



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN
Y POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

“Estudio del aprovechamiento de los recursos hídricos locales
mediante la evaluación de la viabilidad de sistemas de energía hidroeléctrica
de pequeña escala”

Trabajo de titulación para obtener el título de
Magíster en ingeniería ambiental con mención en recursos hídricos

AUTOR:

Ing. Andrés Eduardo Mena Maldonado

TUTOR:

Ing. Lenin Santiago Orozco Cantos Mgs.

Riobamba, Ecuador. 2025

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Andrés Eduardo Mena Maldonado**), con número único de identificación **060391571-1**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: **“Estudio del aprovechamiento de los recursos hídricos locales mediante la evaluación de la viabilidad de sistemas de energía hidroeléctrica de pequeña escala.”** previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería ambiental con mención en Recurso hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 24 de octubre de 2025



ANDRÉS EDUARDO MENA
MALDONADO

Ing. Andrés Eduardo Mena Maldonado

N.U.I. 060391571-1

Acta de Culminación de Trabajo de Titulación

En calidad de miembros del Tribunal designados por la Comisión de Posgrado, CERTIFICAMOS que una vez revisado el Trabajo de titulación bajo la modalidad Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado “Estudio del Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Locales mediante la Evaluación de la Viabilidad de Sistemas de Energía Hidroeléctrica de Pequeña Escala”, dentro de la línea de investigación de Ambiente y Biodiversidad, presentado por el maestrante Mena Maldona Andres Eduardo, portador de la CC. 060391571-1, del programa de Maestría en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que podemos certificar en honor a la verdad.

Riobamba, 23 de octubre de 2025

Atentamente



Mgs. Lenin Orozco Cantos
TUTOR



Mgs. Iván Ríos García
MIEMBRO DEL
TRIBUNAL 1



Mgs. Carla Silva Padilla
MIEMBRO DEL
TRIBUNAL 2

Certificado de contenido de similitud

Riobamba, 10 de noviembre de 2025

C E R T I F I C A D O

De mi consideración: Yo Lenin Santiago Orozco Cantos, certifico que Andrés Eduardo Mena Maldonado con cédula de identidad No. 0603915711 estudiante del programa de maestría en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos hídricos, cohorte Primera (2023-2024), presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada/desarrollo denominado: “*ESTUDIO DE APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS LOCALES MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE SISTEMAS DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA DE PEQUEÑA ESCALA*” el mismo que fue sometido al sistema de verificación de contenido de similitud de contenido COMPILATIO identificando el porcentaje de similitud (siendo menor al 10%) en el texto. Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad. Atentamente,



Ing. Lenin Santiago Orozco Cantos Mgs

CI: 0603761032

Dedicatoria

Dedico este trabajo de manera muy especial a mi madre que es mi razón de vivir y me bendice con su amor incondicional, mis hermanas, mi padre y al nuevo miembro de la familia Matías por motivarme con la bendición de la nueva y prospera vida que tiene por delante, a mi familia por su inquebrantable apoyo, amor ilimitado y constante motivación a lo largo de esta travesía académica. Su aliento, su ayuda y sacrificio han sido la fuerza que me impulso a alcanzar este logro. A la persona que siempre creyó en mí a pesar de las dificultades. A todos ustedes, les dedico con cariño y agradecimiento esta gran etapa de mi vida.

Andrés Eduardo Mena Maldonado

Agradecimiento

En primer lugar, agradecer a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría para culminar este proyecto. A mi familia razón de ser del esfuerzo y dedicación en esta investigación. Agradecer de manera especial a mi tutor Ing. Mgs. Lenin Orozco, por su invaluable orientación, apoyo durante el proceso de elaboración de esta investigación.

Agradecer a la Universidad Nacional de Chimborazo por brindarme la oportunidad de una educación superior de calidad y de forjarme como profesional.

No puedo dejar de mencionar a los amigos y compañeros que me brindaron su apoyo incondicional y contribuyeron de diversas formas mediante su ánimo, motivación y colaboración que fueron pilares fundamentales en este arduo camino. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental en la culminación de esta investigación y etapa importante en mi vida académica.

Gracias a la vida por permitirme avanzar en mi camino que espero siga siendo de éxitos.

Andrés Eduardo Mena Maldonado

Índice General

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	ii
Acta de Culminación de Trabajo de Titulación	iii
Certificado de contenido de similitud	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice General	vii
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract	xiv
Introducción	15
Capítulo 1	17
Generalidades.....	17
1.1. Planteamiento del problema.....	17
1.2. Justificación de la Investigación	19
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo General	21
1.3.2. Objetivos Específicos	21
Capítulo 2	22
Estado del Arte y la Practica	22
2.1. Antecedentes Investigativos.....	22
2.2. Fundamentación Legal.....	28
2.3. Fundamentación Teórica.....	32
2.3.1. Fundamentos de la energía hidroeléctrica	32
2.3.1.1. Principios físicos del aprovechamiento hídrico.....	32
2.3.1.2. Energía hidráulica como fuente renovable.	35

2.3.1.3. Alternativa de energía a través de hidroeléctricas de pequeña escala.	35
2.3.2. Componentes principales de un sistema hidroeléctrico	36
2.3.2.1. Obras de captación y presas.	37
2.3.2.2. Canal o conducción hidráulica.	37
2.3.2.3. Cámara de carga y tubería forzada.....	37
2.3.2.4. Turbina.	38
2.3.2.5. Generador eléctrico.	40
2.3.2.6. Sistema de regulación y control.	40
2.3.2.7. Sistema de transmisión y distribución.	41
2.3.3. Hidroeléctricas de pequeña escala (PCH)	41
2.3.3.1. Definición y ventajas frente a grandes centrales.	41
2.3.3.2. Clasificación técnica por potencia instalada.....	42
2.3.3.3. Demanda energética local.	42
2.3.3.4. Aplicaciones en zonas rurales y no interconectadas.....	43
2.3.4. Características a considerar para la selección de sistemas hidráulicos de pequeña escala.....	45
2.3.5. Parámetros técnicos de diseño en PCH	45
2.3.5.1. Caudal de diseño.....	46
2.3.5.2. Altura neta.	47
2.3.5.3. Potencia instalada.	49
2.3.5.4. Potencia disponible.....	49
2.3.5.5. Tipo de turbina.	49
2.3.5.6. Factores de carga y demanda.....	51
2.3.5.7. Pérdidas en conducción.	51
2.3.5.8. Generadores Eléctricos en Hidro sistemas.	52
2.3.5.9. Sistemas De Transmisión De Potencia Mecánica.	52
2.3.5.10. Líneas de Transmisión y Redes de Distribución.	52

2.3.5.11. Ubicación de la Central Hidroeléctrica.	53
2.3.5.12. Obras civiles de una pequeña central hidroeléctrica.	53
2.3.5.13. Tuberías de Conducción.....	54
2.3.5.14. Bocatoma de fondo.....	54
2.3.5.15. Desarenador y Cámara de Carga.	55
2.3.5.16. Tubería de Presión.	55
2.3.5.17. Válvulas Para Tuberías de Presión.	55
2.3.5.18. Apoyos y anclajes para tuberías de presión.....	55
2.3.6. Criterios para selección y viabilidad de una PCH.....	55
2.3.6.1. Parámetros mínimos requeridos.....	56
2.3.6.2. Limitaciones y barreras frecuentes.	56
2.3.7. Metodologías de análisis en proyectos hidroeléctricos	57
2.3.7.1. Evaluación de recursos hídricos.....	57
2.3.7.2. Métodos de diagnóstico hidrológico y topográfico.	58
2.3.7.3. Análisis de prefactibilidad y factibilidad	58
2.3.7.4. Recursos Hídricos Y Su Aprovechamiento Sostenible.....	61
2.3.8. Enfoque de sostenibilidad y gestión integrada del agua.....	65
2.3.8.1. Rol de las PCH en la transición energética ecuatoriana.	66
Capítulo 3	68
Diseño Metodológico.....	68
3.1. Enfoque de la Investigación	68
3.2. Diseño de la Investigación.....	68
3.3. Tipo de Investigación	69
3.3.1. Por su alcance	69
3.4. Nivel de Investigación.....	69
3.5. Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos.....	70
3.6. Parámetros de diseño de una pequeña central hidroeléctrica.....	71

3.7.	Selección y análisis de casos de estudio.....	72
3.7.1.	Criterios de selección de casos	72
3.7.2.	Procedimiento de análisis de información y sistematización de casos	
	75	
Capítulo 4		78
Análisis y Discusión de Resultados.....		78
4.1.	Análisis Descriptivo de los Resultados.....	78
4.1.1.	Revisión detallada de la literatura	78
4.1.2.	Selección De Casos De Estudio Representativos.....	80
4.1.2.1.	Caso 1: PCH en un afluente del río Guayas.....	83
4.1.2.2.	Caso 2: PCH de flujo libre río Zarapullo.	85
4.1.2.3.	Caso 3: Hidroeléctrica en la Universidad Estatal Amazónica.	86
4.1.2.4.	Caso 4: Predicción de generación de energía Illuchi II.	88
4.1.2.5.	Caso 5: Repotenciación de PCH el Amarillo en Portovelo.	89
4.1.2.6.	Caso 6: PCH en el río Chimbo.....	91
4.1.2.7.	Caso 7: PCH río Ambato.	92
4.1.2.8.	Caso 8: Central hidroeléctrica El Altar.	93
4.1.3.	Revisión de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala en marcha	
	102	
4.2.	Discusión de los Resultados.....	109
Capítulo 5		115
Conclusiones y Recomendaciones		115
5.1	Conclusiones	115
5.2	Recomendaciones.....	117
Referencias Bibliográficas		118

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparativo de Normativas Aplicables a Proyectos Hidroeléctricos de Pequeña Escala	30
Tabla 2 Ventajas y desventajas del uso de turbinas hidroeléctricas.	38
Tabla 3. Clasificación de PCH's según la CREG.....	42
Tabla 4. Clasificación de PCH's según la OLADE.....	42
Tabla 5. Cuencas hidrográficas del Ecuador con potencial para PCH	44
Tabla 6. Comparación de métodos directos de medición del salto hidráulico.	48
Tabla 7. Características principales de turbinas hidráulicas.	50
Tabla 8. Parámetros técnicos comunes en el diseño de PCH.	51
Tabla 9. Tensiones de líneas de transmisión y redes de distribución primaria recomendadas.	52
Tabla 10. Fases en la elaboración de proyectos hídricos.	58
Tabla 11. Centrales hidroeléctricas con potencias menores a 30 MW.	62
Tabla 12. Criterios de selección y exclusión de casos de estudio	73
Tabla 13. Resultados obtenidos de acuerdo a filtros	74
Tabla 14. Resumen de la metodología aplicada.	77
Tabla 15. Análisis de motores de búsqueda y bases de datos académicos	78
Tabla 16. Criterios de selección de casos de estudio.....	80
Tabla 17. Casos de estudio seleccionados.	81
Tabla 18. Matriz de comparación entre los casos de proyectos hidroeléctricos seleccionado.....	95
Tabla 19. Resumen de aspectos cuantificables de los casos de estudio.	98
Tabla 20. Resumen de proyectos hidroeléctricos de pequeña, micro y mini escala en el Ecuador.....	107

Índice de Figuras

Figura 1 Potencia instalada de los proyectos hidroeléctrico emblemáticos del país	34
Figura 2 Capacidad instalada de centrales hidroeléctricas en Ecuador	34
Figura 3 Flujograma del proceso de funcionamiento de una hidroeléctrica.....	36
Figura 4 Diseño de canal hidráulico	38
Figura 5. Brecha de cobertura en la zona rural y urbana del Ecuador.	43
Figura 6. Ubicación de proyectos hidroeléctricos del portafolio de CELEC.	45
Figura 7. Esquema de una PCH con embalse.	46
Figura 8. Esquema de una PCH de circuito cerrado	47
Figura 9. Diagrama de selección de Turbinas Hidráulicas.	50
Figura 10. Componentes de una pequeña central hidroeléctrica tipo	54
Figura 11. Régimen del caudal ecológico anual.	60
Figura 12. Diagrama de selección entre opciones de acuerdo al salto neto y el caudal del estudio en el río Guayas.....	84
Figura 13. Interfaz software HCANALES para el estudio en el río Zarapullo.	86
Figura 14. Comportamiento anual del río Puyo.....	87
Figura 15. Comparativa de potencia generada real kW.h versus los modelos ARIMA matemático y RNA redes neuronales artificiales.	88
Figura 16. Condición al 2019 de la turbina Pelton en la PCH El Amarillo.....	90
Figura 17. Bosquejo de la PCH en el río Chimbo.	91
Figura 18. Esquema de diseño de la PCH en el tramo del canal de riego Ambato- Huachi-Pelileo.	93
Figura 19. Esquema de la instalación de la PCH El Altar.....	94
Figura 20. Potencia instalada vs potencia efectiva de los casos de estudio.....	99
Figura 21. Inversión en millones de dólares por caso de estudio.....	99
Figura 22. Potencia anual efectiva comparada con la potencia anual real estimada	100
Figura 23. Producción de energía bruta del SIN en el 2024.....	101

Figura 24. Diferencia de toneladas de CO ₂ *GWh.año emitidas entre termoeléctricas vs hidroeléctricas.	102
--	-----

Resumen

El estudio evaluó el potencial de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala (PCH) en Ecuador para optimizar el uso de recursos hídricos locales y ampliar el suministro eléctrico en comunidades con limitaciones. Con un enfoque de métodos mixtos, se combinó análisis cuantitativo de datos hidrológicos y económicos con una revisión cualitativa de políticas, normativas y estudios de caso. Los resultados muestran eficiencias de 85–97 %, potencias efectivas de 0,03–9,00 MW y energías anuales por proyecto de 0,30–78,84 GWh/año. En conjunto, la energía teórica asciende a 303,23 GWh/año; considerando un factor de capacidad del 40 %, la entrega estimada al Sistema Nacional Interconectado es 121,29 GWh/año ($\approx 0,4$ % del total nacional y 0,61 % de la hidroelectricidad en 2024). Las inversiones varían entre USD 1,80 y 16,92 millones, favoreciendo sitios con mejor relación salto-caudal y diseños estandarizados. Ambientalmente, la sustitución de generación térmica implicaría $\sim 148,74$ t CO₂ evitadas por año. Se concluye que las PCH analizadas son técnica y económicamente viables y contribuyen a la resiliencia y diversificación del sistema eléctrico, siempre que la planificación integre explícitamente el factor de capacidad, las pérdidas y los costos de obra.

Palabras clave: pequeñas centrales hidroeléctricas, factor de capacidad, energía anual, inversión, emisiones, SNI.

Abstract

This study assessed the potential of small hydropower plants (PCH) in Ecuador to optimize the use of local water resources and expand electricity supply in communities with limited access. Using a mixed-methods approach, we combined quantitative analysis of hydrological and economic data with a qualitative review of policies, regulations, and case studies. Results show overall efficiencies of 85–97%, effective capacities of 0.03–9.00 MW, and annual energy per project of 0.30–78.84 GWh/year. Taken together, theoretical energy totals 303.23 GWh/year; assuming a 40% capacity factor, the expected delivery to the National Interconnected System (SNI) is 121.29 GWh/year ($\approx 0.4\%$ of national total and 0.61% of hydropower in 2024). Investment requirements range from USD 1.80 to 16.92 million, favoring sites with stronger head–flow relationships and standardized designs. Environmentally, replacing thermal generation would avoid approximately 148.74 t CO₂ per year. We conclude that the analyzed PCH projects are technically and economically viable and contribute to system resilience and diversification, provided that planning explicitly incorporates the capacity factor, conversion losses, and infrastructure costs.

Keywords: small hydropower, capacity factor, annual energy, investment, emissions, SNI.



Reviewed by:

Mgs. Sofía Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

Introducción

En el país el crecimiento poblacional, junto con la creciente demanda de energía incrementando a 28,8% en estos últimos años, siendo en la última década el consumo de 1.304 kWh a 1.680 kWh per cápita, resalta la necesidad de buscar alternativas sostenibles que puedan integrarse al sistema nacional interconectado. En 2023, se alcanzó una cobertura eléctrica nacional del 97,46%, consolidándose como uno de los países con mayor acceso a la electricidad en la región. Sin embargo, persisten desafíos en la ruralidad, donde el acceso a un suministro eléctrico confiable sigue siendo limitado. En 2013, la cobertura en áreas rurales fue del 93,37%, mientras que en zonas urbanas alcanzó el 97,99%, reflejando una brecha significativa. Esta desigualdad evidencia la necesidad de soluciones energéticas sostenibles, como los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, para mejorar la calidad del servicio y garantizar el acceso equitativo a la energía en todo el país (Subsecretaría de Distribución y Comercialización de energía eléctrica, 2022) (Pérez et.al, 2024).

La utilización eficiente de los recursos hídricos locales es una necesidad urgente en la actualidad, dado que encontrar soluciones sostenibles para la generación de energía es una prioridad a nivel mundial. Los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala constituyen una opción viable y accesible para comunidades, tanto rurales como urbanas, que experimentan restricciones en el suministro de electricidad, favoreciendo así el desarrollo sostenible y la autonomía energética, estos micro sistemas se diferencian por su capacidad instalada, las microcentrales generan entre 100 kW y 1 MW, las pequeñas centrales entre 1 MW y 10 MW, mientras que las picocentrales producen menos de 100 kW, siendo ideales para comunidades aisladas.. (Mirassou, 2016)

En esta investigación a nivel nacional, los recursos hídricos disponibles tienen un alto potencial para ser utilizados mediante la adopción de tecnologías de pequeña escala. Estas no solo reducen las consecuencias ambientales negativas en contraste con grandes represas hidroeléctricas, sino que también impulsan el desarrollo socioeconómico local. La producción de energía renovable a través de estos sistemas puede mejorar la calidad de vida de las comunidades, reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover la conservación del medio ambiente. (Maldonado, 2014)

A pesar de su potencial, la implementación de estos sistemas requiere un análisis exhaustivo de factores técnicos, económicos y sociales que aseguren su operatividad y sostenibilidad a largo plazo. Por ello, este estudio tiene como objetivo evaluar de manera

integral las condiciones locales para determinar la viabilidad de los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, fomentando así estrategias para una gestión eficiente del recurso hídrico y la promoción de energías renovables. (Paish, 2014)

La estrategia metodológica adoptada se fundamenta en diversos elementos. En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica que permite identificar los enfoques metodológicos empleados en estudios anteriores. Además, se analizan las normativas y políticas vinculadas al uso de los recursos hídricos y las energías renovables tanto en Ecuador como en otros contextos. Un aspecto central del análisis es la selección de estudios de caso, priorizando aquellos que se desarrollan en condiciones similares. Desde el punto de vista técnico, se examinan variables como el caudal disponible, la altura, la capacidad instalada y el tipo de tecnología empleada. También se consideran factores económicos, tales como los costos de inversión, operación y mantenimiento. Además, se consideran indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el tiempo requerido para recuperar la inversión. En el aspecto ambiental, se analizan los efectos sobre los ecosistemas acuáticos y las medidas de mitigación aplicadas. Asimismo, se tienen en cuenta los aspectos sociales, incluyendo la aceptación y participación de las comunidades locales. (Liu et.al, 2019) (Meza & Aparicio, 2017) (Escobar et.al, 2018)

Esta investigación no solo enriquece el conocimiento académico, sino que también proporciona una base práctica para planificar proyectos energéticos en comunidades con características similares. Además, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, especialmente en lo que respecta al acceso a energía asequible, segura y renovable (ODS 7) y a la gestión sostenible de los recursos hídricos (ODS 6). (Munévar et.al, 2023)

El estudio contribuye al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles mediante la evaluación de la viabilidad de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. Su enfoque integral permite no solo optimizar el uso de los recursos hídricos, sino también fortalecer el desarrollo socioeconómico de las comunidades. Al alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, esta investigación sienta las bases para futuras iniciativas que promuevan la eficiencia energética, la autonomía local y la preservación ambiental.

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Planteamiento del problema

Ecuador es un país con abundantes recursos hídricos distribuidos en sus cuatro regiones geográficas. Sin embargo, la utilización de estos recursos para la generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala no ha alcanzado su pleno potencial, especialmente en áreas rurales y remotas donde se presentan limitaciones en el acceso a fuentes de energía convencional (Instituto de investigación Geológico y Energético, 2023). Regiones como la Amazonía y ciertas zonas de la Sierra presentan un alto potencial hídrico, pero su infraestructura energética continúa siendo limitada. La puesta en marcha de hidrosistemas eléctricos de pequeña escala en estas áreas podría contribuir significativamente al desarrollo sostenible, pues proporciona una fuente de energía renovable, ayudaría a disminuir la dependencia de combustibles fósiles, fortaleciendo la adaptación energética local. (Macas, 2015).

Desde la perspectiva de la ingeniería ambiental, el uso racional y planificado de los recursos hídricos para generación eléctrica debe considerar tanto la disponibilidad y variabilidad del recurso como los impactos sobre los ecosistemas acuáticos, la conservación de las cuencas hidrográficas y los servicios ambientales que estas proveen. En consecuencia, se requiere integrar criterios técnicos, ambientales y sociales en la evaluación de este tipo de sistemas, a fin de garantizar su sostenibilidad a largo plazo (Menéndez, 2017).

No obstante, el desarrollo de proyectos de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala enfrenta diversos desafíos técnicos, económicos, sociales y ambientales en el contexto ecuatoriano. Entre los principales obstáculos se encuentran la falta de estudios detallados sobre el potencial hídrico en cuencas específicas, la ausencia de normativas claras para proyectos a pequeña escala, las limitaciones en el acceso a financiamiento para la implementación de estas tecnologías y en los últimos tiempos a la variabilidad climática. La evidencia de 2024–2025 mostró tensiones sin precedentes en la seguridad de suministro y obligó a incorporar generación de emergencia y a acelerar esquemas de generación distribuida para sostener la demanda. En su Rendición de Cuentas 2024, ARCONEL informó que la normativa emitida permitió incorporar 459,34 MW, de los cuales 404,56 MW correspondieron a generación de emergencia y 54,78 MW a

generación fotovoltaica para autoabastecimiento, en respuesta al déficit hídrico que afectó al parque hidroeléctrico nacional (ARCONEL, 2025).

Estos hechos revelan una brecha estructural debido a que el país tiene un importante potencial hidro energético local sub aprovechado en escalas micro y pequeña, especialmente aptas para soluciones descentralizadas, resilientes y con menores impactos territoriales. El “Inventario de recursos energéticos del Ecuador con fines de producción eléctrica” identificó 39 proyectos hidroeléctricos de pequeña capacidad (1,0–9,99 MW) que totalizan 200,77 MW de capacidad instalable, además de un conjunto mayor de sitios de mediana y gran escala; este banco de proyectos sugiere una ventana de oportunidades para redirigir inversiones hacia soluciones de menor escala sobre todo a los centros de consumo rurales (ARCONEL, 2015).

En el ámbito de la planificación del sector, el Plan Maestro de Electricidad 2023–2032 fue aprobado por el Ministerio de Energía y Minas en junio de 2024 como un documento de carácter vinculante, destinado a orientar el crecimiento de la generación, transmisión y distribución eléctrica, garantizando la cobertura del servicio bajo criterios de seguridad y eficiencia. El PME dispone su publicación oficial y encarga su implementación coordinada con la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables ARCERNNR y el Operador Nacional de Electricidad CENACE, destacando la necesidad de ajustar el plan cuando cambien significativamente los parámetros del recurso, precisamente el caso de los cambios hidrológicos recientes. Este marco refuerza la pertinencia de evaluar, a escala local, la viabilidad técnico-económica y ambiental de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala como estrategia de mitigación del riesgo de desabastecimiento (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Estos sistemas deben desarrollarse bajo un enfoque de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), que permita equilibrar el aprovechamiento energético con la protección de los ecosistemas y la participación activa de las comunidades locales en su gestión (Manzano M. , 2022).

Estudios recientes han demostrado que el desarrollo de proyectos de energía hidroeléctrica a pequeña escala puede no solo cubrir las necesidades energéticas de comunidades aisladas, sino también generar beneficios ambientales al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Liu et.al, 2019).

En este contexto, surge la necesidad de realizar una detallada revisión de fuentes bibliográficas específica y técnica de los recursos hídricos locales en Ecuador y evaluar la factibilidad de implementar sistemas de energía hidroeléctrica a pequeña escala en zonas estratégicas con alto potencial. Este enfoque permitirá identificar áreas prioritarias y proponer soluciones que integren el desarrollo energético con la sostenibilidad ambiental y social, contribuyendo a las metas programadas de los objetivos de desarrollo sostenible - ODS establecidos en la Agenda 2030.

De allí que surge la pregunta objeto de estudio del problema planteado en este apartado: ¿Qué aprendizajes y criterios pueden extraerse del análisis de estudios de factibilidad, prefactibilidad y diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas en Ecuador, y cómo contribuyen a identificar regiones con alto potencial y evaluar su viabilidad técnica, económica, ambiental y social?

1.2. Justificación de la Investigación

El desarrollo sostenible es una prioridad a nivel mundial, y dentro de este marco, la diversificación de las fuentes de energía renovable juega un papel esencial. En Ecuador, la disponibilidad de recursos hídricos es significativa debido a su ubicación geográfica y su variada topografía. No obstante, una gran parte de este potencial permanece subutilizado, especialmente en lo que respecta a los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. Estos proyectos constituyen una alternativa eficiente y sostenible para proporcionar acceso a energía confiable y asequible a comunidades rurales y aisladas que aún carecen de este servicio (Naranjo, 2024).

Esta investigación es relevante porque aporta al conocimiento sobre la factibilidad técnica, económica, ambiental y social de los sistemas hidroeléctricos a pequeña escala en Ecuador. Mediante el análisis de casos de estudio, se podrán reconocer las mejores prácticas, los desafíos comunes y las lecciones del desarrollo de estos proyectos. Los hallazgos servirán como referencia para optimizar el uso de los recursos hídricos locales, minimizando los impactos negativos y promoviendo soluciones energéticas sostenibles (Torres M. , 2024).

Desde un punto de vista técnico, este estudio busca llenar un vacío de información sobre cómo las características hidrológicas y topográficas específicas de las diferentes regiones del Ecuador influyen en el diseño y funcionamiento de estos sistemas.

El país cuenta con un potencial hidroeléctrico considerable aún no aprovechado: hay aproximadamente 41 micro o pequeñas centrales (<10 MW) en operación que suman alrededor de 102 MW, mientras que el potencial estimado llega a 296,6 MW únicamente para este rango de escala. Aún más, un atlas reciente identificó 479 sitios potenciales en Ecuador con más de 17 200 MW de capacidad total, con capacidad media por sitio de más de 35 MW. Esto confirma la presencia de recursos locales con alto potencial (Haro et.al, 2023).

Económicamente, se justifica por su capacidad de proporcionar datos que permitan optimizar inversiones, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de los proyectos, para ello se cita una metodología de comparación de proyectos de generación de energía denominado Levelized cost of energy que es el costo nivelado de energía LCOE. Estudios internacionales reportan que el LCOE de una planta de pequeña escala (aproximadamente 6 MW como hidroeléctrica de pasada) puede alcanzar valores tan bajos como USD 0,05/kWh, lo que indica un alto atractivo económico comparativo (Claude, y otros, 2022). Mientras que en centrales hidroeléctricas de embalse en el contexto nacional los costos promedios para micro escalas (0,35 – 0,85 MW) rondan los USD 0,13/kWh y para pequeñas escalas (1,38 MW– 10,40 MW) USD 0,09/kWh (Reynaldo, 2021).

Desde la perspectiva ambiental, la investigación adquiere una importancia significativa, ya que se centra en examinar de manera integral las repercusiones que los proyectos hidroeléctricos de pequeña escala generan sobre los ecosistemas circundantes. Este análisis contempla no solo la dinámica de los cuerpos de agua, sino también las transformaciones que pueden producirse en los suelos y en los distintos componentes de la biodiversidad local. A la par, el estudio plantea la necesidad de establecer lineamientos y estrategias de mitigación orientados a minimizar los impactos adversos que suelen asociarse a este tipo de infraestructuras, tales como la modificación del caudal ecológico, los procesos de erosión acelerada y la fragmentación de hábitats naturales. Todo ello se articula bajo el objetivo de contribuir a la implementación de un modelo de generación energética que, además de ser eficiente, esté alineado con los principios de sostenibilidad y conservación ambiental. (Jimenez, 2022) (Bacca & Toro, 2021).

Por otra parte, esta investigación posee un relevante aporte social, pues responde a la necesidad de fortalecer las condiciones de vida en las comunidades locales. La provisión de energía eléctrica a través de sistemas hidroeléctricos puede favorecer el

desarrollo económico, social y educativo en zonas rurales, ayudando a disminuir la desigualdad existente frente a los sectores urbanos. Asimismo, el enfoque en proyectos de pequeña escala fomenta la participación comunitaria, lo que aumenta la aceptación y sostenibilidad de estas iniciativas a largo plazo (Meza & Aparicio, 2020).

Además, esta investigación está alineada con las prioridades nacionales e internacionales en cuanto a la transición energética y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente aquellos relacionados con agua y saneamiento (ODS 6), la energía asequible y no contaminante (ODS 7) y la acción por el clima (ODS 13). Los resultados podrán servir como materia de análisis en las propuestas de políticas reguladoras y estrategias que impulsen el desarrollo de esta tecnología sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, fortaleciendo el desarrollo energético sostenible del Ecuador.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Elaborar un estudio del aprovechamiento de los recursos hídricos locales mediante la evaluación de la viabilidad de sistemas de energía hidroeléctrica de pequeña escala en el contexto ecuatoriano.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar y analizar casos de estudio representativos de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala implementados en Ecuador, considerando sus aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.
- Determinar los principales factores críticos de éxito y barreras para la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en diferentes contextos geográficos y socioeconómicos del país.
- Proponer lineamientos estratégicos y recomendaciones técnicas basados en las experiencias evaluadas, el estado actual y nuevas tecnologías de los casos estudiados, que sirvan como guía para futuros proyectos de energía hidroeléctrica a pequeña escala en Ecuador.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Practica

2.1. Antecedentes Investigativos

La producción de energía hidroeléctrica a pequeña escala ha adquirido importancia a nivel global, al ser considerada una opción sostenible para abastecer de energía a comunidades rurales. Diversos estudios han analizado su viabilidad en diferentes contextos, abordando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales. En este apartado se presentan antecedentes en tres niveles: global, regional y nacional, con el fin de contextualizar la importancia de este estudio dentro de la realidad ecuatoriana.

A nivel global, la investigación sobre pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) ha destacado su eficiencia en la generación de energía renovable con bajo impacto ambiental. El estudio de Paish analiza el estado de la tecnología de generación hidroeléctrica a pequeña escala, resaltando que el diseño eficiente de turbinas y el uso de sistemas modulares han permitido su implementación en países con diversas condiciones geográficas (Paish, 2014).

La Cadena informativa SER enfatiza el rol de estas tecnologías en la electrificación rural en África y Asia, señalando que la adaptación a las condiciones hidrológicas locales es clave para garantizar la sostenibilidad de los proyectos (S.E, 2024). En esta línea, la integración de tecnologías emergentes como los generadores triboeléctricos ha sido explorada como una opción para mejorar la eficiencia energética en entornos de bajo flujo hídrico (Jian et.al, 2019)

En el "Informe Mundial sobre el Desarrollo de la Pequeña Central Hidroeléctrica" de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), las PCH ofrecen una solución simple, asequible y práctica para la generación de energía, especialmente cuando se consideran aspectos ambientales y socioeconómicos en su desarrollo (Liu et.al, 2019).

Diversos estudios han analizado el impacto técnico, ambiental y socioeconómico de las PCH por ejemplo en proyectos hidroeléctricos en India, el autor subraya la relevancia de realizar evaluaciones exhaustivas de viabilidad técnica y económica para optimizar el diseño y maximizar la eficiencia de estos sistemas (Blazquez, 2018).

El uso exitoso de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) es evidente en el proyecto de "Autopista Eléctrica del Este de África", que conecta Etiopía, Kenia y Tanzania. Este proyecto permite transportar energía hidroeléctrica generada en Etiopía a través de una línea de transmisión en corriente continua hacia Kenia, donde se convierte nuevamente en corriente alterna para su integración en la red eléctrica local mejorando el acceso a servicios básicos en comunidades rurales y ha impulsado el desarrollo económico en la región. Además, el Banco Europeo de Inversiones (BEI) apoya proyectos en África que explotan de manera responsable recursos naturales, como la energía hidroeléctrica, con el fin de proporcionar energía limpia a precios asequibles (S.E, 2024).

En el artículo *A comprehensive overview of new designs in the field of small hydropower systems*, se sistematizan los avances recientes en diseño y automatización de PCH. Entre los principales avances destacan el desarrollo de turbinas compactas, generadores a velocidad variable y soluciones integradas de control remoto. Estas innovaciones han permitido la expansión de este tipo de sistemas en países con condiciones similares a las de Ecuador, en términos de topografía compleja y disponibilidad hídrica estacional (Laghari et.al, 2013).

Varios estudios recientes han identificado innovaciones tecnológicas aplicables a sistemas hidroeléctricos de pequeña escala y los principales desafíos en su implementación.

En el artículo de Microcentrales hidroeléctricas con tecnología Turbulent Hydro, se analiza la viabilidad de esta tecnología en contextos rurales. El estudio destaca que las microcentrales Turbulent Hydro puede alcanzar eficiencia de conversión del 70% al 90% generando entre 5 a 70 kW por turbina. Además, se resalta que el costo de una microcentral con esta tecnología es de aproximadamente 750 euros (alrededor de \$835), incluidos servicios de instalación, mantenimiento y monitoreo, con una vida útil estimada de 15 a 30 años. No obstante, el estudio señala su implementación requiere inversiones iniciales significativas en infraestructura y en estudios de factibilidad técnica y ambiental (Cuichan et.al, 2024).

Según el estudio de Sari M. (2018) se revisan las innovaciones tecnológicas recientes en la generación hidroeléctrica a partir de conductos de agua, destacando el potencial de las turbinas "agua a alambre" para el mercado hidroeléctrico de menos de 1 MW. Se evalúan 16 tecnologías de turbinas, tanto convencionales como emergentes, en

términos de beneficios, desafíos y niveles de preparación tecnológica. Las turbinas más nuevas ofrecen soluciones más rentables y escalables.

En otro estudio se proponen soluciones para reducir los costos de inversión en pequeñas plantas hidroeléctricas, como la integración de turbinas y generadores en módulos prefabricados de concreto. Se presenta una turbina semi-Kaplan que opera con un generador de imanes permanentes, eliminando la necesidad de transmisión mecánica costosa y mejorando la fiabilidad (Liska et.al, 2022).

En el artículo de Generación hidroeléctrica a velocidad variable de Fraile-Ardanuy, Wilhelmi, Fraile-Mora, & Pérez (2016) se discute las ventajas de la generación hidroeléctrica a velocidad variable, que mejora la eficiencia de las turbinas y la operación de la planta. Se implementó un esquema de control basado en redes neuronales artificiales, mostrando aumentos significativos en la producción en comparación con plantas de velocidad fija.

En los últimos años se ha estudiado a la inteligencia artificial para el control de pequeñas plantas hidroeléctricas en las que se aborda la necesidad de soluciones económicas y efectivas para la automatización y control remoto de plantas hidroeléctricas, especialmente en áreas lejanas. Se propone un dispositivo electrónico inteligente estandarizado para operación autónoma y gestión segura del agua (Suleimenova et.al, 2023)

Otra tecnología que resulta interesante es los nanogeneradores triboeléctricos (TENG's) que ofrecen una tecnología prometedora para la recolección de energía hidroeléctrica, especialmente en aplicaciones de pequeña escala. Estos dispositivos convierten la energía mecánica en eléctrica mediante la electrificación por contacto y la inducción electrostática, lo que los hace adecuados para aprovechar diversas formas de energía hídrica, como las olas, las corrientes de agua y la lluvia gracias a su diseño adaptable y a la capacidad de operar en modos de contacto sólido-líquido y sólido-sólido (Jian et.al, 2019).

A nivel regional, América Latina ha experimentado un crecimiento progresivo en la instalación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, impulsados principalmente por políticas de descentralización energética, subsidios gubernamentales y cooperación internacional. Países andinos como Colombia, Perú y Bolivia han implementado

estrategias que integran generación distribuida, participación comunitaria y conservación de cuencas hidrográficas (BID, 2021).

Estudios de organismos multilaterales y universidades en estos países destacan la importancia de adaptar las tecnologías a las condiciones socioambientales del territorio, priorizando soluciones de bajo mantenimiento, escalabilidad modular y uso eficiente del recurso hídrico disponible. Estas experiencias proporcionan lecciones valiosas para Ecuador, particularmente en lo que respecta a la articulación entre actores locales, marcos normativos flexibles y esquemas tarifarios diferenciales para zonas no interconectadas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2022).

Un ejemplo relevante se encuentra en Brasil que dentro de la región de características comparables al Ecuador. En 2023, la generación de electricidad en Brasil registró las menores emisiones de CO₂ en once años, alcanzando una tasa de 38,5 kg de CO₂ por cada MWh generado. Este logro se atribuye a la entrada de nuevas centrales renovables, a un escenario hidroeléctrico favorable y políticas efectivas de descarbonización del sector eléctrico (S.A, 2024).

En Ecuador, los estudios sobre sistemas hidroeléctricos de pequeña escala han tenido un enfoque creciente, especialmente en relación con su potencial para fomentar la autonomía energética en comunidades rurales e indígenas, investigaciones relevantes para este contexto destacan el potencial de las microcentrales para fomentar la autonomía energética en comunidades rurales e indígenas, enfatizando la necesidad de mecanismos regulatorios claros y esquemas de financiamiento accesible. La revisión de casos implementados en universidades, municipios y sectores agrícolas indica que, si bien existe conocimiento técnico local, la escalabilidad de estos proyectos se ve limitada por la ausencia de marcos integradores entre gestión del agua, energía y participación comunitaria. (Manzano M. , 2022) (Torres M. , 2024).

Ecuador ha experimentado un notable incremento en su producción de energía hidroeléctrica, pasando de 4 TWh en 1985 a 7 TWh en 2005 y alcanzando 24 TWh en 2020, impulsado por la explotación de sus recursos hídricos superficiales y el desarrollo de proyectos energéticos estratégicos para 2021. En ese mismo año, la capacidad instalada alcanzaba 5.107 MW, mientras que la Comisión Regional de Integración Energética de Sudamérica estimó que el país cuenta con un potencial hidroeléctrico total de 23.120 MW, lo que indica que aproximadamente el 22 % de este recurso había sido aprovechado hasta 2021 (Naranjo, 2024).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Ecuador representan una alternativa energética eficiente y sostenible, permitiendo el aprovechamiento de fuentes hídricas de menor escala con mínimo impacto ambiental. Su diseño evita la emisión de contaminantes atmosféricos y disminuye el uso de combustible convencional, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética. Además, no alteran significativamente los ecosistemas, aunque su implementación requiere una gestión sostenible para evitar afectaciones en el flujo natural de los ríos y la biodiversidad. Estas plantas son clave para el desarrollo energético del país, siempre que se realicen evaluaciones ambientales rigurosas (Cabrera & Racines, 2015).

Las plantas hidroeléctricas suelen emplear tecnologías con bajo impacto ecológico, como el sistema de agua fluyente. Este mecanismo permite que el agua pase por un generador para la producción de energía y posteriormente regrese a su cauce natural, lo que reduce significativamente los efectos negativos en el entorno (Chuquin & Mayorga, 2024).

Ecuador, al igual que otros países, ha enfrentado crisis eléctricas desde 1992 debido a la falta de infraestructura y períodos de estiaje, lo que provocó racionamientos de energía. Para enfrentar esta situación, desde 2007 el gobierno priorizó el cambio de la matriz energética, enfocándose en la construcción de ocho grandes proyectos hidroeléctricos para incrementar la producción y reducir la dependencia externa (Naranjo, 2024).

En 2008, la generación eléctrica en Ecuador dependía en un 46% de fuentes fósiles y un 43% de energía hidroeléctrica. Para 2016, la hidroeléctrica alcanzó el 58.08% de la capacidad de generación, con proyecciones de superar el 93% en los próximos años (Romero et.al, 2024).

Se ha planteado la necesidad de integrar aspectos de ingeniería como proyecciones climáticas en el diseño de centrales hidroeléctricas. Varios estudios abordan la manera en que los cambios en el clima, junto con la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos, inciden en la cantidad y estabilidad del recurso hídrico disponible. Dichas alteraciones repercuten de forma directa en la operación de las plantas hidroeléctricas, afectando tanto su fiabilidad como su desempeño energético. (Navarro, 2023).

Una investigación referente a la exposición de la energía hidroeléctrica frente a factores climáticos señala que la alta dependencia de este tipo de generación puede

incrementar el riesgo en el sistema eléctrico, particularmente bajo escenarios de variabilidad climática y en presencia de eventos extremos como El Niño. Los resultados resaltan la importancia de incorporar evaluaciones relacionadas con el cambio climático en las fases de planificación y concepción de las centrales hidroeléctricas, de manera que se garantice su viabilidad, sostenibilidad operativa y desempeño eficiente en el largo plazo ((Bacca & Toro, 2021).

Se han identificado estudios que abordan aspectos del manejo del recurso hídrico y el desarrollo hidroeléctrico en Ecuador como el desarrollado en el trabajo sobre Estrategias de Manejo Ambiental en comunidades Kychwa de la Amazonia ecuatoriana, en donde se analiza el manejo del recurso hídrico y las prácticas agrícolas en comunidades Kichwa de la Amazonía ecuatoriana. Aunque se centra en la región amazónica, ofrece perspectivas sobre el uso sostenible del agua que podrían ser relevantes para el contexto hidroeléctrico nacional (Chicaiza et.al, 2022).

Mientras que en el estudio: *"La sostenibilidad del recurso hídrico en el Ecuador: análisis multicriterial de la gestión del agua"*, se evalúa el impacto de la inversión pública en proyectos multipropósito y su relación con la seguridad alimentaria, proporcionando información sobre la gestión del agua en el país (Rivera, 2016).

Según el Plan de Expansión de Generación 2018-2027, Ecuador tiene un potencial hidroeléctrico de 22,000 MW en 11 cuencas hidrográficas que es económicamente viable. En el mismo año, el país aprovechó 5,071 MW de este potencial, lo que equivale al 23.05% del total disponible, con 71 centrales hidroeléctricas, dejando un 76.95% aún sin aprovechar. El objetivo de Ecuador es lograr la autosuficiencia energética mediante la producción de energía limpia, y alcanzar el potencial para exportar energía a países vecinos (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

De acuerdo al análisis del recurso hidroeléctrico en el país operan actualmente 30 plantas hidroeléctricas de gran escala (>10 MW), con una potencia instalada acumulada de 4.973 MW. Además, como ya se mencionó existen 41 instalaciones hidroeléctricas de menor tamaño en operación. (Haro et. al, 2023) (Naranjo, 2024).

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian que los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala representan una alternativa sostenible que permita garantizar el acceso a la energía en comunidades rurales, siempre que se adapten a las condiciones técnicas, ambientales y socioeconómicas de cada territorio. A nivel global,

las innovaciones tecnológicas han permitido ampliar el alcance de estas soluciones incluso en contextos de bajo caudal y alta variabilidad. En América Latina, las experiencias exitosas en países con características similares a las de Ecuador demuestran el potencial de estos sistemas cuando se integran con políticas públicas adecuadas y participación comunitaria. En el contexto nacional, si bien existen estudios y proyectos en marcha, aún persisten desafíos relacionados con la articulación normativa, la planificación ambiental y la falta de sistematización de casos. Estos vacíos justifican la necesidad de una revisión crítica y estructurada de experiencias existentes, como la que plantea el presente estudio, a fin de generar conocimientos aplicables que contribuyan al desarrollo energético sostenible del país.

2.2. Fundamentación Legal

El desarrollo de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador se sustenta en un marco normativo nacional e internacional que regula el uso de los recursos hídricos, la generación energética sostenible y la protección del ambiente. Este cuerpo legal establece las directrices necesarias para que los proyectos se implementen bajo principios de equidad, sostenibilidad y participación social, garantizando el respeto a los derechos humanos y la conservación de los ecosistemas (Zela, 2011).

Cabe resaltar que, dentro del ámbito de las ciencias jurídicas, el derecho ambiental se configura como una de los aspectos del derecho internacional con mayor dinamismo y evolución. En este contexto, tratados y acuerdos internacionales han adquirido un papel central, convirtiéndose en referentes fundamentales tanto para el fortalecimiento del derecho ambiental internacional como para la formulación de normativas nacionales en esta materia. En la actualidad, numerosos instrumentos jurídicos internacionales han sido suscritos en este campo, y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ha impulsado una nueva fase orientada a consolidar dichos avances (ONU, 2023).

Ecuador ha suscrito compromisos internacionales clave, como la Agenda 2030, que mediante los ODS 6, 7 y 13 impulsa el uso de energías renovables y la gestión sostenible del recurso hídrico. Del mismo modo, al ratificar el Acuerdo de París en 2015, el país asumió la meta de reducir emisiones y fomentar tecnologías limpias dentro de su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC). (Naciones Unidas, 2018) (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No renovables, 2021).

Otro instrumento clave es la Convención de Ramsar, relevante en contextos hidroeléctricos por su enfoque en la conservación de humedales y su biodiversidad, recursos sensibles ante intervenciones en el régimen hídrico (RAMSAR, 2015).

En el ámbito nacional la Constitución de la República del Ecuador, reconoce al agua y la energía como sectores estratégicos. El artículo 12 establece el acceso al agua como un derecho humano fundamental, mientras que los artículos 313 y 408 disponen que el Estado es responsable de la gestión y regulación de los recursos naturales, incluyendo su aprovechamiento para la generación eléctrica mediante fuentes limpias (Asamblea del Ecuador, 2008).

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, regula el uso del recurso hídrico bajo principios de sostenibilidad, equidad e interés colectivo. Esta ley prioriza el consumo humano, establece obligaciones para realizar estudios técnicos y de impacto ambiental (art. 43), y promueve el uso de tecnologías limpias (art. 94), lo que resulta crucial para proyectos de generación hidroeléctrica a pequeña escala (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2014).

En relación con el sector Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) y su reglamento regulan la generación, distribución y autogeneración de energía, incluyendo el uso de fuentes renovables no convencionales. Estas normativas fomentan la participación público-privada y la electrificación rural, abriendo espacio para sistemas descentralizados como las PCH (Asamblea Nacional del Ecuador, 2015) .

Asimismo, el Código Orgánico del Ambiente (COA, 2018) establece el marco legal para la evaluación de impactos ambientales, la obtención de licencias y la implementación de planes de manejo ambiental. Este cuerpo normativo regula también los requisitos específicos para proyectos de generación energética, incluyendo las pequeñas centrales hidroeléctricas, y garantiza que estos se ejecuten bajo principios de prevención, precaución y sostenibilidad (Ministerio del ambiente, 2017).

La normativa de licencias ambientales en Ecuador regula el otorgamiento de permisos ambientales para proyectos hidroeléctricos, asegurando la mitigación de impactos negativos sobre los ecosistemas. Esta normativa establece los requisitos y procedimientos para obtener las licencias ambientales necesarias para la construcción y operación de proyectos hidroeléctricos, garantizando que se cumplan los estándares ambientales y se tomen medidas para proteger el medio ambiente. locales (UNIR, 2024).

El Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025, establece las prioridades del gobierno ecuatoriano para el período 2021-2025, en línea con el Plan de Gobierno y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. El plan contempla objetivos concretos orientados a impulsar el uso de fuentes renovables, favoreciendo la transición hacia una matriz energética más sustentable. El plan estratégico del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables para el mismo período se alinea con estos objetivos, buscando un aprovechamiento sostenible y ambientalmente responsable de los recursos naturales (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

En octubre de 2024, la Asamblea Nacional de Ecuador expidió una normativa que habilita la participación del capital privado en el ámbito eléctrico, autorizando la ejecución de proyectos de generación de hasta 100 MW. Esta disposición, denominada *“Ley orgánica para impulsar la iniciativa privada en la generación de energías”*, calificada de urgente en materia económica, busca enfrentar la crisis energética y fortalecer el desarrollo de fuentes renovables con apoyo empresarial (Valencia, 2024).

A manera de resumen se recoge en la tabla 1 los aportes de cada una de las normativas desarrolladas anteriormente que fundamentan normativamente la gestión del recurso hídrico a través de las implementaciones de sistemas de generación hidráulica

Tabla 1
Comparativo de Normativas Aplicables a Proyectos Hidroeléctricos de Pequeña Escala

Normativa / Instrumento Legal	Ámbito de Aplicación	Aportes Clave al Desarrollo de PCH	Relevancia para el presente estudio
Constitución del Ecuador (2008)	Nacional	Establece al agua y la energía como sectores estratégicos (Arts. 313–315); orienta la provisión estatal bajo criterios de sostenibilidad y equidad.	Fundamenta el marco jurídico superior para garantizar el acceso universal a energía limpia y de calidad.
Ley Orgánica del Servicio Público de Energía	Nacional	Define principios para el servicio eléctrico: sostenibilidad, calidad, eficiencia; promueve	Regula técnicamente la generación, distribución y

Eléctrica (LOSPEE, 2015)		participación pública y autogeneración de energía mediante PCH.
Reglamento a la LOSPEE (2021)	Nacional	Establece criterios para Instrumento clave para la planificación de PCH y obtención de permisos.
Ley Orgánica de Eficiencia Energética (LOEE, 2019)	Nacional	Reconoce como asunto de Apoya la inclusión de tecnologías limpias como la PCH dentro de la política energética.
Reglamento General de la LOEE (2021)	Nacional	Define mecanismos Relevantes para justificar el uso eficiente de recursos hídricos en PCH.
Código Orgánico del Ambiente (2018)	Nacional	Exige Evaluación de Impacto Ambiental (EIA); integra criterios de precaución y prevención ambiental.
Guía MAATE para Evaluación Ambiental de Energías Renovables (2021)	Técnico– ambiental	Establece criterios Fuente técnica esencial para elaborar el componente ambiental del proyecto.
Plan Nacional de Desarrollo (2021–2025)	Nacional (Planificación)	Establece la transición Justifica el enfoque territorial y sostenible del proyecto propuesto.
		ecológica y el uso racional de recursos energéticos como ejes estratégicos.

Política del Sector Eléctrico (2022)	Pública Nacional	Promueve proyectos con participación público-privada, ERNC, autogeneración y generación distribuida.	Refuerza el rol estratégico de las PCH en la matriz energética nacional.
Acuerdo de París (2015)	Internacional	Compromete al país a reducir emisiones mediante el fomento de energías limpias.	Justifica el desarrollo de PCH como aporte a los compromisos climáticos internacionales.

Si bien la legislación ecuatoriana reconoce el agua como un bien estratégico, su implementación presenta retos significativos, como la fragmentación institucional y la falta de mecanismos de control, la desconexión entre marcos legales y la limitada participación ciudadana en la gobernanza del agua (Chamorro & Mera, 2025) (Wingfield, Martínez-Moscoso, & Ochoa-Herrera, 2021)

2.3. Fundamentación Teórica

2.3.1. *Fundamentos de la energía hidroeléctrica*

2.3.1.1. Principios físicos del aprovechamiento hídrico.

La hidroelectricidad aprovecha la energía almacenada en el agua en forma de altura y movimiento, la cual, al descender por un desnivel, se convierte en fuerza mecánica que es transformada en electricidad a través de turbinas acopladas a generadores. Este mecanismo, aplicado globalmente, se ha consolidado como una de las principales fuentes de energía renovable, destacando por su carácter limpio y por presentar impactos ambientales menores en comparación con otras tecnologías de generación. (Ingfocol Ltda, 2017).

La potencia generada por un sistema hidroeléctrico se puede calcular mediante la siguiente fórmula (1):

$$P=\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q\cdot H \quad (1)$$

Donde:

P = potencia eléctrica generada (W)

η = eficiencia global del sistema

ρ = densidad del agua (aproximadamente 1000 kg/m³)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

Q = caudal de agua (m³/s)

H = altura neta de caída (m)

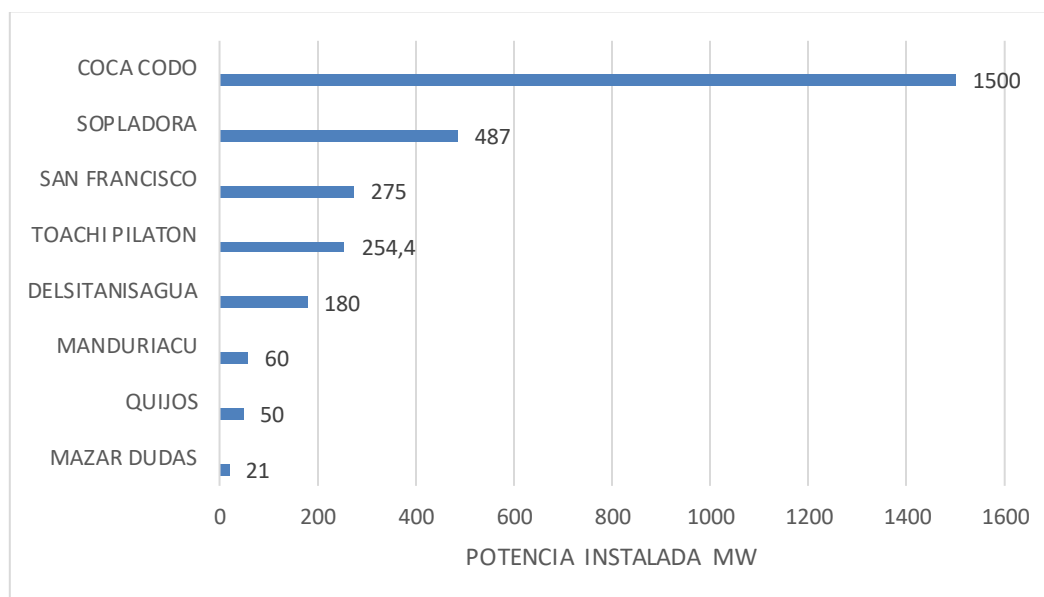
Esta ecuación demuestra que la energía hidroeléctrica depende directamente del caudal del agua y de la altura de caída, lo cual explica la necesidad de un estudio detallado del entorno hidrológico y topográfico para el diseño de sistemas eficientes (Chuquin & Mayorga, 2024).

En el contexto ecuatoriano, el recurso hídrico se considera uno de los más abundantes. El país posee un potencial hidroeléctrico de aproximadamente 22 GW, de los cuales solo una fracción está siendo utilizada, principalmente en grandes proyectos como Coca-Codo Sinclair. Sin embargo, las microcentrales hidroeléctricas representan una alternativa más viable para comunidades rurales debido a su menor costo y flexibilidad operativa (Narvaez, y otros, 2023).

A nivel mundial, la energía hidroeléctrica cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 1000 GW, aunque en 2013 solo representó el 3.8% de la producción global. En Ecuador, los ocho proyectos hidroeléctricos emblemáticos suman 2827.4 MW de potencia, y una vez operativos, se espera que aporten más del 93% de la generación nacional, posicionando al país entre los líderes en energías limpias. En la Figura 1 se muestran los proyectos emblemáticos, en función de su potencia instalada.

Figura 1

Potencia instalada de los proyectos hidroeléctrico emblemáticos del país

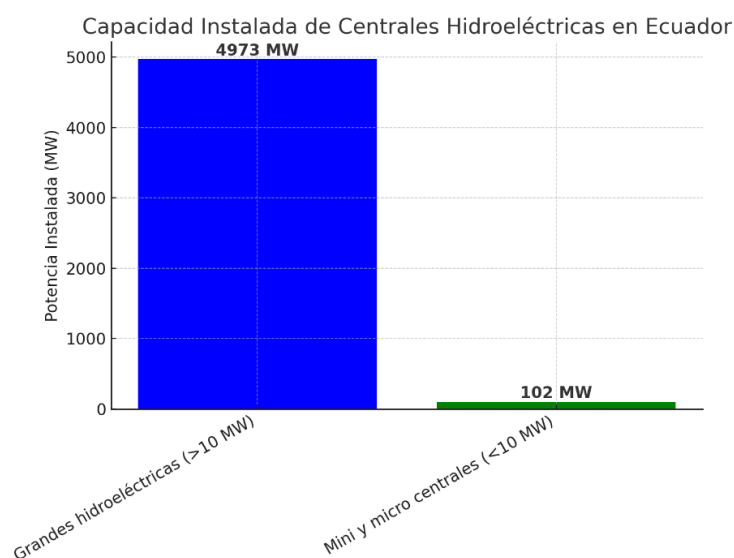


Nota. (Naranjo, 2024)

En la figura 2 se puede observar la capacidad instalada en MW al año 2023 de las centrales hidroeléctricas en el país de acuerdo al proyecto Hyposo (Soluciones hidroeléctricas para países emergentes y en desarrollo).

Figura 2

Capacidad instalada de centrales hidroeléctricas en Ecuador



Nota. Obtenido de (Haro, y otros, 2023)

Si bien el principio teórico de conversión de energía es ampliamente aceptado, su aplicación práctica enfrenta desafíos significativos en contextos locales, especialmente en zonas de difícil acceso. En el país, la dependencia de tecnologías importadas para la generación hidroeléctrica ha limitado la optimización del sistema energético. Estas tecnologías no siempre son adecuadas para las condiciones específicas de los recursos hídricos locales, lo que puede resultar en una eficiencia subóptima y un aumento en los costos operativos (Chamorro & Mera, 2025).

2.3.1.2. Energía hidráulica como fuente renovable.

La energía hidráulica, impulsada por el ciclo natural del agua y la radiación solar, es una fuente renovable que no genera emisiones directas de gases de efecto invernadero ni agota recursos. Las tecnologías hidroeléctricas modernas, especialmente las de pequeña escala, son eficientes (70–90 %), duraderas y permiten un suministro estable, además de integrarse con otros usos del agua como riego, abastecimiento y recreación. (Chuquin & Mayorga, 2024).

No obstante, también implica desafíos como la alteración de caudales naturales, la sedimentación y los impactos en la biodiversidad acuática, lo que exige una evaluación ambiental rigurosa en cada proyecto (Kibler, 2013).

2.3.1.3. Alternativa de energía a través de hidroeléctricas de pequeña escala.

La energía hidroeléctrica de pequeña escala se refiere a la conversión del potencial energético del agua en electricidad, con capacidades de generación generalmente por debajo de los 10 MW. En Ecuador, el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables clasifica estos sistemas en microhidroeléctricos (menos de 100 kW), minihidroeléctricos (entre 100 kW y 1 MW) y pequeñas centrales hidroeléctricas (entre 1 MW y 10 MW) (Vaca, Gerbens, & Nonhebel, 2020).

Desde una perspectiva técnica, los sistemas hidroeléctricos enfrentan desafíos operativos vinculados a la variabilidad hidrológica y las limitaciones geográficas. En el país estos retos se manifiestan claramente a pesar de su riqueza hídrica, debido a fluctuaciones estacionales en el caudal y una gestión compleja de los recursos. Los sistemas hidroeléctricos, especialmente los de tipo filo de agua (sin embalses de almacenamiento), son altamente sensibles a cambios en el caudal. Estudios demuestran que reducciones del 30% en el flujo hídrico pueden paralizar operaciones en centrales pequeñas. En Ecuador, el 65% del agua distribuida se pierde antes de llegar a usuarios

finales, agravando la disponibilidad para generación eléctrica (Hammerling, Walczak, & Kaluza, 2023) (Oscullo et.al, 2024).

Por otro lado, Kumar & Schei (2014) argumentan que las pequeñas centrales hidroeléctricas tienen una ventaja clave sobre otras fuentes renovables, como la solar o eólica, debido a su capacidad de generar electricidad de manera continua y predecible. Sin embargo, estos autores también resaltan la necesidad de integrar estudios de impacto ambiental y social para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

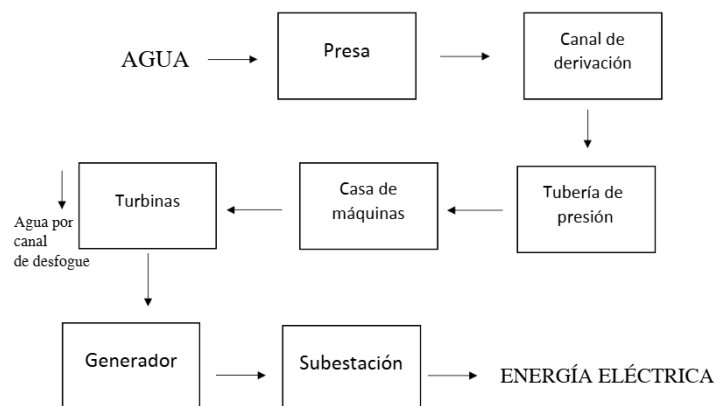
Las PCH ofrecen beneficios como la descentralización energética, la generación de energía limpia y el impulso al desarrollo rural. Sin embargo, enfrentan desafíos significativos, entre ellos: altos costos iniciales, falta de financiamiento, ausencia de políticas y capacitación técnica insuficiente (Zela, 2011) (United Nations Industrial Development Organization, 2019).

2.3.2. Componentes principales de un sistema hidroeléctrico

Un sistema hidroeléctrico, independientemente de su tamaño, está integrado por diversos componentes cuya función esencial es conducir el agua y convertir su energía potencial en energía eléctrica. Estas incluyen estructuras diseñadas para la captación de agua, la separación de sedimentos (desarenador), la conducción del agua hacia la instalación, el tanque de carga, la tubería de presión y la casa de máquinas como se observa en el flujograma desarrollado en la figura 3 (Escobar, Cortés, & Leguizamon, 2018). Se describen brevemente las principales obras que componen una PCH.

Figura 3

Flujograma del proceso de funcionamiento de una hidroeléctrica.



Nota. Obtenido de (Coz, 2005)

2.3.2.1.Obras de captación y presas.

La captación es el primer componente del sistema y se encarga de desviar una parte del caudal del río hacia la conducción hidráulica. En las PCH generalmente se emplean tomas de derivación simples, con estructuras de retención mínimas. Las presas pueden ser ausentes o muy pequeñas, ya que el objetivo es afectar lo menos posible el caudal ecológico y evitar grandes impactos ambientales (Paish, 2002). En algunos casos, se usan rejillas o desarenadores para evitar la entrada de sedimentos y sólidos al sistema.

La presa funciona como una infraestructura de contención que permite regular el caudal y crear el desnivel requerido para obtener energía potencial. Según Kumar (2015), la eficiencia de una presa depende de su diseño, material y ubicación. En el país, muchas pequeñas cuencas hidrográficas son ideales para presas de bajo impacto, aunque su implementación requiere estudios de impacto ambiental rigurosos. Las presas en sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, si bien son menos invasivas que las de gran escala, deben diseñarse cuidadosamente para minimizar su impacto ambiental. En el país, la falta de lineamientos técnicos específicos para centrales de pequeña escala dificulta su construcción eficiente (Quinaluisa et.al, 2019).

2.3.2.2.Canal o conducción hidráulica.

El agua captada se transporta por medio de canales abiertos o tuberías cerradas hacia una cámara de carga. La selección del tipo de conducción depende de la topografía, distancia y tipo de terreno. En sistemas de pequeña escala, se priorizan soluciones de bajo costo y mantenimiento, como canales revestidos o tuberías de policloruro de vinilo PVC o polietileno de alta densidad HDPE (Laghari, Mokhlis, Bakar, & Mohammad, 2013).

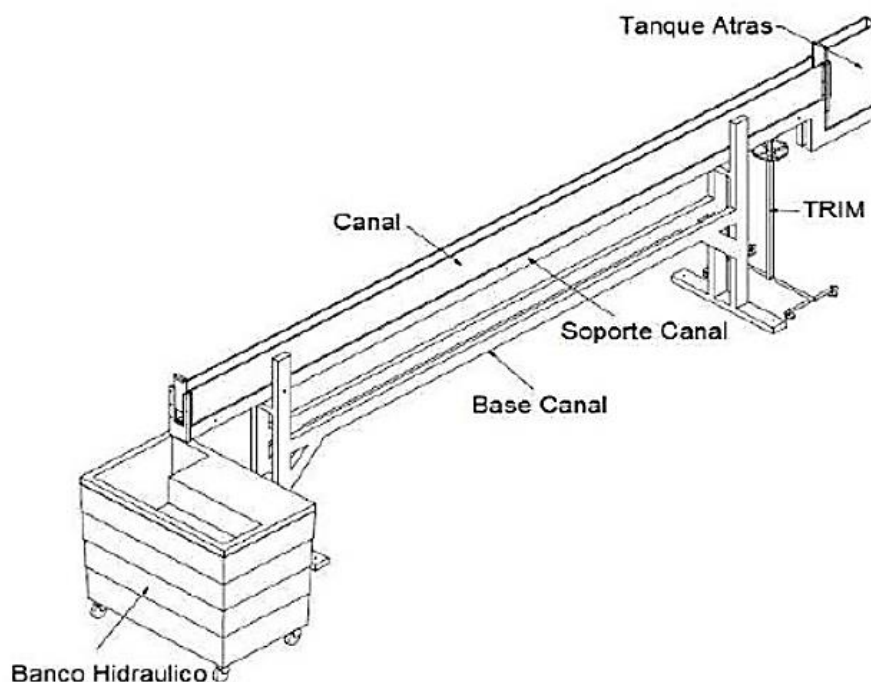
2.3.2.3.Cámara de carga y tubería forzada.

La cámara de carga regula la presión del flujo y actúa como amortiguador antes de que el agua ingrese a la tubería forzada. Esta última conduce el agua con presión suficiente hasta la turbina. La eficiencia del sistema depende en gran medida del correcto dimensionamiento de esta tubería, que debe minimizar las pérdidas de carga y soportar la presión generada por la altura de caída (Cuichan et al., 2024).

En la figura 4 se puede observar el diseño tipo de un canal hidráulico de pendiente variable.

Figura 4

Diseño de canal hidráulico



Nota. Obtenido de (Castellanos, Collazos, Farfan, & Meléndez, 2017)

2.3.2.4. Turbina.

La turbina es responsable de convertir la energía cinética del agua en energía mecánica. Según Ceballos y otros (2021), la elección de la turbina depende del flujo y la caída de agua. En sistemas pequeños, las turbinas Pelton y Kaplan son las más utilizadas debido a su capacidad de operar en caudales bajos y moderados. A pesar de su eficiencia, las turbinas disponibles en el mercado ecuatoriano suelen ser costosas y su mantenimiento requiere personal capacitado, lo que limita su implementación en comunidades rurales (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2013).

La tabla 2 presenta de manera sintetizada las principales fortalezas y limitaciones de las turbinas hidráulicas de reacción empleadas con mayor frecuencia en las PCH, incluido un rango de precios base para turbinas con capacidad de 50 kW y 5 MW.

Tabla 2

Ventajas y desventajas del uso de turbinas hidroeléctricas.

Tipo de turbina	Descripción	Ventajas	Desventajas	Altura (m)	Caudal (m ³ /s)	Aplicaciones típicas	Precio (USD)
-----------------	-------------	----------	-------------	------------	----------------------------	----------------------	--------------

Pelton	Turbina de acción; el agua impulsa cucharas montadas en una rueda	de Estructura simple. Menos peligro de erosión en los álabes. Reparaciones más sencillas.	Requiere alta presión. No son de arranque automático.	Alta (>100)	Bajo (<1)	Zonas montañosas con caudales pequeños	20 M – 100 M
Turgo	Turbina de acción; el chorro incide oblicuamente sobre los álabes	de Más compacta que Pelton, buena eficiencia.	Menor eficiencia que Pelton en caídas muy altas	50 – 250	Medio (0,5-3)	Caídas medias, topografía variable	15 M – 80 M
Francis	Turbina de reacción; combina presión y velocidad del agua	de Presenta mínimas pérdidas hidráulicas, elevada eficiencia y velocidad específica, así como costos reducidos de acoplamiento con el generador. Eficiente en amplios rangos de altura y caudal.	Presenta riesgos de cavitación y menor eficiencia a cargas parciales, además de desgaste elevado por erosión debido a su diseño. No es adecuado para alturas superiores a 800 m ni para caudales variables, requiriendo un flujo constante.	Media (10-300)	Medio-Alto (1-15)	Centrales medianas con caudales regulares	40M – 250M
Kaplan	Turbina de reacción; álabes ajustables al caudal	de Posee alta velocidad específica, con álabes que se ajustan a variaciones de altura y caudal, y una elevada velocidad de rotación para un diseño más compacto.	Presenta velocidades de embalamiento elevadas, un alto riesgo de cavitación y un incremento significativo de costos debido a	Baja (2-30)	Alto (>10)	Grandes volúmenes de agua con bajas pendientes	100M – 500 M

				los sistemas de regulación.				
Bulbo	Turbina de reacción sumergida en el flujo	de	El conjunto turbina - generador se encuentra en el bulbo, lo que reduce significativamente los costos de construcción civil.	Su fabricación y mantenimiento requieren procesos complejos y con elevados costos.	Baja (2-15)	Alto (>15)	Ríos amplios, centrales de paso	150M – 600M

Nota. Obtenido de (Morales, Corredor, Paba, & Pacheco, 2014)

2.3.2.5. Generador eléctrico.

El generador convierte la energía mecánica de la turbina en electricidad, y su desempeño y estabilidad dependen tanto de su diseño como de la coordinación con sistemas de control que aseguren un suministro eléctrico confiable. (Delgado, 2014)

Según Romero et al. (2023), los generadores utilizados en sistemas hidroeléctricos a pequeña escala son altamente eficientes y pueden adaptarse a las condiciones específicas del flujo de agua. En Ecuador, la adquisición de generadores para centrales de pequeña escala depende en gran medida de la importación, lo que incrementa significativamente los costos iniciales. Además, en zonas rurales, la falta de infraestructura eléctrica adecuada limita el aprovechamiento total de la energía generada, lo que subraya la necesidad de soluciones tecnológicas más accesibles y adaptadas a las realidades locales (Dialnet, 2023) (Cuichan et.al, 2024) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2013).

2.3.2.6. Sistema de regulación y control.

Este sistema permite mantener la operación estable de la planta. Controla parámetros como voltaje, frecuencia, caudal y presión, e incluye dispositivos como válvulas, sensores, controladores y, en algunos casos, sistemas automatizados o inteligencia artificial para el monitoreo remoto (Suleimenova, Kabulov, & Musiripsha, 2023). La regulación asegura la seguridad del sistema y la calidad del suministro eléctrico.

2.3.2.7. Sistema de transmisión y distribución.

El sistema de transmisión es crucial para distribuir la energía generada hacia los usuarios finales. En microcentrales, estos sistemas suelen ser más simples y localizados, lo que reduce las pérdidas de energía (Cuichan et.al, 2024).

Sin embargo, la geografía montañosa de Ecuador presenta un desafío significativo para la instalación de líneas de transmisión adecuadas (Navarro, 2023).

Aunque los sistemas de transmisión en proyectos de pequeña escala son menos complejos que en grandes hidroeléctricas, pueden enfrentar problemas técnicos debido a la falta de planificación adecuada (Zela, 2011).

Además, muchas comunidades rurales carecen de redes eléctricas existentes que permitan conectar nuevas fuentes de energía, limitando así el aprovechamiento total de la energía generada (Operador Nacional de Electricidad, 2023).

2.3.3. *Hidroeléctricas de pequeña escala (PCH)*

Las hidroeléctricas de pequeña escala (PCH) son sistemas de generación eléctrica que aprovechan el caudal y la caída del agua en cursos naturales, mediante infraestructura y equipos compactos, con una capacidad instalada generalmente menor a 10 MW. Este tipo de proyectos ha cobrado relevancia en las últimas décadas por su adaptabilidad a entornos rurales, bajo impacto ambiental comparado con grandes presas y viabilidad técnica en zonas con recursos hídricos distribuidos de manera descentralizada (Liu, Liu, Wang, & Kremere, 2019) (Cuichan et.al, 2024)

2.3.3.1. Definición y ventajas frente a grandes centrales.

Las PCH se diferencian de las grandes centrales hidroeléctricas por su escala, inversión, complejidad técnica y nivel de afectación ambiental. En general, no requieren grandes embalses ni modificaciones intensivas del cauce, lo que reduce significativamente el impacto sobre los ecosistemas acuáticos y las comunidades. Además, suelen tener menores tiempos de construcción, costos de operación más bajos, y pueden funcionar de forma autónoma o interconectadas a redes locales o nacionales (Paish, 2014).

Entre sus principales ventajas se destacan: Aprovechamiento de caudales medianos en cuencas pequeñas. Menor afectación ambiental y social. Posibilidad de

gestión comunitaria o descentralizada. Estabilidad en el suministro energético en zonas no interconectadas. Fomento a la soberanía energética local.

2.3.3.2. Clasificación técnica por potencia instalada.

En las tablas 3 y 4 se presentan los estándares definidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

Tabla 3.

Clasificación de PCH's según la CREG

Potencia	Tipo
0-100 kW	Microcentral
100-1000 kW	Minicentral
1000-10000 kW	Pequeña central

Nota. (Escobar, Cortés, & Leguizamon, 2018)

Tabla 4.

Clasificación de PCH's según la OLADE

Potencia	Tipo	Salto		
		Bajo	Medio	Alto
0.5-5 kW	Picocentral		N.A.	
5-50 kW	Microcentral	<15	15-50	>50
50-500 kW	Minicentral	<20	20-100	>100
500-5000 kW	Pequeña central	<25	25-130	>130

Nota. (Escobar, Cortés, & Leguizamon, 2018)

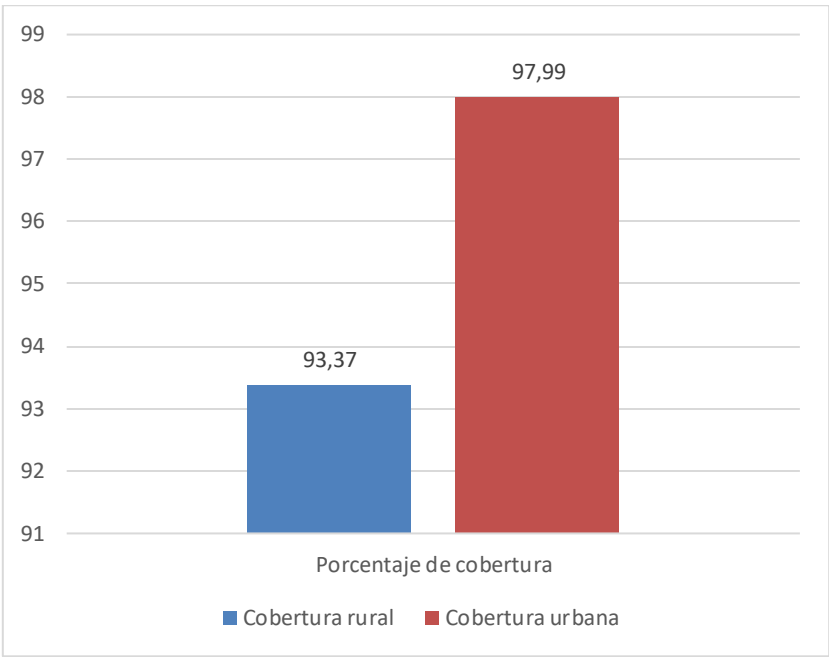
2.3.3.3. Demanda energética local.

Las pequeñas hidroeléctricas son más efectivas cuando la demanda de energía en la comunidad o sector es acorde a su capacidad de generación. Generalmente, se instalan en poblaciones rurales, industrias locales o sistemas de electrificación aislada, donde otras

fuentes de energía son costosas o inaccesibles. Pese a que la cobertura de acuerdo a Pérez (2024) (véase figura 5) es alta en la región de Latinoamérica es importante destacar la brecha existente entre la cobertura en la zona rural y urbana y la imperante necesidad de realizar estudios de la demanda energética en estos sectores desatendidos de servicios básicos.

Figura 5.

Brecha de cobertura en la zona rural y urbana del Ecuador.



Nota. Datos obtenidos de (Pérez et.al, 2024)

2.3.3.4. Aplicaciones en zonas rurales y no interconectadas.

En Ecuador, las PCH representan una alternativa viable para comunidades rurales y aisladas que aún no cuentan con acceso regular a la red eléctrica nacional. En zonas como la Amazonía, la Sierra Centro y sectores periféricos de la Costa, existen múltiples cuencas hidrográficas con potencial hídrico suficiente para el desarrollo de micro y mini hidroeléctricas como se puede evidenciar en la tabla 5. Estos sistemas pueden impulsar actividades productivas, mejorar la calidad de vida, y fortalecer la resiliencia energética frente a fenómenos climáticos extremos (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Tabla 5.*Cuencas hidrográficas del Ecuador con potencial para PCH*

Cuenca hidrográfica	Región	Potencial para pch
Cuenca del río Pastaza	Centro Sierra y Amazonía	Alto (gran pendiente y caudal regular)
Cuenca del río Zamora	Amazonía sur	Medio – Alto
Cuenca del río Napo	Amazonía norte	Alto (Zona montañosa con varios afluentes)
Cuenca del río Esmeraldas	Norte Costa y Sierra	Medio
Cuenca del río Mira	Sierra Norte	Medio
Cuenca del río Guayas	Costa centro	Medio – Bajo
Cuenca del río Jubones	Centro Costa y Sierra	Medio
Cuenca del río Chota	Sierra norte	Medio – Alto
Cuenca del río Santiago	Amazonía norte	Alto (alta pluviosidad y pendiente)
Cuenca del río Coca	Amazonía centro	Alto

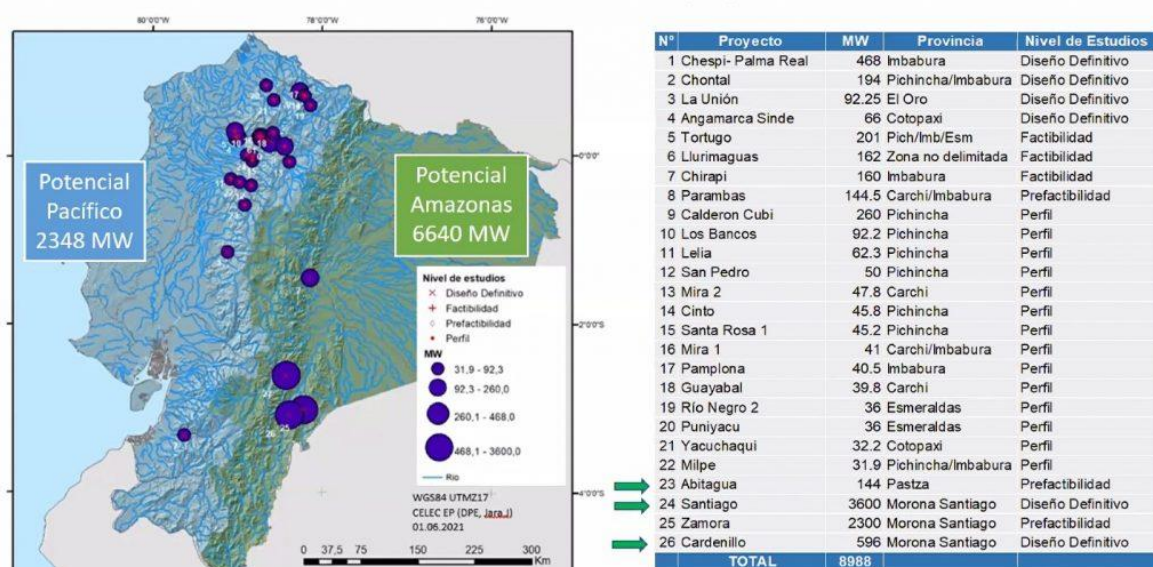
Nota: Elaboración propia con base de datos del MEER (2021)

Además, su implementación puede articularse con modelos de gestión comunitaria, cooperativas de energía o alianzas público-comunitarias, promoviendo la participación activa de las poblaciones beneficiarias en la operación y mantenimiento del sistema (Manzano L. , 2015) (Torres E. , 2015)

En el mapa de la figura 6 proporcionada por Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC se evidencian las ubicaciones de los proyectos hidroeléctricos que constan en su portafolio en distintos niveles de estudios. Aquí se puede observar que la mayoría de los proyectos se ubican en la zona norte de la región sierra y el sector sur de la Amazonía

Figura 6.

Ubicación de proyectos hidroeléctricos del portafolio de CELEC.



Nota. Obtenido de (Energía Estratégica, 2021)

2.3.4. Características a considerar para la selección de sistemas hidráulicos de pequeña escala

Antes de abordar la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, es fundamental establecer los criterios que determinan su viabilidad. Estos sistemas son adecuados en escenarios donde se cumplen ciertas condiciones técnicas, económicas, ambientales y sociales.

2.3.5. Parámetros técnicos de diseño en PCH

El diseño depende de una serie de parámetros técnicos que permiten evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto. Estos parámetros están estrechamente relacionados con las características topográficas, hidrológicas y energéticas del sitio de implantación.

Para garantizar el rendimiento óptimo de una instalación hidroeléctrica, es esencial considerar tanto el caudal del agua como la diferencia de altura, ya que estos factores determinan las características técnicas de la central y su capacidad de generación eléctrica. De igual manera, el río debe presentar una profundidad entre 1,5 y 5 metros y un caudal mínimo de 1 m³/s disponible por lo menos durante nueve meses continuos. Bajo estos criterios es posible determinar el sitio más apropiado para la instalación del sistema.

A continuación, se describen los principales elementos que deben considerarse.

2.3.5.1.Caudal de diseño.

Es el volumen de agua que fluye por segundo a través de la turbina y que se utilizará para generar electricidad. Se obtiene a partir de estudios hidrológicos históricos, mediante curvas de duración de caudales (curvas Q vs. % tiempo de ocurrencia). El caudal debe seleccionarse de forma que garantice una operación eficiente durante la mayor parte del año (Delgado, 2014).

Para que una pequeña central hidroeléctrica sea viable, debe existir un caudal de agua constante y una altura de caída suficiente (salto hidráulico). En zonas de baja precipitación o con estacionalidad marcada, es necesario evaluar la estabilidad del flujo para garantizar un suministro energético confiable.

Para medir el caudal de un cuerpo de agua, se utilizan métodos históricos y directos. Los métodos históricos analizan datos previos para determinar caudales pico, mínimos, medios, de diseño y ecológicos; este último suele establecerse como el 10% del caudal medio anual.

La disponibilidad de agua para pequeñas centrales hidroeléctricas depende de las precipitaciones y el área de drenaje de la cuenca. Estas plantas pueden adaptarse a variaciones hídricas, especialmente aquellas con embalses (ver Figura 7) que almacenan agua para regular la producción. Algunas centrales funcionan en un ciclo cerrado sin conexión directa a un curso de agua (ver figura 8). Los estudios hidrológicos para estos proyectos analizan cuencas con áreas de drenaje menores a 200 km²

Figura 7.

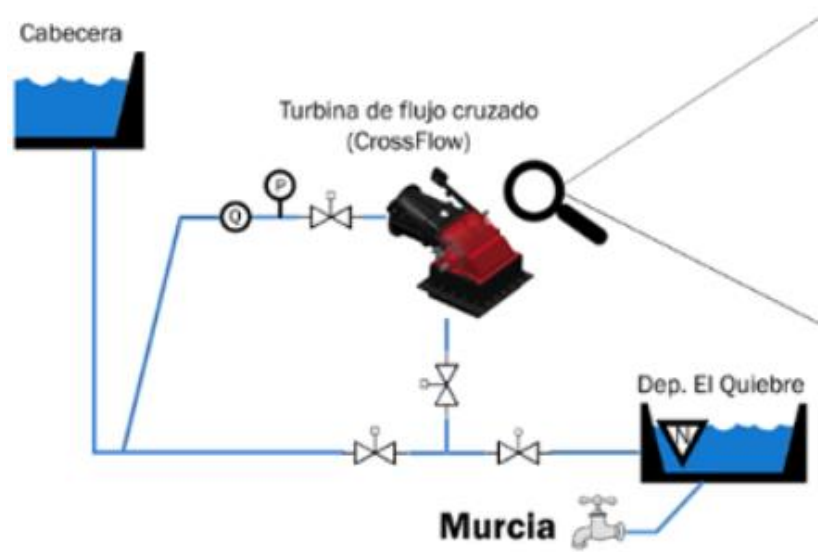
Esquema de una PCH con embalse.



Nota. Tomado de (Sillo, 2020)

Figura 8.

Esquema de una PCH de circuito cerrado



Nota. Obtenido de (Mentado, 2020)

2.3.5.2. Altura neta.

Es la altura correspondiente a la diferencia efectiva entre el punto de captación y la turbina, descontando las pérdidas por fricción y turbulencias en las conducciones. Este parámetro es esencial para determinar la energía potencial disponible (Hurtado & Castro, 2023).

De este modo, la capacidad de generación de una central hidroeléctrica está determinada por la altura de caída del agua y el caudal disponible. Una mayor altura incrementa la energía potencial, mientras que un mayor caudal permite accionar las turbinas con más fuerza. En Ecuador, la variada topografía y la abundancia de recursos hídricos favorecen el desarrollo de estas centrales (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Existen métodos de medición instantáneos del caudal de un cuerpo de agua estos son: método del recipiente, medición del caudal con flotador, correntómetro, escala, vertedero y descarga como los principales (Subdirección Ambiental del Valle de Aburrá, 2019).

En la Tabla 6 se observa una comparativa de métodos más usados para medir el salto hidráulico en sistemas hidrológicos.

Tabla 6.*Comparación de métodos directos de medición del salto hidráulico.*

Método	Ventajas y limitaciones	Precisión	Observaciones
Manguera de nivelación	Rápido para caídas pequeñas	Aproximadamente 5%	Es recomendable hacerlo entre dos personas
Manguera y manómetro	Es un método rápido y seguro, que además permite medir con precisión la longitud de la tubería simultáneamente	<5%	Calibración de instrumentos
Nivel de carpintero y tablas	No recomendado para largas pendientes y de poca gradiente.	Aproximada a 5% en pendientes pronunciadas	Para caídas pequeñas
Altímetro	Utilizado en caídas mayores a 40 m (altas y medianas) ya que son rápidas	Probabilidad errores del (30%)	Necesidad de programas de calibración de instrumentos y habilidad de manejo
Eclímetro	Rápido de costo moderado	Buena errores del 5%	Recomendable para terrenos homogéneos
Nivel de ingeniero	Rápido y de alto costo	Muy buena	No es útil en vegetación arbórea densa
Mapa	Únicamente replicable en caídas altas	Aceptable para prefactibilidad	Habilidad para interpretar planos
GPS	Rápido de costo reducido	Excelente	Para todo tipo de terrenos

Nota. (Coz, 2005)

2.3.5.3.Potencia instalada.

Se refiere a la capacidad global de todos los alternadores instalados en la central hidroeléctrica. La potencia es proporcional a la altura del salto y el caudal turbinado. Las centrales se clasifican según su potencia instalada (Morales et.al, 2014).

2.3.5.4.Potencia disponible.

La energía hidráulica convierte la energía potencial y cinética del agua en energía mecánica a través de las turbinas, y posteriormente en energía eléctrica mediante los generadores. La eficiencia del sistema nunca es del 100 %, debido a pérdidas por fricción en tuberías, turbulencias y disipación en válvulas. Estas pérdidas se manifiestan como calor y energía no aprovechable. El caudal, la altura y las características del conducto influyen directamente en la energía disponible. El diseño hidráulico busca minimizar pérdidas mediante selección de materiales, perfil de tuberías y sistemas de control. Optimizar estos parámetros permite maximizar la eficiencia y la producción eléctrica de manera confiable (Zela, 2011).

2.3.5.5.Tipo de turbina.

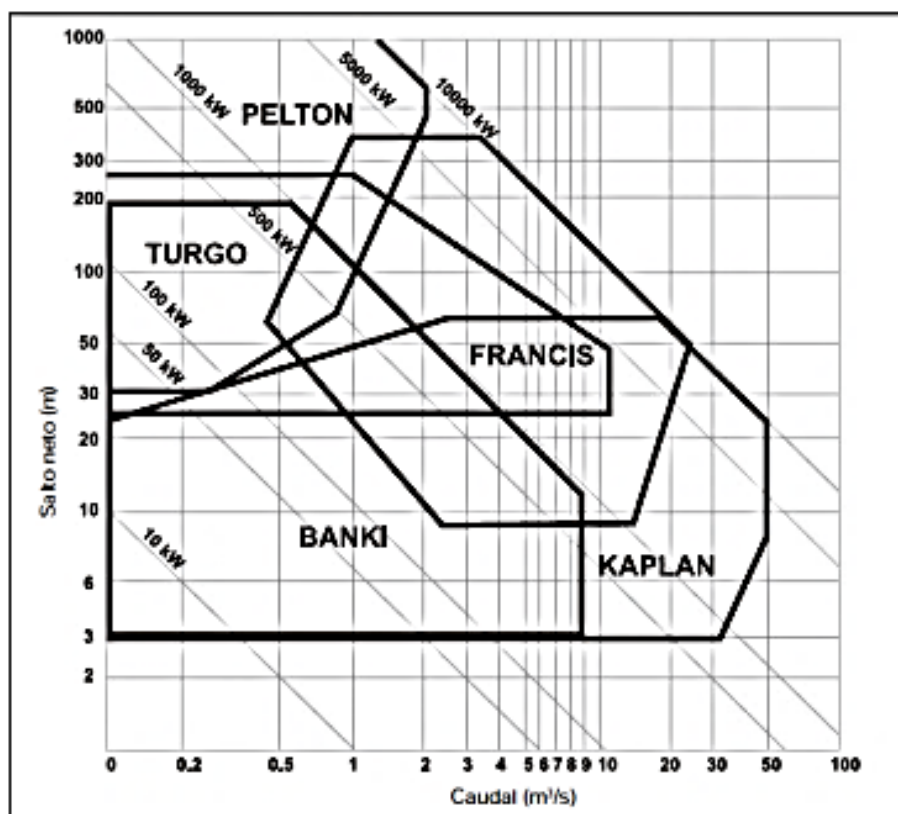
La elección depende del caudal y la altura neta disponibles. Entre las turbinas más comunes se encuentran:

- Turbinas Pelton: para altas alturas y bajos caudales.
- Turbinas Francis: para alturas y caudales intermedios.
- Turbinas Kaplan: para bajas alturas y altos caudales.

Las turbinas hidráulicas varían según sus características y aplicaciones en centrales de generación. Las más utilizadas por su alto rendimiento, superior al 90%, son Pelton, Michell Banki, Francis, Hélice y Kaplan, cada una adaptada a diferentes condiciones de caudal y altura de caída del agua, para ello los diseñadores de turbinas generan diagramas para la selección de las turbinas como se observa en la figura 3. (Delgado, 2014).

Figura 9.

Diagrama de selección de Turbinas Hidráulicas.



Nota. (Coz, 2005).

Así mismo en la guía de pequeñas centrales hidroeléctricas se presenta la tabla 7 a continuación transcrita se observa las principales características de turbinas hidráulicas para que se complemente la selección adecuada.

Tabla 7.

Características principales de turbinas hidráulicas.

Turbina	Inventor	Caudal m³/s	Altura m	Potencia kW	Eficiencia máxima %
Pelton	Lester Pelton	0,05-50	30-1800	2-300000	91
Turgo	Eric Crewdson	0.025-10	15-300	5-8000	85
Michell- Banki	A.G Michell; D. Banki	0.025-5	1-50	1-750	82

Bomba roto dinámica	Dionisio Papin	0.05-0.25	10-250	5-500	80
Francis	James Francis	1-500	2-750	2-750000	92
Deriaz	P. Deriaz	500	30-130	100000	92
Kaplan y de hélice	V. Kaplan	1000	5-80	2-200000	93
Axiales	Kuhne; Hugein; Harza	600	5-30	100000	93

Nota. (Coz, 2005)

2.3.5.6. Factores de carga y demanda.

El análisis de carga y demanda estima la energía requerida por el área servida, considerando tanto el consumo promedio como los picos. El factor de planta relaciona la energía generada con la máxima posible a plena capacidad, evaluando eficiencia del sistema. Se incorporan proyecciones de crecimiento poblacional e industrial para anticipar variaciones futuras en la demanda. Estos datos permiten dimensionar adecuadamente la capacidad de generación y garantizar confiabilidad. (Delgado, 2014).

2.3.5.7. Pérdidas en conducción.

Deben evaluarse en función del material de tuberías, la longitud del canal o tubería forzada, las singularidades del sistema (curvas, válvulas, cambios de sección, etc.) (Zela, 2011).

A continuación, se resumen en la tabla 8 los parámetros de diseño de un microsistema de aprovechamiento hídrico.

Tabla 8.

Parámetros técnicos comunes en el diseño de PCH.

Parámetro	Unidad	Valor típico	Observaciones
Caudal de diseño (Q)	m ³ /s	0,2 – 5,0	Depende del aforo del río
Altura Neta (Hn)	m	5 – 200	Depende del relieve

Potencia (P)	kW- MW	100 – 10.000	Micro, mini, pequeña
Eficiencia global (η)	%	60 – 90 %	Sistema completo
Tipo de turbina	-	Pelton, Francis, Kaplan	Según el caudal y la altura
Factor de planta	%	40 – 80 %	Influye en el costo y dimensionamiento

Nota. Obtenido de (Romero & Siguenza, 2019)

2.3.5.8. Generadores Eléctricos en Hidro sistemas.

Los generadores eléctricos en hidro sistemas son máquinas rotativas acopladas a las turbinas para convertir energía mecánica en electricidad. El generador síncrono es el más utilizado debido a su capacidad de operar a una velocidad de giro específica en rpm, asegurando estabilidad en la generación de energía (Zela, 2011).

2.3.5.9. Sistemas De Transmisión De Potencia Mecánica.

Los sistemas de transmisión de potencia mecánica posibilitan ajustar la velocidad de las turbinas a la de los generadores en las centrales hidroeléctricas. Su diseño depende de factores como la potencia a transmitir, la velocidad de entrada y salida, y las condiciones de servicio, asegurando eficiencia en la conversión de energía (Delgado, 2014).

2.3.5.10. Líneas de Transmisión y Redes de Distribución.

Estas líneas en proyectos hidroeléctricos suelen utilizar sistemas trifásicos con una sola terna y configuración radial de carga concentrada. Para su diseño, se prioriza la ruta más corta posible y la ubicación preliminar de postes, con una distancia entre ellos de 100 a 150 metros, optimizando la eficiencia del sistema. (Zela, 2011). En la tabla 9 se muestran las líneas de transmisión recomendadas para dimensionamiento de PCH.

Tabla 9.

Niveles de tensión sugeridos para las líneas de transmisión y las redes de distribución primaria.

Tensión nominal kV	Tensión más elevada kV
--------------------	------------------------

3	3.6
6	7.2
10	12.0
15	17.5
20	24.0

Nota. (Coz, 2005)

2.3.5.11. Ubicación de la Central Hidroeléctrica.

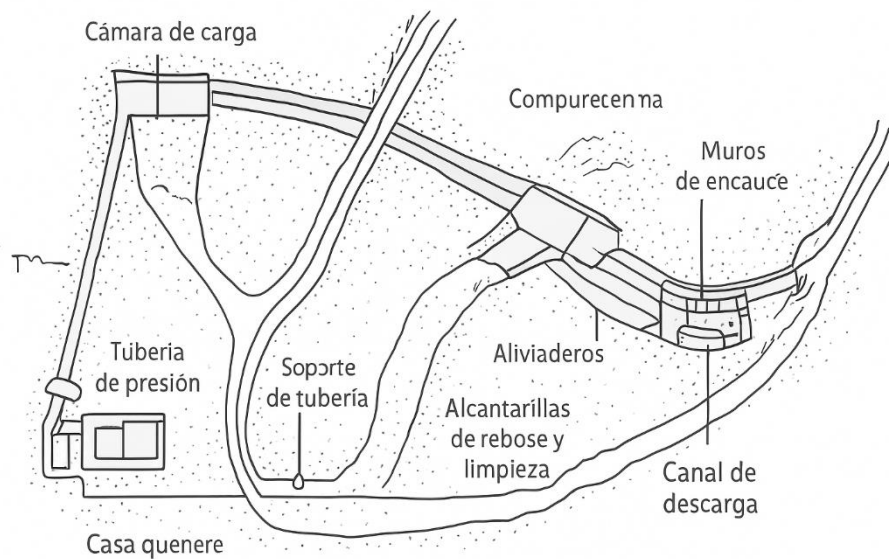
La ubicación de una central hidroeléctrica depende de la topografía del área y la accesibilidad para la construcción de obras civiles. Si se requieren múltiples estaciones sincronizadas, es recomendable que la distancia entre ellas no exceda un kilómetro; distancias mayores podrían requerir equipos elevadores de tensión para transportar la energía desde la subestación hasta la casa de máquinas. Además, la implementación de subestaciones ofrece la ventaja de mantener el suministro eléctrico incluso si una estación necesita detenerse, lo cual es beneficioso para planes de mantenimiento (Coz, 2005).

2.3.5.12. Obras civiles de una pequeña central hidroeléctrica.

Los sistemas de abastecimiento de agua en centrales hidroeléctricas de pequeña escala incluyen varios componentes esenciales. Entre ellos se encuentran el barraje de derivación, la toma de ingreso y las compuertas de regulación, que controlan el flujo de agua. Además, se emplean aliviaderos y canales de rebose para gestionar excesos hídricos. El transporte del agua se realiza mediante canales o tuberías de conducción, que pasan por un desarenador antes de llegar a la cámara de carga. Finalmente, la tubería de presión, junto con cruces de canal, apoyos y anclajes, garantizan la adecuada distribución del agua hasta la turbina (Delgado, 2014)

Figura 10.

Componentes de una pequeña central hidroeléctrica tipo



Notas. (Coz, 2005)

2.3.5.13. Tuberías de Conducción

El uso de tuberías en sistemas hidroeléctricos es más costoso que los canales abiertos, por lo que se optimiza con tuberías cortas y de mayor presión. Sin embargo, pueden presentar bloqueos y su instalación en terrenos escarpados puede ser inviable. Cuando la topografía impide construir canales, las tuberías largas son una alternativa, pero es clave elegir un diámetro que garantice el caudal de diseño y minimice costos. Además, se deben tomar precauciones para evitar daños por crecidas del río (Zela, 2011).

2.3.5.14. Bocatoma de fondo.

Una bocatoma de fondo es una estructura diseñada para regular y captar un caudal específico destinado a la producción de energía hidroeléctrica. Su función principal es asegurar un flujo constante y evitar la entrada de sólidos flotantes al sistema. La ubicación óptima de una bocatoma se encuentra en tramos rectos y estables del río, considerando factores como la topografía, la geología y las variaciones hidrológicas del área (Pacheco & Pallo, 2014).

2.3.5.15. Desarenador y Cámara de Carga.

El agua que ingresa a las turbinas contiene partículas sólidas que pueden desgastar sus álabes. Para evitarlo, se emplean desarenadores, donde el flujo se reduce para que las partículas decanten y puedan ser extraídas. Además, la cámara de carga regula la presión y asegura un flujo constante hacia las turbinas, evitando la entrada de aire (Delgado, 2014).

2.3.5.16. Tubería de Presión.

La tubería de presión es un componente clave en una central hidroeléctrica, ya que su costo puede representar una parte significativa del presupuesto total. Optimizar su diseño ayuda a reducir gastos de instalación y mantenimiento. Es fundamental que los soportes y anclajes se coloquen en pendientes estables con cimientos adecuados para garantizar su durabilidad y eficiencia (Zela, 2011).

2.3.5.17. Válvulas Para Tuberías de Presión.

Para el caso de la pequeña central el uso de válvulas en tuberías de presión se restringe principalmente a las válvulas de mariposa y de compuerta debido a su eficiencia y versatilidad. Estas permiten regular el flujo de agua y facilitar el mantenimiento del sistema con un diseño adecuado para altas presiones (United Nations Industrial Development Organization, 2019).

2.3.5.18. Apoyos y anclajes para tuberías de presión.

Los apoyos y anclajes en tuberías de presión evitan desplazamientos y daños estructurales causados por la fuerza del flujo de agua. Para su estabilidad, deben instalarse sobre suelo firme y no sobre rellenos. Asimismo, resulta fundamental incorporar canaletas de drenaje a lo largo de la tubería con el fin de evitar procesos de erosión en las bases de los soportes (Asociación de bancos privados del Ecuador, 2022).

2.3.6. Criterios para selección y viabilidad de una PCH

La factibilidad de implementar una central hidroeléctrica de pequeña escala demanda una evaluación completa que considere de manera conjunta los criterios técnicos, financieros, ecológicos y sociales. Dicha evaluación debe asegurar que la iniciativa resulte viable, genere beneficios económicos y mantenga armonía con las condiciones del medio donde se llevará a cabo.

2.3.6.1. Parámetros mínimos requeridos.

Para considerar viable el diseño de una PCH, es fundamental evaluar la disponibilidad del recurso hídrico. Se recomienda un caudal medio anual superior a 0.5 m³/s, lo que permite una producción de energía constante y suficiente para justificar la inversión inicial (Riccardi et.al, 2018).

Además, una altura neta de caída significativa, preferiblemente mayor a 15 metros para mini hidroeléctricas, mejora la eficiencia del sistema y reduce el volumen de agua necesario para alcanzar una determinada generación (Morales, Corredor, Paba, & Pacheco, 2014).

La topografía del terreno también es crucial; zonas con pendientes naturales permiten aprovechar la energía potencial del agua, reduciendo la necesidad de estructuras adicionales. Asimismo, se deben evaluar las condiciones geológicas del sitio para garantizar la estabilidad de las obras civiles y prevenir problemas de filtraciones o deslizamientos (Zela, 2011).

La accesibilidad al sitio es otro factor clave; se recomienda que la distancia al punto de conexión con la red eléctrica sea inferior a cinco kilómetros, lo que reduce significativamente los costos de interconexión y las pérdidas de energía durante el transporte (Vallejo et.al, 2018).

2.3.6.2. Limitaciones y barreras frecuentes.

A pesar de sus múltiples ventajas, el desarrollo de PCH en Ecuador enfrenta diversas limitaciones. Una de las principales es de carácter técnico, relacionada con la disponibilidad limitada de sitios con pendientes apropiadas y con condiciones geológicas estables (Villagran, 2007).

Desde la perspectiva regulatoria, el marco jurídico puede constituir un obstáculo, ya que los trámites relacionados con licencias ambientales, concesiones de aprovechamiento hídrico y autorizaciones para obras civiles suelen ser extensos y complejos. A esto se suma la elevada inversión inicial, que representa otra limitación significativa. Si bien las pequeñas centrales hidroeléctricas presentan gastos de operación relativamente reducidos, los costos vinculados a estudios previos, adquisición de equipos,

construcción de infraestructura y conexión al sistema eléctrico resultan considerablemente altos (Terra & Schenzer, 2014).

Finalmente, existen barreras sociales y ambientales que deben ser gestionadas adecuadamente. En algunas zonas, las comunidades pueden percibir el proyecto como una amenaza a su acceso al agua o a sus prácticas culturales, lo cual genera conflictos y oposición (Osorio, 2017).

2.3.7. Metodologías de análisis en proyectos hidroeléctricos

El desarrollo de proyectos hidroeléctricos, incluso aquellos de pequeña escala como las PCH, requiere de metodologías sistemáticas que garanticen su viabilidad técnica, económica, ambiental y social. Estas metodologías se estructuran en varias fases que incluyen la evaluación de recursos hídricos disponibles, el diagnóstico detallado del sitio desde el punto de vista hidrológico y topográfico, y los estudios de prefactibilidad y factibilidad. La correcta aplicación de estas herramientas metodológicas permite reducir riesgos y optimizar la inversión en estos proyectos.

2.3.7.1. Evaluación de recursos hídricos.

La evaluación del recurso hídrico es un paso crítico en el diseño de cualquier central hidroeléctrica. Para ello se deben cuantificar los caudales disponibles, su variabilidad temporal y espacial, así como la calidad del agua. Esta etapa suele incluir el análisis de series históricas de caudales, obtenidas a través de estaciones hidrométricas, modelaciones hidrológicas, o bien mediante aforos directos. Además, se determina el caudal ecológico, indispensable para garantizar la conservación del ecosistema aguas abajo de la obra de captación (MAATE, 2021).

Los métodos más comúnmente empleados incluyen análisis estadísticos como el de recurrencia o el de frecuencia, y herramientas de simulación hidrológica con software como HEC-HMS o WEAP. Para proyectos de pequeña escala, se recomienda disponer de al menos 10 años de datos hidrológicos representativos para reducir la incertidumbre en la estimación del caudal medio anual y del caudal firme (ESMAP, 2005).

2.3.7.2. Métodos de diagnóstico hidrológico y topográfico.

Una vez definido el potencial hídrico, es indispensable realizar un diagnóstico integral del terreno. El levantamiento topográfico de la zona posibilita determinar con exactitud el recorrido del canal de conducción, la localización de la casa de máquinas y la altura neta de caída. Los métodos modernos incluyen el uso de drones con LIDAR, fotogrametría, y levantamientos con estaciones totales o GPS diferencial.

Por otro lado, el diagnóstico hidrológico incluye la identificación de zonas de escurrimiento, infiltración, y retención, así como la evaluación del régimen de lluvias y posibles eventos extremos. Estas evaluaciones permiten dimensionar adecuadamente las obras hidráulicas y prever medidas de control de inundaciones o sedimentos (García, 2018). Este diagnóstico también contempla aspectos del uso actual del suelo y cobertura vegetal, ya que influyen directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca.

2.3.7.3. Análisis de prefactibilidad y factibilidad

El análisis de prefactibilidad permite descartar sitios con limitaciones técnicas insalvables o costos excesivos, con una inversión relativamente baja. Esta fase abarca estimaciones preliminares de producción energética, análisis del acceso a líneas de transmisión, revisión legal y social básica, y un primer análisis económico (BCE, 2019).

En cambio, la factibilidad técnica implica estudios detallados de ingeniería civil, eléctrica, ambiental y económica. En esta etapa se incluyen modelos hidráulicos más precisos, simulaciones de generación, estudios de impacto ambiental y social, así como análisis costo-beneficio y evaluación financiera con indicadores como el VAN y la TIR. La factibilidad también define el modelo de gestión y operación del proyecto, considerando aspectos institucionales y de financiamiento (IEA, 2021).

En la tabla 10 se observa las fases de los proyectos junto con las herramientas comúnmente usadas para su desarrollo

Tabla 10.

Fases en la elaboración de proyectos hídricos.

Fases del proyecto	Descripción	Herramientas/métodos
--------------------	-------------	----------------------

Evaluación de recursos hídricos	Análisis de caudales, series históricas, modelación hidrológica, determinación de caudal ecológico	HEC-HMS, WEAP, Excel, datos INAMHI
Diagnóstico topográfico e hidrológico	Levantamiento topográfico, análisis de escurrimiento, cobertura vegetal, eventos extremos	Drones, GPS diferencial, LIDAR, QGIS
Prefactibilidad	Evaluación preliminar de generación, aspectos legales, sociales, técnicos y económicos	Análisis costo-beneficio, evaluación social, mapas SIG
Factibilidad	Estudios detallados: ingeniería, impacto ambiental, análisis financiero, modelos de gestión	Modelos hidráulicos, simulación energética, VAN, TIR, software de ingeniería

En el plano económico, es esencial estimar con exactitud los costos iniciales de inversión, así como los gastos de operación y mantenimiento, y proyectar los ingresos provenientes de la comercialización de la energía. Para valorar la rentabilidad del proyecto a futuro, se emplean herramientas financieras como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), que permiten analizar la viabilidad económica y comparar diferentes alternativas de inversión (Zela, 2011) (Confirmado, 2024).

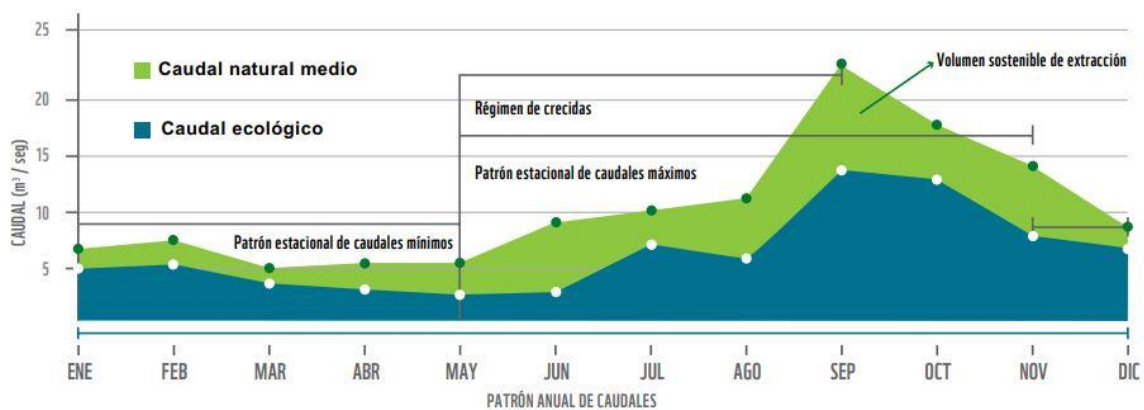
En cuanto al componente ambiental, se deben identificar los impactos potenciales sobre los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, evaluando efectos sobre la fauna, la flora, la calidad del agua y el paisaje. La normativa ecuatoriana exige la realización de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), y las guías correspondientes establecen parámetros específicos para proyectos hidroeléctricos de pequeña escala (Zela, 2011).

El diseño de la central debe minimizar afectaciones a los ecosistemas acuáticos, asegurando el mantenimiento del caudal ecológico y evitando la fragmentación de hábitats.

Para el caudal ecológico como indica la figura 11 como un instrumento de gestión hídrica que minimiza el impacto de este tipo de actividades antropogénicas se suele utilizar modelos hidrológicos que se construyen a través del estudio histórico de parámetros hídricos como el caudal, la precipitación, escorrentía, evapotranspiración entre otros. (Alp, Akyuz, & Kucukali, 2020) (Geo Sigma, 2020).

Figura 11.

Régimen del caudal ecológico anual.



Nota. Obtenido de (Geo Sigma, 2020)

El estudio técnico de los proyectos hidroeléctricos a pequeña escala contempla la valoración de los caudales disponibles, la determinación del potencial de generación energética y la elección de las tecnologías más apropiadas. Para asegurar su factibilidad, resulta esencial aplicar modelos hidrológicos que permitan simular procesos clave, como la conversión de la precipitación en escorrentía y la propagación del flujo superficial (Riccardi et.al, 2018).

En Ecuador se han desarrollado estudios de factibilidad que integran el análisis de parámetros técnicos, ambientales, económicos y financieros, con el propósito de determinar la viabilidad de implementar pequeñas centrales hidroeléctricas (Zela, 2011).

La aceptación social es fundamental para el éxito de los proyectos hidroeléctricos. Diversos estudios resaltan la importancia de integrar a las comunidades locales en todas las etapas del proyecto, desde la planificación hasta la operación, para garantizar su viabilidad y sostenibilidad. Mientras que otros estudios sugieren que los proyectos

hidroeléctricos de pequeña escala pueden tener impactos sociales negativos significativos, como conflictos socioambientales, desplazamiento de comunidades y cambios en los medios de vida locales, a pesar de las salvaguardas implementadas (Vallejo et.al, 2018).

Como se menciona en el párrafo anterior la integración de la sociedad en este tipo de proyectos es especialmente imprescindible en zonas rurales e indígenas. Es menester analizar el grado de aceptación por parte de las comunidades locales, sus expectativas frente al proyecto y las posibles afectaciones a sus actividades tradicionales (Anda et.al, 2018).

2.3.7.4. Recursos Hídricos Y Su Aprovechamiento Sostenible.

Las tecnologías hidroeléctricas de pequeña escala constituyen una alternativa sostenible para la generación de energía renovable, al favorecer un uso eficiente de los recursos hídricos y minimizar los impactos ambientales en comparación con las grandes centrales. Su implementación se caracteriza por una reducida huella ecológica, ya que requieren obras de menor envergadura y generan menos alteraciones en los ecosistemas, además de que su capacidad de generación se ajusta a las condiciones específicas de cada fuente hídrica local. (Chuquin & Mayorga, 2024).

Una de las principales ventajas de estas tecnologías es su durabilidad. Las instalaciones hidroeléctricas de pequeña escala pueden mantenerse operativas durante décadas aproximadamente 30 a 40 años con el adecuado mantenimiento, lo que permite una sostenibilidad a largo plazo. A diferencia de las grandes represas, las hidroeléctricas de pequeña escala requieren infraestructuras más simples, que no modifican drásticamente los ecosistemas acuáticos, permitiendo una integración más armoniosa con el entorno natural. (Gomezcoello & Sarango, 2017)

Según datos del Ministerio de Energía y Minas, hasta 2020, el país contaba con 71 centrales hidroeléctricas operativas, sumando una capacidad instalada de 5.071 MW. De este total, una proporción significativa corresponde a PCH que aportan al suministro energético nacional, varios de esos proyectos hidroeléctricos de pequeña escala están operando con éxito (Ministerio de Energía y Minas, 2024). Entre ellos, destacan iniciativas como:

Papallacta con una capacidad instalada de 4,2 MW, opera desde 1961 en la provincia de Napo. Es una central de pasada que utiliza una turbina Francis horizontal y no requiere de una represa y Loreto también ubicada en Napo, operativa desde 1961, esta central de pasada tiene una capacidad de 2,15 MW y funciona como instalación complementaria a Papallacta.

Sarapullo que es parte del complejo Toachi-Pilatón, esta central de embalse inició operaciones en 2023 con una capacidad de 49 MW, utilizando tres turbinas Francis de 16,3 MW cada una.

Palmira-Nanegal situada en Pichincha, comenzó a operar en 2017. Es una central de embalse con una capacidad de 10 MW que suministra energía al noroccidente de la provincia.

Mazar Dudas localizada en Cañar, esta central de embalse consta de tres plantas que, en conjunto, suman una capacidad de 21 MW y una producción estimada de 125,4 GWh anuales. Alazán: Ubicada en Azogues, inició operaciones en 2015 con una capacidad de 6,23 MW, generando hasta 2020 un total de 101.581,18 MWh.

Ocaña es una central de embalse en Cañar, operativa desde 2012, cuenta con una capacidad de 26,1 MW y utiliza dos turbinas Pelton con un caudal de diseño de 8,2 m³/s.

Gualaceo, esta mini central en Azuay, con una capacidad de 0,97 MW, fue rehabilitada en 2013, logrando un incremento del 94% en su generación.

En la tabla 11 se presenta un listado de pequeñas, micro y mini centrales hidroeléctricas menores de 30 MW conectados al Sistema Nacional Interconectado SNI de acuerdo al informe de expansión de energía hidroeléctrica del CENACE pertenecientes a las empresas de distribución eléctrica, a municipios y a empresas privadas (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Tabla 11.
Centrales hidroeléctricas con potencias menores a 30 MW.

Nombre Agente	Nombre central	Nombre Unidades	Potencia efectiva	Potencia efectiva central
----------------------	-----------------------	------------------------	--------------------------	----------------------------------

			por unidad	
Ambato generador	C.H. Península	Península U1	500	3.000
		Península U2	500	
		Península U3	500	
		Península U4	1.500	
Elecaastro	C.H. Ocaña	Ocaña U1	13.050	26.100
		Ocaña U2	13.050	
	C.H. Saucay	Saucay U1	4.000	24.000
		Saucay U2	4.000	
		Saucay U3	8.000	
		Saucay U4	8.000	
	C.H. Saymirín 5	Saymirín 5 U1	3.760	7.520
		Saymirín 5 U2	3.760	
Cnel Bolívar Generador	C.H. Saymirin	Saymirín U1	1.250	14.400
		Saymirín U2	1.250	
		Saymirín U3	1.950	
		Saymirín U4	1.950	
	C.H. Río Chimbo	Saymirín U5	4.000	1.350
		Saymirín U6	4.000	
		Río Chimbo U1	450	
		Río Chimbo U2	900	
Cotopaxi Generador	C.H. Illuchi	Illuchi U1	600	4.000
		Illuchi U2	600	
	C.H. Illuchi 2	Illuchi U3	1.400	5.000
		Illuchi U4	1.400	
Ecoluz Autoproductor	C.H. Papallacta	Ill2h0A	2.500	6.100
		Ill2h0A	2.500	
Ecoluz Generador	C.H. Loreto	Papallacta U1	1.900	2.100
		Papallacta U2	4.200	
Epmaps Autoproductor	C.H. El Carmen	Loreto U1	2.100	8.300
		Carm U 1	8.300	
	C.H. Recuperadora	Gen.Hidr Recuperadora U1	14.500	14.500

Epmaps	Microcentral tanque alto	Tanque alto		
Generador	Carcelén	Carcelén U01	60	60
Enermax	C.H. Calope	Calope U1	9.000	18.000
Autoproductor		Calope U2	9.000	
	C.H. Ambi	Ambi U1	4.000	8.000
		Ambi U2	4.000	
		La Playa U1	410	
Emelenorte	C.H. La playa	La Playa U2	410	1.230
Generador		La Playa U3	410	
	C.H. San Miguel de Car	San Miguel U1	2.940	2.940
	C.H. La Merced de Buenos Aires	Buenos Aires U01	980	980
	C.H. Los Chillos	Los Chillos U1	900	1.800
		Los Chillos U2	900	
		Guangopolo Hidro U1	2.000	
		Guangopolo Hidro U2	2.000	
		Guangopolo Hidro U3	1.700	
	C.H. Guangopolo	Guangopolo Hidro U4	1.700	20.400
Quito Generador		Guangopolo Hidro U5	2.000	
		Guangopolo Hidro U6	11.000	
	C.H. Nayón	Nayón U1	14.400	28.800
		Nayon U2	14.400	
	C.H. Pasochoa	Pasochoa U1	2.300	4.600
		Pasochoa U2	2.300	
		Alao U1	2.600	
Riobamba	C.H. Alao	Alao U2	2.570	10.440
Generador		Alao U3	2.660	
		Alao U4	2.610	
	C.H. Río Blanco	Río Blanco U1	3.000	3.000
	C.H. Carlos Mora Carrión	Carlos Mora U1	600	2.400

Regional Sur		Carlos Mora U2	600	
Generador		Carlos Mora U3	1.200	
Hidalgo Hidalgo	C.H. Sibimbe	Sibimbe U1	7.500	15.000
		Sibimbe U2	7.500	
HidroImbabura	HidroCarolina	Hidrocarolina U01	900	900

Nota. Obtenido de (Inga, 2015)

2.3.8. Enfoque de sostenibilidad y gestión integrada del agua

La sostenibilidad en los proyectos hidroeléctricos, implica un equilibrio entre el aprovechamiento del recurso hídrico y la preservación de los ecosistemas. El enfoque moderno en el diseño e implementación de estas centrales incluye la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la contribución a la transición energética hacia sistemas más limpios y resilientes (Martínez & Villalejo, 2018).

2.3.8.1. Gestión integrada de recursos hídricos (GIRH).

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se entiende como un enfoque orientado a planificar y administrar de forma conjunta el agua, el suelo y los recursos asociados, con el propósito de optimizar los beneficios sociales y económicos de manera justa, garantizando al mismo tiempo la conservación de los ecosistemas esenciales (Basterrechea & Franco, 2021). En el contexto de las PCH, esta gestión implica integrar el diseño de los proyectos con políticas de cuenca, participación comunitaria y mecanismos de control de impactos ambientales y sociales (Alarcón, 2019).

En Ecuador, la GIRH está reconocida como una herramienta estratégica para la planificación territorial. Para el desarrollo de PCH, implica considerar aspectos como: Balance hídrico de la microcuenca. Múltiples usos del agua (riego, consumo humano, conservación). Participación de actores locales, gestión comunitaria del agua y evaluación de caudales ecológicos.

2.3.8.2. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El desarrollo de las pequeñas centrales hidroeléctricas guarda una relación directa con diversos ODS planteados en la Agenda 2030 de la ONU. De manera específica, estas infraestructuras aportan a la provisión de energía limpia y de bajo costo, apoyan la administración responsable del recurso hídrico, estimulan un crecimiento económico con enfoque inclusivo y contribuyen a la mitigación de los efectos del cambio climático. (Munévar, Díaz, & Sanchez, 2023).

La generación de energía limpia y de bajo costo constituye el eje central en el desarrollo de las PCH. Estas plantas suministran electricidad sostenible a zonas rurales, reducen la dependencia de combustibles fósiles y fortalecen la capacidad de resiliencia energética a nivel comunitario. (Navarro, 2023).

2.3.8.1. Rol de las PCH en la transición energética ecuatoriana.

La transición energética se concibe como un proceso mundial que busca sustituir los modelos de generación y uso de energía fundamentados en combustibles fósiles por opciones renovables, sostenibles y de bajo impacto ambiental. En el caso de Ecuador, este cambio ha cobrado importancia estratégica, tanto por los compromisos internacionales de mitigación de emisiones como por la urgencia de diversificar la matriz energética del país (Loayza, 2025).

Las PCH juegan un rol fundamental dentro de esta transición. Su aprovechamiento permite descentralizar la generación energética, impulsar el acceso a energía en comunidades aisladas, y reducir la vulnerabilidad del sistema eléctrico nacional ante eventos climáticos extremos. A diferencia de las grandes centrales hidroeléctricas, las PCH requieren menores superficies inundadas, generan impactos ambientales más controlables y pueden adaptarse a las características particulares de cada microcuenca, favoreciendo así una gestión hídrica sostenible (Alarcon, 2021).

En términos de política pública, Ecuador ha reconocido el potencial de las PCH a través de instrumentos como el Plan Maestro de Electricidad y las actualizaciones de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC). Ambos documentos promueven el aumento de la participación de fuentes renovables en la matriz energética, entre ellas las

hidroeléctricas de pequeña escala, la energía solar y la eólica (Ministerio de energía y minas Ec, 2021) (República del Ecuador, 2025)

Sin embargo, para consolidar su aporte en la transición energética, se requiere superar ciertos desafíos, entre ellos el acceso a financiamiento para proyectos de menor escala, la simplificación de procesos de licenciamiento ambiental, y la implementación de mecanismos de incentivos específicos para la inversión en energía renovable distribuida (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1. Enfoque de la Investigación

El enfoque de esta investigación es de naturaleza cualitativa y cuantitativa, basado en el análisis documental de estudios previos y casos relacionados con la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador. Se emplea un enfoque mixto en el cual se integran elementos cuantitativos, como el análisis de datos sobre potencial hídrico y costos, con cualitativos, como la revisión de políticas, normativas y experiencias documentadas.

El enfoque cualitativo se basa en la revisión y análisis de literatura científica, documentos técnicos y marcos normativos vinculados a las energías renovables y, en particular, a la hidroenergía de pequeña escala, junto con la interpretación de la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de los sistemas hidroeléctricos en el contexto nacional.

Este enfoque se complementa con un análisis cuantitativo sustentado en datos hidrológicos de cuencas y microcuencas en Ecuador, así como en indicadores financieros como el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, además de información referente a los costos de instalación y operación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala.

3.2. Diseño de la Investigación

El diseño de esta investigación es no experimental, transversal y descriptivo, ya que se centra en el análisis de información existente sobre sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador sin manipular variables ni realizar experimentación directa. Además, incorpora una perspectiva exploratoria al examinar casos previos y normativas aplicables. No se intervendrán directamente los sistemas hídricos ni se realizarán ensayos físicos.

Se recopilarán datos secundarios de fuentes documentales, bases de datos hidrológicas y estudios técnicos. Es transversal debido a que la investigación se realiza en un período determinado, analizando información histórica y actual para evaluar las condiciones actuales del potencial hidroeléctrico de pequeña escala en Ecuador.

3.3. Tipo de Investigación

3.3.1. *Por su alcance*

El enfoque descriptivo permite caracterizar en detalle las variables involucradas en la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. Este tipo de investigación no busca manipular las variables, sino simplemente observar, analizar y detallar las características o dimensiones de los fenómenos estudiados.

En este caso, la investigación se centrará en describir aspectos como el potencial hidroeléctrico, el marco normativo, los costos y beneficios asociados, y la viabilidad de los proyectos.

Al tratarse de una investigación aplicada, el presente trabajo no se restringe únicamente a la descripción de fenómenos, sino que plantea directrices técnicas que servirán de base para tomar decisiones en proyectos energéticos de pequeña escala. De esta manera, contribuye a la formulación de soluciones factibles orientadas al uso eficiente de los recursos hídricos en áreas con potencial aún no aprovechado, particularmente en zonas rurales o fuera del sistema interconectado.

3.4. Nivel de Investigación

Para el análisis de la viabilidad de los sistemas de energía hidroeléctrica de pequeña escala en Ecuador, se empleará un enfoque exploratorio, descriptivo y correlacional, lo que permitirá comprender en profundidad el fenómeno estudiado y establecer relaciones entre sus diversas variables.

El estudio posee un carácter exploratorio, ya que busca identificar y analizar antecedentes sobre la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador.

La investigación exploratoria es adecuada cuando se trata de temas poco estudiados o cuando se requiere generar un marco teórico más sólido a partir de la revisión de experiencias previas.

Dado que en Ecuador existen estudios dispersos sobre proyectos hidroeléctricos de pequeña escala, pero pocos análisis integrales de su viabilidad en el contexto nacional, la exploración de literatura científica, documentos gubernamentales y proyectos previos permitirá establecer una base de referencia para la investigación.

El enfoque descriptivo se aplicará para caracterizar los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, sus componentes, normativas y el potencial hídrico del país, la investigación descriptiva permite detallar con precisión las características de un fenómeno, sin manipular las variables.

En este sentido, se analizarán las principales tecnologías utilizadas, los costos asociados, los beneficios energéticos y ambientales, así como las barreras para su implementación en Ecuador. La recopilación de datos provenientes de estudios previos, informes técnicos y bases de datos oficiales contribuirá a establecer una visión clara sobre la situación actual.

La investigación también adoptará un enfoque correlacional, ya que pretende identificar relaciones entre diferentes variables que influyen en la viabilidad de los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. Los estudios correlacionales buscan analizar asociaciones entre factores sin establecer causalidad directa.

En este estudio se analizará la vinculación entre el potencial hídrico existente y la viabilidad técnica, económica y legal de los proyectos hidroeléctricos en Ecuador. Asimismo, se considerará el efecto que ejercen los incentivos estatales, las fuentes de financiamiento y el marco regulatorio en la puesta en marcha de esta alternativa de energía renovable.

3.5. Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos

Dado que la presente investigación se basa en la revisión y análisis de estudios de caso documentados, la técnica principal para el procesamiento de datos es el análisis de contenido técnico-científico, complementado con cuadros comparativos y sistematización de parámetros de diseño extraídos de fuentes secundarias especializadas..

El procesamiento de datos incluyó varias etapas que permitieron organizar, depurar y analizar la información obtenida de diferentes fuentes.

Para la interpretación de datos cualitativos provenientes de la revisión documental, se aplicará el análisis de contenido, que permitirá identificar patrones, tendencias y conceptos clave en la información recopilada.

Se empleará una estrategia de análisis comparativo entre casos de estudio en Ecuador y experiencias internacionales, lo que permitirá evaluar similitudes y diferencias

en los enfoques adoptados para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala e identificar buenas prácticas y adaptar modelos exitosos al contexto ecuatoriano.

Los resultados serán interpretados y presentados mediante tablas, gráficos, diagramas de flujo y mapas conceptuales para ilustrar procesos y modelos de implementación.

3.6. Parámetros de diseño de una pequeña central hidroeléctrica

Para llevar a cabo esta investigación se establecieron parámetros técnicos clave orientados a valorar la factibilidad de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas en el contexto ecuatoriano. La elección de dichos parámetros se sustentó en la consulta de literatura especializada, en el marco normativo vigente a nivel nacional e internacional, y en el examen de estudios de caso previamente reportados. Aunque estos parámetros ya fueron expuestos y fundamentados en el capítulo 2, en la presente sección se argumenta su aplicación dentro del procedimiento metodológico.

Entre los parámetros seleccionados se incluyen el caudal medio anual disponible, la altura neta de caída, la eficiencia global del sistema y la demanda energética prevista. Estos criterios fueron elegidos por su relevancia en la determinación de la factibilidad técnica y económica de una PCH y porque son comúnmente empleados en estudios de preinversión y factibilidad de este tipo de proyectos (Hurtado & Castro, 2023).

El caudal medio anual disponible (Q) constituye una variable determinante para establecer la capacidad de generación de una PCH. Para este estudio, se considera como referencia un caudal mínimo de 0.5 m³/s, valor sugerido en la literatura técnica para garantizar una producción energética económicamente viable en sistemas de pequeña escala (Fundación Red de Energía, 2025).

La altura neta de caída (H_n) también se incluye como parámetro clave, ya que determina, en conjunto con el caudal, la potencia teórica disponible. Se ha considerado una altura ímina de 15 m, criterio que permite optimizar la eficiencia hidráulica del sistema y reducir los requerimientos volumétricos de agua para la generación de energía (Tello, 2024). Mientras que proyectos en América Latina destacan la optimización de eficiencia de los sistemas mediante políticas de uso racional del agua y tecnologías adaptadas a saltos hidráulicos ≥ 15 m (PNUMA, 2011).

La eficiencia global del sistema se ha estimado en un rango de 70% a 90%, dependiendo de las características específicas del sitio, el tipo de turbina seleccionada y

las condiciones de operación. Este valor es consistente con los reportados en estudios de caso de PCH implementadas en América Latina y en manuales de diseño reconocidos internacionalmente (Fundación Red de Energía, 2025).

Finalmente, la demanda energética prevista se incluye como variable de comparación para garantizar que la capacidad instalada propuesta pueda satisfacer las necesidades energéticas de la comunidad o región objetivo.

Estos parámetros, sistematizados a través de matrices comparativas y análisis de contenido, permitirán valorar de manera objetiva las condiciones técnicas de los casos de estudio seleccionados y establecer lineamientos generales para futuros proyectos de PCH adaptados a las particularidades hidrológicas, topográficas y sociales del Ecuador.

3.7. Selección y análisis de casos de estudio

3.7.1. Criterios de selección de casos

Para cumplir con los objetivos de la investigación y garantizar la validez y pertinencia de la información obtenida, se establecieron criterios específicos para la selección de los casos de estudio. Estos criterios permitieron identificar proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas que fueran representativos, considerando sus características técnicas y su importancia dentro del contexto socioambiental del Ecuador.

Los criterios de inclusión fueron proyectos clasificados como pico, micro, mini o pequeñas centrales hidroeléctricas; además de casos que hayan desarrollado al menos estudios de prefactibilidad o factibilidad técnica, o que estén en operación; también deben contar con información técnica suficiente para el análisis de parámetros de diseño, eficiencia y contexto social/ambiental.

Los criterios de exclusión incluyeron proyectos de gran escala debido a sus diferencias sustanciales en diseño, impacto ambiental y gestión. Casos con información técnica insuficiente o de baja confiabilidad también fueron descartados. Y proyectos que no cuenten con documentación pública o accesible a través de repositorios científicos o técnicos se excluyeron de la selección. En la tabla 12 se resumen tanto los criterios de inclusión como los de exclusión de esta selección de casos.

Tabla 12.

Criterios de selección y exclusión de casos de estudio

Criterio	Descripción
Ubicación geográfica	Principales cuencas y sub cuencas del país
Tecnología de energía renovable	Pequeñas y micro centrales hidroeléctricas
Tamaño del proyecto	A nivel doméstico, comunitario, red, industrial
Impacto socioeconómico	Proyectos que demuestren un efecto significativo en el desarrollo socioeconómico de las comunidades, considerando mejoras en la calidad de vida, educación, salud y generación de oportunidades económicas.
Impacto ambiental	Proyectos dirigidos a apoyar la mitigación del cambio climático, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo la conservación de los ecosistemas locales
Disponibilidad de datos	Casos de estudio basados en información confiable y verificable, que incluyen informes técnicos, artículos científicos y datos proporcionados por los actores clave involucrados en los proyectos

La aplicación de estos criterios permitió focalizar el análisis en casos que aportan datos relevantes para la formulación de lineamientos técnicos aplicables a futuras iniciativas de PCH en el país, considerando tanto el desempeño técnico como las lecciones aprendidas en términos de sostenibilidad, participación comunitaria y adaptación territorial.

3.7.2. Estrategia de búsqueda documental

La estrategia de búsqueda documental se diseñó con el fin de identificar fuentes confiables, actualizadas y pertinentes para el análisis de casos de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), así como para la recopilación de parámetros técnicos, normativos y contextuales relevantes. Este proceso metodológico se estructuró en torno a una revisión sistemática, orientada a garantizar la trazabilidad, validez y reproducibilidad de la información recopilada.

Se definieron palabras clave y descriptores controlados, combinados mediante operadores booleanos, para optimizar la búsqueda en bases de datos científicas y técnicas. Algunos de los términos utilizados fueron: “pequeñas centrales hidroeléctricas”, “mini hidroeléctricas”, “proyectos hidroeléctricos de pequeña escala”, “potencial hidroeléctrico”, “viabilidad técnica”, “energía renovable en Ecuador”, entre otros. Las búsquedas se complementaron con combinaciones en español e inglés (“small hydropower”, “mini hydro power plants”, “run-of-river systems”).

Los resultados se filtraron según los siguientes criterios resumido en la tabla 13.

Tabla 13.

Resultados obtenidos de acuerdo a filtros

Filtro	Descripción
Período de publicación	Entre 2010 y 2024
Idioma	Español e inglés
Tipo de documento	Artículos científicos, tesis de pregrado y posgrado, informes técnicos, estudios de pre y factibilidad, documentos oficiales y guías metodológicas
Acceso	Editoriales académicas, documentos de fuentes oficiales estatales
Bases de datos científicas	Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, Scielo
Repositorios institucionales	Biblioteca del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), ONUDI, Global Small Hydropower Database CELEC EP, ARCONEL, MAATE, Universidades

La búsqueda fue iterativa y dinámica, permitiendo ajustar los términos y fuentes conforme se identificaron patrones de relevancia y recurrencia temática. Toda la información seleccionada fue registrada y organizada en matrices de análisis para su posterior sistematización.

3.7.2. Procedimiento de análisis de información y sistematización de casos

El análisis de la información recopilada en los casos de estudio seleccionados se estructuró mediante un enfoque comparativo y cualitativo, orientado a identificar patrones técnicos, ambientales y sociales comunes que permitan inferencias aplicables al diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en territorios similares.

En la etapa de análisis de la documentación la primera fue la organización de la información, que una vez obtenida fue sistematizada en una matriz comparativa, estructurada con base en los siguientes ejes:

- Características técnicas del sistema hidroeléctrico
- Condiciones topográficas e hidrológicas del sitio
- Modelos de gestión operativa y mantenimiento
- Impactos sociales, ambientales y económicos

La segunda etapa fue la codificación y categorización temática aplicada para clasificar la información relevante según los objetivos de la investigación. Esta etapa facilitó el reconocimiento de similitudes y diferencias entre los casos, permitiendo su agrupación por categorías como tipo de turbina, esquema de captación y estrategias de sostenibilidad.

La tercera etapa es la evaluación técnica comparativa con base en las variables técnicas clave (caudal, altura neta, potencia instalada, eficiencia del sistema), se construyeron perfiles técnicos de cada PCH, permitiendo evaluar su replicabilidad en contextos similares.

La fase conclusiva de la evaluación de los datos recopilados consistió en un análisis transversal de sostenibilidad basado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Durante este proceso se identificaron prácticas coherentes con los principios de sostenibilidad energética, inclusión social y gestión ambiental responsable, lo que facilitó la formulación de recomendaciones estratégicas para el diseño de futuros proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas con un enfoque sostenible.

Este procedimiento metodológico permitió construir una base de conocimiento aplicada, orientada a generar recomendaciones de diseño adaptativo para pequeñas centrales hidroeléctricas, considerando no solo variables técnicas, sino también el contexto territorial, social y ambiental. Asimismo, la sistematización estructurada de casos reales fortalece el componente de aplicabilidad y transferencia tecnológica de la investigación.

3.7.3. Síntesis metodológica

La presente investigación adoptó un enfoque cualitativo-descriptivo con base en el análisis documental y el estudio de casos, orientado a establecer criterios técnicos y sostenibles para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en contextos geográficos similares al ecuatoriano. La metodología se estructuró en varias fases interrelacionadas que permitieron abordar los objetivos específicos del estudio.

En la primera etapa, se definió el enfoque, tipo y nivel de investigación, priorizando la exploración de información técnica existente y la sistematización de experiencias aplicadas. A continuación, se seleccionaron casos de estudio mediante criterios definidos de viabilidad, accesibilidad, representatividad y calidad técnica de la documentación.

El procedimiento metodológico integró técnicas como la revisión bibliográfica sistemática, el análisis comparativo y la codificación temática de variables técnicas, sociales y ambientales. Se utilizaron herramientas como matrices comparativas, fichas técnicas, y esquemas de categorización para garantizar la rigurosidad del análisis.

Además, se establecieron parámetros de diseño que permitieron contrastar las especificaciones de los proyectos estudiados con las condiciones particulares del contexto de aplicación. Esta triangulación de información técnica, documental y contextual fortaleció la validez y aplicabilidad de los hallazgos.

Finalmente, la metodología propuesta permitió no solo extraer recomendaciones técnicas concretas, sino también generar un marco de referencia que puede ser replicado en estudios similares de diseño o evaluación de PCH con un enfoque sostenible e integrado.

A manera de resumen se presenta la tabla 14 en la cual se sintetiza la metodología usada en la evaluación de proyectos hídricos base del presente estudio, así como la relación de variables y el peso otorgado a cada aspecto utilizado.

Tabla 14.

Resumen de la metodología aplicada.

Proceso	Objetivo	Actividades clave	Evidencias / Producto	Variables asociadas
Selección de criterios de evaluación	Definir <i>qué</i> y <i>cómo</i> se evaluará	Delimitar dimensiones técnica, ambiental, social y regulatoria; fijar indicadores y umbrales	Lista de criterios/indicadores con definiciones operativas	Región del país, tipo de central, tecnología, potencia instalada, Q, H, eficiencia; aspectos ambientales/sociales; regulatorio
Uso de bases de datos	Reunir fuentes confiables y trazables	Identificar repositorios/Informes/Fichas; registrar metadatos	Inventario de fuentes con enlace, fecha y responsable	Bases de datos de fuentes confiables
Filtro de información	Garantizar calidad y comparabilidad	Criterios de inclusión/exclusión (período, idioma, validez científica); homogeneizar unidades	Base depurada y unificada en las mismas unidades	Período, idioma, validez; consistencia en Q, H, P, η
Selección de casos de estudio (ocho)	Elegir 8 casos representativos y con datos suficientes	Aplicar filtros y criterios mínimos (Q–H, tecnología, trazabilidad)	Lista justificada de 8 casos con ficha resumida	Información del proyecto; tipo de central, ubicación, Q, H, tecnología, permisos
Extracción de información relevante	Estandarizar la información de cada caso	Llenar fichas comparables con datos técnicos y cualitativos	Tabla/fichas por caso con campos completos	Q, H, tecnología, potencia/eficiencia, impacto ambiental, impacto social, regulatorio
Determinación del estado actual de PCH	Sintetizar hallazgos comparativos	Tablas con rangos Q–H, tecnologías, cumplimiento ambiental/regulatorio	Tabla de síntesis de proyectos en ejecución	Conjunto de criterios técnicos, sociales, ambientales y regulatorios
Evaluación y discusión de información	Explicar relaciones y priorizar (si aplica)	Análisis H–P, Q–tecnología, cumplimiento ambiental/social;	Gráficas H vs P, etc; energía por caso, aporte al SNI	Criterios técnicos de diseño de PCH y cumplimiento ambiental/social.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de Resultados

4.1. Análisis Descriptivo de los Resultados

Para esta investigación sobre el desarrollo de la electrificación rural mediante energías renovables, se emplearán métodos cualitativos y cuantitativos. Entre ellos, se incluyen la revisión exhaustiva de la literatura, el estudio de múltiples casos, el análisis de contenido cualitativo, evaluaciones económicas y de impacto, además de la elaboración de un marco conceptual.

4.1.1. Revisión detallada de la literatura

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura disponible sobre la implementación de plantas hidroeléctricas de pequeña escala como fuentes de energías renovables en diversas regiones de Ecuador. Esta revisión incluyó artículos científicos, informes técnicos y otros documentos relevantes extraídos de diversas bases de datos y motores de búsqueda académica.

Para garantizar la rigurosidad del proceso, se establecieron criterios claros de búsqueda, priorizando fuentes académicas, artículos científicos indexados y documentos técnicos de organismos especializados. Se utilizaron motores de búsqueda académicos reconocidos como Scopus, ScienceDirect, Scielo y Google Scholar. La tabla 15 presenta de forma sintetizada los términos utilizados, los filtros aplicados, la cantidad de resultados encontrados y el número de artículos finalmente seleccionados luego de evaluar su relevancia y calidad.

Tabla 15.

Análisis de motores de búsqueda y bases de datos académicos

Motor de búsqueda	Criterios de búsqueda	Número de resultados	Documentos relevantes seleccionados
Repositorios universitarios	“hidroeléctricas de pequeña escala”, “microcentrales” “Ecuador”	215	19

Scopus	"small hydropower" AND "design" AND "feasibility"	328	9
ScienceDirect	"mini hydroelectric plants" AND "Ecuador" AND "rural electrification"	189	14
Scielo	"hidroeléctricas de pequeña escala" AND "diseño técnico"	76	12

Como resultado del proceso, se obtuvieron 54 documentos relevantes, que constituyen la base teórica y técnica de este estudio. Los documentos fueron seleccionados considerando su aplicabilidad al contexto ecuatoriano, la actualidad de la información y la calidad metodológica de los estudios.

Este proceso permitió identificar casos de éxito, criterios de diseño, limitaciones comunes, avances tecnológicos y enfoques de sostenibilidad relacionados con las PCH. A partir de esta base, se desarrollaron los análisis presentados en los apartados siguientes, incluyendo la selección de casos representativos nacionales.

Entre los hallazgos más relevantes se encuentra la preferencia por turbinas tipo Pelton y Francis en proyectos con caídas altas y medianas, respectivamente, así como el uso de conducciones en acero galvanizado y sistemas de regulación automática. La eficiencia global de estos sistemas, según diversos estudios de caso, fluctúa entre el 65 % y 85 %, dependiendo de la correcta selección de componentes y la calidad del mantenimiento.

También se identificaron múltiples estudios que abordan la repotenciación de PCH existentes, subrayando el potencial no aprovechado en muchas instalaciones debido al deterioro de equipos, obsolescencia tecnológica o deficiencias en la gestión operativa. Asimismo, se documentaron casos de éxito en zonas rurales donde la implementación de PCH ha contribuido a la mejora del acceso a energía eléctrica, dinamización de economías locales y reducción de emisiones de carbono.

La literatura también revela una creciente incorporación de criterios de sostenibilidad, incluyendo evaluaciones ambientales estratégicas y análisis multicriterio para la selección de sitios adecuados. Estos enfoques integradores son fundamentales para garantizar la viabilidad a largo plazo de las PCH, particularmente en regiones con ecosistemas sensibles o poblaciones vulnerables.

Finalmente, esta revisión permitió establecer un marco de referencia para la selección de casos de estudio representativos en el contexto ecuatoriano, los cuales serán analizados en detalle en los apartados siguientes.

4.1.2. Selección De Casos De Estudio Representativos

En este estudio se realizó la selección de los proyectos más representativos de diseño, implementación y análisis de pequeñas centrales hidroeléctricas en distintas regiones de Ecuador, fundamentándose en una revisión exhaustiva de la literatura disponible. Los criterios de selección consideraron la ubicación geográfica de los proyectos, las tecnologías de energías renovables empleadas, la escala de cada iniciativa, así como los impactos socioeconómicos y ambientales generados. Adicionalmente, se tomó en cuenta la disponibilidad de datos confiables y verificables, imprescindibles para la validación de los casos de estudio escogidos. En la tabla 16 se presentan los criterios aplicados para la selección de los estudios.

Tabla 16.

Criterios de selección de casos de estudio.

Criterio	Descripción
Ubicación geográfica	Principales cuencas y sub cuencas del país
Tecnología de energía renovable	Pequeñas y micro centrales hidroeléctricas
Tamaño del proyecto	A nivel doméstico, comunitario, red, industrial
Impacto socioeconómico	Proyectos que muestren un efecto significativo en el desarrollo socioeconómico de las comunidades, incluyendo mejoras en la calidad de vida, la educación, la salud y la generación de oportunidades económicas.

Impacto ambiental	Proyectos orientados a contribuir a la mitigación del cambio climático mediante la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la conservación de los ecosistemas locales.
Disponibilidad de datos	Casos de estudio basados en información confiable y verificable, que incluyen informes técnicos, artículos científicos y datos proporcionados por los actores clave involucrados en los proyectos

La elección de los casos de estudio más representativos se fundamentó en la recopilación de información de fuentes confiables y verificables, incluyendo investigaciones de pregrado y posgrado de universidades, informes técnicos, artículos científicos, reportes oficiales y datos proporcionados por los principales actores involucrados en la ejecución de los proyectos.

En el Anexo B se evidencia la lista de los títulos seleccionados con los parámetros de evaluación descritos en la tabla 16, en la cual se calificó sobre un puntaje total de 10 de acuerdo a la descripción del Anexo A y se seleccionó a los ocho documentos base del presente estudio conforme a su mayor calificación y pertinencia al presente estudio, teniendo en consideración que los documentos con una calificación de promedio moderado forman base del análisis para el reporte de resultados.

En la tabla 17 se resumen los casos de estudio seleccionados para la base informativa de esta revisión bibliográfica, junto con el año de publicación, el impacto socioeconómico y su impacto ambiental

Tabla 17.

Casos de estudio seleccionados.

Nro. de caso	Caso de estudio	Ubicación	Año de publicación	Impacto socioeconómico	Impacto ambiental
Caso 1	Estudio de factibilidad de una pequeña central	Guayas	2023	Medio	Medio

	hidroeléctrica en un afluente del Río Guayas – Ecuador				
	Aplicación De Software Libre Para El Diseño Y Modelación De Las Obras Hidráulicas A Flujo Libre De Una				
Caso 2	Pequeña Central Hidroeléctrica En El Río Zarapullo Ubicado En La Provincia De Sto. Domingo De Los Tsachilas Factibilidad De La Implementación	Santo Domingo	2015	Medio	Medio
Caso 3	Hidroeléctrica Para La Universidad Estatal Amazónica En El Puyo, Ecuador Escenarios de producción de energía eléctrica en una pequeña central hidroeléctrica utilizando series sintéticas	Pastaza	2024	Alto	Medio
Caso 4	Estudio de prefactibilidad para la repotenciación de la pequeña central hidroeléctrica el Amarillo situada en el cantón Portovelo	Cotopaxi	2023	Medio	Medio
Caso 5		El Oro	2019	Medio	Medio

Caso 6	Diseño De Una Central Hidroeléctrica Para La Generación De 10 Mw En El Río Chimbo, La Victoria	Chimborazo	2024	Medio	Medio
Caso 7	Diseño De Una Pequeña Central Hidroeléctrica En El Canal De Riego Ambato – Huachi – Pelileo En La Provincia De Tungurahua Desde El Tramo +0.00 Km Hasta +4.24 Km	Tungurahua	2021	Medio	Medio
Caso 8	Diseño Definitivo De La Central Hidroeléctrica “El Altar”	Chimborazo	2016	Medio	Alto

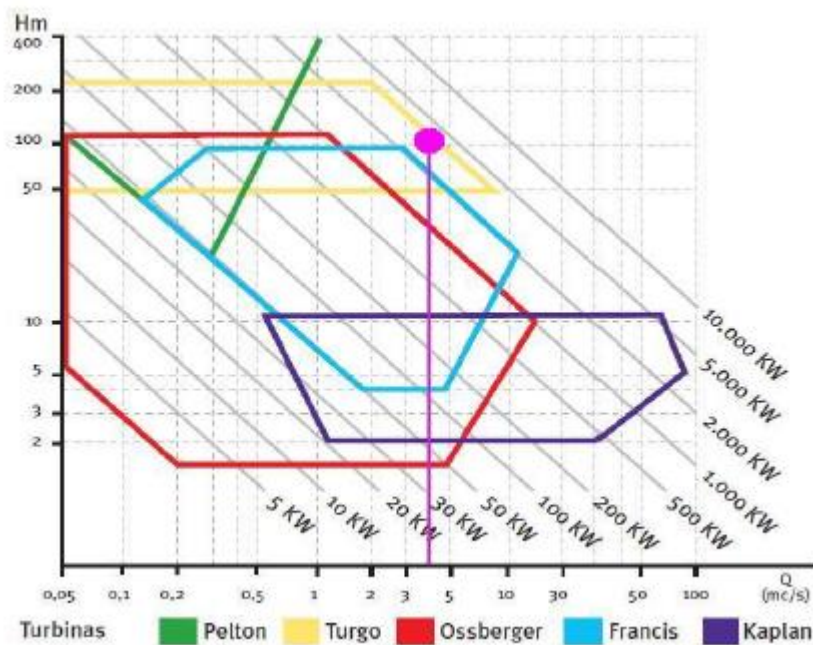
A manera de breve resumen se desarrollan los principales aspectos tratados en los estudios con lo cual se entiende de mejor manera la calificación cuantitativa que se otorgó a cada estudio.

4.1.2.1. Caso 1: PCH en un afluente del río Guayas.

El estudio evalúa la viabilidad de una pequeña central hidroeléctrica en un afluente del Río Guayas. Este proyecto se seleccionó por representar un sistema de generación en la región Costa, con características topográficas de colinas y caídas de agua media. El estudio determinó un caudal óptimo de 5,2 m³/s y comparando dos tipos de turbinas: Francis y Turgo. concluyendo que la turbina Turgo es la opción más eficiente, generando 37,6 GWh/año con una eficiencia del sistema del 90%, la selección se realizó de acuerdo al diagrama de eficiencia evidenciado en la figura 12.

Figura 12.

Diagrama de selección entre opciones de acuerdo al salto neto y el caudal del estudio en el río Guayas.



Nota. (Hurtado & Castro, 2023)

El proyecto busca mejorar la productividad en zonas específicas de la cuenca hidrográfica del río Guayas, contribuyendo al desarrollo local y al acceso a energía renovable. Se espera que la implementación de la central genere empleo y mejore la calidad de vida de la comunidad.

En el análisis ambiental, se determinó que las emisiones de CO_2 son considerablemente bajas (0,5 libras/kWh), con impactos locales en fauna y flora que pueden mitigarse mediante la implementación de escaleras para peces y zonas de protección. La generación hidroeléctrica a pequeña escala representa una alternativa sostenible para el aprovechamiento de los recursos hídricos locales, contribuyendo a la reducción de emisiones y al fortalecimiento de la matriz energética renovable del país.

Se estima que la inversión inicial asciende a 10 millones de USD, con ingresos anuales proyectados de 1,5 millones de USD. El análisis de sensibilidad señala que el proyecto mantiene su viabilidad incluso con una tarifa de \$0,04/kWh, lo que implica que, asumiendo un precio de venta equivalente a la mitad de la tarifa actual, se preserva la

factibilidad económica. Asimismo, se identifica que un incremento del 128% en los impuestos podría comprometer dicha viabilidad.

Se calcula una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 29,21% y un Valor Presente Neto (VAN) de 7,7 millones de USD, lo que sugiere una rentabilidad atractiva. El análisis financiero considera costos de proyecto y tarifas eléctricas, destacando la importancia de estos factores en la viabilidad económica (Hurtado & Castro, 2023).

4.1.2.2. Caso 2: PCH de flujo libre río Zarapullo.

El estudio se centra en el diseño hidráulico de prefactibilidad a flujo libre de una Pequeña Central Hidroeléctrica en el río Zarapullo, utilizando métodos como la observación y el análisis de caudales históricos. Se aplica software libre para la modelación y verificación de resultados, asegurando precisión en el diseño de los componentes con el fin de reducir costos y tiempos en estudios de pre inversión.

El proyecto tiene como objetivo incrementar el acceso a energía eléctrica en comunidades rurales, promoviendo el desarrollo social y económico de la zona. Se prevé que la construcción de la central genere empleo local y contribuya al bienestar de la población. Asimismo, el estudio integra la conservación de la biodiversidad y procura minimizar el impacto ambiental, en concordancia con el Plan Nacional para el Buen Vivir, evaluando los efectos sobre el ecosistema local y asegurando un uso sostenible de los recursos hídricos

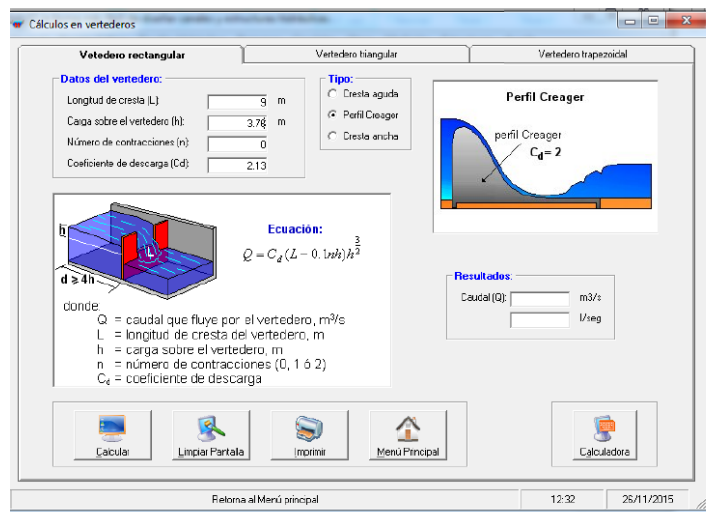
El análisis de costos se realizó en función de la pre-factibilidad del proyecto, considerando la inversión necesaria para su implementación. Se busca optimizar recursos y tiempos, facilitando la viabilidad económica del proyecto.

El estudio contempla la evaluación de costos de consultoría y la inversión inicial requerida, así como la proyección de beneficios económicos a largo plazo. Se espera que el proyecto no solo sea rentable, sino que también contribuya al desarrollo energético del país (Cabrera & Racines, 2015).

El uso de software especializado hace del proyecto dinámico con los datos obtenidos para su modelación, como se puede observar en la interfaz del programa HCanales presentado en la figura 13 del estudio en mención.

Figura 13.

Interfaz software HCANALES para el estudio en el río Zarapullo.



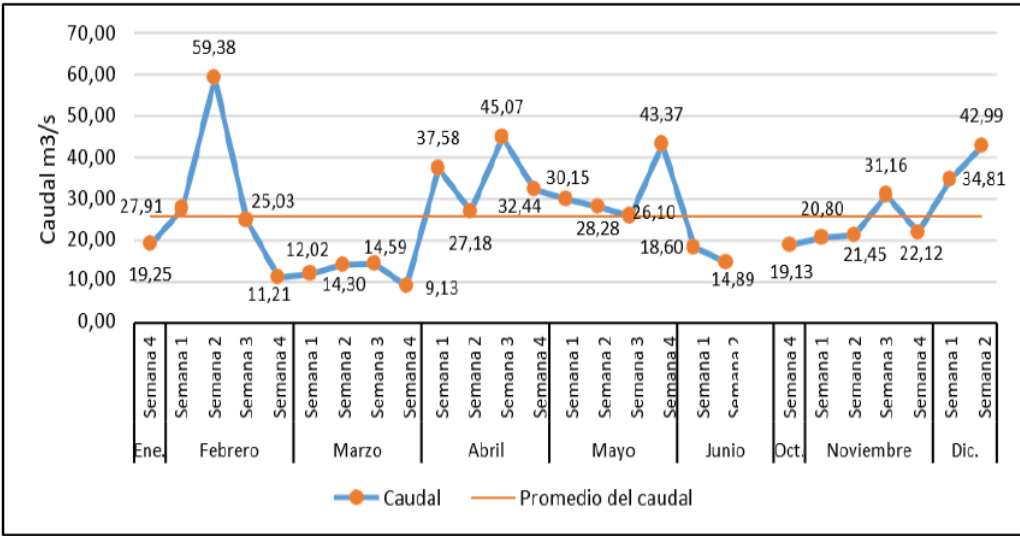
Nota. (Cabrera & Racines, 2015)

4.1.2.3. Caso 3: Hidroeléctrica en la Universidad Estatal Amazónica.

Se llevó a cabo un análisis hidrológico, topográfico y geológico del río Puyo, empleando herramientas GIS y mediciones de campo con el fin de estimar el caudal y la potencia disponibles. La planta Hidroeléctrica tiene una capacidad estimada de 280 kW, aprovechando el caudal promedio de 25,85 m³/s, un caudal aprovechable de 8,21 m³/s, con un salto neto de 3,88 m; dicho caudal aprovechable se puede evidenciar en la figura 14 sobre el comportamiento del río Puyo.

Figura 14.

Comportamiento anual del río Puyo.



Nota. (Romero, Loján, Basantes, Romero, & Gonzalez, 2024)

El proyecto busca involucrar a todas las partes interesadas, promoviendo la educación sobre prácticas sostenibles y la autosuficiencia energética en la comunidad universitaria. Se espera que la planta sirva como un modelo educativo para la promoción de energías renovables.

Se detectaron y evaluaron los posibles impactos ambientales durante las etapas de construcción y operación, y se propusieron medidas de mitigación y compensación. La puesta en marcha de la planta aportará a la disminución de la huella de carbono de la universidad y al fomento del desarrollo sostenible en la región.

Se estimaron los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como los ingresos derivados de la venta de energía y los ahorros en el consumo eléctrico. El análisis financiero evidencia la rentabilidad del proyecto, sustentándose en indicadores como el valor presente neto y la tasa interna de retorno.

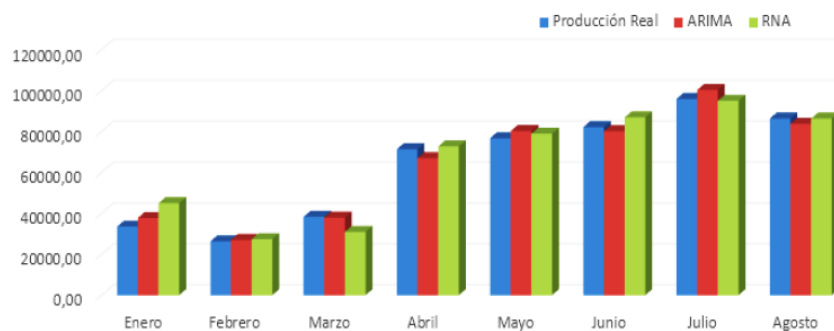
Se calculó la viabilidad financiera del proyecto, destacando su capacidad para generar ingresos y reducir costos operativos. La rentabilidad del proyecto sugiere que la inversión en la planta es sostenible y beneficiosa a largo plazo para la UEA (Romero et.al, 2024).

4.1.2.4. Caso 4: Predicción de generación de energía Illuchi II.

El proyecto realiza un análisis detallado de la producción energética de la central Illuchi II empleando el modelo ARIMA, lo que posibilita la proyección de la generación futura de energía. Asimismo, resalta la relevancia de recopilar datos históricos para garantizar la sostenibilidad del suministro energético ante incrementos en la demanda. Se incorpora un enfoque comparativo de modelos mediante el criterio de información de Akaike (AIC), con el fin de seleccionar la alternativa predictiva más adecuada, como se muestra en la Figura 15, que presenta los valores de los modelos predictivos frente a los datos reales de la central.

Figura 15.

Comparativa de potencia generada real kW.h versus los modelos ARIMA matemático y RNA redes neuronales artificiales.



Nota. (Carrillo & Tapia, 2023)

Técnicamente, la central opera con dos turbinas Pelton de 2675 kW y caudal de 950 l/s, con potencia instalada de 6,5 MVA, generadores de 3250 kVA a 720 rpm, y se enlaza al sistema nacional a 13,8 kV, permitiendo evaluar curvas de carga diaria y anual y aplicando ARIMA y redes neuronales para pronósticos precisos de producción, contribuyendo a la estabilidad del sistema eléctrico y garantizando la cobertura de la demanda futura.

El aspecto social del proyecto se centra en garantizar un suministro energético sostenible que responda al crecimiento poblacional y a las demandas futuras. La implementación del modelo ARIMA para predecir la producción de energía de la central ILLUCHI II permitirá a la comunidad beneficiarse de un servicio confiable y eficiente, impactando positivamente en su calidad de vida. Este enfoque también facilita la

planificación y desarrollo de infraestructuras necesarias para el aprovechamiento energético, promoviendo así un crecimiento equilibrado y sostenible en la región.

El componente ambiental aborda la evaluación de los efectos de la generación eléctrica sobre el entorno natural, destacando la importancia de un uso sostenible del recurso hídrico y la reducción de la huella ecológica de la central para preservar el ecosistema circundante. El proyecto se articula con los objetivos de la Agenda 2030, al promover el acceso a energía limpia, asequible y sostenible en Latacunga, optimizando el aprovechamiento de los recursos hídricos locales y disminuyendo emisiones mediante la priorización de la generación hidroeléctrica en la matriz energética. Asimismo, incorpora actividades académicas y de investigación que fortalecen la cultura de sostenibilidad y el aprendizaje práctico de los estudiantes de ingeniería.

El resumen económico y financiero proporciona una visión clara de los aspectos monetarios del proyecto, incluyendo costos, ingresos esperados y análisis de viabilidad. Se enfatiza la importancia de los enfoques matemáticos para la predicción de la producción energética y su impacto en la sostenibilidad económica, fortaleciendo la rentabilidad operativa de la PCH y contribuyendo a la eficiencia financiera de ELEPCO S.A. (Carrillo & Tapia, 2023).

4.1.2.5. Caso 5: Repotenciación de PCH el Amarillo en Portovelo.

Los aspectos técnicos considerados en el estudio incluyen la evaluación del estado de tres instalaciones clave: el canal de desviación, el desarenador y el desfogue con canal de descarga, construidas en 1924. Estos análisis se centran en factores operativos, físicos, de seguridad y de mantenimiento, cada uno ponderado para una calificación global.

Se propone la repotenciación con tecnología actual para elevar la potencia instalada de 675 kW a aproximadamente 3,3 MW, aprovechando el caudal del río Amarillo mediante canal de derivación de 4,7 km y tubería de presión de 60 pulgadas con una caída neta de 50 m, seleccionando turbinas Pelton (figura 16) por su compatibilidad con el salto y caudal disponible, y considerando mejoras en el sistema de captación, desarenadores, transformadores y líneas de evacuación.

Figura 16.

Condición al 2019 de la turbina Pelton en la PCH El Amarillo.



Nota. (Romero & Siguenza, 2019)

El componente social sugiere que la repotenciación de la pequeña central hidroeléctrica podría generar un impacto positivo en la comunidad local, al mejorar potencialmente el acceso a la energía y favorecer el desarrollo económico regional. Además, la seguridad y el acceso libre constituyen factores clave que pueden incidir en la percepción y aceptación del proyecto por parte de la población.

El estudio destaca la relevancia de aprovechar los recursos hídricos del río Amarillo, subrayando su potencial para la generación de energía renovable. Se analiza el impacto ambiental de la actividad hidroeléctrica, considerando la disponibilidad limitada de agua como un factor restrictivo en distintos sectores. La investigación se sustenta en datos hidrológicos históricos y plantea soluciones tecnológicas adecuadas para optimizar la eficiencia operativa y reducir el desgaste de la infraestructura existente. Se concluye que la repotenciación de la central sería beneficiosa, contribuyendo a mejorar la calidad de vida en la región mediante un uso sostenible de los recursos hídricos y energéticos.

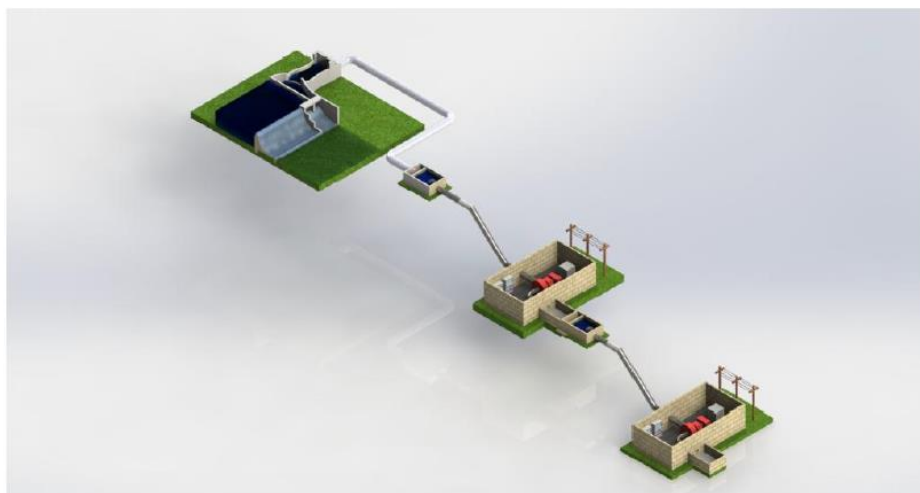
El análisis financiero del proyecto se centra en la inversión inicial requerida, los costos de producción, la proyección de ingresos a través de la venta de energía y el impacto de los impuestos sobre los resultados financieros. La inversión total se establece en \$4.387.610,71, que incluye edificaciones, maquinaria y asistencia técnica concluyendo que la repotenciación de la PCH El Amarillo es técnica y económicamente factible, con impacto positivo en el desarrollo local (Romero & Siguenza, 2019).

4.1.2.6. Caso 6: PCH en el río Chimbo.

El proyecto propone el diseño de una central hidroeléctrica de 10 MW en el río Chimbo, Chimborazo, Ecuador, aplicando un enfoque técnico y sostenible. Se empleó una metodología de diseño concurrente basada en la Casa de la Calidad para optimizar rendimiento, costos y selección de turbinas Pelton. El sistema (figura 17) incluye una represa de gravedad y tuberías de presión para maximizar la eficiencia energética. Se realizaron análisis hidrológicos y simulaciones CFD con ANSYS y SolidWorks para optimizar el diseño con una altura neta de diseño de 179,5 m y un caudal de diseño de 15 m³/s, mientras que el caudal máximo registrado es de 132 m³/s, el mínimo de 2,5 m³/s y un caudal medio de 31,71 m³/s.

Figura 17.

Bosquejo de la PCH en el río Chimbo.



Nota. (Chuquin & Mayorga, 2024)

La construcción de la central hidroeléctrica en La Victoria tiene como objetivo disminuir la dependencia energética de Ecuador de fuentes externas y optimizar el uso de los recursos hídricos para la generación de electricidad. No obstante, este proyecto enfrenta desafíos ambientales y sociales significativos que requieren ser gestionados adecuadamente para asegurar un desarrollo sostenible.

La generación de energía hidroeléctrica cumple un rol clave en el impulso del desarrollo sostenible, ya que reduce la emisión de gases de efecto invernadero y aporta a la mitigación del cambio climático. Además, favorece el desarrollo de infraestructura en comunidades locales, genera empleo durante las fases de construcción y operación, y asegura el acceso a energía confiable, mejorando la calidad de vida. Entre las medidas de

mitigación se incluyen el mantenimiento de caudales ecológicos adecuados, la gestión de sedimentos, el monitoreo de la biodiversidad y la implementación de programas de reforestación en las áreas impactadas.

La investigación destaca la importancia de la optimización costo-beneficio para asegurar la viabilidad económica a largo plazo del proyecto.

El documento menciona que el proyecto presenta un costo total de inversión de USD 12.659.666,41 (USD 11.272.916,44 en costos directos y USD 1.386.749,97 en costos indirectos); una proyección de ventas mensuales de energía de \$484,941.60 USD, lo que resulta en una venta anual de energía de \$5,819,299.20 USD, lo cual es crucial para la elaboración del presupuesto anual y la evaluación de la viabilidad económica de los proyectos a largo plazo.

Este balance asegura la viabilidad financiera de la central hidroeléctrica, permitiendo un retorno de inversión favorable a través de la venta de energía al sistema interconectado nacional y la reducción de pérdidas económicas por importación de energía, constituyéndose en un motor económico para la región y asegurando sostenibilidad en la provisión energética para el país (Chuquin & Mayorga, 2024).

4.1.2.7. Caso 7: PCH río Ambato.

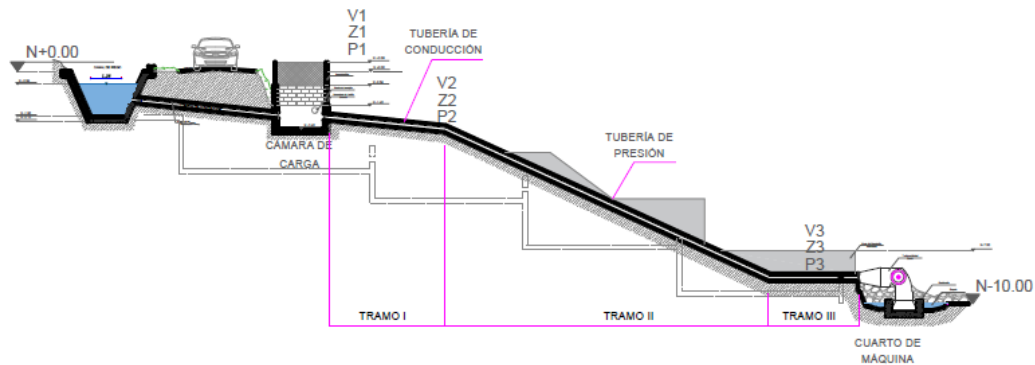
El proyecto técnico propone el aprovechamiento hidro energético del afluente del canal de riego Ambato - Huachi - Pelileo, específicamente en el tramo del kilómetro +0.00 al kilómetro +4.3, ubicado entre Huachi La Libertad y Manzana de Oro. Esta propuesta se basa en un levantamiento topográfico que identificó los módulos existentes a lo largo del tramo 1 especificado.

El estudio determinó las características físicas e hidráulicas de los módulos. Se utilizó un medidor de velocidad rotatorio DMM-4000 para medir los caudales. Los datos sobre las velocidades se procesaron para determinar el caudal de cada módulo.

El proyecto incluye el diseño civil de un canal de conducción, una tubería forzada y la selección de un Turbina Michell Banki para el Módulo 1. Este módulo tiene un desnivel topográfico de 10 metros y un caudal promedio de 0,392 m³/s, adecuado para producir 38,46 kW de energía para el sector agrícola como se observa en el diseño del sistema de la figura 18.

Figura 18.

Esquema de diseño de la PCH en el tramo del canal de riego Ambato- Huachi-Pelileo.



Nota. (Naula, 2021)

El estudio subraya la creciente preocupación global por la protección del medio ambiente y la adopción de métodos de generación de energía libres de contaminación, motivada por el consenso científico internacional sobre el cambio climático y los compromisos políticos adoptados para fomentar el desarrollo sostenible. Asimismo, se destaca el rol de la academia en la promoción de soluciones innovadoras, como la reutilización de aguas residuales en proyectos energéticos que atiendan necesidades concretas de las comunidades circundantes.

El proyecto contribuye a la sostenibilidad energética local al reutilizar el agua del canal de riego sin afectar su disponibilidad para las 5.800 hectáreas productivas que abastece, reduciendo el uso de energía proveniente de fuentes fósiles y fomentando conciencia ambiental en la comunidad agrícola local, con un impacto mínimo en el entorno por el uso de infraestructura existente y la conservación del caudal ecológico en la zona

El estudio concluye que es factible diseñar una pequeña central hidroeléctrica en el tramo estudiado del canal Ambato-Huachi-Pelileo. La propuesta no solo busca generar energía eléctrica, sino también mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico disponible para la agricultura en la región, contribuyendo al desarrollo sostenible del área (Naula, 2021).

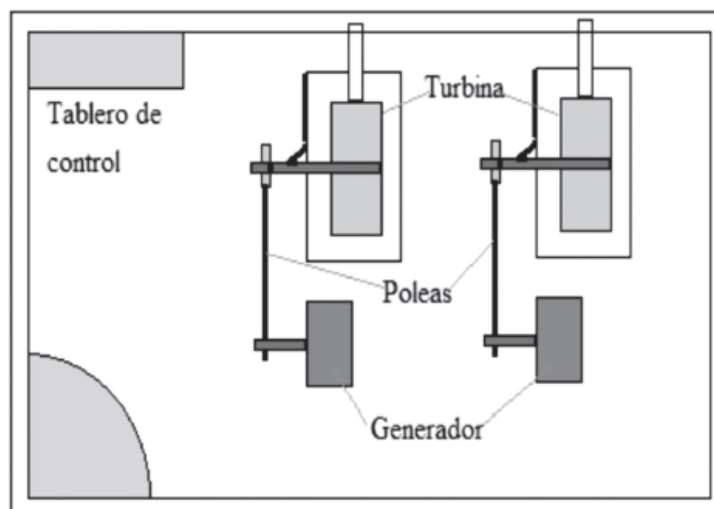
4.1.2.8. Caso 8: Central hidroeléctrica El Altar.

El proyecto contempla el diseño de una central hidroeléctrica tipo PCH con capacidad de 10 MW, distribuida en dos módulos de 5 MW cada uno. Cada módulo incorpora turbinas Pelton de cinco inyectores operando a 600 rpm y generadores

síncronos de 5 MW a 60 Hz. Se considera un caudal de diseño de 8 m³/s y un salto neto de 164 m. El agua es conducida hacia la casa de máquinas mediante tuberías de presión de 1.097,6 mm de diámetro y 420 m de longitud por tramo, ubicadas a una altitud de 2.423 m s. n. m. La energía producida será transmitida mediante una línea de 69 kV a lo largo de 25,25 km hasta la subestación Riobamba, tal como se observa en la figura 19.

Figura 19.

Esquema de la instalación de la PCH El Altar.



Nota. (Ordoñez, Viteri, Serrano, & Orozco, 2016)

En el aspecto socioambiental, se identificaron impactos como la remoción de flora nativa, afectación de hábitats, emisión de ruidos y material particulado, para lo cual se implementarán medidas de mitigación como reforestación, mantenimiento de un caudal ecológico mínimo del 10% del caudal promedio anual y compensación económica por compra de terrenos, mientras se generará empleo local y dinamización de la economía por la compra de bienes y servicios en la zona durante construcción y operación. Además, el agua turbinada facilitará el riego agrícola, impulsando la producción.

El proyecto requiere una inversión de 14.497.038,69 USD y también fortalecerá la industria local y asegurará una rápida recuperación de inversión, estimada en 10 años y 10 meses, con una TIR del 32%. La venta de energía a 0.04 USD/kWh garantizará la sostenibilidad financiera del proyecto (Ordoñez, Viteri, Serrano, & Orozco, 2016).

En resumen, para el análisis de los datos obtenidos en los estudios seleccionados se elaboró una matriz comparativa de datos cualitativos y cuantitativos como se observa en la tabla 18 a continuación.

Tabla 18.

Matriz de comparación entre los casos de proyectos hidroeléctricos seleccionado

Criterios	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Ubicación geográfica	Afluente del río Guayas	Río Zarapullo – Pichincha, Santo Domingo y Cotopaxi	Universidad Estatal Amazónica Puyo	Juan Montalvo Pusuchusi Alto - Cotopaxi	Portovelo – El Oro	La Victoria - Río Chimbo – Cumandá	Canal de riego Ambato Huachi Pelileo	Río Puela parroquia El Altar Penipe
Tipo de central hidroeléctrica	Flujo libre	Flujo libre	Flujo libre	Caudal de paso	Dique de derivación	Represa de gravedad	Dique de derivación	Flujo libre
Potencia instalada	(5,3 - 6,1) MW	5.35.MW	0,28 MW	6,5 MW	1,6 MW	10 MW	38,46 kW	10 MW
Tecnología de turbinas	Francis y Turgo	Francis	Kaplan	Pelton	Pelton	Pelton	Michel Banki	Pelton
Caudal promedio	4,6 m ³ /s	14,46 m ³ /s	25,85 m ³ /s	0,95 m ³ /s	7,5 m ³ /s	15 m ³ /s	0,392 m ³ /s	8 m ³ /s
Salto Hidráulico	115,20 m	85 m	10 m	327 m	50 m	179,50 m	7,23 m	174 m
Eficiencia del sistema	90% de 51.476 kWh por año	85% de 44.100 kWh por año	93% de 725, 278 kW	86% de 13.800 kW	97%	85% Eficiencia teórica igual a eficiencia mejorada o condiciones	93,5% de 5.000 kW	90% de 9.638 kW

operativas favorables.								
Costo de inversión inicial	\$ 10 millones	\$ 16.920 millones	\$ 2.5 millones	\$7.7 millones aprox. \$ 1.397.111 costo de mejoras año 2024	\$ 4.387.610,71 repotenciación	\$ 12.659.666,41	\$1.8 millones	\$ 14.5 millones
Indicadores financieros Retorno de inversion	VAN \$7,7 millones TIR 29,21% Retorno de inversión 8,5 años Erosión y disminución de caudales – Caudal ecológico	Ventaja financiera con el uso de software modelacion hidráulica	Retorno de inversión en 12 años	Pérdidas en el 2021 de 4.4% equivalentes a 43.533,03 al año	VAN positivo TIR > 0	Retorno de la inversión \$5.8 millones de venta de electricidad al año	TIR 19% retorno en 9 años	TIR 32% 4 años periodo de recuperación VAN positivo
Impacto Ambiental	Escalera de peces y zona de cría. 0,5 libras de CO ₂ por kWh vs 3 lb	Menor impacto que las termoeléctricas	Reducción de la huella de carbono y modelo educativo en prácticas sostenibles	Mantenimientos constantes para asegurar una producción eficiente y sostenible de energía. Control de Sedimentos planificando desalojos periódicos para garantizar la	Se debe considerar la reducción del impacto ambiental en la operación de la PCH, especialmente en la adquisición de implementos para producción de	Mantenimiento de caudal ecológico Estabilización de taludes Monitoreo y control de sedimentos	Manejo de sedimentos Restauración de habitats Monitoreo ambiental	El Plan de Prevención de Impactos establece medidas para el mantenimiento de equipos, gestión de químicos y reducción de impactos en suelo, agua,

	CO ₂ de centrales a carbón			vida útil de la central y minimizar impactos en el medio acuático	energía renovable.			aire y biodiversidad.
								El Plan de Manejo de Residuos regula la gestión de desechos Plan de Relaciones Comunitarias e Institucionales busca fortalecer las capacidades de gestión social e institucional, fomentando la comunicación, el diálogo comunitario y el desarrollo local sostenible
Impacto social	Venta de energía 0,04 - 0,08 US\$/kWh	Reduce la migración rural, fuentes de trabajo, mejor calidad de vida	Autosuficiencia energética en la comunidad universitaria	Dotación de energía a los siete cantones de Cotopaxi beneficiando al sector productivo	La repotenciación generará empleo local y mejorará el acceso a energía impulsando la economía local	Venta de energía 0,03 US\$/kWh Generación de empleo Desarrollo de infraestructura Estabilidad del suministro eléctrico	Acceso a energía renovable Desarrollo económico local Fomento productivo	

De la tabla anterior se recabaron datos cuantitativos para presentar diferentes proyecciones que pretenden demostrar la importancia de incluir estos proyectos en la planificación de electrificación del país en sus tres ejes de desarrollo: social, ambiental y técnico.

En la tabla 19 se muestra un resumen de los datos obtenidos en el análisis de los ocho casos base del presente proyecto, incluidos los valores de potencia efectiva, la potencia anual, el factor de emisión de CO₂, el aporte anual al Sistema Nacional Interconectado, la cantidad estimada de emisión de CO₂ en toneladas por cada MWh.

Tabla 19.

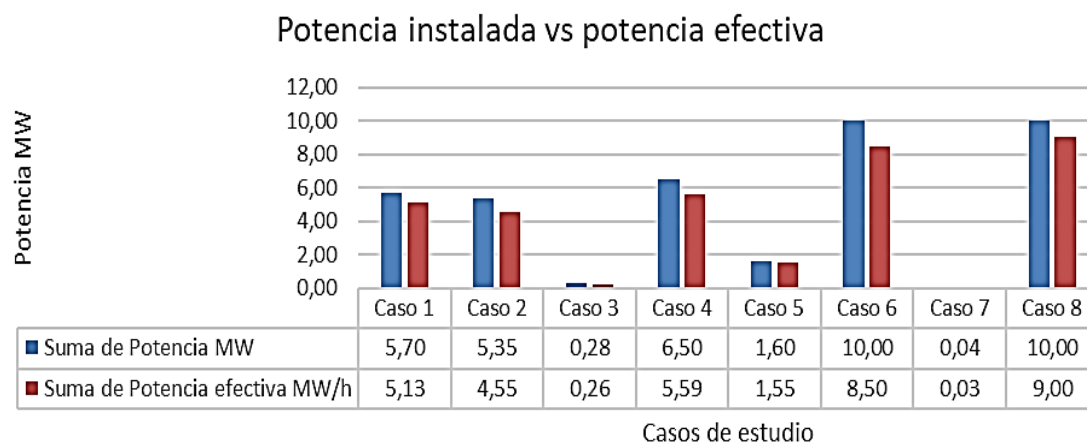
Resumen de aspectos cuantificables de los casos de estudio.

Caso de estudio	Potencia MW	Caudal m3/s	Salto m	Eficiencia %	Potencia efectiva MW/h	Energía anual GW.h/año	Inversión MUSD	Factor de emisión de CO ₂	Aporte SNI GW	Emisiones tonCO ₂ * GW.h.año
Caso 1	5,70	4,60	115,20	90,00	5,13	44,94	10,00	0,12	17,98	5,39
Caso 2	5,35	14,46	85,00	85,00	4,55	39,84	16,92	0,12	15,93	4,78
Caso 3	0,28	25,85	10,00	93,00	0,26	2,28	2,50	0,12	0,91	0,27
Caso 4	6,50	0,95	327,00	86,00	5,59	48,97	7,70	0,12	19,59	5,88
Caso 5	1,60	7,50	50,00	97,00	1,55	13,60	4,39	0,12	5,44	1,63
Caso 6	10,00	15,00	179,50	85,00	8,50	74,46	12,66	0,12	29,78	8,94
Caso 7	0,04	0,39	7,23	90,00	0,03	0,30	1,80	0,12	0,12	0,04
Caso 8	10,00	8,00	174,00	90,00	9,00	78,84	14,50	0,12	31,54	9,46

En la figura 20 se observa una comparativa entre la potencia teórica y la potencia efectiva de cada caso de estudio, definidos por el factor de eficiencia principalmente de la turbina y consideradas aquellas pérdidas por los accesorios y tuberías de la planta, es así como todo sistema tiende a generar perdidas a ser consideradas para su dis

Figura 20.

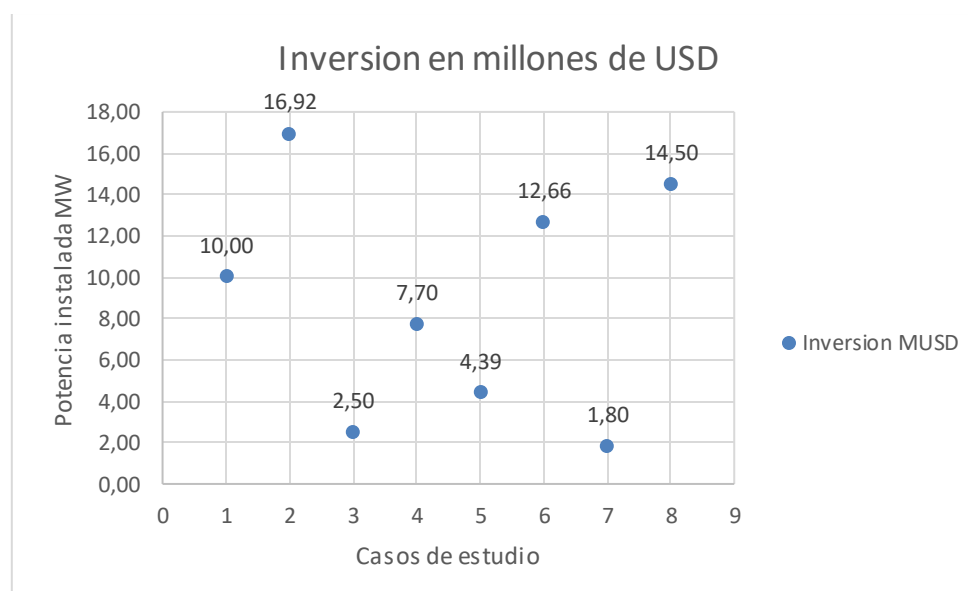
Potencia instalada vs potencia efectiva de los casos de estudio.



En la figura 21 se evidencia el costo valorado de acuerdo al caso de la implementación o potenciación de los casos de estudio, es variable respecto a la potencia instalada y esto debido a factores como el tipo de central conforme a la entrada de caudal, si es de embalse, de derivación o de flujo libre que generan costos por la infraestructura asociada

Figura 21.

Inversión en millones de dólares por caso de estudio.

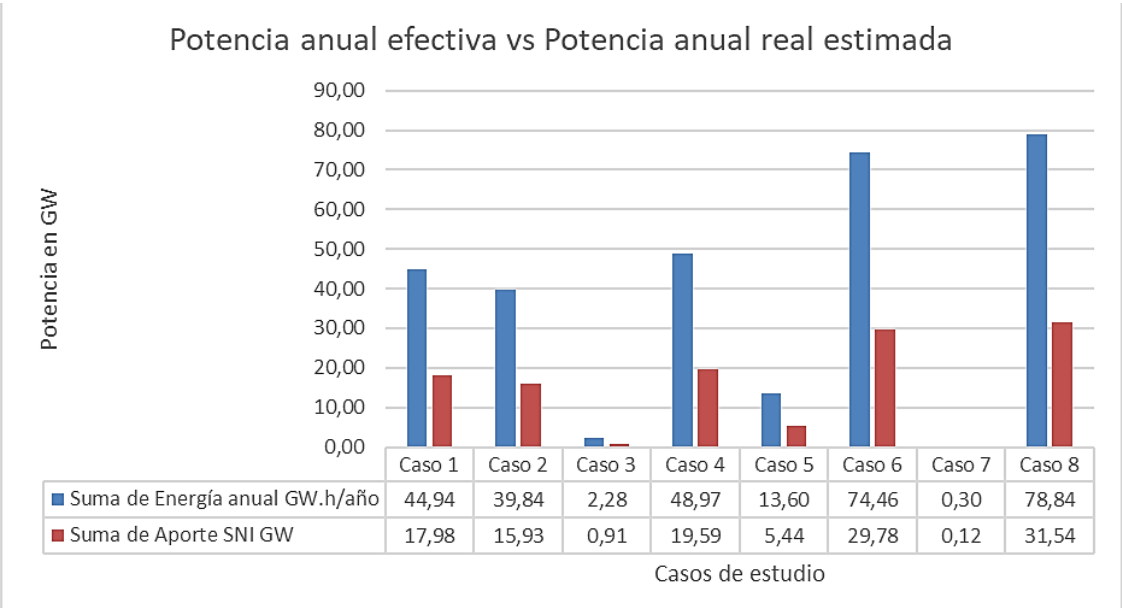


En la figura 22 se presentan los valores calculados de la potencia estimada anual de cada caso de estudio, comparada con los valores estimados de potencia anual real de acuerdo al factor de capacidad (potencia que efectivamente se entrega al SNI anualmente)

de una planta de pequeña escala, que oscila entre 40% comparada con otras plantas de mayor tamaño que pueden llegar al 80% (Oliber, 2023), esto debido a que las plantas generalmente no operan a su capacidad completa para entregar la potencia calculada en el año.

Figura 22.

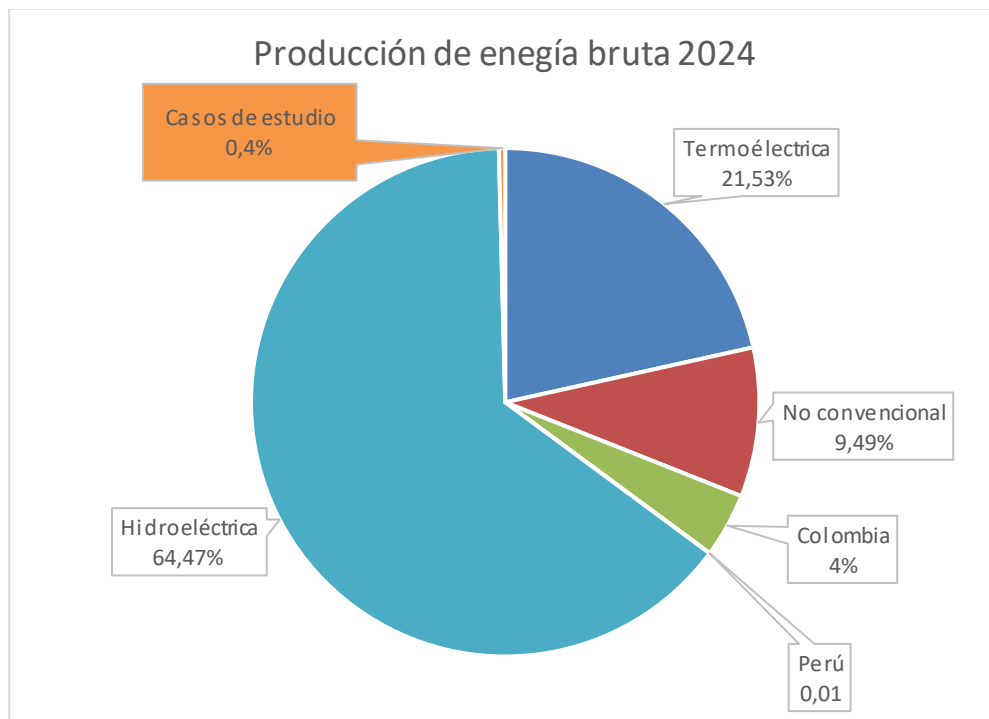
Potencia anual efectiva comparada con la potencia anual real estimada



El aporte de energía al Sistema Nacional Interconectado es de 121,29 GW.h lo cual corresponde al 0,4% de la energía total entregado al SNI y al 0,61% de la energía provista de hidroeléctricas en el año 2024 (67,40% que corresponde a energía hidroeléctrica), según el informe anual de CELEC EP (2024); por lo que en la figura 23, se muestra la distribución de energía que alimentó el SNI en el año de evaluación, incluido la contribución de ser implementados los casos de estudio.

Figura 23.

Producción de energía bruta del SIN en el 2024.

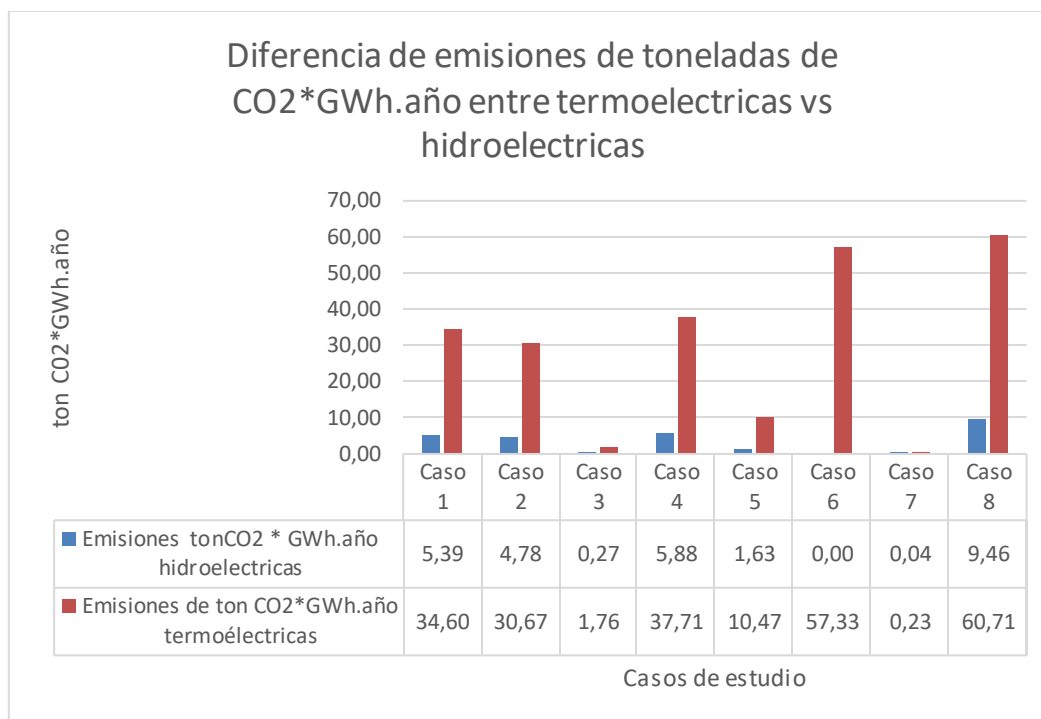


Nota. Elaboración propia con base de datos del CENACE (2024)

Al ser considerada la ventaja ambiental en la disminución de dióxido de carbono emitido al ambiente en la generación de energía por fuentes no convencionales, para la figura 24 se toma en como base de cálculo la concentración estimada de toneladas de CO₂ emitida por la generación eléctrica de fuentes convencionales (0,77 ton CO₂.GWh. año, de acuerdo al Ministerio de energía y minas en su informe 2023 de la Comisión técnica de determinación de factores de emisión de gases de efecto invernadero (Ministerio de energía y minas, 2023)), obteniendo una disminución de 148,74 ton CO₂.GWh. año de los ocho casos de estudio.

Figura 24.

*Diferencia de toneladas de CO₂*GWh.año emitidas entre termoeléctricas vs hidroeléctricas.*



4.1.3. Revisión de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala en marcha

La evaluación del estado actual de las pequeñas centrales hidroeléctricas en Ecuador se centra en el análisis de proyectos operativos, repotenciaciones y microcentrales con potencial de rehabilitación, con el objetivo de identificar su contribución a la matriz energética nacional y la eficiencia de su operación. Esta revisión se realizó mediante la recopilación de información de fuentes oficiales, reportes de empresas eléctricas, estudios de factibilidad y documentación técnica de los proyectos.

El país cuenta con un conjunto diverso de PCH distribuidas principalmente en las provincias del centro y sur, cuya capacidad instalada varía desde micro centrales a grandes hidro sistemas. Cada instalación presenta características técnicas particulares, como tipo de turbina, caudal de diseño, caída neta y sistemas de generación, que condicionan su desempeño energético y su integración al Sistema Nacional Interconectado (SNI).

El análisis de estos proyectos permite identificar no solo la capacidad de generación actual, sino también las oportunidades de mejora mediante modernización,

repotenciación y utilización de tecnologías nacionales. Además, se consideran aspectos operativos como la producción anual, la estabilidad de caudales y la eficiencia de los equipos, con el fin de establecer un panorama actualizado sobre el estado de la PCH en Ecuador y su aporte al desarrollo energético sostenible.

Finalmente, se presenta un resumen sistematizado de las principales centrales hidroeléctricas de pequeña escala, detallando su capacidad instalada, ubicación, características técnicas y desempeño, lo que permite obtener una visión integral de su situación actual.

Estas pequeñas y medianas hidroeléctricas, distribuidas en 15 provincias, aportan alrededor del 30% de la energía hidroeléctrica del país.

Las centrales hidroeléctricas de Papallacta y Loreto, situadas en la parroquia Papallacta del cantón Quijos, provincia de Napo, han tenido un papel relevante en la generación de energía en Ecuador. La central de Papallacta comenzó a operar en 1961 con una turbina Francis horizontal de 1,9 MW, aprovechando las aguas del río Papallacta sin requerir represa. Con el tiempo, se añadieron más unidades, alcanzando una capacidad total de 4,2 MW en Papallacta y 2,15 MW en Loreto. En 2024, el Grupo Gloria, mediante su filial ecuatoriana UCEM S.A., adquirió el 99,998 % de las acciones de Ecoluz S.A. (Yamunaque, 2024) .

El proyecto de la micro central hidroeléctrica de la empresa minera Ecuacorriente S.A. (ECSA), con una capacidad de 19 kW operaría a 1.050 rpm, suministrando energía al campamento minero ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe. Este proyecto es notable porque la mayoría de los componentes de la micro central serían de fabricación nacional, excepto algunos elementos eléctricos y la turbina Pelton importada (elamazonico, 2024). Sin embargo, el 21 de agosto de 2024, la empresa informó que ha descartado esta construcción debido al aumento de costos y a la concesión de permisos para otra planta en la misma área por parte del Ministerio de Energía (Orozco, 2025).

En la provincia de Chimborazo, se han identificado varias minicentrales hidroeléctricas con potencial de rehabilitación, entre ellas Cordovez (1,8 MW) y Cemento Chimborazo (1,6 MW). Estas minicentrales forman parte de un inventario de 21 existentes en las provincias del centro y sur del país, incluyendo Chimborazo, Cañar, Azuay, El Oro, Loja y Zamora Chinchipe. La rehabilitación de estas instalaciones ha sido

objeto de estudios y proyectos piloto, con el objetivo de mejorar su eficiencia y aumentar su contribución a la matriz energética nacional (Manzano L. , 2015).

En el "Estudio de factibilidad para la repotenciación de la Mini Central Hidroeléctrica de 2 MW de la Empresa UCEM – CEM, Planta Chimborazo" se evaluó la viabilidad de optimizar la generación de energía en esta instalación ubicada en la parroquia San Juan, cerca de Riobamba. Se analizaron datos históricos y actuales de consumo y generación de energía, así como el rendimiento de los equipos. Se propusieron dos escenarios técnicos: uno con una potencia promedio de 880 kW y un caudal estable de 330 litros por segundo (l/s), y otro con potencias de 1,258.4 kW y 352 kW, respectivamente, asociados a caudales diferenciados de 472 l/s y 132 l/s durante distintos horarios. La evaluación reveló una producción proyectada de 7,688.03 MWh, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 16.28% con financiamiento y 24.16% sin financiamiento. Se recomendó a la empresa proceder con la inversión, preferiblemente utilizando financiamiento propio (Santiana, 2016).

La Central Hidroeléctrica Sarapullo, con una capacidad instalada de 49 MW, inició su operación comercial el 1 de marzo de 2023. Hasta el 29 de febrero de 2024, ha generado un total de 168.840,58 MWh, con un promedio mensual de 16.302 MWh, contribuyendo significativamente al Sistema Nacional Interconectado (SNI), especialmente durante los períodos de estiaje. Esta planta, parte del complejo hidroeléctrico Toachi Pilatón, está compuesta por una casa de máquinas subterránea alimentada por el río Pilatón. Dentro de esta instalación, operan tres turbinas Francis de 16,3 MW cada una, conectadas a generadores síncronos, diseñadas para maximizar la eficiencia y la producción energética (Redacción Primicias, 2023).

La Central Hidroeléctrica Palmira-Nanegal, situada en la parroquia de Nanegal en la provincia de Pichincha, Ecuador, es una instalación destinada a la generación de energía limpia. Este proyecto es resultado de la colaboración entre la empresa pública Hidroequinoccio EP y la Constructora Nacional S.A., con una inversión aproximada de 25.988.000 dólares. Inaugurada el 19 de diciembre de 2017, la planta tiene una capacidad de generación de 10 MW, aprovechando el caudal del río Alambi. Este proyecto beneficia a las parroquias del noroccidente de la provincia, contribuyendo al desarrollo sostenible de la región (Velásquez, 2015).

El Proyecto Hidroeléctrico Mazar Dudas, ubicado en el cantón Azogues, provincia del Cañar, Ecuador, cuenta con una capacidad instalada de 21 MW y se abastece de los

ríos Pindilig y Mazar. Está conformado por tres plantas: Alazán (6,23 MW), San Antonio (7,19 MW) y Dudas (7,40 MW), con caudales medios anuales de 3,69 m³/s, 4,66 m³/s y 2,90 m³/s, respectivamente, generando una producción anual estimada de 125,4 GWh. Para mayo de 2022, el proyecto registraba un avance del 87,33 %, siendo la planta Alazán operativa desde abril de 2015 y habiendo aportado 153,42 GWh al Sistema Nacional Interconectado hasta julio de 2022 (Gobernación del Cañar, 2015).

La Central Hidroeléctrica Alazán, administrada por CELEC EP a través de su Unidad de Negocio Hidroazogues, ha generado 101.581,18 MWh desde su puesta en marcha en abril de 2015, equivalente al consumo eléctrico de Azogues durante un año. Este logro se atribuye al mantenimiento efectivo y al compromiso del equipo de 14 profesionales de la central. La planta, con una capacidad de 6,23 MW, se encuentra en la parroquia Rivera del cantón Azogues, y utiliza el caudal del río Mazar y la quebrada Sipanche para producir energía limpia. Además, CELEC EP promueve la responsabilidad social y ambiental en la zona, invirtiendo en proyectos que benefician a las comunidades locales (Celec Ep, 2020).

La Central Hidroeléctrica Ocaña, ubicada en el recinto Javín, parroquia San Antonio, cantón Cañar, comenzó su operación comercial en 2012. Cuenta con dos unidades de generación de 13,05 MW cada una, con una potencia instalada total de 26,1 MW. Las turbinas son tipo Pelton y la central aprovecha un caudal de diseño de 8,2 m³/s con una caída neta de 373 m. Con una tubería de presión de 1.085 m, la central contribuye significativamente al abastecimiento de energía eléctrica en el país, además de fomentar el monitoreo del recurso hídrico del río Cañar (ElecAustro, 2017).

ElecAustro contrató a la firma Kawsus, con sede en Cuenca, para ejecutar la ingeniería de detalle y actualizar el diseño definitivo de la central hidroeléctrica Ocaña II, de 29 MW, situada en la región austral de Ecuador. El contrato, valorado en 1,11 millones de USD con un plazo de 240 días, abarca estudios hidrológicos, geológicos, ambientales y la optimización del diseño de la central. Ocaña II aprovechará la cuenca del río Cañar, complementando la planta existente Ocaña I de 26,1 MW, e incluirá dos turbinas tipo Francis. El proyecto está orientado a generar energía limpia y económica, reduciendo la dependencia de diésel, y se instalará en configuración en cascada con Ocaña I. Adicionalmente, ElecAustro tiene planificados otros proyectos, como la central hidroeléctrica Soldados Yanuncay (22 MW) y el parque solar Huascachaca (30 MW) (El Oriente Redacción, 2024).

La central hidroeléctrica Fernando Malo Cordero (Saucay), situada a 24 km al noroeste de la ciudad de Cuenca, en la provincia del Azuay, se desarrolló en dos etapas: la primera en 1978, con la instalación de dos unidades de 4 MW, y la segunda en 1982, que incorporó dos unidades adicionales de 8 MW. Su capacidad instalada total es de 24 MW y opera con turbinas tipo Pelton y un caudal de diseño de 6,76 m³/s. La longitud de la tubería de presión varía entre 1.317 y 1.320 m, según los grupos. Debido a su antigüedad, se ha propuesto un plan de modernización que contemple la actualización de las unidades de generación, turbinas, sistemas de excitación y regulación, así como la evaluación de la factibilidad de modernizar los sistemas auxiliares de medición y control. (ElectAustro, 2015).

Además del plan mencionado en el párrafo anterior, se ha propuesto el “Estudio Para La Modernización De La Central Hidroeléctrica Saucay” en el que se recomienda mejorar el sistema de enfriamiento y actualizar el sistema de regulación de tensión a digital. Además, se propone modernizar los sistemas auxiliares y reemplazar ciertos componentes para aumentar la eficiencia. Se han evaluado dos planes de modernización, siendo el Plan 1 el más económico y viable, con un costo de \$1.638.670 (Arias & Bravo, 2016).

La Central Hidroeléctrica Arturo Salazar Orrego, conocida como Saymirín, se ubica aproximadamente a 15 kilómetros al noroccidente de Cuenca, en la provincia del Azuay. Este complejo energético ha sido desarrollado en varias etapas: Saymirín I y II se inauguró en 1956 y la segunda en 1963 que, tras cumplir su vida útil, estas instalaciones fueron transformadas en el "Museo de la Energía". Saymirín III y IV puestas en operación en 1995, cada una de estas dos unidades cuenta con una capacidad de 4 MW, sumando una potencia instalada de 8 MW. Utilizan turbinas tipo Francis, manejan un caudal de diseño de 4,28 m³/s, con una caída neta de 212 metros y una tubería de presión de 345 metros de longitud. La generación eléctrica se realiza a 2.400 V, elevándose posteriormente a 69.000 V mediante una subestación y la etapa de Saymirín V concluida en 2014 en la que se incorporó dos unidades adicionales de 3,76 MW cada una, totalizando 7,52 MW. Emplea turbinas Pelton, con un caudal de diseño de 4,1 m³/s, una caída neta de 215,21 metros y una tubería de presión de 345 metros de longitud (Elec Austro, 2014). Finalmente es apropiado mencionar que la central se declaró en emergencia debido a intensas lluvias que provocaron deslizamientos y afectaron su infraestructura (Redacción El Mercurio, 2025).

La mini central hidroeléctrica Gualaceo, ubicada en el río San Francisco, provincia de Azuay, cuenta con una capacidad instalada de 0,97 MW. Para su repotenciación, se empleó ingeniería y tecnología nacional, destacando la reubicación de la casa de máquinas, lo que permitió incrementar la caída neta a 174 m y mejorar la producción en un 94 %. La central utiliza una turbina tipo Pelton y un caudal de diseño de 0,7 m³/s. Este proyecto, respaldado por un convenio entre el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable y ELECAUSTRO, no solo busca rehabilitar la infraestructura, sino también promover el uso de energía renovable y la generación distribuida. Tras la rehabilitación, la central puede generar 7 GWh al año, reduciendo aproximadamente 2.926 toneladas de CO₂ anuales. Asimismo, la intervención fomenta la automatización y el uso de tecnología local, constituyéndose en un modelo para futuras iniciativas hidroeléctricas. (Gomezcoello & Sarango, 2017).

A manera de resumen se presenta la tabla 20 en donde se recopilan los principales aspectos recogidos en las fuentes de información con la finalidad de organizar la información y proponer un estado actual del desarrollo de la pequeña central hidroeléctrica en el país.

Tabla 20.

Resumen de proyectos hidroeléctricos de pequeña, micro y mini escala en el Ecuador

Nombre del proyecto	Potencia instalada MW	Año de operación	Ubicación	Tipo de central	Características adicionales
Papallacta	4.2 MW	1961	Napo	Central de pasada	Sin represa, turbina tipo Francis horizontal.
Loreto	2.15 MW	1961	Napo	Central de pasada	Instalación complementaria a Papallacta.
Cordovez	1.8 MW	No especificado	Chimborazo	Minicentral	En evaluación para rehabilitación.

Cemento Chimborazo	1.6 MW	No especificado	Chimborazo	Minicentral	En evaluación para rehabilitación. Parte del complejo
Sarapullo	49 MW	2023	Toachi Pilatón	Central de embalse	Toachi Pilatón, 3 turbinas Francis de 16,3 MW. Proporciona energía al noroccidente de Pichincha.
Palmira-Nanegal	10 MW	2017	Pichincha	Central de embalse	Tres plantas, capacidad total de 21 MW, producción estimada de 125.4 GWh anuales. Operación desde 2015,
Mazar Dudas	21 MW	No especificado	Cañar	Central de embalse	101,581.18 MWh generados hasta 2020. 2 turbinas
Alazán	6.23 MW	2015	Azogues	Central de embalse	Pelton, caudal de diseño de 8.2 m ³ /s.
Ocaña	26.1 MW	2012	Cañar	Central de embalse	Plan de modernización en proceso.
Saucay (Fernando)	24 MW	1978-1982	Azuay	Central de embalse	

Malo Cordero)					
Saymirín (Arturo Salazar Orrego)	8 MW	1995-2014	Azuay	Central de embalse	Varias etapas de operación, turbinas Pelton y Francis. Rehabilitada en 2013, incremento de generación en un 94%.
Gualaceo	0.97 MW	No especificado	Azuay	Mini Central	

4.2. Discusión de los Resultados

La evaluación de los ocho proyectos hidroeléctricos analizados demuestra que los sistemas de pequeña escala en Ecuador presentan variaciones significativas en términos de eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad ambiental. A continuación, se discuten los principales hallazgos en relación con los objetivos de la investigación.

Al evaluar los aspectos técnicos y económicos, los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador muestran una amplia diversidad de características que reflejan tanto los retos como las oportunidades en el aprovechamiento de los recursos hídricos del país. Según los casos analizados, la energía hidroeléctrica de pequeña escala resulta factible, siempre que se consideren factores clave como la disponibilidad de caudal, el tipo de turbina y el salto hidráulico, los cuales determinan la eficiencia de las centrales. Mendoza & Yampier (2017) señalan en su estudio sobre generadores eléctricos para zonas rurales que la producción de energía mecánica de una turbina hidráulica aumenta a medida que se incrementa el producto del salto hidráulico por el caudal disponible.

En cuanto a la tecnología de turbinas la mayoría de las centrales emplean turbinas Pelton, especialmente en sistemas con caudales más bajos y saltos hidráulicos altos, como el Caso 4 (Juan Montalvo Pusuchusi Alto) y Caso 7 (Río Puela – El Altar Penipe), donde el salto hidráulico alcanza los 327 m y 174 m, respectivamente. Mientras tanto, las turbinas Francis son más comunes en centrales con caudales mayores, como se observa en el Caso 2 (Río Zarapullo), donde el caudal promedio alcanza los 14.46 m³; mientras

que las turbinas Kaplan son más adecuadas para caudales elevados con bajo salto (Ej. Caso 3 - Universidad Estatal Amazónica); esto sucede debido a que las turbinas Pelton están diseñadas para aprovechar las altas velocidades de un chorro de agua impulsado sobre las palas de la rueda mientras que la turbina Francis tiene una forma de espiral que permite que el agua de flujo más constante y mayor, fluya a través de ella y reciba energía en el proceso (Porras, 2016).

Los proyectos con mayor eficiencia (superior al 90%) se encuentran en ubicaciones con caudales constantes y saltos hidráulicos elevados (Ej. Caso 4 - Illuchi II con 327 m de salto y Caso 6 - Río Chimbo con 179.5 m).

La Tabla 20 presenta un resumen de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en funcionamiento en diversas regiones del país, detallando su viabilidad técnica y socioeconómica, lo que resulta clave para el análisis del presente estudio. Al identificar la potencia instalada, ubicación y fechas de operación de los proyectos, se proporciona una base sólida para evaluar su viabilidad económica en distintas regiones de Ecuador. Por ejemplo, el proyecto Loreto, con una potencia de 2.15 MW, y el proyecto Saucay, actualmente en proceso de modernización, ilustran cómo las centrales pueden ser modificadas o complementadas con el tiempo para optimizar su rendimiento. Además, estos proyectos incluyen tanto centrales de embalse como de pasada, con diseños adaptados a las características geográficas de cada ubicación. En este sentido, el proyecto Sarapullo es una central de embalse que forma parte de un complejo hidroeléctrico mayor, mientras que Papallacta es una central de pasada sin represa. Finalmente, las características de las turbinas, como las de tipo Pelton y Francis, varían según el caudal y salto hidráulico, demostrando la adaptación técnica a las condiciones locales de cada proyecto.

Así mismo la mayoría de los estudios contemplan el impacto ambiental y aplican medidas de mitigación para reducir los efectos negativos, especialmente en zonas ecológicamente sensibles, dichas medidas incluyen la mejora del flujo ambiental, la instalación de válvulas de derivación automatizadas, la gestión sostenible de sedimentos, y la implementación de embalses de regulación para reducir los impactos ecológicos.

En términos de rentabilidad los costos de inversión inicial varían ampliamente, desde \$1.8 millones hasta \$16.92 millones, indicando que la viabilidad económica depende del tipo de infraestructura requerida y del financiamiento disponible, aunque los proyectos más pequeños y comunitarios (como los de micro y mini hidroeléctricas)

ofrecen una solución costo-efectiva para áreas rurales, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables, estos sistemas de acuerdo al estudio de Narvaez, y otros (2023) son sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, proporcionando acceso a electricidad fiable y asequible a comunidades que de otra manera estarían desconectadas de la red eléctrica nacional. Estos sistemas aprovechan la energía hidroeléctrica de pequeñas turbinas de agua, lo que reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables y promueve el desarrollo económico local. Además, la selección adecuada de la turbina para un proyecto hidroeléctrico es crucial para su eficiencia y rendimiento, lo que se logra mediante un enfoque específico en el diseño de la turbina para las condiciones operativas disponibles.

Ante este potencial de los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala, el estudio citado anteriormente denominado “Plataforma para la micro hidro generación en áreas rurales del Ecuador” propone el desarrollo de una plataforma web destinada a optimizar la implementación y administración de sistemas de generación microhidráulica en comunidades rurales. Mediante cálculos que consideran el caudal y el desnivel del agua, la herramienta selecciona la turbina más eficiente, utilizando Python para perfeccionar el diseño. Además, la plataforma actúa como un espacio de intercambio de información entre especialistas y comunidades locales. Los resultados destacan su capacidad para ampliar el acceso a energía sostenible en zonas rurales.

Los proyectos tienen un alto potencial social, mejorando el acceso a energía en comunidades rurales, impulsando el desarrollo local y contribuyendo al bienestar social, aunque algunos proyectos pueden generar conflictos socioambientales y su sostenibilidad a largo plazo depende de una gestión adecuada y la participación comunitaria, para lo cual es imperante la implementación de planes de relaciones comunitarias para la socialización del proyecto y la participación integral en el desarrollo de los estudios, la ejecución, gestión y seguimiento que asegure la sostenibilidad de las PCH.

En cuanto al objetivo dos los principales factores que determinan el éxito de un sistema hidroeléctrico de pequeña escala incluyen:

Un diseño hidráulico eficiente evidenciado en aquellos proyectos que han integrado estudios detallados de caudal y modelación hidráulica pues presentan mejor rentabilidad y menor impacto ambiental (Ej. Caso 2 - Río Zarapullo).

En cuanto a estrategias de mitigación ambiental los proyectos con control de sedimentos, mantenimiento de caudal ecológico y estabilización de taludes han reducido significativamente su impacto ambiental (Ej. Caso 5 - PCH El Amarillo).

La rentabilidad de los proyectos depende de su Tasa Interna de Retorno (TIR) y su período de recuperación. Los proyectos más exitosos tienen TIR superiores al 25% y períodos de retorno menores a 10 años (Ej. Caso 8 - El Altar con TIR 32%).

Sin embargo, se han identificado barreras que limitan la implementación de estos sistemas en el país. La inversión inicial sigue siendo un reto, especialmente para comunidades rurales que dependen de subsidios gubernamentales o inversión privada. Deficiencias en planificación y mantenimiento esto debido a que algunos proyectos han experimentado pérdidas económicas debido a deficiencias en su operación y mantenimiento (Ej. Caso 4 - Pérdidas del 4.4% anual). Impactos ambientales mal gestionados como la erosión y la reducción de caudales que pueden generar conflictos con comunidades locales si no se establecen planes adecuados de gestión del recurso hídrico.

A partir del análisis de los casos de estudio, se plantean diversas estrategias para optimizar la implementación de los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador, con el fin de asegurar su eficiencia, sostenibilidad y viabilidad a largo plazo. En primer lugar, se sugiere mejorar el diseño técnico mediante la incorporación de modelación hidráulica avanzada, lo que permitiría incrementar la eficiencia de captación de agua y el rendimiento de las turbinas, ajustándose a las condiciones específicas de cada sitio, como el caudal y el salto hidráulico. La correcta aplicación de este enfoque maximizaría la generación de energía, disminuiría los costos operativos y potenciaría el desempeño global de los sistemas hidroeléctricos.

Además, es importante la implementación de nueva tecnología que se ha identificado en varios estudios que han desarrollado que las nuevas tecnologías en hidroeléctricas de pequeña escala que incluyen turbinas modulares y de tornillo de Arquímedes, sistemas de almacenamiento de energía hidroeléctrica bombeada, y plantas micro-hidroeléctricas con control electrónico avanzado e inteligencia artificial, todas se han enfocado en mejorar la eficiencia, reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

Otro aspecto crucial es el fomento de incentivos financieros para facilitar la implementación de estos proyectos. Se sugiere la creación de programas de financiamiento accesible mediante subsidios, créditos verdes y asociaciones público-privadas, lo cual aliviaría la carga financiera inicial de los proyectos, especialmente aquellos ubicados en zonas rurales o de menor escala. Este tipo de apoyo financiero contribuiría al crecimiento de proyectos de energía renovable y sostenible, facilitando su expansión en diferentes regiones del país.

Asimismo, es fundamental fortalecer el marco normativo relacionado con la gestión de los recursos hídricos. Es necesario implementar regulaciones específicas que aseguren el mantenimiento del caudal ecológico y minimicen el impacto ambiental en los ecosistemas acuáticos. Este enfoque regulatorio no solo garantizaría la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos, sino que también contribuiría a la preservación de la biodiversidad local y evitaría posibles conflictos con las comunidades cercanas, al asegurar que se respeten los derechos ambientales y el bienestar de las poblaciones afectadas.

Finalmente, la capacitación y gestión comunitaria juegan un papel fundamental en la sostenibilidad de estos proyectos. Involucrar a la comunidad local en la operación y mantenimiento de las pequeñas centrales hidroeléctricas asegurará una mayor autonomía y continuidad a largo plazo. La capacitación técnica no solo fortalecerá las capacidades locales, sino que también fomentará el desarrollo económico y social, mejorando la calidad de vida de las poblaciones beneficiarias y promoviendo una mayor conciencia ambiental y energética.

Estas estrategias, alineadas con los resultados del análisis, permiten trazar un camino claro hacia la mejora de la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador, promoviendo un desarrollo sostenible, eficiente e inclusivo.

Acerca del análisis de potencia efectiva y pérdidas cuyos valores se muestran en la tabla 19 se observa que todos los casos presentan diferencias entre la potencia instalada y la potencia efectiva, lo cual se refleja en la figura 20. Estas diferencias son atribuibles principalmente la eficiencia de la turbina, que varía entre 85% y 97% según el caso; Además de las pérdidas en accesorios y tuberías de la planta y condiciones operativas por caudales fluctuantes. Dichas pérdidas son típicas en proyectos de pequeña escala y deben

considerarse en el diseño y planificación, ya que impactan directamente en la energía que finalmente se puede entregar al SNI.

En cuanto a la inversión y relación con el tipo de central, la figura 21 muestra que la inversión requerida varía según el tipo de central: flujo libre, derivación o embalse. También el caudal y salto hidráulico disponible, determina la infraestructura necesaria mientras que la potencia instalada, en plantas con mayor capacidad requieren mayor inversión, aunque no siempre proporcional a la potencia.

Los proyectos con alto salto o represa (Casos 6 y 8) muestran una inversión significativa, pero ofrecen un aporte mayor al SNI y una reducción de emisiones más eficiente. Por otro lado, proyectos pequeños (Caso 7) tienen inversión baja, pero contribuyen marginalmente.

Considerando la potencia anual y factor de capacidad la figura 22 y 23 muestran que la potencia anual efectiva es menor que la potencia teórica, debido al factor de capacidad, que en plantas de pequeña escala puede ser de 40%, frente a 80% en plantas mayores. Esto refleja la variabilidad hidrológica del recurso; las limitaciones de operación y mantenimiento y las estrategias a tomar en cuenta para respetar el caudal ecológico.

De acuerdo al aporte combinado al SNI (121,29 GWh/año), este equivale al 0,61% del total de energía hidroeléctrica en 2024, según CELEC EP. Aunque representa un porcentaje pequeño, este aporte es relevante porque diversifica la matriz energética del país contribuyendo a la electrificación de zonas rurales y periféricas, así como también sirve de base de análisis técnico para su correcta implementación.

En el análisis final acerca de la reducción de emisiones de CO₂ estimada se usó como referencia un factor de emisión de termoeléctricas de 0,77 ton CO₂/GWh, se estima que la implementación de estos ocho proyectos podría evitar la emisión de 148,74 ton CO₂/GWh.año, como se muestra en la figura 25. Esto permite definir una ventaja ambiental de las PCH frente a fuentes fósiles, así como demostrar la contribución de las PCH a las metas de mitigación de gases de efecto invernadero del país en el marco del cumplimiento a los ODS, y la importancia de incluir proyectos de pequeña escala en la planificación energética por sus beneficios sociales y ambientales.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

El estudio ha demostrado que existe un considerable potencial para el aprovechamiento de los recursos hídricos locales a través de sistemas de energía hidroeléctrica de pequeña escala en Ecuador. La investigación ha evidenciado que, a pesar de los desafíos técnicos, económicos y sociales, la implementación de estas tecnologías es viable y puede contribuir de manera significativa al desarrollo sostenible del país. Asimismo, los hallazgos sugieren que la promoción de políticas públicas que fomenten la inversión en infraestructura hidroeléctrica de pequeña escala puede facilitar el acceso a energía renovable y asequible para comunidades rurales y aisladas, impulsando así la calidad de vida y la autonomía energética de estas poblaciones.

Técnicamente, las PCH de los ocho casos son viables, considerando eficiencia, caudal y salto hidráulico, y su operación genera energía efectiva significativa.

Económicamente, la inversión varía según el tipo de central, pero la relación inversión-aporte energético es favorable en casos de alto salto y represa.

Ambientalmente, la reducción de emisiones de CO₂ y el menor impacto en el entorno justifican la incorporación de estas plantas en la planificación energética.

Socialmente, los proyectos contribuyen a electrificación local, generación de empleo y desarrollo de infraestructura, reforzando los tres ejes de desarrollo: social, ambiental y técnico. Aunque el aporte al SNI es relativamente pequeño en porcentaje, los beneficios acumulativos en términos de energía, reducción de emisiones y desarrollo local hacen que la inclusión de estas PCH sea estratégica para la planificación sostenible del sector eléctrico en el país. Finalmente, a nivel rural y localidades aisladas este porcentaje de aporte al SNI incrementaría visiblemente los beneficios mencionados.

La identificación y análisis de casos de estudio representativos de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador han puesto de manifiesto su efectividad y diversidad en la aplicación. Se ha evidenciado que estos sistemas no solo amplían el acceso a energía en zonas de difícil cobertura, sino que también generan beneficios económicos, entre ellos la reducción de costos energéticos y la generación de empleo local. En el ámbito ambiental, su implementación favorece la disminución de emisiones

de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. Estos análisis subrayan la necesidad de promover y replicar estos casos exitosos como un modelo viable para el desarrollo energético sostenible en el país.

El estudio de los factores clave para el éxito y de las limitaciones en la implementación de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en Ecuador evidencia que su viabilidad depende en gran medida de la capacidad para adaptarse a las condiciones geográficas y socioeconómicas particulares de cada territorio. La identificación de obstáculos como la falta de financiamiento, la capacitación técnica insuficiente y las limitaciones normativas son fundamentales para comprender los desafíos que enfrentan estos proyectos. Al mismo tiempo, el estudio ha destacado factores que facilitan la implementación, como el apoyo comunitario, la participación activa de actores locales y el acceso a incentivos gubernamentales. Esta comprensión integral permitirá diseñar estrategias más efectivas y personalizadas que maximicen el potencial de los sistemas hidroeléctricos a pequeña escala en diversas regiones del país.

La propuesta de lineamientos estratégicos y recomendaciones derivadas del análisis de casos de estudio de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala proporciona un marco integral para el desarrollo futuro de estos proyectos en Ecuador. Se destaca la importancia de impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras adecuadas al contexto local, así como de fortalecer el marco normativo y los mecanismos de financiamiento, además de mejorar la capacitación técnica de las comunidades. Asimismo, resulta fundamental promover la participación activa de los usuarios en la planificación y ejecución de los proyectos para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Estas recomendaciones orientan la optimización del uso de los recursos hídricos locales y el avance hacia un desarrollo energético sostenible, en coherencia con los compromisos nacionales e internacionales relacionados con las energías renovables.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda desarrollar programas de capacitación técnica para las comunidades locales que deseen implementar sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. La formación debe abarcar tanto el manejo técnico de las instalaciones como la gestión administrativa y financiera, lo que permitirá una mejor operatividad y sostenibilidad de los proyectos a largo plazo.

Se sugiere realizar investigaciones adicionales enfocadas en la adaptación y desarrollo de tecnologías innovadoras específicas para el contexto ecuatoriano. Esto incluiría estudios sobre tecnologías de generación de energía hidroeléctrica más eficientes y accesibles que puedan ser implementadas en diversas geografías y condiciones climáticas del país.

Aconsejamos llevar a cabo estudios de evaluación del impacto social y ambiental más exhaustivos y específicos. Estos estudios deberán incluir la participación de las comunidades afectadas desde las etapas iniciales, para garantizar que sus intereses y necesidades sean considerados en el diseño e implementación de los proyectos hidroeléctricos.

Se recomienda la formulación de políticas públicas que faciliten la integración de sistemas hidroeléctricos de pequeña escala en el marco energético nacional, así como la creación de incentivos económicos que promuevan la inversión en estas tecnologías. Esto ayudará a superar las barreras encontradas durante el estudio y a fomentar un entorno favorable para nuevos proyectos en el futuro.

Referencias Bibliográficas

- Agencia de Regulación y Control del Agua. (05 de Agosto de 2014). *regulacionagua*.
Obtenido de <https://www.regulacionagua.gob.ec/>
- Alarcon, A. (7 de Julio de 2021). *BID mejorando vidas*. Obtenido de
<https://blogs.iadb.org>
- Alarcón, J. (02 de Abril de 2019). *INTE PUCP*. Obtenido de <https://inte.pucp.edu.pe>
- Alp, A., Akyuz, A., & Kucukali, S. (2020). Ecological impact scorecard of small
hydropower plants in operation: An integrated approach. *Renewable Energy*,
1605-1617.
- ARCONEL. (Junio de 2015). *Regulatory Indicators for Sustainable Energy*. Obtenido de
<https://rise.esmap.org/>
- ARCONEL. (11 de Julio de 2025). *Agencia de regulación y control de electricidad*.
Obtenido de <https://arconel.gob.ec>
- Arias, F., & Bravo, A. (2016). Estudio para la modernización de la central hidroeléctrica
Saucay. *Tesis*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Asamblea del Ecuador. (28 de Septiembre de 2008). *Comisión de las Naciones Unidas*.
Obtenido de <https://www.fao.org/faolex/>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2015). Ley Orgánica del Servicio Público de Energía
Eléctrica (LOSPEE). *Registro Oficial Suplemento No. 415*. Ecuador. Obtenido de
<https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2019/03/LEY-DE-ELECRICIDAD.pdf>
- Asociación de bancos privados del Ecuador. (2022). *asobanca*. Obtenido de
<http://asobanca.org.ec>
- Bacca, J., & Toro, J. (22 de Diciembre de 2021). Análisis de la vulnerabilidad de la
hidroelectricidad en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 27-45.
doi:<https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl2.92923>
- Banco Interamericano de Desarrollo BID. (2021). *BID*.
- Basterrechea, M., & Franco, G. (Mayo de 2021). *Global Water Partnership*. Obtenido de
<https://www.unepdhi.org>

- Blazquez, A. (Julio de 2018). Evaluation of small hydropower plant prospectives in north-east India. *Tesis*. Graz, Austria: Institute of Electricity Economics and Energy Innovation.
- Borkowski, D., & Wegiel, T. (2023). Small Hydropower Plant With Integrated Turbine-Generators Working at Variable Speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 452-459.
- Cabrera, J., & Racines, P. (2015). Aplicación de software libre para el diseño y modelación de las obras hidráulicas a flujo libre de una pequeña central hidroeléctrica en el río Zarapullo ubicado en la provincia de Sto. Domingo de los Tsachilas. *Maestría*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica .
- Carrillo, M., & Tapia, J. (Febrero de 2023). Escenarios de producción de energía eléctrica en una pequeña central hidroeléctrica utilizando series sintéticas. *Tesis*. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Castellanos, H., Collazos, C., Farfan, J., & Meléndez, F. (2017). Diseño y Construcción de un Canal Hidráulico de Pendiente Variable. *Información tecnológica* .
- Ceballos, J., Isaza, C., Patiño, I., & Morales, A. (2021). Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación. *Ingeniería y Competitividad Revista Científica y Tecnológica*.
- Celec Ep. (9 de Junio de 2020). *Celec ep Corporación eléctrica del Ecuador*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/>
- CENACE EP. (2024). *Informe anual Operador Nacional de Electricidad - CENACE 2024*. Quito: CENACE.
- Chamorro, J., & Mera, E. (2025). Estudio de la crisis energética en el Ecuador por la dependencia en la generación de energía hidráulica. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación*, 168-186.
- Chicaiza, C., Logroño, W., Chicaiza, A., Nuñez, W., & Ortiz, M. (2022). Estrategias de Manejo Ambiental en comunidades Kichwa de la Amazonia del Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 27-34.

- Chuquin, N., & Mayorga, D. (25 de Junio de 2024). Diseño de una central hidroeléctrica para la generación de 10 MW en la Victoria. *Tesis*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Claude, A., David, T., Davide, F., Joseph, K., Abdoul, A., & Patrice, A. (2022). LCOE-Based Optimization for the Design of Small Run-of-River Hydropower Plants. *Energies*. doi:<https://doi.org/10.3390/en15207507>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *Naciones Unidas*.
- Confirmado. (15 de Noviembre de 2024). *Confirmado.net*. Obtenido de <https://confirmado.net/>
- Coz, F. (2005). *Manual de mini y microcentrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos*. Lima: Intermediate Technology Development Group.
- Cuichan, S., Vera, L., Heras, M., & Quevedo, D. (2024). Microcentrales hidroeléctricas con tecnología turbulent hydro para la generación de electricidad en comunidades aisladas. *Ingenium et Potentia. Revista Electrónica Multidisciplinaria de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura*.
- Delgado, V. (Agosto de 2014). Guía para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. *Maestría*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica de Chimborazo.
- El Oriente Redacción. (19 de Abril de 2024). Kawsus realizará el diseño definitivo de la central Hidroeléctrica Ocaña II. *El Oriente auspiciado por Chevron*.
- elamazonico. (15 de Octubre de 2024). Gobierno Nacional Impulsa Proyectos Hidroeléctricos en Zamora Chinchipe y Morona Santiago. *El Amazónico*.
- Elec Austro. (Noviembre de 2014). *ElecAustro Electrogenerador del Austro S.A*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/>
- ElecAustro. (2017). *ElecAustro energía para la vida*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/>
- ElectAustro. (2015). *ElecAustro energía para la vida*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/>
- Energía Estratégica. (14 de Julio de 2021). *energiaestrategica*. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/>

- Escobar, A., Cortés, C., & Leguizamón, J. (2018). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). *Dialnet*, 111-126.
- Fraile-Ardanuy, J., Wilhelmi, J., Fraile-Mora, J., & Pérez, J. (2016). Variable-speed hydro generation: operational aspects and control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 569-574.
- Fundación Red de Energía. (2025). *BUN-CA*. Obtenido de <https://bun-ca.org>
- Geo Sigma. (2 de Mayo de 2020). *Geosigma*. Obtenido de <https://geosigmaconsultores.com/caudal-ecologico/>
- Gobernación del Cañar. (27 de Julio de 2015). *gobnacioncanar.gob.ec*. Obtenido de <https://gobnacioncanar.gob.ec/>
- Gomezcoello, M., & Sarango, V. (2017). Experiencia en la rehabilitación de la minicentral hidroeléctrica Gualaceo. *Con energía hacia el futuro revista informativa*, 5-7.
- Hammerling, M., Walczak, N., & Kaluza, T. (2023). Analysis of the Influence of Hydraulic and Hydrological Factors on the Operating Conditions of a Small Hydropower Station on the Example of the Stary Młyn Barrage on the Głomia River in Poland. *Energies* 16.
- Haro, P., Ríos, L., Guerra, M., Ortega, P., Toapaxi, J., & Baque, J. (2023). Ecuador, país objetivo del proyecto HYPOSO "Soluciones Hidroeléctricas". *VII Jornadas de Ingeniería del Agua*. Cartagena: JIA 2023.
- Hurtado, J., & Castro, P. (2023). Estudio de factibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en un afluente del Río Guayas -Ecuador. *Polo del conocimiento*.
- Inga, J. (2015). Conversión de pequeñas centrales hidroeléctricas en sistemas reversibles usando energía eólica. *Tesis*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Ingfocol Ltda. (2017). *Unidad de Planeación Minero Energética UPME*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/>
- Instituto de investigación Geológico y Energético. (2023). *Balance Energético Nacional*. Quito: Ministerio de energía y minas.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). *Rendición de cuentas 2023*. Quito: INEC.

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (Octubre de 2013). *idae*.
Obtenido de <https://www.idae.es/>
- Jian, D., Xu, M., Dong, M., Guo, F., Liu, X., Chen, G., & Wang, Z. (2019). Water-solid triboelectric nanogenerators: An alternative means for harvesting hydropower. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Jimenez, J. (12 de diciembre de 2022). Revisión de pequeñas centrales hidroeléctricas para electrificar zonas no interconectadas de Colombia. *Tesis de maestría*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Kibler, K. (2013). Impacto biofísico acumulativo del desarrollo de pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas en el río Nu, China. *Advancing Earth and Space Sciences*, 3104-3118.
- Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., . . . Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Kumar, A., & Schei, T. (2014). Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change. *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*.
- Kumar, P., Singh, R., & Sharma, S. (2015). Hydropower: A renewable energy source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123-132.
- Laghari, J., Mokhlis, H., Bakar, A., & Mohammad, H. (2013). A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 279-293.
- Liska, D., Krzemianowski, Z., Weigel, T., & Borowski, D. (2022). Alternative Solutions for Small Hydropower Plants. *Energies*.
- Liu, D., Liu, H., Wang, X., & Kremere, E. (2019). *Informe mundial sobre el desarrollo de la pequeña central hidroeléctrica 2019*. Organización de las naciones unidas para el desarrollo industrial.
- Loayza, M. (9 de Abril de 2025). *undp*. Obtenido de <https://www.undp.org>

- Macas, L. (2015). Políticas en gestión energética para incentivar el uso de energías renovables en Ecuador ¿cómo incide la crisis del precio del petróleo? *Tesis de maestría*. Chile: Universidad de Chile.
- Maldonado, V. G. (2014). Implementación del mercado de carbono en el desarrollo de centrales hidroeléctricas de pequeña escala en el Ecuador. *Tesis de maestría* . Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Manzano, L. (6 de Marzo de 2015). *Escuela de organización industrial*. Obtenido de <https://www.eoi.es/blogs>
- Manzano, M. (2022). Situación actual del sector hidroeléctrico ecuatoriano y sus desafíos. *Tesis de maestría*. Quito, Ecuador: Universidad Andina Simón Bolívar.
- Martínez, Y., & Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*.
- Mendoza, Y., & Yampier, P. (2017). Diseño de generador hidroeléctrico portable para zonas rurales. *Tesis*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Menéndez, G. (2017). Evaluación ambiental estratégica (EAE) "proceso de decisión ambiental y sostenible para Ecuador". *Revista San Gregorio*.
- Mentado, P. (8 de Julio de 2020). *energiyahoy*. Obtenido de <https://energiyahoy.com/>
- Meza, B., & Aparicio, J. (2017). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y ciencias del agua*, 69-87.
- Meza, B., & Aparicio, J. (2020). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y ciencias del agua*.
- Meza, B., & Aparicio, J. (2020). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y ciencias del agua* .
- Ministerio de energía y minas. (2023). *Informe 2023 de la Comisión técnica de determinación de factores de emisión de gases de efecto invernadero*. Quito: MEM. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec>

- Ministerio de Energía y Minas. (Junio de 2024). *recursosyenergia*. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec>
- Ministerio de energía y minas Ec. (17 de Agosto de 2021). *recursosyenergia*. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/boletines>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No renovables. (14 de Septiembre de 2021). *Recursos y energía*. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/>
- Ministerio del ambiente. (12 de Abril de 2017). *ambiente*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Mirassou, S. B. (2016). La gestión integral de los recursos hídricos: aportes a un desarrollo conceptual para la gobernabilidad del agua. *Tesis de doctorado*. Buenos Aires, Argentina: FLACSO.
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L. (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementacion. *Dyna revista de la facultad nacional de minas*.
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L. (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementacion. *DYNA Revista de la facultad nacional de minas*.
- Munévar, C., Díaz, S., & Sanchez, A. (2023). Derecho humano al agua y ODS 6 Agua limpia y saneamiento básico. Estudio de caso Departamento de Caldas, Colombia. *Dialnet*.
- Naciones Unidas. (Diciembre de 2018). *Comisión económica para América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/>
- Naranjo, S. (2024). Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro. *La granja revista ciencias de la vida*, 63-77.
- Narvaez, M., Cando, E., Paz, D., Escobar, K., Castillo, C., Erazo, R., . . . Aguinaga, A. (2023). Platform for micro-hydro generation in rural areas of Ecuador. *Witpress*, 177-189.
- Narvaez, M., Cando, E., Paz, D., Escobar, K., Castillo, C., Erazo, R., . . . Aguinaga, A. (2023). Platform for micro-hydro generation in rural areas of Ecuador. *Energy and Sustainability*.

- Naula, R. (Septiembre de 2021). Diseño de una pequeña central hidroeléctrica en el canal de riego Ambato - Huachi - Pelileo en la provincia de Tungurahua desde el tramo +0.00 km hasta +4.24 km . *Tesis*. Ambato, Tungurahua, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- Navarro, M. (06 de Julio de 2023). Análisis del impacto de la variabilidad climática en una central hidroeléctrica con embalse de regulación diaria. *Tesis de maestría*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliber, O. (20 de Octubre de 2023). Análisis técnico - económico del recurso hídrico aplicado a la pico central instañada en el cantón Paute. *Tesis*. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26424/4/UPS-CT010985.pdf>
- ONU. (13 de Diciembre de 2023). *UNEP*. Obtenido de <https://www.unep.org/es/>
- Operador Nacional de Electricidad. (2023). Obtenido de <https://www.cenace.gob.ec/>
- Ordoñez, M., Viteri, E., Serrano, C., & Orozco, L. (2016). Diseño de la central hidroeléctrica El Altar. *Vinculos ESPE*, 13-18.
- Orozco, M. (25 de Marzo de 2025). La gigantesca mina de Mirador no hizo la hidroeléctrica que ofreció, ¿qué impacto tiene para Ecuador en medio de los cortes de luz? *PRIMICIAS*.
- Oscullo, J., Carvajal, H., Orozco, N., Vega, J., & Takaaki, O. (2024). Examining the Evolution of Energy Storing in the Ecuadorian Electricity System: A Case Study (2006–2023). *Energies*.
- Osorio, I. (2017). Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia. *Tesis de maestría*. Medellín: Universidad EAFIT. Obtenido de <https://repository.eafit.edu.co>
- Pacheco, E., & Pallo, M. (2014). FACTIBILIDAD DE UNA MICROCENTRAL HIDRAÚLICA EN EL RIO MANGAYACU DEL CANTÓN MERA, PROVINCIA DE PASTAZA Y SU APROVECHAMIENTO EN EL MARCO DEL ECOTURISMO APLICADO AL PROYECTO LAS CASCADAS DE MANGAYACU. *Maestría*. Latacunga, Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi.

- Paish, O. (2002). Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 537-556.
- Paish, O. (2014). Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 537-556.
- Pérez, V., Páez, B., Játiva, J. A., Gallegos, J. D., Paredes, A., Escobar, E., & Egas, S. (2024). La crisis del sector eléctrico vino: para quedarse. *Koyuntura USFQ*.
- Porras, E. (2016). Estudio en el banco de pruebas tutor para determinar la potencia y eficiencia de las turbinas Pelton y Francis en la facultad de ingeniería civil y mecánica. *Tesis*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (26 de Abril de 2011). *ONU environment programme*. Obtenido de <https://www.unep.org>
- Quinaluisa, C., Peralta, K., Solano, A., Gallo, A., Villalba, A., & Zambrano, F. (2019). Energía hídrica en el Ecuador. *Ciencia Digital*, 219-237.
- RAMSAR. (2015). *Convention on Wetlands Secretariat*. Obtenido de <https://www.ramsar.org/es/>
- Redacción El Mercurio. (6 de Marzo de 2025). Central hidroeléctrica Saymirín se declara en emergencia. *El Mercurio*.
- Redacción Primicias. (2 de Marzo de 2023). Hidroeléctrica Sarapullo entra en operación comercial. *PRIMICIAS*.
- República del Ecuador. (2025). *unfccc*. Obtenido de <https://unfccc.int>
- Reynaldo, N. (Enero de 2021). Determinación del costo nivelado de energía (LCOE) para distintos tipos de centrales de generación del Ecuador. *Tesis*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21741>
- Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., & Trivisonno, F. (2018). Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. *Tecnología y ciencias del agua*.
- Rivera, S. (Enero de 2016). La sostenibilidad del recurso hídrico en el Ecuador: análisis multicriterial de la gestión del agua. *Tesis de maestría*. Quito, Ecuador: FLACSO.

- Romero, B., & Siguenza, A. (Junio de 2019). Estudio de prefactibilidad para la repotenciación de la pequeña central hidroeléctrica El Amarillo situada en el cantón Portovelo. *Tesis*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Romero, J., Loján, M., Basantes, E., Romero, A., & Gonzalez, J. (2024). Factibilidad de la implementación hidroeléctrica para la Universidad Estatal Amazónica en el Puyo, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 10377-10391.
- S.A. (15 de Febrero de 2024). La generación de electricidad en Brasil registra las menores emisiones de CO2 en once años. *Pv magazine*.
- S.E. (20 de Diciembre de 2024). El proyecto de 'autopista eléctrica' que se extiende por tres países. *Cadena SER*.
- Santiana, C. (Abril de 2016). Estudio de factibilidad para la repotenciación de la Mini Central Hidroeléctrica de 2MW de la Empresa UCEM – CEM, Planta Chimborazo. *Tesis*. Riobamba, Chimborazo, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Sari, M., Badruzzaman, M., Cherchi, C., Swindle, M., & Ajami, N. (2018). Recent innovations and trends in in-conduit hydropower technologies and their applications in water distribution systems. *Journal of environmental management*, 416-428.
- Secretaria Nacional de Planificación. (Septiembre de 2021). *planificacion*. Obtenido de Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/>
- Sillo, J. M. (Dirección). (2020). *MINI CENTRAL HIDROELÉCTRICA - generador de energía hidráulica* [Película].
- Souza, R., Quiñonez, L., Reyna, L., Salgado, P., & Chere, B. (2024). Renewable Energy Development and Employment in Ecuador's Rural Sector: An Economic Impact Analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy*.
- Subdirección Ambiental del Valle de Aburrá. (2019). *Metropol*. Obtenido de <http://metropol.gov.co>
- Subsecretaria de Distribución y Comercialización de energía eléctrica. (2022). *Ministerio de energía y recursos naturales no renovables*. Obtenido de <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/>

- Suleimenova, S., Kabulov, N., & Musiripsha, Z. (2023). Artificial intelligence for control small hydroelectric power plants. *Bulletin of Shakarim University Technical Sciences*.
- Suleimenova, S., Kabulov, N., Musiripsha, Z., & Ospanov, Y. (2023). Artificial intelligence for control small hydroelectric power plants. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*.
- Tello, O. (Noviembre de 2024). Tesis. *Diseño e implementación de una microturbina hidráulica para la generación de energía eléctrica en tuberías de abastecimiento de agua en el distrito de Colasay*. Jaén, Perú: Universidad Nacional de Jaén.
- Terra, R., & Schenzer, D. (2014). *Barreras para la implantación de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Uruguay: Banco interamericano de desarrollo. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones>
- Torres, E. (2015). *Ráíces indígenas*. Obtenido de <https://raicesindigenas.net/>
- Torres, M. (25 de Noviembre de 2024). Tecnología social para la protección del agua en el páramo central del Ecuador. *Tesis doctoral*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica de Chimborazo.
- UNIR. (15 de Febrero de 2024). *La Universidad en Internet*. Obtenido de <https://ecuador.unir.net/>
- United Nations Industrial Development Organization. (2019). *UNIDO*. Obtenido de <https://www.unido.org/>
- Vaca, S., Gerbens, P., & Nonhebel, S. (2020). The monthly dynamics of blue water footprints and electricity generation of four types of hydropower plants in Ecuador. *The Science of the total environment*.
- Valencia, A. (27 de Octubre de 2024). Ecuador lawmakers approve bill to boost private energy investment. *Reuters*.
- Vallejo, M., Espinosa, B., Venes, F., López, V., & Anda, S. (2018). Esquivando estándares de desarrollo sustentable: estudios de casos en proyectos hidroeléctricos del Ecuador. *Global Development Policy Center*.

- Velásquez, A. (2015). Caracterización geotécnica del proyecto Central Hidroeléctrica Palmira con tomografía sísmica de refracción y perforaciones mecánicas, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador. *Tesis*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Villagran, J. (Junio de 2007). Metodología para la rehabilitación y repotenciación de pequeñas centrales hidroeléctricas. *Tesis*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Wingfield, S., Martínez-Moscoso, A., Quiroga, D., & Ochoa-Herrera, V. (2021). Challenges to Water Management in Ecuador: Legal Authorization, Quality Parameters, and Socio-Political Responses. *Water*.
- Yamunaque, I. (Julio de 17 de 2024). Grupo Gloria consolida su presencia en Ecuador y adquiere hidroeléctrica Ecoluz. *InfoMercado*.
- Zela, C. (2011). Análisis de viabilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas en el Ecuador caso de estudio: proyecto hidroeléctrico Tigreurco (ubicación: provincia de Bolívar-Ecuador). *Tesis*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

ANEXO A

Calificación de documentos

Criterio	Calificación
Ubicación geográfica	Se calificó de 7 a 10 según el grado de enfoque en Ecuador y especificidad en cuencas relevantes
Tamaño del proyecto	Calificado según si aborda micro (≤ 100 kW), mini (≤ 1 MW) o pequeña (≤ 10 MW) escala y su nivel de detalle técnico.
Tecnología de energía renovable	Se evaluó si detalla tecnologías de PCH como Pelton, Francis, sistemas de control y automatización.

Impacto social	Se consideró el nivel de análisis de beneficios en comunidades como educación, salud, electrificación, empleo, etc.
Impacto ambiental	Se valoraron estudios que consideraron caudales ecológicos, mitigación de CO ₂ y conservación de ecosistemas.
Disponibilidad de datos	Evaluated según si el documento presenta datos claros (tablas, gráficos, parámetros técnicos) y metodología replicable

ANEXO B

Documentos evaluados

Nro.	Título de la publicación	Motor de búsqueda	Ubicación geográfica	Tamaño del proyecto	Tecnología energía renovable	Impacto social	Gestión del Impacto ambiental	Disponibilidad de datos	Nota final (promedio)
1	Modelo de correlación desgaste-cantidad de sedimentos para la programación de mantenimiento preventivo de una central hidroeléctrica	Scielo	1 No es un estudio local	8 PCH Francis (10 MW aprox.)	9 Francis, mantenimiento predictivo	1 No se desarrolla	1 No se desarrolla	5 Datos técnicos de funcionamiento de la turbina.	4,16
2	Microcentrales hidroeléctricas con tecnología Turbulent Hydro para la generación de electricidad en comunidades aisladas	Scielo	6 Enfocado a la amazonía	6 Micro (5–70 kW)	9 Turbinas vórtex Turbulent Hydro	9 Alta relevancia social, enfocada en proveer electricidad continua a comunidades aisladas	9 La tecnología es amigable con la fauna acuática, no requiere represas, garantiza caudal ecológico y reduce emisiones de CO ₂	3 No incluye estudios de caso en Ecuador.	7,00
3	Coca Codo Sinclair Hydropower Plant: A time bomb in the energy sector for Ecuador	Scielo	8 Napo	5 Gran escala (1500 MW)	9 Hidroeléctrica, turbinas Francis	9 Desarrolla los impactos como desplazamientos, empleo, etc.	6 Presenta plan de monitoreo propuesto, gestión reactiva.	10 Datos técnicos y económicos detallados	7,83
4	Estudio de factibilidad de una pequeña central hidroeléctrica en un afluente del Río Guayas - Ecuador	Dialnet	8 Ecuador Guayas	10 Aplica a PCH	10 Desarrolla la implementación de turbinas Francis	5 No se aborda específicamente, pero menciona el beneficio económico	10 Describe el impacto ambiental de su implementación	10 Su utilidad directa para estudios de PCH es adecuada	8,83*
5	¿Al margen del conflicto? Apuntes sobre la implementación de Hidroituango en el noroccidente antioqueño Colombia	Scielo	3 Colombia Relevante para la región andina	5 Gran escala	9 Hidroeléctrica, turbinas Francis	9 Aborda ampliamente desplazamientos, conflictos, militarización y efectos en comunidades locales.	5 Limitada efectividad de gestión, con daños significativos al ecosistema.	3 Sin análisis financiero directo útil	5,60
6	Protocolo de pruebas y validación de reguladores de velocidad – Aplicación práctica en la central hidroeléctrica Delsitanisagua	Scielo	10 Zanora Chinchipe, aplicable al	6 Mediana escala 180 MW	9 Turbinas Pelton	7 Impacto social indirecto al mejorar estabilidad del sistema y la continuidad del suministro eléctrico.	3 No aborda gestión ambiental, pero contribuye indirectamente a	10 Parámetros técnicos, valores de estadismo, modelado replicable.	7,50

			contexto de PCH en el país				sostenibilidad operativa		
7	Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica	Scielo	8 Proyecto ecuatoriano en cuenca andina.	6 Mediana escala	9 Detalla uso de turbinas Francis, sensores de vibración	1 Sin evaluación específica a comunidades	1 No se describe ningún plan de mitigación o caudal ecológico.	5 RPM, caudales, frecuencia de vibraciones, eficiencia, sin datos financieros	5,00
8	Implementación de modelo hidrológico para mejora de la operación de la Central Hidroeléctrica Baba	Scielo	10 Cuenca prioritaria Guayas	8 Mediana escala	8 Descripción técnica de elementos clave (presa, túnel, casa de máquinas)	1 No se describe	1 No se describe	7 Datos técnicos útiles	5,83
9	Despacho Hidrotérmico de Mediano Plazo aplicado al Complejo Hidroeléctrico Paute Integral	Scielo	10 Cuenca río Paute	5 Gran escala	5 Hidroeléctrica multipropósito, Francis, embalses	1 No se describe	2 No se desarrolla solo se menciona	7 Base técnica, mapas, esquemas, cifras de operación, sin análisis financiero detallado	5,00
10	Modelación Matemática de los Sistemas de Control de Velocidad de Unidades de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair	Science direct	10 Cuenca del Amazonas	5 Mega escala	5 Uso de turbinas Pelton, conducción subterránea.	1 No se describe	1 No se describe	9 Datos útiles para modelado de PCH	5,16
11	Geometrical Optimization of Pelton Turbine Buckets for Enhancing Overall Efficiency by Using a Parametric Model—A Case Study: Hydroelectric Power Plant “Illuchi N2” from Ecuador	Repositorio universitario y Science direct	10 Revisión nacional	10 Aplica a PCH	10 Desarrolla la implementación de turbinas Pelton 6,5 MVA	7 Menciona beneficiarios per no implementa participación	5 La línea de investigación es protección ambiental pero no se desarrolla	10 Su utilidad directa para estudios de PCH es adecuada	8,66*
12	Diseño de un sistema de generación microhidráulica basado en un tornillo de Arquímedes	Science direct	1 No es un caso ecuatoriano, aunque es aplicable la Sierra o Amazonía	10 Enfocado en micro y mini escala, ideal para PCH descentralizadas.	9 Describe el funcionamiento, rangos operativos y ventajas técnicas.	5 Beneficio a la academia	5 Desarrolla el beneficio de contar con energías sostenibles	8 Presenta parámetros clave técnicos, pero falta información financiera detallada.	6,33
13	Large hydropower, decarbonisation and climate change uncertainty:	Science direct	5 Enfoque claro en el sistema	6 Discute todos los niveles, útil	7 Análisis de múltiples	7	5 Enfatiza reducción de emisiones y normas	5	5,83

	Modelling power sector pathways for Ecuador		eléctrico ecuatoriano.	para justificar el rol de PCH dentro del sistema.	tecnologías y sus implicaciones técnicas.	Detalla beneficios sociales esperados por transición energética.	regulatorias, sin detalles específicos por proyecto.	Buen nivel de indicadores, sin detalles económicos	
14	The monthly dynamics of blue water footprints and electricity generation of four types of hydropower plants in Ecuador	Science direct	10 Análisis regional amazónico y andino con enfoque territorial detallado.	7 Proyectos de <213 MW, relevante para análisis de PCH.	8 Descripción de los sistemas	6 Beneficios energéticos en las comunidades	1 No se describen	7 Mapas, listas de proyectos; proyecciones sin parámetros técnicos numéricos.	6,50
15	Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador	Science direct	10 Cuenca Jubones	7 Analiza proyectos específicos, aplica para escala PCH.	3 No entra en detalle técnico de equipos.	1 No se desarrolla	8 Enfoque ecológico y de sostenibilidad hídrica.	9 Ofrece datos hidroclimáticos claves para pre-factibilidad de PCH.	6,33
16	Multi-criteria analysis for energy planning in Ecuador: Enhancing decision-making through comprehensive evaluation	Science direct	10 Análisis nacional.	9 Se enfoca en proyectos energéticos en general.	1 No describe tecnología específica	5 Considera actores y beneficiarios al ser un análisis multicriterio	1 No se describe	10 Datos SIG, mapas, parámetros de diseño y metodología robusta	6,00
17	Small hydropower impacts on water quality: A comparative analysis of different assessment methods	Science Direct	10 Plantas hidroeléctricas en Polonia	9 Aplica a micro centrales	3 Detalles de turbinas Kaplan	1 No se describe	10 Evaluación directa de impactos en calidad de agua.	5 Tablas de parámetros, ubicación y metodología.	6,33
18	Renewable energy technology diffusion model: Evaluation of financial incentives in the electricity market of Ecuador	Science direct	7 Enfoque nacional de varios tipos de energías renovables	1 No aplica a micro, mini y pequeña escala.	1 Sin detalle de la tecnología renovable	3 Menciona brevemente barreras socio culturales sin profundizar	6 Aborda el beneficio en el efecto sobre GEI, pero sin detalles de gestión de impactos negativos	5 Sin datos replicables a PCH	3,83
19	Ecuadorian electrical system: Current status, renewable energy and projections	Science direct	5 Incluye estudios de Ecuador.	5 Se centra en proyectos hidroeléctricos, en general	1 No aborda componentes técnicos ni ingenieriles	5 Menciona proyecciones de tipos de energía renovable	3 Trata sobre el desarrollo de energías renovables y la transición energética del país a 2050	5 No contiene datos técnicos cuantificables, pero sí análisis cualitativo.	4,00
20	The monthly dynamics of blue water footprints and electricity generation	Science direct	10	5	3	1	1	10	5,00

	of four types of hydropower plants in Ecuador		Todas las plantas están ubicadas en el Ecuador.	Se centra en proyectos de mediana escala	Comparación de caudales sin desarrollo técnico de su tecnología	No se aborda específicamente.	No se incluye análisis ambiental.	Datos técnicos detallados para complementar el diseño de PCH.	
21	The water footprint of electricity in Ecuador: Technology and fuel variation indicate pathways towards water-efficient electricity mixes	Science direct	10 Corresponde a análisis nacional	8 Compara grandes plantas y PCH	9 Sin análisis técnico de la tecnología renovable de PCH	2 No directo, pero inferencia útil para sostenibilidad social.	1 No se aborda	1 Análisis de tipos de energía renovable	5,16
22	Barriers to renewable energy expansion: Ecuador as a case study	Science direct	10 Plan nacional de Ecuador.	9 Cubre todo el espectro, incluye PCH.	3 Análisis detallado de fuentes renovables, sin desarrollo	9 Claras estrategias de acceso y cobertura en zonas vulnerables.	9 Requiere licencias, caudales ecológicos y favorece tecnologías limpias.	10 Completo en datos técnicos, proyecciones y análisis.	8,33
23	Hydrological impacts of dam regulation for hydropower production: The case of Lake Sibinacocha, Southern Peru	Science direct	6 Es en Perú, metodología adaptable a Ecuador.	9 El documento analiza proyectos hidroeléctricos de mayor escala	1 No se presenta diseños específicos y simulaciones técnicas.	3 Menciona conflictos sociales asociados con la gestión del agua	5 Señala elementos a considerar, pero no desarrolla estudio.	9 Amplia base de datos técnicos, hidrológicos y energéticos.	5,50
24	Fish Ecology and Hydrological Responses to a Run-of-River Hydroelectric Project in Ecuador	Science direct	8 El documento se centra en Ecuador, específicamente en los Andes	10 El estudio aborda un proyecto de pequeña escala (8 MW).	5 Menciona la infraestructura, pero no profundiza en la tecnología.	7 Se aborda conflictos sociales, y falta de socialización.	5 Incumpliendo caudales ecológicos, y la necesidad de estudios, sin plan de manejo ambiental.	7 Presenta metodologías de evaluación, útil para replicar estudios.	7,00
25	Analysis for the Implementation of Surplus Hydropower for Green Hydrogen Production in Ecuador	Scopus	10 Estudio centrado en el país.	5 No se limita a PCH, pero considera viabilidad técnica con energía hidráulica.	8 Se mencionan aspectos técnicos como eficiencia de turbinas, pero enfocado en grandes proyectos	1 No se aborda	5 No se aborda, pero el enfoque del estudio hace mención de eficiencia energética	6 Útil en proyecciones, aunque enfocado en grandes plantas	5,83
26	Evaluating the impacts of agricultural development and climate change on	Scopus	9 Cobertura provincial	1 Proyectos distribuidos de pequeña y	1 No incluye PCH.	9 Buen análisis de inclusión energética.	9 El documento aborda la importancia de la	7 Información sobre hidrología que es replicable a PCH	6,00

	the water-energy nexus in Santa Elena (Ecuador)			mediana escala, no incluye hidro directamente.			gestión integrada de recursos naturales		
27	Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro	Scopus	10 Cobertura nacional.	4 No profundiza técnicamente en PCH.	4 Sin detalles técnicos por tipo de turbina o sistema.	9 Profundo análisis crítico sobre conflictos y oportunidades	7 Relevante enfoque estratégico sobre impactos, pero no aborda su gestión	7 Aceptable contexto, pero sin tablas o cálculos específicos.	6,83
28	HYPOSO Map Viewer: A Web-Based Atlas of Small-Scale Hydropower for Selected African and Latin American Countries	Scopus	10 Foco específico en Ecuador y otras regiones con características similares	9 Sitios principalmente viables para PCH.	9 No se detalla condiciones para tecnologías.	3 No incluye análisis de cercanía a comunidades no electrificadas.	9 Incluye datos de áreas protegidas, pero no se aborda la gestión.	8 Excelente nivel de detalle técnico, mapas y metodología.	8,00
29	Assessing the Impact of Applying Individual Discount Rates in Power System Expansion of Ecuador Using OSeMOSYS	Scopus	10 Cobertura nacional y regiones similares	8 Aplica a pequeñas y mini centrales	3 Mención de análisis económico	5 Relevancia en incentivos para inversión y desarrollo de políticas.	5 Menciona cambio climático, pero no aborda su gestión	6 Proporciona datos sobre el potencial hidroeléctri	6,16
30	A Case Study: Sediment Erosion in Francis Turbines Operated at the San Francisco Hydropower Plant in Ecuador	Scopus	9 Enfoque andino del país.	6 Menciona una planta de 230 MW	8 Describe turbinas Francis	1 No se aborda	6 Enfocado en la sedimentación, no existe el desarrollo integral	5 No incluye datos financieros	5,83
31	Threshold Responses of Macroinvertebrate Communities to Stream Velocity in Relation to Hydropower Dam: A Case Study from The Guayas River Basin (Ecuador)	Scopus	8 El documento se centra en la cuenca del río Guayas.	3 No aborda específicamente proyectos de pequeña escala como PCH	3 No incluye información sobre tecnologías específicas	3 No se profundiza en conflictos sociales ni en procesos de socialización relacionados con la construcción de represas.	9 Aborda la importancia de la gestión ambiental, incluyendo la necesidad de definir flujos ecológicos.	7 Valores técnicos para análisis comparativo sin análisis financiero	5,50
32	Multi-Parametrical Tool for the Design of Bottom Racks DIMRACK—Application to Small Hydropower Plants in Ecuador	Scopus	9 Incluye Ecuador y contexto latinoamericano.	9 Metodología adaptable a PCH.	10 Detalla tecnologías, criterios técnicos e indicadores de eficiencia.	1 No se evalúa	1 No se discuten temas de gestión ambiental	5 No incluye información económica o financiera	5,83
33	Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the	Scopus	9	8 Enfocado en escalas	5	7	7 Análisis de impactos, pero sin su gestión	8 Proporciona datos climáticos,	7,33

	CMIP5 ensemble—the case of Ecuador		Aplica al contexto andino de Ecuador.	múltiples, adaptable a PCH.	Aplica a hidroeléctricas en general	Relación con vulnerabilidad comunitaria.		hidrológicos, sin análisis financiero	
34	Chivor's Life Extension Project (CLEP): From Sediment Management to Development of a New Intake System	Scopus	6 Aplica en Colombia	6 Diseño enfocado a grandes plantas	9 Sistema hidráulico específico y replicable.	1 No abordado directamente.	8 Enfoque en minimización de impacto ambiental	10 Detallado y aplicable pionero en Colombia	6,66
35	Smart Climate Hydropower Tool: AMachine-Learning Seasonal Forecasting Climate Service to Support Cost-Benefit Analysis of Reservoir Management	Scopus	6 Herramienta diseñada y probada en Colombia	7 Adaptable a distintas escalas, no se menciona la viabilidad en PCH	1 No detalla aspectos técnicos específicos	1 No se aborda	1 No incluye evaluaciones ambientales	10 Datos hidrometeorológicos y herramientas de aprendizaje automático útiles	4,33
36	Diseño de islas flotantes para la recuperación de flora y fauna en reservorios hidroeléctricos de Quito con monitoreo de variables ambientales	Repositorio universitario	7 Aplicado en Quito	6 Sin evaluación hidráulica en escala compatible con PCH.	5 No se desarrolla tecnologías específicas como turbinas, sistema de transmisión, etc.	1 No desarrollados con profundidad.	9 Enfoque netamente de la gestión ambiental	1 Sin datos replicables en evaluación y diseño de PCH	4,83
37	Factibilidad de la implementación hidroeléctrica para la universidad estatal amazónica en el Puyo, Ecuador	Repositorio universitario	9 Enfocado en Ecuador en la región amazónica	10 Pequeña y mini escala 0,8 MW	10 Sistema hidráulico con enfoque técnico integral.	8 Menciona la percepción comunitaria positiva	9 Evaluación de impacto ambiental y medidas de mitigación propuestas	8 Proporciona datos hidrológicos y de consumo eléctrico que son replicables y útiles	9,00*
38	Estudio de prefactibilidad para la repotenciación de la pequeña central hidroeléctrica el Amarillo situada en el cantón Portovelo.	Repositorio universitario	9 Enfocado en Ecuador en la región sur	10 Pequeña escala 3,3 MW	10 Sistema hidráulico con enfoque técnico integral.	8 Menciona beneficios sociales, aunque no su solución	9 Evaluación de impacto ambiental y medidas de mitigación propuestas	9 Proporciona datos hidrológicos, técnicos y económicos útiles para evaluar viabilidad	9,16*
39	Aplicación de software libre para el diseño y modelación de las obras hidráulicas a flujo libre de una pequeña central hidroeléctrica en el río Zarapullo ubicado en la	Repositorio universitario	9 Enfocado en Ecuador en la región costa	10 Pequeña y mini escala	9 Detalla tipos de turbina, potencia instalada y diseño de centrales.	8 Documenta conflictos por ausencia de consulta y participación.	7 Sin evaluación a profundidad.	10 Incluye tablas, cronologías, fuentes oficiales y datos cuantitativos útiles.	8,83*

	provincia de Sto. Domingo de los Tsachilas								
40	Diseño de una central hidroeléctrica para la generación de 10 MW en el río Chimbo, la Victoria	Repositorio universitario	9 Cantón Cumandá, provincia de Chimborazo	10 Dentro del rango de PCH 10 MW	9 Turbina Pelton con sistema completo modelado.	9 Incluye beneficios locales y socialización.	9 Evaluación integral y medidas propuestas.	10 Proporciona datos hidrológicos, climáticos, costos, y análisis técnicos que son replicables	9,33*
41	Diseño de una pequeña central hidroeléctrica en el canal de riego Ambato – Huachi – Pelileo en la provincia de Tungurahua desde el tramo +0.00 km hasta +4.24 km	Repositorio universitario	9 Región de Tungurahua y el canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo	10 Cubre PCH y minicentrales	10 Detalla turbinas Michell Banki	8 Beneficios para la agricultura falta profundizar	8 Menciona el bajo impacto ambiental, falta la gestión integral	10 Proporciona datos hidrológicos, climáticos, costos, y análisis técnicos que son replicables	9,16*
42	Diseño definitivo de la central hidroeléctrica “el Altar	Repositorio universitario	9 Datos de regiones como Riobamba y la parroquia El Altar.	10 Dentro del rango de PCH 10 MW	9 Turbina Pelton con sistema completo modelado.	9 Incluye beneficios locales sin profundizar en la resolución	10 Evaluación integral y medidas propuestas bien descritas.	10 Proporciona datos hidrológicos, climáticos, costos, y análisis técnicos que son replicables	9,50*
43	Línea base biológica para un proyecto de restauración vegetal en terrenos degradados en la zona de influencia de la Central Mazar	Repositorio universitario	8 Proyecto ubicado en Azuay	10 Mediana escala	1 No se desarrolla	5 Participación comunitaria en campañas de reforestación y recuperación del paisaje.	7 Enfoque en revegetación, estabilización de suelos, control de erosión y conservación de especies.	10 Contiene mapas, listas de especies reforestadas, cronogramas y costos de intervención.	6,83
44	Propuesta de implantación de Mantenimiento centrado en la confiabilidad de los activos críticos de la central hidroeléctrica Ocaña	Repositorio universitario	8 Cuenca del sistema Paute	10 PCH de 13.2 MW	9 Describe turbinas tipo Francis, sistemas de automatización, generadores y transformadores.	1 No se menciona	6 Menciona el control de residuos peligrosos y el mantenimiento de canales sin afectación al ecosistema.	8 Contiene cronogramas de mantenimiento, fichas técnicas de equipos, etc.	7,00
45	Viabilidad Financiera de las Asociaciones Públicas y Privadas en Proyectos Hidroeléctricos. Caso de estudio: PH Paute – Cardenillo, 2020	Repositorio universitario	8 Proyecto Paute-Cardenillo	6 Gran escala	8 Uso de turbinas hidráulicas (Francis), no se	5 Generación de empleo, desarrollo regional, pero sin estudios específicos	1 No se presentan datos ambientales técnicos.	5 VAN, TIR, tasas de descuento, flujo de caja, costos proyectados	5,50

					detalla el equipamiento	de comunidades beneficiarias.			
46	Análisis del cumplimiento de la norma ambiental de la calidad del agua y suelo en embalses artificiales de las centrales hidroeléctricas de CELEC SUR	Repositorio universitario	8 Enfoque regional, sierra centro sur	6 Gran escala y enfocado a embalses	5 Se enfoca en hidroeléctricas, pero no analiza detalles técnicos de turbinas u operación de PCH	1 No se abordan impactos sociales ni participación comunitaria en el estudio	8 Resultados del monitoreo de calidad del agua y suelo en embalses, alineado con la normativa MAATE 097-A	7 Útil como referencia técnica para evaluación ambiental en PCH	5,83
47	Estudio de la calidad físico-química y biológica del agua del río Topo mediante el uso de macroinvertebrados bentónicos y parámetros físico-químicos como indicadores ambientales	Repositorio universitario	7 Centrado en la provincia del Tungurahua	1 No evalúa directamente un proyecto hidroeléctrico	1 No se aborda	1 No se aborda	10 Usa indicadores biológicos y físico-químicos, replicable para monitoreo ambiental	8 Contiene tablas detalladas de parámetros de calidad del agua, índices bióticos	4,66
48	Análisis De La Política Energética Y La Dinámica De Las Hidroeléctricas En El Ecuador: 2011-2017	Repositorio universitario	10 Nivel nacional	5 No entra en detalle de PCH	3 No entra en detalle de la tecnología utilizada	3 Pocos detalles sobre impactos sociales	3 Menciona los impactos, pero no medidas de mitigación	5 Presentan datos de políticas públicas, pero no existen tablas técnicas para factibilidad de PCH	4,83
49	Diseño de las obras hidráulicas de la alternativa técnica de la Central Hidroeléctrica Sardinas Grande, Provincia de Napo	Repositorio universitario	7 Ubicación precisa en Napo	8 PCH de 6,7 MW	10 Detallado diseño hidráulico	3 No se profundiza en el involucramiento comunitario.	10 Capítulo de evaluación de impacto ambiental	10 Análisis económico-financiero y comparativo entre alternativas	8,00
50	Metodología para la optimización del número de turbinas en centrales hidroeléctricas	Repositorio universitario	9 Tres casos: Baeza, Minas, Quijos	9 Grande, mediana y pequeña escala	6 Se enfoca en optimización de turbinas	1 No se aborda	1 No se aborda	8 Tablas técnicas bien detalladas	5,66
51	Implementación de un desarenador para la Central Hidroeléctrica San José de Minas	Repositorio universitario	7 Caso aplicado en Ecuador (San José de Minas, río Cubí)	8 PCH (~6 MW)	6 Se centra en la implementación de un desarenador	1 No hay análisis social estructurado.	1 No se desarrolla plan de disposición final de sedimentos ni caudal ecológico asociado.	8 Datos técnicos disponibles, presupuesto detallado.	5,16
52	Estudio de Prefactibilidad de una Central Hidroeléctrica en el Río Alambí en la Zona del Poblado Tandayapa	Repositorio universitario	7 Noroccidente de Pichincha, cantón Quito, parroquia Nanegalito	8 PCH de 3-5 MW	10 Esquema completo del hidro sistema	1 Sin desarrollo profundo de participación/componente social	5 Evaluación de Impacto Ambiental pero no desarrollo de Plan de Manejo Ambiental	8 Aporta tablas de parámetros	6,50

53	Estudio de Prefactibilidad de una Minicentral Hidroeléctrica en el río Alambí, en la zona de la “Hacienda Palmira”	Repositorio universitario	7 Estación hidrológica Alambi	7 Minicentral hasta 10 MW	10 Esquema completo del hidro sistema	5 Aspecto social en la evaluación ambiental, pero sin detalle de participación	8 Compara alternativas por impacto ambiental	9 Disponibilidad de detalles técnicos para una base hidrológica	7,66
54	Generación Eléctrica: Los nuevos retos de la generación hidroeléctrica, alternativas para su desarrollo en Ecuador	Repositorio universitario	9 Enfoque nacional	2 No aborda PCH sino mega proyectos	5 No entra en detalles del sistema	6 Se discuten conflictos derivados de la mala gestión	5 Señala debilidades en los estudios de impacto, falta de control sobre cumplimiento	2 No dispone de datos técnicos para replicar en diseño de PCH	4,83

Nota: * Estudios con mayor puntaje de evaluación