



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja.

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Loaiza Jaramillo, Pedro Fernando

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, M.Sc.

LOJA – ECUADOR

2015



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magíster.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja** realizado por **Loaiza Jaramillo Pedro Fernando**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, noviembre de 2015

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“ Yo **Loaiza Jaramillo Pedro Fernando** declaro ser autor del presente trabajo de titulación: **Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja**, siendo **Jorge Luis Jaramillo Pacheco** director (a) del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.

Autor: Loaiza Jaramillo Pedro Fernando

Cédula: **1104307051**

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, Yady, que ha sido el pilar fundamental en mi vida, que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, ayudándome a salir adelante en los momentos más difíciles. A mi Segunda madre, mi abuelita “Pepita”, que siempre ha sabido apoyarme, aconsejarme, y llenarme de conocimiento con sus historias de antaño y experiencias.

A mi familia, quienes me han brindado su apoyo incondicional y con quienes he compartido todos estos años llenos de amor.

A mis amigos y compañeros, que siempre han sabido apoyarme y que son fundamentales en el momento de alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

A mi madre Shadyra y a mi abuelita Josefina, que siempre han estado ahí cuando yo las he necesitado, que han sabido hacer el papel de madre y padre, que me han guiado y me han regalado cariño y amor incondicional durante todos estos años, que han sabido aguantar mis ocurrencias, bromas y travesuras. Que son mi ejemplo de superación y perseverancia, que me han enseñado el valor de las cosas, y a no rendirse jamás.

A mi familia, que han sabido llenar de amor y felicidad todos mis años de vida.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza, preparándome para un futuro competitivo.

A mi director y amigo, Jorge Luis Jaramillo, por guiarme en cada paso de este proyecto.

A mis amigos de la infancia, Andrés, Elvis, Henry, y Hugo, que han sabido apoyarme en las decisiones que he tomado, darme consejo en los momentos necesarios. Este logro va por ustedes.

A todos mis amigos, que han sabido estar conmigo en las buenas y las malas, la lista sería interminable si los listara uno a uno.

A mis compañeros, que supieron corregirme cuando estaba equivocado y que me ayudaron a crecer día a día como persona.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	4
1. UNA PRIMERA APROXIMACIÓN A LOS RETOS QUE ENFRENTA LA PROVISIÓN ACTUAL DE ENERGÍA	4
1.1. Introducción	5
1.2. Los retos que enfrenta la provisión actual de energía	5
1.2.1. Un abordaje desde la perspectiva medioambiental.	5
1.2.2. Un abordaje desde la perspectiva política	7
1.2.3. Un abordaje desde la perspectiva social	8
1.3. Algunas estrategias regionales para optimizar la provisión de energía	8
1.3.1. Una economía baja en emisiones de carbono.....	8
1.3.2. Transición hacia una economía baja en emisiones de carbono.....	10
1.3.3. Provisión de energía en las zonas rurales.....	11
CAPÍTULO 2.....	13
2. MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS BASADAS EN VÓRTICE GRAVITACIONAL, UNA SOLUCIÓN POTENCIAL PARA DOTAR DE ENERGÍA A LA ZONA RURAL DEL CANTÓN LOJA.....	13

2.1	Introducción	14
2.2	Sobre las microcentrales hidroeléctricas	14
2.2.1.	¿Qué es una microcentral hidroeléctrica?	14
2.2.2.	¿Cuáles son la ventajas de las microcentrales hidroeléctricas?	15
2.2.3.	Tipos de turbinas utilizadas en microcentrales hidroeléctricas	16
2.3	Microcentrales basadas en vórtices gravitacionales	21
2.3.1	Sobre los vórtices gravitacionales	21
2.3.2	Microcentrales basadas en vórtices garvitacionales.....	25
2.3.3	Una microcentral basada en vórtices gravitacionales aplicable a la zona rural del cantón Loja	25
CAPÍTULO 3.....		29
3. MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS BASADAS EN VÓRTICE GRAVITACIONAL, UNA SOLUCIÓN POTENCIAL PARA DOTAR DE ENERGÍA A LA ZONA RURAL DEL CANTÓN LOJA.....		29
3.1	Introducción	30
3.2	Ingeniería básica de la microcentral hidroeléctrica	30
3.2.1.	Sobre la captación	30
3.2.2.	Sobre el canal de ingreso.....	31
3.2.3.	Sobre el tanque de circulación	32
3.2.4.	Sobre la generación	34
3.3	Identificación de lugares de potencial interés para la implantación de microcentrales basadas en vórtice gravitacional.....	37
3.3.1.	Sobre el cantón Loja	37
3.3.2.	Sobre la implantación de microcentrales basadas en vórtice gravitacional en el cantón Loja	38
CONCLUSIONES.....		44
RECOMENDACIONES.....		45
BIBLIOGRAFÍA.....		46

ANEXOS.....	52
ANEXO A.....	53
PAPER FINAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL, UNA OPCIÓN PARA LA PROVISIÓN SUSTENTABLE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA ZONA RURAL DEL CANTÓN LOJA.....	53

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Un ejemplo de la estructura de la huella del carbono para la actividad de provisión de energía.
- Figura 1.2.** Emisiones de CO₂ per cápita y consumo de energía per cápita en América Latina y el Caribe.
- Figura 1.3.** Características generales de una economía baja en carbono.
- Figura 1.4.** Algunos tipos de fuentes renovables de energía aprovechables para la provisión en zonas rurales.
- Figura 2.1.** Esquema de instalación de una microcentral hidroeléctrica.
- Figura 2.2.** Clasificación de las turbinas empleadas en microcentrales hidroeléctricas.
- Figura 2.3.** Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina de tornillo
- Figura 2.4.** Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Gorlov
- Figura 2.5.** Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Francis
- Figura 2.6.** Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Kaplan
- Figura 2.7.** Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Peltón
- Figura 2.8.** Microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional
- Figura 2.9.** Ejemplo de la formación de un vórtice forzado
- Figura 2.10.** Ejemplos de vórtices libres.
- Figura 2.11.** Diagrama de velocidades en un vórtice cilíndrico.
- Figura 2.12.** Diagrama de velocidades en un vórtice cilíndrico.
- Figura 2.13.** Modelo teórico de un vórtice compuesto o de Rankine
- Figura 2.14.** Vista lateral del sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional.

Figura 2.15. GAM-FD acoplado a la protección mecánica

Figura 2.16. . GAM-FD instalado en el banco hidráulico

Figura 2.17. Perspectiva de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

Figura 3.1. Diagrama de bloques de los componentes de una microcentral

Figura 3.2. Infraestructura de captación de agua para su posterior utilización en microcentrales hidroeléctricas

Figura 3.3. Vista panorámica del tanque de circulación de una microcentral basada en vórtice gravitacional, incluyendo canal de ingreso y etapa de etapa de retorno del caudal

Figura 3.4. . Estructura general de un tanque de circulación para una microcentral basada en vórtice gravitacional

Figura 3.5. Vista panorámica de una turbina de cuatro alabes en operación

Figura 3.6. Vista panorámica de una turbina Zotlöterer en funcionamiento.

Figura 3.7. Grafica de operación en vacío, del generador construido

Figura 3.8. Vista panorámica del generador GAM-FD diseñado y construido en UTPL

Figura 3.9. División política del cantón Loja.

Figura 3.10. Recursos hídricos disponibles en el cantón Loja

Figura 3.11. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en el barrio Santa Cruz, parroquia Malacatos, aprovechando una derivación del río Malacatos

Figura 3.12. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en el barrio Gualiel Pamba, parroquia San Lucas, aprovechando una derivación del río San Lucas

Figura 3.13. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en la parroquia Malacatos, aprovechando una derivación del río Malacatos

LISTA DE TABLAS

Tabla. 3.1. Características geométricas del tanque de circulación.

Tabla. 3.2. Características de operación en vacío, del generador construido.

Tabla. 3.3. Generación esperada para los puntos de implantación.

RESUMEN

En la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan proveer de energía sustentable a las zonas rurales del cantón Loja, en este trabajo se aproxima algunas de las alternativas planteadas para descarbonizar el sector de provisión de energía en zonas rurales; se describe el principio de operación de una microcentral de generación hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional; y se explica el potencial de la generación eléctrica basada en vórtice gravitacional en la zona rural del cantón Loja.

Keywords: energía, provisión de energía, descarbonización del sector energético, energía renovable, microcentrales hidroeléctricas, microcentrales basadas en vórtice gravitacional

ABSTRACT

In the search for technological solutions to provide sustainable energy to rural areas of Canton Loja, in this project some of the alternatives proposed to decarbonize the energy sector in rural areas is approaching; The principle of operation of a micro hydro power plant based on gravitational vortex is described; and the potential for electric power generation based on gravitational vortex in the rural area of Canton Loja is explained.

Keywords: energy, provisión de energía, energy sector decarbonization, renewable energy, a micro hydro power plant, micro hydro power plant based on gravitational vortex

INTRODUCCIÓN

Se podría afirmar que con el crecimiento exponencial de la población, la demanda de energía se ha incrementado dramáticamente. Sin embargo, esta afirmación pierde sustento cuando se comprueba que a pesar de los esfuerzos realizados por distintos organismos públicos y privados, aún persisten factores que limitan el acceso equitativo de la población a fuentes modernas de energía, condenando a millones de personas a la pobreza energética

El acceso a energía eficiente y limpia en zonas rurales de los países en desarrollo, se constituye sin lugar a dudas en una de las condiciones indispensables para el desarrollo sustentable. En este contexto, la búsqueda de fuentes de energía apropiadas, va mucho más allá de la simple selección de la “mejor tecnología”.

La ampliación de la cobertura de las redes eléctricas hacia las zonas rurales suele verse limitada por aspectos geográficos y económicos. Esta situación ha fomentado el apareamiento de iniciativas que apuntan a soluciones desconectadas de la red, en las que la generación de energía, limpia y renovable, se realiza in situ.

Entre las diferentes tecnologías de generación de verde, por su aplicabilidad en las condiciones hidrológicas del cantón Loja, se destacan las microcentrales hidroeléctricas, que por simplicidad y bajo costo son ideales para potenciar iluminación, comunicación, salud, escuelas, y otras facilidades en comunidades alejadas.

En este documento, se describe el potencial de la generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, como una solución para la provisión sustentable de energía en la zona rural del cantón Loja, desde una perspectiva medioambiental, política y social; que facilite una transición sustentable hacia una economía baja en carbono.

CAPÍTULO I

1. UNA PRIMERA APROXIMACIÓN A LOS RETOS QUE ENFRENTA LA PROVISIÓN ACTUAL DE ENERGÍA

1.1. Introducción

Se podría afirmar que con el crecimiento exponencial de la población, la demanda de energía se ha incrementado dramáticamente. Sin embargo, esta afirmación pierde sustento cuando se comprueba que a pesar de los esfuerzos realizados por distintos organismos públicos y privados, aún persisten factores que limitan el acceso equitativo de la población a fuentes modernas de energía, condenando a millones de personas a la pobreza energética [1].

Los límites a la provisión de energía tienen más relación con costos medioambientales y sociopolíticos, antes que con el agotamiento de recursos o costos de producción [2], [3]. Los problemas de la provisión de energía se refieren al calentamiento global causado, en gran medida, por el uso continuo de combustibles fósiles; a la seguridad energética, como respuesta a los conflictos geopolíticos en las zonas con mayores reservas de combustibles fósiles; y, a los esfuerzos por limitar el consumo excesivo de recursos originado como consecuencia del crecimiento poblacional.

Con la intención de explorar nuevas opciones de provisión de energía, en este documento se explica, de manera preliminar, los retos que enfrenta la provisión actual de energía, desde una perspectiva medioambiental, política y social; y, se describe algunas iniciativas en América Latina para la transición hacia una economía baja en carbono.

1.2. Los retos que enfrenta la provisión actual de energía

1.2.1. Un abordaje desde la perspectiva medioambiental.

Para cuantificar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se emplea la **huella del carbono**, concepto ligado al Ecological Footprinting, introducido por Mathis Wackernagel en 1996 [4], que mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización o producto, relevantes para el cambio climático. La huella del carbono se construye para todo el ciclo de vida de un objeto o de un proceso, lo que conlleva a un procedimiento complejo, centrado en la determinación de las emisiones de CO₂, sin prestar atención a otros agentes, sobre todo por falta de metodologías y data confiables. De hecho muchos autores

hablan de la necesidad de cambiar el concepto de huella del carbono por el de **huella climática**, incluyendo en el análisis a todos los agentes capaces de provocar el efecto invernadero [5].

La huella del carbono de la provisión de energía está relacionada con las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles y las emisiones fugitivas a lo largo del ciclo de vida de un producto o de la cadena productiva (ver Figura 1.1)

En América Latina y el Caribe, la huella de carbono (y las emisiones per cápita) relacionada con la provisión de energía presenta dimensiones inferiores a la de la huella de países desarrollados, aunque mantiene un ritmo de crecimiento importante (ver Figura 1.2) [6].

Desde esta perspectiva, la región no debería permanecer ajena a iniciativas que promuevan una economía baja en carbono y la **descarbonización** del sector energético. Estas iniciativas buscan internalizar el costo de las emisiones (mercados de derechos de emisión, impuestos a las emisiones); establecer regulaciones técnicas obligatorias o voluntarias; e implementar mecanismos de fomento (subsidio) para bienes, servicios y tecnologías con baja intensidad de emisiones.



Figura 1.1. Un ejemplo de la estructura de la huella del carbono para la actividad de provisión de energía.

Fuente: <http://clean-energy-now.com/what-is-carbon-footprint/>

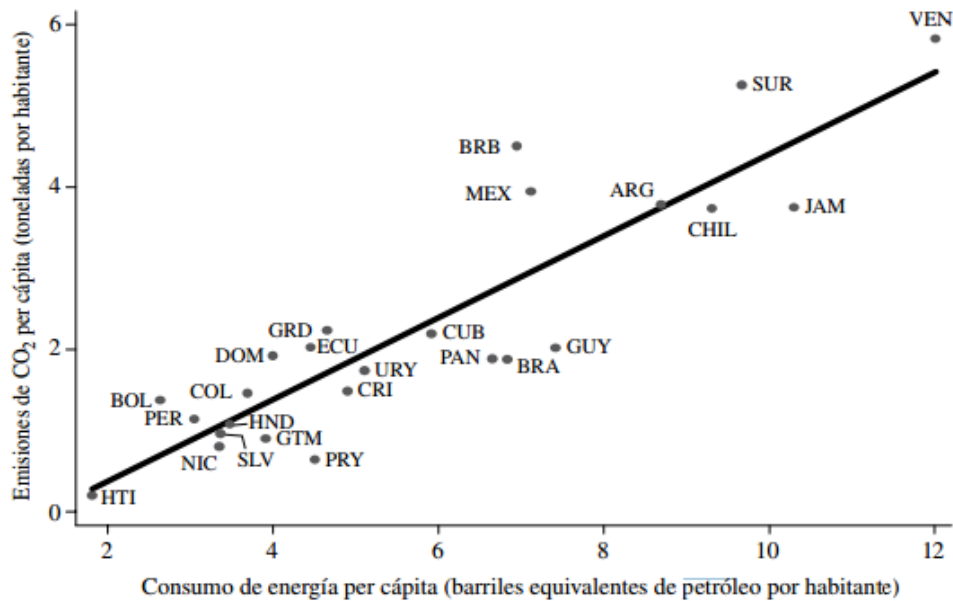


Figura 1.2. Emisiones de CO₂ per cápita y consumo de energía per cápita en América Latina y el Caribe.

Fuente: http://www.preventionweb.net/files/13696_RVE100Galindoetal1.pdf

1.2.2. Un abordaje desde la perspectiva política

El petróleo es un recurso natural no renovable que se convertido en la principal fuente de energía en los momentos actuales. El petróleo representa el 30% de la matriz energética de América Latina, y cada año se registra un aumento de más del 2% en su aporte a la matriz energética mundial [7].

En los últimos años, el crecimiento de la demanda, la reducción de los inventarios de reservas petroleras, y la devaluación del dólar (los EEUU son los principales importadores de petróleo en el mundo) han conllevado a la volatilidad y al incremento del precio del barril de petróleo, que no solo afectan a la gestión de la economía nacional de todos los países del orbe [7], sino que también han desatado una ola de exploración y explotación petrolera que desconoce o invisibiliza el daño medioambiental y las consecuencias sociales. Según Joseph E. Stiglitz, ganador de la Medalla John Bates Clark (1979) y del Premio Nobel de Economía (2001), **“numerosos personajes del mundo y de las finanzas se dejaron seducir por el deseo de enriquecerse y decidieron rebajar sus normas éticas en su carrera por obtener más”** [8].

En este contexto, se requiere promover nuevas iniciativas de provisión de energía que no solo reduzcan el impacto ambiental y el costo social de la generación, sino que también consoliden el concepto de soberanía energética, reduciendo la dependencia nacional de acciones extranjeras.

1.2.3. Un abordaje desde la perspectiva social

Son varias las implicaciones sociales en la provisión de energía, empezando por el tipo de fuentes energéticas que utilizan los pobres en comparación con los no pobres, el grado de equipamiento de los hogares, las problemáticas diferenciadas en áreas rurales y urbanas, la diferenciación de la relación ingresos-gastos en energía entre los diversos estratos sociales; y, la relación entre acceso a la energía e índice de desarrollo humano [1]. En este contexto, se requiere enfrentar los problemas de acceso a la energía y pobreza desde una óptica conjunta, y no por separado como hasta ahora.

En las zonas urbanas, el acceso a energía segura y suficiente se relaciona con el nivel de ingresos, con los cuadros tarifarios y regulatorios, con las facilidades de acceso a alternativas más económicas, y con el nivel de marginación social. Por su parte, las áreas rurales se caracterizan por un acceso limitado a fuentes modernas de energía, pero con un amplio potencial para atender la potenciación de servicios básicos mediante el aprovechamiento de fuentes renovables. Esta última dimensión define con claridad una de las líneas potenciales de investigación y desarrollo en energía: la provisión de energía de fuentes renovables para las zonas rurales.

1.3. Algunas estrategias regionales para optimizar la provisión de energía

1.3.1. Una economía baja en emisiones de carbono

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNCCC), en vigor desde el 21 de marzo de 1994, reconoce el derecho al desarrollo y a la mejora en la calidad de vida de los habitantes de los países en desarrollo, apunta hacia una **economía baja en emisiones de carbono** y al control de las emisiones de GEI, y, establece responsabilidades comunes y diferenciadas a los países signatarios [9].

Una economía baja en carbono, se basa en la utilización de recursos energéticos bajos en carbono que minimizan las emisiones de GEI a la biosfera, especialmente la de dióxido de carbono [2], [10].

La Figura 1.3 muestra las características básicas de una economía baja en carbono. El concepto de bajas emisiones en carbono se refiere a aplicaciones que emite un mínimo de emisiones de gas de invernadero hacia la biósfera, esta contaminación produce la escasez ecológica, es decir, escasez de materias primas, de energía, de tierras y de espacio ambiental para mantener el ritmo de la economía actual [11]. Para disminuir el impacto ambiental y evitar la escasez ecológica se debe realizar un uso eficiente de los recursos, que es una economía verde donde el crecimiento económico se desvincule del daño al medio ambiente [12], reduciendo el riesgo ambiental y mejorando nuestra calidad de vida.

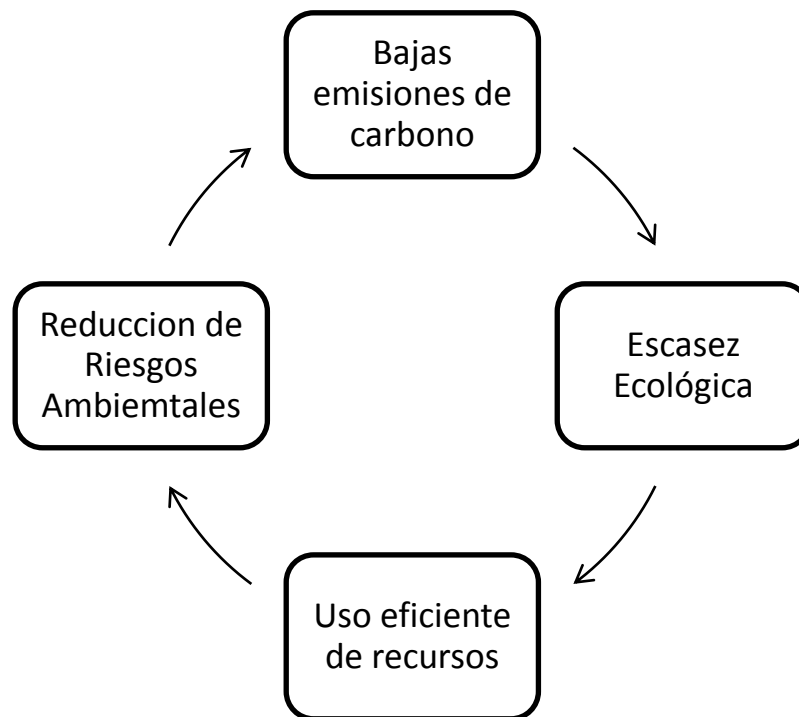


Figura 1.3. Características generales de una economía baja en carbono.

Fuente: Diseño de los autores

1.3.2. Transición hacia una economía baja en emisiones de carbono

Para viabilizar la transición hacia una economía baja en carbono, se requiere de un conjunto de políticas (locales, nacionales, regionales e internacionales) que incentiven el desarrollo y transferencia de tecnología, y el financiamiento e inversión en estos temas.

Entre las experiencias comunes, se recalca el aumento paulatino del precio del carbón u otros combustibles fósiles; los sistemas **cap and trade** que apuntan a reducir cierto tipo de emisión a través de incentivos; la adopción de medidas para derribar barreras regulatorias e institucionales; la adopción de políticas y regulaciones agresivas a corto y largo plazo para acelerar la transición hacia un sistema de energía eficiente y renovable, eliminando los subsidios a tecnologías que usan combustibles fósiles; entre otras. En América Latina se han adoptado varias de estos esquemas y se han introducido también acciones de **cosecha propia**.

En Argentina, el Programa de Uso Racional de la Energía y Eficiencia Energética incentiva el uso racional de electricidad y gas natural, empleando incentivos económicos para reducir el consumo. Se prohibió la comercialización de lámparas incandescentes en el país. Y, se estableció el Programa para Incrementar la Eficiencia Energética y Productiva en Pequeñas y Medianas Empresas, el Programa de Calidad de Electrodomésticos; y el Programa de Ahorro Energético y Eficiencia Energética en Edificios Públicos [9].

En Brasil, para el año 2020 se espera una reducción de 12 a 15 MTON en las emisiones de CO₂, como resultado del Programa de Eficiencia Energética. También se espera reducciones adicionales de 48 a 60 MTON por el incremento en el consumo de biocombustibles, de 79 a 99 MTON por la producción de energía eléctrica a partir de centrales hidroeléctricas, y de 26 a 33 MTON por el uso de fuentes alternativas de energía [9].

En Chile, el programa Nationally Appropriate Mitigation Action (NAMA) apunta de desarrollar energía renovable para el autoconsumo. El programa apunta a una reducción del 20% en emisiones, al 2020. Las acciones del programa incluyen la eficiencia energética, las energías renovables, y el uso del suelo (cambio en el uso del suelo y silvicultura) [9].

En Colombia se destaca el estímulo a la producción de biocombustibles (etanol y biodiesel), y la implementación de mecanismos para un desarrollo limpio (MDL) en el sector energético [9].

En Costa Rica, los esfuerzos de transformación económica de largo plazo, buscan alcanzar la neutralidad en términos de emisiones de carbono en sectores críticos como transporte, energía, gestión forestal, y manejo de residuos [9].

En México, aplica un programa para la reducción de emisiones de GEI hasta un 30% comparada con un escenario “business as usual”, un sistema que se opone a los cambios dentro y fuera de la organización [9], [13].

En Perú, se impulsan iniciativas como el programa para la reducción a cero de la deforestación neta del bosque natural primario; la modificación de la red eléctrica actual de forma tal que la energía renovable (no convencional, hidroelectricidad y biocombustibles) represente al menos el 33% del total de la energía utilizada en 2020; y, el diseño e implementación de medidas que permitan la reducción de emisiones originadas en el manejo inapropiado de los residuos sólidos [9].

En el caso de nuestro país, los organismos públicos impulsan diferentes acciones en eficiencia energética y energías renovables, dentro del marco de una política pública que apunte a la transformación de la matriz energética y productiva.

1.3.3. Provisión de energía en las zonas rurales

La provisión de energía en zonas rurales, debe orientarse a utilizar tecnología moderna, eficiente y limpia, que permita garantizar un desarrollo sustentable [14].

El aprovechamiento de energía de fuentes renovables, se convierte en una opción diferente a la utilización de combustibles fósiles y al empleo primitivo de biomasa, ante las limitaciones de la electrificación centralizada. El inventario de estas fuentes renovables incluye a la energía solar, la eólica la biomasa moderna, la geotermal, y la hídrica (ver Figura 1.4).

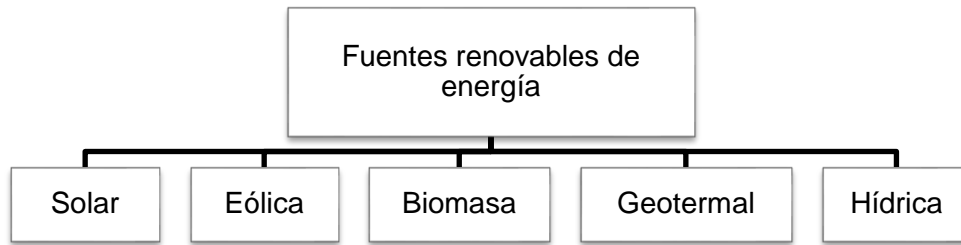


Figura 1.4. Algunos tipos de fuentes renovables de energía aprovechables para la provisión en zonas rurales.

Fuente: Diseño de los autores

En zonas rurales, de difícil acceso o aisladas energéticamente, se puede utilizar sistemas solares domésticos, microcentrales hidroeléctricas o pequeñas turbinas eólicas para suplir de electricidad a las actividades agrícolas, de salud, educación, comunicaciones y acceso a agua potable, entre otras [15].

La energía solar se puede utilizar de 2 formas: como solar térmica y fotovoltaica. La energía solar térmica se captura en colectores, mientras que la fotovoltaica se atrapa en módulos o paneles solares. La efectividad actual de los sistemas térmico solares alcanza el 30%, mientras que los sistema fotovoltaicos llegan a un 15% [15].

La energía eólica se captura en turbinas eólicas, capaces de transformarla en energía mecánica o eléctrica [16]. La abundancia de agua en las zonas rurales podría facilitar la captura de energía hídrica para transformarla en mecánico o eléctrica [17].

CAPÍTULO 2

2. MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS BASADAS EN VÓRTICE GRAVITACIONAL, UNA SOLUCIÓN POTENCIAL PARA DOTAR DE ENERGÍA A LA ZONA RURAL DEL CANTÓN LOJA

2.1 Introducción

El acceso a energía eficiente y limpia en zonas rurales de los países en desarrollo, se constituye sin lugar a dudas en una de las condiciones indispensables para el desarrollo sustentable. En este contexto, la búsqueda de fuentes de energía apropiadas, va mucho más allá de la simple selección de la “mejor tecnología” [14].

La ampliación de la cobertura de las redes eléctricas hacia las zonas rurales suele verse limitada por aspectos geográficos y económicos. Esta situación ha fomentado el apareamiento de iniciativas que apuntan a soluciones desconectadas de la red, en las que la generación de energía, limpia y renovable, se realiza in situ.

Entre las diferentes tecnologías de generación de verde, por su aplicabilidad en las condiciones hidrológicas del cantón Loja, se destacan las microcentrales hidroeléctricas, que por simplicidad y bajo costo son ideales para potenciar iluminación, comunicación, salud, escuelas, y otras facilidades en comunidades alejadas [22].

En este documento, se describe las diversas opciones alrededor de microcentrales hidroeléctricas, desde la perspectiva de su potencial aplicación en las condiciones de la zona rural del cantón Loja.

2.2 Sobre las microcentrales hidroeléctricas

2.2.1. ¿Qué es una microcentral hidroeléctrica?

Por principio, la generación hidroeléctrica convierte energía potencial de un flujo de agua presurizado en energía eléctrica. La presurización del agua se logra en un sistema hidráulico, ante el efecto de una gradiente de nivel [17].

Se conoce como microcentrales hidroeléctricas a sistemas de generación potenciados por energía hidráulica, cuya potencia de salida es menor a 100 KW. Por lo general, estas centrales se instalan en pequeñas comunidades, en zonas remotas. La mayoría de microcentrales

hidroeléctricas están instaladas en regiones montañosas de países en desarrollo, incluyendo los países andinos [23].

El impacto ambiental de una microcentral es mínimo, ya que no depende de presas para almacenar y direccionar agua (ver Figura 2.1) [24]. Además, usando diseños adecuados y contratando mano de obra local, las microcentrales pueden ser de mayor costo - efectividad que los proyectos hidroeléctricos a gran escala.

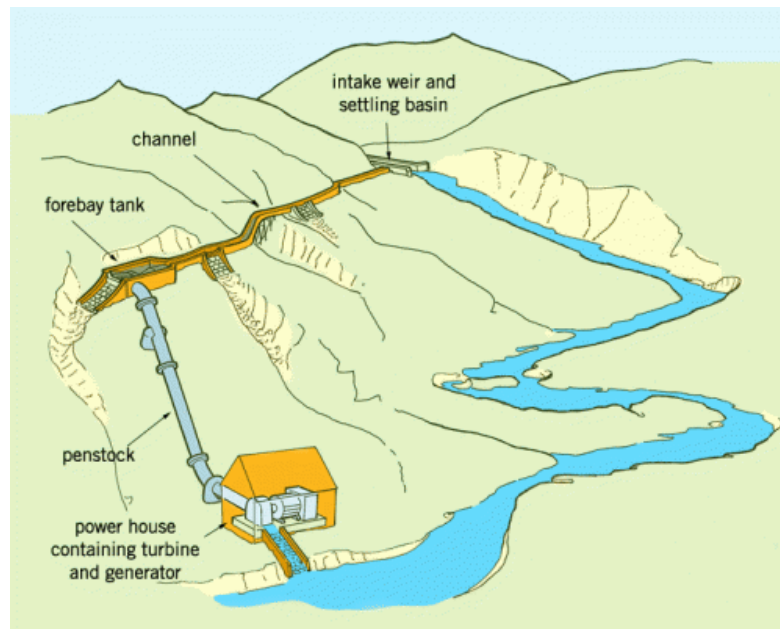


Figura 2.1. Esquema de instalación de una microcentral hidroeléctrica.

Fuente: <http://practicalaction.org/micro-hydro-power>

2.2.2. ¿Cuáles son la ventajas de las microcentrales hidroeléctricas?

Las microcentrales hidroeléctricas presentan ventajas operativas, económicas y medioambientales.

Operativamente, las microcentrales pueden generar energía eléctrica a partir de un pequeño flujo de agua, durante todo el día. En función de su inclusión o no en la red eléctrica de distribución, y, de la forma de almacenamiento de energía, los microsistemas hidroeléctricos

corresponden a 4 configuraciones: conectados a la red sin baterías, conectados a la red con baterías, desconectados de la red sin baterías, y, desconectados de la red con baterías [17].

En términos económicos, el diseño, construcción, operación y mantenimiento de microcentrales demandan recursos perfectamente asumibles por la comunidad, o por un modelo de emprendimiento social, puesto que las microcentrales pueden producir energía fuera de la red, o inyectarla para uso en otras comunidades.

Desde la perspectiva medioambiental, las microcentrales no son sistemas invasivos, por lo que no afectan a la vida salvaje.

2.2.3. Tipos de turbinas utilizadas en microcentrales hidroeléctricas

El tipo de turbina que se puede usar en microcentrales, depende del nivel de caída del agua, entre otros, del caudal de agua disponible, y, de la disponibilidad y facilidades de transporte de equipos al sitio de implantación [25].

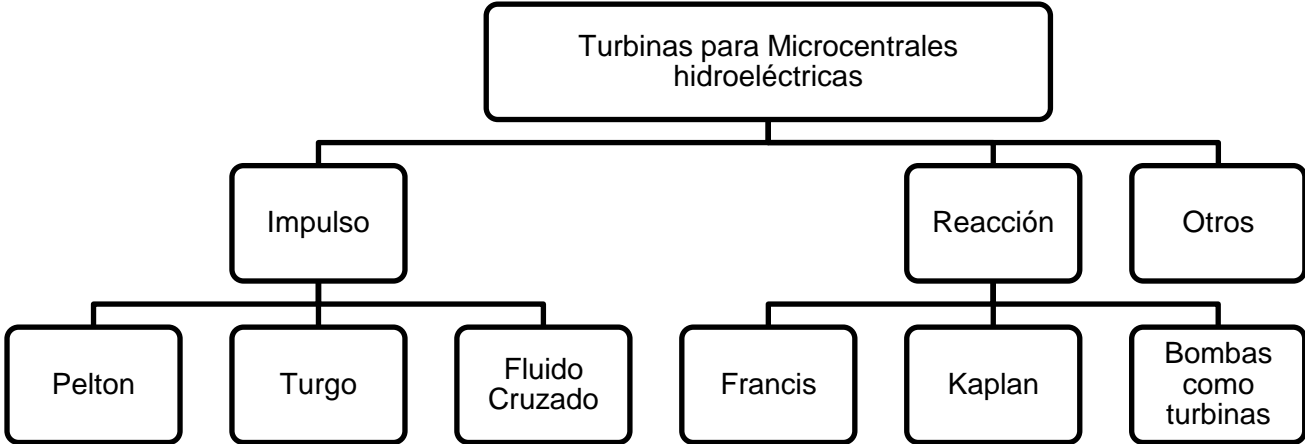


Figura 2.2. Clasificación de las turbinas empleadas en microcentrales hidroeléctricas.

Fuente: Diseño de los autores

Las turbinas de tornillo (ver Figura 2.3) pueden ser utilizadas para generar energía las 24 horas del día, durante todo el año. Su eficiencia alcanza un 85%. Los hidrotornillos se pueden instalar en saltos menores de 10 m, por ejemplo en ríos y arroyos de caudal reducido, en el azud de un río o en antiguos molinos, cualquier lugar con un salto de agua.

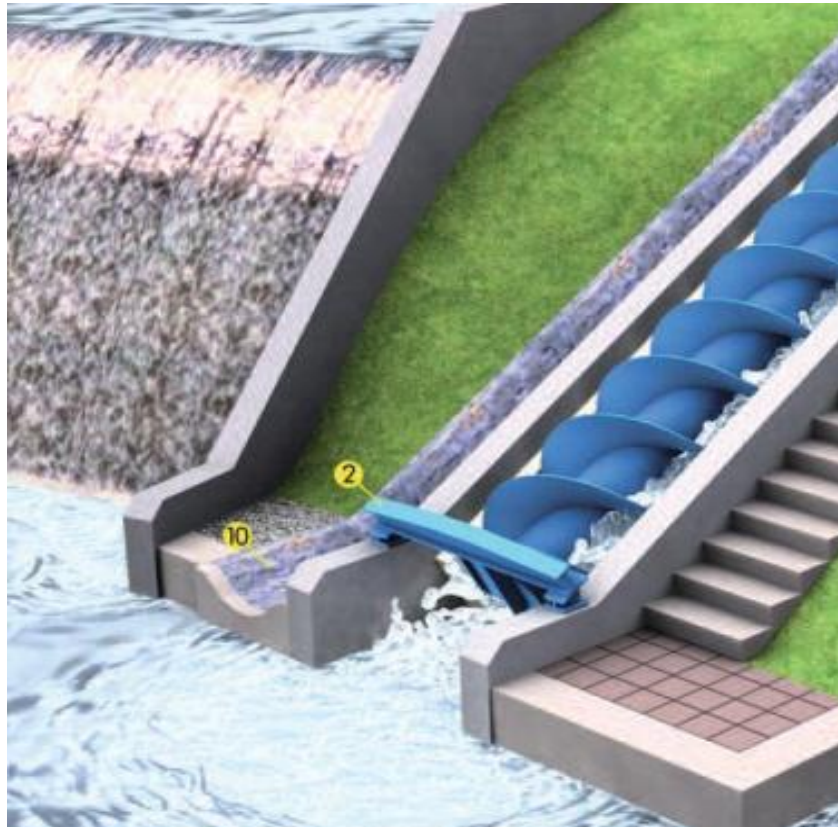


Figura 2.3. Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina de tornillo

Fuente: <http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/3259/2437>

La turbina Gorlov o helicoidal, se utiliza para generar con flujo libre o limitado, con o sin represa (ver Figura 2.4). La turbina Gorlov alcanza una eficiencia de 35% [26]. Se la puede utilizar en cauces de ríos, cerca de poblaciones rivereñas, y es inofensiva frente al paso de peces.



Figura 2.4. Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Gorlov

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gorlov_Helical_Turbines_in_Korea_Installation_Close_View.png

Las turbinas Francis poseen un corredor con cubos fijos (paletas), por lo general nueve o más. El agua se introduce justo por encima del corredor y alrededor de él, y, luego cae a través del mismo, haciéndolo girar (ver Figura 2.5), presentan una eficiencia del 90%. Para la instalación de estas turbinas en una central es necesaria la construcción de un embalse, seguidos de un salto de agua de por lo menos 20 m.



Figura 2.5. Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Francis

Fuente: <http://www.alamy.com/stock-photo-engineer-testing-the-operation-of-the-vanes-actuator-on-a-francis-20456910.html>

Las turbinas Kaplan son uno de los tipos más eficientes de turbinas de agua de reacción de flujo axial, con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice del motor de un barco (ver Figura 2.6). Su eficiencia es del 90%. Para la instalación de este tipo de turbinas se requiere de un depósito de agua o embalse, y de una caída de agua que, dependiendo del tamaño de la turbina, suele ser de entre 10 y 100 m.



Figura 2.6. Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Kaplan

Fuente: <http://www.turbinenbau-sekten.it/en/kaplan-turbine-2.html>

Las turbinas Pelton constan de una rueda dotada de cucharas en su periferia, que convierten en electricidad la energía de un chorro de agua que incide sobre las mismas (ver Figura 2.7). Su eficiencia es del 85%. Para la instalación de este tipo de turbinas es necesario un embalse y una caída de agua, cuya altura depende del número de inyectoros: 500 m para 4 inyectoros, y, 2000 m para un solo inyector.



Figura 2.7. Microcentral hidroeléctrica equipada con una turbina Peltón

Fuente: <http://www.ecopolisla.com/es/hydro-power/products/turbines/detail-pelton-turbine-hhp---h-50/>

En las microcentrales basadas en vórtice gravitacional, una parte del flujo de agua es desviado hacia un recipiente redondo, con una salida en el centro del fondo, que crea un vórtice (ver Figura 2.8). Un rotor simple es movido entonces por la energía cinética. La eficiencia de estas microcentrales varía entre 60 y 80%. Este tipo de centrales no requieren de grandes caudales ni de caídas de agua, por lo que se puede implementar en riachuelos, quebradas, o desviando parte del caudal de un río.



Figura 2.8. Microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

Fuente:

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gravitationswasserwirbelkraftwerk_mit_Zotl%C3%B6terer_Turbine_in_Obergrafendorf_\(AUSTRIA\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gravitationswasserwirbelkraftwerk_mit_Zotl%C3%B6terer_Turbine_in_Obergrafendorf_(AUSTRIA).jpg)

2.3 Microcentrales basadas en vórtices gravitacionales

2.3.1 Sobre los vórtices gravitacionales

En dinámica de fluidos, se define a un vórtice como el movimiento de un fluido a lo largo de un camino encorvado, caracterizado por el patrón de flujo curvo. Cuando el fluido fluye entre las líneas de flujo encorvadas, la fuerza centrífuga es aplicada, y es contra-balanceada por la fuerza de presión que actúa sobre la dirección radial [32].

En una primera clasificación, los vórtices son forzados o libres. Un vórtice forzado se define como aquel en el que un torque externo es requerido para rotar el fluido. En este tipo de vórtice, las partículas del fluido rotan con una velocidad angular constante. El ejemplo más común de vórtice forzado, es un cilindro vertical que contiene un líquido rotando sobre su eje central, con cierta velocidad angular (ver Figura 2.9).

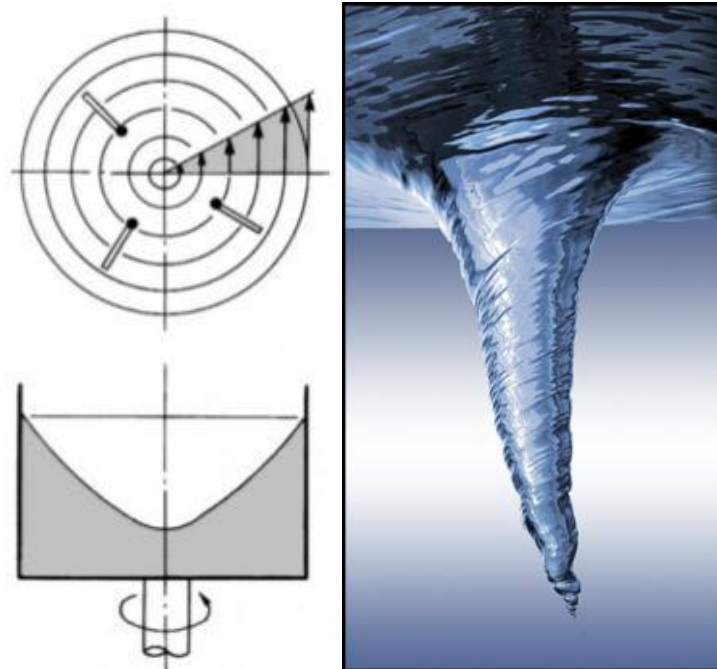


Figura 2.9. Ejemplo de la formación de un vórtice forzado

Fuente: <https://books.google.com.ec/books?id=kleYeyZ8U0wC&lpg=PA216&ots>

<http://www.slideshare.net/garapatiavinash/4fundamentals-of-flow>

Un vórtice libre es aquel en el que el fluido rota sin necesidad de una fuerza externa. El movimiento se puede deber a una rotación previamente impartida a las partículas del fluido, o, a alguna acción interna. Algunos ejemplos de vórtices libres son el flujo de un líquido alrededor de un quiebre encorvado, el remolino en un río, y el flujo de un líquido a través del fondo de un contenedor (ver Figura 2.10)

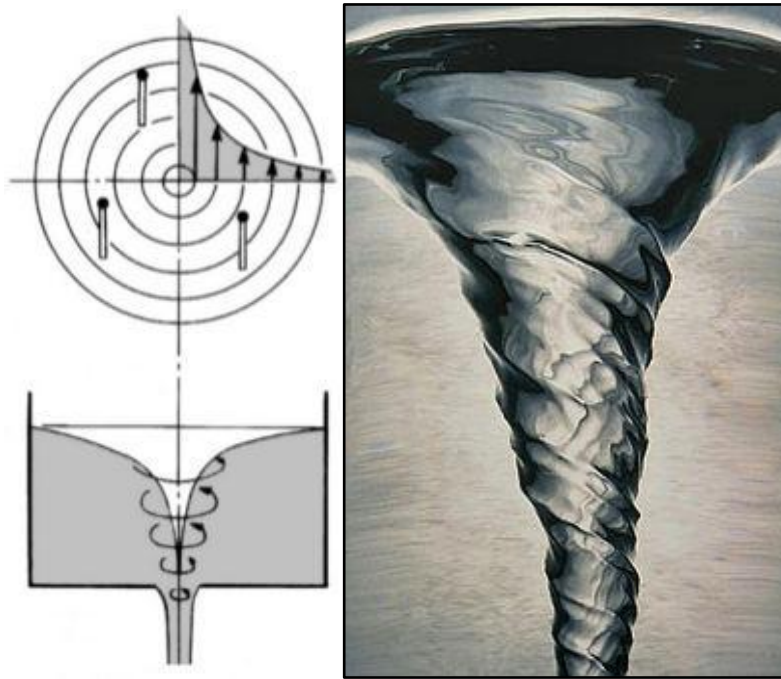


Figura 2.10. Ejemplos de vórtices libres.

Fuente: <https://books.google.com.ec/books?id=kIeYeyZ8U0wC&lpg=PA216&ots>
<http://www.lorinroche.com/yoga/yoga/chakras.html>

En otra clasificación, los vórtices son cilíndricos o espirales. En un vórtice cilíndrico el fluido rota en círculos concéntricos (ver Figura 2.11), mientras que en un vórtice espiral el fluido se mueve en espiral hacia adentro o hacia afuera (ver Figura 2.12). El movimiento de los vórtices espirales se obtiene combinando un vórtice cilíndrico con un movimiento radial.

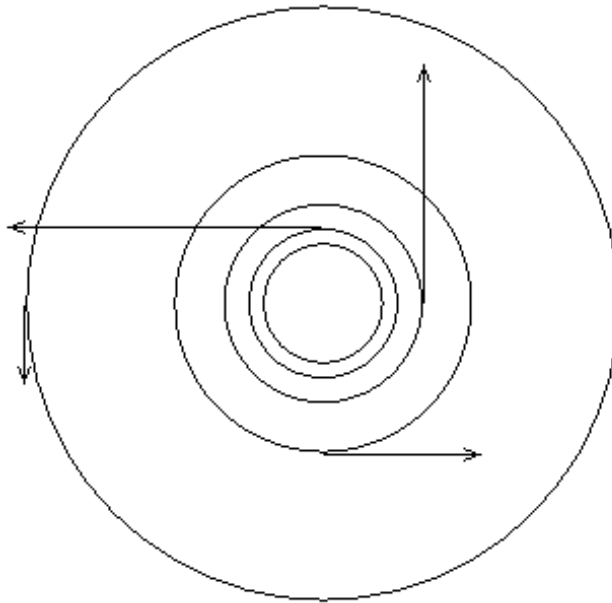


Figura 2.11. Diagrama de velocidades en un vórtice cilíndrico.

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex#/media/File:Vortex_in_draining_bottle_of_water.jpg

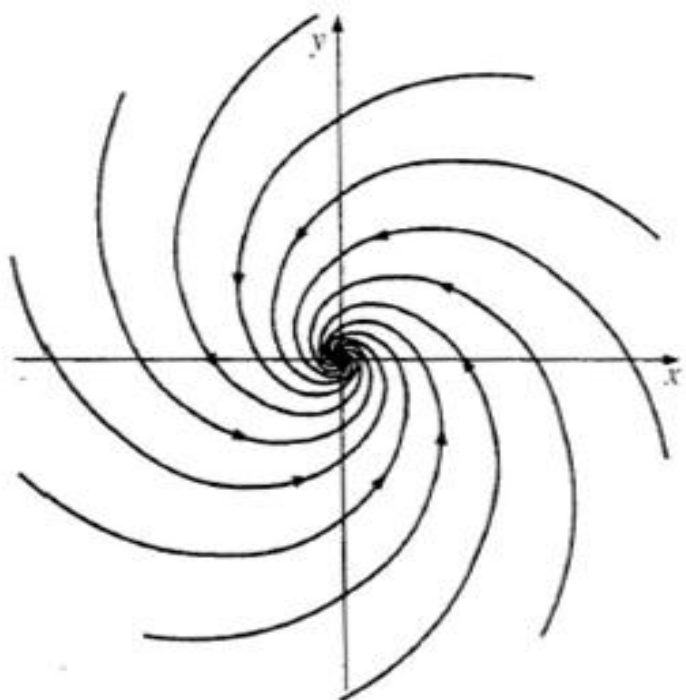


Figura 2.12. Diagrama de velocidades en un vórtice cilíndrico.

Fuente: <http://galileo.phys.virginia.edu/classes/311/notes/fluids1/fluids11/node8.html>

2.3.2 Microcentrales basadas en vórtices gravitacionales

El vórtice gravitacional hidráulico presenta las características de un compuesto o vórtice de Rankine, en el que el flujo próximo al núcleo se comporta como un sólido rígido, mientras el resto del flujo se comporta como un vórtice libre, generado por el flujo tangencial de la garganta del inductor de vórtice en contacto con la cámara cilíndrica estacionaria de vórtice (ver Figura 2.13) [39], [40], [41].

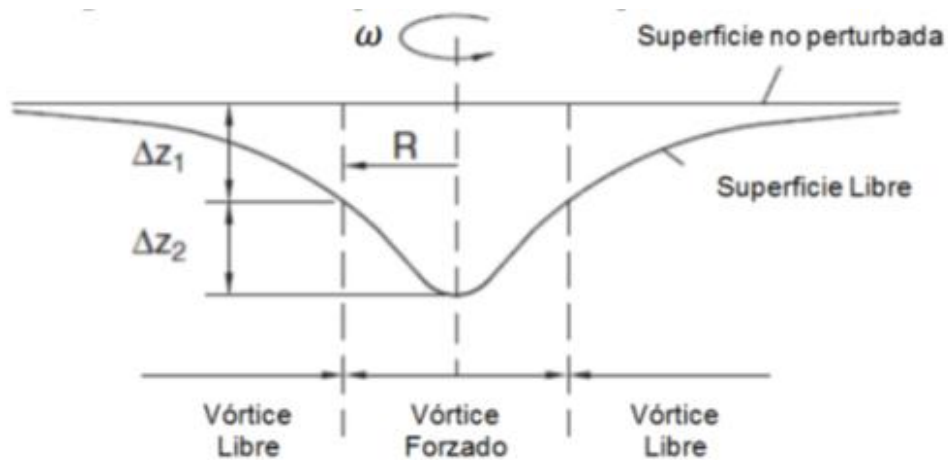


Figura 2.13. Modelo teórico de un vórtice compuesto o de Rankine

Fuente: [https://www.u-](https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf)

[cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf)

2.3.3 Una microcentral basada en vórtices gravitacionales aplicable a la zona rural del cantón Loja

En la Universidad Técnica Particular de Loja se ha desarrollado una serie de iniciativas alrededor de la hidrogenación basada en vórtice gravitacional.

Como parte del trabajo de titulación “Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional” [42], J.C. Peña describió el marco conceptual y

matemático para el diseño y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional conformado por un tanque, paletas, y el subsistema de generación eléctrica. El sistema se implementó y probó en el banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL (ver Figura 2.14).



Figura 2.14. Vista lateral del sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional.

Fuente: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7769/1/FINAL.pdf> >[Consulta: 26 julio 2015

Los resultados obtenidos en el subsistema de generación eléctrica fueron optimizados el trabajo de titulación “Diseño, construcción e implementación de un bloque de generación eléctrica y un módulo de monitoreo para un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional”, desarrollado por J. Ortega y G. Romero [43]. En este trabajo, se diseñó y construyó un generador eléctrico tipo asíncrono monofásico de fase dividida (GAM-FD), capaz de generar voltajes senoidales con errores de no más de 0.01% respecto a la senoide perfecta, demostrando la capacidad de construcción de tales máquinas en la provincia de Loja (ver Figura 2.15 y 2.16)

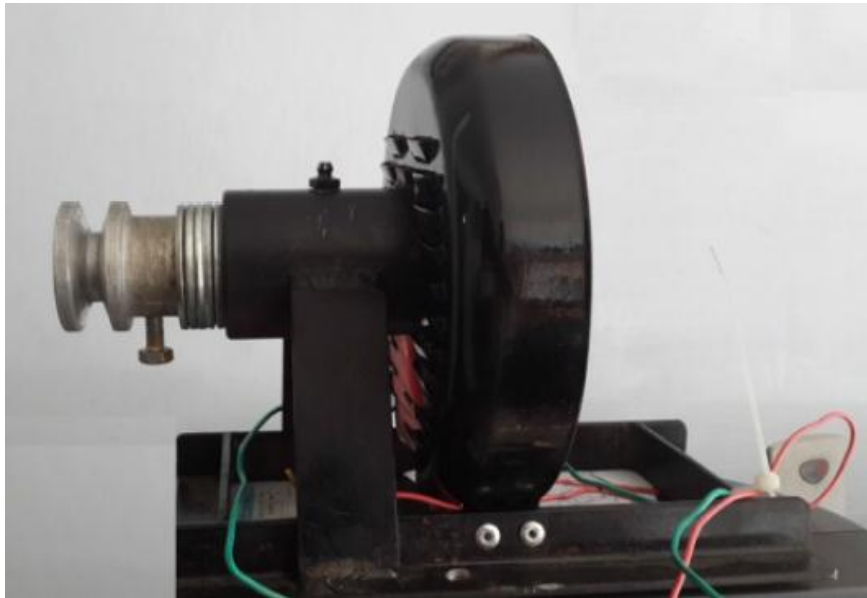


Figura 2.15. GAM-FD acoplado a la protección mecánica

Fuente: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/9060>



Figura 2.16. . GAM-FD instalado en el banco hidráulico

Fuente: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/9060>

El diseño del tanque de circulación fue mejorado como resultado del trabajo de titulación “Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional” de H. Rojas [44]. La Figura 2.17 muestra una vista panorámica de una central implementada en la zona de Loja.



Figura 2.17. Perspectiva de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

Fuente:

<http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10695/1/ROJAS%20ASUERO%20HENRRY%20VICENTE.pdf>

CAPÍTULO 3

3. MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS BASADAS EN VÓRTICE GRAVITACIONAL, UNA SOLUCIÓN POTENCIAL PARA DOTAR DE ENERGÍA A LA ZONA RURAL DEL CANTÓN LOJA

3.1 Introducción

La energía contenida en el flujo de agua puede ser empleada para girar turbinas y generadores que producen electricidad, sin contaminar el aire, la tierra o la misma agua [45].

La generación de electricidad en zonas de difícil acceso, pero con presencia de recursos hídricos, puede ser posible a través de microcentrales hidroeléctricas, entre las que se destaca a las basadas en vórtice gravitacional por cuanto no exigen grandes caudales, o grandes desniveles en el terreno.

En este documento, se describe los resultados obtenidos en la etapa de ingeniería básica de una microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, adecuada para la realidad de la zona rural de la provincia de Loja.

3.2 Ingeniería básica de la microcentral hidroeléctrica

En términos generales, el diseño de una microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, incluye al menos 4 componentes: captación, canal de ingreso, tanque de circulación, y, generación (ver Figura 3.1).

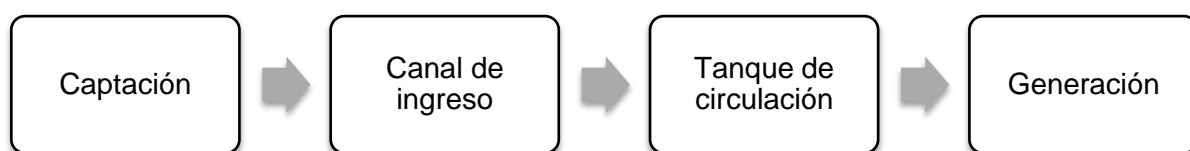


Figura 3.1. Diagrama de bloques de los componentes de una microcentral

Fuente: Diseño de los autores

3.2.1. Sobre la captación

La captación de agua para una microcentral hidroeléctrica no solo prevé de agua para la generación, sino que controla el caudal y el nivel de sedimentos en suspensión para evitar daños en las turbinas.

La Figura 3.2 muestra una vista panorámica de la infraestructura de captación típica para una microcentral. El dique fuerza la entrada del agua al canal, mientras que estructuras de admisión y regulación controlan el caudal admitido. Rejas especiales evitan la entrada de sólidos de gran tamaño al canal. Y, los sedimentadores favorecen la precipitación de los sedimentos [46].



Figura 3.2. Infraestructura de captación de agua para su posterior utilización en microcentrales hidroeléctricas

Fuente: http://www.inapiprojecta.cl/605/articles-1659_recurso_1.pdf

3.2.2. Sobre el canal de ingreso

El agua debe ingresar al tanque de circulación en forma tangencial, controlada, y sin turbulencias mayores, a fin de facilitar la correcta formación del vórtice de agua. A este objetivo aporta el correcto diseño del canal de ingreso. La Figura 3.3 muestra una vista panorámica de un tanque de circulación, del canal de ingreso, y de la etapa de retorno del caudal al cauce original [44].

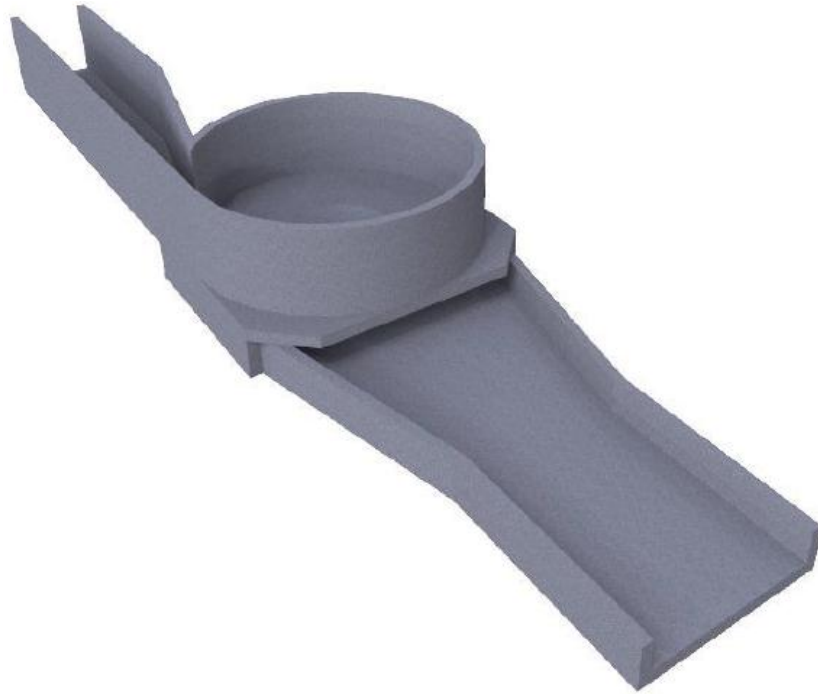


Figura 3.3. Vista panorámica del tanque de circulación de una microcentral basada en vórtice gravitacional, incluyendo canal de ingreso y etapa de etapa de retorno del caudal

Fuente:

<http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10695/1/ROJAS%20ASUERO%20HENRRY%20VICENTE.pdf>

3.2.3. Sobre el tanque de circulación

En el tanque de circulación se induce el vórtice de Rankine. La Figura 3.4 muestra un esquema de la estructura general de un tanque de circulación.

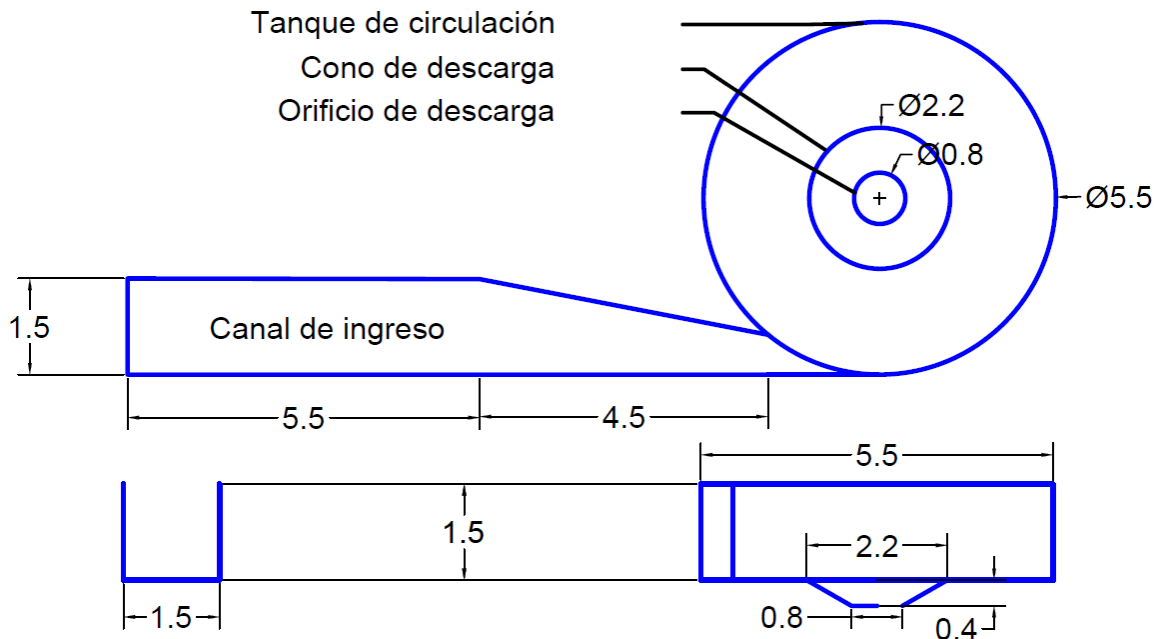


Figura 3.4. . Estructura general de un tanque de circulación para una microcentral basada en vórtice gravitacional

Fuente:

<http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10695/1/ROJAS%20ASUERO%20HENRRY%20VICENTE.pdf>

La existencia del cono de descarga facilita la descarga del agua y evita la recirculación en el flujo causada por la presencia de la denominada capa de Ekman. En [44] se recomienda que el diámetro del orificio de descarga sea el 14% del diámetro del tanque de circulación.

En la Tabla 3.1 se listan las características geométricas propuestas en [44] para el tanque de circulación.

Tabla. 3.1. Características geométricas del tanque de circulación.

Parámetro	Valor, m
Diámetro del tanque (D)	5.50
Diámetro del orificio de descarga (d)	0.80
Altura del tanque (H)	1.50
Base de la entrada al tanque de circulación (be)	0.50
Diámetro mayor de cono de descarga (dv)	2.20
Altura de cono (Hc)	0.40

Fuente: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10695/1/ROJAS%20ASUERO%20HENRRY%20VICENTE.pdf>

Elaborado: 26 julio 2015

3.2.4. Sobre la generación

Por lo general, en microcentrales basadas en vórtice gravitacional se utilizan dos tipos de turbinas: de cuatro alabes y de Zotlöterer [44].

Las turbinas de cuatro alabes cóncavos separados 90° (ver Figura 3.5) poseen una gran velocidad de rotación y gran eficiencia. Por su parte, las turbinas de Zotlöterer (ver Figura 3.6) poseen velocidades nominales dependientes del tamaño de la microcentral, y, aunque lentas son inofensiva para los peces que entren a la microcentral. El uso rural de microcentrales basadas en vórtice gravitacional justifica la utilización de turbinas Zotlöterer de baja velocidad, minimizando el impacto en el ecosistema. A partir de esta selección, se requiere entonces implementar un sistema un sistema de multiplicación de velocidades que permita acoplar la turbina con el generador eléctrico.



Figura 3.5. Vista panorámica de una turbina de cuatro alabes en operación

Fuente: http://blog.hasslberger.com/2007/06/water_vortex_drives_power_plan.html



Figura 3.6. Vista panorámica de una turbina Zotlöterer en funcionamiento.

Fuente: <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/zotloeterer-turbine/>

Como resultado de un trabajo de titulación [43], en UTPL se diseñó y construyó un generador de corriente alterna, de bajo costo y producción local (ver Figura 3.7). Los resultados de la experimentación en vacío se muestran en la Tabla 3.2. Esta máquina está orientada a ser utilizada en microcentrales basadas en vórtice gravitacional.

Tabla. 3.2. Características de operación en vacío, del generador construido.

Velocidad (rpm)	Voltaje (VCA)
18.9	6.95
43.7	7.99
57.0	8.50
76.4	11.43
85.2	12.45
89.5	13.11
91.0	13.35
94.1	13.40
96.5	13.65
100.3	13.88
101.2	14.55
102.7	14.72

Fuente: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/9060>

Elaborado: 26 julio 2015

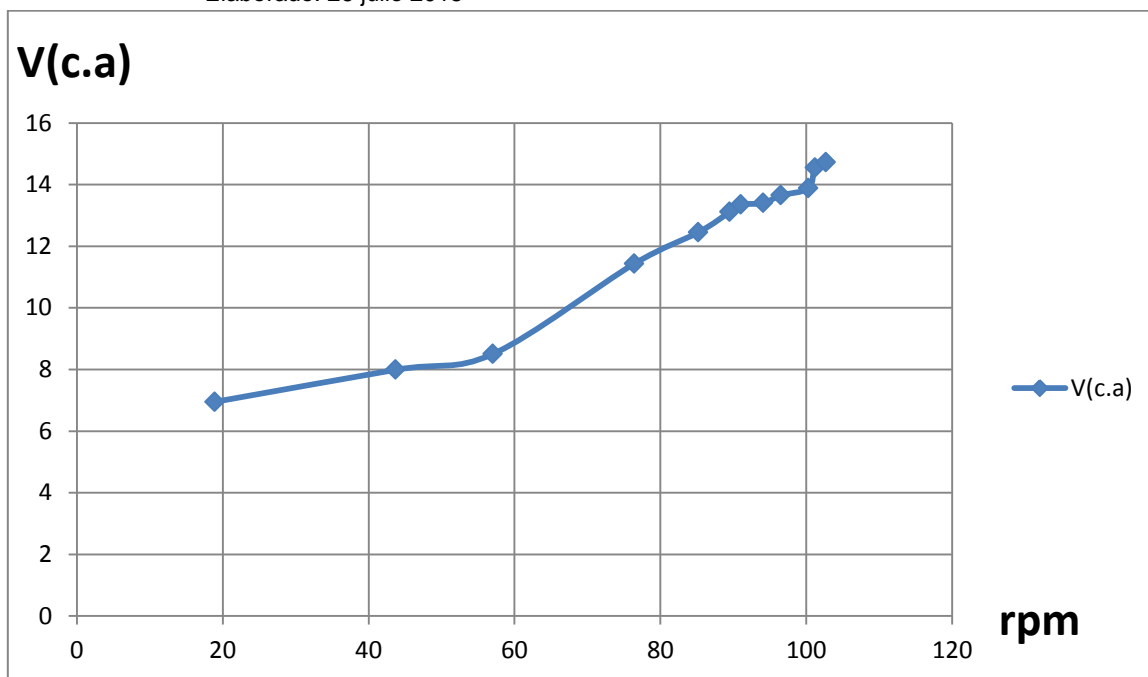


Figura 3.7. Grafica de operación en vacío, del generador construido

Fuente: Diseño de los autores

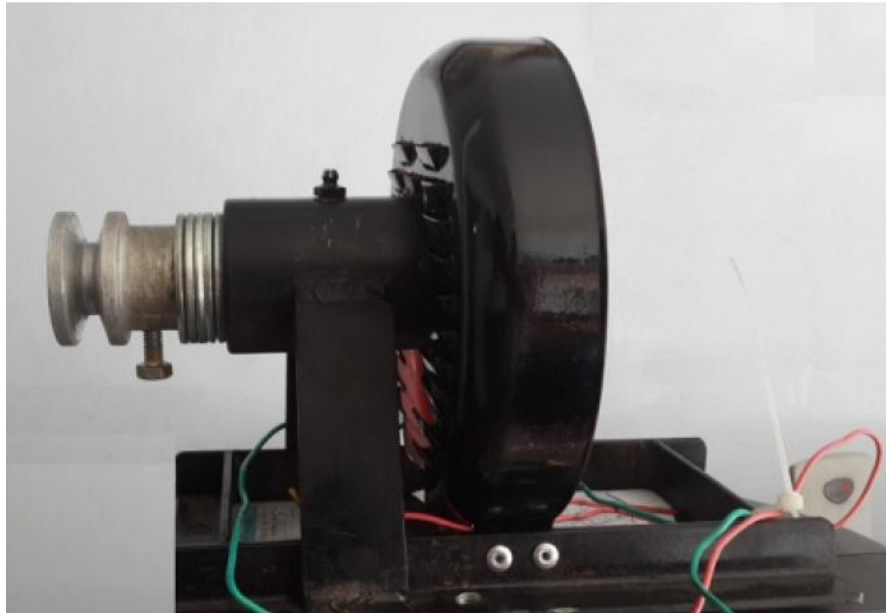


Figura 3.8. Vista panorámica del generador GAM-FD diseñado y construido en UTPL

Fuente: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/9060>

Como otra opción válida se señala la adquisición e instalación de un generador de mercado, como el alternador de baja velocidad, de 3 fases producido por Greef [50].

En este documento, se describe los resultados obtenidos en la etapa de ingeniería básica de una microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, adecuada para la realidad de la zona rural de la provincia de Loja.

3.3 Identificación de lugares de potencial interés para la implantación de microcentrales basadas en vórtice gravitacional

3.3.1. Sobre el cantón Loja

El cantón Loja forma parte de la provincia de Loja, ubicada al sur del Ecuador.

La población del cantón alcanza los 218.000 habitantes, distribuidos en un 68 % en la zona urbana, 13% en la periferia, y 19% en las parroquias rurales [51].

El cantón está dividido políticamente, en 4 parroquias urbanas y 13 parroquias rurales: Malacatos, Quinara, Santiago, Gualiel, Jimbilla, Chuquiribamba, San Pedro de Vilcabamba, Vilcabamba, Yangana, Chantaco, San Lucas, El Cisne, y Taquil (ver Figura 3.8).

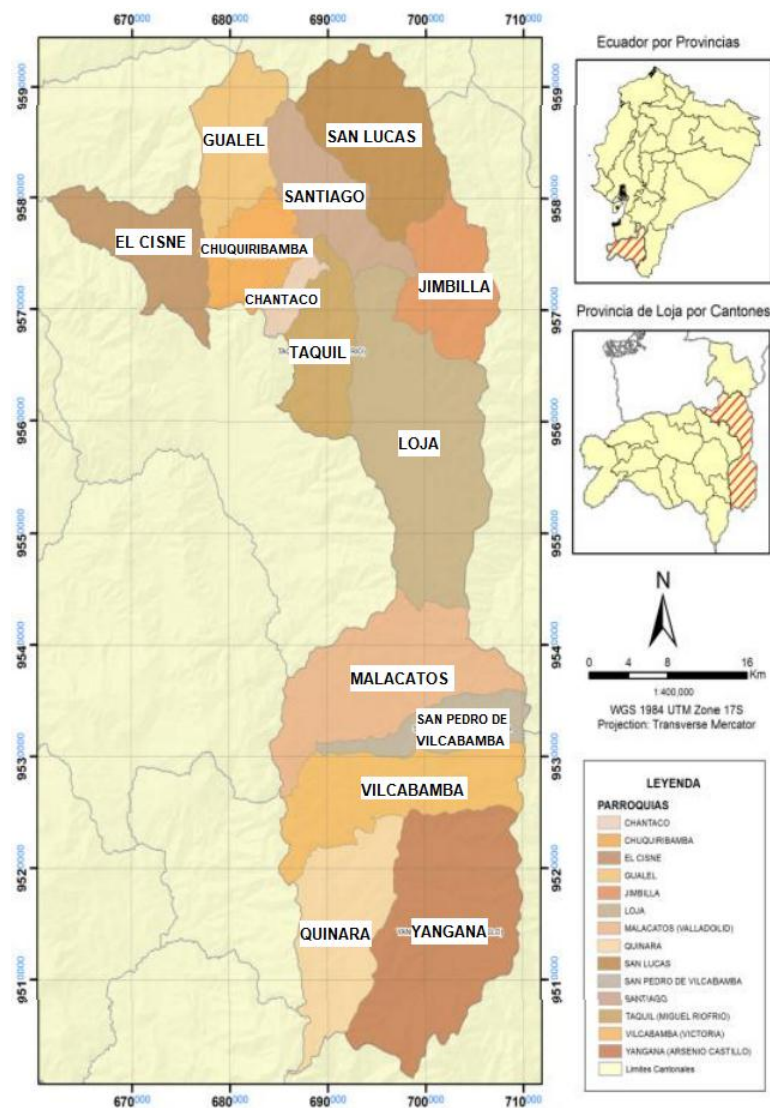


Figura 3.9. División política del cantón Loja.

Fuente: <http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/851/1/Perfil%20territorial%20LOJA.pdf>

3.3.2. Sobre la implantación de microcentrales basadas en vórtice gravitacional en el cantón Loja

Las microcentrales basadas en vórtice gravitacional requieren de caudales moderados y de pendientes leves, razón por la cual pueden implantarse para un aprovechamiento complementario en canales de riego (ver Figura 3.9), o en la derivación de ríos y quebradas.

A manera de ejemplo, y considerando diversas opciones de aplicación de la energía generada por las microcentrales, se decidió identificar 3 posibles implantaciones en el cantón, partiendo del criterio de inversión mínima. Los sitios seleccionados fueron: Santa Cruz, Gualiel Pamba, y, Malacatos.

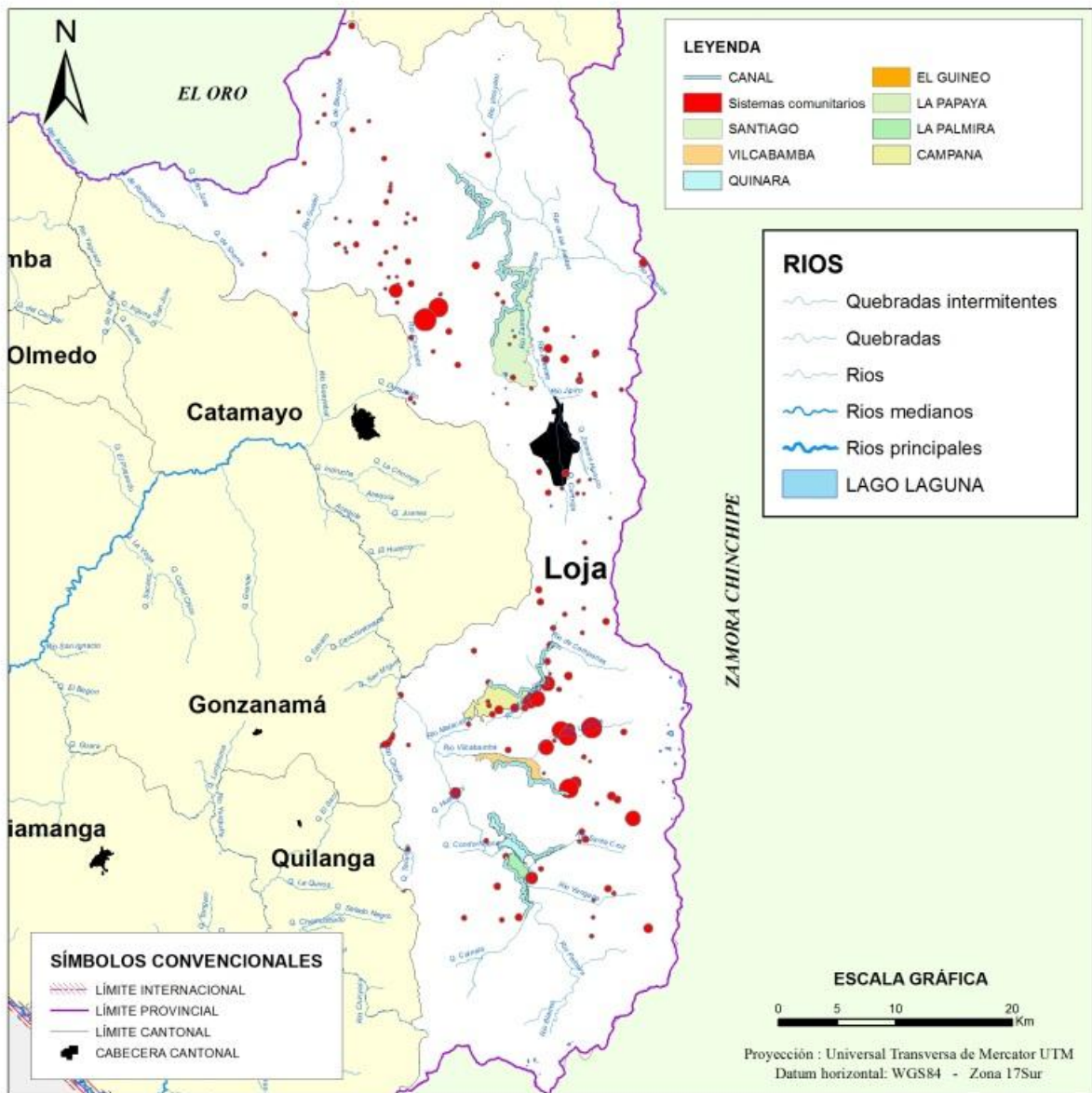


Figura 3.10. Recursos hídricos disponibles en el cantón Loja

Fuente: Diseño de los autores

La primera implantación sugerida se encuentra en el barrio Santa Cruz, perteneciente a la parroquia Malacatos. En este sitio se aprovecharía una derivación del río Malacatos tal como lo muestra la Figura 3.10. La zona posee un suelo apto para la siembra pero carece de riego. La energía generada en la microcentral (mostrada en color rojo) se destinará entonces para potenciar el bombeo de agua, empleando bombas sumergibles [53], desde el río (en color celeste) hacia depósitos elevados, a fin de facilitar el riego por gravedad.

La segunda implantación se sugiere para el barrio Gualiel Pamba, en la parroquia San Lucas, aprovechando una derivación del río San Lucas (ver Figura 3.11). La energía generada podría utilizarse para potenciar el sistema de iluminación de la rivera y de la zona deportiva comunal existente en las cercanías, empleando tecnología LED [54].

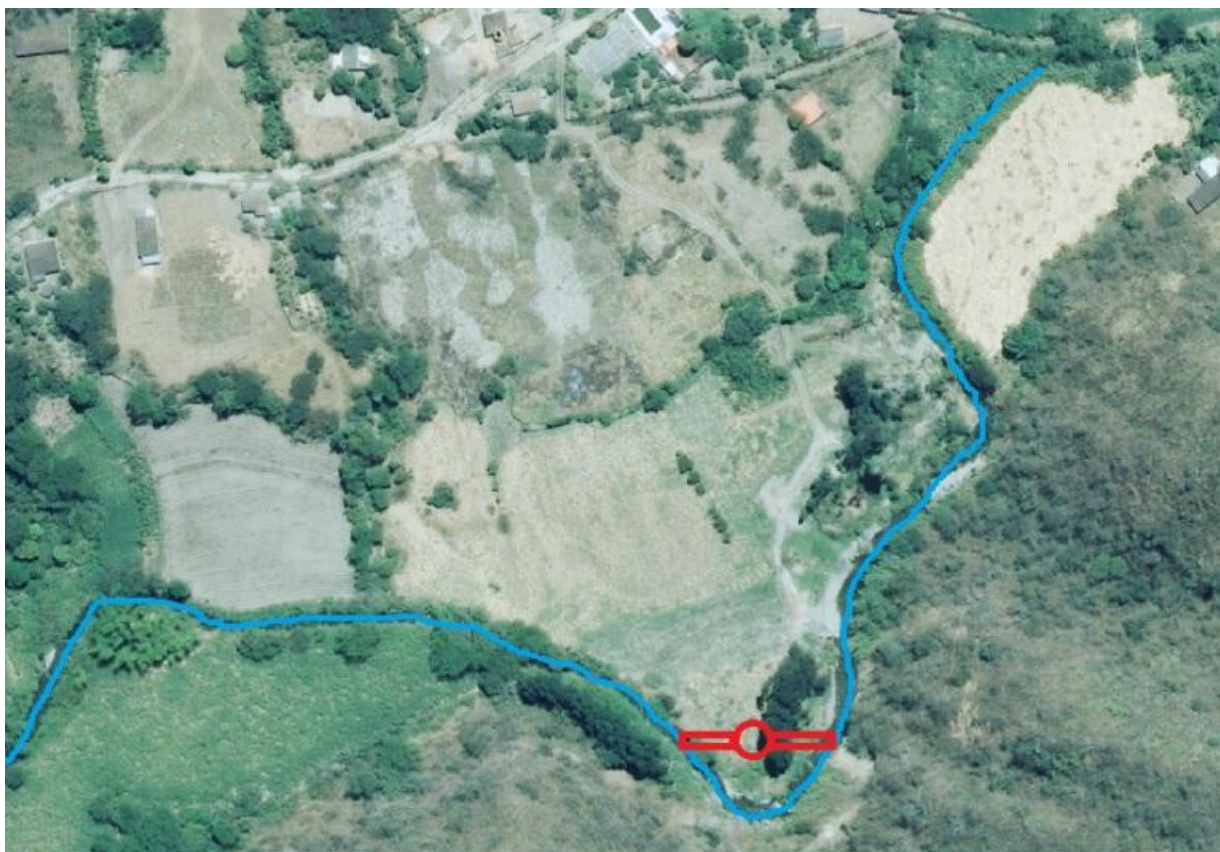


Figura 3.11. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en el barrio Santa Cruz, parroquia Malacatos, aprovechando una derivación del río Malacatos

Fuente: Diseño de los autores

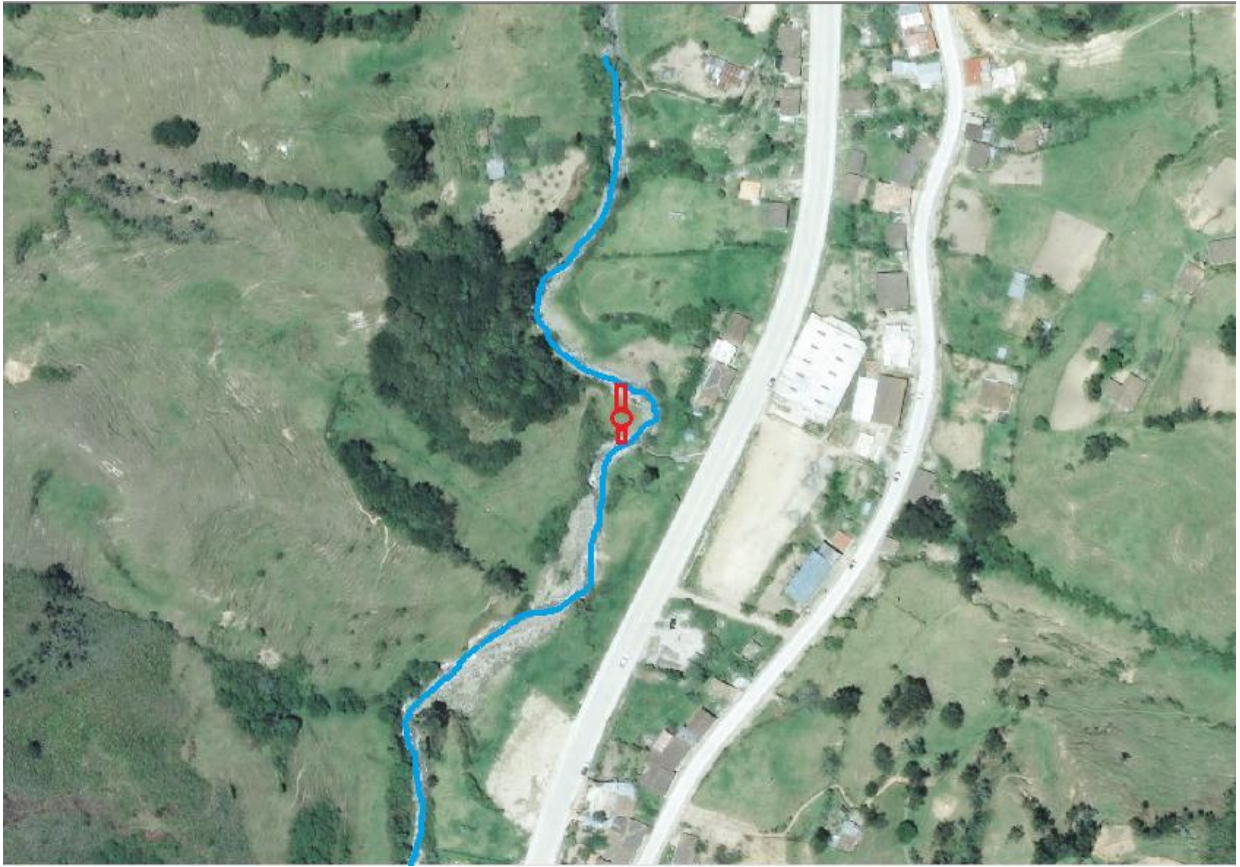


Figura 3.12. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en el barrio Gualiel Pamba, parroquia San Lucas, aprovechando una derivación del río San Lucas

Fuente: Diseño de los autores

La tercera implantación se sugiere para el sector del puente de la vía Malacatos – Vilcabamba, en la parroquia de Malacatos (ver Figura 3.12). La energía generada aprovechando una derivación del río Malacatos, se podría emplear para iluminación monumental del sector, emulando los trabajos efectuados en otras localidades del país [55].

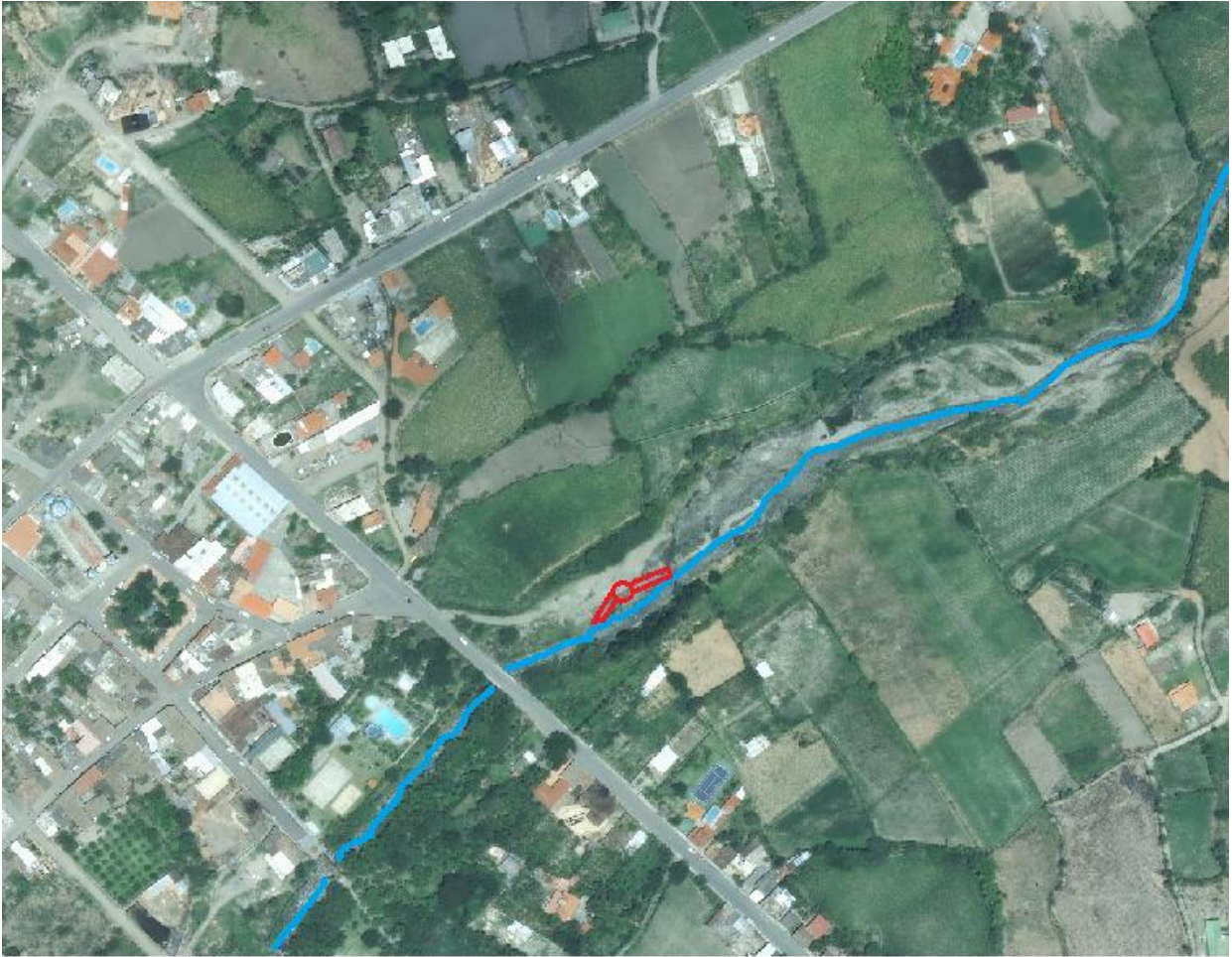


Figura 3.13. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en la parroquia Malacatos, aprovechando una derivación del río Malacatos

Fuente: Diseño de los autores

Para dimensionar el potencial aporte de las microcentrales propuestas, se consideró el caudal disponible en las derivaciones (que dependerá de la geometría del canal de ingreso). La Tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos para 2 tipos de generador: un Greef de mercado [50], y el diseñado en UTPL [43]. El caudal de 8.60 l/s es el mínimo requerido para vencer la inercia mecánica del sistema. Un aumento en el caudal, no necesariamente se traduce en aumento de velocidad en el eje de rotación de las turbinas, sino en el aumento del torque (y el aumento de la potencia capturable).

Tabla. 3.3. Generación esperada para los puntos de implantación.

Caudal, l/s	Turbina, rpm	Generador, rpm	GREEF, KW	Generador UTPL, KW
8.69	102	255	1,020	0,063
9.28	106	265	1,060	0,066
9.87	110	275	1,100	0,068
10.48	114	285	1,140	0,071
11.08	118	295	1,180	0,073
11.69	121	302,5	1,210	0,075
12.31	125	312,5	1,250	0,077
12.93	128	320	1,280	0,079
13.55	132	330	1,320	0,082

Fuente: Diseño de los autores
 Elaborado: 26 septiembre 2015

CONCLUSIONES

- Ante los problemas ocasionados por el uso extensivo de los combustibles fósiles, todos los países del mundo y de la región se encuentran empeñados en adoptar acciones que conduzcan a una economía baja en carbono.
- En este contexto, la provisión de energía a zonas rurales a partir de fuentes renovables ocupa un papel importante, más aún si se considera el concepto de soberanía energética.
- Las microcentrales de generación eléctrica basadas en vórtice gravitacional son una opción interesante para la provisión de energía a baja escala, en las condiciones de la zona rural del cantón Loja.
- Trabajos efectuados en UTPL demuestran la factibilidad técnica de diseñar y construir este tipo de microcentrales en la zona de Loja.
- Se ha descrito a nivel de ingeniería básica los componentes de una microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, adaptada a la realidad de la zona rural del cantón Loja.
- Se ha identificado de forma preliminar 3 potenciales sitios para implantación de microcentrales en el cantón Loja.

RECOMENDACIONES

- Para trabajos futuros se recomienda considerar en cuanto al diseño, el caudal del Río, tanto como sus incrementos y decrementos durante el año.
- Buscar nuevos puntos de implantación a nivel del cantón Loja, y a nivel del Ecuador para estos sistemas de generación autónomos, para mejorar la calidad de vida de la población Ecuatoriana.
- En las microcentrales hidroeléctricas basadas en vórtice gravitacional para la implementación se recomienda el uso de generadores de bajas revoluciones por minuto (RPM), ya que estas están diseñadas para generar bajas RPM para no afectar a la vida silvestre del sitio de implantación.
- Los resultados obtenidos a nivel de generación, sugieren la necesidad de explorar con nuevos modelos de generador, una vez que se hayan implementado los módulos de construcción civil y mecánico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vicepresidencia de Energía de CAF, ENERGÍA: UNA VISIÓN SOBRE LOS RETOS Y OPORTUNIDADES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, Aspectos Sociales del Acceso a la Energía, 2010.
- [2] Cristopher Flavin, Construir una economía baja en carbono. [en línea]. < https://www.fuhem.es/media/cdv/file/biblioteca/Conflictos_socioecologicos/Especial-WEB/Construir_una_economia_baja_en_carbono_CHRISTOPHER_FLAVIN.pdf> [Consulta: 30 abril 2015]
- [3] Charles Levy, A 2020 Low Carbon Economy. [en línea]. <http://www.theworkfoundation.com/DownloadPublication/Report/243_lowcarbonFINAL_CORRECTED.pdf> [Consulta: 29 abril 2015]
- [4] What is Carbon Footprint. [en línea]. < <http://clean-energy-now.com/what-is-carbon-footprint/>> [Consulta: 2 de mayo 2015]
- [5] Thomas Wiedmann, Jan Minx, A definition of 'Carbon, 2006.
- [6] Luis Miguel Galindo, Joseluis Samaniego, La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados. [en línea]. < http://www.preventionweb.net/files/13696_RVE100Galindoetal1.pdf> [consulta: 30 abril 2015].
- [7] La volatilidad de los precios del petróleo y su impacto en América Latina, Fernando Sánchez-Albavera, Alejandro Vargas. [en línea]. < http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6291/S050719_es.pdf?sequence=1> [consulta: 30 abril 2015].
- [8] Joseph E. Stigliz, "Los felices noventa: Semilla de la destrucción", Editorial Taurus, Serie Pensamiento, España, 2003, pag. 183.
- [9] Vicepresidencia de Energía de CAF, ENERGÍA: UNA VISIÓN SOBRE LOS RETOS Y OPORTUNIDADES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, Aspectos Ambientales de la Energía, 2010.
- [10] Robert Pollin, Heidi Garrett-Peltier, James Heintz, Helen Scharber, Green Recovery, A Program to Create Good Jobs and Start Building a Low-Carbon Economy. [en línea]. <http://www.peri.umass.edu/fileadmin/pdf/other_publication_types/green_economics/peri_report.pdf> [Consulta: 1 mayo 2015]

- [11] Florent Marcellesi, Qué es la crisis ecológica. [en línea]. < <http://florentmarcellesi.eu/2013/01/08/que-es-la-crisis-ecologica/>> [consulta: 30 abril 2015].
- [12] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Eficiencia en el uso de los recursos. [en línea]. < http://www.unep.org/pdf/Resources_efficiency_sp.pdf> [consulta: 30 abril 2015].
- [13] Andreas Schmittner, Andreas Oschlies, H. Damon Matthews, Eric D. Galbraith, Future changes in climate, ocean circulation, ecosystems, and biogeochemical cycling simulated for a business-as-usual CO2 emission scenario until year 4000 AD. [en línea]. < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GB002953/full>> [consulta: 30 abril 2015].
- [14] Isaac Dyner, Claudia Alvarez, Judith Cherni, Energy Contribution to Sustainable Rural Livelihoods in Developing Countries: A System Dynamics Approach. [en línea]. < <http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/DYNER155.pdf>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [15] David J. Grimshaw, Sian Lewis, Energía solar para los pobres: hechos y cifras. [en línea]. < <http://www.scidev.net/america-latina/energia/especial/energ-a-solar-para-los-pobres-hechos-y-cifras.html>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [16] The Wind Energy Development Programmatic Environmental Impact Statement, Wind Energy Basics. [en línea]. < <http://windeis.anl.gov/guide/basics/>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [17] Richard Perez, Microhydro Power Basics. [en línea]. < <http://www.homepower.com/>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [18] Bo P. Weidema, Mikkel Thrane, Per Christensen, Jannick Schmidt and Søren Løkke, Carbon Footprint. [en línea]. < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x/full>> [Consulta: 1 mayo 2015]
- [19] The Scottish Government, A Low Carbon Economic Strategy for Scotland. [en línea]. < <http://www.gov.scot/resource/doc/331364/0107855.pdf>> [Consulta: 2 mayo 2015]
- [20] Janet L. Sawin, William R. Moomaw, Renewable Revolution: Low-Carbon Energy by 2030. < <http://www.worldwatch.org/files/pdf/Renewable%20Revolution.pdf>> [Consulta: 3 mayo 2015]
- [21] Energía y pobreza: los problemas del desarrollo energético y los grupos sociales marginados en las zonas rurales y urbanas de Brasil. [en línea]. < <http://www.cepal.org/es/publicaciones/6430-energia-y-pobreza-los-problemas-del-desarrollo-energetico-y-los-grupos-sociales>> [consulta: 30 abril 2015].

- [22] Dr Anne Wheldon, Micro-hydro power. [en línea]. <<http://www.ashden.org/micro-hydro>> [consulta: 24 julio 2015].
- [23] Smith, N.P.A., Induction generators for stand-alone micro-hydro systems. [en línea]. <<http://www.osti.gov/scitech/biblio/474539>> [Consulta: 24 julio 2015]
- [24] Practical Action, Micro-hydro power. [en línea]. < <http://practicalaction.org/micro-hydro-power>> [Consulta: 24 julio 2015]
- [25] O. B. Yaakob, Yasser M. Ahmed, A. H. Elbatran, H. M. Shabara, A Review on Micro Hydro Gravitational Vortex Power and Turbine Systems. [en línea]. < <http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/3259/2437>> [Consulta: 24 julio 2015]
- [26] Valentin M. Silantyev, Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. [en línea]. <<http://www.math.le.ac.uk/people/ag153/homepage/Gorlov2001.pdf>> [consulta: 24 julio 2015].
- [27] Korean Ocean Research and Development Institute (KORDI) (S.Korea) , Gorlov Helical Turbines in Korea Installation Close View. [en línea]. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gorlov_Helical_Turbines_in_Korea_Installation_Close_View.png> [consulta: 24 julio 2015].
- [28] Greenshoots Communications, Engineer testing the operation of the vanes actuator on a Francis turbine at Garry Gualach Hydro Electric Power Scheme, Scotland. [en línea]. <<http://www.alamy.com/stock-photo-engineer-testing-the-operation-of-the-vanes-actuator-on-a-francis-20456910.html>> [consulta: 24 julio 2015].
- [29] Tschurtschenthaler Paul, The Kaplan turbine: a power package for reduced height of fall. [en línea]. <<http://www.turbinenbau-sekten.it/en/kaplan-turbine-2.html>> [consulta: 24 julio 2015].
- [30] Ecopolis, Turbinas Pelton HHP - H. [en línea]. <<http://www.ecopolisla.com/es/hydro-power/products/turbines/detail-pelton-turbine-hhp---h-50/>> [consulta: 24 julio 2015].
- [31] Zotloeterer, Gravitationswasserwirbelkraftwerk mit Zotlöterer Turbine in Obergrafendorf. [en línea]. <[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gravitationswasserwirbelkraftwerk_mit_Zotl%C3%B6terer_Turbine_in_Obergrafendorf_\(AUSTRIA\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gravitationswasserwirbelkraftwerk_mit_Zotl%C3%B6terer_Turbine_in_Obergrafendorf_(AUSTRIA).jpg)> [consulta: 24 julio 2015].
- [32] Sujate Wanchat, Ratchaphon Suntivarakorn, Sujin Wanchat, Kitipong Tonmit, Pongpun Kayanyiem, A Parametric Study of a Gravitation Vortex Power Plant. [en línea]. <

- http://www.researchgate.net/publication/255792443_A_parametric_study_of_gravitational_vortex_power_plant>[Consulta: 26 julio 2015]
- [33] P. Balachandran. Engineering Fluid Mechanics [en línea]. < <https://books.google.com.ec/books?id=kleYeyZ8U0wC&lpg=PA216&ots>>[Consulta: 26 julio 2015]
- [34] Fundamentals of flow [en línea]. < <http://www.slideshare.net/garapatiavinash/4fundamentals-of-flow>>[Consulta: 26 julio 2015]
- [35] Lorin Roche, Ph.D. Vortexes in Nature [en línea]. < <http://www.lorinroche.com/yoga/yoga/chakras.html>>[Consulta: 26 julio 2015]
- [36] Robert D Anderson. A Plughole vortex [en línea]. < https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex#/media/File:Vortex_in_draining_bottle_of_water.jpg>[Consulta: 26 julio 2015]
- [37] Vittorio Celli. Circulation, vorticity, and vortices [en línea]. < <http://galileo.phys.virginia.edu/classes/311/notes/fluids1/fluids11/node8.html>>[Consulta: 26 julio 2015]
- [38] Yunus Cengel, John Cimbala. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, 3rd Edition [en línea]. < <http://www.chegg.com/homework-help/consider-spiraling-line-vortex-sink-flow-xy-r-plane-sketched-chapter-9-problem-20p-solution-9780077295462-exc>>[Consulta: 26 julio 2015]
- [39] Shigeo Kida. Life, Structure, and Dynamical Role of Vortical Motion in Turbulence [en línea]. < <http://www.igf.fuw.edu.pl/IUTAM/ABSTRACTS/Kida.pdf>>[Consulta: 26 julio 2015]
- [40] Paulo Arriagada. Estudio de la formación de vórtices [en línea]. < https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf>[Consulta: 26 julio 2015]
- [41] Gerardo Andrés Torres Casierra. Algunas características hidrodinámicas de un vórtice en un cilindro inducido por una corriente de agua [en línea]. < <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.grupoenergiadebogota.com%2Fcontent%2Fdownload%2F2285%2F35017%2Ffile%2FPregrado%2520Primer%2520Lugar.pdf&ei=zZvyUtyDlcSqkQfxlICIDg&usg=AFQjCNHNgvcPdWI666as0LTtdpAwwrfkgA>>[Consulta: 26 julio 2015]

- [42] Juan Carlos Peña Salazar, Diseño analítico de un tanque de vórtice gravitacional [en línea]. < <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7769/1/FINAL.pdf> > [Consulta: 26 julio 2015]
- [43] José Ricardo Ortega Suing, Gissela Estefanía Romero Añazco. Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional. [en línea]. < <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/9060> > [Consulta: 26 julio 2015]
- [44] Henry Vicente Rojas Azuero, Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional [en línea]. < <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10695/1/ROJAS%20ASUERO%20HENRRY%20VICENTE.pdf> > [Consulta: 26 julio 2015]
- [45] U.S Department of the Interior, Hydroelectric Power. [en línea]. < <http://www.usbr.gov/power/edu/pamphlet.pdf> > [Consulta: 20 septiembre 2015]
- [46] Freire Morales Edwin Geovanny, elaboración e implementación de un software para el diseño de centrales hidroeléctricas hasta 10 mw. [en línea]. < <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/handle/123456789/906/15T00447.pdf;jsessionid=5AA54C5426C1C91B43064EFF220000AF?sequence=1> > [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [47] Centro de Energías Renovables, Ministerio de energía, Gobierno de Chile, Guía de apoyo para desarrolladores de proyectos minihidroeléctricos. [en línea]. < http://www.inapiprojecta.cl/605/articles-1659_recurso_1.pdf > [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [48] Sepp Hasslberger, Water Vortex Drives Power Plant. [en línea]. < http://blog.hasslberger.com/2007/06/water_vortex_drives_power_plan.html > [Consulta: 20 septiembre 2015]
- [49] Zotloeterer, GRAVITATION WATER VORTEX POWER PLANT. [en línea]. < <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/zotloeterer-turbine/> > [Consulta: 20 septiembre 2015]
- [50] GreeF, 50 Rpm Permanent Magnet Alternator Generator 20kw Alternator Low Speed Alternator. [en línea]. < http://www.alibaba.com/product-detail/50-Rpm-Permanent-Magnet-Alternator-Generator_60296286893.html?spm=a2700.7724857.35.1.N5Mqwd > [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [51] Alcaldía de Loja. [en línea]. < www.loja.gob.ec > [Consulta: 25 septiembre 2015]

- [52] Ing. Stalin Paladines, Vulnerabilidad a nivel municipal del cantón Loja. [en línea].<
<http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/851/1/Perfil%20territorial%20LOJA.pdf>>
[Consulta: 25 septiembre 2015]
- [53] Mne, Bombeo solar sistema de riego 1kw. [en línea]. <
<http://spanish.alibaba.com/product-gs/solar-pumping-irrigation-system-1kw-60302941871.html>> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [54] Distribuidora Vasquez, LUZ PUBLICA LED TIPO RAQUETA 150w. [en línea]. <
http://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-407660828-lampara-de-luz-publica-150w-led-impermeable-calles-parqueos-_JM> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [55] Mónica Valencia, Puente sobre el río Aguarico integra a las poblaciones de la Amazonía.
[en línea]. <<http://www.obraspublicas.gob.ec/puente-sobre-el-rio-aguarico-integra-a-las-poblaciones-de-la-amazonia/>> [Consulta: 25 septiembre 2015]

ANEXOS

ANEXO A

**PAPER FINAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL,
UNA OPCIÓN PARA LA PROVISIÓN SUSTENTABLE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA
ZONA RURAL DEL CANTÓN LOJA**

Generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja

#1Loaiza Pedro, #2Jaramillo Jorge

#1 Profesional en formación IET, Universidad Técnica Particular de Loja
#2 Docente investigador SEE DCCE, Universidad Técnica Particular de Loja
Loja, Ecuador

¹pfloaiza@utpl.edu.ec, ²jorgeluis@utpl.edu.ec

Abstract—En la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan proveer de energía sustentable a las zonas rurales del cantón Loja, en este trabajo se aproxima algunas de las alternativas planteadas para descarbonizar el sector de provisión de energía en zonas rurales; se describe el principio de operación de una microcentral de generación hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional; y se explica el potencial de la generación eléctrica basada en vórtice gravitacional en la zona rural del cantón Loja.

Keywords— energía, provisión de energía, descarbonización del sector energético, energía renovable, microcentrales hidroeléctricas, microcentrales basadas en vórtice gravitacional

I. INTRODUCCIÓN

Se podría afirmar que con el crecimiento exponencial de la población, la demanda de energía se ha incrementado dramáticamente. Sin embargo, esta afirmación pierde sustento cuando se comprueba que a pesar de los esfuerzos realizados por distintos organismos públicos y privados, aún persisten factores que limitan el acceso equitativo de la población a fuentes modernas de energía, condenando a millones de personas a la pobreza energética [1].

El acceso a energía eficiente y limpia en zonas rurales de los países en desarrollo, se constituye sin lugar a dudas en una de las condiciones indispensables para el desarrollo sustentable. En este contexto, la búsqueda de fuentes de energía apropiadas, va mucho más allá de la simple selección de la “mejor tecnología” [2].

La ampliación de la cobertura de las redes eléctricas hacia las zonas rurales suele verse limitada por aspectos geográficos y económicos. Esta situación ha fomentado el apareamiento de iniciativas que apuntan a soluciones desconectadas de la red, en las que la generación de energía, limpia y renovable, se realiza in situ.

Entre las diferentes tecnologías de generación de verde, por su aplicabilidad en las condiciones hidrológicas del cantón Loja, se destacan las microcentrales hidroeléctricas, que por simplicidad y bajo costo son ideales para potenciar

iluminación, comunicación, salud, escuelas, y otras facilidades en comunidades alejadas [3].

En este documento, se describe el potencial de la generación eléctrica basada en vórtice gravitacional, como una solución para la provisión sustentable de energía en la zona rural del cantón Loja, desde una perspectiva medioambiental, política y social; que facilite una transición sustentable hacia una economía baja en carbono.

II. LOS RETOS DE LA PROVISIÓN ACTUAL DE ENERGÍA

A. Un abordaje desde la perspectiva medioambiental

Para cuantificar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se emplea la **huella del carbono**, concepto ligado al Ecological Footprinting, introducido por Mathis Wackernagel en 1996 [4], que mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización o producto, relevantes para el cambio climático. La huella del carbono se construye para todo el ciclo de vida de un objeto o de un proceso, lo que conlleva a un procedimiento complejo, centrado en la determinación de las emisiones de CO₂, sin prestar atención a otros agentes, sobre todo por falta de metodologías y data confiables. De hecho muchos autores hablan de la necesidad de cambiar el concepto de huella del carbono por el de **huella climática**, incluyendo en el análisis a todos los agentes capaces de provocar el efecto invernadero [5].

La huella del carbono de la provisión de energía está relacionada con las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles y las emisiones fugitivas a lo largo del ciclo de vida de un producto o de la cadena productiva (ver Fig.1)

Desde esta perspectiva, la región no debería permanecer ajena a iniciativas que promuevan una economía baja en carbono y la **descarbonización** del sector energético. Estas iniciativas buscan internalizar el costo de las emisiones (mercados de derechos de emisión, impuestos a las emisiones);

establecer regulaciones técnicas obligatorias o voluntarias; e implementar mecanismos de fomento (subsidio) para bienes, servicios y tecnologías con baja intensidad de emisiones.



Fig. 1. Un ejemplo de la estructura de la huella del carbono para la actividad de provisión de energía [4]

B. Un abordaje desde la perspectiva política

El petróleo es un recurso natural no renovable que se convertido en la principal fuente de energía en los momentos actuales. El petróleo representa el 30% de la matriz energética de América Latina, y cada año se registra un aumento de más del 2% en su aporte a la matriz energética mundial [6].

En los últimos años, el crecimiento de la demanda, la reducción de los inventarios de reservas petroleras, y la devaluación del dólar (los EEUU son los principales importadores de petróleo en el mundo) han conllevado a la volatilidad y al incremento del precio del barril de petróleo, que no solo afectan a la gestión de la economía nacional de todos los países del orbe [6], sino que también han desatado una ola de exploración y explotación petrolera que desconoce o invisibiliza el daño medioambiental y las consecuencias sociales. Según Joseph E. Stiglitz, ganador de la Medalla John Bates Clark (1979) y del Premio Nobel de Economía (2001), “*numerosos personajes del mundo y de las finanzas se dejaron seducir por el deseo de enriquecerse y decidieron rebajar sus normas éticas en su carrera por obtener más*” [7].

En este contexto, se requiere promover nuevas iniciativas de provisión de energía que no solo reduzcan el impacto ambiental y el costo social de la generación, sino que también consoliden el concepto de soberanía energética, reduciendo la dependencia nacional de acciones extranjeras.

C. Un abordaje desde la perspectiva social

Son varias las implicaciones sociales en la provisión de energía, empezando por el tipo de fuentes energéticas que utilizan los pobres en comparación con los no pobres, el grado de equipamiento de los hogares, las problemáticas diferenciadas en áreas rurales y urbanas, la diferenciación de la relación ingresos-gastos en energía entre los diversos estratos sociales; y, la relación entre acceso a la energía e índice de

desarrollo humano [1]. En este contexto, se requiere enfrentar los problemas de acceso a la energía y pobreza desde una óptica conjunta, y no por separado como hasta ahora.

En las zonas urbanas, el acceso a energía segura y suficiente se relaciona con el nivel de ingresos, con los cuadros tarifarios y regulatorios, con las facilidades de acceso a alternativas más económicas, y con el nivel de marginación social. Por su parte, las áreas rurales se caracterizan por un acceso limitado a fuentes modernas de energía, pero con un amplio potencial para atender la potenciación de servicios básicos mediante el aprovechamiento de fuentes renovables. Esta última dimensión define con claridad una de las líneas potenciales de investigación y desarrollo en energía: la provisión de energía de fuentes renovables para las zonas rurales.

III. ALGUNAS ESTRATEGIAS REGIONALES PARA OPTIMIZAR LA PROVISIÓN DE ENERGÍA

A. Una economía baja en emisiones de carbono

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNCCC), en vigor desde el 21 de marzo de 1994, reconoce el derecho al desarrollo y a la mejora en la calidad de vida de los habitantes de los países en desarrollo, apunta hacia una **economía baja en emisiones de carbono** y al control de las emisiones de GEI, y, establece responsabilidades comunes y diferenciadas a los países signatarios [8].

Una economía baja en carbono, se basa en la utilización de recursos energéticos bajos en carbono que minimizan las emisiones de GEI a la biosfera, especialmente la de dióxido de carbono [3], [9].

La Fig. 3 muestra las características básicas de una economía baja en carbono. El concepto de bajas emisiones en carbono se refiere a aplicaciones que emite un mínimo de emisiones de gas de invernadero hacia la biosfera, esta contaminación produce la escasez ecológica, es decir, escasez de materias primas, de energía, de tierras y de espacio ambiental para mantener el ritmo de la economía actual [10]. Para disminuir el impacto ambiental y evitar la escasez ecológica se debe realizar un uso eficiente de los recursos, que es una economía verde donde el crecimiento económico se desvincule del daño al medio ambiente [11], reduciendo el riesgo ambiental y mejorando nuestra calidad de vida.

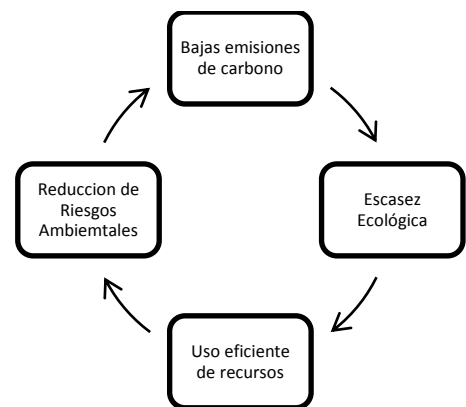


Fig. 2. Características generales de una economía baja en carbono. [Diseño de autores]

B. Provisión de energía en las zonas rurales

La provisión de energía en zonas rurales, debe orientarse a utilizar tecnología moderna, eficiente y limpia, que permita garantizar un desarrollo sustentable [12].

El aprovechamiento de energía de fuentes renovables, se convierte en una opción diferente a la utilización de combustibles fósiles y al empleo primitivo de biomasa, ante las limitaciones de la electrificación centralizada. El inventario de estas fuentes renovables incluye a la energía solar, la eólica la biomasa moderna, la geotermal, y la hídrica (ver Fig.3).

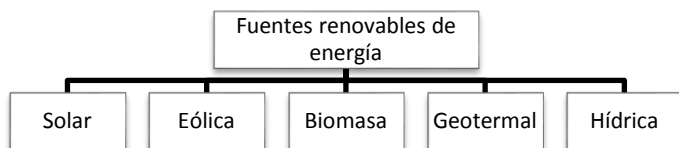


Fig. 3. Algunos tipos de fuentes renovables de energía aprovechables para la provisión en zonas rurales. [Diseño de autores]

En zonas rurales y de difícil acceso, se puede utilizar sistemas solares domésticos, microcentrales hidroeléctricas o pequeñas turbinas eólicas para suplir de electricidad a las actividades agrícolas, de salud, educación, comunicaciones y acceso a agua potable, entre otras [13].

La energía solar se puede utilizar de 2 formas: como solar térmica y fotovoltaica. La energía solar térmica se captura en colectores, mientras que la fotovoltaica se atrapa en módulos o paneles solares. La efectividad actual de los sistemas térmico solares alcanza el 30%, mientras que los sistema fotovoltaicos llegan a un 15% [13].

La energía eólica se captura en turbinas eólicas, capaces de transformarla en energía mecánica o eléctrica [14]. La abundancia de agua en las zonas rurales podría facilitar la captura de energía hídrica para transformarla en mecánico o eléctrica [15].

IV. SOBRE LAS MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS

A. ¿Qué es una microcentral hidroeléctrica?

Por principio, la generación hidroeléctrica convierte energía potencial de un flujo de agua presurizado en energía eléctrica. La presurización del agua se logra en un sistema hidráulico, ante el efecto de una gradiente de nivel [3].

Se conoce como microcentrales hidroeléctricas a sistemas de generación potenciados por energía hidráulica, cuya potencia de salida es menor a 100 KW. Por lo general, estas centrales se instalan en pequeñas comunidades, en zonas remotas. La mayoría de microcentrales hidroeléctricas están instaladas en regiones montañosas de países en desarrollo, incluyendo los países andinos [4].

El impacto ambiental de una microcentral es mínimo, ya que no depende de presas para almacenar y direccionar agua (ver Fig.4) [5]. Además, usando diseños adecuados y contratando mano de obra local, las microcentrales pueden ser de mayor costo - efectividad que los proyectos hidroeléctricos a gran escala.

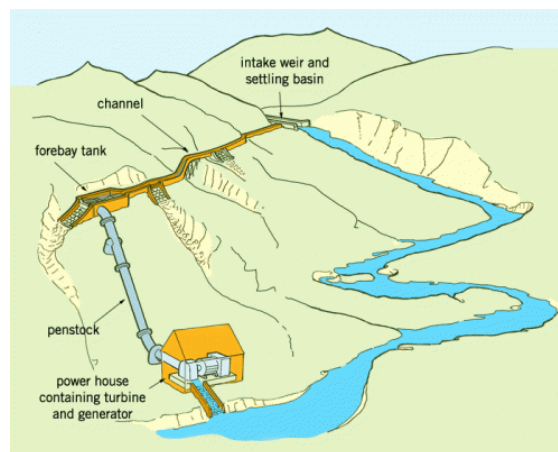


Fig. 4. Esquema de instalación de una microcentral hidroeléctrica [5].

B. ¿Cuáles son la ventajas de las microcentrales hidroeléctricas?

Las microcentrales hidroeléctricas presentan ventajas operativas, económicas y medioambientales.

Operativamente, las microcentrales pueden generar energía eléctrica a partir de un pequeño flujo de agua, durante todo el día. En función de su inclusión o no en la red eléctrica de distribución, y, de la forma de almacenamiento de energía, los microsistemas hidroeléctricos corresponden a 4 configuraciones: conectados a la red sin baterías, conectados a la red con baterías, desconectados de la red sin baterías, y, desconectados de la red con baterías [3].

En términos económicos, el diseño, construcción, operación y mantenimiento de microcentrales demandan recursos perfectamente asumibles por la comunidad, o por un modelo de emprendimiento social, puesto que las microcentrales pueden producir energía fuera de la red, o inyectarla para uso en otras comunidades.

Desde la perspectiva medioambiental, las microcentrales no son sistemas invasivos, por lo que no afectan a la vida salvaje.

C. Tipos de turbinas utilizadas en microcentrales hidroeléctricas

El tipo de turbina que se puede usar en microcentrales, depende del nivel de caída del agua, entre otros, del caudal de agua disponible, y, de la disponibilidad y facilidades de transporte de equipos al sitio de implantación (ver Fig.5) [16].

En las *microcentrales basadas en vórtice gravitacional*, una parte del flujo de agua es desviado hacia un recipiente redondo, con una salida en el centro del fondo, que crea un vórtice (ver Fig.6). Un rotor simple es movido entonces por la energía cinética. La eficiencia de estas microcentrales varía entre 60 y

80%. Este tipo de centrales no requieren de grandes caudales ni de caídas de agua, por lo que se puede implementar en riachuelos, quebradas, o desviando parte del caudal de un río.

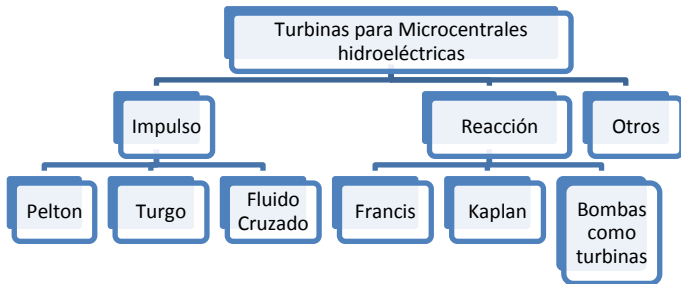


Fig. 5. Clasificación de las turbinas empleadas en microcentrales hidroeléctricas. [Diseño de autores]



Fig. 6. Microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional [17].

V. MICROCENTRALES BASADAS EN VÓRTICES GRAVITACIONALES

A. Sobre los vórtices gravitacionales

En dinámica de fluidos, se define a un vórtice como el movimiento de un fluido a lo largo de un camino encorvado, caracterizado por el patrón de flujo curvo. Cuando el fluido fluye entre las líneas de flujo encorvadas, la fuerza centrífuga es aplicada, y es contra-balanceada por la fuerza de presión que actúa sobre la dirección radial [18].

En una primera clasificación, los vórtices son forzados o libres. Un *vórtice forzado* se define como aquel en el que un torque externo es requerido para rotar el fluido. En este tipo de vórtice, las partículas del fluido rotan con una velocidad angular constante. El ejemplo más común de vórtice forzado, es un cilindro vertical que contiene un líquido rotando sobre su eje central, con cierta velocidad angular (ver Fig.7)

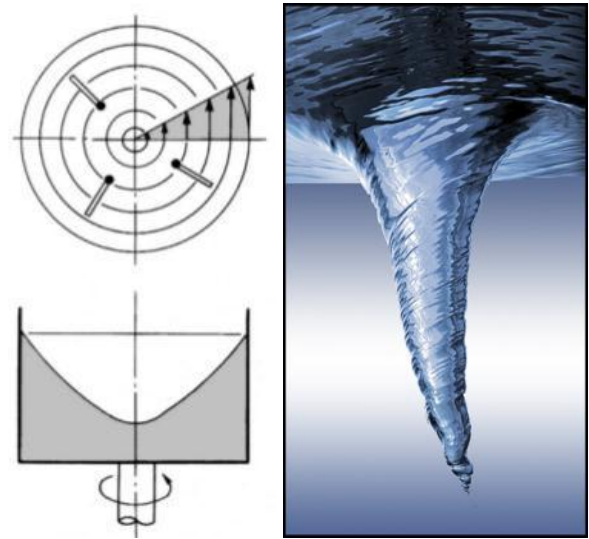


Fig. 7. Formación de vórtices forzados [19], [20]

Un *vórtice libre* es aquel en el que el fluido rota sin necesidad de una fuerza externa. El movimiento se puede deber a una rotación previamente impartida a las partículas del fluido, o, a alguna acción interna. Algunos ejemplos de vórtices libres son el flujo de un líquido alrededor de un quiebre encorvado, el remolino en un río, y el flujo de un líquido a través del fondo de un contenedor (ver Fig.8)

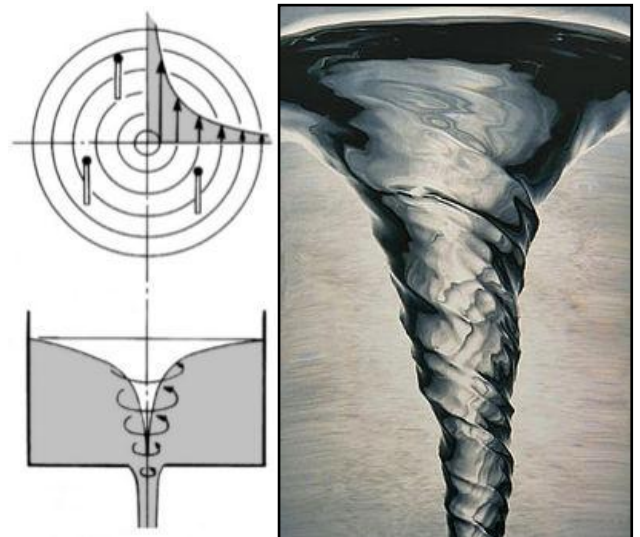


Fig.8. Formación de vórtices libres. [19], [21]

En otra clasificación, los vórtices son cilíndricos o espirales. En un *vórtice cilíndrico* el fluido rota en círculos concéntricos (ver Fig.9), mientras que en un vórtice espiral el fluido se mueve en espiral hacia adentro o hacia afuera (ver Fig.10). El movimiento de los vórtices espirales se obtiene combinando un vórtice cilíndrico con un movimiento radial.

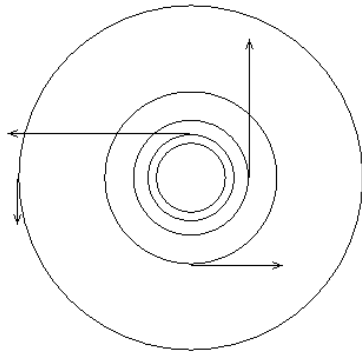


Fig. 9. Diagrama de velocidades en un vórtice cilíndrico, [22].

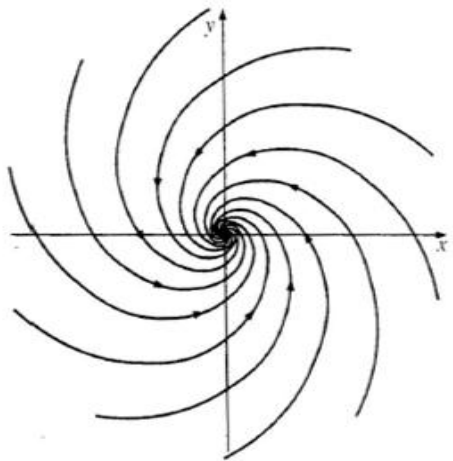


Fig. 10. Diagrama de velocidades en un vórtice cilíndrico, [23].

C. Una microcentral basada en vórtices gravitacionales aplicable a la zona rural del cantón Loja

En la Universidad Técnica Particular de Loja se ha desarrollado una serie de iniciativas alrededor de la hidrogenación basada en vórtice gravitacional.

Como parte del trabajo de titulación “Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional” [28], J.C. Peña describió el marco conceptual y matemático para el diseño y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional conformado por un tanque, paletas, y el subsistema de generación eléctrica. El sistema se implementó y probó en el banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL (ver Fig.12).



Fig. 12. Vista lateral del sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional [28].

B. Microcentrales basadas en vórtices gravitacionales

El vórtice gravitacional hidráulico presenta las características de un compuesto o vórtice de Rankine, en el que el flujo próximo al núcleo se comporta como un sólido rígido, mientras el resto del flujo se comporta como un vórtice libre, generado por el flujo tangencial de la garganta del inductor de vórtice en contacto con la cámara cilíndrica estacionaria de vórtice (ver Fig.11) [25], [26], [27].

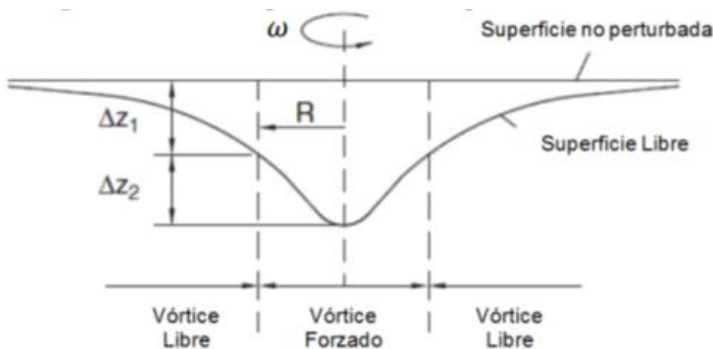


Fig. 11. Modelo teórico de un vórtice compuesto o de Rankine [26].

Los resultados obtenidos en el subsistema de generación eléctrica fueron optimizados el trabajo de titulación “Diseño, construcción e implementación de un bloque de generación eléctrica y un módulo de monitoreo para un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional”, desarrollado por J. Ortega y G. Romero [29]. En este trabajo, se diseñó y construyó un generador eléctrico tipo asíncrono monofásico de fase dividida (GAM-FD), capaz de generar voltajes senoidales con errores de no más de 0.01% respecto a la senoide perfecta, demostrando la capacidad de construcción de tales máquinas en la provincia de Loja (ver Fig. 13 y 14)

VI. INGENIERÍA BÁSICA DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

En términos generales, el diseño de una microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, incluye al menos 4 componentes: captación, canal de ingreso, tanque de circulación, y, generación (ver Fig.16).

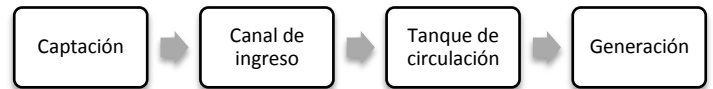


Fig. 16. Diagrama de bloques de los componentes de una microcentral. [Diseño de autores].

La captación de agua para una microcentral hidroeléctrica no solo prevé de agua para la generación, sino que controla el caudal y el nivel de sedimentos en suspensión para evitar daños en las turbinas.

El canal de ingreso permite el ingreso de agua tanque de circulación en forma tangencial, controlada, y sin turbulencias mayores, a fin de facilitar la correcta formación del vórtice de agua.

A. Sobre el tanque de circulación

En el tanque de circulación se induce el vórtice de Rankine. La Fig. 17 muestra un esquema de la estructura general de un tanque de circulación.

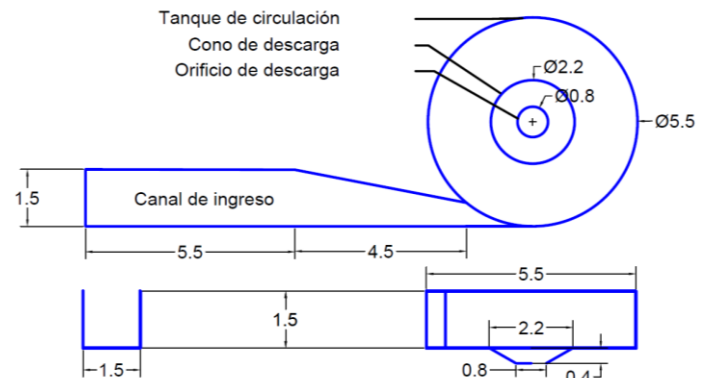


Fig. 17. Estructura general de un tanque de circulación para una microcentral basada en vórtice gravitacional [30].

La existencia del cono de descarga facilita la descarga del agua y evita la recirculación en el flujo causada por la presencia de la denominada capa de Ekman. En [30] se recomienda que el diámetro del orificio de descarga sea el 14% del diámetro del tanque de circulación.

En la Tabla.1 se listan las características geométricas propuestas en [30] para el tanque de circulación.

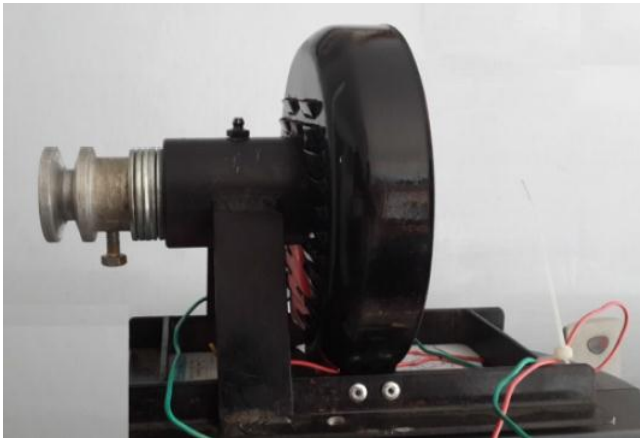


Fig.13. GAM-FD acoplado a la protección mecánica [29].



Fig.14. GAM-FD instalado en el banco hidráulico, [29].

El diseño del tanque de circulación fue mejorado como resultado del trabajo de titulación “Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional” de H. Rojas [30]. La Fig. 15 muestra una vista panorámica de una central implementada en la zona de Loja.



Fig. 15. Perspectiva de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, [30]

Tabla. 1.

Características geométricas del tanque de circulación [30].

Parámetro	Valor, m
Diámetro del tanque (D)	5.50
Diámetro del orificio de descarga (d)	0.80
Altura del tanque (H)	1.50
Base de la entrada al tanque de circulación (be)	0.50
Diámetro mayor de cono de descarga (dv)	2.20
Altura de cono (Hc)	0.40

Por lo general, en microcentrales basadas en vórtice gravitacional se utilizan dos tipos de turbinas: de cuatro alabes y de Zotlöterer [30].

Las turbinas de cuatro alabes cóncavos separados 90° (ver Fig. 18) poseen una gran velocidad de rotación y gran eficiencia. Por su parte, las turbinas de Zotlöterer (ver Fig. 19) poseen velocidades nominales dependientes del tamaño de la microcentral, y, aunque lentas son inofensiva para los peces que entren a la microcentral. El uso rural de microcentrales basadas en vórtice gravitacional justifica la utilización de turbinas Zotlöterer de baja velocidad, minimizando el impacto en el ecosistema. A partir de esta selección, se requiere entonces implementar un sistema un sistema de multiplicación de velocidades que permita acoplar la turbina con el generador eléctrico.



Fig. 18. Vista panorámica de una turbina de cuatro alabes en operación [31].



Fig. 19. Vista panorámica de una turbina Zotlöterer en funcionamiento [32].

Como resultado de un trabajo de titulación [29], en UTPL se diseñó y construyó una máquina eléctrica para generación, de bajo costo y producción local (ver Fig.13), cuyo comportamiento en vacío se muestra en la Tabla 2. Esta

máquina está orientada a ser utilizada en microcentrales basadas en vórtice gravitacional.

Tabla. 2.

Características de operación en vacío, del generador construido [29].

Velocidad (rpm)	Voltaje (V)
18.9	6.95
43.7	7.99
57.0	8.50
76.4	11.43
85.2	12.45
89.5	13.11
91.0	13.35
94.1	13.40
96.5	13.65
100.3	13.88
101.2	14.55
102.7	14.72

Como otra opción válida se señala la adquisición e instalación de un generador de mercado, como el alternador de baja velocidad, de 3 fases producido por Greef [33].

VII. IDENTIFICACIÓN DE LUGARES DE POTENCIAL INTERÉS PARA LA IMPLANTACIÓN DE MICROCENTRALES BASADAS EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

A. Sobre el cantón Loja

El cantón Loja forma parte de la provincia de Loja, ubicada al sur del Ecuador.

La población del cantón alcanza los 218.000 habitantes, distribuidos en un 68 % en la zona urbana, 13% en la periferia, y 19% en las parroquias rurales [34]. El cantón está dividido políticamente, en 4 parroquias urbanas y 13 parroquias rurales: Malacatos, Quinara, Santiago, Gualiel, Jimbilla, Chuquiribamba, San Pedro de Vilcabamba, Vilcabamba, Yangana, Chantaco, San Lucas, El Cisne, y Taquil (ver Fig. 20).

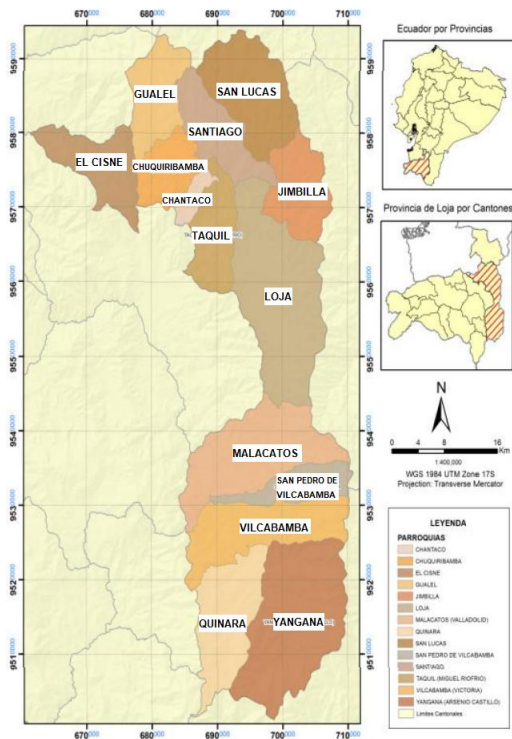


Fig. 20. División política del cantón Loja [35].

B. Sobre la implantación de microcentrales basadas en vórtice gravitacional en el cantón Loja

Las microcentrales basadas en vórtice gravitacional requieren de caudales moderados y de pendientes leves, razón por la cual pueden implantarse para un aprovechamiento complementario en canales de riego (ver Fig.21), o en la derivación de ríos y quebradas.

A manera de ejemplo, y considerando diversas opciones de aplicación de la energía generada por las microcentrales, se decidió identificar 3 posibles implantaciones en el cantón, partiendo del criterio de inversión mínima. Los sitios seleccionados fueron: Santa Cruz, Guallel Pamba, y Malacatos.

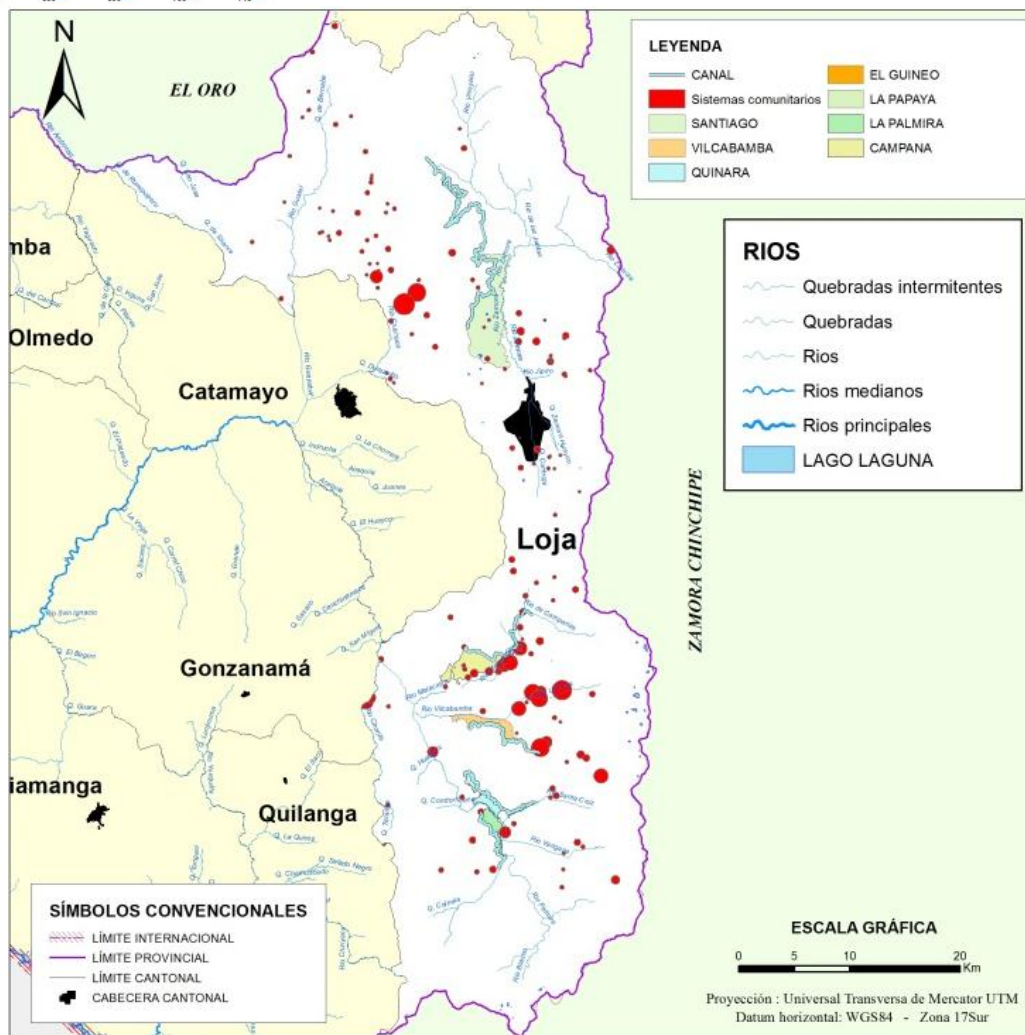


Fig. 21. Recursos hídricos disponibles en el cantón Loja [Diseño de autores].

La primera implantación sugerida se encuentra en el barrio Santa Cruz, perteneciente a la parroquia Malacatos. En este

sitio se aprovecharía una derivación del río Malacatos tal como lo muestra la Fig.22. La zona posee un suelo apto para la siembra pero carece de riego. La energía generada en la microcentral (mostrada en color rojo) se destinará entonces

para potenciar el bombeo de agua, empleando bombas sumergibles [36], desde el río (en color celeste) hacia depósitos elevados, a fin de facilitar el riego por gravedad.

La segunda implantación se sugiere para el barrio Gual el Pamba, en la parroquia San Lucas, aprovechando una derivación del río San Lucas (ver Fig.23). La energía generada podría utilizarse para potenciar el sistema de iluminación de la rivera y de la zona deportiva comunal existente en las cercanías, empleando tecnología LED [37].

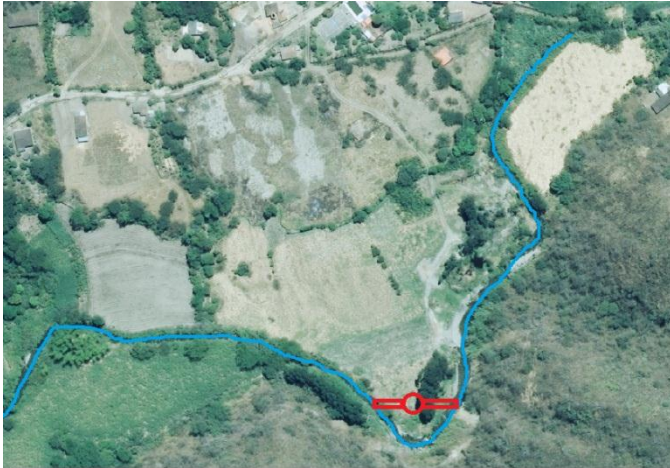


Fig. 22. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en el barrio Santa Cruz, parroquia Malacatos, aprovechando una derivación del río Malacatos [Diseño de autores].

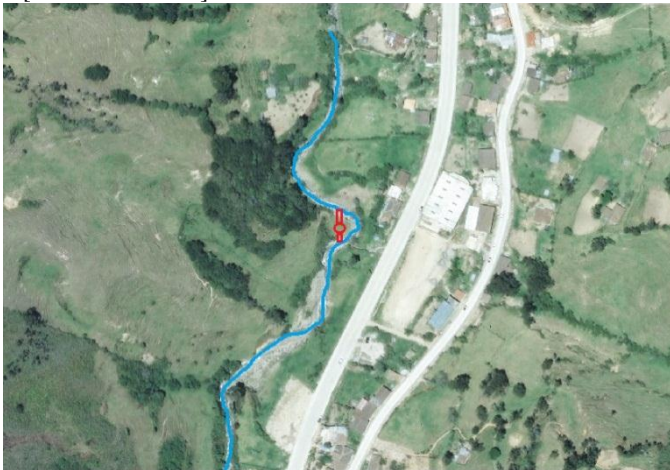


Fig. 23. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en el barrio Gual el Pamba, parroquia San Lucas, aprovechando una derivación del río San Lucas [Diseño de autores].

La tercera implantación se sugiere para el sector del puente de la vía Malacatos – Vilcabamba, en la parroquia de Malacatos (ver Fig.24). La energía generada aprovechando una derivación del río Malacatos, se podría emplear para iluminación monumental del sector, emulando los trabajos efectuados en otras localidades del país [38].

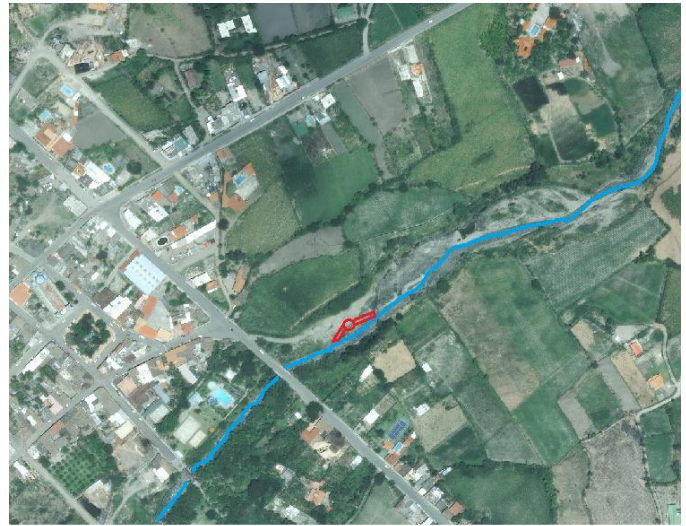


Fig. 24. Sitio de implantación de una microcentral basada en vórtice gravitacional en la parroquia Malacatos, aprovechando una derivación del río Malacatos [Diseño de autores].

VIII. CONCLUSIONES

- Ante los problemas ocasionados por el uso extensivo de los combustibles fósiles, todos los países del mundo y de la región se encuentran empeñados en adoptar acciones que conduzcan a una economía baja en carbono.
- En este contexto, la provisión de energía a zonas rurales a partir de fuentes renovables ocupa un papel importante, más aún si se considera el concepto de soberanía energética.
- Las microcentrales de generación eléctrica basadas en vórtice gravitacional son una opción interesante para la provisión de energía a baja escala, en las condiciones de la zona rural del cantón Loja.
- Trabajos efectuados en UTPL demuestran la factibilidad técnica de diseñar y construir este tipo de microcentrales en la zona de Loja.
- Se ha descrito a nivel de ingeniería básica los componentes de una microcentral hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, adaptada a la realidad de la zona rural del cantón Loja.
- Se ha identificado de forma preliminar 3 potenciales sitios para implantación de microcentrales en el cantón Loja.

IX. REFERENCIAS

- [1]. Vicepresidencia de Energía de CAF, ENERGÍA: UNA VISIÓN SOBRE LOS RETOS Y OPORTUNIDADES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, Aspectos Sociales del Acceso a la Energía, 2010.
- [2]. Isaac Dyner, Claudia Alvarez, Judith Cherni, Energy Contribution to Sustainable Rural Livelihoods in Developing Countries: A System Dynamics Approach. [en línea]. < <http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/DYNER155.pdf>> [Consulta: 24 julio 2015]

- [3]. Dr Anne Wheldon, Micro-hydro power. [en línea]. <<http://www.ashden.org/micro-hydro>> [consulta: 24 julio 2015].
- [4]. What is Carbon Footprint. [en línea]. < <http://clean-energy-now.com/what-is-carbon-footprint/>> [Consulta: 2 de mayo 2015]
- [5]. What is Carbon Footprint. [en línea]. < <http://clean-energy-now.com/what-is-carbon-footprint/>> [Consulta: 2 de mayo 2015]
- [6]. Luis Miguel Galindo, Joseluis Samaniego, La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados. [en línea]. < http://www.preventionweb.net/files/13696_RVE100Galindoetal1.pdf> [consulta: 30 abril 2015].
- [7]. La volatilidad de los precios del petróleo y su impacto en América Latina, Fernando Sánchez-Albavera, Alejandro Vargas. [en línea]. < http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6291/S050719_es.pdf?sequence=1> [consulta: 30 abril 2015].
- [8]. Joseph E. Stiglitz, “Los felices noventa: Semilla de la destrucción”, Editorial Taurus, Serie Pensamiento, España, 2003, pag. 183.
- [9]. Vicepresidencia de Energía de CAF, ENERGÍA: UNA VISIÓN SOBRE LOS RETOS Y OPORTUNIDADES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, Aspectos Ambientales de la Energía, 2010.
- [10]. Robert Pollin, Heidi Garrett-Peltier, James Heintz, Helen Scharber, Green Recovery, A Program to Create Good Jobs and Start Building a Low-Carbon Economy. [en línea]. <http://www.peri.umass.edu/fileadmin/pdf/other_publication_types/green_economics/peri_report.pdf> [Consulta: 1 mayo 2015]
- [11]. Florent Marcellesi, Qué es la crisis ecológica. [en línea]. < <http://florentmarcellesi.eu/2013/01/08/que-es-la-crisis-ecologica/>> [consulta: 30 abril 2015].
- [12]. Isaac Dynner, Claudia Alvarez, Judith Cherni, Energy Contribution to Sustainable Rural Livelihoods in Developing Countries: A System Dynamics Approach. [en línea]. < <http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/DYNER155.pdf>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [13]. David J. Grimshaw, Sian Lewis, Energía solar para los pobres: hechos y cifras. [en línea]. < <http://www.scidev.net/america-latina/energia/especial/energ-a-solar-para-los-pobres-hechos-y-cifras.html>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [14]. The Wind Energy Development Programmatic Environmental Impact Statement, Wind Energy Basics. [en línea]. < <http://windeis.anl.gov/guide/basics/>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [15]. Richard Perez, Microhydro Power Basics. [en línea]. < <http://www.homepower.com/>> [Consulta: 30 abril 2015]
- [16]. O. B. Yaakob, Yasser M. Ahmed, A. H. Elbatran, H. M. Shabara, A Review on Micro Hydro Gravitational Vortex Power and Turbine Systems. [en línea]. < <http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/3259/2437>> [Consulta: 24 julio 2015]
- [17]. Zotloeterer, Gravitationswasserwirbelkraftwerk mit Zotlöterer Turbine in Obergrafendorf. [en línea]. <[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gravitationswasserwirbelkraftwerk_mit_Zotl%C3%B6terer_Turbine_in_Obergrafendorf_\(AUSTRIA\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gravitationswasserwirbelkraftwerk_mit_Zotl%C3%B6terer_Turbine_in_Obergrafendorf_(AUSTRIA).jpg)> [consulta: 24 julio 2015].
- [18]. Sujate Wanchat, Ratchaphon Suntivarakorn, Sujin Wanchat, Kitipong Tonmit, Pongpun Kayanyiem, A Parametric Study of a Gravitation Vortex Power Plant. [en línea]. < http://www.researchgate.net/publication/255792443_A_parametric_study_of_gravitational_vortex_power_plant> [Consulta: 26 julio 2015]
- [19]. P. Balachandran. Engineering Fluid Mechanics [en línea]. < <https://books.google.com.ec/books?id=kIeYeyZ8U0wC&lpg=PA216&ots>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [20]. Fundamentals of flow [en línea]. < <http://www.slideshare.net/garapatiavinash/4fundamentals-of-flow>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [21]. Lorin Roche, Ph.D. Vortexes in Nature [en línea]. < <http://www.lorinroche.com/yoga/yoga/chakras.html>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [22]. Robert D Anderson. A Plughole vortex [en línea]. < https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex#/media/File:Vortex_in_draining_bottle_of_water.jpg> [Consulta: 26 julio 2015]
- [23]. Vittorio Celli. Circulation, vorticity, and vortices [en línea]. < <http://galileo.phys.virginia.edu/classes/311/notes/fluids1/fluids11/node8.html>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [24]. Yunus Cengel, John Cimbala. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, 3rd Edition [en línea]. < <http://www.chegg.com/homework-help/consider-spiraling-line-vortex-sink-flow-xy-r-plane-sketched-chapter-9-problem-20p-solution-9780077295462-exc>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [25]. Shigeo Kida. Life, Structure, and Dynamical Role of Vortical Motion in Turbulence [en línea]. < <http://www.igf.fuw.edu.pl/IUTAM/ABSTRACTS/Kida.pdf>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [26]. Paulo Arriagada. Estudio de la formación de vórtices [en línea]. < https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Estudio_de_la_formacion_de_vortices.pdf> [Consulta: 26 julio 2015]
- [27]. Gerardo Andrés Torres Casierra. Algunas características hidrodinámicas de un vórtice en un cilindro inducido por una corriente de agua [en línea]. < <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.grupoenergidebogota.com%2Fcontent%2Fdownload%2F2285%2F35017%2Ffile%2FPregrado%2520Primer%2520Lugar.pdf&ei=zZvyUtyDlCsqXqfILCIDg&usq=AFQjCNHNgvcPdWI666as0LTtdpAwrrfkGA>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [28]. Juan Carlos Peña Salazar, Diseño analítico de un tanque de vórtice gravitacional [en línea]. < <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7769/1/FINAL.pdf>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [29]. José Ricardo Ortega Suing, Gissela Estefanía Romero Añazco. Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional. [en línea]. < <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/9060>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [30]. Henry Vicente Rojas Azuero, Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional [en línea]. < <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10695/1/ROJAS%20ASUERO%20HENRRY%20VICENTE.pdf>> [Consulta: 26 julio 2015]
- [31]. Sepp Hasslberger, Water Vortex Drives Power Plant. [en línea]. < http://blog.hasslberger.com/2007/06/water_vortex_drives_power_plan.html> [Consulta: 20 septiembre 2015]
- [32]. Zotloeterer, GRAVITATION WATER VORTEX POWER PLANT. [en línea]. < <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/zotloeterer-turbine/>> [Consulta: 20 septiembre 2015]
- [33]. GreeF, 50 Rpm Permanent Magnet Alternator Generator 20kw Alternator Low Speed Alternator. [en línea]. < http://www.alibaba.com/product-detail/50-Rpm-Permanent-Magnet-Alternator-Generator_60296286893.html?spm=a2700.7724857.35.1.N5Mqwd> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [34]. Alcaldía de Loja. [en línea]. < www.loja.gob.ec> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [35]. Ing. Stalin Paladines, Vulnerabilidad a nivel municipal del cantón Loja. [en línea]. < <http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/851/1/Perfil%20territorial%20LOJA.pdf>> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [36]. Mne, Bombeo solar sistema de riego 1kw. [en línea]. < <http://spanish.alibaba.com/product-gs/solar-pumping-irrigation-system-1kw-60302941871.html>> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [37]. Distribuidora Vasquez, LUZ PUBLICA LED TIPO RAQUETA 150w. [en línea]. < http://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-407660828-lampara-de-luz-publica-150w-led-impermeable-calles-parqueos-_JM> [Consulta: 25 septiembre 2015]
- [38]. Mónica Valencia, Puente sobre el río Aguarico integra a las poblaciones de la Amazonía. [en línea]. < <http://www.obraspublicas.gob.ec/puente-sobre-el-rio-aguarico-integra-a-las-poblaciones-de-la-amazonia/>> [Consulta: 25 septiembre 2015]