectos tal como lo establece la ley 1715 de 2014.

La variación del recurso hídrico en Colombia depende de las temporadas de los fenómenos de la Niña, del Niño o por proyectos mineros. Es por esta variabilidad de los cauces y los caudales de los ríos que se puede afectar la sostenibilidad de los proyectos de PCH. Esto debido principalmente a que una variabilidad en los caudales del afluente genera una variabilidad en la energía producida y una variabilidad en la energía entregada en el sistema. Esto último es una barrera por inestabilidad que proporciona el sistema (ESCOBAR DÍAZ ET AL, 2018).

DÁVILA Y RUEDA (2022), evidencian que involucrar a la comunidad y disponer de un correcto conocimiento técnico, son factores clave para el éxito o fracaso de los proyectos en el largo plazo en las ZNI. Inicialmente, la comunidad debe participar activamente en la planeación del proyecto, y se debe gestionar adecuadamente una transferencia de conocimiento por parte de la planta generadora de energía con los operarios locales. Las herramientas y los conocimientos no solo se deben enfocar en los elementos técnicos, sino que por el contrario, son los elementos de gestión empresarial tales como contabilidad, sistema de cobros, gestión documental, planeación en las previsiones, inversión de talento, recursos tecnológicos, los que pueden garantizar una sostenibilidad y un éxito del proyecto a largo plazo (DÁVILA RUEDA, 2022).

RODRÍGUEZ Y ZABALA mencionan que se debe diseñar la planta del FNCER con la capacidad justa que tiene el sistema de integrar más generación o demanda sin perder continuidad del suministro y calidad de la potencia. El aumento de la demanda energética es un factor clave en la implementación de nuevos proyectos energéticos, ya que al instalarse sistemas con capacidad limitada de recursos naturales se puede presentar suspensión del servicio de energía eléctrica por periodos de tiempo determinados (RODRÍGUEZ ZABALA, 2022)

10 ANÁLISIS DE RIESGOS

Riesgo transporte El transporte de los insumos y materias primas requeridas para el diseño y montaje de una PCH es uno de los puntos claves para un proyecto exitoso. Debido a la carencia de infraestructuras y vías en buen estado que tienen las ZNI, existe un potencial riesgo de que el tiempo planeado para finalizar el montaje y operación del proyecto hidro energético no cumpla lo establecido inicialmente. Además de que existe un potencial riesgo de sobrecostos para llevar mercancía a estas zonas de Colombia (GALLEGO, J., 2015).

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 48 de 59

El Riesgo sociocultural surge de las diferencias sociales y culturales entre los promotores del proyecto, las autoridades locales ubicadas en las Zonas No Interconectadas y los trabajadores del proyecto. Este tipo de riesgo es considerado muy importante por los promotores de la inversión, ya que se puede traducir en un incremento de los costos como consecuencia de las quejas, reclamos, vandalismo o resistencia de las poblaciones locales a la ejecución del proyecto y presencia de actores armados en la zona (GALLEGO, J., 2015).

El riesgo económico surge de la posibilidad de un mal desempeño económico del proyecto, incluso si el proyecto está sustentado en buena tecnología y operando a carga normal. La rentabilidad de la PCH depende de un buen análisis económico, del pago oportuno por consumo de energía eléctrica. Incertidumbre por un cambio en las tasas de interés y tasa cambiaria de la moneda. Los cambios en las condiciones económicas del país pueden obligar a tomar decisiones de desistimiento del proyecto (CUNHA & FERREIRA, 2014).

El riesgo ambiental se presenta cuando los efectos del proyecto sobre el medio ambiente provocan retrasos en su desarrollo, estos vienen acompañados de estudios y licencias ambientales para medir el impacto sobre el ecosistema local (CUNHA & FERREIRA, 2014).

El Riesgo de construcción es la posibilidad de tener retrasos en la construcción, por no disponer del personal capacitado en la zona, disponer de materiales de menor calidad a la requerida, y otros surgidos por una mala planificación del proyecto (CUNHA & FERREIRA, 2014).

El riesgo político surge de cambios inesperados en la legislación vigente en las Zonas No Interconectadas, particularmente en el sector energético, estos cambios pueden favorecer o perjudicar las inversiones en estas zonas. (CUNHA & FERREIRA, 2014)

El riesgo tecnológico surge cuando la tecnología se vuelve obsoleta muy pronto o se comporta por debajo de sus especificaciones a lo largo de la vida del proyecto. Una pequeña reducción porcentual en el rendimiento de una turbina puede representar una gran pérdida de capital durante la vida del proyecto (CUNHA & FERREIRA, 2014).

El riesgo hidrológico se considera porque la producción de electricidad depende del caudal del río. Este riesgo depende en gran medida del cambio climático y como las estaciones afectan la estabilidad del cauce del afluente hídrico (CUNHA & FERREIRA, 2014).

Es debido al presente trabajo y a las coyunturas y particularidades que tienen las ZNI colombianas que adicionalmente el autor del presente trabajo de grado menciona los siguientes riesgos:

El riesgo del no pago, existe la posibilidad que después de superar todos los obstáculos, legales, logísticos y tecnológicos para completar el proyecto, pero que una vez en operación no se cuente con usuarios o

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 49 de 59

consumidores que paguen las facturas eléctricas. Este riesgo es relevante a considerar, debido a que es por la cultura del pago se desarrolla el futuro financiero del proyecto.

El riesgo del sostenimiento es la posibilidad de no disponer de la cultura del mantenimiento de las infraestructuras y la maquinaria. Este riesgo cobra vital importancia cuando se implementan proyectos con largos años de vida útil y se pretende tener en óptimas condiciones las instalaciones.

El riesgo de desastres naturales es la posibilidad del daño del proyecto por la ocurrencia de un desastre natural. Aunque ningún lugar de la tierra está exento al riesgo de un desastre natural, se tiene un impacto más negativo en los lugares donde no se tienen infraestructuras de mitigación de estos sucesos.

11 CONCLUSIONES

Actualmente existen pocas PCH en funcionamiento en las ZNI colombianas, esto debido principalmente a que los pobladores de estas zonas cuentan con pocos recursos económicos y se encuentran muy dispersos entre sí. Esta carencia de recursos y la dispersión geográfica, dificulta y encarece la distribución de la energía eléctrica producida hasta el usuario final, por lo que se debe seleccionar el lugar de la implementación de la PCH considerando los factores anteriormente mencionados.

La aprobación de la población local en los proyectos energéticos es fundamental para el buen desarrollo de este, es por ello por lo que se sugiere que antes de comenzar la obra y disponer de recursos en el lugar, se debe establecer mecanismos de dialogo y socialización para la aceptación de la PCH por parte de la comunidad.

En Colombia, existe un panorama legal favorable que promueve la implementación de PCH en las ZNI de Colombia, es por lo que se sugiere que antes de implementar un proyecto hidroeléctrico, se realicen las gestiones administrativas para acceder a los beneficios económicos y tributarios por parte del gobierno.

Las tecnologías utilizadas para el desarrollo de proyectos hidro energéticos son ampliamente conocidas en el territorio colombiano, pero se sugiere que para desarrollar nuevos proyectos de PCH implementar nuevas tecnologías (Como las turbinas de vórtice).

Los costos para la implementación de una PCH varían dependiendo de factores como la topografía del entorno, el caudal y la cabeza hidrostática del afluente. Pero se sugiere que para nuevos proyectos de PCH, se contemple el uso de sistemas híbridos para ampliar la capacidad de energía producida en diferentes condiciones climáticas (Como el sistema hidro / solar).

Se sugiere realizar estudios complementarios al presente trabajo, que aborden situaciones puntuales de desarrollo de PCH en ZNI.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 50 de 59

12 BIBLIOGRAFÍA

- ACOLGEN (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE GENERADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA). 2022. *Capacidad instalada en Colombia*. Acolgen, n.d. URL <https://acolgen.org.co/>
- ALRIKABI, N. K. M. A. (2014). *Renewable Energy Types*. *Journal of clean energy technologies*, 61–64. <https://doi.org/10.7763/jocet.2014.v2.92>
- ARIAS-GAVIRIA, J., VAN DER ZWAAN, B., KOBER, T., & ARANGO-ARAMBURO, S., 2017. *The prospects for small hydropower in Colombia*. *Renewable Energy*, 107, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.054>
- ASPRILLA MOSQUERA, D., 2016. *Estudio de sistemas híbridos de energía renovable (solar – Gasificación de biomasa) como alternativa para satisfacer necesidades energéticas en zonas no Interconectadas del departamento del Chocó*. Universidad Nacional de Colombia.
- BID. 2019. *PCHs Los Molinos S.A.S. E.S.P.* URL <https://idbinvest.org/es/projects/pchs-los-molinos-sas-esp> Miembro del Grupo del Banco Interamericano de Desarrollo
- BID. 2008. *Proyecto Hidroeléctrico Guanaquita*. URL <https://www.idbinvest.org/es/node/9548> Miembro del Grupo del Banco Interamericano de Desarrollo
- CADENA NÚÑEZ, J.G., LÓPEZ MANCILLA, J.P., FLÓREZ BASTO, J.C., 2015. *Estudio de factibilidad para la construcción de una pequeña central hidroeléctrica (PCH) para el parque ecológico Juan Curí ubicado en zona rural del municipio del Paro Santander*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- CCENERGÍA (CÁMARA COLOMBIANA DE LA ENERGÍA). 2019. *Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014*. URL <https://www.ccenergia.org.co/guiapRACTICA-para-la-aplicacion-de-los-incentivos-tributarios-de-la-ley-1715-de-2014/>
- CASTILLO MUÑOZ, J.F., 2019. *Estudio para generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento eficiente de biomasa forestal en estado sólido para zonas no interconectadas del pacífico nariñense*. Universidad nacional de Colombia.
- CASTRO. A. 2006. *Minicentrales hidroeléctricas*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid.
- CELIS, T. 2013. *Aprobaron licencia a brasileña que hará hidroeléctrica entre Caldas y Risaralda*. URL <https://www.larepublica.co/empresas/aprobaron-licencia-a-brasilena-que-hara-hidroelectrica-entre-caldas-y-risaralda-2038301> Diario La Republica
- CELSIA. 2018. *PCH San Andrés Avanza*. URL https://celsia.smk.agency/wp-content/uploads/2020/09/PCHSanAndres_avanza_abril2018_web.pdf Medio institucional de la pequeña central hidroeléctrica / Edición N° 2
- CELSIA. 2021. *Así funciona el Sistema Interconectado Nacional en Colombia*, URL <https://www.celsia.com/es/noticias/donaciones-entregadas-a-la-guajira/>
- CHIVOR. 2014. *Informe de sostenibilidad*. Coordinación de Comunicaciones AES Chivor URL

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 51 de 59

https://s3-us-west-2.amazonaws.com/ungc-production/attachments/89841/original/Informe_de_Sostenibilidad_2013_-_AES_Chivor.pdf?1403308916

COME-ZEBRA, E. I., VAN DER WINDT, H. J., NHUMAIO, G., & FAAIJ, A. P. C. (2021). *A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036>

CONPES. 1999. *Estrategia y acciones para la energización de las zonas no interconectadas del País N° 3055*. URL <https://vlex.com.co/vid/acciones-zonas-no-pais-370650958>

CORPOEMA. 2010. *Formulación de un plan de desarrollo Para las fuentes no convencionales de Energía en Colombia (pdfnce)* URL <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/994/Vol%203%20Tecnologia%20y%20Costos%20FNCE.pdf;jsessionid=6465F6F62500B5A65923DA3C39D32277?sequence=3>

CREG. 2022. *Funciones de la comisión de regulación de energía y gas*. URL <https://www.creg.gov.co/creg/quienes-somos/funciones-0/funciones>

CUNHA, J., FERREIRA, P. 2014. *A Risk Analysis of Small-Hydro Power (SHP) Plants Investments*. *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.* 2, 47–62. <https://doi.org/10.5278/>

DANE. 2018. *Story Map – Energía eléctrica series*. URL <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=2749922ca5f8469db9990986c02b1b93>

DÁVILA RUEDA, E. 2022. *Factores que afectan la supervivencia de los proyectos de energía eléctrica en las zonas no interconectadas: Lecciones para Colombia de la experiencia internacional*. Universidad Nacional de Colombia.

DE LA TORRE, MORENO, R., 2016. *Creación de una aplicación gráfica con Matlab para la caracterización y mejora de una turbina Kaplan*. Universidad de Jaén

ESCOBAR DÍAZ, A., CORTÉS-ARENAS, C.L., LEGUIZAMÓN-ARCHILA, J.S., 2018. *Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): una revisión*. *Visión Electrónica* 1, 111–126. <https://doi.org/10.14483/22484728.18366>

ESSA. 2022. *Essa inaugura nueva subestación río frío, para dar mayor confiabilidad al sistema eléctrico AMB*. URL <https://www.essa.com.co/site/blog/detalle-articulo/essa-inaugura-nueva-subestacion-rio-frio-para-dar-mayor-confiabilidad-al-sistema-electrico-del-amb>

EPSA. 2014. *Reporte integrado*. URL https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2021/02/reporte-integrado-epsa-2014_compressed.pdf

FLORES, F. ROZO, C. OVALLE, J. 2020. *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central*. Universidad Distrital Caldas.

FOROUZBAKHSH, F., HOSSEINI, S.M.H., VAKILIAN, M., 2007. *An approach to the investment analysis of small and medium hydro-power plants*. *Energy Policy* 35, 1013–1024. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.004>

FREEPNG. 2015. *Turbina De Flujo Cruzado*. URL <https://www.freepng.es/png-yj2fsj/>

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 52 de 59

GAITÁN, R. 1998. *Estudio de la construcción de la central hidroeléctrica de bahía solano*. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.

GALLEGO, J. 2015. *Políticas para el Aprovechamiento del Potencial Hidroenergético en Colombia Mediante Pequeñas Centrales*. Universidad Nacional de Colombia

GARZÓN HIDALGO, D., SAAVEDRA-MONTES, A.J., 2017. *Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia*. *Tecnológicas* 20, 39–53. <https://doi.org/10.22430/22565337.687>

GENMAS. 2016. *Solicitud de información para precalificación de posibles Proponentes*. URL https://www.genmas.com.co/images/pdf/contraraciones/encurso/Precalificacion_EQUIPOS_PENDE_RISCO_I_Y_CONDE_revisiones.pdf

GENMAS. 2018. *La PCH Juan García es una realidad*. URL <https://www.genmas.com.co/2016-01-08-20-52-54/noticias/281-la-pch-juan-garc%C3%ADa-es-una-realidad>

GEXIQ. 2016. *El tornillo de Arquímedes o la magia de la espiral*. URL <http://gexiq.com/el-tornillo-de-arquimedes-o-la-magia-de-la-espiral/>

GONZÁLEZ, S.M., CARVAJAL, L.E.C., MARTÍNEZ, G.L., 2011. *Pico Hydroelectric (pCH): an energetic alternative in non-interconnected zones in Colombia*. Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central

GONZÁLEZ-MONTOYA, D., RAMOS-PAJA, C.A., POTOSÍ-GUERRERO, B.A., HENAO-BRAVO, E.E., SAAVEDRA-MONTES, A.J., GONZÁLEZ-MONTOYA, D. 2018. *Análisis de factibilidad técnico-económico de micro redes que integran celdas de combustible en zonas no interconectadas de Colombia*. *Tecnológicas* 21, 71–89. <https://doi.org/10.22430/22565337.1057>

GTRONIC (CONCORSO ENERGÍA IN GIOCO). 2016. *Distribuidor ajustable Kaplan*. URL http://www.gtronic.it/energiaingioco/it/Produzione/turbina_kaplan_more.html

HERNÁNDEZ, H. 2016. *Informe de gestión 2007*. URL <https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2021/02/informe-anual2007.pdf> Comunicación de EPSA

JG. 2022. *Proyectos hidroeléctricos*. URL <https://jgrepresentaciones.com.co/home/index.php/proyectos-hidroelectricos/> Minería y obras civiles

LAYTON, J. 2019. *Central hidroeléctrica El Edén empezó a producir*. URL <https://www.lapatria.com/economia/central-hidroelectrica-el-eden-empezo-producir-352466> Diario la patria

LIU, D., LIU, H., WANG, X., and Kremere, E. 2019. *World Small Hydropower Development Report 2019: Case Studies*. United Nations Industrial Development Organization; International Center on Small Hydro Power. Available from www.smallhydroworld.org.

LÓPEZ, ALEXANDER. 2011. *Diferentes tipos de turbinas hidroeléctricas*. SMI Energ. Renov. URL <https://smienergias.wordpress.com/2011/05/22/diferentes-tipos-de-turbinas-hidroelectricas/>

LUZMA. 2014. *Proyecto PCH luzma I y PCH luzma II Amalfi - Antioquia*. URL <https://es.slideshare.net/mayabotero2011/presentacin-junta-de-avance> SP Ingenieros.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 53 de 59

- IDEA. 2018. *Entra en operación PCH San José de la Montaña*. URL <https://www.idea.gov.co/Paginas/PCH-San-Jose-.aspx>
- IGAC. 2021. El nuevo atlas digital de Colombia ya ha registrado más de 68.000 visitas. URL <https://www.igac.gov.co/es/noticias/el-nuevo-atlas-digital-de-colombia-ya-ha-registrado-mas-de-68000-visitas>. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IPSE. 2021. *Contexto General de la Colombia No Interconectada – IPSE-SIGIPSE*. URL <https://ipse.gov.co/sigipse/contexto-general-de-la-zni/>
- IPSE. 2022a. *Caracterización de Usuarios no Interconectados – IPSE-SIGIPSE*. URL <https://ipse.gov.co/sigipse/caracterizacion-de-usuarios-no-interconectados/>.
- IPSE.2022b. *Caracterización Energética de las ZNI – IPSE-CNM*. URL <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>
- IPSE.2022c. *Manual de funciones del IPSE*. URL <https://ipse.gov.co/mapa-del-sito/ipse/direccionamiento-estrategico/manual-de-funciones/>
- LANIYI, L. 2018. *Resource assessment and feasibility study for the generation of hydrokinetic power in the tailwaters of selected hydropower stations in Nigeria*. Horizontal and vertical axis hydrokinetic turbines. Water Science
- MINEROS. 2007. *1922 – 2015 providencia, 93 años pura vida*. URL https://issuu.com/mineros/docs/providencia_93_an__os_de_pura_energ
- MME. 2007. *Pequeña Central Hidroeléctrica Bahía Solano*. Gensa.
- MME.2022. *Funciones del Ministerio de minas y energía*. <https://www.minenergia.gov.co/es/ministerio/estructura-organizacional/funciones/#:~:text=Formular%2C%20adoptar%2C%20dirigir%20y%20coordinar,de%20minerales%2C%20hidrocarburos%20y%20biocombustibles>.
- MOHADED M. 2018. *DISEÑO DE UNA MICROTURBINA TURGO*. Universidad Nacional de Cordoba
- OGAYAR, B., VIDAL, P.G., 2009. *Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant*. Renew. Energy 34, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.039>
- OKOT, D.K., 2013. *Review of small hydropower technology*. Renew. Sustain. Energy Rev. 26, 515–520. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.006>
- OLAYA, Y. ARANGO, S. LARSEN, E. 2015. *How capacity mechanisms drive technology choice in power generation: The case of Colombia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.065>
- PACHECO, N. TORRES, J. 2021. *Prefactibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en el Embalse del Sisga, Cundinamarca*. Universidad Libre. <https://doi.org/10.21789/22561498.1785>
- PASALLI, Y.R., REHIARA, A.B., 2014. *Design Planning of Micro-hydro Power Plant in Hink River*. Procedia Environ. Sci., the 4th International Conference on Sustainable Future for Human Security SUSTAIN 2013 20, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.009>

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 54 de 59

- PRESIDENCIA. 2007. *Cupica ya tiene energía eléctrica las 24 horas*. Noticias SNE.
URL. http://historico.presidencia.gov.co/prensa_new/sne/2005/agosto/06/02062005.htm
- PRESIDENCIA. 2007. *Cupica ya tiene energía eléctrica las 24 horas*. Noticias SNE.
URL. http://historico.presidencia.gov.co/prensa_new/sne/2005/agosto/06/02062005.htm
- RAIGOSO RUBIO, A. 2012. *Con inversión de \$127.000 millones, Celsia puso a operar Hidromontañas*. URL <https://www.larepublica.co/empresas/con-inversion-de-127-000-millones-celsia-puso-a-operar-hidromontanitas-2012922> Diario La Republica
- RAMÍREZ, C. ARANGO, L. SALAZAR, W. 2019. *Retos e impactos de las Pchs como fuentes variables*. URL <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2020/11/Presentaci%C3%B3n-HMV-RETOS-E-IMPACTOS-PCH-COMO-FUENTES-VARIABLE.pdf> HMV Ingenieros
- ROMERO SÁNCHEZ, J. 2020. *Estudio de Factibilidad técnico- económica para la instalación de microturbinas de gas para la energización del grupo 4 de las ZNI (Rio Meta y Casanare)*. Universidad Nacional de Colombia.
- SÁNCHEZ, R. 2018. *Conozca el mapa de la desigualdad del ingreso en Colombia*. Periódico Universidad Nacional de Colombia.
- SGS. 2022. *Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad*. URL http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- SHEN, W., CHEN, X., QIU, J., HAYWARD, J. A., SAYEEF, S., OSMAN, P., MENG, K., & DONG, Z. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110301>
- SIMEC. 2021. *Plan de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica - PECOR*. URL http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion_Cobertura_Energia.pdf
- SSPD. 2018. *Evaluación integral de prestadores La cascada*. URL https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/evaluacion_integral_de_prestadores_la_cascada_2017_0.pdf
- SSPD. 2020. *Funciones SSPD*. URL <https://www.superservicios.gov.co/Nuestra-entidad/Quienes-somos/funciones>
- STRUCTURE. 2007. *Pequeña Central Hidroeléctrica “Coello”*. URL <https://slideplayer.es/slide/4407995/>
- U.N. 2021. *Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*. URL <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- UPME. 2013. *Funciones y deberes UPME*. URL <https://www1.upme.gov.co/Entornoinstitucional/Paginas/Funciones-y-deberes.aspx>
- UPME. 2015. *Primer Atlas hidroenergético revela gran potencial en Colombia*. URL <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>
- UPME. 2019a. *Transmisión plan actual*. URL <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas>

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	TRABAJO FINAL MAESTRÍA	Código:
	IMPLEMENTACIÓN DE PCH PARA ELECTRIFICAR ZNI DE COLOMBIA	Versión: 1
		Página: 55 de 59

UPME. 2019b. *Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución.* URL https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_sustitucion_progresiva_Lena.pdf

UPME. 2011. *Guía formulación y presentación de proyectos fondos FAER, FAZNI y PRONE.* URL <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/817>

VERREYDT, J. SLACHMUYLDERS, G. BERBEN, L. 2020. *Turbulent Whirling words into action.* URL <https://cdn.uc.assets.prezly.com/87999096-b9da-472b-aa8a-8ae5b04a4edc/-/inline/no/press-kit-20200211.pdf>. PRESS KIT.

VERGARA, F. 2020. *Actualización del inventario de PCHs en Colombia en una herramienta computacional para visualización web.* Universidad de La Salle

WILLIS TOWERS. 2018. *Presentación Corporativa.* URL <http://gunion.com/wp-content/uploads/2019/01/1-Presentacion-Willis-Towers-Watson-20181219.pdf>

XM. 2021a. *Operación del SIN.* URL <https://informeannual.xm.com.co/informe/pages/xm/23-caracteristicas-tecnicas-del-sin.html>

XM. 2021b. *Demanda de energía nacional.* URL <https://informeannual.xm.com.co/informe/pages/xm/20-demanda-de-energia-nacional.html>

XM. 2022. *La generación de energía fue de 6276.74 GWh.* URL <https://www.xm.com.co/noticias/4630-la-generacion-de-energia-en-enero-fue-de-627674-gwh#:~:text=En%20promedio%20durante%20el%20mes,fue%20de%20203.80%20GWh%2Dd%C3%ADa.>



13 ANEXO 1

Listado actual de las PCH, su capacidad y tecnología utilizada.

Nombre PCH	Capacidad MW	Departamento	Municipio	Fecha de entrada	Tecnología
RIO CALI	1.8	Valle del Cauca	Cali	01/01/1925	2 Pelton
SAN CANCIO	2	Caldas	Manizales	01/01/1929	2 Francis
PATICO - LA CABRERA	1.48	Cauca	Popayán	01/01/1930	2 Francis
ASNAZU	0.45	Cauca	Suarez	01/01/1934	
CARACOLI	2.6	Antioquia	Caracolí	01/01/1935	2 Francis
EL BOSQUE	2.28	Quindío	Armenia	01/01/1935	2 Francis
MUNICIPAL	1.4	Caldas	Manizales	01/01/1935	2 Francis
UNION	0.7	Quindío	Calarcá	01/01/1935	2 Pelton
BELMONTE	3.4	Risaralda	Pereira	01/01/1939	2 Pelton
OVEJAS	0.82	Cauca	Buenos Aires	01/01/1939	2 Pelton
NIMA	6.7	Valle del Cauca	Cali	01/01/1942	2 Pelton
JULIO BRAVO	1.5	Nariño	Pasto	01/01/1942	2 Francis
BAYONA	0.6	Quindío	Calarcá	01/01/1943	2 Pelton
RIOFRIO (TAMESIS)	1	Antioquia	Támesis	01/01/1951	2 Francis
PALMAS SAN GIL	15	Santander	San Gil	01/01/1954	3 Francis
CASCADA	3	Santander	Bucaramanga	01/01/1954	2 Francis
RIO FRIO I	1.67	Valle del Cauca	Rio frio	01/01/1954	1 Pelton
RIO SAPUYES	1.65	Nariño	Taqueras	01/01/1954	1 Pelton
IQUIRA I	4.32	Huila	Aquera	01/01/1955	2 Pelton
RIOGRANDE I	19	Antioquia	Don Matías	01/01/1956	
CAMPESTRE (CALARCA)	0.7	Quindío	Calarcá	01/01/1956	2 Francis
VENTANA A	2.5	Tolima	Chícora	01/11/1957	3 Francis
VENTANA B	2.5	Tolima	Chícora	01/11/1957	2 Pelton
MONDOMO	0.75	Cauca	Santander De Quilichao	01/01/1958	2 Francis
RIO RECIO	0.984	Tolima	Lérida	01/11/1958	2 Pelton
RIO BOBO	4	Cauca	Santa Rosa	01/01/1960	
RIO PALO	1.44	Cauca	Caloto	01/01/1960	1 Francis
IQUIRA II	5.4	Huila	Aquera	01/01/1965	2 Francis
LA PITA	1.42	Huila	Garzón	01/01/1965	
PRADO IV	5	Tolima	Prado	01/03/1973	1 Pelton
INTERMEDIA	0.96	Caldas	Manizales	01/01/1974	1 Pelton
FLORIDA	19.9	Cauca	Popayán	01/01/1975	1 Pelton
RIONEGRO	10.2	Cundinamarca	Puerto Salgar	01/01/1975	1 Pelton
AUTOG AYURA	16.7	Antioquia	Envigado	26/10/1983	2 Francis
MANANTIALES	3.15	Antioquia	Bello	01/01/1992	1 Francis
GUACAICA	0.86	Caldas	Neira	01/01/1992	
NIQUIA	19	Antioquia	Bello	28/06/1993	2 Francis
NUEVO LIBARE	5.1	Risaralda	Dos Quebradas	01/01/1994	
SILVIA	0.38	Cauca	Silvia	01/01/1994	1 Francis
SAJANDI	3.2	Cauca	Patía (El Bordo)	01/01/1995	1 Francis
RIO MAYO	19.8	Nariño	San Pablo	20/07/1995	



INSULA	19	Caldas	Chinchiná	20/07/1995	
RIO FRIO II	10	Valle del Cauca	Rio frío	01/01/1996	1 Pelton
CAMPESTRE (EPM)	0.87	Antioquia	Medellín	01/01/1997	1 Francis
NUTIBARA	0.75	Antioquia	Medellín	01/01/1997	
AMERICA	0.41	Antioquia	Medellín	01/01/1997	
BELLO	0.35	Antioquia	Bello	01/01/1997	1 Pelton
RUMOR	2.5	Valle del Cauca	Tuluá	01/01/1999	1 Francis
PAJARITO	13.2	Antioquia	Yaruma	25/11/1999	
RIO PIEDRAS	19.9	Antioquia	Jericó	31/03/2000	1 Pelton
COCONUCO	4.5	Cauca	Popayán	27/09/2000	
PUENTE GUILLERMO	4.2	Santander	Puente Nacional	01/09/2001	
SUEVA 2	6	Cundinamarca	Junín	24/05/2002	2 Pelton
SONSON	18.5	Antioquia	Son son	01/06/2002	
CHARQUITO	19.4	Cundinamarca	Soacha	22/08/2003	2 Francis
SAN JOSE	0.38	Caldas	Pensilvania	16/11/2003	
EL LIMONAR	18	Cundinamarca	San Antonio de Tena	06/12/2003	2 Francis
PASTALES	0.7	Tolima	Pastales	18/02/2004	1 Pelton
LA HERRADURA	19.8	Antioquia	Canas gordas	03/09/2004	2 Francis
MIROLINDO	3.75	Tolima	Ibagué	03/11/2004	2 Pelton
LA VUELTA	11.6	Antioquia	Canas gordas	22/11/2004	1 Francis
SANTA ANA	8	Cundinamarca	Ubalá	09/06/2005	1 Francis
CALDERAS	19.9	Antioquia	San Carlos	30/06/2006	1 Francis
LA CASCADA (ANTIOQUIA)	2.3	Antioquia	San Roque	17/07/2007	
PENDERISCO	19.09	Antioquia	Urao	30/07/2007	2 Francis
SAN JOSE DE LA MONTAÑA	0.4	Antioquia	S. Josela Monta	30/07/2007	2 Francis
AMALFI	0.81	Antioquia	Amalfi	05/08/2007	1 Francis
LA CASCADA (ABEJORRAL)	3	Antioquia	Abejorral	17/09/2007	1 Francis
REMEDIOS	0.75	Antioquia	Remedios	19/09/2007	1 Francis
RIO GRANDE	0.3	Antioquia	Don Matías	01/12/2007	1 Francis
AGUA FRESCA	7.29	Antioquia	Jericó	10/04/2008	1 Francis
INZA	0.75	Cauca	Inza	05/02/2009	
CARUQUIA	9.5	Antioquia	Santa Rosa de Osos	28/01/2010	
GUANAQUITAS	9.5	Antioquia	Santa Rosa de Osos	30/06/2010	1 Pelton 1 Francis
SANTA RITA	1.3	Antioquia	Andes	18/08/2010	
CURRUCUCUES	1.25	Tolima	Rovira	18/08/2010	
AMAIME	19.17	Valle del Cauca	Palmira	06/01/2011	
SANTIAGO	2.8	Antioquia	Santo Domingo	08/01/2011	2 Francis
ALTO TULUA	19.9	Valle del Cauca	Tuluá	28/05/2012	1 Pelton
HIDROMONTAÑITAS	19.9	Antioquia	Don Matías	14/06/2012	
BARROSO	19.9	Antioquia	Salgar	30/11/2012	
SAN FRANCISCO (PUTUMAYO)	0.52	Putumayo	San Francisco	15/12/2012	1 Francis
SUBA	2.6	Bogotá D.E.	Suba	15/04/2013	1 Francis
USAQUEN	1.8	Bogotá D.E.	Usaquén	15/04/2013	
EL POPAL	19.9	Antioquia	Cocona	31/03/2014	2 Pelton
LA REBUSCA	0.7	Antioquia	San Roque	24/07/2014	1 Francis



LA NAVETA	4.8	Cundinamarca	Apuro (R. Reyes)	27/11/2014	
BAJO TULUA	19.9	Valle del Cauca	Tuluá	30/01/2015	1 Kaplan
PROVIDENCIA	4.9	Antioquia	Anori	30/09/2015	2 Pelton
PORCE III MENOR	1.8	Antioquia	Anori	25/04/2016	2 Turgo
GUAVIO MENOR	9.9	Cundinamarca	Ubala	27/04/2016	1 Francis
LA FRISOLERA	0.47	Caldas	Salamina	29/04/2016	
EL COCUYO	0.7	Valle del Cauca	Versalles	20/05/2016	1 Pelton
TUNJITA	19.7	Boyacá	Tunja	30/06/2016	1 Francis
MORRO AZUL	19.9	Risaralda	Belén de Umbria	10/09/2016	1 Francis
COELLO	1.2	Tolima	Coello	10/12/2016	1 Francis
MAGALLO	5.7	Antioquia	Concordia	22/12/2016	1 Pelton
EL EDEN	19.9	Caldas	Pensilvania	02/03/2017	1 Francis
ALEJANDRIA	15	Antioquia	Alejandría	02/03/2017	
EL MOLINO	19.9	Antioquia	Cocona	19/04/2017	1 Francis
SAN MATIAS	19.9	Antioquia	Cocona	25/04/2017	2 Francis
CANTAYUS	4.32	Antioquia	Cisneros	20/05/2017	
LAS PALMAS	2.8	Antioquia	Santa Rosa de Osos	30/08/2017	
LUZMA I	19.6	Antioquia	Amalfi	07/10/2017	1 Francis
LUZMA II	19.6	Antioquia	Amalfi	07/10/2017	1 Francis
TEQUENDAMA 1	14.2	Cundinamarca	San Antonio de Tena	03/04/2018	1 Francis
TEQUENDAMA 2	14.2	Cundinamarca	San Antonio de Tena	03/04/2018	2 Francis
TEQUENDAMA 3	14.2	Cundinamarca	San Antonio de Tena	03/04/2018	1 Francis
TEQUENDAMA 4	14.2	Cundinamarca	San Antonio de Tena	03/04/2018	1 Francis
JUAN GARCIA	4.52	Antioquia	Liberiana	12/09/2018	1 Pelton
SAN JOSE DE LA MONTAÑA II	1.1	Antioquia	S. Mosela Monta	06/10/2018	1 Francis
AURES BAJO	19.4	Antioquia	Son son	12/12/2018	
MULATOS II	7.34	Antioquia	Bolombolo	26/08/2019	
PCH LA LIBERTAD	1.2	Boyacá	Toca	14/03/2020	1 Francis
SAN ANDRES DE CUERQUIA	19.9	Antioquia	San Andrés	11/06/2020	1 Francis
HIDROBARRANCAS	4.7	Antioquia	Dabeiba	26/11/2020	1 Francis
POCUNE	1	Antioquia	Remedios	31/12/2020	2 Francis
LAS VIOLETAS	0.945	Antioquia	San Roque	30/03/2022	2 Francis



14 ANEXO 2

Listado de costos al 2022 de algunas PCH colombianas en \$ COP.

Nombre PCH	Departamento	Municipio	Numero empleados	Caudal m3/s	inversión al 2022 (Billones COP)	Referencia
HIDROMONTAÑITAS	Antioquia	Don Matias	300		\$197,37	RAIGOSO. 2012
SAN ANDRES DE CUERQUIA	Antioquia	San Andres	150	5.0	\$229,48	CELSIA. 2018
ALTO TULUA	Valle del Cauca	Tulua	58		\$176,60	EPSA. 2014
BAJO TULUA	Valle del Cauca	Tulua	58		\$217,31	EPSA. 2014
EL EDEN	Caldas	Pensilvania		5.6	\$188,69	LAYTON, J. 2019
EL MOLINO	Antioquia	Cocorna		10.0	\$328,31	BID. 2019
SAN MATIAS	Antioquia	Cocorna		10.0	\$328,31	RAMÍREZ ET AL. 2019
BARROSO	Antioquia	Salgar	29	6.2	\$124,33	RAMÍREZ ET AL. 2019
MORRO AZUL	Risaralda	Belen de Umbria		18.2	\$108,91	CELSIS. 2013
TUNJITA	Boyacá	Tunja	500		\$82,19	CHIVOR. 2014
LUZMA I	Antioquia	Amalfi		5.5	\$337,85	LUZMA. 2014
AMAIME	Valle del Cauca	Palmira			\$171,47	HERNÁNDEZ. 2016
PENDERISCO	Antioquia	Urrao		30.0	\$283,82	GENMAS. 2016
ALEJANDRIA	Antioquia	Alejandria		16.6	\$150,95	JG. 2022
RIO FRIO II	Valle del Cauca	Riofrio	126		\$293,32	ESSA. 2022
CARUQUIA	Antioquia	Santa Rosade Osos		6.3	\$50,94	RAMÍREZ ET AL. 2019
GUANAQUITAS	Antioquia	Santa Rosade Osos		5.8	\$51,94	BID. 2008
MULATOS II	Antioquia	Bolombolo			\$88,28	WILLIS TOWERS. 2018
PROVIDENCIA	Antioquia	Anori		7.0	\$190,50	MINEROS. 2007
HIDROBARRANCAS	Antioquia	Dabeiba			\$25,82	WILLIS TOWERS. 2018
JUAN GARCIA	Antioquia	Liborina	120	2.0	\$49,93	GENMAS. 2018
COCONUCO	Cauca	Popayan			\$20,44	CORPOEMA. 2010
LA CASCADA (ABEJORRAL)	Antioquia	Abejorral	12		\$21,09	SSPD. 2018.
LA CASCADA (ANTIOQUIA)	Antioquia	San Roque	12	3.1	\$21,09	RAMÍREZ ET AL. 2019
COELLO	Tolima	Coello		14.0	\$14,30	STRUCTURE. 2007
SAN JOSE DE LA MONTAÑA II	Antioquia	S. Josela Monta	60	3.8	\$16,08	IDEA. 2018