



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA RENOVABLE INTERMITENTE EN LA
MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA AISLADO DE LA ISLA DE UTILA,
HONDURAS**

Ing. David Enrique Lagos Figueroa

Asesorado por el M.A. Ing. Edwin Manolo Tock Amezcuita

Guatemala, enero 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA RENOVABLE INTERMITENTE EN LA
MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA AISLADO DE LA ISLA DE UTILA, HONDURAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. DAVID ENRIQUE LAGOS FIGUEROA

ASESORADO POR M.A. ING. EDWIN MANOLO TOCK AMEZQUITA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICO-REGULADOS

GUATEMALA, ENERO 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
EXAMINADOR	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Boj
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA RENOVABLE INTERMITENTE EN LA
MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA AISLADO DE LA ISLA DE UTILA, HONDURAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 9 de noviembre de 2022.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke at the end.

Ing. David Enrique Lagos Figueroa

LNG.DECANATO.OI.05.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA RENOVABLE INTERMITENTE EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA AISLADO DE LA ISLA DE UTILA, HONDURAS**, presentado por: **Ing. David Enrique Lagos Figueroa**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, enero de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, enero de 2024

LNG.EEP.OI.05.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA RENOVABLE
INTERMITENTE EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA
AISLADO DE LA ISLA DE UTILA, HONDURAS”**

presentado por **Ing. David Enrique Lagos Figueroa** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA RENOVABLE INTERMITENTE EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA AISLADO DE LA ISLA DE UTILA, HONDURAS** del estudiante **David Enrique Lagos Figueroa** quien se identifica con número de carné **202290853** del programa de Maestría En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestría En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Tegucigalpa, 13 de octubre de 2022.

Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12

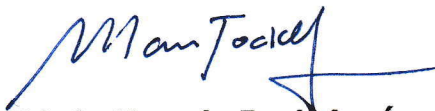
Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he aceptado ser asesor del estudiante **David Enrique Lagos Figueroa**, carné número 99908000, en el proyecto de investigación titulado: **"INCORPORACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA RENOVABLE INTERMITENTE EN LA MATRIZ DE GENERACIÓN DEL SISTEMA AISLADO DE LA ISLA DE UTILA, HONDURAS"**, para optar al grado académico de Maestro en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

En tal sentido, en calidad de asesor, firmo y sello la presente para que el estudiante David Enrique Lagos Figueroa, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



M.A. Ing. Edwin Manolo Tock Amézquita.
Maestría en Administración Industrial
Asesor

Edwin Manolo Tock Amézquita
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado No. 9742

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por estar siempre a mi lado y nunca desampararme.
Mis padres	Humberto Lagos (q.e.p.d.) y Lucila Figueroa por haberme dado la vida, los principios y su amor incondicional.
Mis hermanos	Carlos, José (q.e.p.d.), Cesar y Maritza Lagos, por ser ejemplos de padres, hermanos y profesionales.
Mis hijos	Gracia, Daniel y Leonor Lagos, bendiciones en mi vida e inspiración diaria para ser mejor persona y seguir adelante todos los días.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa institución.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
<i>Utila Power Company</i>	Por haberme brindado la confianza y el apoyo necesario para realizar este trabajo.
Amigos de Guatemala	Por haberme acompañado durante la carrera.
Amigos de Honduras	Por estar ahí cuando los necesité.
Mi asesor	M.A. Ing. Edwin Manolo Tock Amezcuita por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
Gerente de UPCO	Ing. Arlen Flores quien me ayudó a lo largo de la investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XI
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Sistemas híbridos	8
2.2. Fuentes de energías renovables	12
2.2.1. Energía solar	12
2.2.2. Energía eólica.....	16
2.2.3. Energía geotérmica	21
2.2.4. Energía hidroeléctrica.....	23
2.2.5. Energía de biomasa.....	25
2.2.6. Energía del mar	27
2.3. Almacenamiento de energía.....	29
2.4. Procedimientos para optimizar sistemas aislados con Energías Renovables Variables (ERV).....	33
2.4.1. Homer.....	34
2.4.2. Matlab	35

2.4.3.	Regresión lineal.....	36
3.	PRESENTACIÓN DE DATOS	37
3.1.	Recurso del viento.....	38
3.2.	Recurso solar	43
3.3.	Almacenamiento de energía	45
3.4.	Demanda a satisfacer	45
3.5.	Consideraciones financieras	46
3.6.	Escenarios propuestos.....	48
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
4.1.	¿Qué recursos renovables existen en la isla de Utila, Honduras, que sean de implementación comercial y cómo se calcula su potencial?.....	53
4.2.	¿Cuál es el costo de generación de las fuentes de ERV existentes en la isla de Utila, Honduras y su producción?.....	54
4.3.	¿Qué porcentaje de Energía Renovable Variable se puede utilizar sin desestabilizar el sistema y tener un costo de energía eléctrica más estable?.....	55
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	59
	REFERENCIAS	61
	APÉNDICES.....	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Árbol del problema.....	XIV
Figura 2.	Mapa del departamento de Islas de la Bahía.....	6
Figura 3.	Caída precios paneles solares 1976 a 2019.....	7
Figura 4.	Diagrama de un sistema híbrido	9
Figura 5.	Panel solar y calentador de agua solar.....	13
Figura 6.	Componentes de un parque solar.....	15
Figura 7.	Mapa del potencial solar de Honduras.....	16
Figura 8.	Aerogenerador de 10 kW.....	19
Figura 9.	Potencial eólico de Honduras	20
Figura 10.	Instalación de un sistema ORC en fuente geotérmica.....	22
Figura 11.	Mini turbina hidráulica de 20 kW	24
Figura 12.	Planta de biomasa de 75kW	25
Figura 13.	Proceso de producción de biogás.....	26
Figura 14.	Turbinas para aprovechamiento del potencial marítimo	28
Figura 15.	Tecnologías de almacenamiento de energía	31
Figura 16.	Volante de inercia o flywheel	32
Figura 17.	Vista de Homer	35
Figura 18.	Regímenes especiales de manejo forestal en Utila	37
Figura 19.	CAPEX históricos y futuros de proyectos fotovoltaicos	44
Figura 20.	Demanda de Utila	46

TABLAS

Tabla 1.	Implementación de energías renovables en Utila.....	38
Tabla 2.	Velocidades promedio por mes	39
Tabla 3.	Distribución de Weibulll	40
Tabla 4.	Generación de una turbina E33 en Utila.....	41
Tabla 5.	Generación por velocidades del aerogenerador E-33	42
Tabla 6.	Radiación solar en Utila.....	43
Tabla 7.	Generación por tecnología	49
Tabla 8.	Potencia y generación de escenarios.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
US\$	Dólar estadounidense
E	Este
°C	Grados Celsius
kWh	Kilo Watt hora
kWp	Kilo Watt pico
m/s	Metros por segundo
N	Norte
O	Oeste
S	Sur
TW	Tera Watts

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Anemómetro	Equipo utilizado en meteorología para medir la velocidad del viento.
BTU	<i>Brithis Thermal Unit.</i>
<i>Black Start</i>	Arranque de una central eléctrica sin depender de la red externa de transmisión.
CREE	Comisión Reguladora de Energía Eléctrica.
Distribución de <i>Weibull</i>	Herramienta estadística para diseñar eventos futuros considerando las tendencias actuales de diversos fenómenos.
ENEE	Empresa Nacional de Energía Eléctrica.
ERV	Energía Renovable Variable.
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency.</i>
LCOE	Costo nivelado de energía.

Matriz de generación	Estructura de participación de las diferentes fuentes de energía utilizada para la producción de electricidad.
NASA	Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de Norte América.
Off Shore	Energía generada por el viento en el mar.
On Shore	Energía generada por el viento en tierra firme.
ORC	Ciclo orgánico <i>Rankie</i> .
Sistema híbrido	Sistema que genera electricidad a partir de dos o más fuentes, en su mayoría de origen renovable, compartiendo un mismo punto de conexión.
UPCO	<i>Utila Power Company</i> .
Vatio	Unidad de medida de potencia.

RESUMEN

Toda investigación surge de la necesidad de solucionar una situación que causa algún tipo de problema. En el caso particular de *Utila Power Company (UPCO)* la generación de la energía eléctrica que consume la isla de Utila es a base de motores de combustión interna que utilizan diésel.

Esta dependencia del diésel hace que el costo de la generación de energía eléctrica sea volátil por su total dependencia de los vaivenes del suministro y costo de este derivado del petróleo. Este costo no puede ser transmitido de manera directa a los consumidores debido a que el precio de venta de la energía está regulado por la Comisión Reguladora de Energía Eléctrica (CREE) la que establece las tarifas cada trimestre. Por este motivo *Utila Power Company (UPCO)* busca diversificar la matriz de generación de energía eléctrica utilizando las fuentes renovables disponibles en la isla de Utila y que puedan ser aprovechadas en niveles comerciales con tecnología accesibles.

No existe literatura de uso público de libre acceso en la que se exponga las fuentes de Energías Renovables Variables (ERV) que existan en la isla ni el potencial de energético de cada una de ellas. Lo que vuelve necesario hacer el inventario de las diferentes fuentes renovables que se pueden aprovechar. Se debe de utilizar un anemómetro dentro del predio de *Utila Power Company (UPCO)* y con estas lecturas determinar las características del viento mediante el uso de la distribución de *Weibull*.

De existir fuentes termale en la isla se deberá calcular el caudal del fluido durante las temporadas seca y húmeda junto con el gradiente de temperatura.

También la biomasa generada en la isla, si la alcaldía no tiene registro, se debe establecer su composición y poder calorífico. Ambas fuentes renovables se evalúan su comportamiento con una curva normal comprendida en el período de mayor afluencia de turistas y la de menor habitantes en la isla. Los datos de radiación solar para la isla están disponibles en la página oficial de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de Norte América (*NASA*) y en programas informáticos de evaluación de recursos solares como *PVsyst*.

Ya, con toda esta información recopilada se puede establecer el potencial de generación de energía eléctrica con cada una de estas fuentes renovables y evaluar las diferentes tecnologías disponibles en el mercado para establecer el costo de generación de la energía.

Con la información recopilada del comportamiento de las diferentes fuentes que existen en la isla, se evalúa en un programa como *HOMER* o *MATLAB*, las diferentes combinaciones de participación de cada tecnología, donde la calidad de energía suministrada cumpla con los estándares que necesitan los habitantes de la isla. Las opciones que cumplan estos requerimientos técnicos son evaluadas para determinar el costo que tendría la energía eléctrica según la demanda que tiene la isla.

La implementación de una matriz con fuentes de energías renovables en la isla de Utila es viable, tanto desde la parte técnica como desde el punto de costos de generación y calidad de energía.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Islas de la Bahía es el departamento insular de Honduras, está formado por un archipiélago de tres islas principales (Roatan, Utila y Guanaja) y varios cayos (Islas del Cisne, Cayos Zapotillos y Cayos Cochinos). La demanda de energía eléctrica de las tres islas grandes es abastecida por sistemas aislados que no están interconectados entre ellos y son operados por empresas privadas.

- Contexto general

Por la estabilidad y confiabilidad, estas empresas privadas basan su generación de energía eléctrica en motores que funcionan con diésel. Esta alta dependencia del diésel trae como consecuencia que los costos de generación estén indexados a los cambios del precio del diésel, comportamiento que en la mayoría de los casos es al alza.

- Descripción del problema

Utila Power Company (UPCO), es la compañía que opera y administra el sistema eléctrico de Utila y se ve en la necesidad de diversificar su matriz de generación con la incorporación de Energías Renovables Variables (ERV) que se pueda obtener con los recursos que hay en la isla. Aun cuando la incorporación de Energías Renovables Variables (ERV) trae cierto porcentaje de estabilidad de los costos de generación, a través del tiempo, trae inconvenientes de variabilidad y calidad de la energía eléctrica por la intermitencia de su naturaleza.

Por todo lo anterior es necesario incorporar las Energías Renovables Variables (ERV) a la matriz de generación actual dentro de un rango que permita tener un sistema eléctrico confiable y con costos con menos dependencia de la variabilidad del precio de los combustibles fósiles.

- Formulación del problema

En el entendimiento del contexto y realidad que afronta *Utila Power Company (UPCO)* en particular y todos los habitantes de la isla de Utila en general y en la búsqueda de un bien común surge la necesidad de solventar la extrema dependencia de la matriz energética al suministro de diésel.

- Pregunta central

¿Cómo se puede diversificar la matriz de generación de energía eléctrica de la isla de Utila en Honduras para tener un costo de la energía eléctrica menos variable y un sistema eléctrico estable?

- Preguntas específicas

Para responder la pregunta principal de nuestro problema es necesario contestar las siguientes preguntas:

- ¿Qué recursos renovables existen en la isla de Utila, Honduras, que sean de implementación comercial y cómo se calcula su potencial?
- ¿Cuál es el costo de generación de las fuentes de Energías Renovables Variables (ERV) existentes en la isla de Utila, Honduras y su producción?

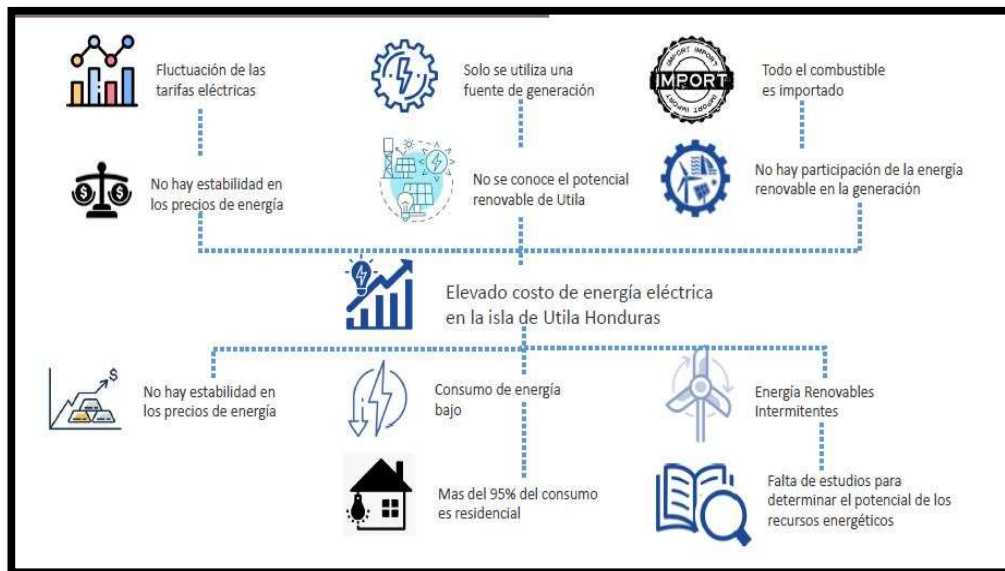
- ¿Qué porcentaje de Energías Renovables Variables (ERV) se puede utilizar sin desestabilizar el sistema y tener un costo de la energía eléctrica más estable?

Utilizando como base el comportamiento histórico de la demanda de energía de la isla de Utila, se pretende proponer una matriz de generación que incorpore las fuentes renovables locales y que no generen daños a los ecosistemas y estén dentro de los parámetros que establece las normativas de la municipalidad.

Debido a que el comportamiento del crecimiento vegetativo de la demanda en la isla es casi nulo, se pueden utilizar los datos que se recopilen durante los ocho meses para prospectarlos en un período de tiempo de corto plazo no mayor de tres años. Por su condición de isla es casi improbable que se produzca una extensión de la transmisión.

Las áreas donde es permitido construir o instalar equipos para la generación de energía eléctrica, ya están establecidas por las autoridades municipales y la probabilidad que estas cambien son nulas, al igual que mayores construcciones residenciales o comerciales que lleguen a requerir un incremento abrupto de la demanda de energía eléctrica, debido a la poca área superficial disponible para viviendas o complejos turísticos.

Figura 1.
Árbol del problema



Nota. Árbol del problema del elevado costo de la energía eléctrica en Utila. Elaboración propia con Power point.

OBJETIVOS

General

Lograr una matriz de generación de energía eléctrica diversificada con la incorporación de fuentes renovables en la isla de Útila, Honduras, con un costo de energía eléctrica más estable y un sistema eléctrico confiable.

Específicos

1. Determinar las fuentes Energías Renovables Variables (ERV) de aprovechamiento comercial existentes en la isla de Útila, Honduras, basado en los datos de radiación solar de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de Norte América (NASA), la medición de las velocidades del viento en los sitios autorizados para construir y la estimación de la biomasa producida.
2. Establecer el costo de generación de energía eléctrica de cada fuente de Energía Renovable Variable (ERV) basado en el potencial y disponibilidad de los recursos con el uso de software para obtener la producción de energía en los sitios autorizados por la municipalidad.
3. Calcular la participación que puede tener cada fuente renovable en la matriz de generación, sin provocar inestabilidad en el sistema y su efecto en el costo de la energía eléctrica de toda la matriz.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Toda literatura coincide que el éxito de la implementación de sistemas de generación con energía renovable variable pasa por una adecuada medición del recurso que se desea aprovechar. En el caso particular de la isla de Utila fue necesario tomar las mediciones del viento para determinar, al final del período de medición, los valores promedio de la velocidad del viento y su orientación.

Para el recurso solar se investigó los datos de radiación solar en la isla de Utila que proporciona la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de Norte América (*NASA*) y se compró con la base de datos que tiene el programa *Homer*.

Con la descripción anterior se observa que todas las variables involucradas en la investigación son del tipo cuantitativo, a excepción de la dirección del viento que será del tipo cualitativo.

El enfoque del estudio es mixto, ya que parte de las variables que se analizaron de los recursos existentes en la isla se pudieron expresar o medir con números, pero existen otras, como la dirección del viento que solo se pudo expresar con direcciones.

Con todos estos datos la investigación pudo determinar el potencial de generación de cada fuente de energía renovable que existe en la isla y que son comercialmente aprovechables para poder establecer una matriz de generación con la mayor participación de fuentes renovables sin que se afecte la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico ni que el costo de generación se eleve.

Esta investigación, tiene un alcance explicativo, ya que al final se pudo comparará el comportamiento del sistema aislado con diferentes porcentajes de participación de cada una de las fuentes de generación.

El diseño que se adoptó es no experimental, debido a que los datos obtenidos no pueden ser manipulados y son producto de las condiciones particulares de sitios específicos de la isla de Utila y de los hábitos de las personas residentes. El alcance de esta investigación no comprobaba ninguna hipótesis.

La población de estudio fue la característica del viento en los predios de *Utila Power Company (UPCO)* en la isla de Utila a una altura de 10 y 20 metros de altura, y la radiación solar en el punto específico de Utila.

Para un mejor desarrollo de la investigación, se diseñó realizarla en cuatro fases, primero la determinación de las fuentes de energía renovable existentes en la isla, seguido de una evaluación de las mismas, pasando a la tercera fase que será el desarrollo de las posibles matrices de generación, para finalizar en la implementación de un programa digital para obtener la matriz de generación óptima para Utila.

Las dos primeras fases son trabajo de campo y las últimas dos fueron de la evaluación de los datos obtenidos.

Primera fase, el punto de partida, fue recopilar la información de estudios previos de acceso público y luego se procedió a la instalación de un anemómetro para la recopilación del comportamiento del viento en la isla, como también se accedió a la base de datos de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de Norte América (*NASA*) para obtener los valores de radiación solar en los lugares donde es permitido ubicar paneles solares.

Segunda fase, en esta fase, con los datos obtenidos en la determinación de las fuentes de energías renovables, se determinó cuáles podrían ser implementadas de manera comercial y cuál es su potencial de producción de energía eléctrica. Siempre teniendo en consideración las limitantes legales sobre el uso de suelo en la isla.

Tercera fase, con el conocimiento del potencial energético de cada una de las fuentes de energía renovable disponibles y la capacidad instalada de los generadores a base de diésel se propusieron los diferentes escenarios de generación con la participación de cada tecnología disponible de manera comercial.

Cuarta fase, para finalizar la investigación se discutieron los datos obtenidos para los escenarios propuestos, ya con sus respectivas bases de datos se ingresaron a un programa digital y se modeló el comportamiento de cada uno de los casos y así se determinó el más óptimo para la isla de Utila.

Al finalizar todas las fases de la investigación se obtuvo un escenario con un porcentaje de participación de Energías Renovables Variables (ERV) por arriba del 50 %, lo que permite un costo de generación que sea menos variable con el cambio de los precios del combustible.

INTRODUCCIÓN

Enclavada en el caribe hondureño, Utila es una de las tres islas principales del archipiélago de las Islas de La Bahía y al igual que muchas islas alrededor del mundo presenta una dependencia total de combustibles fósiles para la generación de su energía eléctrica.

En la actualidad el servicio de energía eléctrica en la isla de Utila está siendo atendida por la compañía *Utila Power Company (UPCO)*, una compañía de capital privado que maneja la concesión municipal de la distribuidora local que utiliza motores a base de diésel para atender la demanda de energía eléctrica de la isla. Los precios de la energía eléctrica están regulados por tarifas que la Comisión Reguladora de Energía Eléctrica (CREE) publica cada tres meses.

Con las necesidades de cuidar el medio ambiente, diversificar las fuentes de energía y obtener un costo de generación de energía que no sea tan volátil, UPCO ha pensado en las fuentes de energías renovables como una alternativa en la diversificación de la matriz de generación de la isla.

Para lograr esta diversificación se debe evaluar las diferentes fuentes de Energías Renovables Variables (ERV) que se puedan implementar de manera comercial, con las condiciones presentes en la isla, tanto de calidad y cantidad del recurso renovable como de las restricciones de uso de suelo que estipula la alcaldía de Utila.

Incluir una alta penetración de energías renovables intermitentes puede traer consigo la inestabilidad en el sistema, por lo que se debe encontrar una

combinación entre las tecnologías y la disponibilidad de los recursos que logre una confiabilidad del sistema junto con la reducción de los costos de generación.

En el transcurso de la investigación se evaluaron las diferentes fuentes renovables que existen en la isla de Utila y que podrían ser integradas de manera comercial en la matriz de generación explorando el potencial de cada uno de ellos.

Para concluir la investigación se hizo uso de herramientas digitales, que han dado buenos resultados en otros casos, para poder evaluar los diferentes escenarios de generación y se pudo obtener un escenario con una participación de Energías Renovables Variables (ERV) mayor del 50 %.

En la discusión de los datos obtenidos y en las conclusiones se aprecia el proceso de análisis para poder integrar las Energías Renovables Variables (ERV) a la matriz de generación de la isla de Utila.

1. ANTECEDENTES

En los análisis realizados, expresan que el suministro de energía eléctrica de las islas, alrededor del mundo, se ha logrado por la interconexión con tierra firme mediante cables sub marinos o por medio de generación local a base de combustibles fósiles, predominando el diésel. Debido a las condiciones climáticas, la variabilidad de los precios de los combustibles fósiles, la logística de transporte y almacenamiento de los combustibles, se ha buscado incorporar Energías Renovables Variables (ERV) en la matriz de generación de los sistemas eléctricos aislados (Eras-Almeida AA, 2020).

Gas natural, recursos biológicos y las mareas son las fuentes de energía que existen en los océanos que tiene la característica de ser abundantes y limpias. Ya en las islas podemos encontrar el viento, la radiación solar, ríos y en algunos casos fuentes geotérmicas (Zhu, 2020).

Alrededor del planeta se han realizado estudios e implementaciones de micro sistemas híbridos en pequeñas islas, ya sea para un proyecto en particular o para toda la isla. Estas experiencias mencionan los diferentes escenarios de combinación de las tecnologías para obtener sistemas estables y viables tanto en lo técnico como lo económico. Los ejemplos son en su mayoría en islas africanas donde existen complejos turísticos y que la participación del diésel como fuente de energía es menor del 50 %. Karunanithi (K. Karunanithi, 2020)

Poder incorporar la cantidad exacta de la participación de cada una de las tecnologías de Energías Renovables Variables (ERV), tiene su complejidad debido a que busca cumplir múltiples objetivos que van desde la confiabilidad del

sistema hasta la disponibilidad del mismo, sin descuidar la parte económica del funcionamiento y la operación (Zhu, 2020).

Así mismo, Los desafíos técnicos para desarrollar un sistema eléctrico con una alta participación de ERV se basan, pero no se limitan, al aseguramiento de capacidad firme suficiente, flexibilidad de satisfacer las necesidades, asegurar la estabilidad del sistema, cumplir con las limitantes físicas, asegurar el funcionamiento efectivo de los sistemas de protección, mantener la calidad del voltaje (IRENA, 2018).

También estima que la planeación de la generación de un sistema eléctrico en islas pequeñas es un reto debido a dos factores : el primero es la planeación de la expansión que está limitada por los recursos disponibles, restricciones medio ambientales y la incertidumbre del crecimiento de la demanda y el segundo es la planeación operacional que dependerá de la baja inercia del sistema, la alta sensibilidad del voltaje y la frecuencia de la red respecto a las variaciones de la demanda y la generación de energía renovable (Ulloa, 2019).

Incorporar las ERV al azar en sistemas débiles y pequeños trae problemas operativos que no deben ser analizados de la misma manera en que se analizan los sistemas más estables.

Al final, la mayoría de las investigaciones concluyen que se puede implementar una matriz energética que tenga una participación considerable de las ERV complementado con una base de generación en diésel y también dejan claro que las condiciones de cada isla deben analizarse con las condiciones particulares en que funcionan (Eras et al., 2020).

Se utilizó el programa *HOMER* para el diseño y optimización del sistema eléctrico en San Martín, como también en la isla de *Bawean*, en Indonesia con resultados diferentes de la matriz final producto de las condiciones específicas de las Islas (Hantoro & Satwika, 2018).

Existen también otros programas utilizados para el desarrollo como Matlab o SAM que han dado resultados en islas del océano Pacífico y en África (Nur & Kayguzus, 2016).

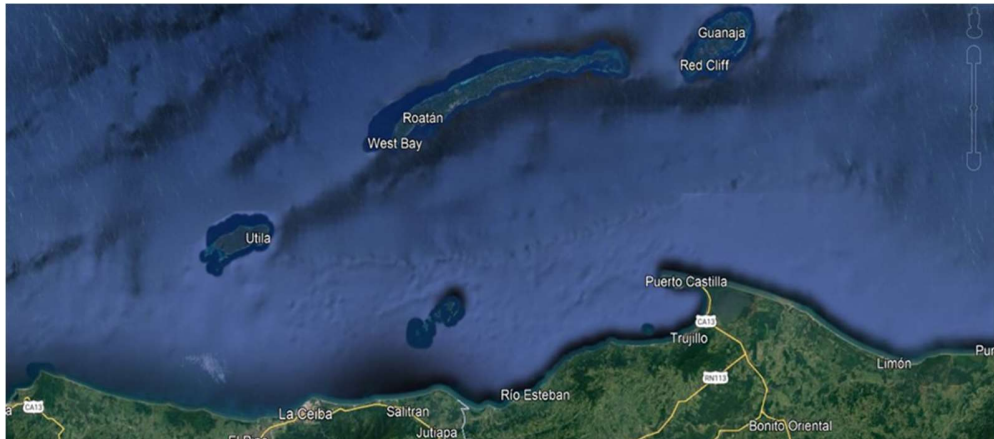
2. MARCO TEÓRICO

Honduras presenta condiciones geográficas que provocan la existencia de ciertas zonas remotas aisladas del resto de los grupos poblacionales del país. A lo anterior hay que agregar el escaso número de habitantes con un bajo consumo de energía lo que ha obligado a desarrollar sistemas aislados de energía en estas zonas del país.

Los sistemas aislados de energía, son instalaciones que no están conectadas a redes de transmisión o distribución eléctrica, por lo que su generación, almacenamiento y distribución se realiza en un ámbito local, la mayor parte de las veces, se suele utilizar grupos electrógenos a base de diésel para asegurar el suministro sea cual sea el estado del clima del momento.

Figura 2.

Mapa del departamento de Islas de la Bahía



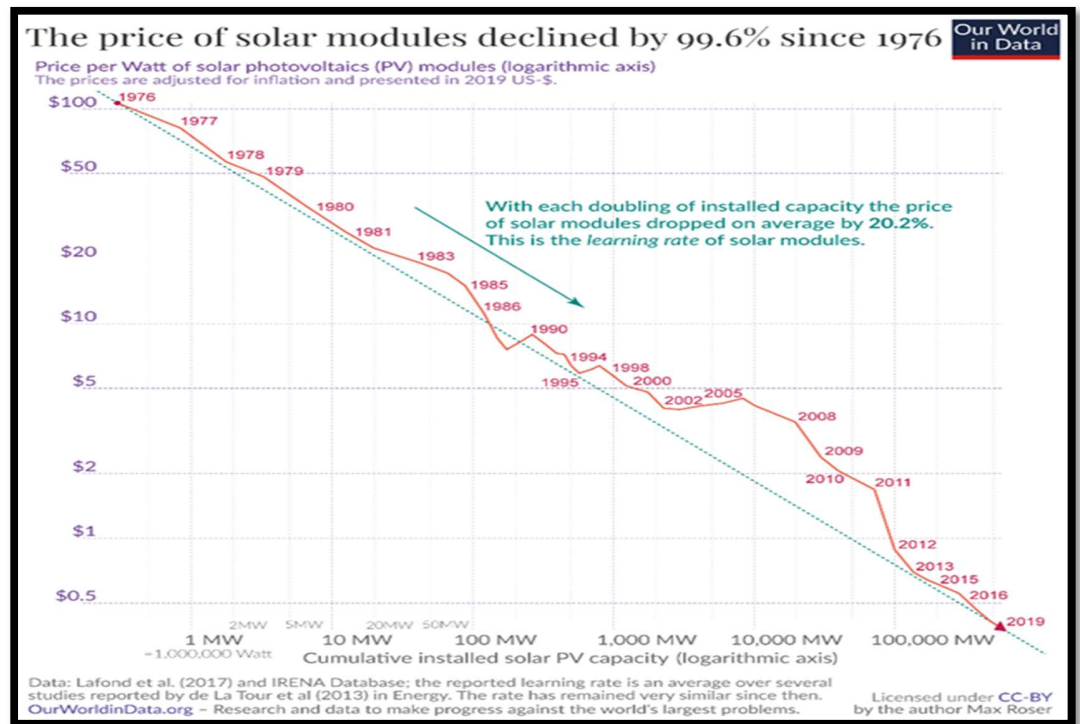
Nota. El mapa muestra la ubicación de la isla de Utila en Honduras. Obtenido de Google Earth, (<https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>) consultado el 20 de octubre de 2022. De dominio público.

En el caso particular del departamento insular de Islas de la Bahía, satisfacen sus necesidades de energía eléctrica por medio de sistemas aislados en cada una de las islas principales: Roatán, Guanaja y Utila.

Guanaja y Utila, en la actualidad, tienen sistemas eléctricos aislados que son abastecidos en su totalidad por grupos electrógenos que funcionan a base de diésel con una participación casi nula de otros tipos de tecnologías.

Figura 3.

Caída precios paneles solares 1976 a 2019



Nota: La gráfica muestra el comportamiento de los precios de paneles solares en los últimos años. Obtenido de *Our Word in Data* (2020) *Why did renewables become so cheap so fast* (<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>), consultado el 20 de octubre de 2022. De Dominio público.

Aun cuando el diésel es una alternativa para los sistemas aislados, presenta inconvenientes como la volatilidad del precio (con comportamiento alcista), la necesidad de importarlo, su logística de manejo, su almacenamiento y las emisiones al medio ambiente.

Todos estos inconvenientes unidos a la necesidad y exigencia creciente de generar energía eléctrica de forma limpia y sostenible, obliga a las empresas que

atienden estos sistemas a buscar en las energías renovables una alternativa de generación.

La mejora de las distintas tecnologías relacionadas con estas fuentes de energía y el descenso de los costos de generación (con predominio de energía fotovoltaica y eólica) han hecho que desde hace algunos años haya sido una solución muy viable para satisfacer la demanda del consumo energético y los costos de generación en muchos lugares aislados.

2.1. Sistemas híbridos

Un sistema Híbrido de Generación de Energía, según Alarcon (2015) es:

Aquel sistema que utiliza en una sola instalación varias fuentes de generación de energía, conectadas a una red de distribución. Están compuestos en su mayoría por fuentes renovables y generación fósil, un sistema de control, y pueden incluir baterías para acumular la energía producida. (pág. 1)

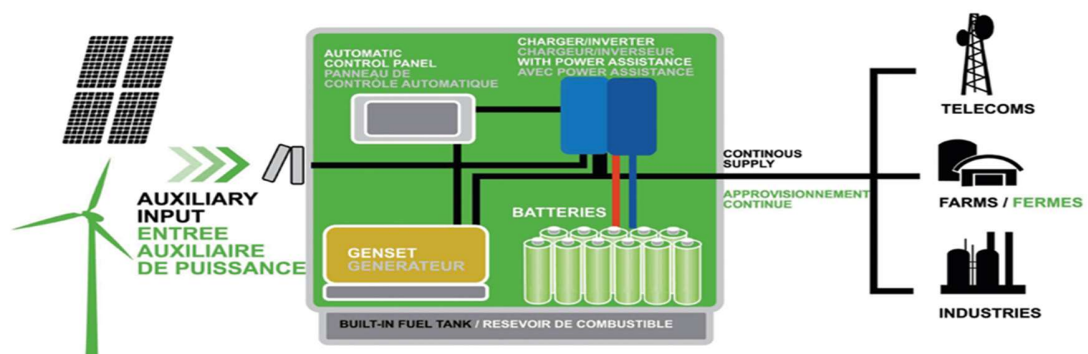
El mayor problema de los sistemas híbridos con un único tipo de fuente de Energía Renovable Variable (ERV), con un alto porcentaje de participación, es la variabilidad del clima y por lo tanto su comportamiento intermitente. Ello hace que, si se quiere asegurar el suministro, se deba instalar mayor capacidad de la requerida en el sistema de generación, o el sistema que se disponga para almacenamiento, o ambos; lo que incurre en un encarecimiento global de la instalación.

Una solución al problema anterior son los sistemas híbridos que emplean

dos o más fuentes diferentes de Energías Renovables Variables (ERV) para transformarla en energía eléctrica. Gracias a ello, se consigue aumentar la fiabilidad del suministro eléctrico, al estar basado en más de una fuente de energía que dependen de condiciones ambientales diferentes. Además, al ser sistemas más fiables, se puede disminuir la capacidad del sistema de almacenamiento de energía.

Figura 4.

Diagrama de un sistema híbrido



Nota: La figura muestra la configuración de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica. Obtenido del Atlas NRG (2022). *Sistemas Híbridos* (www.AtlasNRG.com) consultado el 20 de octubre de 2022. De dominio público.

El garantizar un suministro de energía eléctrica que cumple con los parámetros de calidad y el reducir los costos de la inversión inicial y de la operación, son los objetivos que buscan este tipo de soluciones. Para lograr estos objetivos se debe dimensionar de manera óptima cada uno de los equipos integrantes del sistema.

La primera idea para satisfacer la demanda de manera segura es sobre dimensionar la capacidad instalada de los equipos, con esto la confiabilidad

aumenta al igual que el costo de la inversión. En el otro extremo está el dimensionamiento por debajo de las necesidades, se logra disminuir los costos de inversión y de operación, pero la confiabilidad del sistema se ve afectada de manera negativa. Por tanto, dimensionar el tamaño óptimo de un sistema, mejora su fiabilidad y reduce sus costos.

Para ecologistas, los dos objetivos de optimización de un sistema híbrido de energías renovables intermitentes deberían estar basados los aspectos económicos y ambientales, dejando de lado los aspectos técnicos. Estos analistas buscan, en el objetivo ambiental, reducir las emisiones de dióxido de carbono, esto provoca un sistema con una alta participación de energías renovables variables.

En el objetivo económico los analistas apuntan a la reducción del costo del sistema lo cual resulta en un tamaño que cumple las necesidades de las cargas eléctricas. Al comparar los resultados de la optimización de cada uno de estos objetivos se encontró que los que se realizaron basado en el objetivo ambiental son de mayores costos, según Gómez (2020):

La implementación de un sistema de energía híbrido renovable (HRES, por sus siglas en inglés), requiere de la recolección de datos por un periodo, mínimo de un año, de los recursos energéticos renovables disponibles en la región de estudio. Los datos pueden contemplar información sobre la irradiación solar, la velocidad del viento y otros, como pueden ser la altura, la temperatura o el potencial de biomasa de la zona donde se desee instalar el sistema. (p. 2)

Los Sistemas Híbridos de Generación de Energía (SHGE), cuando son dimensionados de forma correcta, presentan menor costo de la energía generada, mayor confiabilidad, además de beneficios ambientales en relación a sistemas basados en una única fuente renovable o sistemas de generación tradicionales. Sin embargo, el dimensionamiento de este tipo de sistemas se presenta como una tarea compleja, debido a la característica variable de los recursos renovables, solar y eólica, como también de la carga, el comportamiento no lineal de algunos, componentes del sistema y la alta interacción entre las variables del sistema.

Varias técnicas de optimización han sido aplicadas para resolver este problema. Estos métodos tradicionales de optimización presentan dificultades para tratar problemas con esta complejidad, por otro lado, técnicas más modernas como los algoritmos evolutivos muestran buen desempeño en estas aplicaciones. Sin embargo, no hay unanimidad en que método es el mejor entre todos los disponibles.

La experiencia demuestra que el proceso de optimización de sistemas híbridos aislados es más complejo que en los sistemas no híbridos, y no se logra de manera fácil utilizando los procedimientos clásicos de optimización, ya que el problema que debe resolverse tiene multitud de soluciones posibles, distintas combinaciones de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, generadores diésel, baterías de almacenamiento, distintas estrategias de gestión del sistema y muchas mas, unido al alto grado de variabilidad que presentan los recursos renovables y a que algunos de los componentes de los sistemas presentan características no lineales hacen que exista un gran número de variables que pueden influir en este proceso de optimización.

2.2. Fuentes de energías renovables

En varias zonas de Honduras existen fuentes energéticas renovables para la generación de energía eléctrica y la isla de Utila no es la excepción. La mayoría de las fuentes renovables son dependientes de la energía que emana el sol y que por varias transformaciones y el paso del tiempo se manifiestan de diferentes maneras, como la biomasa, el viento y el agua. Las únicas dos manifestaciones que no dependen de la energía del sol son la geotermia y las mareas.

2.2.1. Energía solar

Para determinar la potencia de la energía solar Rubio (2016) estima:

El sol tiene una potencia energética estimada de 170 *TeraWatios* de los cuales un 70 % atraviesan la atmósfera terrestre (119 TW), y de esta el 66% (79 TW) calienta la corteza terrestre". Para el aprovechamiento de esta energía se emplean dos métodos muy utilizados, estos son: la conversión fotovoltaica o la calefacción de algún fluido. (p.3)

Figura 5.

Panel solar y calentador de agua solar



Nota. La figura muestra tecnologías para aprovechamiento solar. Obtenido de Eco Inventos (2022). *Datos interesantes de la energía solar que deberías conocer* (<https://ecoinventos.com/datos-interesantes-sobre-la-energía-solar/>) consultado el 21 de octubre de 2022. De dominio público.

Esta energía se puede aprovechar con dos sistemas, el primero de ellos utiliza paneles solares, “una célula PV es un dispositivo semiconductor que puede convertir la energía solar en electricidad de corriente continua a través del efecto fotovoltaico. Un panel fotovoltaico se compone de varias células fotovoltaicas conectadas” (Bouhier, 2017, p. 11).

La potencia nominal de un panel es especificada en las Condiciones de Prueba Estándar (STC) que incluyen una temperatura de unión celular definido (como norma de 25 °C) y la irradiación solar (por lo general 1000 W/m²) y es la máxima potencia de salida en este estado expresada en *Watts* pico (Wp). La potencia de un panel depende del área de las celdas y la eficiencia.

IRENA (2019) expone que: “El grado de despliegue de los sistemas solares FV instalados en los tejados ha aumentado considerablemente en los últimos años

debido, en gran medida, a políticas de apoyo, como la medición neta y los incentivos fiscales “ (p. 5).

Otra técnica para el aprovechamiento de la energía solar es utilizar la radiación del sol, “estos sistemas emplean superficies colectoras de los rayos solares para calentar un fluido que es forzado a describir un ciclo termodinámico. El trabajo útil obtenido a través de este ciclo permite impulsar un generador de energía eléctrica” (Valenciaga, 2001, p. 7).

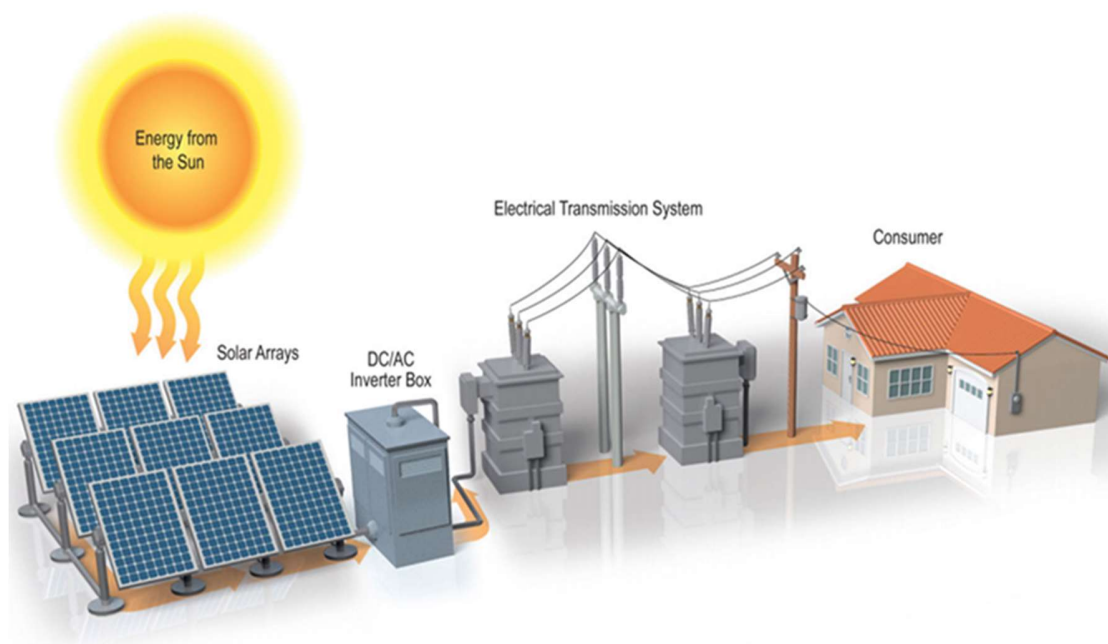
Una descripción de un sistema fotovoltaico conectado a la red se describe de la siguiente manera: “consiste, de manera básica, en un generador fotovoltaico (módulos de paneles) acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica (Cortez, 2017, p. 18).

Injectar energía a la red tiene variadas aplicaciones, desde pequeños sistemas de pocos *kilowatts* pico (kWp) de potencia instalada hasta centrales de varios *megawatts* pico (MWp).

El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, se puede utilizar en el consumo de manera directa o entregarla a la red eléctrica de distribución.

Figura 6.

Componentes de un parque solar



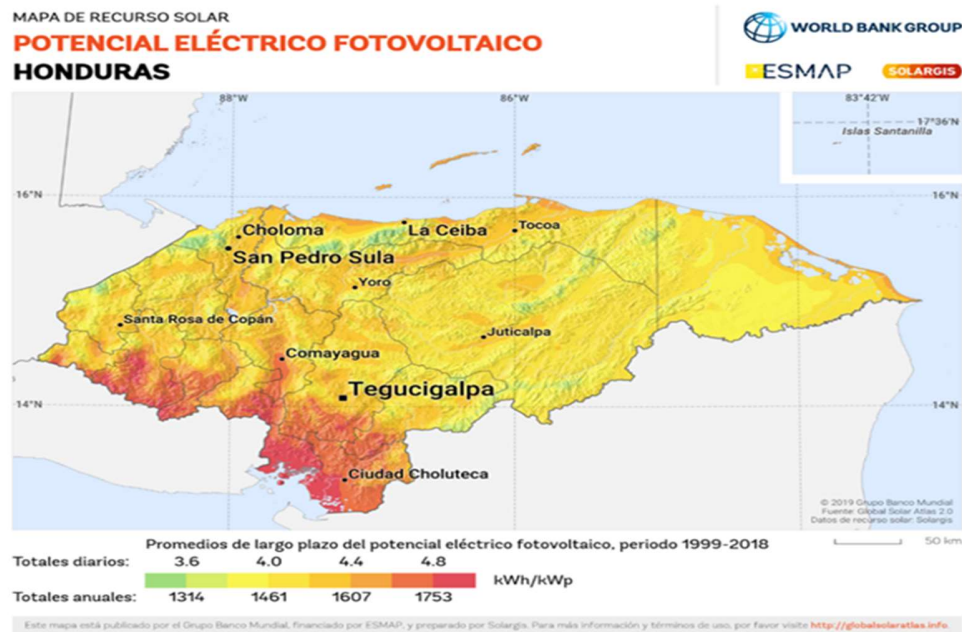
Nota. La figura muestra la configuración de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. Obtenido de Renew Wisconsin (2018), *How do solar panels and solar projects work?* (www.renewwisconsin.org/solarfarms/) consultado el 19 de octubre de 2022. De dominio público.

Estas dos funciones las realiza un inversor de corriente directa a corriente alterna diseñado de manera especial para esta aplicación.

En la estructura física de un sistema fotovoltaico conectado a red, se pueden distinguir como elementos fundamentales: - Módulos fotovoltaicos. - Inversor para la conexión a la red. - Dispositivo de intercambio con la red eléctrica. - Contador de energía bidireccional. Los paneles fotovoltaicos pueden utilizarse en los sistemas híbridos, como los cargadores de las baterías, tal como se puede apreciar en la figura 5.

Figura 7.

Mapa del potencial solar de Honduras



Nota. La figura muestra el potencial solar de las regiones de Honduras. Obtenido de Global Solar Atlas (2022). *Mapas de recursos solares de Honduras.* (solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/honduras) consultado el 21 de octubre de 2022. De dominio público.

2.2.2. Energía eólica

Desde la antigüedad el ser humano ha hecho uso de la energía eólica ya sea para transportarse en barcos de vela o para la molienda. Una descripción de como se produce el viento es “La energía eólica tiene su origen, como el de la mayor parte de las fuentes energéticas del planeta, en la energía solar” (Fernandez, 1993, p. 7).

“El calentamiento de masas de aire como consecuencia de la radiación solar contribuye a la aparición de corrientes ascendentes, siendo el espacio que liberan

ocupado por otras masas adyacentes de aire más fríos” (Fernandez, 1993, p. 10).

Fernández (1993), también se considera que:

Ciertas características del terreno pueden provocar la aparición de unos vientos locales que tienen una escasa dependencia con los vientos globales. Una muestra clara de esto son las zonas costeras, donde la característica local de cercanía de una gran masa de agua provoca la formación de un viento que fluye hasta el interior durante el día y hacia el mar durante la noche. (p. 13)

Siempre se debe tener presente que:

La energía eólica se basa en tecnologías y aplicaciones que permiten el aprovechamiento de la energía cinética del viento para producir energía eléctrica o mecánica. Según el sitio donde se lleve a cabo este proceso, la energía eólica puede ser *onshore*, cuando los aerogeneradores están ubicados en tierra firme con alta incidencia de vientos superficiales, u *offshore*, cuando se desarrolla la actividad en mar abierto. (Clementi, 2017, p. 17)

Bergey Windpower Co. (2019), El fabricante de turbinas de viento comenta “La energía eólica debe ser considerada con más cuidado que la energía solar. La energía eólica sigue patrones estacionales que ofrecen el mejor rendimiento en los meses de invierno y el menor rendimiento en los meses de verano” (p. 2).

Esto es justo lo contrario de la energía solar. Por esta razón, los sistemas eólico y solar funcionan bien juntos en sistemas híbridos. Estos sistemas híbridos brindan una producción más constante durante todo el año que los sistemas solo eólicos o solo fotovoltaicos.

Uno de los segmentos de mercado más activos para los pequeños fabricantes de turbinas eólicas es el de los propietarios de sistemas que solo utilizan paneles fotovoltaicos que están ampliando su sistema con energía eólica.

Se debe tomar en cuenta que:

El concepto de parque eólico va asociado a un conjunto de aerogeneradores con potencias individuales del orden de 0,6 MW a 2 MW que suman una potencia entre 10 MW y 20 MW, aunque también existen parques eólicos con aparatos de potencia más pequeña, entre 25 kW y 50 kW, que tienden en la actualidad a ser sustituidos por otros más potentes. (Fernández, 2012, p. 181)

Los aerogeneradores aprovechan la energía del viento para producir electricidad. Lo consiguen gracias a sus palas, que capturan el viento y giran. Cuando no hay viento, las palas forman un ángulo de 45°, de modo que el aerogenerador pueda extraer el máximo de energía de los vientos suaves, este movimiento es gracias a que cuentan con una veleta y un anemómetro que permiten conocer la velocidad y dirección del viento. Los aerogeneradores empiezan a producir energía cuando el viento alcanza

velocidades cercanas a los cuatro metros por segundo. (Hernández, 2005, p. 181)

En Honduras hay un gran potencial de recursos autóctonos de Energías Renovables Variables (ERV). Estos recursos podrían desarrollarse a precios competitivos debido a la probable tendencia a largo plazo de elevados precios del petróleo, Honduras cuenta con tres plantas eólicas en operación comercial, que ayudan a reducir la demanda de consumo de energía, con una capacidad instalada total hasta el año 2018 de 225 MW comerciales para el aprovechamiento de este tipo de energía.

Figura 8.

Aerogenerador de 10 kW

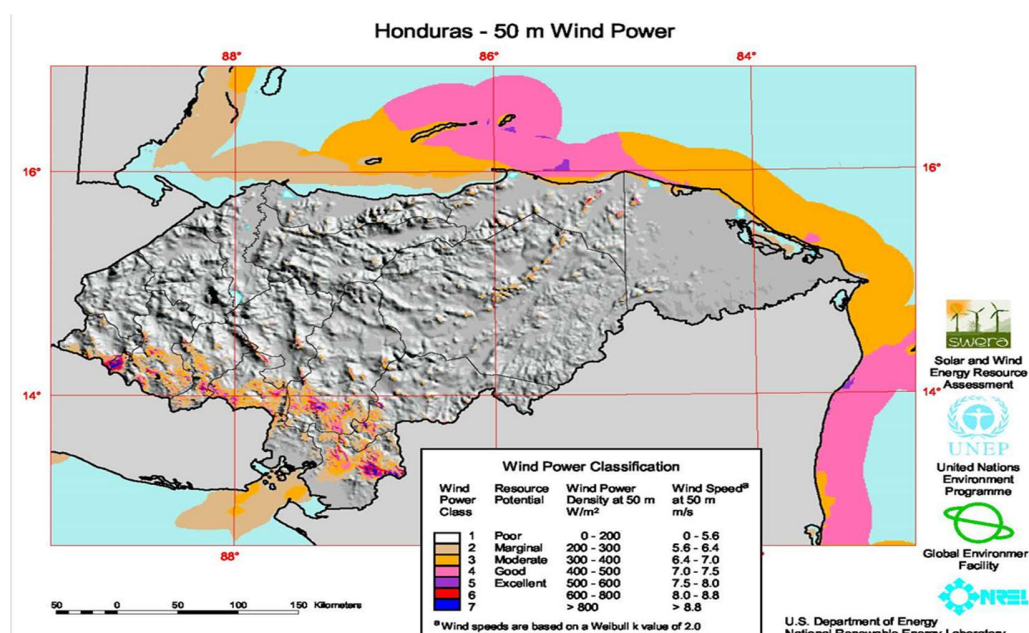


Nota. La figura muestra un aerogenerador de 10 kW. Consultado de Kansas Wind Power (2015). *Bergey Wind Power Wind Turbines*. (http://kansaswindpower.net/bergey_wind_generators.htm), consultado el 18 de octubre de 2022. De dominio público.

La importancia de este recurso energético se evidencia en las expectativas que se tienen sobre el futuro del mismo. Es considerada la Energía Renovable Variable (ERV) más limpia y en ciertos emplazamientos su costo de energía es de los más bajos.

Existen muchas instalaciones de aerogeneradores en el mar y son conocidas como *off shore*, estas instalaciones permiten utilizar aerogeneradores de mayor tamaño y potencia debido a que no tienen limitantes de espacio.

Figura 9.
Potencial eólico de Honduras



Nota. La figura muestra el potencial del viento evaluado a una altura de 50 metros. Obtenido de ACSIO Consultores (2017). *Mapa de Potencial Eólico de Honduras.* (<http://juanpablohernandezflores.blogspot.com/2013/mapa-de-potencial-eolico-de-honduras-ca.html?m=1>) consultado el 21 de octubre de 2022. De dominio público.

2.2.3. Energía geotérmica

El Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC , 2022) define la energía geotérmica como: “La energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra, engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cuales quiera que sea su temperatura profundidad y procedencia” (p.1). Este es el tipo de Energía Renovable Variable (ERV) más abundante.

Argumenta Exposito (2015) en su trabajo que:

La energía geotérmica somera (baja y muy baja temperatura) es una gran alternativa. Capta y aprovecha el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad, o en acuíferos pocos profundos; en cualquier punto de la superficie del planeta, de manera directa o a través de bombas de calor. (p. 101)

Figura 10.

Instalación de un sistema ORC en fuente geotérmica



Nota. Equipo de ciclo orgánico Rankie que opera con agua a 101° C Obtenido de Electratherm (2018). *Geothermal Brine Heat Recovery In Romania* (<http://electratherm.com/geothermal-brine-heat-recovery-in-romania/>) consultado e 18 de octubre de 2022. De dominio público.

En un trabajo realizado se describe la clasificación de los yacimientos geotérmicos de la siguiente manera:

Yacimientos de alta entalpía en los que se cumplen las condiciones clásicas de existencia de un yacimiento y el foco de calor permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y alta temperatura (superior al menos a los 150°C). Las características termodinámicas del fluido permiten su aprovechamiento para producción de electricidad. Yacimientos de media entalpía en los que los fluidos se encuentran a temperaturas situadas entre los 100 y los 150°C, lo que permite su uso para producción de electricidad mediante ciclos binarios que, en general, tienen rendimientos algo inferiores. Yacimientos de baja entalpía, cuando la temperatura del fluido es

inferior a los 100°C y su aplicación son los usos directos del calor (calefacción, procesos industriales y usos en balneoterapia. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) , 2008, pág. 21)

2.2.4. Energía hidroeléctrica

La fuerza del agua en movimiento es uno de los recursos energéticos renovables más empleados. Más del 20 por ciento de la electricidad del mundo se origina en las centrales hidroeléctricas. La energía hidroeléctrica que se puede obtener en una zona depende de los cauces de agua y desniveles de la misma, y existe por lo tanto, una cantidad máxima de energía que puede obtenerse por este medio. (EPEC, 2019, p. 4)

Una de las principales ventajas que presentan los aprovechamientos hidroeléctricos es que permiten dar solución conjunta a otro problema importante: la falta de agua. La construcción de la presa necesaria para el salto hidroeléctrico genera un embalse que puede ser explotado no sólo con fines energéticos sino para el consumo humano o el abastecimiento de sistemas de regadío o evitar inundaciones.

La implantación de mini centrales hidroeléctricas está experimentando un considerable impulso en los últimos años. En los países desarrollados las mini centrales permiten obtener energía en aquellas localizaciones donde una gran central no sería viable además de minimizar el impacto ambiental que produce la obra civil, presa, edificio de la central” (Sarasúa, 2009, p.39).

Las mini centrales, en los países en vías de desarrollo permiten la electrificación de zonas rurales alejadas de los grandes núcleos de población proporcionando un empuje decisivo para su crecimiento socioeconómico. En los países desarrollados las mini centrales son opción en los lugares aislados que no tienen acceso al sistema interconectado.

Figura 11.

Mini turbina hidráulica de 20 kW



Nota. La figura muestra una mini turbina hidráulica. Obtenido de Canyon Hydro (2018). *Ejemplo de sistemas de Canyon Hydro en funcionamiento* (http://canyonhydro.com/micro_sp/gallerymicro/microgallery_sp.html) consultado el 21 de octubre de 2022. De dominio público.

Es más común el aprovechamiento del potencial hídrico por medio de

grandes centrales hidroeléctricas. En menor tamaño se le puede aprovechar a través de micro turbinas. La utilización de estas mini centrales hidroeléctricas está limitada por las características del lugar de su instalación y provocan un impacto ambiental mínimo.

2.2.5. Energía de biomasa

Se puede definir como biomasa a: “toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo en ella a los materiales procedentes de su transformación natural o artificial” (Toscano, 2009, p. 12).

La biomasa se puede aprovechar de dos maneras; quemándola para producir calor o transformándola en combustible.

Figura 12.

Planta de biomasa de 75kW



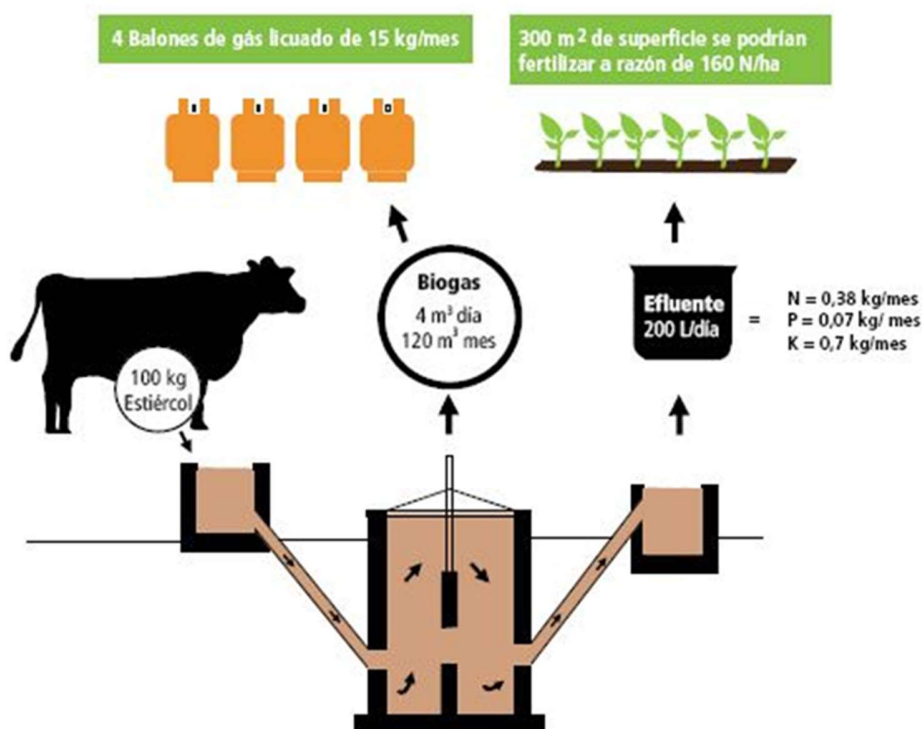
Nota. La figura muestra una planta de generación de energía eléctrica que funciona con biomasa. Obtenido de *Solar impulse Foudation* (2014), *Mini Green Power turns Green waste into electricity and heat* (<http://solarimpulse.com/companies/mini-green-power>), consultado el 20 de octubre de 2022. De dominio público.

La principal ventaja de la biomasa es ser una fuente de energía limpia y

con pocos residuos que además son biodegradables y se producen de forma continua como consecuencia de la actividad humana y por los residuos animales por lo que es considerada como renovable e inagotable, su desventaja es que se necesitan grandes cantidades de plantas y por ende de terrenos.

Figura 13.

Proceso de producción de biogás



Nota. La figura muestra la configuración de un biodigestor para producir biogás. Obtenido V. García (de Red Agrícola, (www.redagricola.col) consultado el 19 de octubre de 2022. De dominio público.

“La biomasa tiene una naturaleza muy heterogénea. Existen muchos tipos

de biomasa que se puede considerar para fines energéticos. Básicamente, la biomasa más abundante es la biomasa lignocelulósica que está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina” (Martin, 2020, p. 18).

En el caso de su transformación a combustible se pueden obtener combustibles sólidos (leña, astillas, carbón vegetal), líquidos (biocarburantes, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos) o gaseosos (biogás, hidrógeno).

2.2.6. Energía del mar

Según algunos autores, la energía oceánica se obtiene a partir de la energía potencial, cinética, térmica o química del agua de mar, que puede ser transformada para suministrar electricidad, energía térmica o agua potable. Esta energía proviene de seis fuentes diferentes: olas, amplitud de mareas, corrientes de mareas, corrientes oceánicas, conversión de energía térmica oceánica y gradientes de salinidad. (Mora, Bustamante, & Ramirez, 2020)

También se describe que la energía proveniente del oleaje marino, se obtiene a partir de la fuerza mecánica producida por las olas generadas a través de la acción del viento sobre el agua. En cuanto a las corrientes marinas, la energía se obtiene gracias a la fuerza cinética del agua que ocasiona el movimiento de las partículas del agua. (Benbuzid & Benbuzid, 2014)

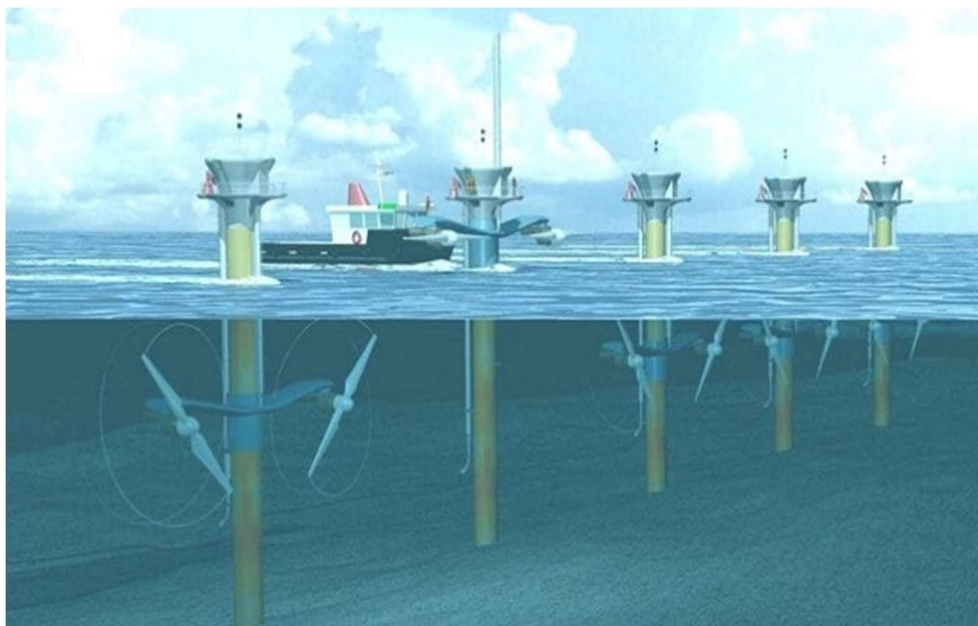
La implementación de cada tecnología dependerá de las condiciones geográficas específicas de la región, la disponibilidad de la implementación de la tecnología, leyes ambientales y de las regulaciones que imponen las autoridades respecto al uso del lecho marino y de las costas.

Las corrientes oceánicas se pueden clasificar en, corrientes superficiales y corrientes profundas. Cerca de la costa, las corrientes superficiales son impulsadas por los vientos y las mareas que contribuyen a que el agua avance y retroceda conforme el nivel del mar aumenta o disminuye.

Térmica oceánica es un método para transformar en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua que se encuentra en la profundidad.

Figura 14.

Turbinas para aprovechamiento del potencial marítimo



Nota. La figura muestra la disposición de turbinas marítimas. Obtenido de Electricas.net (2018) *Nueva referencia en la energía mareomotriz gracias a las turbinas pioneras.* (<https://www.electricas.net/energia/mareomotriz/nueva-referencia-la-energia-mareomotriz-gracias-las-turbinas-pioneras/>) _consultado el 19 de octubre de 2022. De dominio público.

Si bien en la actualidad existen dos sistemas para el aprovechamiento de esta fuente energética los rendimientos obtenidos son bajos. La tecnología utilizada para su explotación se encuentra en una incipiente etapa experimental. Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. Solo el 0,01 % del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias con poca pérdida de energía.

Así, la energía generada en cualquier parte del océano termina en los bordes continentales. En comparación la densidad de energía de las olas por metro de costa es un orden de magnitud mayor que la densidad de energía solar por metro cuadrado, constituyendo por lo tanto un recurso de gran potencialidad.

De los sistemas ideados para el aprovechamiento de la energía del mar, se pueden clasificar entre dispositivos flotantes y los fijos a tierra firme. Todos ellos se encuentran en etapa de experimentación. La energía estimada que se disipa por las mareas es del orden de 22.000 TWh al año. De esta energía se considera recuperable una cantidad que ronda los 200 TWh.

El obstáculo principal para la explotación de esta fuente es el económico. Los costos de inversión tienden a ser altos con respecto al rendimiento. La limitación para la construcción de estas centrales, no solo se centra en el alto costo de la energía producida, sino también en el impacto ambiental que generan.

2.3. Almacenamiento de energía

“El almacenamiento de energía se refiere al conjunto de formas, sistemas y distintas tecnologías que se conocen para transformar y almacenar la energía para poder usarla a conveniencia cuando se necesite posteriormente” (Garcia,

2021, p. 18).

Mayoral (2019) expone que: “Los principales beneficiados con la implementación de sistemas de almacenamiento, son los sectores de generación, transmisión y distribución de energía” (p. 16-17).

En los tipos de almacenamiento de energía en baterías podemos encontrar: batería de iones de litio, baterías de sodio – azufre, Plomo – ácido Carbón.

Endemaño (2016) en su trabajo nos describe cada uno de los tipos de baterías de la siguiente manera:

Las baterías de iones de litio han experimentado un crecimiento considerable para aplicaciones estacionarias de almacenamiento de energía. Siendo ya una tecnología comercial madura en las aplicaciones electrónicas, esta tecnología se está posicionando como líder en el sector de los vehículos eléctricos, que usan formatos de celdas y packs cada vez más grandes, llegando a capacidades de 15 a 20 kWh para los vehículos PHEV y 50 kWh para todos los vehículos eléctricos. (p. 7)

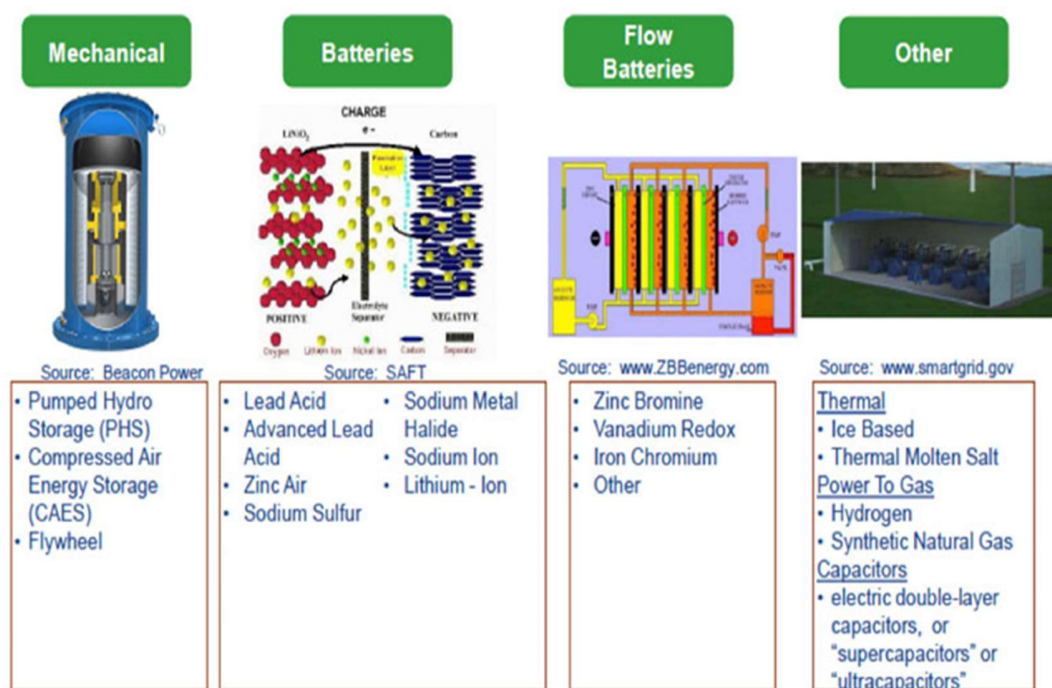
Para las baterías de sodio – azufre expresa:

Las baterías de sodio – azufre (NaS) es una tecnología comercial de almacenamiento de energía que se ha ido buscando su puesto en aplicaciones como brindar apoyo en las redes de distribución e integración

de energía eólica. La tecnología de baterías de sodio – azufre tiene mucho potencial para el uso en los servicios de redes, debido a su alto tiempo de descarga (alrededor de 6 horas). (Endemaño, 2016, p. 8)

Figura 15.

Tecnologías de almacenamiento de energía



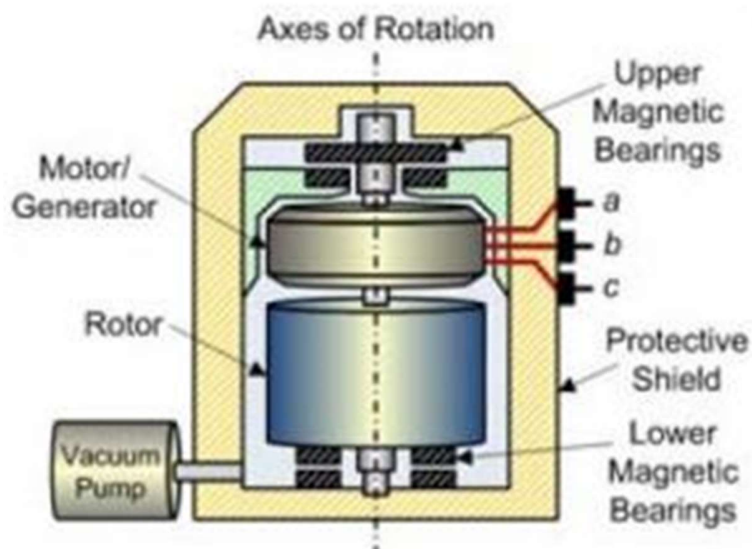
Nota. La figura muestra los diferentes tipos de tecnologías para el almacenamiento de energía Obtenido de Illuminet (2018). *El valor del almacenamiento de la energía eléctrica* (<https://iluminet.com/almacenamiento-energia-renovable/#>) consultado el 19 de octubre de 2022. De dominio público.

Y para finalizar la de Plomo – ácido carbón como:

La tecnología plomo – ácido carbón exhibe altos índices de carga y descarga sin el efecto de detrimento aparente en su vida útil, como ocurre por lo general en las baterías plomo – ácido ventiladas tradicionales (VLA) y las baterías VRLA. Esta característica le permite a las baterías de plomo – ácido carbón suministrar y soportar grandes índices de corriente, solo disponibles en las caras baterías de níquel metal hidruro (Ni – MH) y las baterías de iones de litio (Li - ion). (Endemaño, 2016, p. 10)

Figura 16.

Volante de inercia o flywheel



Nota. La figura muestra la disposición de un volante de inercia. Adaptado de M. Molina (2010). *Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications*. (<https://www.intechopen.com/chapters/6820>), consultado el 17 de octubre de 2022. De dominio público.

También existen tecnologías mecánicas para almacenar energía y como nos explica están los volantes de inercia, conocidos también como *flywheel*, y expresa que: “consisten en rotores hechos de acero o compuestos de carbón” (Endemaño, 2016, p. 20).

Estos almacenan energía en forma de energía cinética, que es proporcional a la masa del rotor y su velocidad angular. El bloque motor/generador se acopla al mismo eje del volante el cual rota al vacío para minimizar las pérdidas.

Los rotores se sujetan mediante soportes pasivos o electromagnéticos, con soportes magnéticos se usan superconductores de alta temperatura, los cuales requieren enfriamiento criogénico para lograr un mayor rendimiento.

2.4. Procedimientos para optimizar sistemas aislados con Energías Renovables Variables (ERV)

Como ya se expuso, el dimensionamiento óptimo de los equipos que componen la matriz de generación es vital en sistemas aislados y repercuten más en sistemas pequeños donde los costos de las inversiones iniciales se vuelven tan importantes por el tamaño del sistema.

Existen dos maneras de poder realizar la optimización de sistemas aislados, una manera es de manera manual, realizando una solución geométrica y otra utilizando varios programas computacionales desarrollados para esta función. Las soluciones digitales han sido aplicadas en diferentes partes del mundo y cuando han sido exitosos coinciden que se debe a una fuente de datos muy confiables.

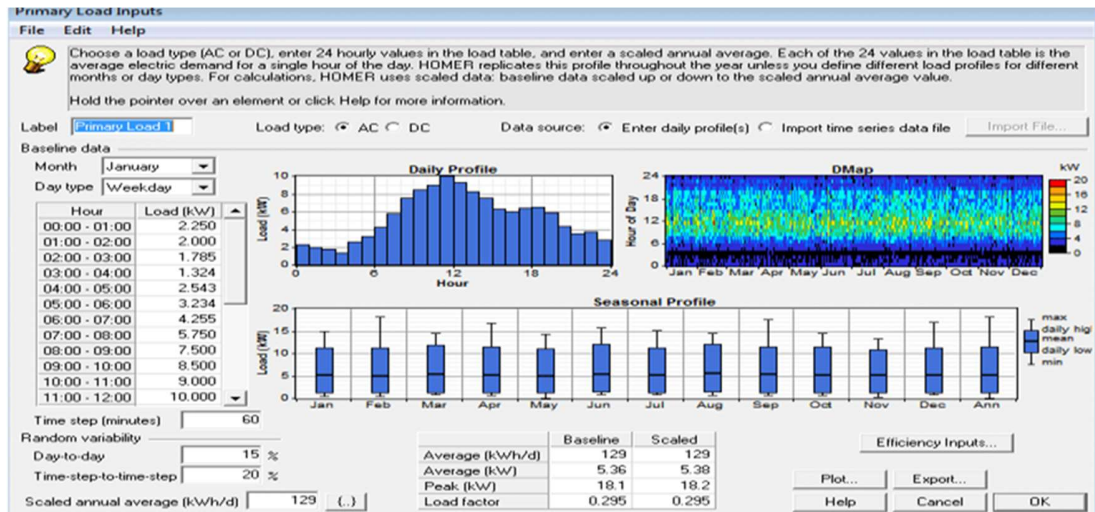
2.4.1. Homer

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables, NREL por sus siglas en inglés, desarrolló un programa para optimizar los sistemas híbridos con múltiples tecnologías de generación y fue nombrado como *HOMER, Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources*, este programa se ha utilizado en todos los sectores, tanto para islas como en comunidades pequeñas hasta campus conectados a una red robusta o bases militares.

Este programa tiene tres versiones una para sistemas aislados, otra para generación distribuida y una tercera versión para sistemas híbridos conectados a una red principal. La versión para sistemas aislados permite la optimización a través de la simulación del comportamiento de las diferentes fuentes de generación que utilizan Energías Renovables Variables (ERV). Acepta hasta nueve módulos de fuentes de energía como son: solar fotovoltaica, viento, baterías, generadores diésel, biomasa, hidro, *CHP*, hidrógeno y conexiones a otros sistemas.

Figura 17.

Vista de Homer



Nota. La figura muestra una captura de pantalla del software Homer Obtenido de University of Strathclyde (2015). *VIP: Energy resources analysis with the HOMER software.* (<https://strathclydee4d.wordpress.com/2015/04/22/energy-resources-analysis-with-the-homer-software/>), consultado el 19 de octubre de 2022. De dominio público.

Homer es un programa que simula un sistema viable para todas las posibles combinaciones que se desean considerar no solo desde el aspecto técnico si no también el aspecto financiero.

2.4.2. Matlab

Matlab es una abreviación de *Matrix Laboratory* y es un lenguaje de programación de multi-paradigmas y un ambiente de computación numérico desarrollado por *MathWorks*. *Matlab* es un producto que provee todas las herramientas que se necesitan para desarrollar un modelo matemático para la modelación de micro redes. Integra computación, visualización y programación en un ambiente fácil de utilizar donde los problemas y las soluciones son

expresadas en una notación matemática familiar.

Hay que recalcar que no es un programa para un usuario final y es la base para desarrollar programas más accesibles para un usuario final, *Homer* utiliza el Matlab como algoritmo base.

2.4.3. Regresión lineal

Este concepto matemático es la base bajo el cual se elaboran los programas digitales antes expuestos. De la técnica de regresión lineal se dice:

Es utilizada para establecer relaciones entre variables dependientes continuas de valores real y una o más variables independientes. El objetivo de este análisis es identificar una función que describe de la mejor manera posible, la relación entre dichas variables. De modo que el valor de las variables dependientes se puede predecir utilizando las variables independientes. (Montero, 2016, p. 1)

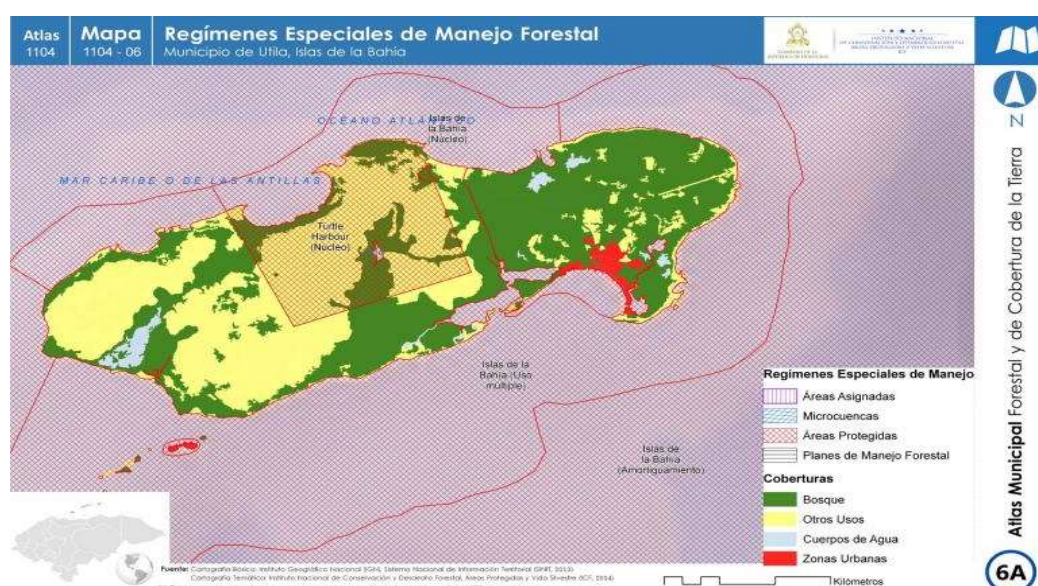
En su aplicación para predicción de carga, ésta puede estimarse a partir de variables independientes como condiciones climáticas, y otras variables que puedan influenciar la carga eléctrica.

3. PRESENTACIÓN DE DATOS

Utila es una isla con una superficie de 44 km² y como se aprecia en el mapa de regímenes especiales de manejo forestal, las microcuencas son inexistentes por lo que no se puede utilizar tecnología para aprovechamientos hidráulicos, alrededor de la isla son áreas protegidas lo que no permite la implementación de tecnología mareomotriz.

Figura 18.

Regímenes especiales de manejo forestal en Utila



Nota. La imagen muestra el mapa de los regímenes de manejo forestal en la isla de Utila. Obtenido del Instituto Geográfico Nacional de Honduras (2018). *Utila Atlas Forestal Municipal* [Regímenes Especiales de Manejo Forestal] (<https://inparsa.net/atlas/sites/default/files/1104%20Anexo%20Estad%C3%ADstico%20Atlas%20Municipal%20Utila.pdf>), consultado el 23 de junio de 2023. De dominio público.

Tabla 1.

Implementación de energías renovables en Utila

Tecnología	Implementación	Causa
Hidráulica	No se puede implementar	No hay fuentes hídricas
Geotérmica	No se puede implementar	No hay manifestaciones geotérmicas
Mareomotriz	No se puede implementar	Hay zonas protegidas
Solar	Viable implementarla	Alta radiación solar y área disponible
Eólica	Viable implementarla	Presencia del recurso

Nota. Diferentes tipos de fuentes de Energías Renovables Variables (ERV) de posible uso en Utila y su implementación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Dado las condiciones expuestas, las fuentes de energías renovables variables que se pueden aprovechar son el viento y el sol.

3.1. Recurso del viento

Los datos para evaluar el recurso del viento se obtuvieron del monitoreo de doce meses instalando un anemómetro en un mástil de 20 m de altura, para registrar cada cinco minutos la velocidad y dirección del viento en los predios de *Utila Power Company (UPCO)* y en punto específicos donde las autoridades municipales permiten la instalación de los aerogeneradores y las obras necesarias.

Con más de ciento cinco mil datos recopilados, se hace un análisis de la distribución de Weibull, para obtener dos coeficientes (coeficiente a y coeficiente k) que son esenciales al momento de evaluar el comportamiento de los aerogeneradores con las condiciones de viento evaluado.

Tabla 2.

Velocidades promedio por mes

Velocidad promedio del viento (m/s)	Altura de anemómetro	
	10 m	20 m
jun-22	3.8	6.2
jul-22	3.6	5.6
ago-22	3.4	5.2
sep-22	2.8	4.4
oct-22	2.8	4.5
nov-22	3.6	5.9
dic-22	3.1	5.0
ene-23	2.8	4.6
feb-23	3.5	5.7
mar-23	3.7	5.9
abr-23	4.1	6.6
may-23	3.6	5.8

Nota. Velocidades del viento en promedio a 10 y 20 metros de altura. Elaboración propia con Excel.

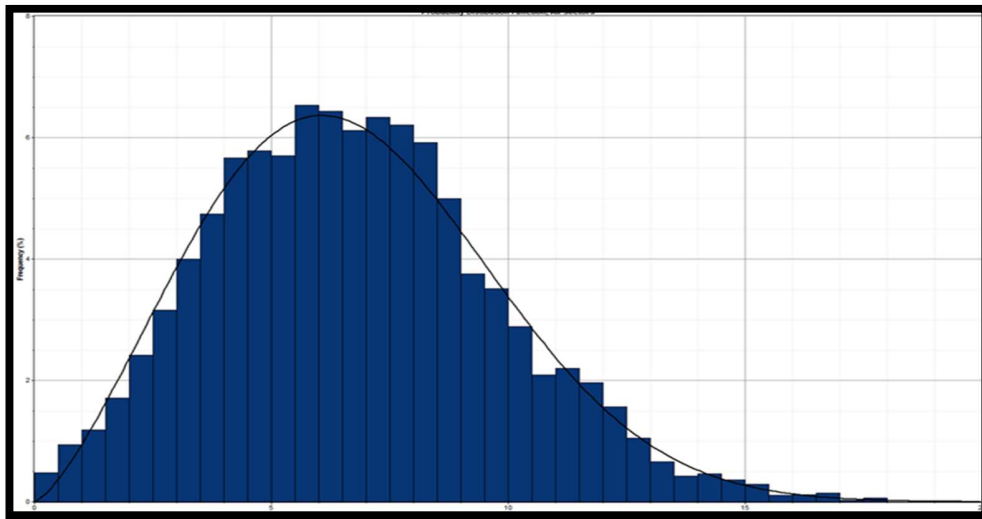
Con la serie de datos obtenidos de velocidad y dirección se procede a calcular su distribución de *Weibull* para calcular la energía que podría generar una turbina eólica con estas condiciones.

Los factores obtenidos de la distribución de *Weibull* son un $k=2.38$ y $C=7.36$ m/s.

Con los datos obtenidos se selecciona un aerogenerador que sea conveniente transportarlo e instalarlo en la isla por la disponibilidad de logística que requiere, el modelo seleccionado es E33 del fabricante alemán *Energón*.

Tabla 3.

Distribución de Weibull



Nota. La figura muestra la distribución de *Weibull* para las condiciones de Utila. Elaboración propia con Windographer.

Al evaluar el comportamiento del aerogenerador modelo E33, con estos datos de viento, en el *software* del fabricante se obtienen los datos de generación, horas trabajadas al año, factor de planta y cantidad de energía generado por cada rango de velocidad.

El comportamiento del aerogenerador evaluado, descrito con anterioridad, se puede apreciar resumido en las figuras 15 y 16.

Para realizar la evaluación de los costos de inversión de cada turbina de viento, ya instalada, se consideran de \$300/kW, haciendo un total de US\$ 1,800,000.00 por dos aerogeneradores.

Este valor ya incluye el transporte desde Alemania hasta Utila y la inversión de las obras civiles necesarias para el transporte dentro de la isla como la instalación eléctrica necesaria para generar.

Tabla 4.

Generación de una turbina E33 en Utila

Hesteller	Enercon
Typ	E-33
Installier Leistung	330kW
Rotordurchmesser	33.4 m
Energieertrag	1,062,718 kWh/jahr
Kapazitätsfaktor	36.70%
Volllaststunden	3,218 h/jahr
Betriebsstunden	8,027 h/jahr

Nota. La figura muestra los datos técnicos relacionados a la generación de una turbina de viento E33 con las condiciones de Utila. Obtenido de *Suiss éole* (2013). *Herramientas* ([https://www.wind-](https://www.wind-data.ch/tools/powercalc.php?a=9.21&k=3&type=v&v=8.8&d=1.111&turbine=36&p%5B0%5D=0&p%5B1%5D=0&p%5B2%5D=0&p%5B3%5D=77&p%5B4%5D=190&p%5B5%5D=353&p%5B6%5D=581&p%5B7%5D=886&p%5B8%5D=1273&p%5B9%5D=1710&p%5B10%5D=2145&p%5B11%5D=2544&p%5B12%5D=2837&p%5B13%5D=2965&p%5B14%5D=2995&p%5B15%5D=3000&p%5B16%5D=3000&p%5B17%5D=3000&p%5B18%5D=3000&p%5B19%5D=3000&p%5B20%5D=3000&p%5B21%5D=3000&p%5B22%5D=3000&p%5B23%5D=3000&p%5B24%5D=3000&p%5B25%5D=0&p%5B26%5D=0&p%5B27%5D=0&p%5B28%5D=0&p%5B29%5D=0&abfrage=+Ertrag+berechnen+)

[data.ch/tools/powercalc.php?a=9.21&k=3&type=v&v=8.8&d=1.111&turbine=36&p%5B0%5D=0&p%5B1%5D=0&p%5B2%5D=0&p%5B3%5D=77&p%5B4%5D=190&p%5B5%5D=353&p%5B6%5D=581&p%5B7%5D=886&p%5B8%5D=1273&p%5B9%5D=1710&p%5B10%5D=2145&p%5B11%5D=2544&p%5B12%5D=2837&p%5B13%5D=2965&p%5B14%5D=2995&p%5B15%5D=3000&p%5B16%5D=3000&p%5B17%5D=3000&p%5B18%5D=3000&p%5B19%5D=3000&p%5B20%5D=3000&p%5B21%5D=3000&p%5B22%5D=3000&p%5B23%5D=3000&p%5B24%5D=3000&p%5B25%5D=0&p%5B26%5D=0&p%5B27%5D=0&p%5B28%5D=0&p%5B29%5D=0&abfrage=+Ertrag+berechnen+](https://www.wind-data.ch/tools/powercalc.php?a=9.21&k=3&type=v&v=8.8&d=1.111&turbine=36&p%5B0%5D=0&p%5B1%5D=0&p%5B2%5D=0&p%5B3%5D=77&p%5B4%5D=190&p%5B5%5D=353&p%5B6%5D=581&p%5B7%5D=886&p%5B8%5D=1273&p%5B9%5D=1710&p%5B10%5D=2145&p%5B11%5D=2544&p%5B12%5D=2837&p%5B13%5D=2965&p%5B14%5D=2995&p%5B15%5D=3000&p%5B16%5D=3000&p%5B17%5D=3000&p%5B18%5D=3000&p%5B19%5D=3000&p%5B20%5D=3000&p%5B21%5D=3000&p%5B22%5D=3000&p%5B23%5D=3000&p%5B24%5D=3000&p%5B25%5D=0&p%5B26%5D=0&p%5B27%5D=0&p%5B28%5D=0&p%5B29%5D=0&abfrage=+Ertrag+berechnen+)) Consultado el 14 de junio de 2023. De dominio público.

Tabla 5.

Generación por velocidades del aerogenerador E-33

Enercon E-33 (330 kW)					
1 m/s	0	kW	11 m/s	292.8	kW
2 m/s	0	kW	12 m/s	320	kW
3 m/s	5	kW	13 m/s	335	kW
4 m/s	13.7	kW	14 m/s	335	kW
5 m/s	30	kW	15 m/s	335	kW
6 m/s	55	kW	16 m/s	335	kW
7 m/s	92	kW	17 m/s	335	kW
8 m/s	138	kW	18 m/s	335	kW
9 m/s	196	kW	19 m/s	335	kW
10 m/s	250	kW	20 m/s	335	kW
			21 m/s	335	kW
			22 m/s	335	kW
			23 m/s	335	kW
			24 m/s	335	kW
			25 m/s	335	kW
			26 m/s	0	kW
			27 m/s	0	kW
			28 m/s	0	kW
			29 m/s	0	kW
			30 m/s	0	kW

Nota. La figura muestra la potencia del aerogenerador por cada valor de velocidad del viento incremento de un m/s. Obtenido de Suiss éole (2013). Herramientas (<https://www.wind-data.ch/tools/powercalc.php?a=9.21&k=3&type=v&v=8.8&d=1.111&turbine=36&p%5B0%5D=0&p%5B1%5D=0&p%5B2%5D=0&p%5B3%5D=77&p%5B4%5D=190&p%5B5%5D=353&p%5B6%5D=581&p%5B7%5D=886&p%5B8%5D=1273&p%5B9%5D=1710&p%5B10%5D=2145&p%5B11%5D=2544&p%5B12%5D=2837&p%5B13%5D=2965&p%5B14%5D=2995&p%5B15%5D=3000&p%5B16%5D=3000&p%5B17%5D=3000&p%5B18%5D=3000&p%5B19%5D=3000&p%5B20%5D=3000&p%5B21%5D=3000&p%5B22%5D=3000&p%5B23%5D=3000&p%5B24%5D=3000&p%5B25%5D=0&p%5B26%5D=0&p%5B27%5D=0&p%5B28%5D=0&p%5B29%5D=0&abfrage=+Ertrag+berechnen>) Consultado el 14 de junio de 2023. De dominio público.

Los costos de operación estimados para cada turbina se estiman en US\$ 10,000.00 al año, y el ciclo de vida de cada aerogenerador, y resto de componentes de la granja eólica, se prevé que sea de veinte años.

3.2. Recurso solar

La consideración inicial para estimar el recurso solar estará basada en un sistema fotovoltaico fijo con una inclinación de 16° orientado hacia el sur e instalados sobre el techo de las bodegas de la compañía.

Los datos del recurso solar se obtuvieron de la irradiación media global horizontal para la isla de Utila proporcionado por la NASA están detallados en la tabla 3.

Tabla 6.

Radiación solar en Utila

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Radiación diaria (Wh/m ² /dia)	4540	5600	6490	7150	6800	6520	6170	6360	6200	5190	4390	4200

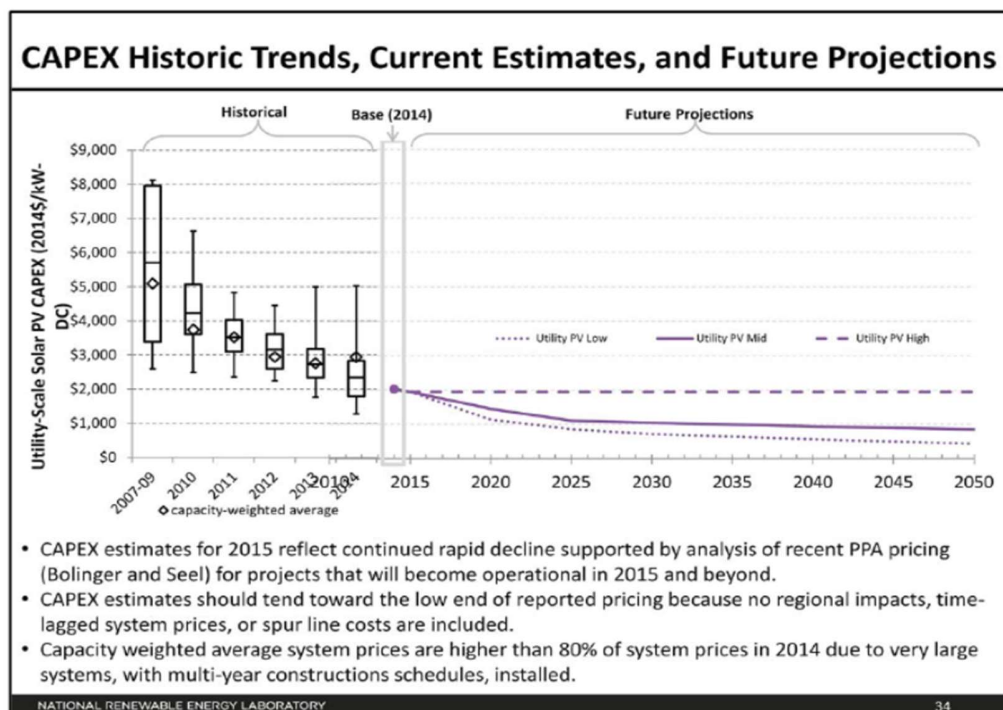
Nota. Promedio anual de la radiación solar en Utila. Elaboración propia con Excel.

Se asume que el costo de instalación del sistema fotovoltaico en la isla de Utila ascienden a US\$ 2,000.00 por kW, (este valor incluye los paneles, la estructura, los inversores, mano de obra por la instalación, el cableado y el controlador); y el costo de operación y mantenimiento asciende a US\$ 12.00 por kW al año. Estos costos son obtenidos del *U.S. National Renewable Energy Laboratory*.

Con la proyección de Instalar 175 kWp en los techos de las bodegas de la compañía y considerando el ciclo de vida de la instalación fotovoltaica en 20 años, el costo de la energía eléctrica generada es de 0.06729 US\$/kWh.

Figura 19.

CAPEX históricos y futuros de proyectos fotovoltaicos



Nota. La figura muestra el comportamiento del precio, a través del tiempo, de los proyectos fotovoltaicos en Estados Unidos de Norte América. Obtenido de National Rural Electrification Laboratory (2019). 2019 Annual Technology Baseline (<https://atb.archive.nrel.gov/electricity/2019/index.html?t=insusdsrscgthpcgcccncb&m=1>), consultado el 13 de junio de 2023. De dominio público.

3.3. Almacenamiento de energía

Se considera en la simulación del programa *Homer* un bloque de baterías de 500 kW/4000 kWh que consiste en cuatro contenedores de 8 X 30 pies que contiene baterías de flujo *Vanadium redox* conectados en serie cada contenedor de baterías de 125kW/1,190kWh DC.

Se considera que el costo de baterías es de 717\$/kWh y el costo de mantenimiento asciende al 3 % del valor de compra, lo que nos dá un valor de compra por cada contenedor de batería de US\$ 853,230.00 para un total de US\$ 3,412,920.00 y un costo de mantenimiento anual de US\$ 25,000.00 por cada contenedor de baterías, lo que suma US\$100,000.00 en total.

3.4. Demanda a satisfacer

En el período de un año se recabó la demanda de potencia en la isla de Utila y dio como resultado los valores que se muestran en la figura 18, haciéndose notar que los meses de julio y agosto son los de mayor demanda y los de menor demanda son enero y febrero.

Figura 20.

Demanda de Utila



Nota. La figura muestra un resumen del comportamiento de la demanda de la isla de Utila. Elaboración propia con Excel.

Utilizando los datos de demanda e información sobre la planta de energía *diesel* existente, los recursos potenciales de Energías Renovables Variables (ERV) y las opciones de almacenamiento, se simuló una combinación de soluciones potenciales usando el modelo de *Homer*, para obtener la combinación que resultó en el menor costo actual neto (inversión más costos de operación) en un proyecto de 25 años de vida.

3.5. Consideraciones financieras

El escenario base considera una demanda igual a la demanda actual incrementada en un 22 % al final del ciclo de vida considerado (2 % de crecimiento anual en un período de 10 años) y también se consideró un aumento

del 10 % en el costo del combustible, resultando en un precio promedio del combustible de 1.10 US\$/l.

La tasa de descuento utilizada fue del 10 % y se supuso una inflación del 2 % anual (se considera una inflación de Estados Unidos por evaluarse todos los valores en dólares americanos).

La carga no servida se valoró en 0,50 \$/kWh. Este es un valor se asume considerando que cualquier deficiencia de energía o potencia en el sistema sería provista por generadores de pequeñas capacidades alimentados con combustibles fósiles de reserva (diésel, gasolina y lpg), este valor da un dato aproximado de este costo de reemplazo. Además, es superior al costo calculado de las tecnologías de generación propuestas, incluida la generación existente a base de diésel.

El controlador se configuró para usar una estrategia de seguimiento de carga, lo que significa que cada vez que el generador *diesel* funciona, produce solo la energía suficiente para satisfacer el exceso de carga suministrado por fuentes renovables. De esta forma, las baterías solo se cargan con el exceso de generación renovable.

Se asumió que el costo del controlador se distribuiría entre los costos de las turbinas eólicas, la planta solar fotovoltaica y el sistema de almacenamiento de energía.

La viabilidad económica de aumentar el uso de la energía eólica, solar y de almacenamiento se analiza comparando el Costo Nivelado de la Energía (LCOE) y el valor actual neto de las inversiones de capital y los gastos de

operación y mantenimiento de las diferentes opciones del sistema que calcula el programa *Homer* para un Proyecto de vida de 25 años.

3.6. Escenarios propuestos

Los escenarios propuestos para su comparación se conforman de la siguiente manera:

- El Caso Base. Con un solo generador *diesel* existente. Se simulan dos escenarios: (i) uno donde la demanda se mantiene en los niveles actuales y el precio del combustible es de \$1.00/L; y, (ii) otro donde tanto la demanda como el precio del combustible *diesel* se incrementan en un 10 % durante el período de 25 años. El primer escenario se presenta solo como referencia, mientras que el segundo se presenta como base de comparación con escenarios en los que se han integrado las energías renovables.
- El caso del costo más bajo. Es el caso que resulta en el costo actual neto más bajo cuando la demanda y el precio del combustible se incrementan en un 10 %.
- El caso de mayor integración de Energía Renovable Variable (ERV). Es el caso del mayor nivel de integración renovable cuando la demanda y el precio del combustible también se incrementan un 10 %.

Si bien la propuesta que resulta de menor costo no incluye almacenamiento, se puede observar que muestra una fracción renovable del 56 %, mientras que, al incorporar baterías al escenario, resulta en un aumento significativo de la fracción renovable al 76 %.

Este incremento se debe al aumento de la capacidad eólica, posibilitada por la posibilidad de almacenar el exceso de generación eólica, al mismo tiempo que se reduce el exceso de Energía Renovable Variable (ERV) generada, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de la capacidad de generación renovable.

Estos datos se pueden ver y comparar en la tabla 5 donde se aprecia la disminución de la participación de la tecnología diésel en el abastecimiento de la demanda de la isla de Utila, con forme se va aumentando la participación de las Energías Renovables Variables (ERV) en la matriz de generación.

Tabla 7.
Generación por tecnología

Escenario	Capacidad instalada (kW)				Producción anual		
	solar(kW)	eólica(kW)	Diesel(kW)	Batería(kWh)	solar(kWh)	eólica(kWh)	Diesel(kWh)
Escenario 1	-	-	1,280.0	-	-		4,854,180.0
Escenario 2	1,920.0	330.0	1,280.0	-	3,063,978.0	553,564.0	2,821,798.3
Escenario 3	1,750.0	660.0	1,280.0	4,759.0	2,553,315.0	2,214,255.0	1,417,420.6

Nota. La tabla muestra la capacidad instalada en cada escenario propuesto por cada una de las tecnologías y su energía generada al año. Elaboración propia con Excel.

Con forme se agrega más generación con Energía Renovable Variable (ERV) el consumo de *diésel* va descendiendo de manera gradual y conlleva a una menor dependencia del consumo del hidrocarburo.

Este comportamiento se puede apreciar en la tabla 6, donde se evidencia que el ahorro en el consumo anual de diésel puede recuperar la inversión de la implementación del escenario con mayor energía renovable variable.

Tabla 8.

Potencia y generación de escenarios

Escenario	Demanda GWh/año	Costo del Diesel US\$/l	Inversión millones US\$	Diesel millones US\$	LCOE US\$/kWh
Escenario 1	4,854	1.1	2.15	20.38	0.3435
Escenario 2	4,854	1.1	2.15	12.23	0.3209
Escenario 3	4,854	1.1	5.5	6.13	0.3236

Nota. La tabla muestra la inversión necesaria para implementar cada escenario propuesto y el consumo de *diésel* que conlleva. Elaboración propia con Excel.

El Caso de Mayor Penetración de Renovables se logra agregando capacidad de almacenamiento, lo que a su vez permite aumentar la capacidad de generación eólica.

El efecto de la disponibilidad de almacenamiento se refleja en la reducción sustancial de la generación diésel y el aumento casi correspondiente de la generación solar fotovoltaica.

Existen dos tipos de mediciones para describir el nivel de penetración de las energías renovables en la red: las relacionadas con la capacidad, que es un valor puntual en el tiempo, y las relacionadas con la energía, que son más un valor acumulativo. El propósito de las métricas de penetración relacionadas con la capacidad es brindar una idea de los problemas potenciales asociados con tener fuentes de generación no controlables o variables en la red.

Demasiada generación variable en la red puede causar problemas de estabilidad y calidad de la energía. Estas métricas pueden describir la parte de la capacidad instalada total que se compone de capacidad de generación

renovable. El caso con mayor participación de energías renovables variables la métrica es de potencia instalada es 70 %, sin considerar el almacenaje.

La fracción renovable, calculada como la energía renovable dividida por la energía total, es una métrica de penetración relacionada con la energía que describe la proporción de la carga de energía de un determinado período que se suministra a partir de fuentes renovables. Esta proporción ayuda a dar una idea de la sostenibilidad del suministro energético a largo plazo, que es la reducción del consumo de combustible y emisiones, en el caso con mayor penetración de energías renovables variables es de un 77 %.

Una comparación entre estas dos cifras muestra el impacto de agregar almacenamiento, lo que permite una mayor capacidad eólica y una sustitución de la generación diésel por energía suministrada por baterías en ciertos momentos en los que puede complementar las fuentes renovables, en particular la eólica en horas valle.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cambiar una matriz de generación de energía eléctrica a base de diésel, que ha sido la única solución que ha existido en la isla de Utila, crea un grado de estrés e incertidumbre entre todos los involucrados en la toma de decisión, para migrar a una que tenga un alto componente de ERV.

Y si a este miedo natural, agregamos las experiencias de otros sistemas, grandes o pequeños, donde la integración de las energías renovables ha causado más complicaciones que soluciones, la implementación se ve más difícil de lograr.

Para minimiza estos problemas y al mismo tiempo tener un servicio de energía eléctrica confiable y de calidad en la isla de Utila, se estableció un proceso científico para poder adaptar las soluciones renovables, que faciliten su diseño e implementación, basado en las preguntas formuladas al inicio de todo el proceso.

4.1. ¿Qué recursos renovables existen en la isla de Utila, Honduras, que sean de implementación comercial y cómo se calcula su potencial?

Después de un recorrido por toda la isla de Utila y tomando en consideración todas las condiciones técnicas, legales, geográficas, ambientales y sociales se determina que en la isla de Utila las tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables de manera comercial son la solar fotovoltaica y la eólica, como se muestra en la tabla 1.

Para calcular el potencial de los recursos renovables existentes en la isla se hace uso de mediciones del viento por medio de anemómetros en los sitios aprobados por la Corporación Municipal de Utila, como se muestran en la tabla 2 que luego se condensan para aplicar una distribución de *Weillbull* como se muestra en la figura 19.

Con los datos de la distribución de *Weillbull* se ingresan los valores en los programas del fabricante de aerogeneradores para estimar el potencial de energía a generar.

4.2. ¿Cuál es el costo de generación de las fuentes de ERV existentes en la isla de Utila, Honduras, y su producción?

Conociendo las fuentes renovables existentes en la isla de Utila y después de evaluar cuales se pueden aprovechar de manera comercial, se determinó la potencia nominal que puede instalarse para implementar las soluciones renovables en la isla de Utila, todas dentro de la propiedad donde está operando *Utila Power Company (UPCO)* al momento de realizar este estudio.

Con la ayuda de programas informáticos que facilitan la selección de equipos, y calculan la producción anual de energía eléctrica bajo las condiciones específicas de la isla de Utila y los supuestos financieros necesarios para instalar, operar y mantener los equipos se determina que los costos directos de generación son de US\$ 0.05175 US\$/Kwh para la tecnología eólica y 0.06729 US\$/Kwh para la tecnología solar.

Conociendo las potencias máximas que se pueden aprovechar, el siguiente paso es establecer la integración óptima de estas tecnologías para

lograr una matriz con la mayor participación de Energías Renovables Variables (ERV) posible.

4.3. ¿Qué porcentaje de Energía Renovable Variable se puede utilizar sin desestabilizar el sistema y tener un costo de energía eléctrica más estable?

Se proponen tres escenarios para compararlos entre si y determinar el óptimo. El primero consiste en generar toda la energía eléctrica con diésel, el segundo considera un generador diésel, un aerogenerador y la mayor cantidad de paneles solares que se pueden instalar y el tercer escenario considera utilizar un generador diésel, dos aerogeneradores y paneles solares.

Después de analizar los tres escenarios propuestos, se puede determinar que la penetración de Energía Renovable Variable (ERV) puede llegar hasta un 77 % del total de la energía demandada por la isla, con una capacidad renovable instalada del 70 %, como se muestran en las tablas 5 y 6.

Al ser los escenarios una mezcla de tecnologías diferentes, se comparan entre si utilizando el costo nivelado de la energía de cada propuesta obteniendo un costo de generación de energía, muy cercano al actual, y una reducción del consumo de diésel a un tercio del consumo actual.

CONCLUSIONES

1. La disponibilidad de aprovechamiento de las fuentes de energías renovables en Utila, al igual que muchas islas pequeñas alrededor del mundo, se ve limitada por condiciones legales en lo que se refiere a las zonas protegidas, la ausencia de fuentes hidráulicas y la topografía. Por tal motivo solo las tecnologías solar y eólica pueden ser implementadas de manera comercial.
2. Desde la perspectiva técnica, es viable implementar las energías renovables intermitentes en sistemas interconectados ya sean pequeños o grandes, logrando precios estables y competitivos sin comprometer la calidad de la energía suministrada, lo anterior se logra con la ayuda de programas informáticos que consideran todas las variables involucradas, desde la estimación del potencial de las fuentes de energías renovables autóctonas del lugar, pasando por los costos de implementación y operación. Estos programas informáticos son herramientas vitales para reducir las probabilidades de fallas tanto técnicas como financieras, al momento de desarrollar una matriz de generación.
3. Implementar modelos de generación de energía eléctrica con alta participación de energías renovables variables, solo es posible por medio de la utilización de un sistema de almacenamiento de energía con respuesta inmediata y un controlador electrónico que administre el sistema.

4. Con la implementación de energías renovables variables en la matriz de generación de la isla de Utila, el consumo de combustibles fósiles se reduce a un tercio del consumo actual. Lo que permite que la variación del costo de generación de energía eléctrica en la isla de Utila sea menos volátil al momento de la variación del precio de los combustibles fósiles.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el levantamiento del potencial de las diferentes fuentes de energía renovable, por parte de la Secretaria de Energía de Honduras, en los departamentos de Islas de la Bahía y Gracias a Dios.
2. Concientizar a la comunidad de Utila de los problemas técnicos y sociales que implica ser auto productor, siendo las autoridades municipales las encargadas de propiciar dicho acercamiento.
3. Fomentar el desarrollo de sistemas informáticos, por iniciativa de las instituciones académicas, para la evaluación de los potenciales de energía renovable en Honduras.
4. Documentar las experiencias de los sistemas aislados de Utila y Guanaja para utilizarlo como material didáctico para la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

REFERENCIAS

- Alarcon, A. (2015). ¿Cuál es la importancia de los sistemas híbridos para América Latina y el Caribe? *Energía para el futuro*. Obtenido de Alarcon, A. (2015). ¿Cuál es la importancia de los sistemas híbridos para América Latina y el Caribe? *Energía para el futuro*.
- Benbuzid, H., & Benbuzid, M. (2014). Ocean Wave Energy Extraction: Up-to-Date Technologies Review and Evaluation. *IEEE*, 338-343.
- Bergey Windpower Co. (2019). A Primer on Small Wind Systems. *Wind School*, 2-4. Obtenido de <https://www.bergey.com/wind-school/a-primer-on-small-wind-systems/>
- EGEC . (19 de julio de 2022). *EGEC Geothermal Market Report 2021*. Obtenido de El sector geotérmico europeo emerge fortalecido tras su ralentización por el COVID-19: <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2021/>
- Endemaño, L. (2016). *Análisis Global de los Sistemas de Almacenamiento*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Endemaño, L. (2016). *Análisis Global de los Sistemas de Almacenamiento*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Eras, A., Egidio, M., Belichinger, P., Berendes, S., Caamaño, E., & Garcia, E. (2020). Decarbonizing the Galapagos Islands: Techno-Economic

Perspectives for the Hybrid Renewable Mini-Grid Baltra–Santa Cruz.
MDPI, 2-4. Obtenido de
<https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v12y2020i6p2282-d332601.html>

Eras-Almeida AA, E.-A. M.-A. (2020). Decarbonizing the Galapagos Islands: Techno-Economic Perspectives for the Hybrid Renewable Mini-Grid Baltra–Santa Cruz. *MDPI*.

Exposito, M. (2015). *Análisis de La Energía Geotérmica de Baja Temperatura en Terrenos Volcánicos, aplicaciones a la construcción en Tenerife*. Alicante: Universidad de Alicante.

Fernandez, P. (1993). *Energía Eólica*. Santander: Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T.

Fernandez, P. (2012). *Energía Eólica*. Cantabria: Universidad de cantabria.

Garcia, J. (2021). *Sistemas de almacenamiento de energía a gran escala*. La Coruña: Universidad de Coruña.

Hantoro, R., & Satwika, N. (2018). Energy Demand Analysis and Design of Hybrid Power System in BAwean Islands. *Matec Web of Conference*.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) . (2008). *Manual de Geotermia*. Madrid: IDAE.

IRENA. (2018). *Transforming small-island power systems: Technical Planning Studies for the Integration*. Abu Dhabi: Abu Dhabi.

- K. Karunanithi, S. R. (2020). Optimum Sizing and Modeling of Stand-Alone DC Microgrid With Hybrid Energy Storage System for Domestic Applications: Cost of Energy, Net Present Cost, and Feasible Configurations,. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, 18-24.
- Martin, M. (2020). *Energía de la biomasa y biocombustibles*. Granada: Universidad de Granada.
- Martinez Rubio, A. (2016). *Energía Solar fotovoltaica integrada en la edificación: modelizado y análisis del efecto sombreado en la captación de irradiación*. La Rioja: Universidad de la Rioja.
- Mayoral, J. (2019). *Tecnologías de almacenamiento de energía con énfasis en electroquímica*. Tulancingo de Bravo: Universidad Politécnica de Tulancingo.
- Montero, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Granada: Universidad de Granada.
- Mora, J., Bustamante, K., & Ramirez, R. (2020). Sistema de generación de energías ecológica. *Dominio de Las Ciencias*, 160-171.
- Nur, A., & Kayguzus, A. (2016). Power Flow Study for Microgrids by Using Matlab and Powerworld Simulator, *International Journal of Energy and Smart Grid*, 14-20. *International Journal of Energy and Smart Grid*.
- Sarasúa, J. (2009). *Control de minicentrales hidroeléctricas fluyentes, modelado y estabilidad*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Toscano, L. (2009). *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa* . Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Ulloa, R. (2019). *Planificación óptima de sistemas eléctricos de distribución en zonas rurales mediante la integración de micro redes*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.

Zhu, W. J. (2020). Optimal Sizing of an Island Hybrid Microgrid Based on Improved Multi-Objective Grey Wolf Optimizer. *MDPI*, 1-24.

APÉNDICES

Estas páginas contienen la información elaborada por el estudiante, donde se resaltan aspectos importantes en la investigación.

Apéndice 1.

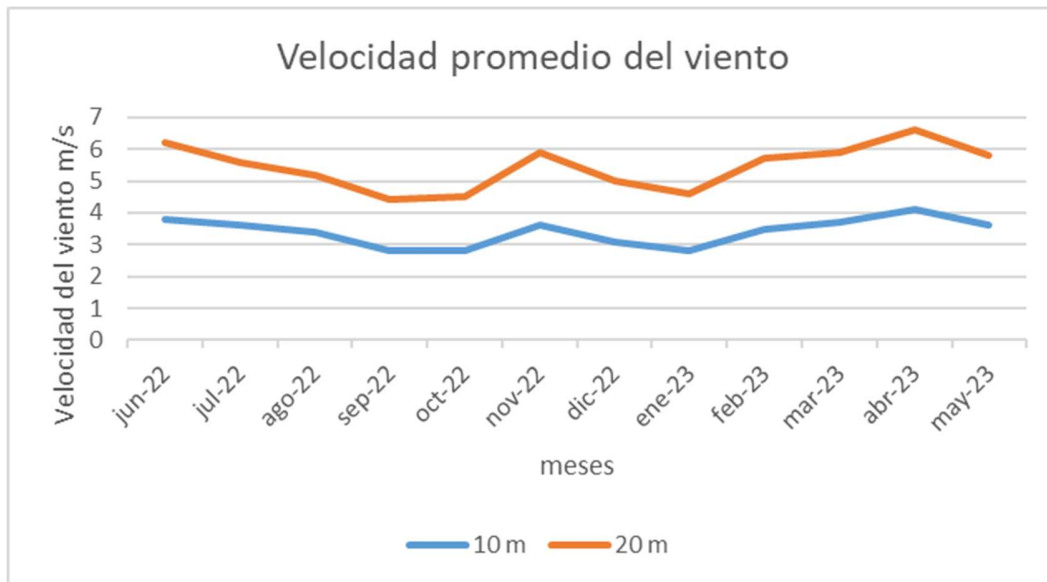
Cálculo del LCOE para cada escenario propuesto1

ESCENARIO	Costo presente neto US\$					LCOE
	Inversión	Ope.y Mant.	Diesel	Reemplazo	Rescate	\$/kWh
Escenario1		2,208,974.61	20,378,585.00			0.3530
escenario 2	4,590,000.00	2,086,249.20	13,846,379.55	132,525.97	83,692.92	0.3209
Escenario 3	9,612,920.00	2,973,946.00	7,672,152.45	898,084.31	477,281.00	0.3236

Nota. La tabla muestra los datos necesarios para calcular LCOE. Elaboración propia con Excel.

Apéndice 2.

Gráfica de la velocidad promedio del viento en Utila



Nota. La gráfica muestra los valores promedios de la velocidad del viento en los diferentes meses de mediciones. Elaboración propia con Excel

Apéndice 3.

Datos de un aerogenerador marca Vestas con las condiciones de Utila

Resultat

Hersteller	Vestas
Typ	V52
Installierte Leistung	850 kW
Rotordurchmesser	52 m
Energieertrag	2'314'608 kWh/Jahr
Kapazitätsfaktor ¹	31.1%
Volllaststunden ²	2'721 h/Jahr
Betriebsstunden ³	7'298 h/Jahr

Nota. La figura muestra los datos técnicos relacionados a la generación de una turbina de viento V52 con las condiciones de Utila. Obtenido de Suiss éole (2013). Herramientas (<https://www.wind->

[data.ch/tools/powercalc.php?a=9.21&k=3&type=v&v=8.8&d=1.111&turbine=36&p%5B0%5D=0&p%5B1%5D=0&p%5B2%5D=0&p%5B3%5D=77&p%5B4%5D=190&p%5B5%5D=353&p%5B6%5D=581&p%5B7%5D=886&p%5B8%5D=1273&p%5B9%5D=1710&p%5B10%5D=2145&p%5B11%5D=2544&p%5B12%5D=2837&p%5B13%5D=2965&p%5B14%5D=2995&p%5B15%5D=3000&p%5B16%5D=3000&p%5B17%5D=3000&p%5B18%5D=3000&p%5B19%5D=3000&p%5B20%5D=3000&p%5B21%5D=3000&p%5B22%5D=3000&p%5B23%5D=3000&p%5B24%5D=3000&p%5B25%5D=0&p%5B26%5D=0&p%5B27%5D=0&p%5B28%5D=0&p%5B29%5D=0&abfrage=+Ertrag+berechnen+](https://www.wind-data.ch/tools/powercalc.php?a=9.21&k=3&type=v&v=8.8&d=1.111&turbine=36&p%5B0%5D=0&p%5B1%5D=0&p%5B2%5D=0&p%5B3%5D=77&p%5B4%5D=190&p%5B5%5D=353&p%5B6%5D=581&p%5B7%5D=886&p%5B8%5D=1273&p%5B9%5D=1710&p%5B10%5D=2145&p%5B11%5D=2544&p%5B12%5D=2837&p%5B13%5D=2965&p%5B14%5D=2995&p%5B15%5D=3000&p%5B16%5D=3000&p%5B17%5D=3000&p%5B18%5D=3000&p%5B19%5D=3000&p%5B20%5D=3000&p%5B21%5D=3000&p%5B22%5D=3000&p%5B23%5D=3000&p%5B24%5D=3000&p%5B25%5D=0&p%5B26%5D=0&p%5B27%5D=0&p%5B28%5D=0&p%5B29%5D=0&abfrage=+Ertrag+berechnen+)) Consultado el 14 de junio de 2023. De dominio público.