



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



Protocolo de Investigación

“Diseño óptimo de un sistema híbrido aislado aplicado a una comunidad rural del estado de Oaxaca, México”

Presenta para su Aprobación:
Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables

Director de Tesis:
Dra. Olaya Pirene Castellanos Onorio

Co-Director de Tesis:
Dr. Francisco Javier Gómez González

Comité Tutorial:
M. C. Jorge Arturo Mendoza Sosa
M. C. José Luis Fernando Palomeque Loyo

H. Veracruz, Ver.

Marzo 2025





Instituto Tecnológico de Veracruz
Subdirección académica

Veracruz, Veracruz, **05/MARZO/2025**
OFICIO: ITV/DEPI/No.197/2025
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. MINERVA ELIZABETH HERNÁNDEZ SANTIAGO

Por este conducto se le comunica que su tesis de **Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables** titulada:

"Diseño Óptimo de un Sistema Híbrido Aislado Aplicado a una Comunidad Rural del Estado de Oaxaca, México"

Fue aprobada en su totalidad en cuanto a formato y calidad del contenido a satisfacción del H. Jurado del examen, por lo que está Usted autorizado a editar la presentación definitiva del trabajo.

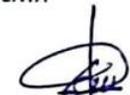
ATENTAMENTE

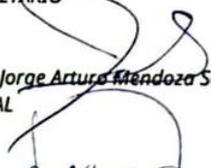
Excelencia en Educación Tecnológica
Antorcha y Luz de Fuego Permanente


OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO
JEFA DE LA DIV. EST. POSG. E INVEST

EL. H. JURADO


DRA. Olaya Pirene Castellanos Onorio
PRESIDENTA


DR. Francisco Javier Gómez González
SECRETARIO


M.C. Jorge Arturo Mendoza Sosa
VOCAL

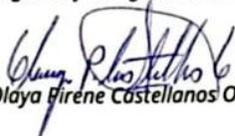

DR. José Luis Fernando Palomeque Loyo
SUPLENTE



El presente trabajo de tesis "Diseño Óptimo de un Sistema Híbrido Aislado Aplicado a una Comunidad Rural del Estado de Oaxaca, México" presentado por el (la) C. Minerva Elizabeth Hernández Santiago ha sido aprobado por su comité tutorial como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables

DIRECTOR


DRA. Olaya Fírene Costellanos Onorio

CODIRECTOR


DR. Francisco Javier Gómez González

CODIRECTOR


M.C. Jorge Arturo Méndez Sosa

REVISOR


DR. José Luis Fernando Palomeque Loyo



Dedicatoria

A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, quien me ha guiado en cada paso de este camino. Gracias por darme la perseverancia y la oportunidad de alcanzar esta meta, por iluminar mis días de esfuerzo y sostenerme en los momentos de duda.

A mi madre, por su amor incondicional, por ser mi ejemplo de lucha y dedicación. Gracias por cada sacrificio, cada palabra de aliento y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Este logro es tan tuyo como mío.

A mis amigos y panoayanes, compañeros de batallas y alegrías, quienes con su apoyo, risas y palabras de ánimo hicieron este camino más llevadero. Gracias por estar ahí en cada desafío, por su amistad sincera y por ser parte de esta etapa inolvidable.

A todos los que, de una u otra manera, han sido parte de este viaje, mi más profundo agradecimiento.

Con gratitud y cariño,
Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi comité revisor cuyo conocimiento y experiencia han sido fundamentales para la realización de este estudio. Agradezco especialmente a la Dra. Olaya Castellanos, al Dr. Francisco Gómez, al Mtro. Arturo Mendoza y al Mtro. José Luis Palomeque por sus valiosas sugerencias y orientación a lo largo del proceso de investigación, mi sincera gratitud ya que sus aportes han sido indispensables para completar este trabajo.

Resumen

La presente investigación aborda el diseño óptimo de un sistema híbrido aislado de energía renovable aplicado a una comunidad rural del estado de Oaxaca, México. El estudio incluye un análisis de las condiciones climáticas y del perfil de consumo de la comunidad seleccionada, lo que permite definir la arquitectura del sistema híbrido.

El objetivo del presente trabajo fue modelar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico aislado de la red eléctrica, para cubrir las necesidades de energía eléctrica que requiere una comunidad rural, permitiendo fomentar el uso de energías renovables como fuentes limpias, en concordancia con la preservación del medio ambiente.

Mediante la optimización con el software HOMER Pro, se obtiene un diseño que balancea la generación de energía, la eficiencia económica y la viabilidad técnica a largo plazo. Los resultados demuestran que el sistema híbrido es una alternativa viable para mejorar la calidad de vida de los habitantes, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental.

Gracias a este tipo de estudios se plantean posibilidades para suministrar energía a las comunidades de difícil acceso y así mejorar la calidad de vida y el nivel educativo de sus habitantes, brindando seguridad energética a través de sistemas como el propuesto, garantizando el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos, facilitando el acceso a la investigación y las tecnologías energéticas no contaminantes.

ÍNDICE

Dedicatoria	I
Agradecimientos	IV
Resumen.....	V
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VIII
CAPITULO I. INTRODUCCION	1
1.1. Planteamiento del problema de investigación	1
1.1.1. Pregunta de investigación	2
1.2. Objetivos de la investigación	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación y delimitación de la investigación.....	4
1.4. Hipótesis.....	6
1.5. Organización de la tesis	7
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes	8
2.1.1 Internacionales	8
2.1.2 Nacionales.....	9
2.2. Marco conceptual.....	12
2.2.1. La electricidad en México.....	12
2.2.1.1. Sistema eléctrico nacional.....	12
2.2.1.2. Normatividad Mexicana.....	14
2.2.1.3. Transición energética	16
2.2.1.4. Energías renovables en México.....	17
2.2.2. Energía solar.....	20
2.2.2.1. Radiación solar.....	21
Uso de la nomenclatura.....	23
2.2.2.2. Cálculo de componentes de radiación solar	24
2.2.2.3. Conversión eléctrica.....	26
2.2.2.4. Estructura de un panel fotovoltaico.....	27
2.2.3. Energía eólica.....	29
2.2.3.1. Energía del viento.....	30
2.2.3.2. Principio de operación.....	33
2.2.3.3. Estructura de un aerogenerador	34
2.2.4. Sistemas de almacenamiento de energía	42
2.2.4.1. Etapa de almacenamiento en el sistema energético.....	43

2.2.5. Sistemas híbridos de energía renovable	47
2.2.5.1. Sistema híbrido eólico/fotovoltaico con almacenamiento de batería	48
2.2.5.2. Técnicas de optimización de sistemas híbridos.....	49
CAPITULO III. METODOLOGÍA	51
3.1 Estructura de la metodología.....	51
3.1.1. Etapa 1. Compilar el recurso renovable y el perfil de demanda de la comunidad bajo estudio.	51
3.1.2. Etapa 2. Proponer la arquitectura de un sistema híbrido renovable que satisfaga las necesidades de energía eléctrica de la comunidad.	55
3.1.3. Etapa 3. Optimizar el sistema híbrido renovable utilizando el software especializado Homer Pro.	57
CAPITULO IV. ANALISIS DE RESULTADOS	58
4.1. Descripción del caso de estudio	58
4.1.1. Compilación del recurso renovable y el perfil de demanda de la comunidad estudiada	59
4.1.2. Propuesta de la arquitectura del sistema híbrido renovable	64
4.1.3. Optimización del sistema hibrido renovable	67
CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	72
ANEXOS	75
Anexo A. Hojas de especificaciones técnicas	75
Anexo B. Reconocimientos.....	79
Anexo C. Artículo publicado	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa en relieve de San Francisco Viejo, Oax. (tomado de (Google maps, 2023)).	5
Ilustración 2. Mapa terrestre de San Francisco Viejo, Oax. (tomado de (Google maps, 2023)).	5
Ilustración 3. Regiones del sistema eléctrico nacional (datos tomados de (CENACE, 2020)).	13
Ilustración 4. Red Troncal de Transmisión del Sistema Eléctrico Nacional 2022 (tomado de (CENACE, 2020)).	14
Ilustración 5. Porcentaje de generación eléctrica en México en 2021 (tomado de (SENER, Nuevo esquema del sistema eléctrico nacional, 2022)).	17
Ilustración 6. Distribución por estado de la producción de energías renovables en México (tomada de ((Patraca & López, 2021)).	19
Ilustración 7. Distribución espectral de la radiación solar (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	22
Ilustración 8. Energía solar que atraviesa la atmósfera (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	23
Ilustración 9. Modelo eléctrico de una célula solar (tomada de (Lamigueiro, 2023)).	27
Ilustración 10. Esquema de un generador fotovoltaico compuesto por 2 ramas de 3 módulos en serie (tomada de (Lamigueiro, 2023)).	29
Ilustración 11. Fuerzas de Sustentación y de Arrastre (tomada de (Marín, Rivero, Sellschopp, Alba, & Ramos, 2017)).	34
Ilustración 12. Rotores de eje horizontal (tomada de (VERDE ZONA, 2015)).	35
Ilustración 13. Rotores de eje vertical (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	36
Ilustración 14. Rendimiento aerodinámico en función de la velocidad típica (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	37
Ilustración 15. Sistema de orientación por cola (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	38
Ilustración 16. Sistema de orientación por rotores auxiliares (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	38
Ilustración 17. Sistema de orientación por efecto de conicidad (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	39
Ilustración 18. Sistema de regulación por orientación del rotor: Veleta auxiliar (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	40
Ilustración 19. Generador de corriente continua, dinamo (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	41
Ilustración 20. Generador de corriente alterna (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).	41
Ilustración 21. Relación de las tecnologías de baterías más utilizadas (tomada de (Valle, y otros, 2017)).	44
Ilustración 22. Comparación entre el proceso de electrólisis y una pila. (tomada de (CEVALLOS, 1998)).	46
Ilustración 23. Esquema de la metodología y las herramientas tecnológicas empleadas. Autoría propia.	51
Ilustración 24. Velocidad promedio anual de la comunidad. Autoría propia.	61
Ilustración 25. Promedio del recurso solar anual. Autoría propia.	62
Ilustración 26. Perfil de carga. Autoría propia.	64
Ilustración 27. Esquema eléctrico del sistema híbrido aislado.	65
Ilustración 28. Curva de potencia de la turbina seleccionada.	65
Ilustración 29. Ciclo de vida VS profundidad de descarga.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de la población San Francisco del Mar Pueblo Viejo. (Datos tomados de (INEGI, 2020)).	6
Tabla 2. Localidades del componente de instalación de sistemas aislados de electrificación	59
Tabla 3. Velocidades de viento promedio mensuales. Autoría propia	60
Tabla 4. Potencia instalada en una vivienda modelo. Autoría propia	63
Tabla 5. Resultados del análisis de sensibilidad	66
Tabla 6. Costos de la configuración	67
Tabla 7. Costos de la configuración. Autoría propia	68

CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1. Planteamiento del problema de investigación

Con el paso de los años, la demanda energética ha crecido, pero la cantidad de energía producida para satisfacer esta necesidad básica no ha ido en aumento, esto debido a diferentes causas como la alta dispersión de la población por las grandes distancias entre comunidades, la falta de infraestructura debido a los terrenos de difícil acceso y los costos crecientes de esta. La revista Forbes afirmó que, según datos oficiales, el consumo de electricidad en México alcanzó niveles récord este año, superando en ocasiones la capacidad de generación y transmisión de su infraestructura de servicios públicos (Reuters, 2024). Además de esto, el país también ha pagado el precio de una infraestructura obsoleta e inadecuada. (Nava, 2021) Más de 1 millón de personas en México, un país rico en recursos pero carente en energía, viven sin electricidad y sin iniciativas a gran escala que solucionen dicho problema; el abordar este tema en cifras se vuelve controversial, ya que hasta la fecha, no existen números precisos de cuantas comunidades hay sin electricidad, pues solo el 1% de los hogares del país la enfrentan según el perfil sociodemográfico 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), en cifras significa un desafío de más de 352,000 hogares, o casi 1.2 millones de personas – considerando que, según el INEGI, un promedio de 3.6 personas viven en un hogar sin electricidad –. Mientras que la Secretaría de Energía SENER, en su Programa Sectorial (SENER, Nuevo esquema del sistema eléctrico nacional, 2022) indican una cifra mayor, con un conteo en 2018 de al menos 2 millones de mexicanos sin acceso a electricidad. Datos discordantes con la Comisión Federal de Electricidad quienes en su plan de negocios 2020 (CFE, 2020) señalan que 32,000 ciudades en todo el país estaban esperando ser electrificadas ese año.

México tiene el compromiso de limitar la generación eléctrica por fuentes fósiles al 65% - de un 80% actual – para este año 2024. Para alcanzar esta meta la energía eólica juega un rol fundamental, ya que en la mayor parte de los países con metas similares esta tecnología ha sido responsable de alrededor de dos tercios del objetivo total (Asociación Mexicana de Energía Eólica). Oaxaca es una región que cuenta con un alto potencial de energía renovable, principalmente eólica, esto de acuerdo con el Atlas de Recursos Eólicos, en donde se estima que el estado tiene este recurso de bueno a excelente en aproximadamente 6,600 km² de

terreno, con clases de potencia de viento de 4 a 7 – en donde 7 es el valor más alto –. El terreno con viento representa un poco más del 7% de la superficie total del estado, es por ello, que el presente estudio se centra en algunas comunidades rurales del estado de Oaxaca que presentan los principales desafíos de infraestructura eléctrica antes mencionados, aunado a las grandes distancias en las que se localizan y su difícil acceso.

De acuerdo con otros investigadores, es necesario un análisis profundo a la hora de implementar proyectos eólicos en una comunidad; tal es el caso del estudio del potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México (Ávila, Morales, Diéguez, & Rubio, 2006), en donde se menciona el gran potencial eólico y lo poco que ha sido explotado este recurso en el país, así como la falta de leyes regulatorias que impulsen una transición energética justa y sostenible.

Por otra parte, derivado de conflictos políticos, a la agencia municipal San Francisco del Mar Pueblo Viejo se le ha cortado la línea eléctrica y derribado varios postes de energía eléctrica. A 5 años de dicho acto, una empresa privada está reinstalando el servicio eléctrico a la comunidad por instrucciones del municipio; sin embargo, sólo tienen indicaciones de reconectar la energía, más no de restaurar y ampliar el servicio, por lo que sólo se tendrá una cobertura del 50%, lo que deja a la mitad de la comunidad aún sin acceso al servicio eléctrico.

1.1.1. Pregunta de investigación

¿El diseño de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico, aislado de la red eléctrica, será una solución óptima para cubrir las necesidades de energía eléctrica que requiere la agencia municipal San Francisco del Mar Pueblo Viejo, Oaxaca?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico, aislado de la red eléctrica, para cubrir las necesidades de energía eléctrica que requiere la agencia municipal San Francisco del Mar Pueblo Viejo, Oaxaca.

1.2.2. Objetivos específicos

- Compilar el recurso renovable y el perfil de demanda de la comunidad bajo estudio.
- Proponer la arquitectura de un sistema híbrido renovable que satisfaga las necesidades de energía eléctrica de la comunidad.
- Optimizar el sistema híbrido renovable utilizando el software especializado Homer Pro.

1.3. Justificación y delimitación de la investigación

Oaxaca se destaca por su notable potencial en la generación de energía renovable, principalmente eólica. Es importante destacar que el impacto de esta tecnología en el uso del suelo es reducido, ya que la base de un aerogenerador de 1 MW requiere un espacio de tan solo 8 x 8 metros cuadrados, esto permite que en las áreas circundantes se puedan realizar actividades agrícolas sin mayores complicaciones. Un aerogenerador de esta capacidad puede generar suficiente electricidad para cubrir las necesidades energéticas de aproximadamente 850 hogares con características similares a las del país; además, los aerogeneradores modernos presentan una ventaja en su diseño modular, lo que facilita una instalación rápida y eficiente. Por ejemplo, construir una planta eléctrica de 100 MW puede tomar menos de un año, un beneficio clave para economías que necesitan incrementar su capacidad energética de manera ágil.

Asimismo, México posee condiciones excepcionales de radiación solar, posicionando a la energía solar como la mejor alternativa incluso para las comunidades más aisladas. Cabe destacar que el 85% del territorio nacional es apto para proyectos fotovoltaicos, lo que convierte a México en un fuerte candidato para ocupar el séptimo lugar a nivel mundial en generación de energía solar. En este marco, los sistemas híbridos emergen como una solución efectiva y accesible, permitiendo reducir el consumo de combustibles fósiles en los sistemas de generación tradicionales, al tiempo que incrementan el acceso sostenible a la electricidad en comunidades rurales y apartadas. Para promover una transición energética es indispensable asegurar, por un lado, que sus beneficios se distribuyan justa y equitativamente, y por otro, es crucial mitigar los impactos negativos que puedan surgir, con especial atención a las posibles afectaciones en las comunidades más vulnerables, asegurando así un enfoque inclusivo y sostenible en el proceso de cambio energético.

Implementar un sistema híbrido con energía fotovoltaica y eólica, podría brindar a la comunidad de San Francisco del Mar Pueblo Viejo, el acceso a la energía eléctrica de la cual por años ha carecido, permitiéndole a sus habitantes una mejor calidad de vida derivado del avance social y tecnológico.

El sistema aislado híbrido se realizará en San Francisco del Mar Pueblo Viejo, también conocido solo como San Francisco Viejo, población del estado de Oaxaca, localizada en el istmo de Tehuantepec y en el municipio de San Francisco del Mar, como se puede observar en la ilustración 1.

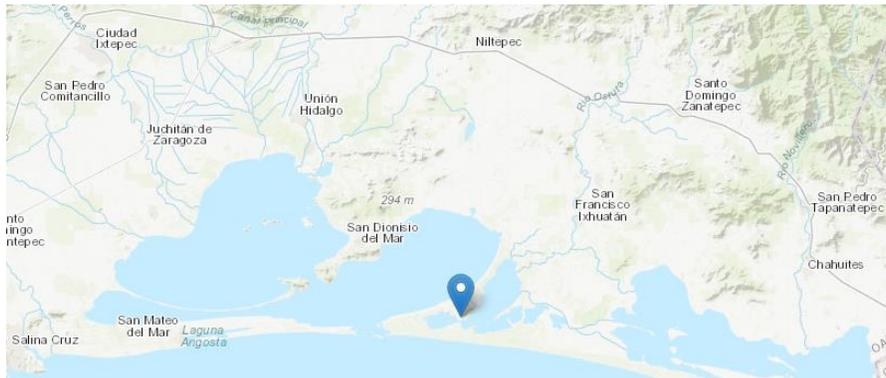


Ilustración 1. Mapa en relieve de San Francisco Viejo, Oax. (tomado de (Google maps, 2023)).

San Francisco del Mar Pueblo Viejo se encuentra localizado a una altitud de 32 metros sobre el nivel del mar; ubicada en la Barra de San Francisco, que divide a la Laguna Inferior y el Mar Muerto del Golfo de Tehuantepec, y en particular en la rivera del estero denominado Laguna El Carrizal (ver ilustración 2).

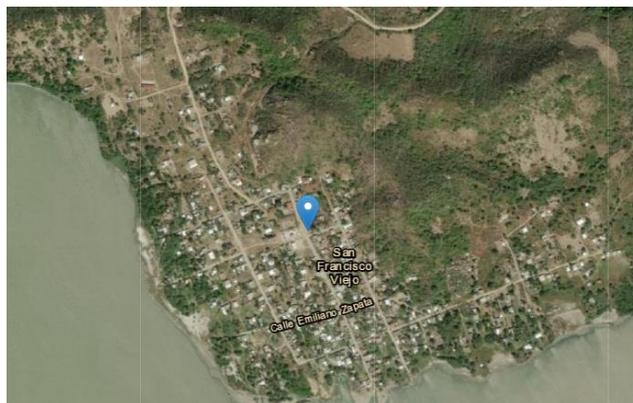


Ilustración 2. Mapa terrestre de San Francisco Viejo, Oax. (tomado de (Google maps, 2023)).

La tabla 1 de acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda de 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía; muestra que San Francisco del Mar Pueblo Viejo tiene una población de 931 habitantes, siendo 489 hombres y 442 mujeres; con un total de 268 viviendas habitadas de las cuáles solo el 28.36% cuentan con electricidad.

Tabla 1. Datos de la población San Francisco del Mar Pueblo Viejo. (Datos tomados de (INEGI, 2020)).

POB TOTAL	POB FEM	POB MAS	TOTAL DE VIVIENDAS	VIVIENDAS HABITADAS	VIVIENDAS CON ELECTRICIDAD	VIVIENDAS SIN ELECTRICIDAD
931	442	489	347	268	76	192

1.4. Hipótesis

Como se ha mencionado anteriormente, Oaxaca tiene un gran potencial eólico y solar, su excelente ubicación y su riqueza en recursos naturales lo hace un estado idóneo para la aplicación de este tipo de sistemas renovables híbridos, además de que, al utilizar diferentes fuentes de energía renovable, resultan más estables y eficientes, adaptándose a las variaciones del viento y la radiación solar, lo que los convierte en una opción más confiable en zonas aisladas; asimismo la integración de almacenamiento en baterías, permitirá crear un diseño que se ajuste a las necesidades específicas de la comunidad y garantizará un costo operativo bajo, en comparación con la dependencia de generadores diésel o de la conexión a la red eléctrica nacional.

Es por ello que la implementación de un sistema eólico-fotovoltaico aislado de la red eléctrica, proporcionará una solución energética sostenible, rentable y eficiente para satisfacer las necesidades eléctricas de la comunidad, al mismo tiempo que reducirá la dependencia de fuentes de energía fósil y tendrá un impacto directo en la calidad de vida de los habitantes, facilitando el acceso a servicios básicos – como drenaje –, mejorando la salud y educación, e inclusive estimulando el desarrollo económico de la localidad.

1.5. Organización de la tesis

La presente tesis está estructurada en cinco capítulos que abordan de manera progresiva el desarrollo del estudio, desde la contextualización del problema hasta las conclusiones finales.

- **Capítulo I - Introducción:** Se presenta el problema de investigación, la justificación del estudio, los objetivos generales y específicos, así como la hipótesis de trabajo.
- **Capítulo II - Marco Teórico:** Se incluyen antecedentes nacionales e internacionales sobre sistemas híbridos de energía renovable, así como conceptos clave en optimización y metodologías aplicadas en el diseño de estos sistemas.
- **Capítulo III - Metodología:** Se describe el proceso de recopilación de datos meteorológicos y de consumo energético, además del procedimiento seguido para la optimización del sistema utilizando HOMER Pro.
- **Capítulo IV - Análisis de Resultados:** Se presentan los hallazgos del estudio, incluyendo las configuraciones óptimas obtenidas mediante simulación, así como un análisis comparativo de las opciones evaluadas.
- **Capítulo V - Conclusiones:** Se evalúa el cumplimiento de los objetivos propuestos, se presentan recomendaciones para futuras investigaciones y se discuten las implicaciones del sistema propuesto en el contexto real.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1 Internacionales

En años recientes, el interés por investigar sistemas híbridos aislados ha ido en aumento, orientándose hacia la optimización de sistemas eólicos y fotovoltaicos para reducir costos y maximizar su eficiencia. En este contexto, (Silva, 2019), en su tesis titulada Dimensionamiento y selección de un sistema híbrido aislado para la electrificación del caserío Pampa de Chaparri, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque, desarrolló un modelo híbrido para proveer electricidad a esta comunidad. La investigación, de carácter aplicado y descriptivo, incluyó visitas al área para analizar la situación actual y calcular el consumo energético promedio diario, con proyecciones para 20 años.

El proyecto consideró datos sobre irradiación solar y velocidad del viento, utilizando HOMER y hojas de cálculo para diseñar un sistema híbrido compuesto por aerogeneradores, paneles so-lares, baterías, inversores y controladores. Las recomendaciones del estudio incluyeron la necesidad de revisiones periódicas del sistema, limpieza de los paneles solares y actualización constante de los datos meteorológicos. Este análisis también destaca la importancia de realizar el mantenimiento solo con personal capacitado.

Por otro lado, un manuscrito preliminar titulado Optimum Sizing of a Stand-alone Hybrid Energy System for Rural Electrification in Bangladesh (Mandal, Das, & Hoque, 2018), aunque utiliza HOMER para simular varios componentes de sistemas híbridos, también analiza los resultados significativos de diferentes configuraciones:

- El caso I: sistema híbrido de generador fotovoltaico/batería/diésel
- Caso II: Sistema híbrido de generador FV/Eólico/Bat/Diesel
- Caso III: sistema híbrido PV/Batt
- Caso IV: Sistema híbrido FV/Eólica/Batería
- Caso V: Sistema generador de batería/diésel
- Caso VI: Sistema híbrido de generador Eólico/Bat/Diesel

Además, se enfoca en identificar otros criterios con respecto a las emisiones del ciclo de vida, los factores de trabajo, la penetración renovable y otros parámetros económicos y ambientales.

De los seis casos estudiados, el sistema híbrido fotovoltaico/batería/diésel destacó por su bajo costo de energía y menores emisiones de CO₂, aunque otras configuraciones presentaron ventajas específicas según el criterio evaluado.

Por su parte, (Muralikrishna & Lakshminarayana, 2008) analizaron en un artículo publicado en ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences la viabilidad económica de sistemas sola-res, eólicos e híbridos, en donde se simuló un método de costeo del ciclo de vida para la evaluación económica de sistemas solares autónomos, sistemas autónomos de energía eólica y sistemas híbridos solar-eólicos. Se realizó una investigación detallada del análisis comparativo de costos del suministro de electricidad para la expansión de la red y del sistema híbrido solar-eólico, utilizando parámetros del sitio, tipo de turbina eólica, tipo de panel solar, días de autonomía de la batería y vida útil del sistema.

Este estudio concluye que los sistemas híbridos solares-eólicos son más rentables y sostenibles en comparación con soluciones individuales, ya que el costo de energía nivelado es consistentemente más bajo, lo que los hace ideales para electrificación rural.

2.1.2 Nacionales

En el contexto nacional, los proyectos relacionados con esta temática son limitados, pero existen aportes valiosos. Un ejemplo destacado que aporta un enfoque diferente es el trabajo de (Nájera, 2020) titulado “Implementación de sistema fotovoltaico aislado y de respaldo para dispositivos de control de personal”. Este estudio aborda varios proyectos realizados, pues se llevó a cabo con cuatro empresas de sectores diversos, aunque se centra exclusivamente en la denominada empresa D, encargada de un proyecto de interés para esta investigación. Esta empresa fue contratada para la instalación de un sistema fotovoltaico, ya que el equipo debía ubicarse en áreas al aire libre en las inmediaciones del autódromo Hermanos Rodríguez. La ubicación es favorable por la alta incidencia de irradiación solar durante la mayoría de las horas solares del día en la zona seleccionada. Adicionalmente, los equipos operan en corriente directa a 12 V, eliminando la necesidad de incorporar un inversor para convertir la energía a corriente alterna.

La empresa D enfrentó desafíos específicos en el diseño del sistema fotovoltaico aislado, como el montaje y la fijación de los componentes, para esto es necesario recordar que son elementos iniciales de suma importancia a la hora de instalar paneles solares. Era esencial

que el diseño incluyera un panel solar con capacidad suficiente para alimentar una batería que garantizara el funcionamiento continuo del sistema las 24 horas del día, los siete días de la semana, incluso en condiciones climáticas adversas. Las baterías seleccionadas debían contar con una capacidad adecuada en amperios-hora para asegurar un almacenamiento de energía suficiente para el sistema de 12 V; asimismo, el controlador era necesario para garantizar una carga eficiente de la batería, evitando sobrecargas y regulando el voltaje suministrado. Este proyecto no detalla una metodología específica, pero describe el procedimiento seguido, el cual concluyó con la elección adecuada de los módulos, baterías y controladores, garantizando un funcionamiento óptimo del sistema. Gracias a una logística bien estructurada, todas las actividades planificadas se completaron conforme a los tiempos establecidos.

Otro trabajo en esta línea es el de (Pérez-Ramírez, Pérez-López, & Martínez-Arremilla, 2019), titulado “Optimización de sistemas híbridos de energía para la electrificación rural de comunidades indígenas de México”. Esta investigación se enfocó en la comunidad indígena del Carrizal Paxtlán, ubicada en el municipio de San Andrés Paxtlán, Oaxaca, a 110 km de la capital del estado y a 25 km de la red eléctrica más cercana. El estudio analizó los componentes de un sistema híbrido renovable y propuso un modelo general para determinar la combinación óptima de estos elementos en una comunidad rural; su objetivo principal fue minimizar los costos de capital, el costo neto actual y el costo energético total. El análisis y la simulación se llevaron a cabo utilizando el software IHOGA, el cual es una herramienta especializada en simulación. Este enfoque permitió obtener diferentes configuraciones de sistemas híbridos, destacándose la configuración Fotovoltaica/Eólica/Baterías como la más económica y viable para satisfacer la demanda energética. Los resultados de simulación fueron una herramienta útil para facilitar la toma de decisiones sobre una futura inversión de capital para las comunidades aisladas de México. En cuanto a la herramienta de optimización, IHOGA ofrece la mejor solución de todas las combinaciones posibles y sobre todo la precisión de los elementos del sistema: número de paneles fotovoltaicos, su tipo y el número de baterías y su tipo; resultados que otros métodos no ofrecen.

Por la metodología empleada es que se menciona el artículo publicado por (Corral, Villalba, Caberta, & Valenzuela, 2014) titulado “Diseño de un sistema híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua”, en el cual se realizó

una simulación para un poblado rural llamado Cerro Prieto, en el municipio de Balleza, Chihuahua. Este lugar, con 175 habitantes y 50 viviendas, carece de energía eléctrica debido a su distancia de 200 km respecto a la red eléctrica más cercana. El proyecto incluyó un sistema eólico-fotovoltaico, un generador diésel como respaldo y un banco de baterías para almacenar energía. Aunque la simulación mostró que el costo era aproximadamente cuatro veces mayor al de la electricidad comercial de CFE, se determinó que la solución era viable considerando el bajo consumo energético y la lejanía de la red eléctrica. Adicionalmente, se ofrecieron recomendaciones para optimizar costos operativos, extender la vida útil de los equipos y mejorar el desempeño del sistema.

Finalmente, un proyecto antiguo pero muy útil para esta investigación (Medina, 2013), centrada en un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para un edificio habitacional, constituye un referente valioso. Este proyecto planteó el diseño de un sistema capaz de satisfacer la demanda eléctrica de un conjunto habitacional, así como de la instalación eléctrica necesaria, incluyendo la selección rigurosa de todos los componentes eléctricos necesarios. Se concluyó que tan solo para recuperar la inversión, el costo por unidad departamental es bastante aceptable y competitivo en comparación con el costo de un departamento convencional, mientras que los ahorros a largo plazo eran significativos. El beneficio lo disfrutaban los habitantes de cada unidad departamental, ya que podían economizar más de \$210,000 MXN en 30 años gracias al uso de calentadores solares y aproximadamente \$225,000 MXN adicionales al depender de energía generada por el sistema híbrido, y no estar sujetos a cubrir una cuota bimestral por tarifa eléctrica. Además, se evitó la emisión de más de un millón de toneladas de CO₂ durante tres décadas, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. El sistema híbrido proporcionó flexibilidad y confiabilidad al combinar dos fuentes de energía renovable, lo que garantizó el suministro eléctrico incluso en condiciones climáticas adversas.

Cabe mencionar que se seleccionó este estudio porque la caracterización de la demanda energética se muestra sumamente detalla, así como los cálculos pertinentes del sistema.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. La electricidad en México

La planeación del Sistema Eléctrico Nacional SEN, la cual dirige la Secretaría de Energía SENER, garantiza en todo momento el suministro constante de energía eléctrica y anticipándose a los requerimientos futuros de abastecimiento eléctrico, tanto para la población en general como para la planta productiva nacional, la cual continúa creciendo en conjunto con los cambios geopolíticos recientes, los cuales son los principales en precisar los pronósticos de crecimiento de la demanda energética, del consumo y de la generación de electricidad, los cuales se dan a conocer detalladamente en el programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2023-2037. (SENER, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037, 2023).

El Sistema Eléctrico Nacional, es uno de los sistemas integrados más grandes del mundo, ya que atiende a más de 125 millones de habitantes en áreas geográficas complejas, así como a servicios públicos y privados en todo el país. Se tiene como objetivo actual abastecer a todos los mexicanos de electricidad a precios accesibles y garantizar el suministro a todos los sectores productivos de la economía mexicana para lograr la igualdad social y disminuir la disparidad existente de desarrollo entre los estados del norte y el sur del país.

La planeación del Sistema Eléctrico Nacional se realiza con criterios claramente definidos para la instalación de nuevas centrales eléctricas que garanticen el suministro de manera eficiente, con calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad; por lo que respecta a la electricidad, es de interés público y colectivo, por lo tanto, el enfoque debe centrarse en el uso óptimo de los recursos naturales y energéticos.

2.2.1.1. Sistema eléctrico nacional

Gracias a datos de la CENACE se sabe que el Sistema Eléctrico Nacional está compuesto por nueve regiones de control y un sistema eléctrico aislado (Mulegé), como se muestra en la ilustración 3.



Ilustración 3. Regiones del sistema eléctrico nacional (datos tomados de (CENACE, 2020)).

El Sistema Interconectado Nacional está integrado por las siete Gerencias de Control Regional. En ellas se reparten los recursos y reservas de capacidad ante la diversidad de situaciones operativas; esto permite el intercambio de energía para lograr un funcionamiento más asequible y confiable en su conjunto.

El SEN está constituido por Redes Eléctricas en diferentes niveles de tensión:

- Red Nacional de Transmisión (RNT): Sistema integrado por las Redes Eléctricas que se utilizan para transportar energía a las RGD y a los Usuarios Finales que por las características de sus instalaciones lo requieran, así como las interconexiones a los sistemas eléctricos extranjeros que determine la SENER. Incluye las tensiones iguales o mayores a 69 kV.
- Redes Generales de Distribución (RGD): Redes Eléctricas que se utilizan para distribuir energía eléctrica al público en general; están integradas por las Redes Eléctricas en media tensión, cuyo Suministro Eléctrico ocurre a niveles mayores a 1 kV y menores a 69 kV, así como las Redes Eléctricas en baja tensión en las cuales el Suministro Eléctrico es igual o menor a 1 kV.
- Redes Particulares: Redes Eléctricas que no forman parte de la RNT o de las RGD.

En la ilustración 4, se muestra la red troncal de transmisión, considerando desde 115 a 400 kV en el SIN (CENACE, 2020).

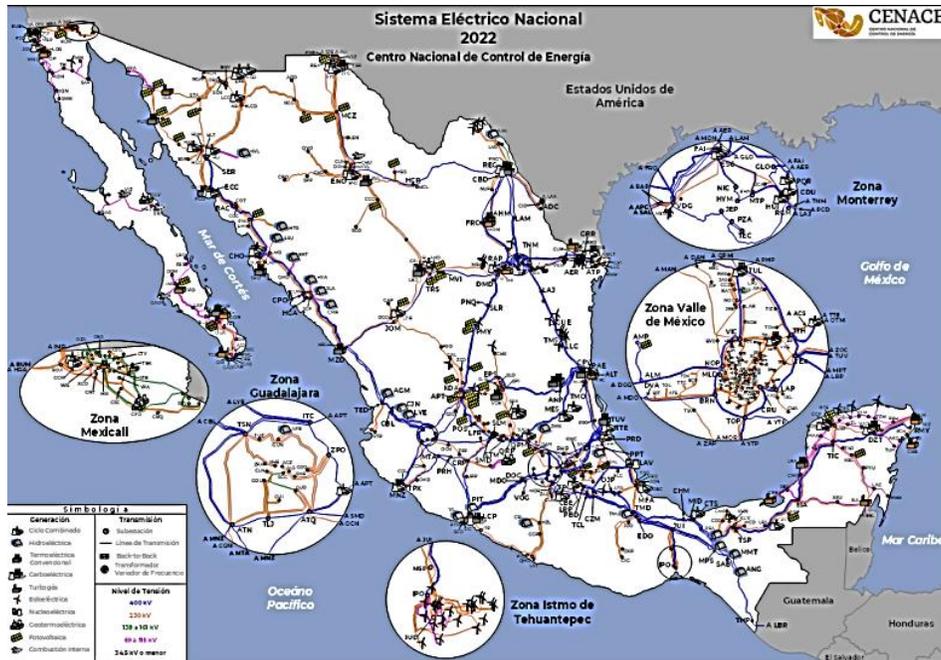


Ilustración 4. Red Troncal de Transmisión del Sistema Eléctrico Nacional 2022 (tomado de (CENACE, 2020)).

2.2.1.2. Normatividad Mexicana

El Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional es el documento que contiene la planeación del Sistema Eléctrico Nacional, el cual establece los objetivos, metas, estrategias y prioridades que deberán adoptarse para satisfacer la demanda en el Sistema, procurando que su operación se realice en condiciones de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad; para lo cual, deberá dar cumplimiento a los objetivos de Energías limpias y considerar las necesidades de proyectos de inversión que los transportistas y distribuidores deben llevar a cabo.

El Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (SENER, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037, 2023) es el instrumento de Políticas Públicas del Gobierno de México que expone a detalle la planeación del Sistema Eléctrico Nacional para los próximos quince años, el cual está alineado al Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 y plasma los grandes objetivos de la Política Energética del actual gobierno.

El PRODESEN incorpora, principalmente, los elementos más relevantes del Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas, de los Programas de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y del Programa de las Redes Generales

de Distribución, así como define la infraestructura eléctrica a desarrollar en los próximos años.

La SENER (2023) marca en el “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional”: Está sustentado en los artículos 4, párrafo quinto, 25, párrafos primero, tercero y quinto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos CPEUM, que establecen la obligación del Estado de garantizar el derecho a un medio ambiente sano; los principios de rectoría económica del Estado; planeación del desarrollo nacional; actividades estratégicas y la regulación de actividades económicas reservadas al Estado. Dice que la energía eléctrica no debe caracterizarse como un derecho humano autónomo, sino como un bien constitucionalmente protegido, que es parte de un servicio público de primera importancia, sobre el cual se proyectan distintos principios previstos en los artículos 25, 27 y 28 constitucionales. (SENER, 2023, pág. 17)

Entre la normatividad de la cual tiene relación con este proyecto, es necesario tener conocimiento sobre las leyes que están en vigor:

La Ley de Transición Energética (LTE), en su artículo 14, fracciones VII y XVI faculta a la SENER para incorporar la instalación de Centrales Eléctricas con Energías Limpias en la planeación indicativa del crecimiento de la infraestructura eléctrica; así como promover la construcción de las obras de infraestructura eléctrica que faciliten la interconexión de Energías Limpias al SEN. (SENER, 2023, pág. 19)

La SENER (2023) también menciona la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en su artículo 7, fracción XXIII, establece como atribución de la federación desarrollar programas y proyectos integrales de mitigación y adaptación al cambio climático en materia de energía eléctrica, para lograr el uso eficiente y sustentable de los recursos energéticos fósiles y renovables del país.

La SENER (2023) se compromete al uso de energías limpias mediante el Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica (RLIE) que establece en su artículo 5, que:

Para la elaboración del PRODESEN deberán considerarse, al menos, los pronósticos de la demanda eléctrica y los precios de los insumos primarios de la Industria Eléctrica; la coordinación de los programas indicativos para la instalación y retiro de Centrales Eléctricas con el desarrollo de los programas de ampliación y modernización de la RNT y las RGD; la política de Confiabilidad; los Programas Indicativos para la Instalación y Retiro de Centrales

Eléctricas que prevea la infraestructura necesaria para asegurar la Confiabilidad del SEN; la coordinación con el programa de expansión de la Red Nacional de Gasoductos y los mecanismos de promoción de las Energías Limpias, así como el análisis costo beneficio integral de las distintas alternativas de ampliación y modernización de la RNT y las RGD. Asimismo, en su artículo 9, último párrafo destaca que en el mes de mayo de cada año la SENER publicará el PRODESEN, una vez autorizados los programas de ampliación y modernización de la RNT y de las RGD.

2.2.1.3. Transición energética

La transición energética busca, entre otros objetivos, eliminar la pobreza energética y garantizar el acceso universal a la electricidad. Para ello, se encuentran de forma inherente una serie de estrategias que las empresas deben adoptar para cumplir con estos objetivos. En ese sentido, la digitalización representa una dirección más para optimizar el rendimiento económico y ambiental de las empresas. (SolarPower Europe; ASOLMEX, 2019)

En el nuevo esquema del sistema eléctrico nacional (SENER, 2022), el artículo 27 menciona que corresponde exclusivamente a la Nación el área estratégica de la electricidad, consistente en generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica. La Nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieren para dichos fines.

El Estado queda a cargo de la transición energética y utilizará de manera sustentable todas las fuentes de energía de las que dispone la Nación, con el fin de reducir las emisiones de gases y componentes de efecto invernadero. Establecerá:

- Políticas públicas científicas, tecnológicas e industriales
- Impulso de financiamiento
- Planeación energética sustentable

La ley de transición energética del Gobierno de México GoM establece el objetivo de que el 35% de su generación de electricidad provenga de fuentes de energía limpia para 2024. México está en camino de cumplir este objetivo, generando el 26.7% de su electricidad a partir de fuentes renovables en 2021. Sin embargo, tendrá que continuar expandiendo su sector renovable ya que se espera que la demanda de electricidad en México crezca un 12.7% para 2024. (MÉXICO ENERGY, s.f.)

La CFE se encargará de mantener los márgenes establecidos en los compromisos internacionales: 35% al 2024 asimismo, impulsará la generación distribuida en hogares, escuelas, edificios, pozos de riego, núcleos rurales, entre otros, a través de la utilización sustentable de todas las fuentes de energía de las que dispone la Nación, donde se beneficiará directamente al usuario para el apoyo de la economía familiar. Con energías limpias en un 28.6%. (SENER, Nuevo esquema del sistema eléctrico nacional, 2022). (Ver ilustración 5)

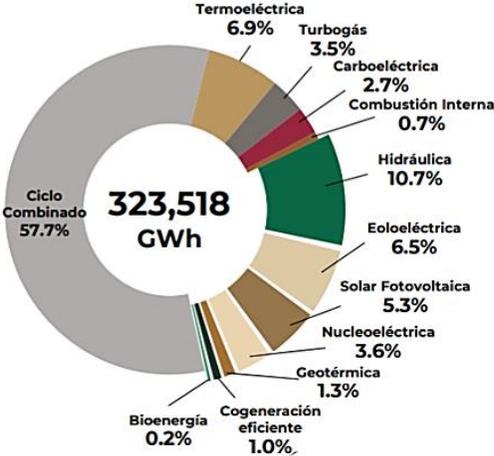


Ilustración 5. Porcentaje de generación eléctrica en México en 2021 (tomado de (SENER, Nuevo esquema del sistema eléctrico nacional, 2022)).

2.2.1.4. Energías renovables en México

México se presta al desarrollo de las energías renovables gracias a sus favorables condiciones geográficas. El país disfruta de alrededor de 300 días de luz solar cada año, y con más de 9,000 km de costa, existe un potencial significativo de crecimiento en otras formas de energía renovable. (MÉXICO ENERGY, s.f.)

SEMARNAT menciona que las energías renovables representan mayor seguridad energética, menos contaminación y ahorros a la economía de estados y municipios

México posee un gran potencial para generar energía a través de fuentes renovables, ya que cuenta con altos niveles de insolación, recursos hídricos para instalar plantas minihidráulicas, vapor y agua para el desarrollo de campos geotérmicos, zonas con intensos y constantes vientos, grandes volúmenes de esquilmos agrícolas e importantes cantidades de desperdicios orgánicos en las ciudades y el campo. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018)

Las fuentes de energía se generan dependiendo de las características de cada población, pueden ser desde biogás de tiraderos municipales – en poblaciones de medianas a grandes, el desarrollo del potencial de plantas minihidráulicas, la generación de electricidad a través de un mayor uso de residuos agropecuarios y forestales, hasta las tecnologías más maduras como la instalación de celdas fotovoltaicas y la energía eólica.

La CFE dice que además de la geotermia, la única fuente de energía alterna capaz de desarrollarse, en zonas de corrientes de viento, a precios competitivos en gran escala es la energía eólica.

México ya ha desarrollado una combinación diversa de energía renovable que consiste en energía hidroeléctrica, solar, eólica y geotérmica. El sector de energía solar del país es el segundo más grande de América Latina, después de Brasil, con una capacidad instalada de generación solar fotovoltaica (PV) un poco más de 7 GW en 2021. La capacidad de energía eólica de México se situó en 7.7 GW, mientras que su producción geotérmica totalizó 976 MW. También cuenta con instalaciones de bioenergía, geotermia y energía nuclear. (MÉXICO ENERGY, s.f.)

(MEXICO 2, 2016) En México, la cantidad de energía generada a partir de fuentes renovables se duplicó entre 2010 y 2019, pasando de 13,515 a 25,648 MW de acuerdo a datos de la IRENA; contándose hasta 2019 con 50 parques fotovoltaicos ubicados en 15 estados, 68 parques eólicos en 14 estados, cuatro proyectos geotérmicos operando en cuatro estados, y 66 hidroeléctricas distribuidas en 15 estados del país (Observatorio de Inteligencia del Sector Energético (OISE), 2018). Estos números son alentadores, pero se requiere un esfuerzo sostenido para que México pueda cumplir con los compromisos que adquirió en “El Acuerdo de París, sobre Cambio Climático” que incluyen la reducción en un 22% de emisiones de gases de efecto invernadero y en 51% las emisiones de carbono negro para 2030.

Al observar la distribución de los sitios de aprovechamiento de las distintas energías entre los estados de la República podemos observar que no es homogénea, pues estados como Colima, Morelos, Tlaxcala, Campeche, Tabasco y la Ciudad de México carecen de producción de energías renovables, mientras que Baja California Norte, Sonora, Coahuila, San Luis Potosí, Jalisco y Puebla aprovechan tres de los cuatro tipos de energías renovables que se producen en el país, lo cual indica que hay posibilidades de crecimiento para la generación de energías renovables (Ilustración 6).



Ilustración 6. Distribución por estado de la producción de energías renovables en México (tomada de ((Patraca & López, 2021)).

El gobierno mexicano dio la bienvenida a la energía renovable desde el principio con la construcción del parque eólico Eurús en 2009. Ubicado en el estado de Oaxaca, es uno de los desarrollos de energía eólica más grandes de América Latina. Mientras tanto, Iberdrola estableció el primer parque solar de México en Sonora en 2018. Como pionero en la adopción de energía renovable, (MÉXICO ENERGY, s.f.) asegura que México tiene un potencial significativo para desarrollar el sector sustancialmente durante la próxima década para convertirse en un líder de energía renovable en América Latina.

Patraca y López (2021) aseguran que el desarrollo de una planta de energía renovable depende de una combinación de factores económicos, sociales e inclusive legales, entre otros, sin embargo, el primer requisito es la disponibilidad de recursos naturales como fuente de energía, ya que esto influye significativamente en la viabilidad de una tecnología en particular. Un ejemplo de ello es Indonesia, que posee el 40 % de las reservas geotérmicas del mundo y ha incrementado gradualmente su aprovechamiento. En México, las fuentes renovables como la energía hidráulica, eólica, solar y geotérmica presentan un alto potencial de crecimiento. Regiones como el norte de Veracruz y Baja California Sur cuentan con

condiciones óptimas para la generación eólica, mientras que el clima desértico del norte del país, con baja nubosidad, favorece el desarrollo de la energía solar. Asimismo, el Eje Neovolcánico Transversal, que abarca entidades como Hidalgo, Guanajuato y Querétaro, posee importantes recursos geotérmicos. En cuanto a la energía mareomotriz, aunque aún no ha sido explotada en México, estudios prospectivos indican que la costa noroeste del país tiene un considerable potencial para su implementación.

A medida que México hace la transición hacia la energía renovable, se espera que la expansión del sector cree más empleos de alta calidad, así como ayude a México a cumplir su objetivo de cero emisiones netas de carbono para 2050. Además, la energía renovable proporciona un medio de bajo costo para electrificando las zonas rurales (MÉXICO ENERGY, s.f.).

Según el Departamento de Energía de EE. UU., México tiene el potencial para desarrollar su industria de energías renovables para establecer 24,918 GW de energía solar fotovoltaica, repartidos por todo el país. Además, podría desarrollar 3,669 GW de energía eólica, 2.5 GW de energía geotérmica convencional y 1.2 GW de energía hidráulica.

2.2.2. Energía solar

Bahman Zohuri (2018) reconoce a la energía solar, también conocida como fotovoltaica, como una de las más populares y de más rápido crecimiento fuentes de energía alternativas. Inicialmente, la energía fotovoltaica solo se usaba para operaciones pequeñas y medianas, desde dispositivos alimentados por energía solar (como calculadoras) hasta paneles domésticos. Sin embargo, desde la década de 1980, las plantas comerciales de energía solar comenzaron a volverse mucho más comunes. Los aumentos en la eficiencia de las células solares y la caída de los precios están haciendo que la energía solar sea competitiva con las fuentes de energía convencionales, es decir, combustibles fósiles y carbón (Zohuri, 2018).

Definiendo el termino correcto, ¿qué es la energía solar? SEMARNAT define que la energía solar es la obtenida directamente del Sol a través de la radiación electromagnética, la cual puede aprovecharse por su poder calórico, o bien para generar electricidad. Se estima que el sol produce 4 mil veces más energía de la que los seres humanos somos capaces de consumir, por lo cual su potencial es realmente ilimitado. La unidad, comúnmente usada, para medir el

recurso solar en términos de energía es el kilowatt-hora por metro cuadrado por día – kWh/m² día –, mientras que el de potencia es el watt por metro cuadrado (watt/m²).

2.2.2.1. Radiación solar

La SEMARNAT (2015) en su “guía de programas de fomento a la generación de energía con recursos renovables” describe que la radiación solar es aprovechada a través de paneles solares, los cuales pueden clasificarse en dos tipos: colectores solares y paneles fotovoltaicos. Los colectores solares capturan la energía de la radiación y la transforman en energía térmica, utilizada principalmente para el calentamiento de agua. Por otro lado, los paneles fotovoltaicos están compuestos por múltiples celdas que convierten la luz en electricidad.

La conversión de energía solar en electricidad se lleva a cabo mediante una célula fotoeléctrica. Cuando los fotones de la luz solar inciden sobre una superficie compuesta principalmente de silicio, este material libera electrones. Al ser capturados, generan una corriente eléctrica que puede ser utilizada en distintos sistemas y aplicaciones. El equipo necesario para producir energía eléctrica a partir de la energía solar se constituye por: celdas fotovoltaicas, módulo fotovoltaico, acumuladores de energía, inversor (dispositivo que convierte la corriente continua en corriente alterna), medidor bidireccional, líneas de transmisión, cuadro eléctrico (cableado, transformador, rectificador y controlador) equipado con voltímetro y amperímetro, fusibles, e interruptores.

A su paso por la atmósfera, la radiación solar es sometida a una combinación de procesos de reflexión, atenuación y difusión que alteran sus características. La reflexión en las nubes disminuye la radiación incidente en la superficie terrestre mientras que la absorción por vapor de agua, ozono y CO₂ produce una modificación de las características espectrales de la radiación. Además, la dispersión por partículas modifica la distribución espacial de la radiación. (Lamigueiro, 2023) Dependiendo del tamaño de la partícula en interacción pueden distinguirse tres fenómenos de difusión:

- Difusión de Rayleigh, donde la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño de la partícula. Se produce en las capas altas y es responsable del color azul del cielo.
- Difusión de Mie, donde la longitud de onda es de magnitud similar al tamaño de la partícula. Se produce en las capas bajas de la atmósfera.

- Difusión no selectiva, aquella en la que la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de la partícula.

Friedrich et al. (1988) explican en el libro de las energías renovables que “toda la energía expresada por la constante solar no llega a la superficie de la Tierra; al atravesar la radiación solar la atmósfera terrestre, pierde intensidad, a la vez que se modifica su distribución espectral”. (Ilustración 7) Todo ello es debido a complejos fenómenos de absorción, reflexión y difusión que tienen lugar en las capas de la atmósfera por acción de los gases que la constituyen, el vapor de agua, y las partículas en suspensión. En efecto, el nitrógeno y el oxígeno del aire tienen un poder de absorción muy débil, el ozono absorbe la mayor parte de la radiación UV y tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono absorben una fracción de la radiación IR.

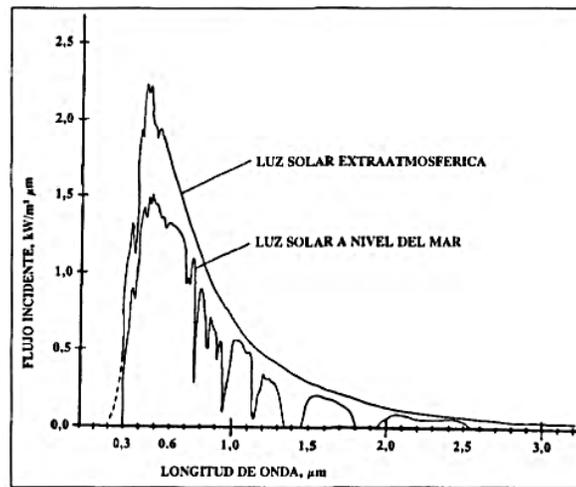


Ilustración 7. Distribución espectral de la radiación solar (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

(FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988) Además de estos factores, la intensidad de la radiación solar también se ve afectada por el espesor de la capa de aire, la ubicación geográfica y la estación del año, entre otros aspectos. Estos elementos contribuyen a la complejidad de los factores que influyen en la cantidad de radiación solar que llega a un lugar determinado. La energía que la Tierra recibe del Sol, conocida como radiación global, se compone de dos partes bien diferenciadas:

1. Radiación directa, que atraviesa la atmósfera sin sufrir alteraciones y puede ser concentrada mediante sistemas ópticos.
2. Radiación difusa, también llamada radiación dispersa, que resulta de la dispersión provocada por los componentes de la atmósfera y el albedo (la fracción de radiación reflejada por la superficie terrestre). A diferencia de la radiación directa, la radiación difusa no puede ser enfocada con sistemas ópticos.

Con todo esto, la radiación que llega al suelo es de unos 900 W/m² (Ilustración 8), valor que equivale a unas 2.000 veces al consumo energético mundial.

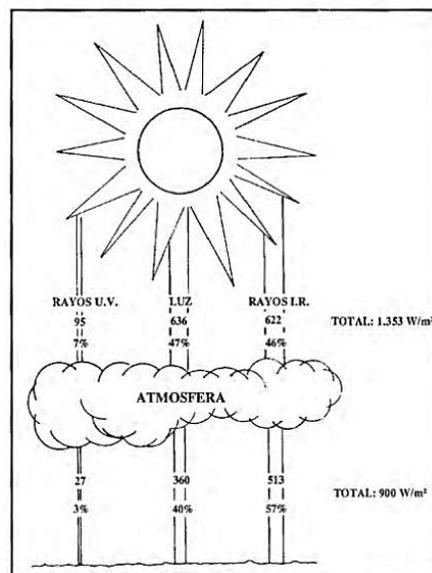


Ilustración 8. Energía solar que atraviesa la atmósfera (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

Uso de la nomenclatura

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de la radiación solar incluyen en su expresión la forma de cada componente de la irradiancia o irradiación, el instante o período en el que se recibe, el período de promedio de los valores y el lugar de incidencia. Es recomendable leer estas expresiones en el orden período, forma, tiempo y lugar utilizando el formato de nomenclatura de la siguiente ecuación:

Forma tiempo, promedio (lugar)

Para expresar el lugar de incidencia caben las siguientes posibilidades:

- (Orientación, Inclinación): (β , α)

- (Horizontal): (0)
- (Superficie perpendicular al vector solar): (n)
- (En el plano del generador): (I)

Por ejemplo, al escribir $B_h(0)$ leeremos irradiación directa (forma) horaria (tiempo) en el plano horizontal (lugar), mientras que $G_{d,m}(I)$ se lee media mensual (periodo) de la irradiación global (forma) diaria (tiempo) en el plano del generador (lugar).

2.2.2.2. Cálculo de componentes de radiación solar

Para determinar la energía generada por una planta de células solares o analizar su evolución a lo largo del tiempo, es fundamental conocer la radiación que incide sobre el plano del generador. Si el objetivo es prever la producción energética futura del sistema, el desafío radica en estimar la radiación que recibirá, utilizando para ello los datos disponibles sobre el comportamiento histórico de la radiación en la ubicación específica.

A la hora de analizar el comportamiento de un sistema fotovoltaico, el problema radica en convertir los valores de irradiancia disponibles en valores correspondientes a la inclinación y orientación del generador. En general, las bases de datos disponibles recogen información sobre la radiación global en el plano horizontal. Esta información suele almacenarse en forma de valores de exposición diaria, aunque a veces se encuentran disponibles datos de exposición para períodos de tiempo más cortos de 10 minutos o incluso 1 minuto. Por tanto, para solucionar estos dos problemas se deben realizar diferentes procedimientos de cálculo para obtener información sobre la radiación en condiciones diferentes a las iniciales.

Como fue expuesto por (Lamigueiro, 2023), estos procedimientos estimarán la proporción de cada componente en la radiación global. A partir de estas componentes estimadas, se realizarán transformaciones para calcular la radiación directa y difusa en el plano del generador. Veremos que estos procedimientos deben asumir un determinado comportamiento estocástico y una distribución angular de la radiación difusa.

Uno de los primeros intentos de realizar una descripción del comportamiento estocástico de la radiación solar fue llevado a cabo por Liu y Jordan en 1960. Para caracterizar la radiación solar en un lugar propusieron el índice de claridad, KT . Este índice es la relación entre la radiación global y la radiación extra atmosférica, ambas en el plano horizontal. Según la definición de $B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos \theta_z$, al dividir la radiación global con la extra atmosférica

el índice de claridad no depende de las variaciones debidas al movimiento aparente del sol ni de la localidad.

El índice de claridad diario es la relación entre los valores diarios de irradiación:

$$K_{Td} = \frac{G_d(0)}{B_{0d}(0)} \quad (1)$$

Mientras que el índice de claridad mensual es la relación entre las medias mensuales de la irradiación diaria:

$$K_{Tm} = \frac{G_{d,m}(0)}{B_{0d,m}(0)} \quad (2)$$

Los datos de radiación disponibles en bases de datos proceden de medidas realizadas por estaciones terrestres o estimadas a partir de imágenes de satélite. Las estaciones terrestres suelen ser estaciones agroclimáticas dedicadas a la medida de variables meteorológicas y climáticas orientadas principalmente al sector agrícola. Uno de los instrumentos que incorporan es el piranómetro, dispositivo capaz de medir la radiación global. En casos excepcionales incluyen un pirheliómetro, dispositivo que mide la radiación directa, o un piranómetro de difusa. La información recogida por las redes de estaciones agroclimáticas suele estar disponible en páginas de Internet

La cobertura espacial que ofrece la red de estaciones terrestres es muy limitada por lo que frecuentemente hay que recurrir a interpolaciones entre varias estaciones (aproximación válida sólo cuando existe una distancia mínima) o a imágenes de satélite. Las imágenes procedentes de satélites geoestacionarios meteorológicos (por ejemplo, el Meteosat) pueden ser interpretadas para estimar la radiación incidente en la superficie terrestre. Lamigueiro (2023) resalta que “el valor obtenido es una medida indirecta a través de un algoritmo de análisis, con el consiguiente error asociado”. No obstante, su alta cobertura espacial y disponibilidad han fomentado su uso en los últimos años. (Lamigueiro, 2023) Es importante considerar que las discrepancias entre distintas bases de datos pueden alcanzar hasta un 30%, lo que implica que cualquier resultado obtenido debe interpretarse dentro de este margen de incertidumbre. Por ello, toda estimación de energía debe estar claramente referenciada a la base de datos utilizada para su cálculo. En general, la información disponible en estas bases suele limitarse a valores diarios de radiación global en el plano horizontal. A partir de estos

datos, es necesario aplicar un procedimiento de cálculo que permita estimar la radiación difusa y directa, y posteriormente trasladar estos valores al plano inclinado correspondiente.

2.2.2.3. Conversión eléctrica

Existen dos efectos físicos que permiten la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica: el termoelectrónico y el fotoelectrónico. En el primero, la corriente eléctrica se produce a partir del calor de la radiación luminosa, mientras que, en el segundo, es la energía de los corpúsculos constituyentes de la luz o fotones, la que se aprovecha para producir electricidad. (Lamigueiro, 2023)

La radiación solar se capta mediante paneles solares; éstos pueden ser colectores solares, que obtienen la energía de la radiación y la transforman en energía térmica, generalmente utilizada para calentar agua, o bien, paneles fotovoltaicos, los cuales se componen de varias celdas que permiten convertir la luz en electricidad. En la guía de programas de fomento a la generación de energía con recursos renovables (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018) explica que la conversión de energía solar en energía eléctrica se realiza a través de una célula fotoelectrónica. La luz, que llega en forma de fotones, impacta sobre una superficie construida principalmente por silicio, éste emite electrones que, al ser capturados, producen una corriente eléctrica.

(Nandwani, 2005) La conversión de energía solar en electricidad se logra mediante celdas solares, fabricadas principalmente a partir de materiales semiconductores como el silicio. Estas celdas se emplean en una amplia variedad de dispositivos, desde relojes y calculadoras hasta naves espaciales. Sin embargo, debido a la alta inversión inicial y la complejidad de su fabricación, solo un número reducido de países en el mundo produce celdas solares.

El sistema necesario para generar electricidad a partir de la energía solar está compuesto por varios elementos clave: celdas fotovoltaicas, que capturan la energía solar; módulos fotovoltaicos, que agrupan múltiples celdas; acumuladores de energía, que almacenan la electricidad generada; y un inversor, que transforma la corriente continua en corriente alterna. Además, el sistema incluye un medidor bidireccional, líneas de transmisión y un cuadro eléctrico, el cual integra cableado, transformador, rectificador y controlador, además de instrumentos de medición como voltímetros y amperímetros, junto con fusibles e interruptores de seguridad.

2.2.2.4. Estructura de un panel fotovoltaico

Célula solar

Como describe Lamigueiro, O. P. (2023) la corriente de una célula solar es un balance entre la fotocorriente y la corriente de oscuridad que, a su vez, depende de la tensión aplicada en los terminales del dispositivo. Cuando la tensión aplicada es nula (la célula está cortocircuitada) la corriente se debe exclusivamente a la fotocorriente. El valor de la corriente permanece casi constante hasta las cercanías del valor de tensión en el que el diodo comienza a conducir. A partir de este punto, la corriente disminuye abruptamente hasta alcanzar un valor nulo (célula en circuito abierto) en el punto donde la fotocorriente y la corriente de oscuridad quedan compensadas. La corriente fotogenerada puede ser modelada con un generador de corriente mientras que la corriente de oscuridad puede ser representada con un diodo, tal y como se recoge en la ilustración 9.

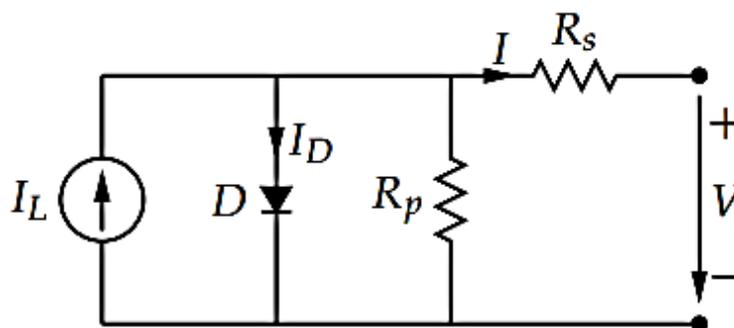


Ilustración 9. Modelo eléctrico de una célula solar (tomada de (Lamigueiro, 2023)).

En condiciones de radiación solar de 1 kW/m^2 , una célula solar en condiciones óptimas de trabajo proporciona una potencia de 14 mW/cm^2 (28 mA/cm^2 a una tensión de $0,5 \text{ V}$), lo que supone un rendimiento del 14%. Si varía la iluminación, la corriente de la célula varía proporcionalmente, en tanto que la tensión se mantiene casi invariable. Naturalmente, estos niveles de tensión son inutilizables para la mayor parte de las aplicaciones, pero si se desea obtener mayor tensión, basta conectar un cierto número de células en serie. Así, conectando 36 de ellas (dimensiones normales, $7,6 \text{ cm}$ de diámetro) se obtienen 18 V , tensión suficiente para hacer funcionar equipos a 12 V , incluso con iluminaciones mucho menores de 1 kW/m^2 (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988).

Sin embargo, Lamigueiro, O. P. (2023) señala que las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales. Es necesario realizar agrupaciones en serie y paralelo para entregar tensión y corriente adecuadas. Un módulo fotovoltaico es una asociación de células a las que protege físicamente de la intemperie y aísla eléctricamente del exterior, dando rigidez mecánica al conjunto.

Zohuri, B. (2018) en su libro *Hybrid Energy Systems* dice: “Las células solares normalmente se combinan en módulos que contienen alrededor de 40 células solares; varios de estos módulos están montados en conjuntos fotovoltaicos que pueden medir hasta varios metros de lado”.

Estos paneles fotovoltaicos de placa plana se pueden montar en un ángulo fijo orientado hacia el sur, o se pueden montar en un dispositivo de seguimiento que sigue al sol, lo que les permite capturar la mayor cantidad de luz solar a lo largo del día. Varios paneles fotovoltaicos conectados pueden proporcionar suficiente energía para un hogar; para grandes empresas de servicios eléctricos o aplicaciones industriales, se pueden interconectar cientos de conjuntos para formar un único sistema fotovoltaico de gran tamaño.

“Una serie de módulos montados sobre un soporte mecánico constituyen un panel fotovoltaico” (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988). Los módulos de un panel se pueden conectar en serie o en paralelo, de modo que puede conseguirse casi cualquier valor de tensión y de corriente.

(Lamigueiro, 2023). Un generador fotovoltaico es una asociación eléctrica de módulos fotovoltaicos para adaptarse a las condiciones de funcionamiento de una aplicación determinada. Se compone de un total de $N_p \cdot N_s$ módulos, siendo N_p el número de ramas y N_s el número de módulos en cada serie. El número de ramas define la corriente total del generador, $I_g = N_p \cdot I_m$, y el número de módulos por serie define la tensión del generador, $V_g = N_s \cdot V_m$. (Pág. 63)

La ilustración 10 muestra un generador fotovoltaico compuesto por 2 ramas de 3 módulos en serie. El esquema incluye la protección con fusibles y por rama y los diodos de paso incluidos en cada módulo.

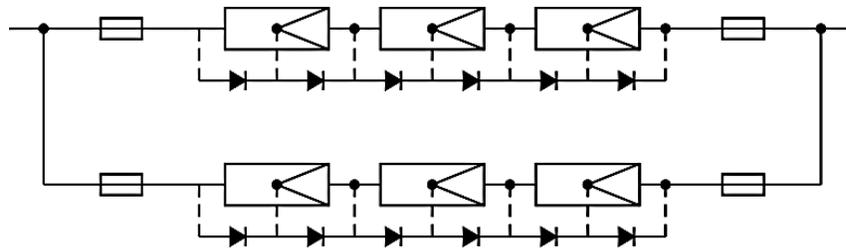


Ilustración 10. Esquema de un generador fotovoltaico compuesto por 2 ramas de 3 módulos en serie (tomada de (Lamigueiro, 2023)).

Como se sabe, una instalación, además requiere controlar del voltaje, mediante un regulador, y dirigir la corriente hacia una batería, para almacenarla. (Nandwani, 2005)

La energía generada por un panel fotovoltaico es en forma de corriente continua (CC), lo que resulta adecuada para ciertas aplicaciones específicas. Sin embargo, muchos dispositivos y sistemas eléctricos operan con corriente alterna (CA), por lo que es necesario un equipo electrónico especializado que convierta la corriente producida por el panel en el tipo requerido. En algunos casos, además de transformar la corriente continua en alterna, también puede ser necesario modificar sus características para adaptarla a diferentes requerimientos de voltaje o frecuencia, garantizando así su compatibilidad con una mayor variedad de aplicaciones y sistemas eléctricos. (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)

Esta fase del proceso de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica se denomina acondicionamiento de potencia. Lamigueiro, O. P. (2023) menciona que como la corriente eléctrica producida es directa, es necesario, para algunas aplicaciones, un inversor para convertirla en corriente alterna.

2.2.3. Energía eólica

Zohuri, B. (2018). En su libro Hybrid Energy Systems data que la energía eólica se ha utilizado durante miles de años para impulsar velas, impulsar molinos de viento o generar presión para bombas de agua. Aprovechar el viento para generar electricidad ha sido objeto de investigación desde finales del siglo XIX. Sin embargo, fue sólo gracias a grandes esfuerzos por encontrar fuentes alternativas de energía en el siglo XX que la energía eólica se convirtió en el centro de una considerable investigación y desarrollo.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales describe a la energía eólica como: “La energía obtenida de la fuerza del viento. Está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión”.

Salgado, O. A. (2013) muestra las principales ventajas que ofrece la generación eoloelectrónica moderna, las cuáles son:

- Bajo costo nivelado de producción de electricidad, que resulta competitivo con nuclear, carbón e inclusive en algunos casos con ciclo combinado.
- Libre de costos de combustible, emplea un recurso natural inagotable.
- Energía limpia con bajo impacto ambiental, no se presentan emisiones de bióxido de carbono durante su operación.
- Mejora la independencia energética ya que evita la importación de combustibles.
- Modular y rápida de instalar con una vida útil de 25 años.
- Su implementación es compatible con otras fuentes convencionales.

El Consejo Mundial de Energía Eólica y Greenpeace International se unieron para publicar un informe titulado “Perspectiva global de la energía eólica 2014”. Este informe afirma que en todo el mundo la energía eólica puede llegar a proporcionar tanto como entre el 25% y el 30% de la electricidad mundial para 2050. En el momento de redactar el informe, las instalaciones comerciales en más de 90 países tenían una capacidad total de 318 gigavatios (GW), que proporciona alrededor del 3% del suministro mundial

2.2.3.1. Energía del viento

El viento es una consecuencia de la radiación solar. Friedrich, F. J. et al. (1988). Mencionan en el libro de las energías renovables que las diferencias de insolación entre los distintos puntos de la Tierra generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan diferencias de densidad en las masas de aire, que se traducen en variaciones de presión. El aire, como cualquier gas, se mueve desde las zonas de alta presión a las de baja presión. Se establece así cierto equilibrio por transferencia de energía entre las zonas de diferente temperatura, lo que ocasiona un desplazamiento de masas de aire, lo que produce el viento.

De esta forma, se podría definir el viento “como una corriente de aire resultante de las diferencias de presión en la atmósfera, provocadas en la mayoría de los casos, por variaciones de la temperatura” (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988).

De acuerdo con lo antes mencionado se da respuesta a la interrogante, ¿cómo se produce? SEMARNAT explica que, La generación de electricidad a partir del viento se logra mediante un dispositivo conocido como aerogenerador, el cual transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica. Este equipo consta de una turbina eólica que, impulsada por el viento, genera energía mecánica a través de un rotor de hélices. Dicha energía se transmite mediante un sistema mecánico que hace girar el rotor de un generador eléctrico, encargado de convertir la energía mecánica en electricidad. El sistema necesario para la producción de energía eléctrica a partir del viento está compuesto por los siguientes elementos:

- **Rotor**, conformado por tres palas con diámetros que pueden variar entre 42 y 120 metros.
- **Caja de engranajes**, que ajusta la velocidad de rotación.
- **Generador**, con capacidades que van desde 600 hasta 6,000 kW.
- **Equipo de control y monitoreo**, encargado de regular el funcionamiento del sistema.
- **Torre**, cuya altura oscila entre 40 y 100 metros, permitiendo captar vientos más fuertes y constantes.
- **Subestación y línea de transmisión**, que transportan la electricidad generada hacia la red eléctrica.

Los aerogeneradores pueden operar de manera independiente o formar parte de parques eólicos o plantas de generación eólica, donde se agrupan múltiples unidades para una producción a gran escala. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018)

Como ya se ha mencionado, y como lo menciona Salgado, O. A. (2013) en su informe Energía eólica. Teoría y conceptos, los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento para producir un trabajo mecánico que posteriormente se transforma en energía eléctrica. Los aerogeneradores dependen de la velocidad del viento para generar potencia eléctrica, se les ha considerado por mucho tiempo una fuente intermitente no despachable debido al carácter aleatorio de las condiciones del viento.

Cabe precisar que los cambios aleatorios de la velocidad del viento, los sitios o locaciones que cuentan con potencial eólico aprovechable presentan patrones de comportamiento cíclicos.

Así que, para el correcto diseño de un sistema de generación eoloelectrico es primordial el estudio del comportamiento de la velocidad del viento durante al menos dos años, que permita crear una base de datos de viento para la proyección de posibles emplazamientos.

En definitiva, se puede considerar que, a nivel general, las variables que definen el régimen de vientos en un punto determinado son las siguientes:

- Situación geográfica.
- Características climáticas locales.
- Estructura topográfica de la zona.
- Irregularidades puntuales del terreno.
- Altura sobre el nivel del suelo.

Se ha calculado que aproximadamente el 2% de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía eólica, y que un 35% de ésta se disipa en la zona inferior de la atmósfera, a 1 km de espesor. Cualesquiera que sean los progresos técnicos alcanzados con las máquinas, que no es posible utilizar más del 10% de la energía eólica disponible a nivel del suelo, estos cálculos plasmados en el libro de energías renovables (CEVALLOS, 1998) indican, para el conjunto del planeta, un potencial energético igual a $1,3 \times 10^{11}$ kW, es decir, unas 20 veces el actual consumo mundial de energía. Esto hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovables de primera magnitud. La energía del viento es de tipo cinético: cuando una masa de aire m se mueve con una velocidad v , su energía cinética viene dada por una conocida expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \text{ (Julios)} \quad (3)$$

La masa de aire, de densidad ρ , que pasa por la unidad de tiempo (caudal másico, M) a través de una sección de área perpendicular a su dirección, S , se expresa de la siguiente forma:

$$M = \rho S v \text{ (kg/s)} \quad (4)$$

El teorema de Betz permite demostrar que el viento que pasa a través de un dispositivo captador de energía eólica reduce su velocidad como máximo en $2/3$ de su valor inicial, lo que equivale a la extracción del 59% de la energía cinética inicial del viento.

De esta forma, el máximo teórico de potencia que se puede obtener de un captador eólico se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{\max} = (0.59) (0.625 S v^3) = 0.37 S v^3 \text{ (Watts)} \quad (5)$$

Lo que se lograría con un dispositivo de captación ideal, es decir, con un rendimiento del 100%. Aunque tal dispositivo no existe, el ser humano ha intentado obtener desde los tiempos más antiguos el mayor rendimiento posible de la energía del viento, como queda patente al hacer un breve repaso histórico del aprovechamiento de la energía eólica.

2.2.3.2.Principio de operación

Para entender como los aerogeneradores se emplean hoy en día, es de gran utilidad considerar algunos de los principios bajo los cuales operan. El proceso de transformación en las turbinas eólicas modernas usa los principios básicos de las fuerzas aerodinámicas para producir una torca positiva sobre un eje, dando como resultado energía mecánica y enseguida su transformación a electricidad por medio de un generador. Las turbinas eólicas, a diferencia de cualquier otro generador, puede producir energía sólo del viento que se encuentra disponible en el momento. (Salgado, 2013)

Moragues y Rapallini (2003) dicen que, aunque existen dos tipos básicos de molinos, eje horizontal y eje vertical, el principio de operación es esencialmente el mismo. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las palas, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado cubo [conjunto que recibe el nombre de rotor].

El principio aerodinámico, por el cual este conjunto gira, es similar al que hace que los aviones vuelen. Según este principio, el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de una placa o perfil inclinado, ver ilustración 11, genera una diferencia de presiones entre ambas caras, dando origen a una fuerza resultante (R) que actúa sobre el perfil.

Descomponiendo esta fuerza en dos direcciones se obtiene:

- a) la fuerza de sustentación (S), o simplemente sustentación, de dirección perpendicular al viento, y,
- b) la fuerza de arrastre (A), de dirección paralela al viento.

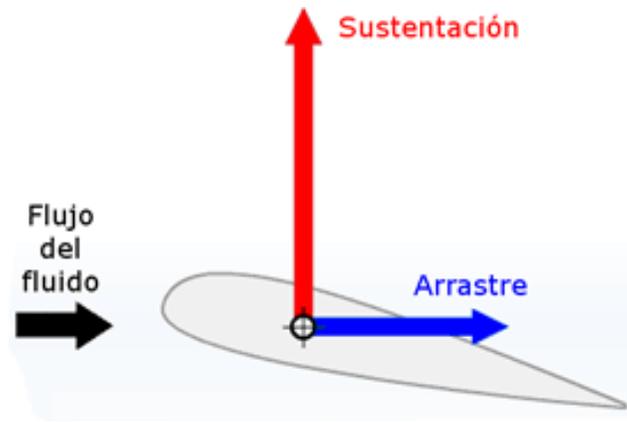


Ilustración 11. Fuerzas de Sustentación y de Arrastre (tomada de (Marín, Rivero, Sellschopp, Alba, & Ramos, 2017)).

Una máquina eólica es cualquier dispositivo accionado por el viento. Si se utiliza directamente la energía mecánica, será un aeromotor, y si se acciona un generador eléctrico, se tratará de un aerogenerador. (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988). La caracterización de una máquina eólica se realiza según los parámetros que se definen a continuación:

- Velocidad de arranque: velocidad mínima del viento que hace girar la máquina.
- Velocidad de conexión: velocidad mínima del viento a partir de la cual la máquina genera potencia.
- Velocidad nominal: velocidad mínima del viento que permite generar la máxima potencia (potencia nominal).
- Velocidad de frenado: velocidad máxima del viento que puede soportar la máquina generando potencia sin dañarse.
- Área de captación: superficie del sistema captador de la máquina perpendicular al viento.

2.2.3.3. Estructura de un aerogenerador

Friedrich, F. J., et al. (1988). Describen los distintos elementos de que consta una máquina eólica, que son, en general, los siguientes:

- **Soportes:** Las máquinas eólicas han de estar colocadas sobre un soporte, que debe ser capaz de tolerar todo el empuje del viento que transmita el sistema de captación y las eventuales vibraciones.

Por otra parte, su altura debe ser suficiente para evitar que las turbulencias debidas al suelo afecten a la máquina y superar los posibles obstáculos cercanos, que puedan perturbar el viento. Dentro de estos dispositivos se pueden distinguir los soportes autoportantes y los soportes atirantados.

(FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988) Los soportes autoportantes pueden ser de estructura metálica (parecida a las utilizadas para el transporte de energía eléctrica), sobre la que hay que colocar una plataforma de servicio para facilitar el mantenimiento de la máquina. Siempre que el terreno lo permita, es aconsejable, para máquinas pequeñas, utilizar un soporte atirantado basculante, que facilita el mantenimiento en el suelo con mayor comodidad y sin peligro, tanto de la máquina eólica como del propio soporte. El atirantamiento debe realizarse con cuatro vientos, y la unión de los cables al suelo debe hacerse a través de tensores que permitan regular la tensión del cable.

- **Sistema de captación:** El rotor es el elemento principal de una máquina eólica. Está compuesto por un determinado número de palas, siendo su misión la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica utilizable. Existe gran variedad de rotores y su clasificación más usual se realiza en función de la disposición del eje. En la ilustración 12 se muestran los ejemplos más típicos de rotores de eje horizontal, mientras que en la ilustración 13 se pueden observar los diseños más usuales de rotores de eje vertical.

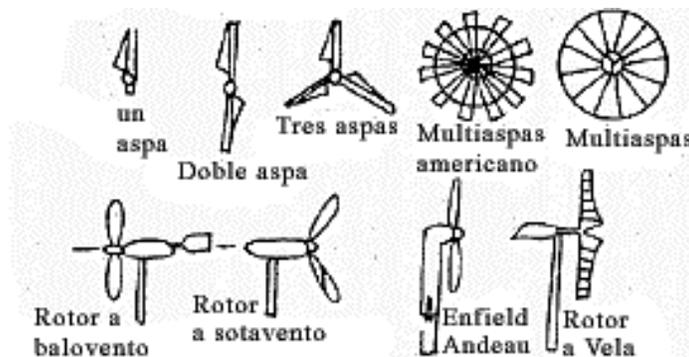


Ilustración 12. Rotores de eje horizontal (tomada de (VERDE ZONA, 2015)).

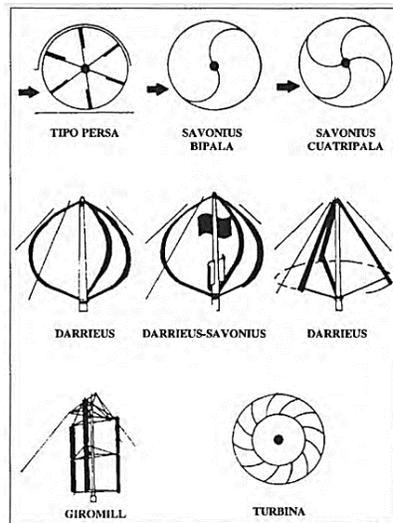


Ilustración 13. Rotores de eje vertical (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

Las características generales de un rotor se definen por los siguientes parámetros:

- Velocidad típica.
- Solidez.
- Rendimiento aerodinámico.

La **velocidad típica** o coeficiente de velocidad X , se define como la relación entre la velocidad de la punta de la pala (ωR) y la velocidad del viento (v):

$$X = \frac{\omega R}{v} \quad (6)$$

siendo ω la velocidad de rotación (rad/s) y R la longitud de la pala.

La **solidez** se define como la relación entre la superficie proyectada por las palas y la superficie descrita por las mismas en su movimiento de rotación. Este parámetro permite comparar diferentes tipos de rotores desde el punto de vista de la eficacia del material utilizado y de la sencillez constructiva.

El **rendimiento aerodinámico** o coeficiente de potencia, C_p , expresa la parte de la energía del viento que se transforma en energía mecánica en el eje del rotor. El teorema de Betz expresa que, bajo condiciones ideales, el rendimiento aerodinámico de los rotores alcanza un máximo del 59%. En realidad, dicho rendimiento oscila entre el 20 y el 40%, según los tipos de rotores (número de palas) y en función de la velocidad típica de operación, tal como se muestra en la ilustración 14. (Pág. 102-103)

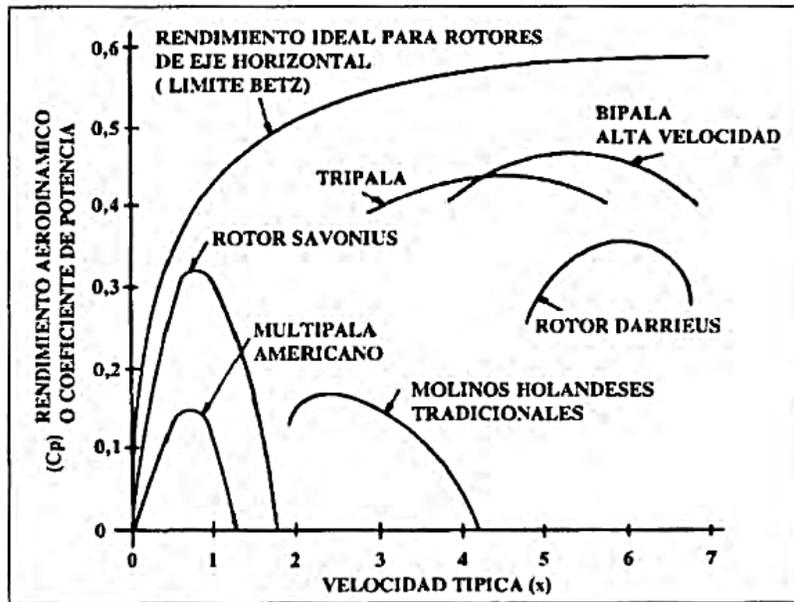


Ilustración 14. Rendimiento aerodinámico en función de la velocidad típica (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

- **Sistema de orientación:** Aunque las máquinas eólicas de eje vertical no necesitan orientación, prácticamente todas las de eje horizontal precisan de un sistema que oriente el rotor, es decir, que de alguna manera detecte la dirección del viento y sitúe el rotor en su misma dirección. Ello disminuye los esfuerzos y las pérdidas de potencia.

(CEVALLOS, 1998) Explica que las máquinas eólicas de eje horizontal están sometidas a fuertes esfuerzos durante los cambios de velocidad y dirección del viento. Por ello, el sistema de orientación deberá cumplir la condición de mantener el rotor cara al viento sin provocar grandes cambios de dirección del rotor cuando se produzcan cambios rápidos de la dirección del viento. Existen varios dispositivos de orientación, elegidos generalmente de acuerdo con la potencia de la instalación eólica.

Para las máquinas de pequeña potencia, menores a 50 kW, cuyo rotor está situado cara al viento, el dispositivo más adecuado suele ser una cola (ver ilustración 15). La cola actúa como una veleta, y cualquier alteración de la posición de equilibrio, genera un empuje sobre la misma que tiende a devolver la turbina a su posición original.

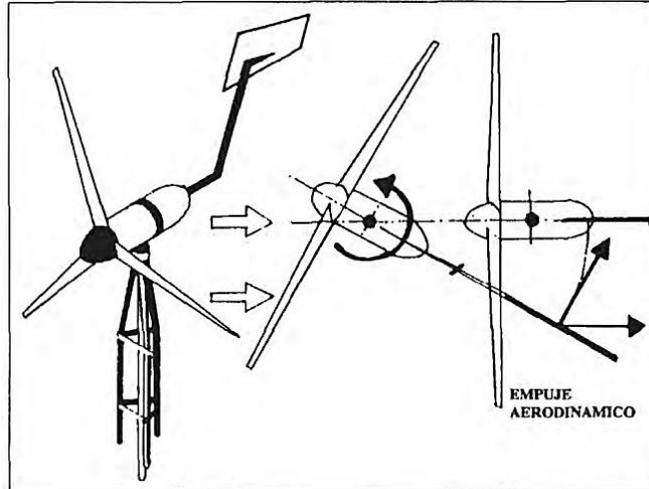


Ilustración 15. Sistema de orientación por cola (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

Se utiliza también en máquinas de baja potencia el sistema de rotores auxiliares (ver ilustración 16). El viento sólo actúa sobre las hélices cuando el rotor no está orientado. La rotación producida por el viento en las hélices auxiliares actúa sobre un mecanismo que mueve toda la turbina hasta que queda de nuevo orientada. (CEVALLOS, 1998)

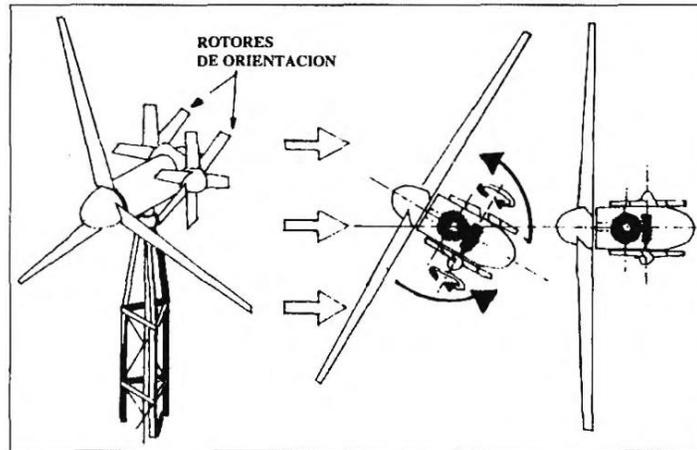


Ilustración 16. Sistema de orientación por rotores auxiliares (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

Las máquinas eólicas mayores (diámetros superiores a los 20 m). En este caso, se utiliza el efecto de conicidad. Las palas se inclinan ligeramente hacia atrás, de forma que en su rotación describan un cono. Cuando el rotor no está orientado, las palas que se encuentran más a favor del viento reciben un mayor empuje aerodinámico, que tiende a variar la orientación del rotor hasta conseguir la posición de equilibrio, donde todas las palas sufren el mismo empuje (ver ilustración 17). (CEVALLOS, 1998)

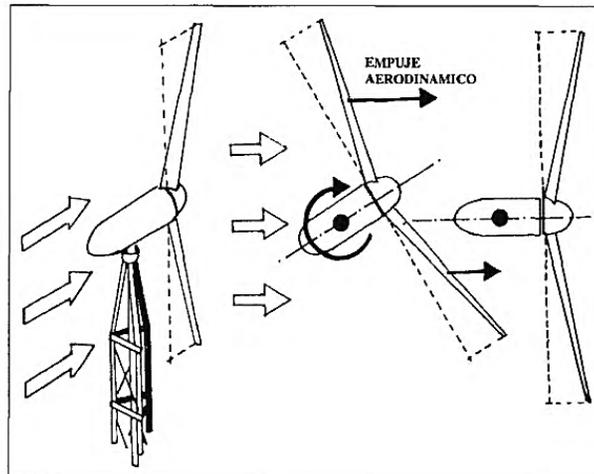


Ilustración 17. Sistema de orientación por efecto de conicidad (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

- **Sistema de regulación:** El libro de energías renovables especifica que el propósito de los sistemas de regulación es evitar las variaciones causadas por la velocidad del viento al controlar la velocidad de rotación y el par motor en el eje rotor.

Los sistemas más sencillos operan sólo en la etapa de exceso de potencia, evitando velocidades de rotación demasiado elevadas (vientos fuertes), que podrían poner en peligro la integridad de la máquina (sistemas de frenado). Estos se utilizan solamente en máquinas de pequeña potencia y en instalaciones en las que son aceptables variaciones en la potencia de salida.

Los dos grandes grupos de sistemas de regulación vienen definidos por su forma de actuación. En unos, el control se realiza por actuación sobre el rotor, aumentando o disminuyendo la potencia absorbida. En los otros, la regulación se lleva a cabo sobre el eje motor. Los primeros sólo son posibles en rotores de eje horizontal, mientras que los segundos

se pueden adaptar a cualquier tipo de máquina eólica. El sistema de regulación más sencillo del tipo de actuación sobre el rotor, utilizado en máquinas de pequeña potencia, es el de puesta en bandera, aunque no es propiamente un sistema de regulación, sino más bien de frenado. Este dispositivo funciona automáticamente, bien mediante una veleta, que hace girar la turbina cuando la velocidad del viento es demasiado elevada (ilustración 18), o bien aprovechando la fuerza del empuje aerodinámico sobre una excéntrica (ilustración 19). Ambos sistemas actúan contra un resorte, que devuelve la máquina a su posición normal cuando la velocidad del viento disminuye.

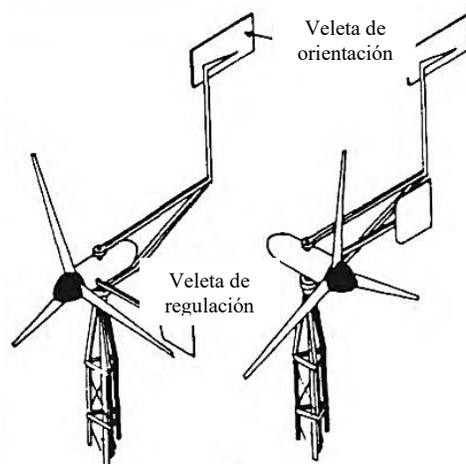


Ilustración 18. Sistema de regulación por orientación del rotor: Veleta auxiliar (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

- **Sistema de generación.**

Aunque la energía mecánica que genera una turbina eólica puede utilizarse directamente como tal para el bombeo de agua y, en menor medida, de aire, el sistema de aprovechamiento de la energía eólica más generalizado en la actualidad y, sin duda alguna, el de mayor interés, es la producción de electricidad, debido a la facilidad en la manipulación y transporte inherente a este tipo de energía, así como la versatilidad de sus aplicaciones posteriores.

Friedrich, F. J., et al.(1988) explica que el sistema eléctrico de un aerogenerador está condicionado por las características de operación del rotor (velocidad constante o variable) y por el sistema de aprovechamiento de la energía obtenida (conexión directa a la red o almacenamiento). Los generadores que transforman la energía mecánica en eléctrica pueden ser dinamos o alternadores. Estos últimos pueden ser, a su vez, de inducción (asíncronos) o

de excitación (síncronos). Cada uno de estos sistemas de generación tiene diferentes características, tanto en los requerimientos de entrada como en las particularidades de la corriente de salida. (Pág. 112)

La dinamo es una máquina eléctrica sencilla, que produce corriente continua (ilustración 19). Requiere un colector con escobillas que se desgastan con el uso y, por tanto, precisa de mantenimientos periódicos.

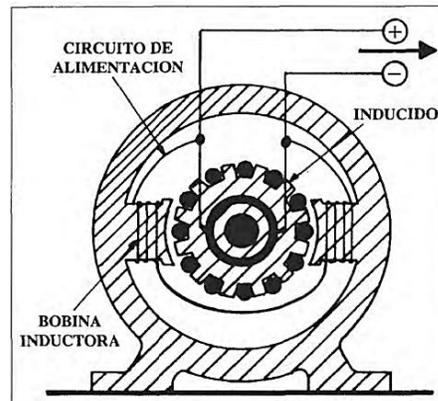


Ilustración 19. Generador de corriente continua, dinamo (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

Los alternadores se diferencian de las dinamos, aparte de producir corriente alterna, en que reciben la corriente de excitación del inductor de una fuente externa, y en que el inductor es el rotor (ilustración 20).

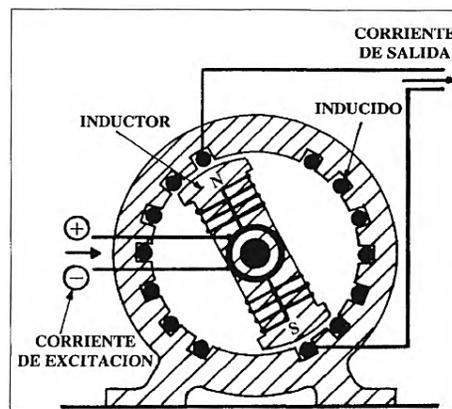


Ilustración 20. Generador de corriente alterna (tomada de (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)).

Según sea la corriente de excitación de los generadores de corriente alterna, éstos pueden clasificarse en dos tipos bien diferenciados, cuyas características operacionales son marcadamente distintas: generadores síncronos los cuales reciben la corriente de excitación en forma de corriente continua y generadores asíncronos que reciben la corriente de excitación en forma de corriente alterna. (Moragues & Rapallini, 2003)

2.2.4. Sistemas de almacenamiento de energía

En un artículo escrito por la empresa Solar Plak se detalla que las baterías desempeñan un papel fundamental en las instalaciones aisladas, ya que permiten el almacenamiento de energía para su uso cuando el sistema no está generando electricidad. Esto resulta especialmente útil en situaciones donde las condiciones ambientales no son favorables, como en días nublados, en ausencia de viento o durante la noche. Gracias a su capacidad de acumulación, las baterías garantizan un suministro energético continuo y estable, mejorando la autonomía y eficiencia de los sistemas renovables al proporcionar electricidad cuando se requiere, independientemente de las condiciones climáticas. (<https://solarplak.es/energia/cuales-son-las-mejores-baterias-para-placas-solares/>)

En el “*XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*”, Tarrillo, J. M. (2012) habla de los sistemas de almacenamiento de energía y señala que el actual desarrollo de las energías renovables implica la generación de energía usando fuentes renovables. Muchas de ellas tienen comportamiento aleatorio, como, por ejemplo: la velocidad del viento sobre las turbinas eólicas, la radiación solar en las fuentes fotovoltaicas, la altura de las olas del mar en las fuentes mareomotrices, entre otros.

Las fuentes renovables están conectadas a las redes eléctricas o micro redes de electricidad. Pero la disponibilidad aleatoria de la energía primaria da como consecuencia períodos con exceso y deficiencia de energía. Esto ha llevado a que se desarrollen diferentes formas para almacenar la energía sobrante a fin de utilizarlo cuando sea necesario y las condiciones de operación del sistema eléctrico lo permitan.

Los beneficios del almacenamiento de energía son significativos y desde hace tiempo se reconoce que son necesarios para el funcionamiento coordinado y confiable de las redes de servicios públicos.

Zohuri, B. (2018) explica en su libro *Hybrid Energy Systems* que el almacenamiento de energía es especialmente importante para la integración de tecnologías de generación renovable distribuida. El almacenamiento protege contra errores en los pronósticos, elimina barreras para conectar recursos de energía renovable a una variedad de redes, desplaza la demanda en los picos almacenando energía fuera de los picos, proporciona regulación de frecuencia y puede retrasar costosas actualizaciones de la red o tiempos de inactividad debido a una demanda repentina o cualquier interrupción de cualquier fuente adjunta al sistema de red nacional. (Pág. 10)

2.2.4.1. Etapa de almacenamiento en el sistema energético

El almacenamiento de energía forma parte, tanto de los procesos naturales como de los artificiales de aprovechamiento de energía. Existen muchos tipos de sistemas de almacenamiento energético, por lo que su clasificación tiende a ser muy compleja. En la mayoría de los casos, son de importancia fundamental dos características:

- La cantidad de energía almacenada.
- El tiempo de almacenamiento.

Asimismo, son importantes, tanto la forma de energía que se va a consumir como las variaciones en la velocidad del consumo, pero los parámetros claves a considerar cuando se comparan sistemas de almacenamiento son, en efecto, la densidad energética y el tiempo de almacenamiento. (FRIEDRICH, DOMINGUEZ, ESCARTIN, GONZALEZ, & HERNANDEZ, 1988)

Tarrillo, J. M. (2012) indica que se realiza una caracterización de las tecnologías de almacenamiento de energía de baja y larga duración. Son examinadas para tres categorías: almacenamiento de energía masivo para ser usado a nivel de carga, generación distribuida (DC) para atender los picos locales y calidad de energía (PQ) para alta fiabilidad en usuario final, con importantes variaciones en el tiempo de descarga y la capacidad de almacenamiento.

Friedrich, F. J., et al.(1988) hace mención sobre el uso efectivo, tanto de los combustibles fósiles como de las fuentes de energía renovables, demandan un almacenamiento energético económico y eficaz, flexible en su operación y ubicación.

Baterías.

En la ilustración 21, Del Valle, et. al. (2017) indican las tecnologías de baterías más utilizadas. Las baterías de litio-ion acaparan un 70% del mercado mundial y el 30% restante se divide entre baterías de flujo, baterías de sodio y baterías de plomo.

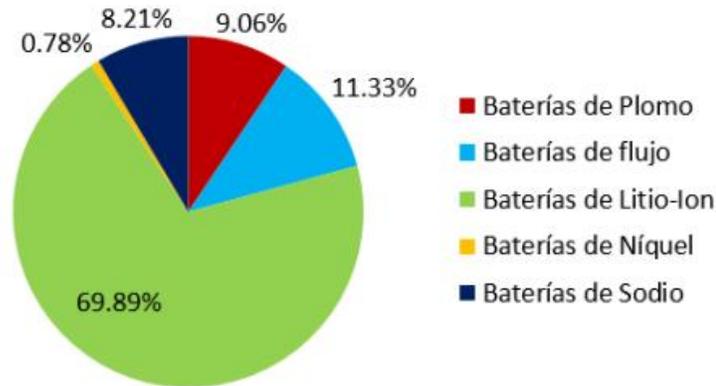


Ilustración 21. Relación de las tecnologías de baterías más utilizadas (tomada de (Valle, y otros, 2017)).

Baterías de Plomo. Se trata de la tecnología más madura. Hoy en día se sigue utilizando por su bajo coste en comparación con las baterías de litio o de sodio; sin embargo, su rendimiento es inferior en términos de energía específica (15Wh/kg), vida útil y eficiencia. Además, presentan problemas de seguridad ya que emiten gas hidrógeno.

Baterías de litio-ion. (Sánchez-Migallón, 2016) A pesar de que la aplicación principal de las baterías de litio ion ha sido los dispositivos portátiles, en los últimos años se han comenzado a utilizar en aplicaciones de alta potencia. Esto ha sido posible gracias a la aparición de nuevas tecnologías de baterías, que incorporan materiales avanzados, y al diseño de las celdas con nuevas formas constructivas, lo que facilita la realización de los packs (conjunto de celdas en serie y/o paralelo que conforman la batería).

Baterías de Sulfuro de Sodio. (Sánchez-Migallón, 2016) También conocida como tecnología de sal fundida, esta es una alternativa más reciente y prometedora en comparación con las mencionadas anteriormente. Se basa en el uso de un electrolito de sodio y azufre en estado líquido, lo que le permite operar a altas temperaturas, desde 300°C hasta alcanzar los 350°C, una de sus principales ventajas. Estas baterías destacan por su elevada densidad de energía y eficiencia, con un rendimiento que varía entre el 89% y el 82%, y una capacidad aproximada

de 150 kWh/m³. Además, no presentan autodescarga y requieren un mantenimiento mínimo. Su costo es relativamente bajo debido a la accesibilidad de sus materiales, aunque su naturaleza corrosiva representa un desafío. Son ampliamente utilizadas en aplicaciones a gran escala para el almacenamiento de energía en la red eléctrica.

En los generadores diésel un grupo electrógeno se encarga de convertir el movimiento o energía mecánica en energía eléctrica alterna, la cual pasa a través de una serie de cables y llegan a las instalaciones. En muchos sentidos, el generador actúa de la misma forma en la que una bomba se encarga de hacer que el agua fluya por las tuberías. Se pueden encontrar dos tipos de grupos electrógenos: de diésel y de gasolina. Los primeros causan algo más de ruido; sin embargo, estos suelen ser más eficientes en términos de consumo, requieren un menor mantenimiento y tienen un periodo de utilidad más largo. (IPESA, 2020)

El generador Diesel es un equipo cuyo uso está indicado para aplicaciones que requieren mayor potencia y/o funcionamiento continuo, ya que este combustible se quema a mayor temperatura, en comparación con otros tipos, como la gasolina, y por lo tanto es más eficiente y garantiza mayor potencia al generador. (GRUPEL, s.f.) Bien, sirve en áreas que no cuentan con una conexión a una red eléctrica usualmente se cuenta con un generador, también conocido como grupo electrógeno. Asimismo, este también cumple las funciones de fuente de energía de emergencias que se mantiene siempre disponible en caso se presenten problemas en el suministro.

(IPESA, 2020) Las **partes de un generador eléctrico** regularmente comprenden un motor, un alternador, un sistema de combustible, un regulador de voltaje, un sistema de lubricación, sistemas de enfriamiento y escape, un panel de control y un cargador de batería.

Los generadores diésel tienen la ventaja de ser más económicos y están indicados para casos en los que la premisa principal es asegurar el suministro de energía sin fallos y con un alto rendimiento para una gran potencia. (GRUPEL, s.f.)

Para las pilas de combustible, en estas tecnologías determinados compuestos químicos (el más empleado es el hidrógeno) se convierten en energía eléctrica, y viceversa, dando lugar a la denomina pila de combustible. Estos sistemas destacan por su gran densidad energética pero su eficiencia es muy pobre (40%). (Valle, y otros, 2017).

Su funcionamiento se comprende mejor si se compara con el proceso inverso de la electrólisis, ya citado como sistema de producción de hidrógeno a partir del agua (Ilustración 22).

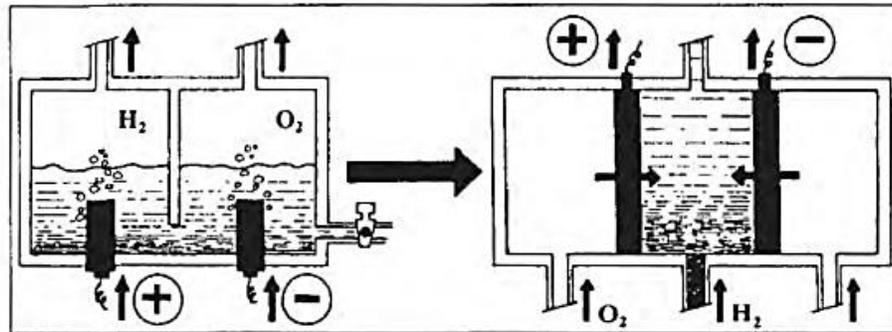


Ilustración 22. Comparación entre el proceso de electrólisis y una pila. (tomada de (CEVALLOS, 1998)).

El principio de la electrólisis es la reacción que tiene lugar cuando una corriente eléctrica pasa a través de agua, liberándose hidrógeno en el ánodo (+) y oxígeno en el cátodo (-). (CEVALLOS, 1998) En las pilas de combustible el procedimiento es a la inversa: el polo negativo se alimenta con hidrógeno y el polo positivo con oxígeno, que se combinan formando agua y producen corriente eléctrica. El combustible y el oxidante se introducen a cada lado de los electrodos, en forma gaseosa, absorbiéndose por el electrolito. Este puede estar formado por diversas disoluciones ácidas o alcalinas, aunque la tendencia actual es a encontrar electrolitos sólidos, aunque se tenga que operar a temperaturas más elevadas. Los electrodos suelen ser de platino u otro metal noble.

(Rekioua, 2020) Los supercondensadores permiten una densidad de energía mucho mayor, con una densidad de potencia alta, pero el voltaje varía con la energía almacenada. En el sistema de conversión de energía eólica, los supercondensadores se utilizan para suprimir las fluctuaciones rápidas de la energía eólica, pero en una pequeña escala de tiempo y estabilizar de la tensión suministrada por los paneles solares. Así, pueden considerarse únicamente como soporte para sistemas de aerogeneradores y generalmente se combinan con un sistema de baterías en un sistema de almacenamiento híbrido.

La energía almacenada en estos supercondensadores es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada siguiendo la fórmula de ecuación 6, (Sánchez-Migallón, 2016) estos

supercondensadores llegan a alcanzar valores de hasta 5 kF, el inconveniente principal que tienen es su tensión de operación que ronda tensiones cercanas a los 3.5V.

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2 \quad (7)$$

En estos sistemas encontramos la interconexión de distintos supercondensadores en serie para poder formar un sistema de mayor tensión de operación estando repartida entre los distintos supercondensadores.

La tecnología más extendida son los supercondensadores. Del valle, et. al. (2017) señalan que sus principales ventajas son: rapidez de respuesta, elevada densidad energética y alta eficiencia (95%). Sin embargo, su autodescarga es muy elevada (5% al día) y su tensión por elemento muy pequeña. Su principal aplicación es la mejora de la calidad del suministro eléctrico.

2.2.5. Sistemas híbridos de energía renovable

¿Por qué limitarse a una sola fuente de energía u opción de almacenamiento? Bahman Zohuri en su libro *“Hybrid Energy Systems”* describe que los sistemas de energía híbridos combinan dos o más formas de generación, almacenamiento o tecnologías de uso final de energía, y pueden ofrecer una gran cantidad de beneficios en comparación con los sistemas de fuente única. En estos casos, los sistemas de energía híbridos son una solución ideal ya que pueden ofrecer mejoras sustanciales en el rendimiento y reducción de costos y pueden adaptarse a los distintos requisitos del usuario final.

En general, la hibridación consiste en combinar varias fuentes de energía y unidades de almacenamiento dentro de un mismo sistema con el fin de optimizar la producción y la gestión energética. (Rekioua, 2020)

D. Rekioua menciona que las mayores ventajas de estos sistemas son su simplicidad de uso y su independencia de una fuente de energía, por lo que pueden ser productivos durante el día y la noche, (Corral, Villalba, Caberta, & Valenzuela, 2014) otra ventaja de los sistemas híbridos de energía renovable (HRES) es su capacidad para proporcionar un suministro energético a largo plazo, lo que contribuye a reducir la dependencia de la importación de combustibles. Estos sistemas permiten aprovechar las fortalezas tanto de las fuentes

convencionales como de las renovables, lo que ha impulsado el desarrollo de diversas alternativas para la generación de electricidad en la última década. Sin embargo, una de sus principales desventajas radica en la integración de múltiples fuentes de energía y unidades de almacenamiento, lo que aumenta la complejidad del sistema en comparación con aquellos basados en una única fuente.

En este contexto, se requiere un sistema de gestión energética avanzado para regular el flujo de potencia, lo que añade mayor complejidad al control y operación del sistema global. (Rekioua, 2020)

2.2.5.1. Sistema híbrido eólico/fotovoltaico con almacenamiento de batería

Chaparro (2019) en el SYSCOM blog define un sistema híbrido de energía aislado como “Los sistemas isla o aislados de la red eléctrica son sistemas que operan fuera de la red, capaces de dar energía a casi cualquier equipo; produciendo la energía con módulos fotovoltaicos e inyectándola a un banco de baterías para mantener la energía cuando el arreglo fotovoltaico no opere”.

Las fuentes eólicas y fotovoltaicas son una de las formas más limpias de conversión de energía disponibles. Una de las ventajas que ofrece la hibridación de diferentes fuentes es la de proporcionar electricidad sostenible en zonas no atendidas por la red eléctrica convencional. Son muy utilizados en muchas aplicaciones, pero debido a su no linealidad, se proponen sistemas de energía híbridos para superar este problema con importantes mejoras. (Rekioua, 2020)

Para el dimensionamiento de un sistema híbrido fotovoltaico/eólico/baterías, Zohuri (2018) dice que el sistema general incluye un controlador de carga, un banco de baterías y un convertidor CC/CA que proporciona un perfil de carga. Estos componentes principales deben seleccionarse según el sitio de ubicación y la aplicación. Aquí ambas fuentes de energía están conectadas a un bus de CC y se agregan baterías como sistema de almacenamiento, mientras que la carga suministrada se conecta alternativamente a través de un inversor.

En la sección aprendamos con Solmic (<https://www.solmic.co/aprendamos-sobre-el-sistema-hibrido>) se detallan los componentes para su funcionamiento:

- **Caja de distribución de corriente continua (DCDB):** El DCDB es una caja combinadora, su función principal es combinar las múltiples cadenas de paneles

solares en una sola. Esta caja consta de componentes de protección como un disyuntor en miniatura (MCB), un fusible y un dispositivo de protección contra sobretensiones.

- **Controlador de carga:** Este componente se ensambla con la batería para controlar la cantidad de carga que llega a la batería. La principal tarea del controlador es regular el flujo de cargas y evitar que la batería se sobrecargue, aumentando así la vida útil de la misma.
- **Inversor híbrido:** El inversor es un componente esencial del sistema, que ayuda a convertir la energía de CC generada por el panel solar o la batería en energía de CA utilizable. El inversor permite controlar la energía gastada, recibida, consumida o almacenada en la batería; ayuda a controlar el rendimiento del panel solar y de la batería.
- **Caja de distribución de corriente alterna (ACDB):** La función principal de la caja de distribución de corriente alterna es proteger los aparatos de cualquier fallo que se produzca en el inversor híbrido; consta de dispositivos de protección como un disyuntor en miniatura (MCB), un fusible y un dispositivo de protección contra sobretensiones.
- **Baterías:** En los sistemas híbridos y sin conexión a la red, las baterías desempeñan un papel importante para almacenar el excedente de energía producido durante el día soleado y se recupera más tarde durante el tiempo nublado o la noche cuando el panel solar no es capaz de producir una cantidad suficiente de energía. Para los sistemas de energía renovable, se recomiendan las baterías recargables, como las de litio o plomo-ácido.

2.2.5.2. Técnicas de optimización de sistemas híbridos

La optimización de sistemas híbridos de energía renovable es fundamental para maximizar su eficiencia y viabilidad económica. Existen diversas técnicas utilizadas para este fin:

- **Simulación y modelado:** Herramientas como HOMER Pro permiten evaluar múltiples configuraciones del sistema y seleccionar la más eficiente según costos, autonomía y emisiones.

- **Algoritmos evolutivos:** Se emplean métodos como algoritmos genéticos para encontrar soluciones óptimas mediante la selección, mutación y cruce de variables.
- **Programación lineal y no lineal:** Permite minimizar costos y maximizar la eficiencia de los componentes del sistema.
- **Redes neuronales artificiales y machine learning:** Aplicadas para predecir la generación de energía y la demanda eléctrica, mejorando la gestión del sistema.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Estructura de la metodología

La metodología propuesta para el alcance de los objetivos señalados en el capítulo uno, se muestra esquemáticamente en la ilustración 23.



Ilustración 23. Esquema de la metodología y las herramientas tecnológicas empleadas. Autoría propia

3.1.1. Etapa 1. Compilar el recurso renovable y el perfil de demanda de la comunidad bajo estudio.

- Seleccionar la comunidad rural

Por medio de diferentes fuentes de consulta, se recopilarán datos sobre comunidades rurales en el estado de Oaxaca con poco o nulo acceso a energía eléctrica; al hacer la selección de la comunidad se debe de buscar algún canal de comunicación (vía telefónica, redes sociales, etc.) para saber de manera interpersonal su situación actual y en caso de ser necesario programar visitas a la comunidad, teniendo en cuenta el difícil acceso que pueden tener estas zonas.

Para identificar comunidades rurales con poco o nulo acceso a energía eléctrica en el estado de Oaxaca, se recopilarán datos mediante fuentes oficiales como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Secretaría de Energía (SENER), además de revisión de literatura y estudios previos.

Una vez identificadas posibles comunidades, se buscará establecer un canal de comunicación con los habitantes a través de llamadas telefónicas, redes sociales, autoridades locales o visitas in situ para conocer de manera interpersonal su situación energética. Se considerará la logística del acceso a la comunidad y se programarán visitas en caso necesario.

Una vez seleccionada la comunidad es fundamental determinar si la zona bajo estudio es apta para implementar un sistema tanto eólico como fotovoltaico, por ello, se debe calcular el potencial de producción de energía eléctrica mediante la fuerza del viento y la radiación solar que hay en San Francisco del Mar, Pueblo Viejo, población del estado de Oaxaca, ubicada en el istmo de Tehuantepec y en el municipio de San Francisco del Mar, el cual se encuentra localizado en las coordenadas $16^{\circ}14'01''\text{N } 94^{\circ}37'56''\text{O}$ y a una altitud de 32 metros sobre el nivel del mar; se localiza en la Barra de San Francisco, que divide a la Laguna inferior y el Mar Muerto del Golfo de Tehuantepec.

Las bases de datos meteorológicos son una herramienta fundamental para determinar las características de los recursos renovables con los que cuenta la comunidad. Una de estas herramientas que se usará para la caracterización de los recursos renovables es el Power Data Access Viewer que es una aplicación de la NASA que muestra el histórico de los datos meteorológicos de cualquier parte del mundo, ya sea por días, meses o años y que brinda la información tabulada para su mayor comprensión, brindado también datos en tiempo real al igual que el mapa satelital Meteored, la cual es una aplicación de utilidad puesto que en él se puede consultar el mapa atmosférico y situarlo en cualquier parte del mundo.

- Caracterizar la velocidad del viento en la comunidad para calcular su potencial eólico

En el Power Data Access Viewer se localiza en el mapa la comunidad y se delimita la zona a estudiar, para posteriormente descargar los datos medios mensuales de la velocidad del viento (km/hr) a 10 m. y 50 m. de altura. Con el apoyo de Meteored se pueden observar, de manera visual, las rachas de viento en tiempo real del área estudiada.

Los aerogeneradores dependen de la velocidad del viento para generar potencia eléctrica (Salgado, 2013). Para determinar el recurso eólico en la zona bajo estudio se requiere hacer un análisis del histórico de 10 años – 2014 a 2023 – de la velocidad del viento por hora a través del programa Data Access Viewer de la NASA, la cual da las rachas de viento a 10 metros de altura de las 24 horas del día, con esta información – 8760 datos – se estimó la velocidad promedio mensual de la comunidad estudiada, para posteriormente hacer el cálculo a una altura de 12 metros ya que los aerogeneradores propuestos son instalados a dicha altura, para ello se empleó la fórmula de la ecuación 1:

$$V_{real} = V_{ref} \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right] \quad (8)$$

- Caracterizar la radiación solar en la comunidad para obtener su potencial solar

En el Power Data Access Viewer localizar en el mapa la comunidad y delimitar la zona a estudiar, descargar los datos diarios requeridos como son la temperatura máxima y mínima, cantidad de días equivalentes de sol y de no sol, y radiación solar a distintas latitudes.

Se obtendrán datos diarios de temperatura máxima y mínima, días equivalentes de sol y niveles de radiación solar en diferentes inclinaciones. Posteriormente se compararán las mediciones obtenidas con bases de datos climáticas nacionales (como el Servicio Meteorológico Nacional) para verificar su consistencia.

- Calcular la demanda energética de la población.

La estimación de la demanda energética se realizará por secciones, las cuales se van a dividir en los sectores de salud, educativo y social, enfocándose de manera independiente en cada uno de ellos, para esto se hará un levantamiento de datos del centro de salud y de las escuelas que haya en la comunidad, así como los horarios de trabajo y equipos con los que cuentan, será de apoyo realizar dicho levantamiento de datos por medio de distintos métodos de recolección de datos, como la entrevista y revisión de registros, en la cual para el primer método se tomará una muestra de la población para hacer un conteo de los equipos que consumen energía eléctrica en los hogares, total de horas que son utilizados y número de habitantes por hogar, y para el segundo método se realizará una revisión de los registros

históricos de consumo eléctrico, esto con la ayuda de algunos recibos de luz de años anteriores u otros registros que se tengan documentados.

Se realizará un levantamiento de información para determinar el consumo de energía de la población mediante:

- Recolección de datos primarios: Encuestas y entrevistas a los habitantes sobre el uso de energía en los sectores de salud, educativo y social.
- Registros históricos: Análisis de recibos de luz y otros documentos disponibles.
- Categorización de carga energética: Se calcularán los requerimientos energéticos por sector, considerando equipos, horarios de uso y cantidad de usuarios.

3.1.2. Etapa 2. Proponer la arquitectura de un sistema híbrido renovable que satisfaga las necesidades de energía eléctrica de la comunidad.

- Definir los tipos de paneles solares, aerogeneradores y sistemas de almacenamiento de energía que se pueden establecer para el sistema híbrido de acuerdo con las condiciones geográficas de la comunidad.

Realizar una adecuada investigación sobre las características de los distintos tipos de paneles solares, aerogeneradores y sistemas de almacenamiento de energía a usar, permitirá elegir las posibles opciones a tomar en cuenta para el sistema, esto en base a la demanda de energía que se calculó previamente y tomando en cuenta la relación entre la calidad de los equipos y su precio, así como las especificaciones de fabricante que traen cada uno de estos.

Se evaluarán distintas opciones de tecnologías de generación y almacenamiento de energía, considerando:

- Paneles solares: Tecnologías de silicio monocristalino, policristalino o película delgada.
 - Aerogeneradores: Tipos de turbinas eólicas según capacidad, eficiencia y compatibilidad con el recurso eólico disponible.
 - Sistemas de almacenamiento: Baterías de ion-litio, plomo-ácido u otras opciones según su costo-beneficio.
 - Condiciones geográficas y climáticas: Factores como corrosión, temperatura y humedad que puedan afectar la durabilidad de los equipos.
- Caracterizar las posibles combinaciones del sistema eólico-fotovoltaico aislado a través del software seleccionado

En esta etapa se procede a realizar la simulación en Homer Pro, el sistema con los equipos funcionando en conjunto, ingresando las características meteorológicas presentes en la zona y realizando distintas combinaciones entre paneles solares, aerogeneradores y el sistema de almacenamiento de energía, esto previamente determinado con la ayuda de un diseño estadístico.

Se utilizará Homer Pro para evaluar diferentes configuraciones del sistema híbrido, ingresando:

- Datos meteorológicos obtenidos en la etapa previa.
- Distintas combinaciones de paneles solares, aerogeneradores y baterías.
- Requerimientos energéticos según el análisis de demanda.
- Costos de inversión, operación y mantenimiento.

3.1.3. Etapa 3. Optimizar el sistema híbrido renovable utilizando el software especializado Homer Pro.

- Resolver cuál es el sistema óptimo para la comunidad

Comparando las simulaciones realizadas en el software, con el funcionamiento del sistema híbrido aislado y el precio de su implementación se elige el diseño más óptimo generado a través de Homer Pro que además satisfaga las necesidades eléctricas de la comunidad.

Se analizarán los resultados de las simulaciones de Homer Pro para determinar la mejor configuración en términos de:

- Costo-beneficio: Comparación entre inversión inicial y retorno de inversión.
- Rendimiento energético: Capacidad de abastecer la demanda de la comunidad.
- Autonomía del sistema: Evaluación del desempeño en períodos de baja generación.

- Realizar el análisis técnico-económico del proyecto

El análisis técnico-económico permitirá evaluar la viabilidad a largo plazo y la rentabilidad del proyecto, así como el tiempo de retorno de inversión, dichos indicadores se definirán mediante un método de evaluación seleccionado, que en este caso será el cálculo de los costos y beneficios asociados a este estudio.

Se aplicará un modelo de análisis técnico-económico considerando:

- Costos de adquisición, instalación y mantenimiento de los equipos.
- Análisis del tiempo de retorno de inversión.
- Evaluación de subsidios o apoyos gubernamentales disponibles.
- Impacto económico y social del proyecto en la comunidad.

Finalmente, se presentará un informe con las conclusiones obtenidas sobre la viabilidad del sistema híbrido renovable y recomendaciones para su implementación en la comunidad seleccionada.

CAPITULO IV. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Descripción del caso de estudio

El análisis de resultados se centró en la comunidad de San Francisco del Mar Pueblo Viejo, Oaxaca, una zona sin acceso a la red eléctrica nacional. Se recopilieron datos sobre el recurso eólico y solar, así como el consumo energético estimado para una vivienda tipo.

El software HOMER Pro permitió determinar la combinación óptima de componentes, considerando los costos de instalación, operación y mantenimiento. Se encontró que la mejor configuración incluía:

- Un sistema fotovoltaico compuesto por 7 paneles solares.
- Un mini aerogenerador de eje vertical.
- Dos baterías de ciclo profundo.
- Un inversor Sofar Solar.

Con esta configuración, se logró una producción de 7,240 kWh anuales por vivienda, con una autonomía de 16.8 horas y un costo mensual estimado de \$371.03 por hogar. Estos resultados demuestran que el sistema híbrido es viable tanto técnica como económicamente, proporcionando una solución sostenible para la comunidad.

4.1.1. Compilación del recurso renovable y el perfil de demanda de la comunidad estudiada

- Seleccionar la comunidad rural

El Fondo de Servicio Universal Eléctrico – FSUE – es un programa administrado por la Secretaría de Energía – SENER –. El objetivo del FSUE es financiar la electrificación de comunidades rurales y zonas urbanas marginadas. Gracias a datos obtenidos de la SENER se identificaron distintas comunidades con una característica en común; no tienen acceso a energía eléctrica; en la tabla 2 se pueden observar los municipios seleccionados para estudiar, así como el porcentaje de viviendas sin electricidad de cada uno.

Tabla 2. Localidades del componente de instalación de sistemas aislados de electrificación

Relación de Localidades del Componente de Instalación de Sistemas Aislados de Electrificación 2022			
NO.	MUNICIPIO	LOCALIDAD	VIVIENDAS CON ELECTRICIDAD
1	<i>Putla Villa de Guerrero</i>	<i>Tierra Colorada</i>	86.44%
2	<i>San Carlos Yautepec</i>	<i>San Miguel Chongos</i>	85.71%
3	<i>San Francisco del Mar</i>	<i>San Francisco del Mar Pueblo Viejo</i>	28.36%
4	<i>San Francisco del Mar</i>	<i>Puerto Estero</i>	75.00%
5	<i>San Mateo Río Hondo</i>	<i>La Concepción</i>	70%
6	<i>Villa Sola de Vega</i>	<i>Guillaya (Arroyo de Guillaya)</i>	0%
7	<i>San Sebastián Río Hondo</i>	<i>Río Molino</i>	14%
8	<i>Santa María Chimalapa</i>	<i>Canaán</i>	4.70%

La comunidad seleccionada fue San Francisco del Mar Pueblo Viejo, debido al fácil acceso a la información con la que se contó, ya que esta tiene redes sociales oficiales por las cuales se logró obtener comunicación para saber la situación actual de la población con respecto al acceso de electricidad y la demanda energética requerida por sus habitantes. Gracias a las investigaciones realizadas se reveló a la población se le cortó el suministro de electricidad dejándola sin un servicio esencial, a causa de problemas políticos, tras varios años de este suceso una empresa privada asumió la tarea de reestablecer el suministro eléctrico en la zona, limitándose a reconectar la energía, más no de restaurar y ampliar el servicio, obteniendo una cobertura del 50% de la población, lo que deja aún a la mitad de la comunidad –

aproximadamente 135 viviendas – aún sin acceso al servicio eléctrico, manteniendo una desigualdad significativa en el suministro de este recurso básico.

- Caracterizar la velocidad del viento en la comunidad para calcular su potencial eólico

Para determinar el recurso eólico en la zona bajo estudio se hizo el análisis del histórico de 10 años – 2014 a 2023 – de la velocidad del viento por hora a través del programa Data Access Viewer de la NASA, la cual da las rachas de viento a 10 metros de altura de las 24 horas del día, con esta información – 8760 datos – se estimó la velocidad promedio mensual de la comunidad estudiada, para posteriormente hacer el cálculo a una altura de 12 metros ya que los aerogeneradores propuestos son instalados a dicha altura, para ello se empleó la fórmula de la ecuación 1:

$$V_{real} = V_{ref} \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right] \quad (9)$$

En donde V_{ref} es la velocidad de referencia tomada directamente de la información que brinda Data Access Viewer, los cuales son los 8760 datos históricos de velocidades de viento durante 10 años las 24 horas del día; z es la altura por instalar el aerogenerador, o sea 12 metros; z_0 es un índice de rugosidad en el que tomaremos un valor de 1 metro y z_{ref} es la altura de referencia la cual proporciona directamente el programa, que en este caso son 10 metros. Al calcular la velocidad promedio a la altura de 12 metros, se puede hacer un mejor procesamiento de los datos, mostrado en la tabla 3.

Tabla 3. Velocidades de viento promedio mensuales. Autoría propia

	Velocidad promedio (m/s)
Enero	6.17
Febrero	6.14
Marzo	6.13
Abril	6.13
Mayo	6.10
Junio	6.09
Julio	6.10
Agosto	6.09
Septiembre	6.09
Octubre	6.11
Noviembre	6.14
Diciembre	6.13

Una vez recolectados y ordenados los datos del histórico de 10 años de la comunidad, y gracias a las herramientas tecnológicas como Excel, se calcularon las velocidades anuales mostradas en la ilustración 24, lo cual nos da un panorama general sobre el recurso eólico presente en la zona de estudio.

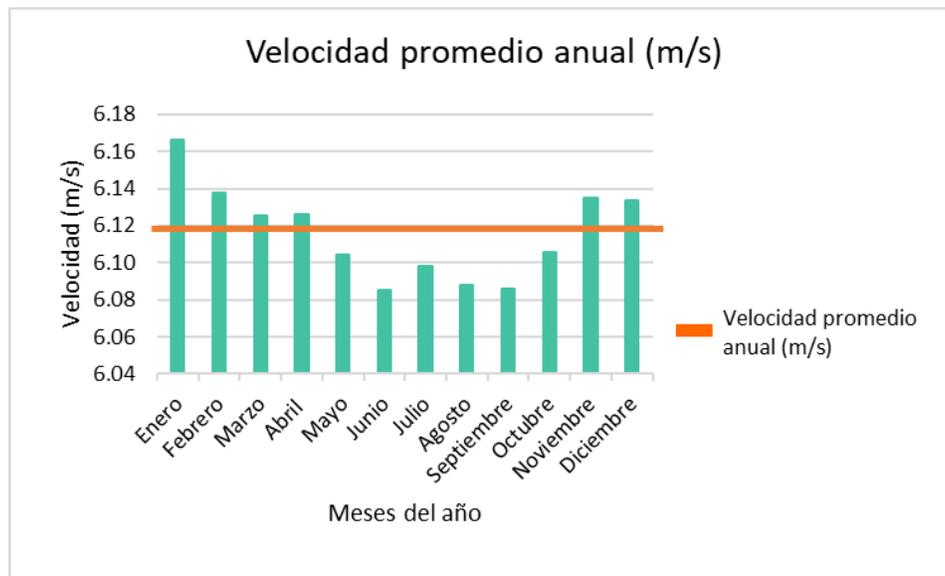


Ilustración 24. Velocidad promedio anual de la comunidad. Autoría propia

El tratamiento y la comprensión de estos datos permitió seleccionar la turbina adecuada de acuerdo con la hoja técnica proporcionada por el fabricante, como son la velocidad de arranque y la velocidad nominal con la que, el o los aerogeneradores a instalar, funcionen de

manera óptima de acuerdo con las velocidades de viento de las comunidades y cubran la demanda energética propuesta.

- Caracterizar la radiación solar en la comunidad para obtener su potencial solar

Para calcular la energía producida por una planta de celdas solares o modelar su evolución temporal, es necesario obtener información sobre la radiación incidente en el plano del generador. Si se quiere predecir la energía que producirá un sistema a futuro, el problema consiste en estimar la radiación que recibirá en función de la información disponible sobre el comportamiento de la radiación en el sitio (Nandwani, 2005).

Los datos de radiación solar y el índice de claridad se obtuvieron a través del programa Data Access Viewer de la NASA, el cual permitió hacer la comparación de un histórico de 10 años – 2014 a 2023 – en donde se obtuvo un promedio de radiación solar de 4.60 kW/h/m² y un índice de claridad de 0.48.

La figura 25 muestra el promedio mensual del recurso solar a lo largo de 10 años.

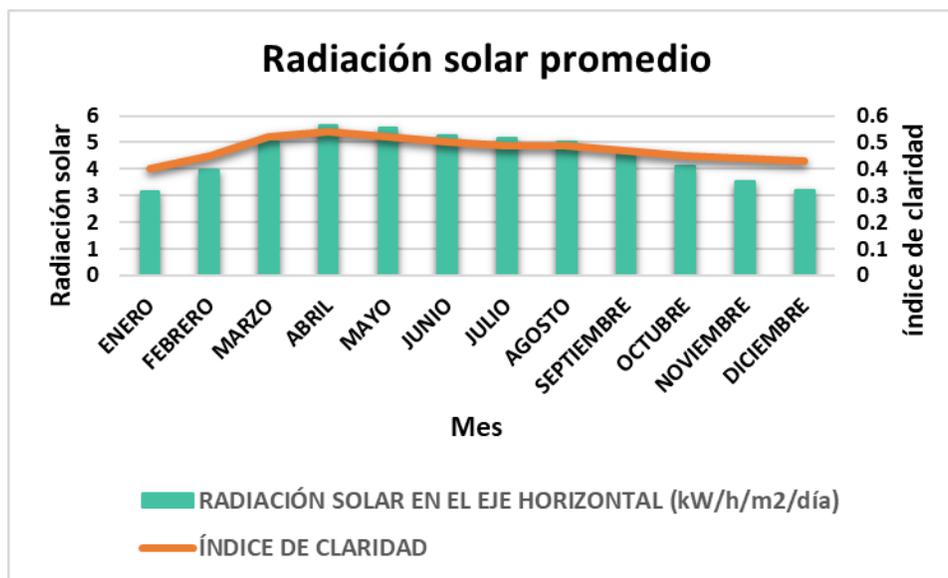


Ilustración 25. Promedio del recurso solar anual. Autoría propia

Gracias a los datos de radiación solar que inciden en la zona y el índice de claridad, entre otros aspectos, se puede llevar a cabo el diseño para la instalación fotovoltaica ideal a implementar.

- Calcular la demanda energética de la población.

Para determinar la demanda energética es necesario comprender la diferencia entre la potencia instalada en una vivienda, la cual es la capacidad máxima de energía eléctrica que puede ser utilizada por los dispositivos y equipos conectados a dicho hogar (Grupo Iberdrola, 2024); y el perfil de carga o demanda energética que caracteriza el consumo de potencia a lo largo de un periodo de tiempo. Este periodo puede ser diario, semanal, mensual o anual dependiendo del objetivo de estudio (Aravena, 2019).

Debido a las condiciones de la comunidad y sus cifras de población sin acceso a energía, se tomó como muestra una vivienda modelo que cuenta con los componentes básicos de un hogar en una comunidad rural. En la tabla 4 se muestran los equipos y la potencia total instalada (W).

Tabla 4. Potencia instalada en una vivienda modelo. Autoría propia

ELECTRODOMÉSTICOS	POTENCIA (W)	TOTAL DE APARATOS	POTENCIA INSTALADA (W)
FOCOS	15	4	60
VENTILADOR	70	1	70
REFRIGERADOR	200	1	200
RADIO	15	1	15
CARGADOR DE TELÉFONO	5	1	5
TOTAL			350

Como se puede observar, la potencia instalada no varía durante el transcurso día – a menos que se instalen más número de aparatos o equipos – esto es lo que la diferencia del perfil de carga, ya que este se basa en los hábitos de uso de cada electrodoméstico en la vivienda, por lo tanto, corresponde a la demanda energética. Para calcular este perfil de carga se hizo un estimado de cuantas horas al día se utilizan los diferentes aparatos dentro del hogar, como se puede observar en la figura 26, la gráfica no es constante ya que la demanda energética varía a lo largo de las 24 horas.

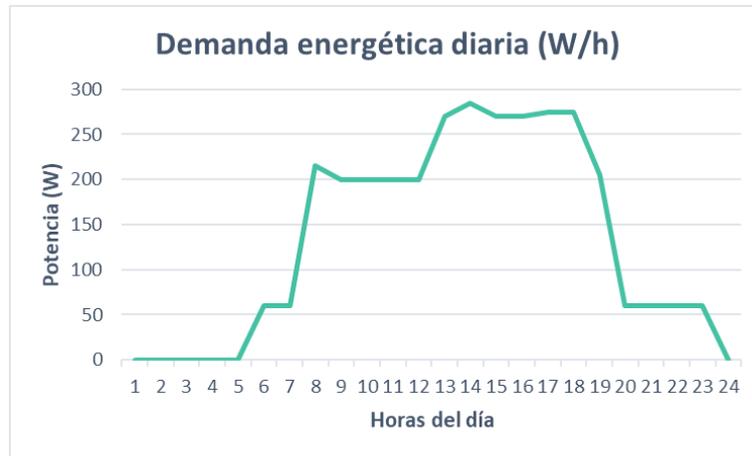


Ilustración 26. Perfil de carga. Autoría propia

4.1.2. Propuesta de la arquitectura del sistema híbrido renovable

- Caracterizar las posibles combinaciones del sistema eólico-fotovoltaico aislado a través del software seleccionado
 - A. Componentes del sistema.** Para cubrir con el suministro de la demanda eléctrica, se cuenta con diferentes tecnologías existentes, como se puede apreciar en la figura 27.

Este proyecto contempló los siguientes componentes en el sistema: un arreglo fotovoltaico, para el aprovechamiento de la irradiación solar; una turbina eólica, para el aprovechamiento del viento y un banco de baterías de plomo-acido, el cual entrará en acción cuando exista intermitencia en los recursos renovables. Es importante tener en cuenta que el sistema híbrido proporcionará corriente directa, proveniente de las baterías, es por lo que se debe integrar un inversor al sistema – de corriente directa a corriente alterna –, ya que la mayoría de los electrodomésticos en un hogar necesitan ser alimentados con corriente alterna.

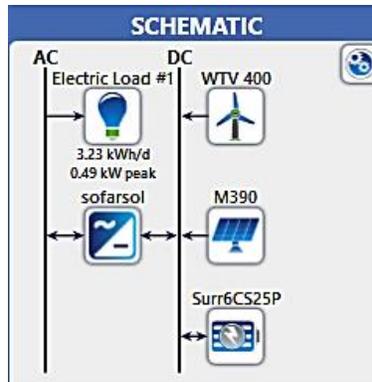


Ilustración 27. Esquema eléctrico del sistema híbrido aislado.

1. Sistema fotovoltaico. El panel fotovoltaico seleccionado para este caso fue el modelo M390-A1F de la empresa MITREX, el cual es de celda solar monocristalina, con una potencia nominal máxima de 390 W y una eficiencia del 19.2%, porcentaje considerado alto. El precio de este panel es de \$2433.00 MX y su tiempo de vida es el más largo de todos los componentes, ya que tiene un estimado de 25 años y el costo de operación y mantenimiento es de \$121.65 MX por año.

2. Aerogenerador. El aerogenerador que se eligió fue una turbina de eje vertical de 5 cuchillas de arranque de baja velocidad de la marca Mars Rock. Su curva de potencia se muestra en la figura 28.

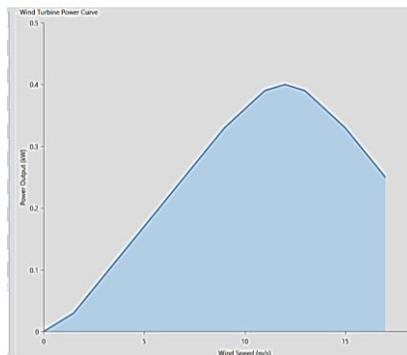


Ilustración 28. Curva de potencia de la turbina seleccionada

Gracias a la curva de potencia se determina cuánta potencia va a desarrollar la turbina a ciertas velocidades; para este modelo la velocidad de arranque es de 1.5 m/s y su velocidad nominal de 12 m/s, llegando a generar 400 W y soportando velocidades hasta de 45 m/s. Cabe mencionar que este aerogenerador brinda corriente alterna, sin embargo, para que la energía generada pueda ser almacenada, debe de conectarse a un convertidor de ca a cd, que

se encargue de transmitirla directamente a las baterías. Este modelo tiene un precio de \$2,310.69 MX y un costo de operación y mantenimiento anual de \$464.50 MX con un tiempo de vida de 20 años.

3. **Baterías.** El sistema de almacenamiento de energía seleccionado se basa en baterías, ya que es fácil de dimensionar y tienen mejor accesibilidad durante la compra. Las baterías seleccionadas fueron de ciclo profundo modelo 6 CS 25P de la marca Rolls, con un tiempo de vida de cinco años y un precio de \$9,071.35 MX, lo que lo convierte en el componente más caro del sistema; es necesario resaltar que no necesitan inversión económica de operación y mantenimiento. En la figura 29 se muestra el ciclo de vida versus la profundidad de descarga.

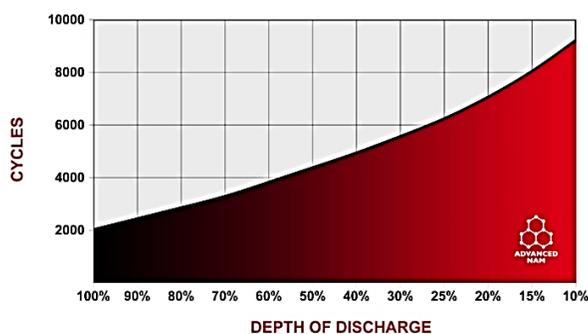


Ilustración 29. Ciclo de vida VS profundidad de descarga

B. Optimización. Una vez ingresados los datos de los recursos renovables, el perfil de carga y los componentes seleccionados, HOMER Pro evaluará todas las combinaciones correspondientes para decidir cuál es el sistema óptimo técnica y económicamente.

Hay que mencionar que la estimación se hizo por vivienda, por lo que los resultados que arrojó la simulación fueron individuales, por lo que se tendrá que escalar por el número total de viviendas de la comunidad.

También se realizó un análisis de sensibilidad para 20 y 25 años de vida útil del proyecto y descubrir su efecto en la optimización del sistema, principalmente en el costo nivelado de energía, el costo de operación por año, costo de capital y costo de operación y mantenimiento. Ver tabla 5.

Tabla 5. Resultados del análisis de sensibilidad

Tiempo de vida del proyecto (años)	LCOE (\$/kWh)	Costo de operación	Costo de capital	Costo O&M	Costo Presente Neto (NPC)
20	\$4.84	\$3,787.87	\$2,520.78	\$508.22	\$84,425.71
25	\$4.84	\$4,064.55	\$2,520.78	\$508.22	\$98,656.00

Como se puede apreciar, los costos no varían significativamente, sin embargo, es necesario considerar que el tiempo de vida de los componentes se adaptan más al lapso de 20 años, ya que el único componente con vida útil de 25 años, aproximadamente, es el sistema fotovoltaico por lo que sería desfavorable el reemplazo del aerogenerador con un tiempo de vida de 20 años, por los 5 años restantes de los paneles solares.

Tabla 6. Costos de la configuración

Componente	Capital (\$)	Reemplazo (\$)	O&M (\$)	Total (\$)
Panel FV M390-A1F	\$3,322	\$0	\$2,454.30	\$5,413.57
Turbina eje vertical	\$2,527.89	\$0	\$7,510	\$10,038.18
Convertidor Sofar solar 2200TL-G3	\$2,756.19	\$2,036.34	\$0	\$4,792.53
Baterías Surrette 6CS 25P	\$19,850.72	\$44,336	\$0.00	\$64,186.93
Sistema	\$28,457	\$46,372.55	\$9,964.59	\$84,431.21

Gracias a la optimización realizada por HOMER Pro, se consiguieron 61.6 horas de autonomía y una producción de 1,890 kWh anuales por vivienda, factores de suma importancia, considerando que el acceso a la comunidad es muy restringido, de manera que la intermitencia de los recursos renovables no afectará a la comunidad gracias a las horas de autonomía que puede cubrir el sistema.

4.1.3. Optimización del sistema híbrido renovable

- Resolver cuál es el sistema óptimo para la comunidad

HOMER Pro evaluó todas las combinaciones correspondientes para decidir cuál es el sistema óptimo técnica y económicamente hablando. Hay que mencionar que la estimación se hizo en una vivienda modelo, así que los resultados que arrojó la simulación fueron individuales, por lo que se tendrá que escalar por el número total de viviendas dependiendo de la comunidad.

Los resultados para la comunidad San Francisco del Mar Pueblo Viejo, se muestra en la tabla 7 en donde se analizan los costos de capital, reemplazo, operación y mantenimiento y costo total con un tiempo de vida de 20 años.

Tabla 7. Costos de la configuración. Autoría propia

Componente	Capital (\$)	Reemplazo (\$)	O&M (\$)	Total (\$)
Panel FV M390-A1F	\$3,322	\$0	\$2,454.30	\$5,413.57
Turbina eje vertical	\$2,527.89	\$0	\$7,510	\$10,038.18
Convertidor Sofar solar 2200TL-G3	\$2,756.19	\$2,036.34	\$0	\$4,792.53
Baterías Surrette 6CS 25P	\$19,850.72	\$44,336	\$0.00	\$64,186.93
Sistema	\$28,457	\$46,372.55	\$9,964.59	\$84,431.21

Por otro lado, el costo de reemplazo es elevado debido a que el tiempo de vida de las baterías es de tan solo 5 años y de la turbina eólica es de 20 años, por lo que el reemplazo del sistema de almacenamiento para la zona es forzoso debido a que se trata de una configuración aislada, variable que de igual manera altera el costo de operación y mantenimiento. Cabe destacar que a simple vista los costos se ven elevados, sin embargo, es importante tomar en cuenta que es una inversión a un plazo 20 años.

CONCLUSIONES

El estudio logró determinar que el diseño de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico es una solución viable para la electrificación de comunidades rurales en Oaxaca. Se alcanzaron los objetivos específicos, optimizando el diseño con HOMER Pro y garantizando la viabilidad técnica y económica del sistema. El sistema propuesto ofrece una alternativa sustentable, con un costo de energía competitivo y una reducción significativa de emisiones de CO₂. La implementación de baterías asegura una autonomía adecuada, permitiendo el suministro eléctrico constante.

El estudio realizado sobre el diseño óptimo de un sistema híbrido aislado para San Francisco del Mar Pueblo Viejo, Oaxaca, muestra la importancia de las energías renovables en la búsqueda de soluciones efectivas para comunidades rurales. Este proyecto no solo aborda el problema del acceso limitado a la electricidad en regiones aisladas, sino que también sienta las bases para un sistema replicable en otras comunidades alrededor de la República Mexicana con características similares.

Oaxaca, siendo una región con alto potencial eólico y solar, es un escenario ideal para implementar un sistema híbrido renovable. La comunidad seleccionada enfrenta desafíos relacionados con la falta de infraestructura eléctrica, condiciones económicas escasas y problemas de acceso a la red eléctrica. En este contexto, el diseño de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico aislado no solo garantiza atender la demanda energética de la población, sino que también contribuye significativamente a una transición energética justa y sostenible, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030.

Esta investigación demuestra que las soluciones basadas en energías renovables pueden ser económicamente competitivas y técnicamente viables, incluso en regiones con características geográficas desafiantes. Además, se destaca que los sistemas híbridos no solo garantizan un suministro eléctrico confiable, sino que también ofrecen una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero, factor clave en la lucha contra el cambio climático. El sistema propuesto, compuesto por aerogeneradores, paneles fotovoltaicos y un sistema de almacenamiento de energía, que en este caso son baterías, representa una solución energética completa. Los resultados de la simulación indican un costo nivelado de energía competitivo en comparación con alternativas tradicionales como generadores a diésel o la restauración de

la infraestructura de la red eléctrica. Esto muestra que los sistemas híbridos no solo son sostenibles, sino también asequibles para comunidades rurales con recursos limitados.

Además, la incorporación de baterías para almacenamiento garantiza autonomía energética, permitiendo que la comunidad tenga acceso a electricidad incluso en condiciones climáticas adversas, como días nublados o sin viento. Este diseño ofrece una cobertura confiable del 100% de la demanda energética estimada, proyectada también para el crecimiento poblacional y el incremento en el uso de dispositivos eléctricos en los próximos años.

El acceso a la electricidad tiene un impacto directo y positivo en la calidad de vida de los habitantes de San Francisco del Mar Pueblo Viejo. Entre estos beneficios destacan:

1. **Educación:** Una iluminación adecuada facilita el aprendizaje y promueve el acceso a tecnología educativa, como el establecimiento del uso de las tecnologías de información
2. **Salud:** La electricidad en esta comunidad permitirá la creación de un centro de salud para el acceso a servicios médicos de los que carecen.
3. **Economía local:** La electrificación permite la refrigeración de productos, fortaleciendo sus principales actividades económicas como la pesca y la venta de alimentos, promoviendo la economía circular de la comunidad y sus alrededores.
4. **Reducción de costos:** Se estima que las familias ahorrarán hasta un 40% en comparación con los gastos asociados al uso de generadores diésel, al mismo tiempo que disminuyen su dependencia de combustibles fósiles.

Uno de los logros más significativos del proyecto es su contribución al desarrollo sostenible. Al utilizar recursos renovables, el sistema híbrido propuesto evita la emisión de toneladas de CO₂ anuales, contribuyendo directamente a los compromisos de México en materia de cambio climático. Este diseño demuestra que es posible atender las necesidades energéticas de comunidades vulnerables sin comprometer el equilibrio ambiental.

Además, este proyecto promueve el empoderamiento de las comunidades para que gestionen sus propios recursos renovables. Esto no solo reduce la dependencia de la red eléctrica nacional, sino también del uso de combustibles fósiles, a su vez que fomenta la autogestión y el desarrollo comunitario.

Este trabajo pone en evidencia la necesidad de adoptar un enfoque adaptado a las características específicas de cada región para garantizar el éxito de proyectos de

electrificación rural. La combinación de tecnologías renovables, herramientas de simulación avanzadas y un análisis detallado de las necesidades de la comunidad asegura resultados óptimos en términos técnicos, económicos y sociales.

Se recomienda continuar con estudios de implementación real del sistema, considerando aspectos de mantenimiento, financiamiento y aceptación social de la tecnología en la comunidad.

En resumen, esta investigación no solo ofrece una solución a un problema energético en una comunidad específica, sino que también establece un precedente para la adopción de sistemas híbridos renovables en zonas rurales. Al brindar un acceso sostenible a la electricidad, mejora la calidad de vida de los habitantes, impulsa el desarrollo local y contribuye significativamente a los objetivos nacionales de transición energética. Este enfoque demuestra que las energías renovables no solo son viables, sino esenciales para construir un futuro más justo, sostenible y equitativo para todos. Gracias a este tipo de investigaciones, se crea conciencia sobre la importancia de invertir en nuevas tecnologías y se impulsa hacia una transición energética justa y asequible para todos, promoviendo la implementación de las energías renovables y cumpliendo con algunos de los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 y su principio fundamental: no dejar a nadie atrás.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aravena, M. R. (2019). Elaboración de perfiles de demanda a nivel distribución. Santiago de Chile: FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS.
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (s.f.). El potencial eólico Mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico.
- Ávila, M. E., Morales, L. F., Diéguez, E. T., & Rubio, A. O. (Abril de 2006). Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México. Recuperado el 31 de Agosto de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000400002&lng=es&nrm=iso
- CENACE. (2020). Programa de ampliación y modernización de la red nacional de transmisión y redes generales de distribución del mercado eléctrico mayorista 2020-2034.
- CEVALLOS, M. S. (1998). El libro de las energías renovables. Costa Rica: ERA SOLAR.
- CFE. (Diciembre de 2020). Plan de negocios 2020-2024. Recuperado el Junio de 2024, de https://portales-transparencia.cfe.mx/art73/c%20Plan%20de%20Negocios/Plan%20de%20Negocios%202020_2024.pdf
- Chaparro, C. (28 de Junio de 2019). SYSCOM. Obtenido de <https://www.syscomblog.com/2019/06/sistemas-hibridos-aislados-de-energia.html#:~:text=Los%20sistemas%20isla%20o%20aislados,el%20arreglo%20fotovoltaico%20no%20opere>.
- Comisión Federal de Electricidad. (30 de Septiembre de 2010). CFE. Obtenido de <https://web.archive.org/web/20051210071731/http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/eoloelectrica/>
- Corral, C. P., Villalba, L. A., Caberta, R. Ñ., & Valenzuela, R. A. (2014). Diseño de un sistema híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua. Culcyt.
- FRIEDRICH, F. J., DOMINGUEZ, C. P., ESCARTIN, N. E., GONZALEZ, J. F., & HERNANDEZ, J. J. (1988). El libro de las energías renovables. Costa Rica: S.A. de Publicaciones Técnicas.
- Gobierno de México. (06 de Marzo de 2013). Obtenido de Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía : <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-vigentes>
- Google maps. (2023). Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/70146+San+Francisco+Viejo,+Oax./@16.2353436,-94.6333569,16z/data=!4m6!3m5!1s0x85953ab9d8dca265:0x361b0bbe657c79b8!8m2!3d16.2319982!4d-94.6333336!16s%2Fg%2F11c267d237?authuser=0&entry=ttu>
- Google maps. (2023). Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/70146+San+Francisco+Viejo,+Oax./@16.2351088,-94.6356329,1505m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x85953ab9d8dca265:0x361b0bbe>

- 657c79b8!8m2!3d16.2319982!4d-94.6333336!16s%2Fg%2F11c267d237!5m1!1e4?authuser=0&entry=tту
- GRUPEL. (s.f.). GRUPEL. Energy everywhere. Obtenido de <https://grupel.eu/es/faqs/como-funciona-un-generator-diesel-grupel/>
- Grupo Iberdrola. (2024). I-DE Redes Eléctricas Inteligentes. Recuperado el Julio de 2024, de <https://www.i-de.es/glosario/potencia-instalada-en-instalacion-de-consumo>
- IANAS. (2016). Guía para un futuro sustentable para las Américas. México.
- INEGI. (2020). INEGI. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/Herramientas>
- IPESA. (08 de Julio de 2020). IPESA. Obtenido de <https://www.ipesa.com.pe/blog/funciona-generator-diesel/>
- Lamigueiro, O. P. (2023). Energía solar fotovoltaica . España: Creative Commons.
- Liu, B. Y., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy* 4.
- Mandal, S., Das, B. K., & Hoque, N. (2018). Dimensionamiento Óptimo de un Sistema Energético Híbrido Autónomo para Electrificación Rural en Bangladesh. *Cleaner Production* .
- Marín, F., Rivero, M., Sellschopp, S., Alba, F., & Ramos, E. (2017). Análisis mediante dinámica de fluidos computacional de un álabo con perfil NACA 2411. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, 132.
- Medina, M. G. (2013). Sistema híbrido de generación de energía eléctrica eólico – fotovoltaico aislado para el suministro eléctrico demandado por un edificio habitacional. México D. F., México.
- MEXICO 2. (2016). Obtenido de <https://www.mexico2.com.mx/energia.php?id=17>
- MÉXICO ENERGY. (s.f.). MÉXICO ENERGY. Obtenido de <https://mexicoenergyllc.com.mx/es/blogs/mexico-energy-insights/an-overview-of-renewable-energy-in-mexico>
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). Energía eólica., (págs. 2-22). Argentina.
- Muralikrishna, M., & Lakshminarayana, V. (2008). Sistemas de energía híbrida (solar y eólica) para electrificación rural. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*
- Nájera, E. B. (2020). Implementación de sistema fotovoltaico aislado y de respaldo para dispositivos de control de personal. CDMX, México.
- Nandwani, S. S. (Junio de 2005). ENERGIA SOLAR - CONCEPTOS BASICOS Y SU UTILIZACIÓN. Heredia, Costa Rica.
- Nava, D. (16 de Diciembre de 2021). Expansion. Obtenido de <https://expansion.mx/empresas/2021/12/16/vivir-sin-luz-electrica-la-otra-pobreza-que-afecta-a-1-millon-de-mexicanos>
- Observatorio de Inteligencia del Sector Energético (OISE). (2018).
- Patraca, R. V., & López, J. L. (9 de noviembre de 2021). Portal Comunicación Veracruzana. Energías renovables en México.
- Pérez-Ramírez, R., Pérez-López, A., & Martínez-Arremilla, J. C. (2019). Optimización de sistemas híbridos de energía para la electrificación rural de comunidades indígenas de México. Chiapas.
- Rekioua, D. (2020). *Hybrid Renewable Energy Systems. Optimization and Power Management Control*. Suiza: Springer.

- Reuters. (28 de Mayo de 2024). Forbes México. Recuperado el Junio de 2024, de <https://www.forbes.com.mx/demanda-electrica-en-mexico-alcanza-record-en-medio-de-calor-extremo-y-escasez-de-agua/>
- Salgado, O. A. (02 de Septiembre de 2013). Energía eólica. Teoría y conceptos. Temixco, Morelos, México.
- Sánchez-Migallón, Á. C. (2016). Estudio de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores. Alcalá de Henares, Madrid, España.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (24 de Septiembre de 2018). SEMARNAT. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/energias-renovables-gran-oportunidad-para-mexico-172759>
- SEMARNAT. (2015). Guía de Programas de Fomento a la Generación de Energía con Recursos Renovables. México.
- SENER. (2022). Nuevo esquema del sistema eléctrico nacional.
- SENER. (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037.
- Silva, D. S. (2019). Dimensionamiento, Selección de un Sistema Híbrido aislado para Electrificar el Caserío Pampa de Chaparri. LAMBAYEQUE – PERÚ.
- Solar Plak. (s.f.). Solar Plak. Obtenido de <https://solarplak.es/energia/cuales-son-las-mejores-baterias-para-placas-solares/>
- SolarPower Europe; ASOLMEX. (2019). Digitalización y Energía Solar. Edición México. México.
- Solmic. (s.f.). Solmic. Obtenido de Sistema híbrido: <https://www.solmic.co/aprendamos-sobre-el-sistema-hibrido>
- Tarrillo, J. M. (2012). Sistemas de almacenamiento de energía. XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, (págs. 2-8). Lima.
- Valle, J. A., Viera, J., González, M., Anseán, D., García, V. M., & Viejo, C. B. (2017). Sistemas de almacenamiento masivo de energía con baterías: Estado actual y tendencias de futuro. 2-3.
- VERDE ZONA. (14 de marzo de 2015). Verde zona. Obtenido de <http://verdezona.blogspot.com/2015/03/energias-renovables-la-energia-eolica.html>
- Zohuri, B. (2018). Hybrid Energy Systems. Albuquerque, NM, USA: Springer.

ANEXOS

Anexo A. Hojas de especificaciones técnicas

Specifications

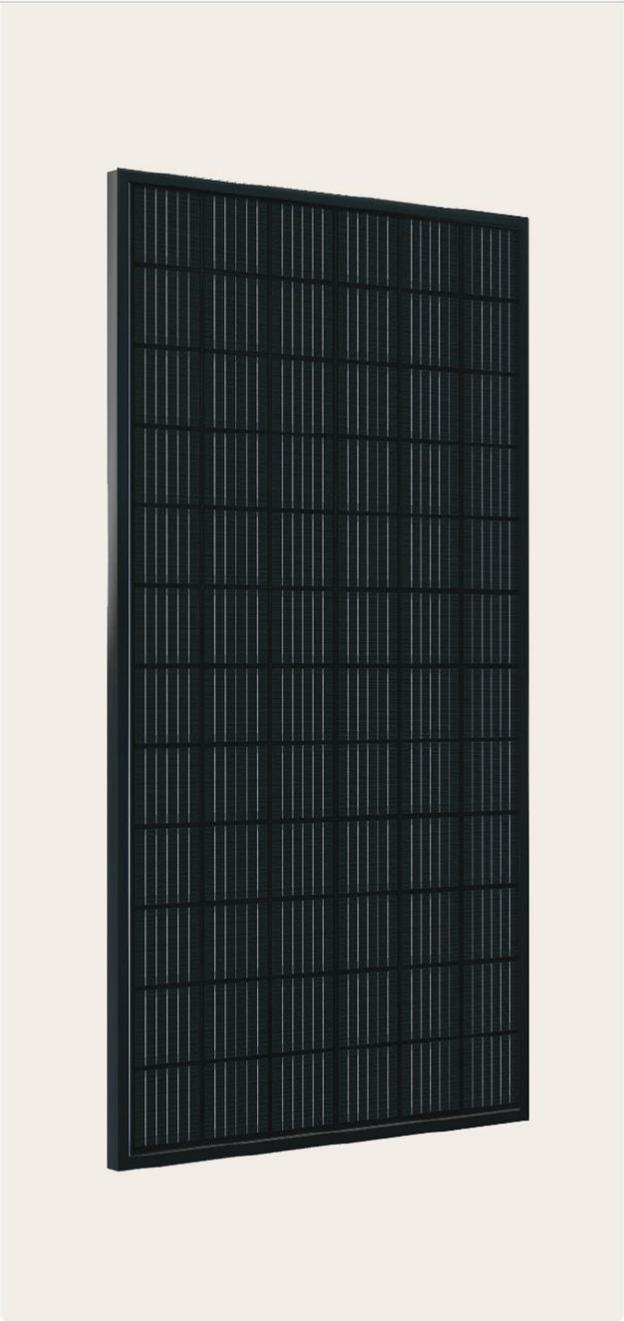
Model Number	5D-400-12V	is_customized	Yes
Type	Wind Power Generator	Brand Name	MARS ROCK
Shaft Material	IRON	Mounting Base	Without Mounting Base
Origin	Mainland China	Certification	CE,FCC,RoHS
Power	400W	voltage	12V 24V
Blades Length	60cm/23.62inch	Blades Wheel Diameter	88.5cm/34.85inch
Blades material	nano-fiber glass fiber	Blades Shape	Round
Blades QTY	5PCS	Wind start-up	1.5M/S;3.4mp/h
Wind Rated Speed	12M/S;27mp/h	Wind Survival speed	48/S;100.7mp/h
Generator Rotation Speed	900RPM	Wind Controller System	Electromagnet
Product name	Vertical Wind Generator		

Especificaciones de la turbina de eje vertical de 5 cuchillas de arranque de baja velocidad de la marca Mars Rock

M390-A1F

High Efficiency Mono PV Module

- **North American Manufacturer**
Mitrex is a world-leading manufacturer of standard solar and BIPV products based in Canada. With over 20 years of experience, Mitrex guarantees high-quality, fully-automated manufacturing and continuous innovation in solar technology.
- **Quality, Durability And Performance**
Mitrex panels are engineered with the highest quality- featuring wide-ranging compatibility with racking and electrical components, advanced cell technology, ability to withstand high snow/wind load conditions, and high performing modules.
- **25-Year Product And Performance Warranty**
Made in North America, all our products come with an industry leading 25-year warranty for products and performance, ensuring the quality of the hardware, energy generation, and aesthetics are maintained.

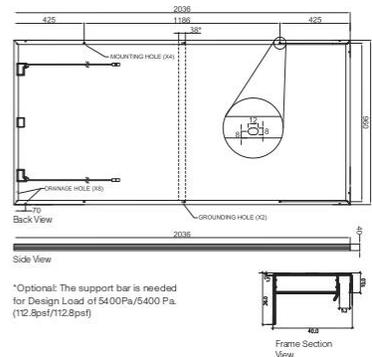


Electrical Specifications

Test Conditions	STC
Module Power (Pmax)	390W
Maximum Power Voltage (Vpmax)	41.9V
Maximum Power Current (Ipmax)	9.31A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.2V
Short Circuit Current (Isc)	9.97A
Module Efficiency	19.2%
Maximum System Voltage (VDC)	1000V (IEC/UL)
Series Fuse Rating	20A
Power & Other Electrical Specification Tolerance	5%
Application Classification	Class A

Measurement Conditions: STC 1000 W/m² - AM 1.5 - Temperature 25°C

Engineering Drawing



Mechanical Properties

Module Weight	22 kg
Dimensions (H x L x D)	2036 x 996 x 40mm
Design Load	5400Pa front load / 5400Pa rear load or 5400Pa front load / 2400Pa rear load*
Hail Impact Resistance	ø 25mm at 83 km/h
Cells	72 [12x6] Mono-crystalline (158.75 x 158.75mm)
Glass	3.2mm tempered glass, high transmittance, anti-reflective coating
Cables & Connectors (Refer to Installation Manual)	300mm, 1000mm, 1200mm - 4mm ² , 12 AWG (UL) MC4 from Staubli
Backsheet	High durability, UV resistant, PV backsheet
Frame	Anodized aluminum alloy black frame
Bypass Diodes	3 diodes- 30SQ045T (45V max DC blocking voltage, 30A max forward rectified current)
Junction Box	IP68 rated, TUV and UL certified
Fire Rating	Type II

Metric

Module Weight	22 kg
Dimensions (H x L x D)	2036 x 996 x 40mm
Design Load	5400Pa front load / 5400Pa rear load or 5400Pa front load / 2400Pa rear load*
Hail Impact Resistance	ø 25mm at 83 km/h
Cells	72 [12x6] Mono-crystalline (158.75 x 158.75mm)
Glass	3.2mm tempered glass, high transmittance, anti-reflective coating
Cables & Connectors (Refer to Installation Manual)	300mm, 1000mm, 1200mm - 4mm ² , 12 AWG (UL) MC4 from Staubli
Backsheet	High durability, UV resistant, PV backsheet
Frame	Anodized aluminum alloy black frame
Bypass Diodes	3 diodes- 30SQ045T (45V max DC blocking voltage, 30A max forward rectified current)
Junction Box	IP68 rated, TUV and UL certified
Fire Rating	Type II

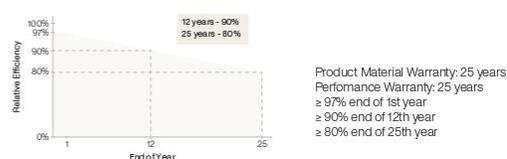
Imperial

Module Weight	48.5 lbs
Dimensions (H x L x D)	80.2 x 39.2 x 1.6in
Design Load	112.8psf front load / 112.8psf rear load or 112.8psf front load / 50.1psf rear load*
Hail Impact Resistance	ø 1in at 51.6 mph
Cells	72 [12x6] Mono-crystalline (6.25 x 6.25in)
Glass	0.126in tempered glass, high transmittance, anti-reflective coating
Cables & Connectors (Refer to Installation Manual)	11.8in, 39.4in, 47.2in - 0.16in ² , 12 AWG (UL) MC4 from Staubli
Backsheet	High durability, UV resistant, PV backsheet
Frame	Anodized aluminum alloy black frame
Bypass Diodes	3 diodes- 30SQ045T (45V max DC blocking voltage, 30A max forward rectified current)
Junction Box	IP68 rated, TUV and UL certified
Fire Rating	Type II

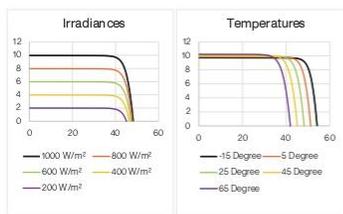
Temperature Ratings

Temperature Coefficient Isc	0.037% /°C
Temperature Coefficient Voc	-0.27% /°C
Temperature Coefficient Pmax	-0.36% /°C
Nominal Module Operating Temperature	45 ± 3°C
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C

Warranty



I-V Curves



Shipping

Modules Per Pallet	25
Pallets Per Truck	28
Modules Per Truck	700

Certifications

- UL 61730-1/-2, CSA C22.2 #61730-1/-2, IEC 61730-1/-2, UL 61215-1/-2, IEC 61215-1/-2, CSA 61215-1/-2, CEC Listed

Datasheet is subjected to change without prior notice, always obtain the most recent version of the datasheet. **Caution:** For professional use only, the installation, handling, and cleaning of PV modules should only be performed by qualified professionals. Read the Installation Manual for mounting specifications before handling, installing and operating modules.

Learn More:
mitrex.com info@mitrex.com

Headquarters:
41 Racine Rd., Toronto, ON M9W 2Z4, Canada +1 (416) 497 7120

USA Office:
Chrysler Building, 405 Lexington Avenue Floor 26, NY, USA +1 (646) 583 4486



Series	5000	Warranty	See Warranty Terms
Volts	6	BCI	SPEC
Cells	3	Plates/Cell	25
Terminal Type	Flag		
Included Hardware	S/S Hex Cap Screw, Nut, Lock & Flat Washer		
Size & Thread	5/16"-18		

Charge	
Charge Voltage Range	2.45-2.5 V/cell @ 25°C (77°F)
Float Voltage Range	2.25 V/cell @ 25°C (77°F)
Self-Discharge Rate	5%-10% per month at 25°C (77°F)

Capacity	
Cold Crank Amps (CCA) 0°F / -18°C	2090
Marine Crank Amps (MCA) 32°F / 0°C	2612
Reserve Capacity (RC @ 25A)	2047 Minutes
Reserve Capacity (RC @ 75A)	682 Minutes

Capacity Affect by Temperature	40°C (104°F)	25°C (77°F)	0°C (32°F)	-15°C (5°F)
	105%	100%	75%	50%

Hour Rate	Capacity / AMP Hour	Current / AMPS
@ 100 Hour Rate	1100 AH	11.00 A
@ 72 Hour Rate	1040 AH	14.45 A
@ 50 Hour Rate	985 AH	19.70 A
@ 20 Hour Rate	853 AH	42.64 A
@ 15 Hour Rate	793 AH	52.87 A
@ 10 Hour Rate	759 AH	75.90 A
@ 8 Hour Rate	733 AH	91.68 A
@ 5 Hour Rate	682 AH	136.45 A
@ 1 Hour Rate	384 AH	383.76 A

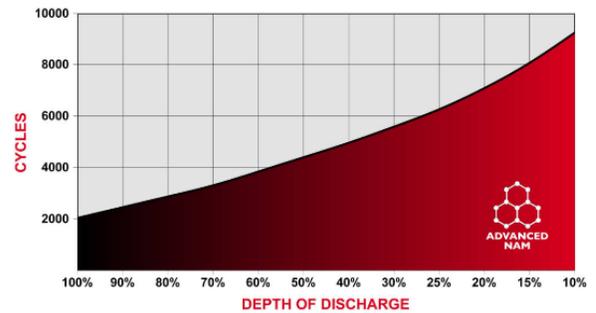
Ampere hour capacity ratings based on specific gravity of 1.280 at 27°C (80°F). Reduce capacities 5% for specific gravity of 1.265 and 10% for 1.250.

Specifications			
	Weight	144 kg	317.5 lbs
	Length	55.9 cm	22"
	Width	28.6 cm	11.25"
	Height Inc. Term.	46.4 cm	18.25"

Product measurements & weights are calculated based on sample data. Individual specifications are subject to vary due to the manufacturing process, battery components & electrolyte levels.

Electrolyte Reserve	95 mm	3.75"
Container (Inner)	Polypropylene	
Cover (Inner)	Polypropylene - heat sealed to inner container	
Container (Outer)	High Density Polyethylene	
Cover (Outer)	High Density Polyethylene snap fit to outer container	
Handles	Molded	

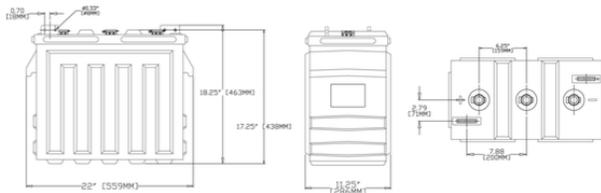
Cycle Life vs. Depth of Discharge



Voltage vs. Depth of Discharge

DISCHARGE	0%	25%	50%	75%	100%
20 HR AH RATE	2.10 V	2.05 V	2.02 V	1.96 V	1.75 V
6 HR AH RATE	2.10 V	2.04 V	2.00 V	1.95 V	1.75 V
1 HR AH RATE	2.10 V	2.03 V	1.99 V	1.94 V	1.75 V

Detailed Illustration



Rev.#4 | October 2022

Especificaciones de las baterías de ciclo profundo modelo 6 CS 25P de la marca Rolls.

Anexo B. Reconocimientos



México, 20 de Marzo del 2024

CONSTANCIA DE PARTICIPACIÓN

Cápsula Channel y Biociencia Wild otorga la presente a

Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Por haber concluido satisfactoriamente el Curso de **Introducción a la divulgación científica** impartido y coordinado por los proyectos de Divulgación Científica Cápsula Channel y Biociencia Wild.

[Signature]

Mtro. Arturo Medina Camacho
Director de Cápsula Channel

[Signature]

Ulises Carbajal González
Director de Biociencia Wild



CONSTANCIA

La Red Sinapsis ciencia y divulgación
otorga la presente a

Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Por su destacada participación con la videoconferencia
"México sostenible: Energías limpias y renovables" en
el evento **Multiverso de la Ciencia 2024**.

23 de agosto del 2024



Mtro. Arturo Medina Camacho
Presidente



Ulises Carbajal González
Vicepresidente



Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Curso terminado satisfactoriamente

Curso Mujeres en la Ciencia

La estudiante en cuestión ha asistido y aprobó la evaluación con éxito del Curso Mujeres en la Ciencia, el cual inició el Martes 5 de Marzo y finalizó el Sabado 9 de Marzo del año 2024 de 8:00 a 10:00 PM GTM-6, con un total de 8 horas teóricas

Este curso ha sido diseñado bajo los parámetros del sistema de competencias de SEP-CONOCER por un instructor avalado ante la secretaría de educación pública e impartido por mujeres científicas profesionales

Cédulas de la entidades evaluadoras: CE1084-OC63-18 y CE0648-ECE202-15

Instructora y diseñadora del curso
Maestra Mariana
Jiménez Montenegro
Perito en Genética Forense

Instructora y diseñadora del curso
Licenciada en Biotecnología
Giselle Berenice Vela Sancho

Instructora y diseñadora del curso:
Lic. Maria Isabel Diaz Iniguez

Instructora y diseñadora del curso:
M. en C. Ana Marroquin
Bióloga
Doctorante en bioquímica

Diseñador del curso:
Lic. Carlos Ernesto Mora Ornelas
Certificado ante SEP-CONOCER
Cédula D-0003381023
Cédula D-0042056023

Emtech Institute & Santander Open Academy

Otorga la siguiente constancia a

Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Por haber completado satisfactoriamente el programa

Introducción a las Tecnologías Emergentes: Edición 2024

Edición 2024



Issue d: 2024-05-15

Certificate ID: pvv5t2qkah



LA FEDERACIÓN MEXICANA DE ENTRENADORES TRANSFORMACIONALES

Otorga el presente

Certificado

Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Al C.

Que le acredita como:

CONFERENCISTA INTERNACIONAL

Estados Unidos Mexicanos a 9 de Septiembre 2024 al 9 de septiembre 2029

ALFREDO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ
Presidente de la
Federación Mexicana de
Entrenadores Transformacionales



Centro Universitario de España y México

MARÍA JUÁREZ MORALES
Master Speaker y Master Coach
Embajadora de la FMET en México



NO. 1053

Edutin Academy

Este documento certifica que

Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Ha invertido (260 horas) de estudios para completar exitosamente el curso y obtener el certificado

DIPLOMADO EN MEDIO AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD


Elias Silvera Malo
Coord. pedagogía
Edutin Academy




Bairon Londoño
Dir. pedagogía
Edutin Academy



Hemos confirmado la identidad del estudiante y su participación en el curso.
Verificar en app.edutin.com/verify/11535058

Emitido el 28 de Mayo del 2024
Newark DE, Estados Unidos

Anexo C. Artículo publicado



Boca del Río, Ver., 4/Septiembre/2024
TEMA: Carta de aceptación

Hernández-Santiago, M. E.
Castellanos-Onorio, O. P.
Gómez-González, F. J.
Mendoza-Sosa, J. A.
Tecnológico Nacional de México
PRESENTE

A nombre del Comité Organizador, tenemos el gusto de comunicarles que su trabajo titulado:

“Diseño de un sistema eólico-fotovoltaico aislado para electrificar a una comunidad rural del estado de Oaxaca”

ha sido ACEPTADO para ser presentado en modalidad PÓSTER en el “Simposio Ambiente y Bioenergía 2024” (SAB-2024), que se llevará a cabo del 12 al 14 de noviembre de 2024 en Boca del Río, Veracruz, México.

Agradecemos enormemente el gran esfuerzo de su parte por participar activamente y sin más por el momento, Nos despedimos con un cordial saludo.

ATENTAMENTE


Dr. Carlos Escamilla Alvarado
Presidente de ABIAER


Dr. Giovanni Hernández Flores
Vice Presidente de ABIAER


Dr. Luis Alfredo Ortega Clemente
Secretario de ABIAER
Líder del Comité Organizador del SAB

<https://abiaer.com>
sab@bdelrio.tecnm.mx

Ciudad de México a 27 de Marzo de 2024

Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Asunto.

Confirmación participación de ponencia en el CIARMX24

La **Asociación Mexicana de Empresas del Ramo de las Instalaciones (AMERIC AC)**, asociación de empresarios con 50 años de trayectoria enfocados en la edificación e infraestructura, y **Federación de Asociaciones Iberoamericanas de Aire Acondicionado y Refrigeración (FAIAR)**, federación integrada por 14 asociaciones de la región de iberoamérica por más de 22 de años; hace llegar a usted nuestro saludo con carácter institucional.

*El motivo de la presente es para **CONFIRMAR** tu participación en el CIARMX24 con los siguientes datos:*

Nombre: Minerva Elizabeth Hernández Santiago

Conferencia: Diseño óptimo de un sistema híbrido aislado aplicado a una comunidad rural del estado de Oaxaca, México

Fecha: 6/junio/2024

Horario: 13:15 HRS

Sala: 2

Es importante mencionar que tu participación es presencial en las instalaciones del Centro Citi Banamex, Ciudad de México.

En breve, el equipo de AMERIC se comunicará contigo para dar seguimiento en cuanto a las modificaciones, adiciones y cambios de la ponencia, todo ello en función del ACUERDO / GUÍA que nos enviaron firmado.

ATENTAMENTE

**Ing. J. Ernesto
Díaz Sánchez**

Presidente AMERIC AC

**Ing. Roberto
Rosas Ángeles**

VP Sector Climatización
AMERIC AC

**Lic. Sahel Carrillo
Belaunzarán**

Director AMERIC AC



INFORMACIÓN EN
SOCIO.AMERIC.ORG.MX/CIARMX24



LLama al
(55) 56 11 5496 / 5414





**El Instituto Tecnológico de Boca del Río y
la Asociación de Biotecnología, Ingeniería Ambiental y Energías Renovables, Asociación Civil
(ABIAER, AC)**

Otorgan la presente constancia de participación a:

**Hernández-Santiago, M.E.; Castellanos-Onorio, O.P.;
Gómez-González, F.J.; Mendoza-Sosa, J.A.**

Por la presentación en **MODALIDAD PÓSTER** del trabajo titulado:

“Diseño de un sistema eólico-fotovoltaico aislado para electrificar a una comunidad rural del estado de Oaxaca”

Durante el Simposio Ambiente y Bioenergía 2024 desarrollado los días 12, 13 y 14 de noviembre del 2024 en Boca del Río, Veracruz, México.


Dr. Carlos Escamilla Alvarado
Presidente de la ABIAER, AC


Dr. Luis Alfredo Ortega Clemente
Presidente del Comité Organizador


Dra. Estela Rivera López
Directora
TecNM-Instituto Tecnológico de
Boca del Río

