



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Máster Universitario en Energías Renovables

Diseño de Sistema Renovable Mixto de generación eléctrica Off Grid.

Trabajo fin de estudio presentado por:	Fernando Gabriel Rocha Rodriguez
Tipo de trabajo:	Diseño de Sistema Híbrido de generación eléctrica Off Grid.
Línea/as de trabajo:	Fotovoltaica, Eólica
Director/a:	Prof. Tyrone Lis Alecio
Fecha:	Diciembre 2025

Resumen

El Trabajo de Fin de Master (TFM), enfocara el estudio, diseño y dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos y eólicos aislados de la red, destinados a abastecer la demanda energética de una vivienda tipo, ubicada en zona rural del norte de Uruguay.

Primeramente, se llevará a cabo una caracterización rigurosa de los recursos solares y eólicos locales, considerando parámetros como Irradiación, Velocidad de Vientos, Temperatura ambiente, Angulo de incidencia y número de horas sol, con el fin de estimar la potencialidad de generación de Energía eléctrica en dicha zona.

A continuación, se presentarán las cargas habituales de una vivienda tipo, tomando en cuenta hábitos normales de consumo, así como las características técnicas de cada uno de los artefactos eléctricos a utilizar y se facilitarán los planos técnicos de dicha instalación.

Sobre la base obtenida, se dimensionará los principales componentes del sistema fotovoltaico y eólico para que cumplan dicha demanda, así como toda la instalación eléctrica requerida con sus respectivas protecciones, el banco de batería, bomba de agua, el regulador MPPT e inversor necesario.

Dicho estudio, utilizara criterios técnicos, que contemplarán pérdidas por temperatura, sombreado, suciedad, a efectos que no se vea comprometido el nivel de acumulación de energía en la batería que en ningún caso podrá ser menor del 90%.

Por último, se presentarán los resultados de viabilidad del dimensionamiento utilizado y su respectivo costo económico, con el fin de mostrar la sustentabilidad de este tipo de sistemas *Off Grid*, para la problemática de autogeneración eléctrica rural.

.

Palabras clave: Sistema Fotovoltaico y Eólico, Dimensionamiento, Sistemas aislados, Electricacion Rural.

Abstract

"The Final Master's Project will focus on the study, design, and sizing of photovoltaic and wind systems isolated from the grid, intended to supply the energy demand of a typical household located in a rural area.

First, a rigorous characterization of local solar and wind resources will be carried out, considering parameters such as irradiation, wind speed, ambient temperature, angle of incidence, and number of sunlight hours, in order to estimate the potential for electricity generation in the area.

Next, the typical loads of a household will be presented, taking into account normal consumption habits, as well as the technical characteristics of each electrical appliance to be used and the technical plans of the installation.

Based on this information, the main components of the photovoltaic and wind system will be sized to meet this demand, along with the entire required electrical installation with its respective protections, the battery bank, water pump, MPPT controller, and inverter.

This study will apply technical criteria that consider losses due to temperature, shading, and dirt, ensuring that the level of energy storage in the battery is not compromised, which in no case may fall below 90%.

Finally, the results of the feasibility of the proposed sizing and its corresponding economic cost will be presented, in order to demonstrate the sustainability of this type of Off-Grid systems as a solution to the challenge of rural self-generation."

Keywords: Photovoltaic and Wind System, Sizing, Stand-Alone Systems, Rural Electrification.

Índice de contenidos

1.	Introducción	14
1.1.	Planteamiento del problema.....	14
1.2.	Justificación	15
1.3.	Estructura del trabajo	15
2.	Contexto y estado del arte	16
2.1.	Energía solar	16
2.2.	Bases físicas de la conversión fotovoltaica	17
2.3.	Condiciones ambientales	17
2.3.1.	Radiación solar	18
2.3.2.	Irradiancia e irradiación	19
2.3.3.	Atenuación atmosférica.....	20
2.3.4.	Espectro solar	20
2.3.5.	Tiempo de insolación y Horas Sol Pico	21
2.3.6.	Movimiento aparente del sol	21
2.3.7.	Orientación del panel.....	23
2.3.8.	Altura solar h	24
2.3.9.	Ángulo acimutal.....	24
2.3.10.	Ángulo de incidencia	25
2.3.11.	Temperatura de la celda.....	26
2.3.12.	Suciedad en los módulos	27
2.4.	Componentes	27
2.4.1.	Módulo fotovoltaico	27
2.4.2.	Regulador de carga	29
2.4.3.	Baterías	32

2.4.4.	Inversor	34
2.4.5.	Sistema de montaje	37
2.5	Aerogeneradores	37
2.4.6.	Orígenes de los vientos	37
2.4.7.	Evolución Histórica de la Energía Eólica	38
2.4.8.	Principio de operación de los aerogeneradores eólicos.....	40
2.4.9.	Tipos de máquinas eólicas	42
3.	Objetivos del TFM	48
3.1.	Objetivo general	48
3.2.	Objetivos específicos	49
4.	Hipótesis de trabajo	49
5.	Requisitos de diseño	50
6.	Metodología	54
7.	Evaluación del recurso renovable.....	55
7.1.	Estudio de la radiación solar.	55
7.2.	Análisis del viento en la región.....	57
8.	Diseño de la instalación	58
8.1.	Estudio de la radiación solar.	58
8.2.	Análisis del viento en la región.....	63
9.	Análisis económico	70
10.	Análisis ambiental	73
11.	Resultados.....	75
11.1.	Resultados del Recurso Solar	75
11.1.1.	Horas Sol Pico y disponibilidad anual.....	75
11.1.2.	Influencia de la inclinación del panel	76

11.2.	Resultados del Recurso Eólico	77
11.2.1.	Velocidad media del viento y distribución estadística	77
11.2.2.	Densidad de potencia disponible.....	77
11.3.	Resultados del Dimensionamiento Fotovoltaico	77
11.3.1.	Generación energética mensual	77
11.3.2.	Pérdidas del sistema.....	77
11.4.	Resultados del Aerogenerador	78
11.5.	Resultados Combinados del Sistema Híbrido	78
11.6.	Resultados del Banco de Baterías	79
11.7.	Análisis Económico: Resultados	79
11.8.	Discusión de Resultados	79
12.	Conclusiones	81
13.	Citas Bibliográficas:	82
Anexos 1	85

Índice de figuras

Figura 1: Formación de la zona de neutralización de cargas por difusión al juntar dos dopajes tipo P y N (extraído de (Core.ac.uk, 2023)	17
Figura 2: Tipos de radiación.....	18
Figura 3: Curva I-V en función de la irradiancia (Temperatura = 43°).	19
Figura 4: Espectro de la radiación solar	21
Figura 5: Declinación solar	22
Figura 6: Carta solar	22
Figura 7: Angulo de azimut y ángulo de orientación	24
Figura 8: Altura solar	24
Figura 9: Angulo acimut	25
Figura 10: Angulo de incidencia.....	26
Figura 11: Efecto de la suciedad en módulos FV	27
Figura 12: Celda de silicio monocristalino.....	28
Figura 13: Celda de silicio policristalino	29
Figura 14: Celda de silicio amorfo.....	29
Figura 15: Ejemplo de funcionamiento del Ciclo útil de una señal PWM.....	30
Figura 16: Identificación de MPP en un generador fotovoltaico	31
Figura 17: Grafico Ciclos/profundidad de baterías estacionarias	33
Figura 18: Tipos de señal en inversores	35
Figura 19: Circulación de la Atmosfera terrestre.	38
Figura 20: Circulación de Vientos locales.....	38
Figura 21: Molinos verticales.	39
Figura 22: Molinos verticales con velas triangulares.....	40
Figura 23: Molinos Holandeses del siglo XIV-XIX.....	40

Figura 24:Fuerzas de sustentación, arrastre y resultante.....	41
Figura 25:Plano y sentido de rotación de las palas.	42
Figura 26:Aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical.	43
Figura 27: Aerogenerador tipo Savonius	44
Figura 28: Aerogenerador tipo Savonius	44
Figura 29: Aerogenerador de Eje Horizontal.....	46
Figura 30: Componentes principales internos de aerogenerador de Eje Horizontal	47
Figura 31: Vista satelital de la zona de instalación.	50
Figura 32: Plano de la Instalación Eléctrica de la vivienda rural.	51
La Figura 33. esquema unifilar de la casa rural.	52
Figura 33. esquema unifilar.....	53
Figura 34: Representación de la incidencia de los rayos solares en el punto de.....	56
Figura 35: Grafico cartesiano de la trayectoria solar en el punto de instalación.	56
Figura 36: Localización del sitio de Instalación	58
Figura 37: Parámetros del modulo	59
Figura 38: Información del sistema Figura 39: Resultados obtenidos	59
Figura 40: Localización geográfica	60
Figura 41: Conexiones Serie-Paralelo del sistema.	60
Figura 42: HSP diario a partir de los datos de irradiación.....	61
Figura 43: Imagen Software Python creado por el autor.....	61
Figura 44: Gráfico de HSP totales de cada mes.	62
Figura 45: Rosas de viento y frecuencia del viento	63
Figura 46: Rosa de energía y densidad media de potencia.....	63
Figura 47: Grafica de Velocidad del viento en el punto de instalación.	64
Figura 48: Programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES.	64

Figura 49: Promedio mensual del viento	65
Figura 50: Programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES.	65
Figura 51: Programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES.	66
Figura 52: Raptor G5 (Raptor Generation 5)	67
Figura 53: energías Fotovoltaicas	69
Figura 54: energías Eólica.	69
Figura 55: generación media mensual de las energías fotovoltaicas y eólica.	69
Figura 56: Diseño del sistema de generación mixta.	70

Índice de tablas

Tabla 1: Características de aerogeneradores verticales.	45
Tabla 2: Características de aerogeneradores horizontales.....	48
Tabla 3: Características de cada circuito eléctrico.	52
Tabla 4: Carga total, factor de simultaneidad, carga corregida, Hs de uso diario, consumo diario de la casa.	53
Tabla 5:de especificaciones técnicas: Aerogenerador Missouri Wind & Solar Raptor G5	68
Tabla 6: Ítems y cantidades de Insumos.	71
Tabla 7: Flujo de caja proyectado.	72
Tabla 8: Resumen de las HSP.....	76
Tabla 9: Resumen de pérdidas en la instalación.	78

1. Introducción

Actualmente, el acceso confiable y continuo a la energía eléctrica representa un desafío crítico en algunas regiones del Uruguay, especialmente en áreas remotas y con infraestructuras deficientes. La dependencia de redes eléctricas convencionales en estos lugares resulta a menudo inviable debido a los altos costos asociados a la instalación y a las dificultades en el mantenimiento de

líneas eléctricas (Ministerio de Industria, 2020).

En este contexto, las fuentes de energía independientes suelen ser la principal solución.

Entre las alternativas más efectivas se encuentran los sistemas de generación eólica, fotovoltaica e hidráulica, que proporcionan una forma continua, confiable y sostenible de suministrar energía en regiones donde la infraestructura es limitada. También se considera la implementación de sistemas híbridos que combinan estas tecnologías para maximizar la eficiencia y adaptabilidad del suministro energético (Bottinelli et al. 2013).

El presente documento se enfoca en el dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaico y eólico aislado, destinado a zonas donde la red eléctrica es inestable o inexistente, centralizándose fundamentalmente en viviendas domésticas unifamiliares, cuya problemática de larga data en este aspecto, es hoy posible solucionar con la aplicación de las tecnologías existentes en el campo de las energías renovables. Por tanto, lo que se busca es proporcionar una solución de energía autónoma y sostenible que mejore la calidad de vida de los habitantes rurales.

El estudio aborda diversos aspectos técnicos de los sistemas fotovoltaicos y eólicos, incluyendo el dimensionamiento de los componentes y la gestión de la energía generada y almacenada. Además, se exploran estrategias para maximizar la eficiencia y durabilidad del sistema, garantizando su viabilidad a largo plazo.

1.1. Planteamiento del problema

La inestabilidad o inexistencia en el suministro de energía eléctrica en tipo de regiones rurales que están alejadas de los centros urbanos y en las cuales se manifiestan interrupciones frecuentes y prolongadas, así como demoras significativas para restablecer el servicio tras eventos climáticos adversos. Esto repercute directamente en tareas que dependen de la

energía eléctrica, como la conservación de alimentos o el funcionamiento de bombas de agua (Ministerio de Industria, 2020).

1.2. Justificación

En resumen, se busca contribuir al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y accesibles, adaptadas a las necesidades específicas de comunidades remotas uruguayas.

La implementación de sistemas de generación fotovoltaicos y eólicos aislados posibilita una mejora significativa en la calidad de vida de los habitantes y en la sostenibilidad ambiental de estas regiones.

1.3. Estructura del trabajo

La estructura de trabajo va a estar centrar fundamentalmente en la descripción de los dos sistemas más comúnmente utilizados hoy en día, en la transformación de la Energía Solar y Energía Eólica en Energía Eléctrica.

Se propondrá, por tanto, en una primera parte, la descripción de la Energía Fotovoltaica y su evolución histórica, así como una descripción de la característica de esta tecnología en la actualidad.

Se describirá de una forma exhaustiva y técnica los componentes electrónicos que puedan llegar a ser parte de este proyecto dada su validación, como son los Paneles Solares, Inversores, Protecciones eléctricas, baterías, etc.

A continuación, en una segunda parte se hará lo propio también con la Energía Eólica y la importancia que llevo a tener esta tecnología en la actualidad.

En una tercera instancia, estará destinado a describir las diferentes cargas que serán usadas en la casa, así como sus características particulares y se aportara también el plano técnico de las líneas eléctricas las cuáles serán las encargadas de mantener el correcto funcionamiento de las instalaciones.

Para finalizar, se presentará una descripción de la tecnología híbrida seleccionada para este proyecto basado en las descripciones de cada una de las tecnologías anteriormente presentadas y los respectivos resultados finales.

2. Contexto y estado del arte

Este capítulo desarrolla los fundamentos de la conversión fotovoltaica y eólica, detallando el funcionamiento de los componentes que conforman cada sistema como son: las celdas solares, Inversores, reguladores de carga, estructura de unión PN, magnitudes eléctricas involucradas en un sistema fotovoltaico, etc y también los distintos tipos de aerogeneradores existentes y sus componentes interno.

2.1. Energía solar

La energía solar es una fuente renovable, inagotable y ambientalmente sostenible, con amplia disponibilidad geográfica. Su conversión directa en energía eléctrica se basa en el efecto fotovoltaico, fenómeno físico descubierto por Alexandre-Edmund Becquerel en 1839, que consiste en la generación de una corriente eléctrica cuando ciertos materiales semiconductores son expuestos a la radiación solar (Core.ac.uk, 2023).

Las celdas fotovoltaicas (FV) están construidas a partir de silicio cristalino dopado, formando una unión p-n que permite la separación de cargas inducida por la luz incidente. Esta estructura actúa como generador de corriente continua al recibir fotones cuya energía excede la banda prohibida del material (Alvarado Ladrón de Guevara, 2018).

El proceso de fabricación comienza con el corte de lingotes de silicio monocristalino (sc-Si) o policristalino (mc-Si) en obleas de aproximadamente 200 μm de espesor. Luego, se realiza el dopado superficial por difusión de impurezas (fósforo para la región tipo n, boro para el tipo p), seguido del depósito de los contactos metálicos frontal y posterior, y la aplicación de un recubrimiento antireflectante para maximizar la absorción fotónica (Alvarado Ladrón de Guevara, 2018).

Las celdas producidas industrialmente presentan formato cuadrado estándar de 150mm \times 150 mm, con parámetros eléctricos típicos de tensión en circuito abierto $V_{OC} \approx 600\text{mV}$, corriente de cortocircuito $I_{SC} \approx 8,4\text{ A}$, y potencia individual cercana a 4W en corriente continua, con una eficiencia de conversión entre 16 % y 17 % (Alvarado Ladrón de Guevara, 2018).

Para alcanzar niveles de potencia adecuados, las celdas se interconectan en serie formando módulos fotovoltaicos. Una configuración común agrupa 72 celdas por panel, obteniendo tensiones nominales próximas a 40V y potencias de hasta 300Wp, dependiendo de la tecnología empleada (Alvarado Ladrón de Guevara, 2018).

En sistemas convencionales, este proceso puede realizarse sin partes móviles y a temperatura ambiente, lo que convierte a la energía solar fotovoltaica en una solución tecnológica robusta, de bajo mantenimiento y alta eficiencia para la generación eléctrica.

2.2. Bases físicas de la conversión fotovoltaica

La conversión se basa en el efecto fotovoltaico, cuando la energía de los fotones incidentes $h\nu$ supera la banda prohibida E_g del material semiconductor, se generan pares electrón-hueco. En una celda de silicio cristalino, la unión p – n forma un campo interno que separa los portadores generados, desplazando los electrones hacia la región tipo n y los huecos hacia la región tipo p. como se representa a continuación en la Figura 1.

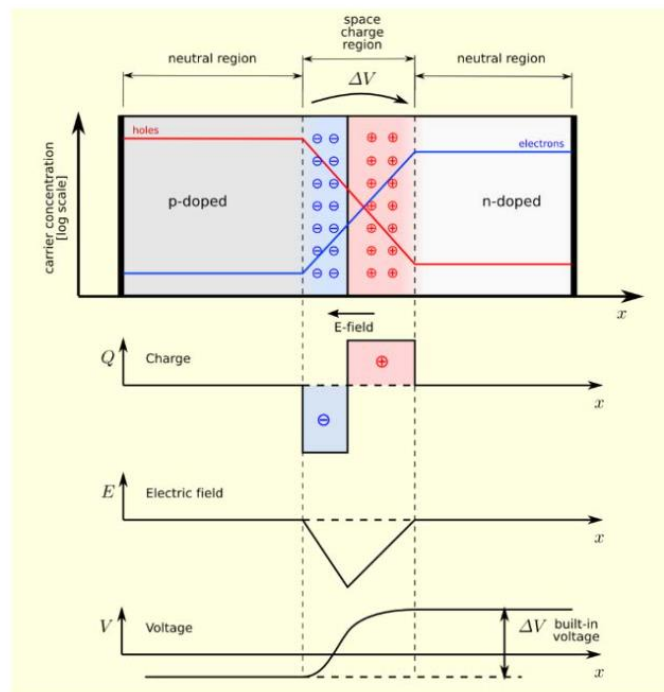


Figura 1: Formación de la zona de neutralización de cargas por difusión al juntar dos dopajes tipo P y N (extraído de (Core.ac.uk, 2023))

2.3. Condiciones ambientales

El rendimiento de un sistema fotovoltaico aislado está condicionado por variables ambientales que afectan la generación de energía a lo largo del tiempo. Entre las más relevantes se encuentran la irradiación solar, la temperatura ambiental, las horas sol pico (HSP), el ángulo de incidencia de la radiación y el efecto albedo del entorno.

2.3.1. Radiación solar

La radiación solar forma parte del espectro electromagnético emitido por el Sol.

Cada fotón transporta una carga de energía, medida en electrón-voltio.

Esta energía se caracteriza por su longitud de onda, frecuencia y forma de propagación hasta la superficie terrestre. La energía solar que llega a la estratosfera es mayor que la que alcanza la superficie terrestre; esto se debe a que parte de dicha radiación se atenúa al atravesar la atmósfera. La cantidad máxima de energía solar recibida por unidad de área en la atmósfera exterior, cuando los rayos del Sol inciden perpendicularmente, se denomina constante solar, y tiene un valor aproximado de 1367 W/m^2 (Merchan y Medina, 2022).

La radiación solar se puede dividir en:

Radiación Directa: Radiación que ingresa por la atmósfera y llega de forma directa a un punto de la superficie del receptor.

Radiación Difusa: Es aquella que, al ingresar por la atmósfera, se dispersa en distintas direcciones debido a la interacción con las moléculas de aire, nubes, partículas y otros obstáculos presentes en la atmósfera.

Radiación Reflejada: Es la fracción de la radiación solar recibida después de ser reflejada por una superficie (radiación de albedo). Esta puede incrementar levemente la radiación efectiva dependiendo del entorno de instalación.

Radiación Solar Total o Global: Es la suma de la energía solar directa, difusa y reflejada que alcanza al receptor.

A continuación, en la Figura 2 se presenta una imagen ilustrativa de los tipos de radiación.

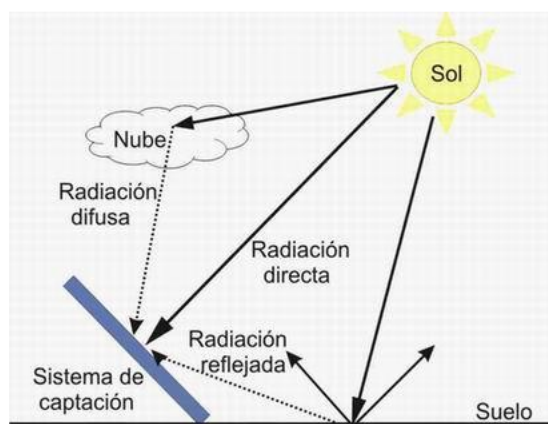


Figura 2: Tipos de radiación

Fuente: Extraído de (García, s.f.)

2.3.2. Irradiancia e irradiación

La Irradiancia afecta de forma directa la generación del panel fotovoltaico: a menor irradiancia, menor es la energía generada. En la Figura 3 (a) y (b) se observa cómo varían tanto la curva I_V (corriente vs. tensión) como la curva P_V (potencia vs. tensión) en función del nivel de irradiancia.

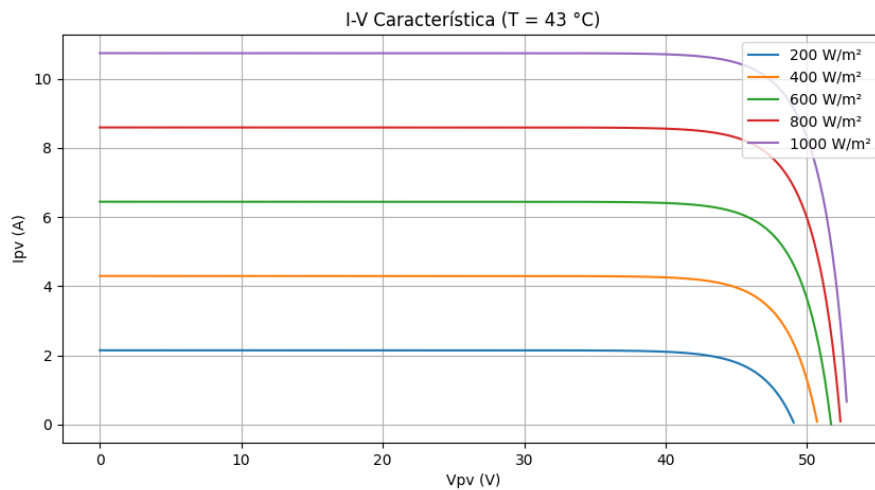


Figura 3: Curva I-V en función de la irradiancia (Temperatura = 43°).

Fuente: Elaborado por el autor.

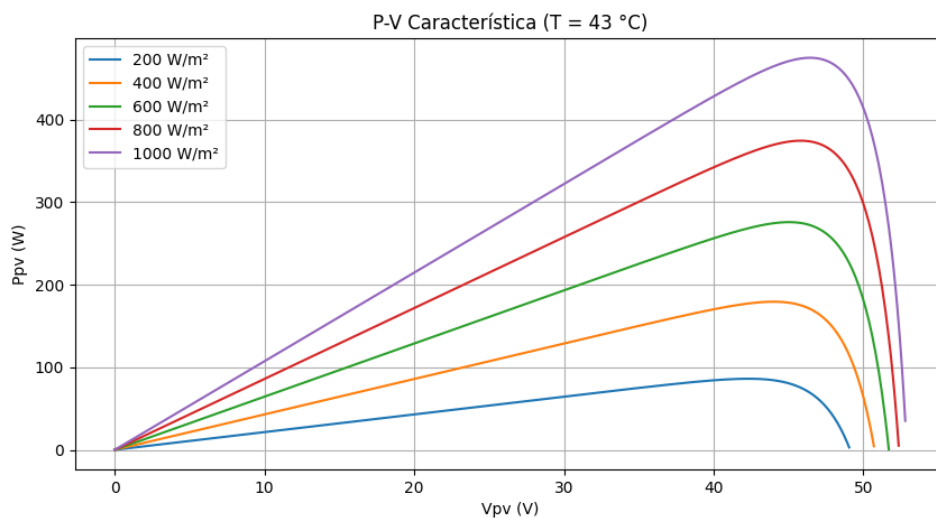


Figura 3: Curva P-V en función de la irradiancia (Temperatura = 43°)

Fuente: Elaborado por el autor.

Influencia de la latitud en la irradiancia:

La latitud es la distancia en grados de un punto en la superficie terrestre hasta el ecuador, esta varía de -90° a 90° del sur hasta el norte, donde 0° representa el ecuador. Cuanto menor sea el ángulo entre el plano tangente a la superficie de la tierra y el rayo solar, menor será la distancia que la radiación tendrá que recorrer y menores serán las pérdidas en la atmósfera; por lo tanto, cuanto más próximo geográficamente la región se encuentra de la latitud 0° , mayor es el potencial solar de ella (Bamisile et al. 2025).

2.3.3. Atenuación atmosférica

La atmósfera es un medio semitransparente que modifica la magnitud y dirección de la radiación solar extraterrestre. Los principales fenómenos que alteran la radiación solar al pasar por la atmósfera son la absorción y dispersión.

La absorción se debe fundamentalmente al ozono (O_3) en la región espectral ultravioleta, y al vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) en la región del infrarrojo.

Por otro lado, las dispersiones se deben a la interacción de la radiación con moléculas de aire, vapor y partículas de polvo. Todo esto provoca una atenuación en la radiación solar que alcanza la superficie terrestre (Bamisile et al. 2025).

2.3.4. Espectro solar

El espectro solar es la distribución de la radiación solar en función de la longitud de onda o la frecuencia. Esta radiación se extiende desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR), pasando por el espectro visible (VIS) (Amazings,2024).

Infrarrojo (IR): Los rayos infrarrojos, que proporcionan calor, representan aproximadamente el 50% de la radiación solar que llega a la superficie terrestre.

Ultravioleta (UV): Los rayos ultravioletas constituyen cerca del 10% de las emisiones solares. A su vez, se subdividen en tres tipos:

- . **UVA:** Son los que atraviesan fácilmente la atmósfera y alcanzan toda la superficie terrestre.
- . **UVB:** Poseen una longitud de onda menor que los UVA, lo que dificulta su paso por la atmósfera. Llegan con mayor intensidad a las regiones ecuatoriales y en menor medida a latitudes elevadas.
- . **UVC:** Tienen la longitud de onda más corta y no logran atravesar la atmósfera, ya que son absorbidos por la capa de ozono. Son altamente perjudiciales para los seres vivos.

Visible (VIS): Corresponde a la porción del espectro que puede ser percibida por el ojo humano, representando aproximadamente el 40% de la radiación solar que llega a la Tierra y siendo la responsable de proporcionar luz.

Seguidamente, en la Figura 4 se muestra gráficamente la correspondencia de estos espectros conforme a su longitud de onda.

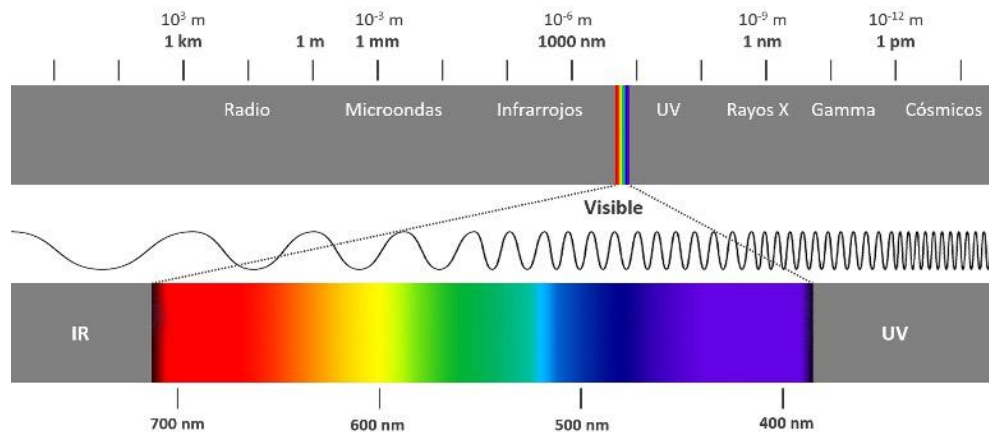


Figura 4: Espectro de la radiación solar

Fuente: Extraído de (Blog de Ingeniería Industrial,2023)

2.3.5. Tiempo de insolación y Horas Sol Pico

La insolación o tiempo de insolación se define como la cantidad de radiación solar total recibida por una superficie terrestre en un período determinado.

Este concepto hace referencia a la presencia del sol sobre el horizonte, ya que es entonces cuando se alcanzan los valores máximos de irradiancia. Su medida se expresa en horas de sol por día (Diversidad Climática: Elementos del Clima, s.f.).

Por otro lado, las Horas Sol Pico (HSP) representan el número de horas diarias equivalentes a una irradiancia constante de 1000 W/m^2 . Este valor se utiliza comúnmente para estimar la generación de energía por unidad de potencia pico instalada (Universidad Técnica de Cotopaxi, 2024).

2.3.6. Movimiento aparente del sol

Se define como movimiento aparente del sol a la trayectoria que parece describir el sol en el cielo a lo largo del día y del año. Este movimiento es producto de los movimientos de rotación y traslación de la Tierra. Aunque el sol no se mueve alrededor de la Tierra, desde la perspectiva de un observador en la superficie terrestre, se percibe que realiza un recorrido diario de este

a oeste. Una de las variables que influye en este movimiento es la declinación solar (δ), la cual varía diariamente debido a la inclinación del eje terrestre y su órbita alrededor del Sol. Esta variable representa la posición del Sol con respecto al ecuador celeste (Gujarro et al. s.f.).

En la siguiente Figura 5 se aprecia este fenómeno.

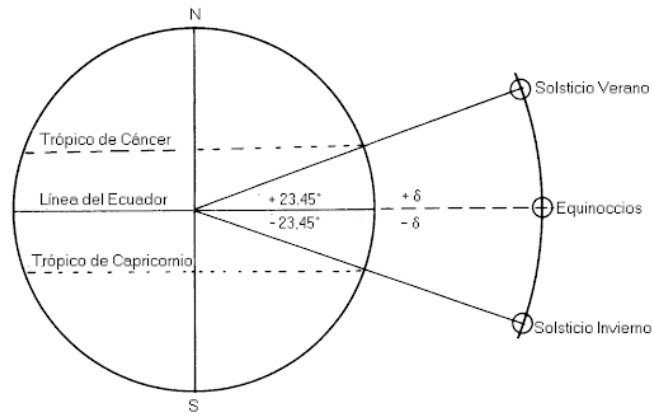


Figura 5: Declinación solar

Fuente: Extraído de (Gujarro et al. s.f.)

Por tanto, se puede construir una gráfica solar que muestre las distintas trayectorias solares en diferentes días del año (Gujarro et al. s.f.).

Se presenta en la Figura 6 una gráfica solar del punto de instalación con la finalidad de demostrar el movimiento solar aparente del Sol.

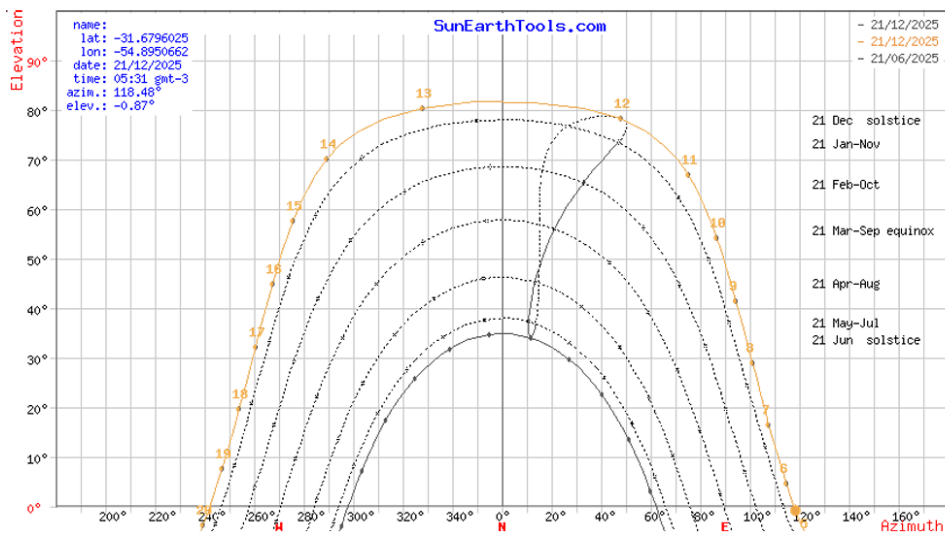


Figura 6: Carta solar

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la estimación de dicho movimiento se parte por determinar la declinación solar:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ \cdot (284 + n)}{365}\right)$$

Siendo δ la declinación solar en grados y n el día juliano en el cual se está calculando la declinación.

2.3.7. Orientación del panel

- **Acimut del panel α :** Es el ángulo entre la proyección de la normal a la superficie en el plano horizontal y la dirección norte-sur. Para sistemas montados en el hemisferio sur, los paneles suelen orientarse directamente hacia el norte (0°). En algunos casos, suelen utilizarse variaciones de más o menos 10 grados debido a la existencia de objetos que interfieran o generen sombreado sobre el panel (Fiallos Chamorro, 2020).
- **Ángulo de inclinación del panel β :** Es el ángulo formado entre el plano del panel y la horizontal (Fiallos Chamorro, 2020). Para sistemas con ajuste estacional, este ángulo está dado por la ecuación:

$$\beta = \phi - \delta$$

Donde ϕ es la latitud sin signo del punto de instalación. Sin embargo, para sistemas fijos se suele tomar solamente el valor de ϕ para la inclinación, ya que se estaría orientando el sistema en base a los equinoccios, es decir, cuando $\delta = 0^\circ$. En Uruguay, las inclinaciones recomendadas en estos casos oscilan entre 31° y 35° , lo cual corresponde directamente a la latitud de la ubicación de instalación (Cotelo, 2022).

En el caso de utilizarse un sistema con seguidor solar, no sería relevante el cálculo de estos ángulos, debido a que el propio seguidor buscaría la orientación óptima en todo momento.

A continuación, en la Figura 7 se muestra una imagen ilustrativa de los ángulos de la orientación del panel.

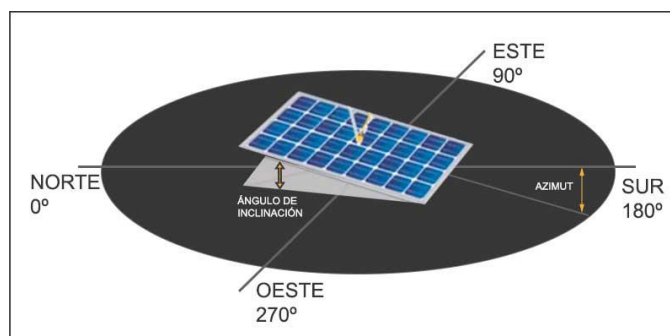


Figura 7: Angulo de azimut y ángulo de orientación

Fuente: Extraído de (Autoconsumo Web, s.f.)

2.3.8. Altura solar h

Se conoce como altura solar al ángulo formado por los rayos solares dirigidos al centro de la bóveda celeste y el plano horizontal. Es medido a partir del plano del horizonte hacia el zenit, de 0° a 90°. A su vez, este ángulo es el complemento del ángulo cenital, el cual es medido a partir del zenit (Electricidad, 2021).

La influencia aislada de la altura solar sobre el ángulo de incidencia está dada por la ecuación a continuación, representada.

$$\theta_h = (h - 90^\circ) - \beta$$

En la Figura 8 se puede apreciar una representación de este ángulo.

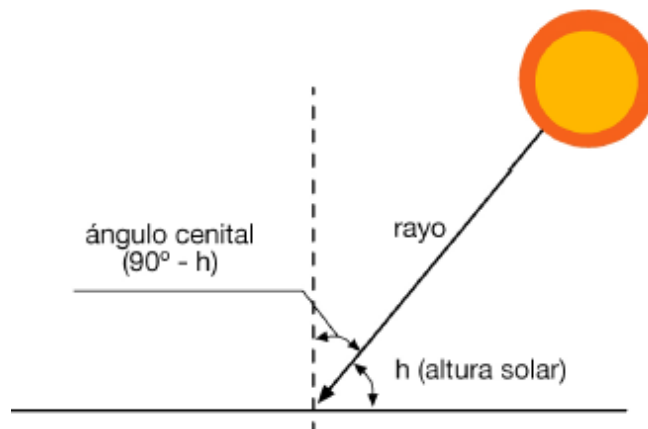


Figura 8: Altura solar

Fuente: Extraído de (Electricidad, 2021)

2.3.9. Ángulo acimutal

Es el ángulo que se forma entre el sol y el norte, medido en sentido horario alrededor del horizonte del observador. El ángulo de acimut corresponde a la dirección de donde proviene la luz solar. Este varía durante todo el día dependiendo también de la latitud y la época del año (Electricidad, 2021).

El ángulo de acimut resultante con respecto al panel se calcula mediante la ecuación a continuación, representada.

$$\theta_{\alpha} = (\gamma_s - \alpha)$$

donde:

γ_s (Acimut solar) - Es el ángulo medido en el plano horizontal que indica la dirección desde la cual llegan los rayos solares, normalmente referido al norte geográfico.

α (Acimut del panel) - Es la orientación horizontal del módulo fotovoltaico con respecto al norte geográfico.

A continuación, en la Figura 9 se muestra una apreciación visual de este ángulo.

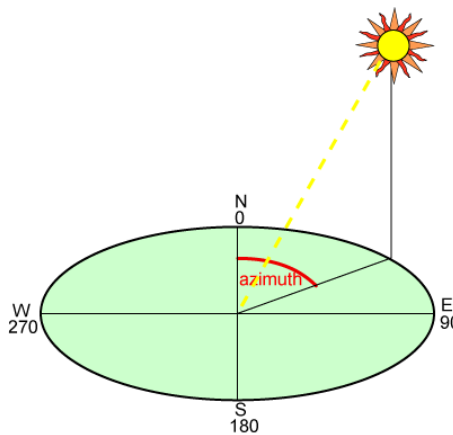


Figura 9: Angulo acimut

Fuente: Extraído de (Electricidad, 2021)

2.3.10. Ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia se define como el ángulo formado entre la radiación solar entrante y una línea perpendicular a la superficie de un panel solar. Este parámetro desempeña un papel crucial en la determinación de la cantidad de energía que puede ser absorbida por el módulo fotovoltaico. Cuanto menor sea dicho ángulo, menores serán las pérdidas por reflexión, lo que se traduce en una mayor captación de energía por parte del panel (Redway Battery, s.f.).

En la Figura 10 se aprecian las variables que influyen en el ángulo de incidencia.

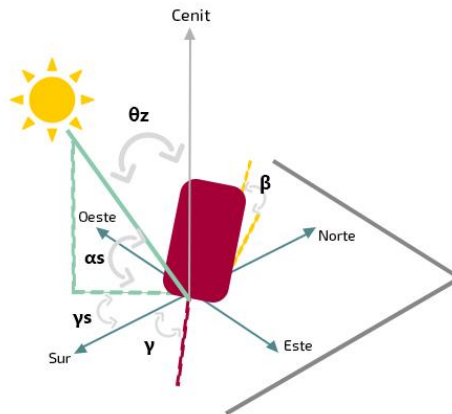


Figura 10: Ángulo de incidencia

Fuente: Extraído de (Krannich Solar México, 2025)

2.3.11. Temperatura de la celda

La eficiencia en la conversión disminuye con el aumento de temperatura debido a la caída de VOC. El coeficiente térmico típico es de $-0,45\%/K$, lo que implica una reducción del punto de máxima potencia por cada grado por encima de los $25^{\circ}C$ aprox. (varía según fabricante). Por ello, se recomienda la ventilación de los módulos y considerar las temperaturas nominales de operación (NOCT) (Aoun et al. 2022).

Para calcular la temperatura de la celda se utiliza la ecuación a continuación, representada.

$$T_c = T_{amb} + (T_{onc} - 20^{\circ}C) \times \frac{E}{800} \times \frac{9.5}{5.7 + 3.8 \times v_{vent}} \times \left(1 - \frac{Ep, fabricante}{\tau \times \alpha}\right)$$

<donde:

- T_c = Temperatura de la celda ($^{\circ}C$)
- T_{amb} = Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
- T_{onc} = Temperatura nominal de operación del panel ($^{\circ}C$)
- E = Irradiación solar (W/m^2)
- v_{vent} = Velocidad del viento (m/s)
- Ep Fabricante = Eficiencia del panel otorgada por el fabricante
- τ = Transmitancia solar del vidrio del panel
- α = Absorbancia solar del módulo

2.3.12. Suciedad en los módulos

La acumulación de suciedad en la superficie de los módulos fotovoltaicos es un factor que afecta directamente su capacidad de captación de energía. Este fenómeno es particularmente relevante en regiones con alta concentración de polvo o en zonas áridas, donde las precipitaciones son escasas y, por tanto, menos eficaces para limpiar de forma natural los paneles. En ausencia de un mantenimiento periódico, las pérdidas asociadas a la suciedad pueden oscilar entre un 5% y un 15% de la generación energética (Core.ac.uk, 2023).

A continuación, en la Figura 11 se puede apreciar gráficamente la magnitud de estas pérdidas.

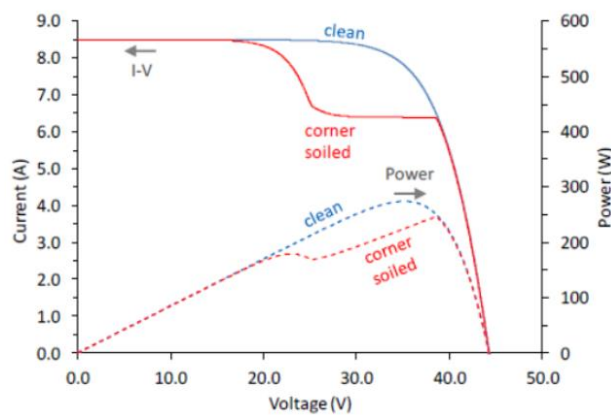


Figura 11: Efecto de la suciedad en módulos FV

Fuente: Extraído de (Core.ac.uk, 2023)

2.4. Componentes

Un sistema fotovoltaico autónomo se compone de un conjunto de dispositivos que trabajan en conjunto para captar la energía solar, convertirla en electricidad, almacenarla y finalmente suministrarla a una carga. A continuación, se detallan los principales elementos que lo conforman.

2.4.1. Módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico consiste en la conexión eléctrica de celdas fotovoltaicas en serie-paralelo hasta obtener los valores de corriente y tensión deseados.

Este conjunto es encapsulado con la finalidad de brindarle protección ante agentes atmosféricos; a su vez, este encapsulamiento le brinda rigidez mecánica y aislamiento eléctrico con respecto al exterior (Vizcaya Romero, 2020).

Existen diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales, métodos y forma de fabricación.

A continuación, se describen las tecnologías más comunes:

- Silicio puro monocristalino: Se basa en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. Las pruebas de este material alcanzan un rendimiento máximo del 24.7% en laboratorio, presentando éste el rendimiento más alto. Sin embargo, su precio es elevado, además de que presenta una gran reducción en el rendimiento a altas temperaturas.

A continuación, en la Figura 12 se aprecia una celda de silicio monocristalino



Figura 12: Celda de silicio monocristalino

Fuente: Extraído de (Dexen, s.f.)

- Silicio puro policristalino: Los materiales son semejantes a los del monocristalino, pero este se diferencia en que varía el proceso de cristalización del silicio. Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Con ellos se obtiene un rendimiento en laboratorio del 19.8 %. Este tipo de módulos, si bien ofrece un rendimiento más bajo, destaca por tener un precio significativamente menor y por funcionar mejor a altas temperaturas en relación al monocristalino.

A continuación, se puede apreciar una celda de silicio policristalino en la Figura 13.



Figura 13: Celda de silicio policristalino

Fuente: Extraído de (Tesla Energy, s.f.)

- Silicio amorfo (TFS): Basados también en el silicio, pero se diferencian en que el material no sigue una estructura cristalina. Este tipo de paneles son empleados principalmente en pequeños dispositivos electrónicos debido a que son capaces de generar energía con una menor irradiación. Aunque su rendimiento máximo en laboratorio alcanza apenas el 13 %, por eso y por tener una corta vida útil no suele ser utilizado en instalaciones de mayor escala.

A continuación, se puede apreciar una celda de silicio amorfo en la Figura 14.



Figura 14: Celda de silicio amorfo

Fuente: Extraído de (Tesla Energy, s.f.)

2.4.2. Regulador de carga

El regulador o controlador de carga es un convertidor de potencia que gestiona la energía producida por los módulos FV. Este componente es el encargado de evitar la sobrecarga

y/o sobredescarga de las baterías, lo cual incrementa la vida útil de estas (Ministerio de Energía de Chile, 2020).

Estos dispositivos se dividen en 2 categorías:

- **Reguladores PWM:** Este tipo de reguladores utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation) para transferir la energía generada por el panel a las baterías. La transmisión de la corriente decrece a medida que se recargan las baterías, mientras que el voltaje varía a medida que se detecta la recarga de la batería. Este proceso se realiza mediante una propiedad de la modulación a la que se denomina "duty cycle"(ciclo de trabajo), en donde la señal cuadrada varía su ciclo útil. Es decir, si el ciclo de trabajo de la señal PWM está al 50 %, se está transfiriendo la mitad del voltaje producido por el panel; si está al 25 %, se está entregando 1/4 del voltaje suministrado por el panel. En la Figura 15 se puede apreciar cómo funciona una señal PWM.

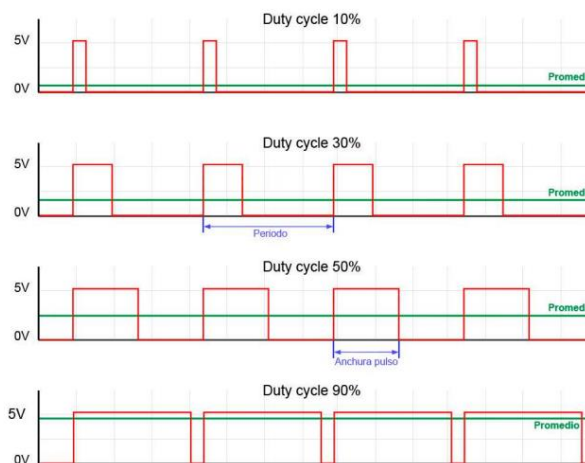


Figura 15: Ejemplo de funcionamiento del Ciclo útil de una señal PWM

Fuente: Extraído de (Betancur, 2016)

Este tipo de reguladores posee la limitación de que el voltaje nominal de la batería y del panel deben ser relativamente cercanos entre sí y su eficiencia se encuentra en el entorno de entre el 65% y 80 % (Betancur, 2016).

- **Reguladores MPPT:** (Maximum Power Point Tracking) Este regulador se podría considerar una variación de un regulador PWM, diferenciándose en la integración de

un convertor buck, el cual se encarga de reducir el voltaje (DC) generado por los paneles, al voltaje (DC) requerido por las baterías.

Este tipo de reguladores es actualmente el más eficiente (90% a 95% de eficiencia) y versátil. Su versatilidad se basa en que, gracias al convertor buck, ya no es estrictamente necesario que el voltaje de las baterías y los paneles sean cercanos. Su mayor eficiencia se debe a que está continuamente ajustándose al punto de máxima potencia del módulo fotovoltaico.

El punto de máxima potencia (MPP) es el máximo valor obtenido del producto entre voltaje y corriente generados por el módulo FV.

En la Figura 16 que a continuación se presenta, se puede apreciar una representación de ese punto.

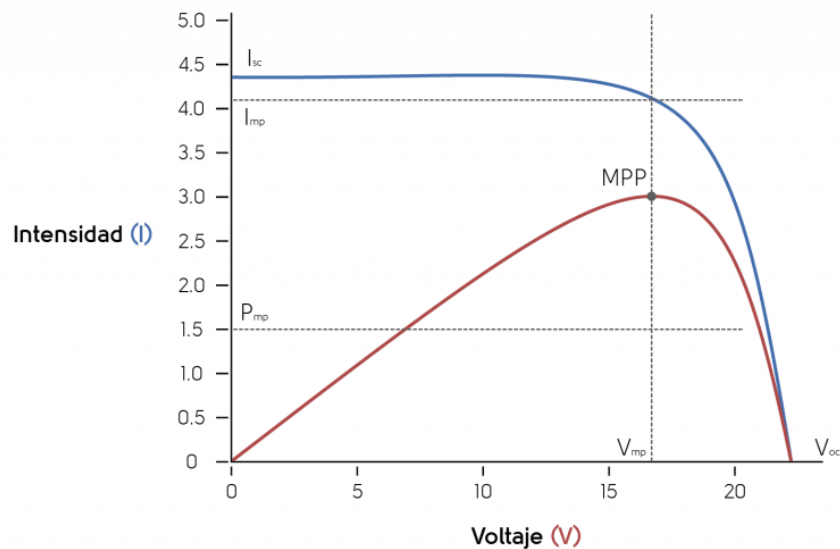


Figura 16: Identificación de MPP en un generador fotovoltaico

Fuente: Extraído de (SACLIMA Solar Fotovoltaica, 2024)

La ubicación del punto de máxima potencia suele variar a lo largo del día según diversos factores ambientales, como pueden ser la intensidad de la radiación solar, la temperatura y las sombras parciales. Debido a esto, es necesario estar monitoreando constantemente el MPP para optimizar la eficiencia del sistema.

Asimismo, cabe mencionar que muchos inversores que hoy se comercializan en el mercado ya traen incorporada esta funcionalidad, lo que contribuye a una fácil implementación en el sistema fotovoltaico.

2.4.3. Baterías

La generación de energía eléctrica mediante módulos fotovoltaicos es intermitente y depende de condiciones ambientales como son la irradiación solar, la temperatura y la nubosidad.

Estas variaciones hacen necesario el uso de un sistema de almacenamiento que permita garantizar el suministro energético durante los períodos en los que los paneles no generen la energía requerida. Esta función es desempeñada por los bancos de baterías o acumuladores (Universidad de Investigación y Desarrollo (UDI), 2020).

Las baterías son dispositivos electroquímicos que almacenan energía en forma química y la liberan como energía eléctrica cuando es necesario.

En los sistemas fotovoltaicos, las baterías se recargan a través del regulador de carga utilizando la energía generada por los paneles solares, permitiendo así suministrar energía de forma continua incluso en ausencia de radiación solar.

Además de su función de almacenamiento, las baterías cumplen un rol esencial en la estabilidad del sistema. Sus funciones principales son: almacenar energía durante determinados períodos, proporcionar potencia instantánea ante demandas súbitas y estabilizar la tensión de operación de la instalación.

Uno de los principales parámetros a tener en cuenta para la elección de las baterías es la capacidad de descarga. Esta se define como la cantidad de energía que puede liberarse en una descarga completa del acumulador partiendo de un estado de carga total. La misma se mide en amperios por hora (Ah), y se calcula como producto de intensidad de descarga durante el tiempo en el que está actuando, como muestra la siguiente fórmula:

$$C = t \cdot I$$

Además de esto, también se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

Eficiencia de carga: Es la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía que realmente es almacenada. Para este parámetro se busca estar lo más próximo

posible al 100 %, cuanto más lejano se encuentre esta eficiencia del 100 %, aumenta la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para garantizar una carga completa de las baterías.

Autodescarga: Proceso mediante el cual el acumulador tiende a descargarse al no estar en uso.

Profundidad de descarga: Es la cantidad de energía, medida en porcentaje, que se extrae de un acumulador en relación con su capacidad total. Una mayor profundidad de descarga, como el 80% de su capacidad nominal, reducirá la vida útil de la batería más rápidamente en comparación con una profundidad de descarga menor, como el 20 %.

La Figura 17 muestra la relación entre la profundidad de descarga y el número de ciclos, evidenciando el impacto en la vida útil.

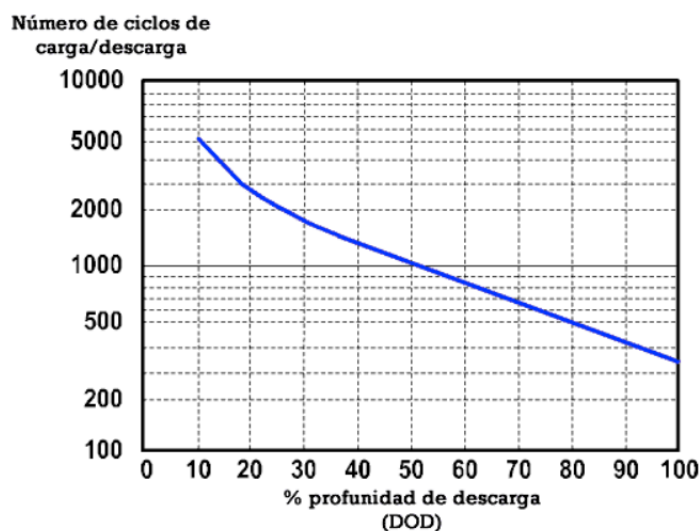


Figura 17: Grafico Ciclos/profundidad de baterías estacionarias

Fuente: Extraído de (SFE Solar, s.f).

Las baterías pueden ser clasificadas teniendo en cuenta la tecnología con la que están fabricadas:

Baterías de plomo ácido abierto: Estas contienen compartimentos separados conectados en serie, los cuales están sumergidos en ácido sulfúrico. Las placas que componen la batería contienen electrodos polarizados positiva y negativamente que se alternan dentro

de la batería. Estas suelen ser utilizadas en instalaciones aisladas gracias al gran rendimiento que poseen en relación a su bajo coste. Su eficiencia de carga se encuentra alrededor del 85 %.

Baterías AGM: (Absorption Glass Mat) es una tecnología que permite a las placas de plomo de la batería absorber más rápido y mejor el ácido. Una de las principales características que poseen es no necesitar mantenimiento gracias a su diseño sellado. Son capaces de soportar un gran número de ciclos por más que sean sometidas a ciclos de descarga profunda, además de contar con una considerable intensidad de arranque en frío. Su eficiencia de carga oscila entre el 90% y 95 %.

Baterías de GEL: estas contienen electrolito gelificado y, al estar selladas, no desprenden gases nocivos por lo que podrían instalarse en locales con poca ventilación. Pueden alcanzar hasta 800 ciclos de descarga profunda, lo cual es una gran durabilidad y, al igual que las AGM, no requieren mantenimiento. Es recomendada para medianas y pequeñas instalaciones. Su eficiencia de carga se encuentra en el 90 %.

Baterías de litio: estas ofrecen la ventaja de poder cargarse más rápidamente que las anteriores, ofrecer mayor densidad energética y contar con una mayor vida útil. Al no poseer efecto de memoria, son capaces de descargarse al 100% sin que la batería sufra daños. Además de esto, no requieren mantenimiento, son más ligeras, otorgan mayor autonomía, no emiten gases y su eficiencia ronda el 99 %. Suelen ser una opción considerable (SFE Solar, s.f).

2.4.4. Inversor

El inversor es un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) que suministran los módulos solares o las baterías a corriente alterna (CA). En este caso, el enfoque se centra en inversores Off-Grid (Gala García, 2022). Estos se pueden clasificar según el tipo de onda que generan:

Inversor de onda senoidal pura: se distingue por generar una corriente prácticamente idéntica a la que se utiliza en la red eléctrica. Este tipo de inversor produce una señal de frecuencia y tensión con un alto grado de precisión y exactitud. En muchos casos, la calidad de la onda generada es incluso más estable y limpia que la de la red eléctrica convencional. Este tipo de inversores son aptos para cualquier aparato eléctrico que funcione en

corriente alterna con la tensión de salida de dicho inversor. Sin embargo, la desventaja de este equipo es el elevado coste en comparación con otros tipos de inversores.

Inversor de onda senoidal modificada: representa una opción intermedia entre los inversores de onda sinusoidal pura y los de onda cuadrada. La forma de la onda generada se basa en la onda cuadrada, pero se ajusta mediante conmutadores electrónicos para modificar los pulsos y aproximarse lo más posible a una onda sinusoidal pura. Este tipo de inversores es adecuado para equipos que no contienen motores o para dispositivos electrónicos simples que no requieren un suministro de energía altamente preciso. Además, ofrecen una ventaja significativa en términos de costo, ya que su precio es considerablemente menor en comparación con los inversores de onda pura.

Inversor de onda cuadrada: Este tipo de inversor se utiliza principalmente para aplicaciones de iluminación o en dispositivos que operan mediante rectificadores. La forma de onda cuadrada, con su cambio brusco y características simples, puede ser adecuada para estos casos, ya que los rectificadores pueden convertir la corriente alterna en corriente continua, atenuando las irregularidades en la forma de onda y permitiendo el funcionamiento de estos dispositivos. Además de esto, los inversores de onda cuadrada suelen ser más económicos en comparación con otros tipos.

A continuación, se puede apreciar una comparación de estas 3 formas de onda en la Figura 18.

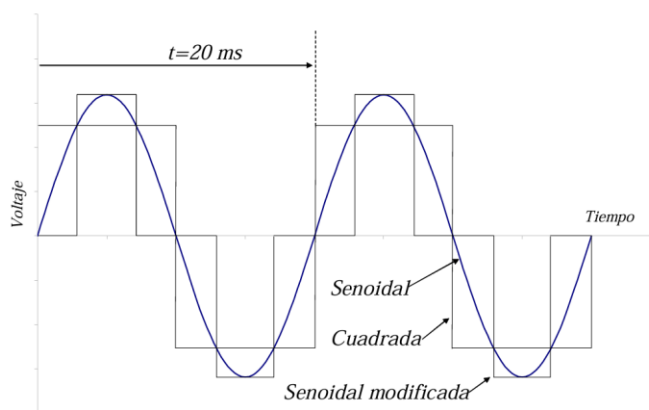


Figura 18: Tipos de señal en inversores

Fuente: Extraído de (Abella, s.f.)

Por otra parte, podemos clasificar por tipos de inversores según su funcionalidad, a continuación, se presenta en forma resumida dicha tipología:

1. **Inversores String (Cadena):**

Tecnología: Convierten la DC de una "cadena" de paneles en AC dominan el mercado residencial y comercial. Se usan comúnmente en instalaciones donde los paneles están expuestos a una radiación solar uniforme, ya que son rentables, fáciles de instalar y con un coste inicial más bajo.

Desventaja: es que, si un panel tiene un problema de sombra o mal funcionamiento, afecta el rendimiento de toda la cadena.

Tendencia: Incorporación de **Optimizadores de Potencia** (ej. Solar Edge) para mitigar el efecto de sombras o suciedad en paneles individuales.

2. **Microinversores:**

Tecnología: Son dispositivos que se instalan individualmente junto a cada panel solar para convertir la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) utilizable. A diferencia de los inversores de cadena, que conectan varios paneles en serie a un único inversor central, los Microinversores permiten que cada panel funcione de manera independiente.

Ventajas: Máxima optimización individual, seguridad (sistema en AC en el techo), y escalabilidad. Ideal para techos complejos con sombras variables. (Ej: Enphase).

3. **Inversores Centrales:**

Tecnología: Unidades de alta potencia $\gg 1$ MW, los inversores centrales son dispositivos de gran tamaño que convierten la corriente continua (CC) de múltiples paneles solares en corriente alterna (CA) para su uso en la red eléctrica. Se utilizan principalmente en instalaciones solares a gran escala, como parques solares o plantas solares fotovoltaicas, y gestionan la energía de varios "String" o cadenas de paneles a la vez desde un único punto.

Características: Alta eficiencia $>99\%$, conectividad para cumplir con códigos de red (grid-code) y gran robustez para operación industrial.

2.4.5. Sistema de montaje

Se entiende como sistema de montaje a la estructura o conjunto de estructuras y demás elementos mecánicos encargados de la fijación y orientación de los módulos fotovoltaicos (Martínez Velastegui y Mora Cotto, 2022).

Según la superficie de instalación, los sistemas pueden clasificarse en:

Montaje sobre cubierta: Es utilizado para montar paneles en techos de viviendas u otras edificaciones. Deben adaptarse según la inclinación y orientación de la cubierta.

Montaje en suelo: Empleado cuando se dispone de un espacio abierto, como terrenos rurales o demás áreas sin edificaciones. Este permite una mayor libertad a la hora de elegir la orientación e inclinación de los módulos.

Estructuras móviles o con seguidor solar: Es una variante de cualquiera de los anteriores con la diferencia de que ajustan el ángulo de inclinación y/o acimut en función del movimiento aparente del sol, brindando una mejor captación de la energía solar.

2.5 Aerogeneradores

Un aerogenerador eólico es una máquina motriz diseñada para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica, para posteriormente, mediante un generador eléctrico, en energía eléctrica. Su operación se fundamenta en los principios de la aerodinámica, la mecánica y la electro-electrónica.

2.4.6. Orígenes de los vientos

El viento tiene su origen en el calentamiento desigual de la superficie terrestre por la radiación solar. En las zonas ecuatoriales, el aire caliente asciende y es enfrentado por masas frías provenientes de los polos, originando una circulación general atmosférica. A su vez el movimiento de rotación terrestre modifica este patrón, generando vientos dominantes en regiones específicas.

A continuación, la Figura 19 representa de forma visual dichos movimientos.

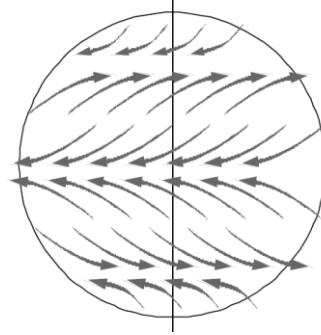


Figura 19: Circulación de la Atmósfera terrestre.

Fuente: Extraído de (Moragues & Rapallini, 2003).

Además de la circulación general, existen fenómenos locales como las brisas marinas (viento del mar a tierra durante el día) y viceversa en la noche y las brisas de montaña/valle, causadas por el calentamiento diferencial de las laderas.

La Figura 20 representa de forma visual dichos movimientos.

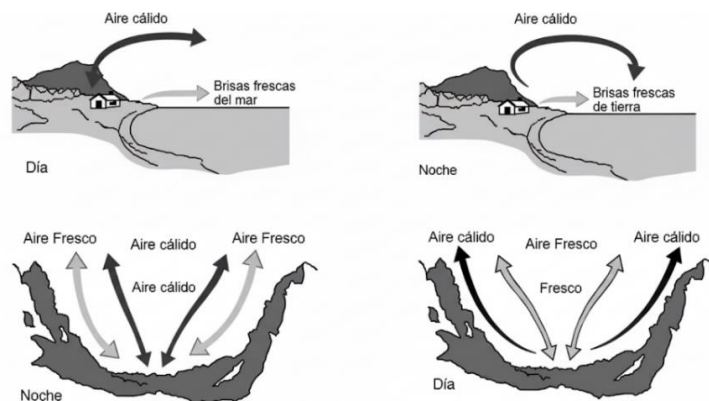


Figura 20: Circulación de Vientos locales.

Fuente: Generado por IA.

2.4.7. Evolución Histórica de la Energía Eólica

El uso del viento se remonta desde la antigüedad, cuando los egipcios empleaban velas para la navegación, ahora bien, los primeros molinos de eje vertical que se tienen registro

surgieron en el siglo VI d.C. en Seistán (Irán-Afganistán) (Kirby, R.S. 1990), estos molinos primitivos usaban esas velas verticales para moler grano o extraer agua de los arroyos con la que regar las cosechas. Estas máquinas comenzaron a utilizarse también en otros lugares como India o China, donde lo utilizaban además para triturar la caña de azúcar recolectada. A continuación, se muestra en la Figura 21 el tipo de estos molinos precursores.

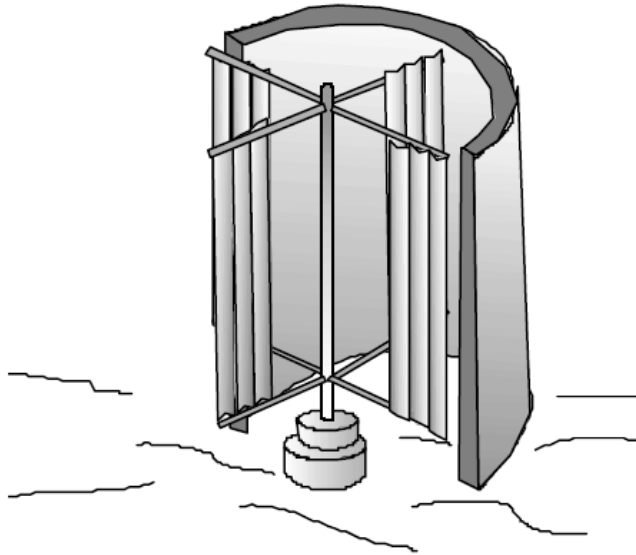


Figura 21: Molinos verticales.

Fuente: Extraído de (Moragues & Rapallini, 2003).

Posteriormente, en el siglo X en Grecia y sus islas aledañas, se desarrollaron los **molinos de eje horizontal** con velas triangulares, la Figura 22 muestra una representación visual de este tipo de molinos.

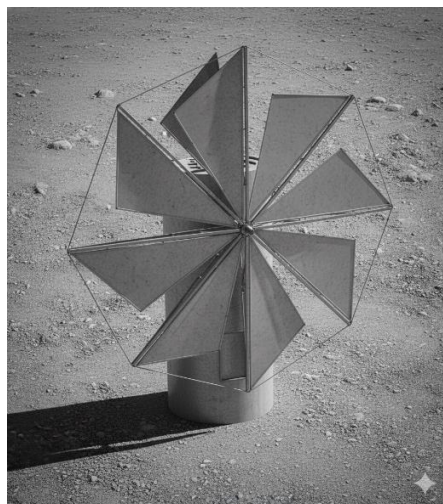


Figura 22: Molinos verticales con velas triangulares.

Fuente: Generado por IA.

Durante los siglos XIV–XIX, los **molinos holandeses** dominaron el paisaje europeo, alcanzando potencias de hasta **65 kW**, la Figura 23 muestra una representación visual de este tipo de molinos.



Figura 23: Molinos Holandeses del siglo XIV-XIX.

Fuente: Generado por IA.

El interés moderno resurgió tras las crisis petroleras de los años 70, consolidando ahora si a las turbinas eólicas, gracias a sus mejoras en aerodinámica, materiales compuestos y control electrónico que fortalecieron las bases de los aerogeneradores eólicos actuales y reafirmo a estas como una fuente competitiva y limpia de generación eléctrica.

2.4.8. Principio de operación de los aerogeneradores eólicos

Las máquinas eólicas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. Su principio aerodinámico se basa en la diferencia de presiones generada en torno al perfil de la pala. Según este principio, el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de una placa o perfil inclinado genera una diferencia de presiones entre ambas caras, dando origen a una **fuerza resultante** (R) que actúa sobre el perfil.

Descomponiendo esta **fuerza resultante** (R) en dos direcciones se obtiene:

a) La **fuerza de sustentación** (S), de dirección perpendicular al viento (eje y)

b) La **fuerza de arrastre (A)**, de dirección paralela al viento (eje x).

La Figura 24 que se presenta a continuación muestran las fuerzas que actúan sobre la pala.

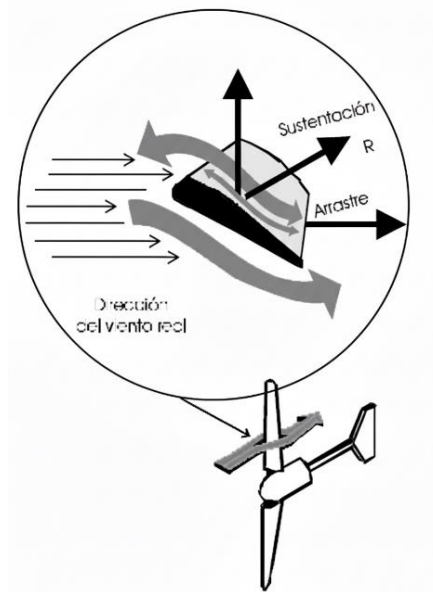


Figura 24: Fuerzas de sustentación, arrastre y resultante.

Fuente: Generado por IA.

Para favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las palas y evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones, se construyen perfiles de pala con formas convenientes desde el punto de vista aerodinámico, hoy día, todas las máquinas modernas priorizan la fuerza dominante de sustentación, pues permite obtener, con menor peso y costo, mayores potencias por unidad (Moragues & Rapallini, 2003).

Como la fuerza de sustentación es la única que dará origen al par, habrá que diseñar el perfil y ubicar las palas dándole un ángulo de ataque (α) que haga máxima la relación fuerza de sustentación/fuerza de arrastre de área del rotor.

La Figura 25 que se presenta a continuación muestran el plano de rotación de las palas y el sentido de rotación de las mismas.

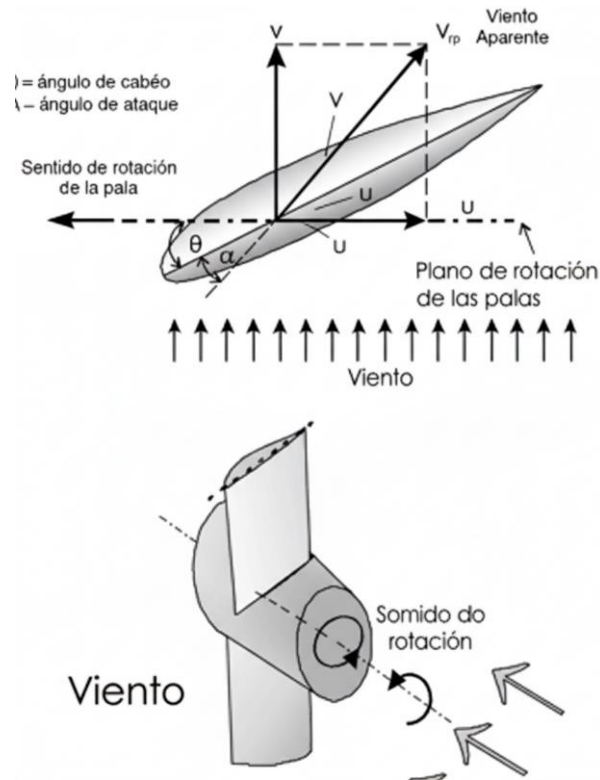


Figura 25: Plano y sentido de rotación de las palas.

Fuente: Generado por IA.

2.4.9. Tipos de máquinas eólicas

Se está acostumbrado a clasificar las máquinas eólicas según la posición del eje de rotación con respecto a la dirección del viento, pudiéndolos dividirse entonces en dos categorías principalmente:

- **Aerogeneradores de eje vertical**- Máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es perpendicular a la superficie terrestre y a la dirección del viento.
- **Aerogeneradores de eje horizontal**- Máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

La Figura 26 nos presenta ambos tipos vertical y horizontal:



Figura 26:Aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical.

Fuente: Generado por IA.

Aerogeneradores de Eje Vertical

La característica de los Aerogeneradores de eje vertical es que no requieren de un sistema de orientación, ventaja nada despreciable pues evita los mecanismos de direccionamiento y minimizan los esfuerzos a que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del viento. Por su disposición permite colocar los sistemas de conversión prácticamente a nivel de suelo, evitando pesadas cargas en las torres, como ocurre en los de eje horizontal.

Existen dos diseños básicos de rotores de eje vertical: **Savonius y Darrieus**.

El rotor Savonius trabaja esencialmente por arrastre, tiene un alto par de arranque, pero su eficiencia es pobre. Por su sencillez y bajo costo es fácil de construir con técnicas artesanales y se los emplea en aplicaciones que requieren potencias pequeñas como es el caso de los extractores de aire en grandes edificios industriales o depósitos y en bombeo de agua.

La Figura 27 nos presenta el tipo Savonius:



Figura 27: Aerogenerador tipo Savonius

Fuente: Generado por IA.

Los rotores Darrieus, inventados por G.J.M. Darrieus en Francia en la década del 20 (Moragues & Rapallini, 2003), son actualmente los principales competidores de los de eje horizontal de palas aerodinámicas para la generación de electricidad. Las fuerzas dominantes son las de sustentación, tienen un par de arranque prácticamente nulo y entregan potencias altas por unidad de peso. El diseño original de palas curvadas ha dado origen a innumerables configuraciones, tratando estas de mejorar algunas características funcionales y constructivas.

La Figura 28 nos presenta el tipo Darrieus:



Figura 28: Aerogenerador tipo Savonius

Fuente: Generado por IA.

A continuación, la Tabla 1 describe las características técnicas de ambos aerogeneradores de eje vertical:

Eje	Tipo de Rotor	Rendimiento Máximo	Características Técnicas
VERTICAL	Savonius	0,30	–0-1,5 kW –No requiere ser orientado –Alto par de arranque –Bajas velocidades –2 a 4 palas
	Darrieus	0,35	–5-500 kW –No requiere ser orientado –Altas velocidades –Buen rendimiento –2 a 3 palas

Tabla 1: Características de aerogeneradores verticales.

Fuente: Extraído de (Moragues & Rapallini, 2003).

Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal, son aquellos cuya característica principal, es que el eje se encuentra paralelo a la superficie del terreno, se suelen instalar en una superficie nivelada mediante una cimentación que funciona de base y permite mantener en forma vertical la torre del mismo. Esta cimentación debe absorber las tensiones que se ejercen sobre la torre, debido a los movimientos producidos por las palas y transmitirlos al terreno. En esta base es común encontrar, por dentro de la torre, una unidad de transformador y convertidor encargada de conectar la energía generada por el aerogenerador a la red eléctrica.

A continuación, la Figura 29 nos presenta un aerogenerador horizontal y sus componentes internos:

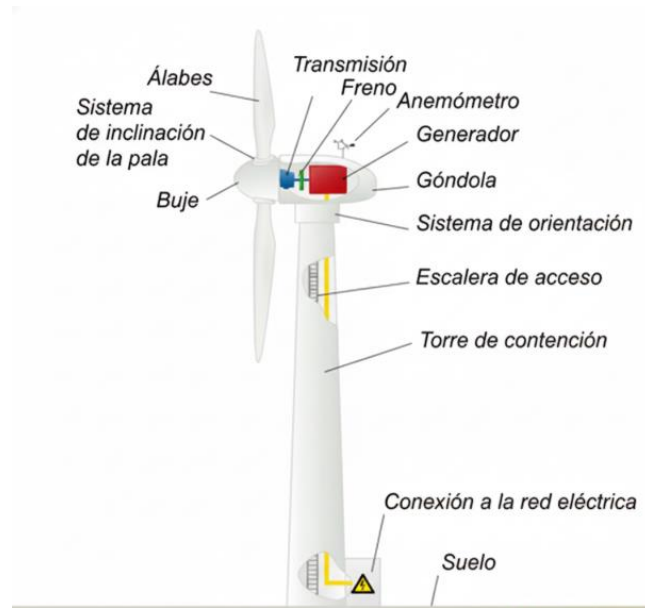


Figura 29: Aerogenerador de Eje Horizontal

Fuente: Generado por IA.

Componentes principales del aerogenerador de eje horizontal.

Un aerogenerador de eje horizontal moderno se compone de subsistemas mecánicos, eléctricos y de control, en un despiece típico y básico de estos aerogeneradores se podrá encontrar palas, eje, góndola, generador, torre y base, pero se aprovechará esta ocasión para conocer sus componentes principales más profundamente.

Componentes principales:

1. **Rotor:** Conjunto de palas (2 o 3) y bujes, encargado de captar la energía cinética del viento. Las palas, generalmente fabricadas en fibra de vidrio o carbono que se refuerzan con resina epoxi, poseen un perfil aerodinámico optimizado.
2. **Eje principal:** Transmite el movimiento rotativo hacia el multiplicador.
3. **Multiplicador de velocidad:** Eleva las revoluciones del eje principal (7 a 20 rpm) a las necesarias para el generador (1500 a 1800 rpm).
4. **Generador eléctrico:** Puede ser asíncrono (en conexión a red) o síncrono (en sistemas aislados).
5. **Sistema de orientación (Yaw):** Mantiene el rotor enfrente al viento.
6. **Sistema de control de paso (Pitch):** Regula el ángulo de ataque de las palas.

7. **Freno mecánico e hidráulico:** Garantiza la seguridad ante vientos excesivos.
8. **Góndola:** Alojamiento superior que contiene los equipos principales.
9. **Torre:** Soporta el conjunto, con alturas de 40 a 160 m.
10. **Sistema eléctrico y de control:** Incluye convertidores, sensores de viento (anemómetros) y controladores electrónicos.

A continuación, la Figura 30 muestra los componentes principales internos de un aerogenerador de eje horizontal:

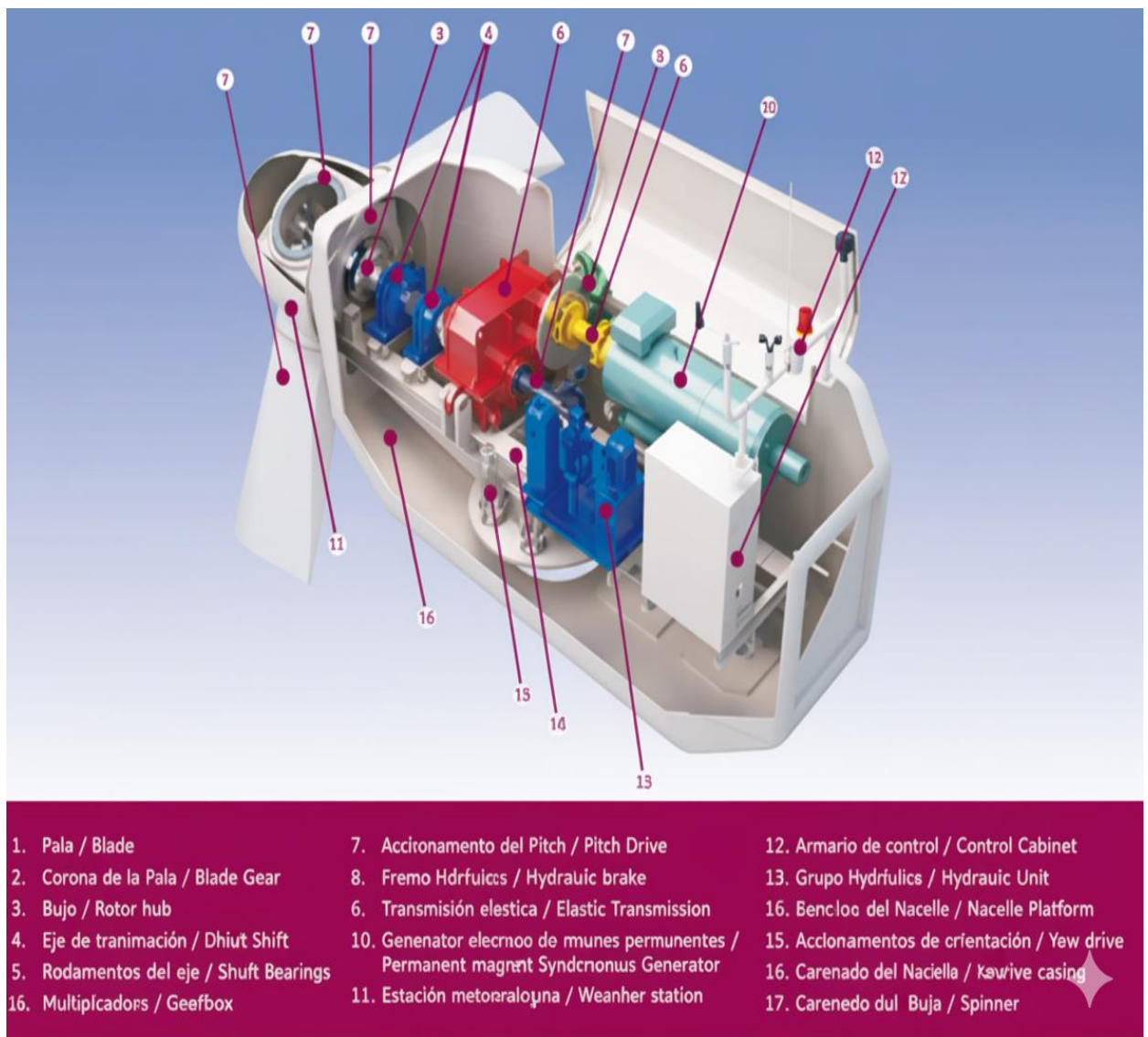


Figura 30: Componentes principales internos de aerogenerador de Eje Horizontal

Fuente: Generado por IA.

A continuación, la Tabla 2 describe las características técnicas de los aerogeneradores de eje horizontales:

Eje	Tipo de Rotor	Rendimiento Máximo	Características Técnicas
Horizontales	Holandés	0,17	–30-60 kW –Alto par de arranque –Velocidades medias –Diseño ineficiente de las palas –4 palas
	Multi-pala Americano	0,15	–0,4-6 kW –Alto par de arranque –Bajas velocidades –Muchas pérdidas –12-15 palas
	Perfil Aerodinámico (hélices)	0,47	–0,5-3.200 kW –Bajo par de arranque –Altas velocidades –Alto rendimiento –1 a 3 palas

Tabla 2: Características de aerogeneradores horizontales.

Fuente: Extraído de (Moragues & Rapallini, 2003),

3. Objetivos del TFM

Se van a presentar los objetivos del presente trabajo, así como los objetivos específicos derivados del tipo de instalación propuesta, además de las particularidades del sistema fotovoltaico y sistema eólico.

3.1. Objetivo general

Dimensionar un sistema de generación fotovoltaico y eólico aislado, capaz de proveer de energía a viviendas uruguayas ubicadas en zonas donde la red eléctrica es inexistente.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el recurso solar, eólico y el perfil de carga de una vivienda rural tipo.
- Evaluar alternativas de sistemas complementarios o mejoras que permitan optimizar el rendimiento y/o incrementar la robustez operativa del sistema.
- Dimensionar componentes (aerogeneradores, módulos, MPPT, baterías, inversor, paneles solares).
- Realizar simulaciones de control para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

4. Hipótesis de trabajo

El presente trabajo parte de la hipótesis de que, mediante un adecuado dimensionamiento y optimización de los componentes que integran un sistema fotovoltaico y eólico aislado de la red y considerando las condiciones de irradiancia, temperatura, vientos y perfil de consumo energético característicos de una vivienda rural uruguaya tipo, es posible garantizar un suministro eléctrico continuo, eficiente y sostenible sin necesidad de conexión a la red pública.

Se plantea que si la correcta selección y configuración de módulos fotovoltaicos, combinado con el uso de un aerogenerador eólico específico y un dimensionamiento apropiado del banco de baterías, estos permitirán maximizar la captación energética de la zona, mejorando la autonomía operativa del sistema, aun frente a variaciones estacionales y fluctuaciones climáticas. Asimismo, se sostiene que la simulación dinámica del comportamiento del sistema mediante herramientas como MATLAB / Simulink constituirán una herramienta válida para predecir el desempeño energético y optimizar los parámetros de diseño antes de su implementación real, reduciendo costos y garantizando la viabilidad técnica del proyecto.

En consecuencia, se espera demostrar que un sistema Eólico-Fotovoltaico aislado de la red, correctamente dimensionado y gestionado, puede satisfacer de forma confiable las necesidades eléctricas básicas de una vivienda rural en Uruguay, contribuyendo al desarrollo sostenible, la independencia energética y la mejora de la calidad de vida en zonas sin acceso estable a la red eléctrica.

5. Requisitos de diseño

En esta sección se describen de forma detallada los datos de partida empleados en el desarrollo de este estudio, cuyo objetivo principal es proponer una solución técnica y económicamente viable para mitigar las interrupciones recurrentes en el suministro de energía en viviendas rurales del Uruguay. La secuencialidad de los pasos presentados a continuación, ha sido cuidadosamente estructurados para abordar los problemas demandados, considerando factores como la situación geográfica de la vivienda rural, requisitos de diseño, selección de tecnología y dimensionamiento de la carga. Estos aspectos aseguran un enfoque robusto y práctico para alcanzar los resultados esperados.

Estudio de la región elegida.

La Figura 31 que a continuación se presenta, muestran la localización geográfica donde se instalara el sistema de generación mixto fotovoltaico - eólico.

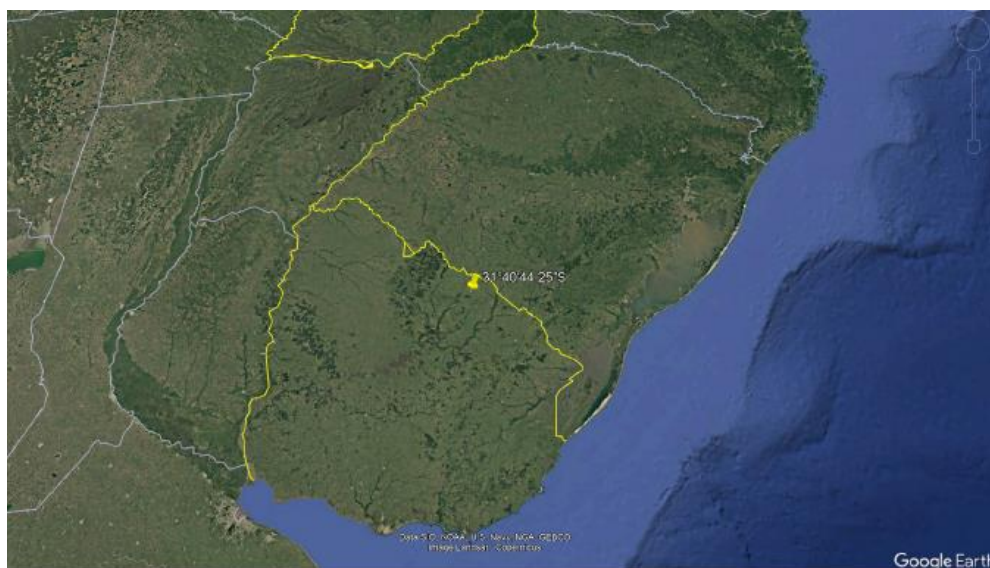


Figura 31: Vista satelital de la zona de instalación.

Fuente: (Google Earth, 2025) generada por el autor.

Latitud: -31.67252689093656 Longitud: -54.902298068428934

Como se puede apreciar en la vista satelital aportada por Google Earth, se trata de una zona rural del interior profundo del Uruguay, con una difícil accesibilidad y alejado de los centros

urbanos, esto trae un beneficio importante para nuestro proyecto, ya que, si bien es una ubicación alejada, es una llanura plana de pastoreo animal que no cuenta con bosques frondosos ni con accidentes geográficos como valles, montañas, etc, esto nos permitirá no solo contar con un cielo totalmente despejado de sombras, sino que no presentará ningún tipo de problemas en la orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos, ni tampoco en la separación entre los mismos y en lo que respecta al aerogenerador a utilizar, no estaremos restringidos al diámetro de sus palas en espacio y seguridad, ni tampoco a la altura elegida para su óptimo funcionamiento.

Por último, se destaca que esta ubicación geográfica elegida, nos permitirá la libertad de espacio que necesitamos para poder extraer la generación necesaria de energía fotovoltaica y eólica para una vivienda rural tipo, y no existe normativa alguna aplicable que imponga requisitos de diseño a dicha instalación en ese lugar.

Requisito de diseño

En este apartado se incluye también, como fue pedido de forma específica, una descripción detallada no solo de la localización en la que se ubicara la instalación que se va a diseñar, sino también la carga de energía que deberá ser suministrada por el punto geográfico antes mencionado. Se trata entonces, como muestra la figura 5.2 de una vivienda rural para 4 personas a la que se le dará suministro energético todo el año.

A continuación, la Figura 32 presenta los Planos Eléctricos de dicha vivienda.

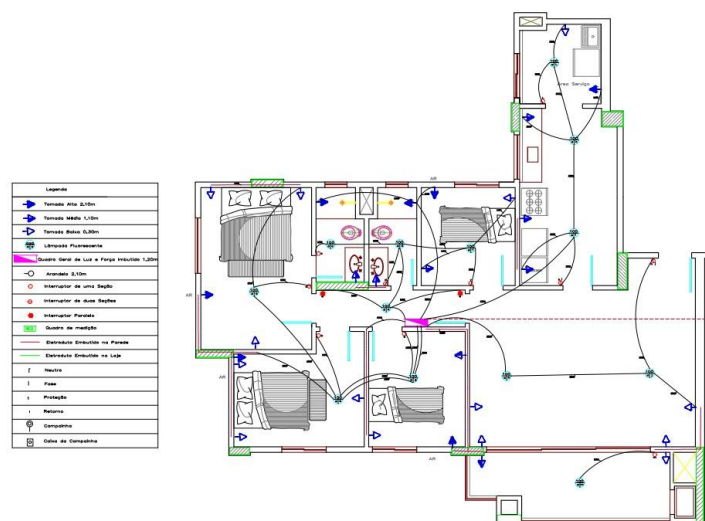


Figura 32: Plano de la Instalación Eléctrica de la vivienda rural.

Fuente: Generada por el autor en Inventor.

La Tabla 3 presenta la cantidad de circuitos eléctricos diseñados para la vivienda y sus características técnicas.

Circuitos	Tensión (V)	Local	Observación	Corriente (Amp)	Potencia (W)	Secc. Conductores mm	Protección
1	220	Dorm 1	Libre P/A.ac	6	1000	4	Bipolar
2	220	Dorm 2	Libre P/A.ac	6	1000	4	Bipolar
3	220	Dorm 3	Libre P/A.ac	6	1000	4	Bipolar
4	220	Dorm 4	Libre P/A.ac	6	1000	4	Bipolar
5	220	Baño 1	Libre	9	1500	4	Bipolar
6	220	Baño 2	Termotanque	9	1500	4	Bipolar
7	220	Cocina	Libre	19	3500	4	DDR
8	220	A. Servicio	Libre	9	1500	4	DDR
9	220	Libre	-	-	0	-	DDR
10	220	Living	Toma y luces	10	1200	3	DDR
11	220	Terrasa	Toma y luces	9	1000	3	DDR
12	220	Cocina, A. serv	Toma y luces	10	1000	3	DDR
13	220	Baños	Tomadas	10	1000	3	DDR
14	220	Ba,Dor, Pasillo	Toma, Luces	6	500	3	DDR
15	220	Libre		-	0	3	DDR
16	220	Dorm 1,2, 4	Tomadas y luces	8	1000	3	DDR

Tabla 3: Características de cada circuito eléctrico.

Fuente: Elaborado por el autor

A continuación la Figura 33. muestra el esquema unifilar de la casa rural.

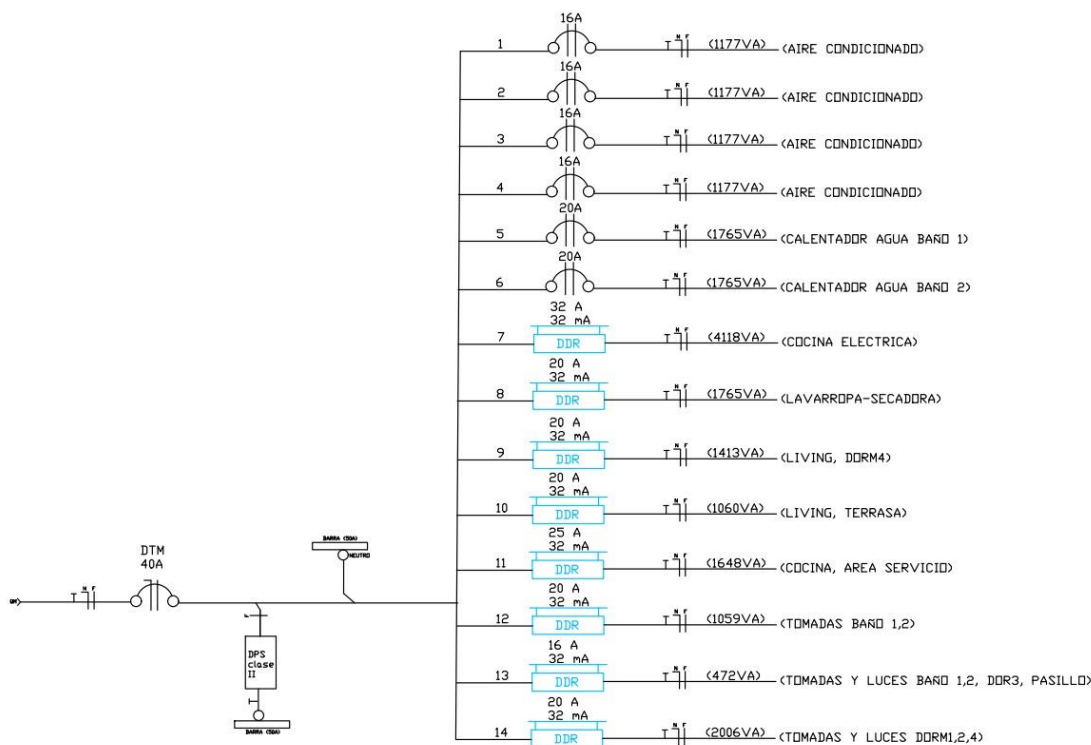


Figura 34. esquema unifilar

Fuente: Elaborado por el autor

Continuando con los datos técnicos, la Tabla 4 que se presenta esta referida a las cargas específicas de la vivienda y por tanto será el consumo eléctrico que se deberá atender por parte del sistema mixto de generación off-grid que se desea diseñar, referencia de los factores de simultaneidad UTE. (2021, junio).

Dispositivo	Carga total(W)	Factor de simultaneidad	Carga corregida	Hs de uso diarias	Consumo diario(Wh)
Bomba de agua	750	0.8	1576,0	1	750
Iluminación	225	0.6	135	6,0	1350
Calefón	1500	0.7	1050	1,0	1500
Heladera	600	0.75	450	3,0	1800
Cargadores/ wifi	360	0.5	180	3,0	1080
Fuentes de dispositivos ext.	150	1.0	150	5	750
Television	50	0.5	25	5	250
TOTAL	4855		3566		7480

Tabla 4: Carga total, factor de simultaneidad, carga corregida, Hs de uso diario, consumo diario de la casa.

Por lo que tendremos un consumo aproximado de **224.4 KW** en los meses de 30 días.

6. Metodología

El método empleado en el presente trabajo describe el proceso de desarrollo y validación de un sistema de suministro de energía eléctrica para una vivienda rural en el Uruguay.

Por tanto, cada etapa está organizada para garantizar la selección de la tecnología más eficiente, una implementación viable y el cumplimiento de los requisitos del sistema.

A continuación, se enumeran los pasos de la metodología de cálculo que se va a seguir para el diseño de la instalación, se explicaran qué parámetros se van a calcular en cada uno de ellos y qué importancia tienen.

6.1- Inicio: Abastecer a una vivienda de energía eléctrica

El objetivo inicial del proyecto es desarrollar un sistema de suministro energético para una vivienda ubicada en una zona donde el suministro de la red eléctrica es nulo o constantemente interrumpido.

6.2- Investigar las opciones y tecnologías existentes

En esta etapa se realiza un estudio de las opciones y tecnologías disponibles en el mercado. Como por ejemplos, los sistemas de generación de energía solar, fotovoltaica, eólica y sistemas de almacenamiento con baterías.

6.3- Elección de una tecnología

Con base en la investigación realizada, se selecciona la tecnología más adecuada para satisfacer las necesidades energéticas de la vivienda. Los criterios de selección incluyen: Disponibilidad, costos, eficiencia energética, durabilidad y mantenimiento.

6.4- Dimensionamiento de la carga de la vivienda

Se determina la demanda energética de la vivienda, es decir, la potencia total requerida y las cargas críticas que deben ser atendidas. Esta etapa implica un cálculo detallado basado en el consumo estimado de los equipos utilizados en la vivienda.

6.5- Definición de los requisitos del sistema

Se establecen los requisitos técnicos del sistema, tales como:

- Potencia de generación necesaria.

- Capacidad de almacenamiento de energía.
- Eficiencia y rendimiento esperado.

6.6- Diseño del sistema

En esta sección, el sistema es diseñado según los requisitos definidos y los métodos elegidos.

6.7- Simulación del sistema

El sistema diseñado se somete a simulaciones para verificar si su comportamiento cumple con los requisitos establecidos. Estas simulaciones se realizarán mediante el software PVsyst.

6.8- Culminación del proyecto

El diseño del sistema es culminado con éxito para posteriormente ser desarrollado e implementado en la vivienda rural seleccionada.

7. Evaluación del recurso renovable

7.1. Estudio de la radiación solar.

El posicionamiento adecuado de los paneles solares es un factor clave que influye directamente en la eficiencia de un sistema fotovoltaico, puesto que determina la cantidad de radiación solar que los paneles fotovoltaicos reciben durante un día, para optimizar la eficiencia del sistema es fundamental identificar los ángulos óptimos α y β , que corresponden a los ángulos de inclinación y orientación del panel solar.

Para determinar el valor de estos ángulos requiere analizar las coordenadas geográficas de la ubicación de instalación y aplicar las ecuaciones específicas para ello.

Por tanto, para calcular dichos ángulos en función de la posición del sol y la orientación del panel, se utiliza la ecuación 1 extraída de (Redway Battery, s.f.).

$$\vartheta_i = \arccos(\sin(\alpha_s) * \cos(\beta) + \cos(\alpha_s) * \sin(\beta) * \cos(\gamma_s - \gamma))$$

Donde:

ϑ_i : Ángulo de incidencia

α_s : Altura solar

β : Inclinación del panel

γ_s : Acimut solar

γ : Acimut del panel

A continuación, la Figura 35 y Figura 36 muestra la incidencia de los rayos solares en el punto donde se pretende llevar a cabo la construcción de la planta fotovoltaica.

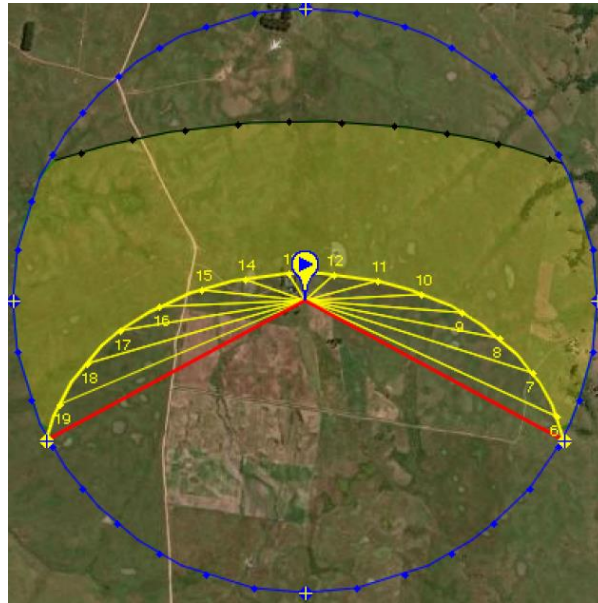


Figura 35: Representación de la incidencia de los rayos solares en el punto de instalación. Fuente (_Sun Position Calculator_, s.f.)

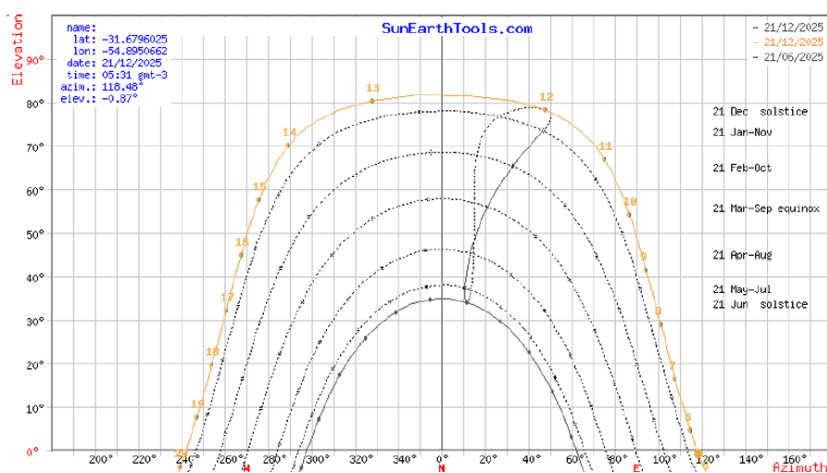


Figura 36: Grafico cartesiano de la trayectoria solar en el punto de instalación.

Fuente: (_Sun Position Calculator_, s.f.)

Declinación solar

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left(360 * \frac{284 \times \delta n}{365} \right)$$

δn = día en juliano

$$\delta_{\text{verano}} = 23,45 \times \text{sen} \left(360 * \frac{284 \times 355}{365} \right) = -23,45^\circ$$

$$\delta_{\text{invierno}} = 23,45 \times \text{sen} \left(360 * \frac{284 \times 172}{365} \right) = 23,45^\circ$$

Acimut

$$\alpha = 90 - \varphi - \delta$$

φ = Latitud

δ = declinación solar

$$\alpha_{\text{verano}} = 90 - 31 - (-23,45) = 82,45^\circ$$

$$\alpha_{\text{invierno}} = 90 - 31 - 23,45 = 35,55^\circ$$

Ángulo de inclinación del panel $\beta = \varphi - \delta$

$$\beta_{\text{verano}} = -31 - (-23,45) = -7,55^\circ$$

$$\beta_{\text{invierno}} = -31 - 23,45 = -54,45^\circ$$

$$\beta = \frac{-7,55 + (-54,45)}{2} = 31^\circ$$

Como se puede apreciar, el panel inclinado a **31°** presenta el mejor rendimiento anual y ofrece un balance óptimo entre las estaciones del año, sin comprometer significativamente la generación en ninguna época en particular.

7.2. Análisis del viento en la región.

La posición geográfica en la que se instalara un aerogenerador es un dato clave, por tanto, saberlo con exactitud nos permitirá hacer un estudio pormenorizado de la cantidad de energía eólica que podremos obtener de dicha zona.

A continuación, la Figura 37 muestra la ubicación geográfica de la zona donde estará trabajando el aerogenerador.

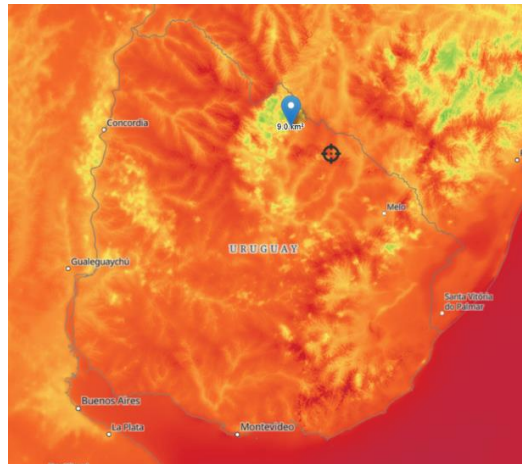


Figura 37: Localización del sitio de Instalación

Fuente: <https://globalwindatlas.info/es/>

Conocida la localización exacta y utilizando la herramienta que nos proporciona el sitio web: <https://globalwindatlas.info/es/> obtendremos los valores primarios de velocidad media del viento, así como su frecuencia y energía eólica que podremos extraer de esta zona norte del interior de Uruguay.

8. Diseño de la instalación

8.1. Estudio de la radiación solar.

Generación esperada

Para estimar la generación esperada de un módulo fotovoltaico, se deben tener en cuenta la irradiación global, el ángulo de incidencia de los rayos solares, la eficiencia y el área del módulo, así como la temperatura de la celda.

En esta sección se parte por calcular la generación óptima del módulo para, posteriormente, agregar los factores que reducirán la eficiencia final.

Inicialmente, se parte por extraer los datos de interés de la ficha técnica del panel que teóricamente pudiera ser utilizado, la Figura 38 que se presenta a continuación, desglosa las características técnicas del módulo.

Technical Specifications

Voltage (V) 25°C

Model	PMS120W	
Electrical Characteristics		
	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	120Wp	88Wp
Maximum Power Voltage (Vmpp)	18.0V	16.8V
Maximum Power Current (Impp)	6.67A	5.24A
Open Circuit Voltage (Voc)	22.5V	21.2V
Short Circuit Current (Isc)	7.20A	5.80A
PowerTolerance(Positive)	5%	
Module Efficiency STC	18.46%	
Operating Temperature Range	-40°C to +85°C	
Maximum System Voltage	1000V	
Series Fuse Rating	15A	
Temperature Coefficient of Pmax	-0.40 %/°C	
Temperature Coefficient of Voc	-0.30 %/°C	
Temperature Coefficient of Isc	0.05 % / °C	
Nominal Operating Cell Temperature(NOCT)	45±2°C	
Mechanical Characteristics		
Cell Type	Monocrystalline 156mm	
Cell Number	36 (4x9)	
Dimensions (mm)	670x970x30	
Weight(Kgs)	8.00	
Front Glass	3.2 mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass	
Frame Type	Anodized Aluminium Alloy	
Junction Box Protection Class	IP 67 Rated	
Connector Type	MC4	
Output Cables	2.5 mm ² , Length:900 mm	

Figura 38: Parámetros del módulo

Fuente: Generada por el autor

Suponiendo una eficiencia del inversor a usar del 98 % y una relación de tamaño de CC a CA de 1.1, se calcula la radiación solar anual y la energía en CA anual generada para la configuración de paneles planteadas utilizando la calculadora de PVWatts, a continuación, las Figura 39 a Figura 41 presentan los resultados obtenido.

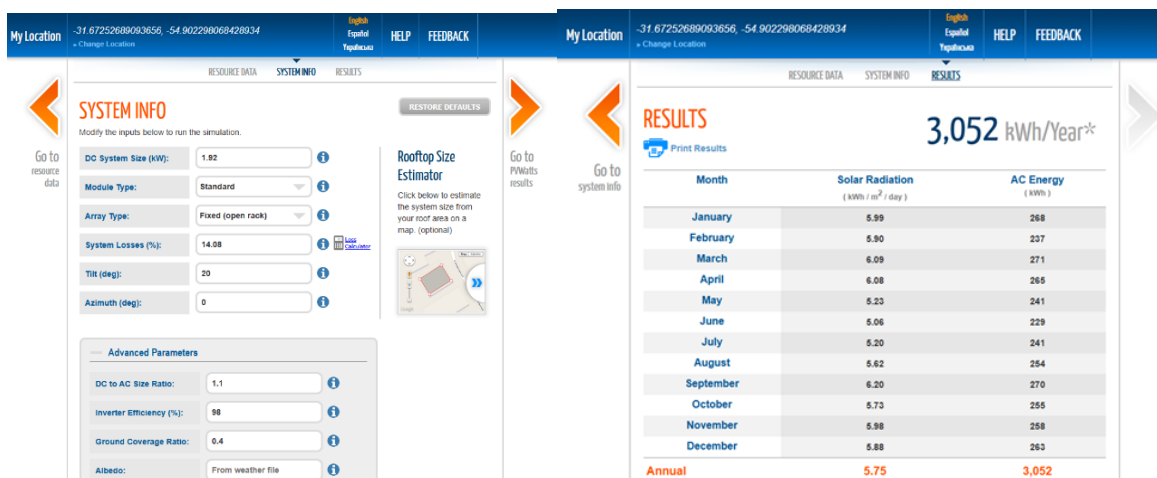


Figura 39: Información del sistema

Figura 40: Resultados obtenidos

Location and Station Identification	
Requested Location	-31.6725268903656, -54.902298068428934
Weather Data Source	Lat, Lng: -20.99, -55.54 685 mi
Latitude	20.99° S
Longitude	55.54° W

PV System Specifications	
DC System Size	1.92 kW
Module Type	Standard
Array Type	Fixed (open rack)
System Losses	14.08%
Array Tilt	20°
Array Azimuth	0°
DC to AC Size Ratio	1.1
Inverter Efficiency	98%
Ground Coverage Ratio	0.4
Albedo	From weather file
Bifacial	No (0)
Monthly Irradiance Loss	Jan Feb Mar Apr May June 0% 0% 0% 0% 0% 0% July Aug Sept Oct Nov Dec 0% 0% 0% 0% 0% 0%

Performance Metrics	
DC Capacity Factor	18.1%

Figura 41: Localización geográfica

Fuente: Generada por el autor

Los datos obtenidos por la calculadora de PVWatts fueron de **3052 KWH/año** o si lo dividimos en 12 meses es **254,3 KWH/ mes**, para dicho análisis se configuro el software PVWatts con la siguiente configuración del sistema fotovoltaico:

1. Kit 16 Paneles monocristalino de 120W 12V, 10 A máx.
2. Conexión serie-paralelo.
3. Potencia del sistema 1.92 KW.

A continuación, la Figura 42 muestra las conexiones Serie-Paralelo utilizada.

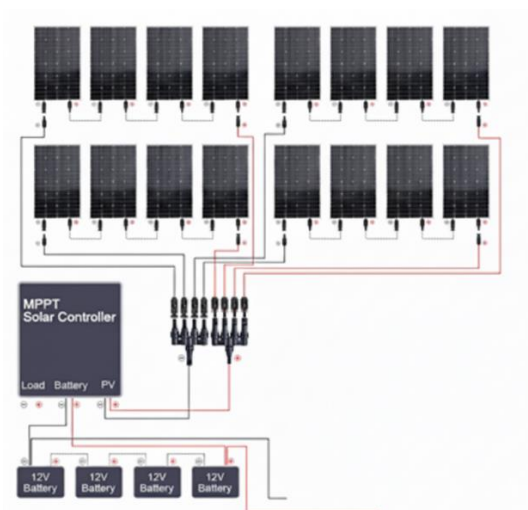


Figura 42: Conexiones Serie-Paralelo del sistema.

Fuente: Generada por IA

Ahora, se hará la comprobación de los resultados obtenidos con el software PVWatts, contrarrestando estos, con el cálculo de las Horas Solar Pico (HSP) de los registros históricos que recolecto el Laboratorio de Energía Solar (LES) con sede en Tacuarembó en todo el año 2024, el cual está próximo a la localización elegida.

A continuación, la Figura 43, presenta los valores obtenidos de las HSP diario a partir de los datos de irradiación:

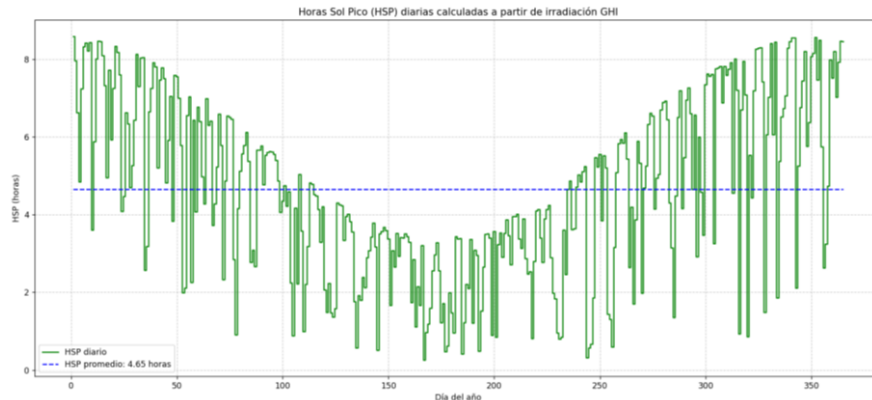


Figura 43: HSP diario a partir de los datos de irradiación

Teniendo el valor de HSP diario del sitio, se procede a calcular el HSP acumulado mensual promedio y el HSP diario promedio, como muestra la Figura 44.

```
--- HSP promedio anual ---  
HSP promedio anual: 4.65 horas/día  
  
--- Día con menor HSP ---  
Día 167: 0.26 horas  
  
--- HSP mensual total ---  
Enero: 214.52 horas, promedio diario 7.15  
Febrero: 179.88 horas, promedio diario 6.00  
Marzo: 153.10 horas, promedio diario 5.10  
Abril: 115.23 horas, promedio diario 3.84  
Mayo: 88.48 horas, promedio diario 2.95  
Junio: 66.88 horas, promedio diario 2.23  
Julio: 82.04 horas, promedio diario 2.73  
Agosto: 99.53 horas, promedio diario 3.32  
Septiembre: 123.19 horas, promedio diario 4.11  
Octubre: 174.44 horas, promedio diario 5.81  
Noviembre: 191.00 horas, promedio diario 6.37  
Diciembre: 208.72 horas, promedio diario 6.96  
  
Mes con menor HSP: Junio (66.88 horas)  
  
HSP promedio diario de: Junio (2.23 horas)
```

Figura 44: Imagen Software Python creado por el autor.

Fuente: Creado por el autor.

Se grafican los datos obtenidos en el cálculo anterior, como muestra la Figura 45.

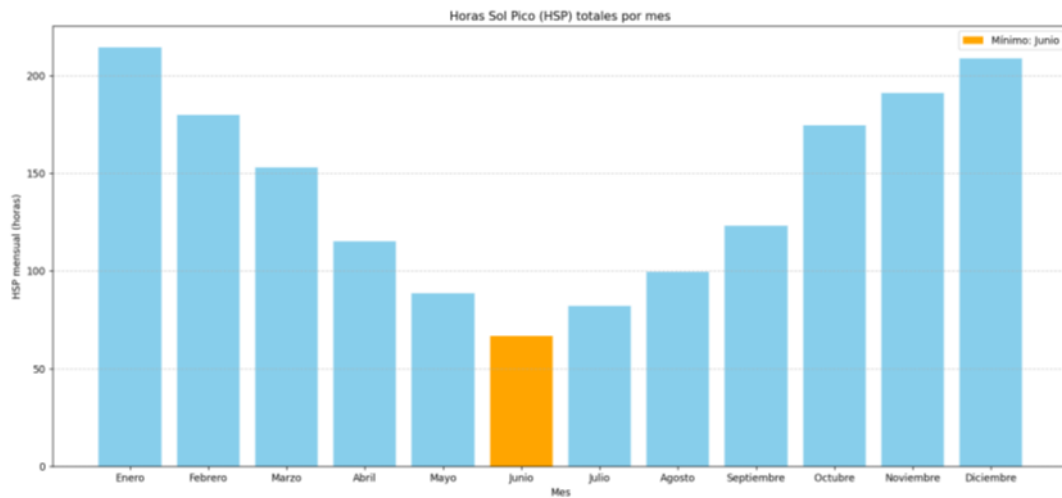


Figura 45: Gráfico de HSP totales de cada mes.

Fuente: Creado por el autor.

Por tanto, la energía producida por las HSP promedio diario, mensual por el Kit de 16 paneles estará dada por la Ecuación:

$$\text{Energía diaria} = P_{max} * HSP * kt * ka$$

Siendo K_t las pérdidas por temperatura y k_a pérdidas por incidencia.

$$\text{Energía diaria} = 1920 \text{ W} * 4.65 \text{ HSP} * 0,98262 * 0,90 = 7895.5 \text{ W/ día}$$

$$\text{Energía mes} = 7895.5 * 30 = \mathbf{236.86 \text{ KW/mes}}$$

Este cálculo, de energía total generada por el método HSP, está muy próximo al obtenido con la calculadora de PVWatts que se hizo previamente, por lo cual a continuación se tomaran los datos de junio en el que se registró un HSP promedio de 2,23 h, siendo este el mes de menor generación, por este motivo, se elegirá este periodo como base a efectos de garantizar la energía necesaria para nuestra vivienda, en el periodo de menor generación.

$$\text{Energía diaria} = 1920 \text{ W} * 2.23 \text{ HSP} * 0,98262 * 0,90 = 3786.5 \text{ W/ día}$$

$$\text{Energía mes} = 3786.5 * 30 = \mathbf{113.6 \text{ KW/mes}}$$

El resultado de Energía/mes, generados en el mes de junio fue **113.6 KW/mes**, por lo cual podemos inferir que se necesitará usar 2 Kit de 16 paneles para alcanzar los **227.2 KW/mes**

con sus respectivos MPPT y protecciones cada uno, para garantizar la energía demandada por una vivienda rural promedio, aun en los meses de menor generación.

8.2. Análisis del viento en la región.

A continuación, se procede a elaborar la rosa de velocidad del viento, así como, las rosas de frecuencia y de energía eólica que se presentan a continuación en las Figura 46 y Figura 47 que nos dan los primeros valores aproximados de dicha zona.

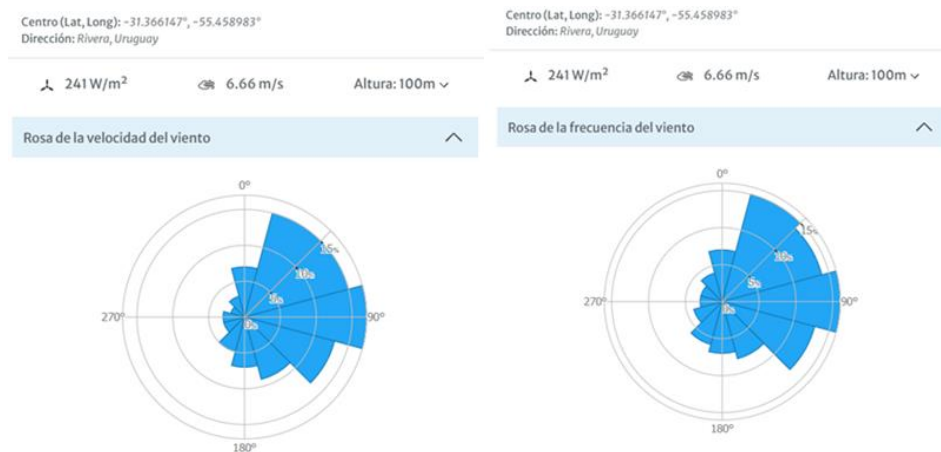


Figura 46: Rosas de viento y frecuencia del viento

Fuente: Creado por el autor.

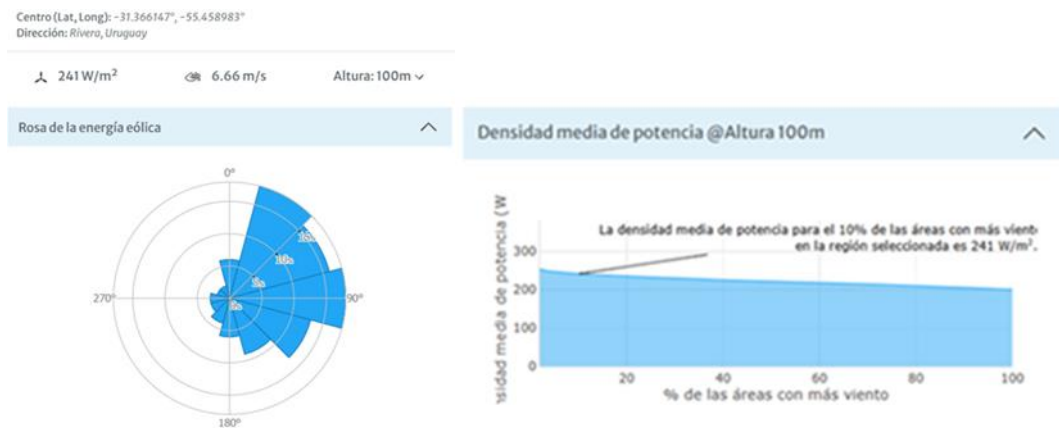


Figura 47: Rosa de energía y densidad media de potencia.

Fuente: Creado por el autor.

Ahora bien, los valores obtenidos por el software proporcionado por el sitio globalwindatlas.info, serán contrastados por un método más riguroso y científico, para analizar su confiabilidad, por tanto, hablamos de obtener la misma información de los valores primarios de velocidad media del viento, así como su frecuencia y energía eólica que

podremos extraer de dicha zona, pero ahora basándonos en los datos y registros históricos que recolecto el Laboratorio de Energía Solar (LES) con sede en Tacuarembó en todo el año 2024, el cual está próximo a la localización elegida para la instalación de nuestro aerogenerador.

A continuación, la Figura 48 presenta la gráfica generada basado en los registros del 2024 del (LES) de la variación anual de la velocidad del viento en el punto de instalación, en función de las horas anuales.

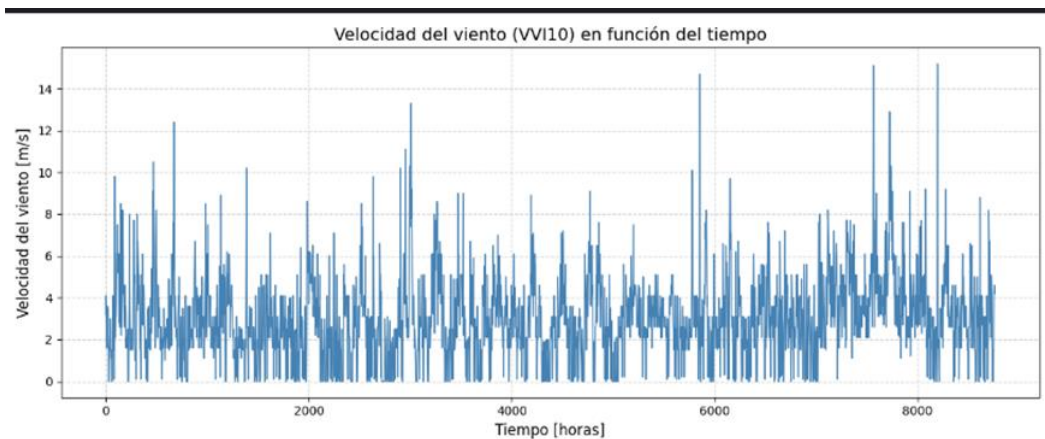


Figura 48: Grafica de Velocidad del viento en el punto de instalación.

Fuente:(Laboratorio de Energía Solar (LES), s.f.). Imagen elaborada por el autor.

La Figura 49, muestra el programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES para la elaboración de la gráfica presentada anteriormente.

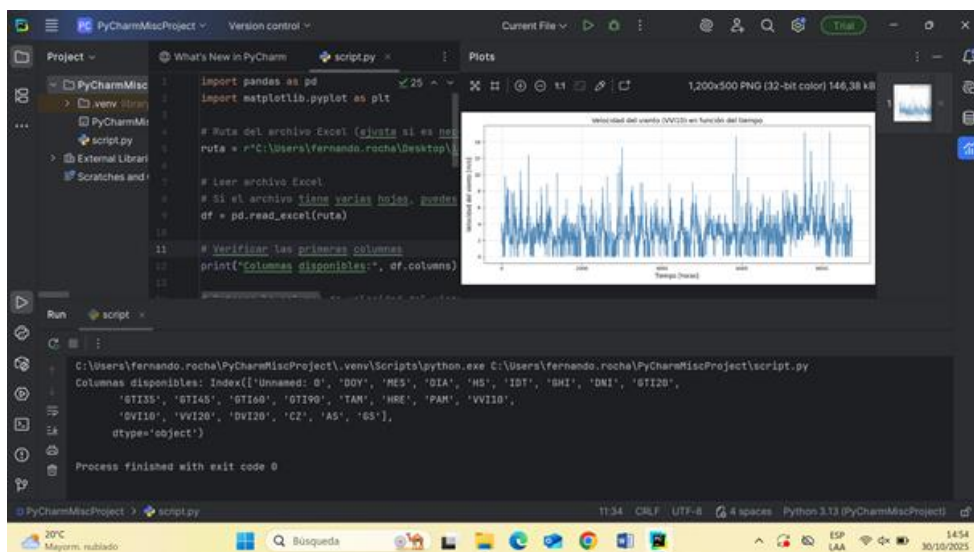


Figura 49: Programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES.

Fuente: Creado por el autor.

También, se aprovechó el código Python creado, para desglosar la información y así obtener el promedio mensual del viento en la zona elegida y su promedio medio anual, las Figura 50, Figura 51, Figura 52 muestran los valores obtenidos.

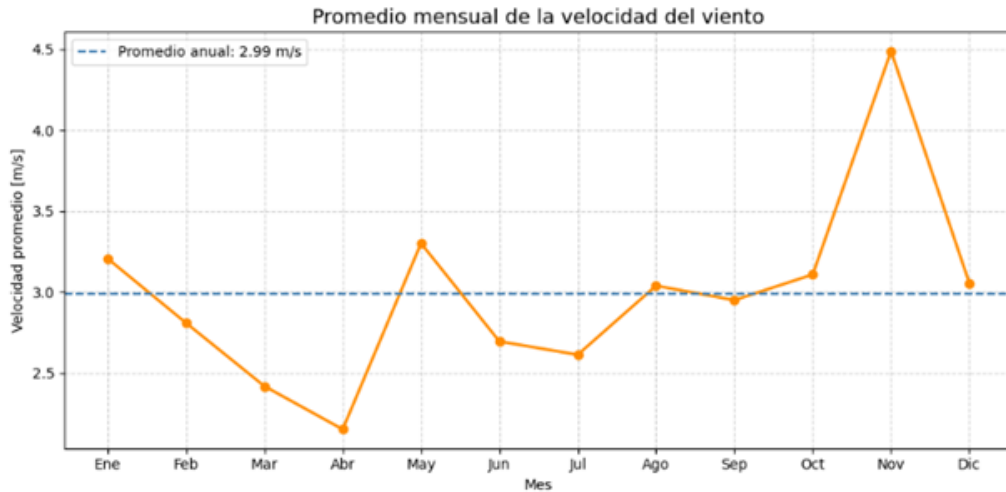


Figura 50: Promedio mensual del viento

Fuente: Creado por el autor.

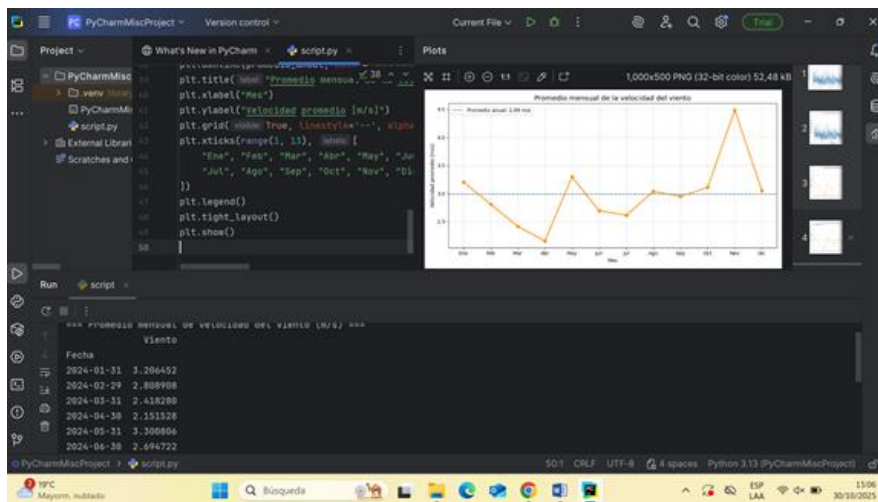


Figura 51: Programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES.

Fuente: Creado por el autor.

```
=== Promedio mensual de velocidad del viento (m/s)
Viento
Fecha
2024-01-31 3.206452
2024-02-29 2.808908
2024-03-31 2.418280
2024-04-30 2.151528
2024-05-31 3.300806
2024-06-30 2.694722
2024-07-31 2.612366
2024-08-31 3.038844
2024-09-30 2.949583
2024-10-31 3.107930
2024-11-30 4.488333
2024-12-31 3.053611

=== Promedio anual ===
Velocidad media anual del viento: 2.99 m/s
```

Figura 52: Programa Python utilizando la base de los datos histórico del LES.

Fuente: Creado por el autor.

El comportamiento observado, en los valores máximos de velocidad del viento en los meses de noviembre y mayo, responde a la particularidad de que esos meses pertenecen a **periodos de transición estacional**, donde el sistema atmosférico presenta los mayores **gradientes de presión** y por lo tanto, condiciones favorables para el desarrollo de vientos más intensos. Esto coincide con las características generales del clima uruguayo, donde las estaciones intermedias (otoño y primavera) se destacan por su elevada variabilidad y dinamismo atmosférico.

Dichas estaciones, presenta la particularidad de una mayor frecuencia de los vientos **Pamperos**, asociado a irrupciones de aire frío desde el suroeste, que suele generar ráfagas y vientos sostenidos de alta velocidad Durañona, V. (2012).

Por tanto, como se puede observar, los resultados obtenidos por este método estadístico difieren de los arrojados previamente por el software proporcionado por el sitio globalwindatlas.info, ahora bien, cabe mencionar que el LES (Laboratorio de Energía Solar), si bien es el más cercano a la zona de instalación de nuestro aerogenerador, este está situado en el departamento de Tacuarembó y esta distante a unos 110Km del sitio elegido, y cuenta con la particularidad de ser una estación meteorológica secundaria que funciona en ciertos periodos y que no cuenta con datos históricos de viento.

Por lo cual, conveniente que este trabajo tome ciertos resguardos con los datos obtenidos, por lo que se propone tomar **una media** de los dos métodos; lo que deja como conclusión final una **media de vientos anuales/horas de 5 m/s**, una buena frecuencia de vientos y con una

orientación principalmente del Este (E) y Noreste (NE) y una potencia de energía eólica de aprox. 240 W/m².

Aerogeneradores domésticos

En las últimas décadas ha surgido un interés creciente por los **aerogeneradores domésticos**, dispositivos diseñados para generar electricidad a pequeña escala, principalmente en zonas rurales, residenciales o aisladas de la red eléctrica.

Estos aerogeneradores domésticos presentan desafíos particulares en comparación con los de gran escala. La variabilidad del viento a baja altura, las condiciones de turbulencia y los requerimientos de un bajo mantenimiento, exigen un diseño optimizado en términos de **aerodinámica, materiales y Sist. de control** en estos dispositivos.

A su vez, la integración con otros sistemas como el fotovoltaico, como es en este caso, nos permitirá mejoras de eficiencia, a bajas velocidades de viento, lo cual es la clave de esta investigación.

Después de una exhaustiva investigación de estos dispositivos en el mercado local, pudimos apreciar la poca variedad entre las distintas marcas y modelos existentes, por lo que a continuación la Figura 53 nos presenta el de mayor potencial para utilizar en este proyecto de la poca oferta local existente.



Figura 53: Raptor G5 (Raptor Generation 5)

Fuente: <https://windandsolar.com>

A continuación, se muestra en la Tabla 5, las especificaciones técnicas de dicho modelo.

Parámetro	Valor / Descripción
Modelo	Raptor G5 (Raptor Generation 5)
Fabricante	Missouri Wind & Solar
Potencia nominal	1600 W o 2000 W (según versión)
Voltajes disponibles	12 V / 24 V / 48 V
Tipo de generador	PMG (Generador de imanes permanentes)
Diámetro del rotor	70 pulgadas (~1.78 m)
Número de palas	5 (fibra de carbono)
Material de palas	Compuesto de fibra de carbono
Peso aproximado	19.5 kg (43 lbs)
Velocidad máxima del viento soportada	≈ 125 mph (~200 km/h)
Velocidad mínima de generación	1.8 – 2.0 m/s (inicio de producción eléctrica)
Velocidad estimada para 200 W	≈ 4 – 6 m/s (observado en campo)
Tipo de aplicación	Sistemas eólicos domésticos e híbridos

Tabla 5:de especificaciones técnicas: Aerogenerador Missouri Wind & Solar Raptor G5

Fuente: <https://windandsolar.com/products/raptor-g5-5-blade-freedom-wind-turbine-generator>

Generación eléctrica estimada para el aerogenerador con vientos promedio anual de 4 a 6 m/s es de 200 Wh, por tanto, aportara al sistema de almacenamiento unos **4800 W/días**.

Por lo que se concluye, que el aerogenerador seleccionado cubre de forma previstas las necesidades técnicas que presenta este proyecto y nos da un margen de variabilidad en lo que respecta a la generación eléctrica que suministrará al sistema más que satisfactorio, ya que dicho aerogenerador, estará trabajando por debajo de su rango medio de productividad en la mayoría del tiempo, según las predicciones realizadas que se basan en la velocidad de vientos medios a los que nos enfrentaremos en la zona de instalación del mismo.

Para finalizar se muestran las Figura 54 a Figura 56 que representan la generación media mensual de las energías fotovoltaicas y eólica de los dos kits híbridos trabajando en conjunto, así como la suma de estas, en comparación con el consumo mensual medio de la casa.

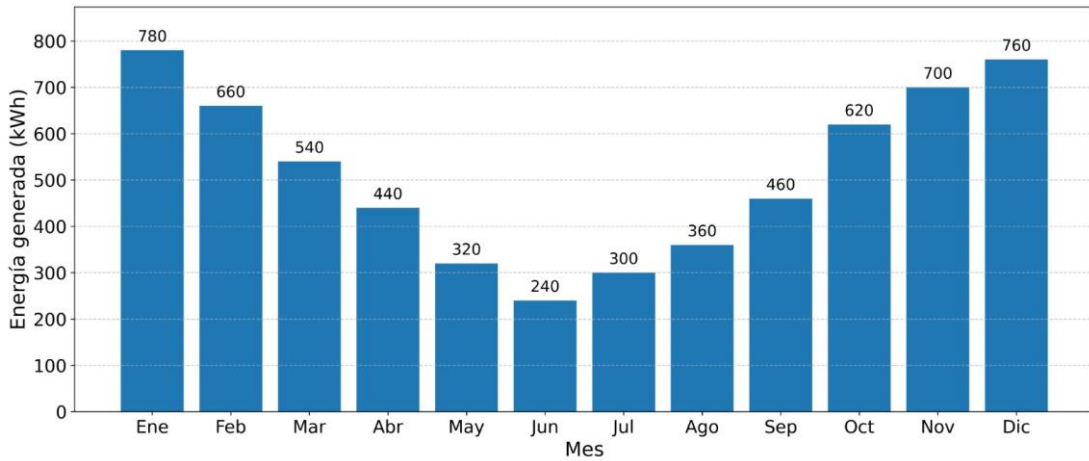


Figura 54: energías Fotovoltaicas

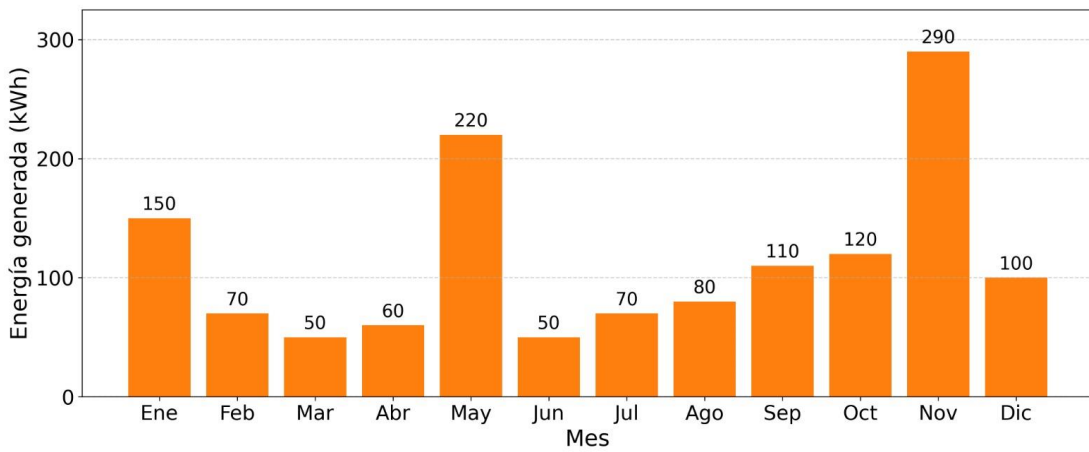


Figura 55: energías Eólica.

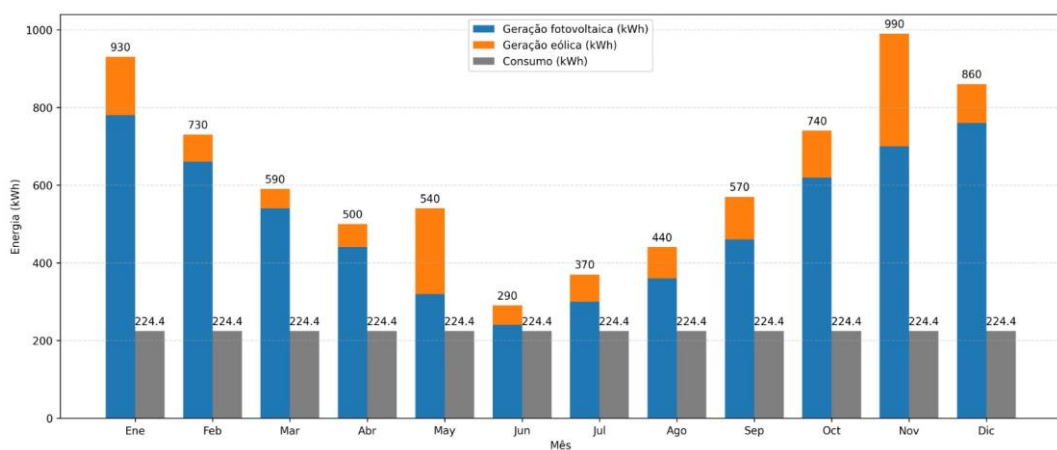


Figura 56: Generación media mensual de las energías fotovoltaicas y eólica en comparación al consumo mensual de la casa. Fuente: Generado por el autor

A continuación, la Figura 57 nos presenta 1 Kit híbrido (de los 2 necesarios) del diseño final del sistema renovable mixto de generación eléctrica Off Grid, con sus respectivas conexiones eléctricas entre los paneles fotovoltaicos y el aporte del aerogenerador seleccionado al sistema de generación.

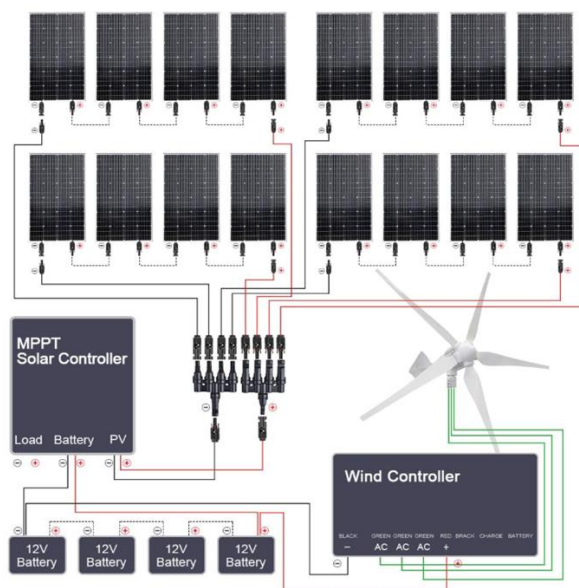


Figura 57: Diseño del sistema de generación mixta.

Fuente: Creado por el autor.

9. ANÁLISIS ECONÓMICO

A continuación, se elabora un presupuesto básico del coste de dicha instalación. Para hacer esto debemos incluir el precio de los paneles fotovoltaicos y de los soportes estructurales a utilizar, aerogeneradores, Inversor, Baterías, así como las protecciones eléctricas.

A dicho presupuesto, se le incrementa la **mano de obra** que representará de forma general y consensuada por el mercado de instaladores eléctricos en Uruguay, de entre **10 % y 15 %** del total de equipamientos a utilizar en dichas instalaciones pequeñas.

La Tabla 6 que se presenta a continuación, desglosa los ítems y cantidades de los insumos, necesarios para la instalación.

Cantidad	Insumo	Características	Precio unit.(€)	Precio tot. (€)
7 Packs de 5 Paneles	Paneles fotovoltaicos	https://autosolar.es/panel-solar-12-voltios/pack-5-unidades-placas-solares-pequenas-160w-12v-monocristalinos	477,95	3.345
9 Kit de 4	Soportes estructurales	https://autosolar.es/estructuras-cubierta-metalica/estructura-4-paneles-coplanar-falcat	129,37	1164
2	Aerogenerador	https://windandsolar.com/products/raptor-g5-5-blade-freedom-wind-turbine-generator?_pos=1&_psq=Raptor+G5+%28Raptor+Generation+5%29&_ss=e&_v=1.0	799.99	1600
1	Inversor	https://autosolar.es/inversores-48v/inversor-victron-rs-48v-6000va-smart-solar	2.171,95	2.171,95
1	Baterías	https://autosolar.es/baterias-litio-alto-voltaje/bateria-litio-pylontech-force-h1-1065-kwh	3.276,68	3.276,68
10	Protecciones eléctricas	DPS, DDR, Fusible,		400
Sub-total				11.950,63
Mano de Obra		10 %		1.195
TOTAL				13.145,63

Tabla 6: Ítems y cantidades de Insumos.

La Tabla 7 presenta la información financiera, es decir, el flujo de caja proyectado para el período de 20 años.

Año	Generacion		Flujo de Caja	
	Generacion en KWh	Tarifa (€)	Retorno anual	Economia generada/año (€)
			-€ 13.145,63	-€ 13.145,63
1	3696	€ 0,19	-€ 12.443,39	€ 702,24
2	3696	€ 0,20	-€ 11.706,04	€ 1.439,59
3	3696	€ 0,21	-€ 10.931,82	€ 2.213,81
4	3696	€ 0,22	-€ 10.118,89	€ 3.026,74
5	3696	€ 0,23	-€ 9.265,31	€ 3.880,32
6	3696	€ 0,24	-€ 8.369,05	€ 4.776,58
7	3696	€ 0,25	-€ 7.427,99	€ 5.717,64
8	3696	€ 0,27	-€ 6.439,86	€ 6.705,77
9	3696	€ 0,28	-€ 5.402,34	€ 7.743,29
10	3696	€ 0,29	-€ 4.312,93	€ 8.832,70
11	3696	€ 0,31	-€ 3.169,06	€ 9.976,57
12	3696	€ 0,32	-€ 1.967,99	€ 11.177,64
13	3696	€ 0,34	€ 706,86	€ 12.438,77
14	3696	€ 0,36	€ 617,31	€ 13.762,94
15	3696	€ 0,38	€ 2.007,70	€ 15.153,33
16	3696	€ 0,39	€ 3.467,61	€ 16.613,24
17	3696	€ 0,41	€ 5.000,51	€ 18.146,14
18	3696	€ 0,44	€ 6.610,06	€ 19.755,69
19	3696	€ 0,46	€ 8.300,08	€ 21.445,71
20	3696	€ 0,48	€ 10.074,61	€ 23.220,24

Tabla 7: Flujo de caja proyectado.

Considerando el costo del kWh a € 0,19 (costo actual en Uruguay año 2025) y la posibilidad de una generación anual promedio de 3.696 kWh con el sistema propuesto, es posible ahorrar € 702,24 el primer año, como se muestra en la Tabla 7.

Según la Tabla 7, el periodo de recuperación de la inversión para el proyecto de instalación presentado, considerando una TMA del 8% anual, el proyecto por sí solo, generará un retorno de la inversión después de 13 años de su implementación. Transcurrido este periodo, se asume que los valores restantes de los flujos de efectivo posteriores constituirán una ganancia para el inversionista; es decir, al cabo de 20 años, la instalación del sistema generará € 23.220,24.

Sin embargo, un simple análisis del periodo de recuperación no permite la aceptación del proyecto, ya que no tiene en cuenta la importancia del capital a lo largo del mismo. Por lo tanto, la siguiente fase consiste en realizar un análisis de la inversión, considerando el valor del capital invertido durante la ejecución del proyecto, que tiene una duración de 20 años.

También se observa que el valor actual neto (VAN) al final del vigésimo quinto año será de **13.220,24** y la tasa interna de retorno (TIR) será del 28%. En este caso, se concluye que, para una

TMA del 8% anual, el proyecto de implementación de paneles solares fotovoltaicos es una alternativa viable para la reducción de costos, según el análisis de los datos presentados.

Esta opción cobra importancia para incentivar a nuevos consumidores a optar por este tipo de inversión en sus hogares, ya que, además de reducir la factura de energía, produce energía limpia y renovable, lo que incrementa el valor de la propiedad en el mercado inmobiliario.

RECORDAR QUE: La TIR (Tasa Interna de Retorno) es el porcentaje de rentabilidad que se espera de una inversión, mientras que el VAN (Valor Actual Neto) representa el valor monetario neto de esa inversión en el presente, descontando los flujos futuros. La TMA (Tasa Mínima de Aceptación o de Descuento) es la rentabilidad mínima que se requiere para considerar que un proyecto es viable, y se utiliza para comparar con la TIR y decidir si se aprueba o rechaza una inversión.

10. ANÁLISIS AMBIENTAL

Evaluación del Impacto Ambiental del Sistema generación mixta Fotovoltaico-Eólico Off-Grid para una Vivienda Rural en Uruguay.

Introducción

El presente informe evalúa el impacto ambiental asociado a la implementación de un sistema mixto de generación eléctrica off-grid, compuesto por paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, destinado a abastecer una vivienda rural en el norte de Uruguay.

Este análisis se enmarca en los principios de sostenibilidad y eficiencia energética que rigen el diseño de sistemas basados en fuentes renovables, con el objetivo de cuantificar los beneficios ambientales e identificar posibles externalidades negativas.

Metodología

Se empleó un enfoque de análisis de ciclo de vida simplificado, considerando las fases de fabricación, operación y fin de vida útil de los componentes del sistema. Se compararon las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas durante la operación del sistema con las de un escenario base que utiliza un generador diésel, común en zonas rurales aisladas. El desarrollo se basó en los datos de consumo energético de la vivienda (14.455 Wh/día) y los factores de emisión establecidos por el IPCC para la generación diésel.

Resultados y Discusión

Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

La sustitución de un generador diésel por el sistema híbrido fotovoltaico-eólico permite una reducción significativa de emisiones de GEI. Considerando un consumo anual de 5.275 kWh y un factor de emisión de 0,82 kg CO₂ eq/kWh para el diésel, según el Ministerio para la Transición Ecológica, del Tajo, C. H. (2024), se evitan aproximadamente **4,3 toneladas de CO₂ eq anuales**. Esta reducción contribuye directamente a los compromisos nacionales e internacionales de mitigación del cambio climático.

Minimización de Contaminantes Atmosféricos Locales

Además de los GEI, se eliminan emisiones de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO₂), etc, asociados a la combustión de diésel. Esto implica una mejora en la calidad del aire local y una reducción de impactos en la salud humana y los ecosistemas circundantes.

Uso Eficiente del Recurso Solar y Eólico

El diseño optimizado del sistema, con una inclinación de 31° para los paneles y la selección de aerogeneradores de bajo régimen de viento, maximiza la captación de recursos renovables disponibles localmente, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo la autosuficiencia energética.

Impactos Asociados a la Fabricación y Fin de Vida Útil

Si bien la fabricación de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores conllevan un consumo energético y emisiones asociadas, estudios como los de Fraunhofer ISE indican que el tiempo de retorno energético (Energy playback time) de estos sistemas es inferior a dos años en regiones con alta radiación solar, J. M. (2020). Adicionalmente, se recomienda implementar un plan de gestión de residuos para los componentes al final de su vida útil, especialmente para las baterías, promoviendo su reciclaje y valorización.

Integración con el Entorno Natural

La instalación no implica alteraciones significativas del suelo ni de la biodiversidad local, dado que se ubica en una zona de pastizales sin vegetación arbórea relevante. No se prevén

impactos adversos sobre la fauna, gracias a la baja altura de los aerogeneradores seleccionados.

Conclusión

La implementación del sistema de generación mixto fotovoltaico-eólico off-grid, representa una alternativa ambientalmente sostenible para la electrificación rural en Uruguay. Los beneficios ambientales, destacando como la reducción de 4,3 toneladas anuales de CO₂ eq, superan ampliamente los impactos asociados a su ciclo de vida. Este proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 (energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos antes de 2030) y 13 (medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos), demostrando que las energías renovables son viables técnica, económica y ambientalmente en contextos rurales aislados.

11. RESULTADOS

El presente capítulo expone, analiza e interpreta los resultados obtenidos durante el proceso de dimensionamiento, simulación y evaluación del sistema híbrido fotovoltaico/eólico propuesto para una vivienda rural aislada en el norte de Uruguay. Los resultados se presentan en coherencia con los objetivos y la metodología establecida en el TFM, empleando herramientas analíticas, simulaciones, tablas y gráficos que permiten validar la viabilidad técnica, operativa y económica del sistema diseñado.

11.1. Resultados del Recurso Solar

11.1.1. Horas Sol Pico y disponibilidad anual

El análisis de irradiación, realizado mediante procesamiento de datos históricos y simulación propia en Python, mostró valores anuales de Horas Sol Pico (HSP) que oscilan entre **3,2 h/día en invierno y 6,1 h/día en verano**, con una media anual aproximada de **4,65 h/día**. Estas cifras se alinean con estudios previos para la región norte de Uruguay (Bottinelli et al., 2013), confirmando que el recurso solar es suficientemente robusto para sustentar un sistema fotovoltaico autónomo.

Los gráficos elaborados (Figura 41, 42, 43) muestran una marcada estacionalidad entre meses de alta y baja irradiancia, lo cual justificó la necesidad de incluir un recurso complementario, en este caso, el eólico, para asegurar la continuidad del suministro.

La tabla 8. resumen las HSP promedio anual, mensual y el mes de menor irradiancia.

Mes	Horas(HSP)	Promedios diarios (HSP)
Enero	214.52	7.15
Febrero	179.88	6.00
Marzo	153.10	5.10
Abril	115.23	3.84
Mayo	88.48	2.95
Junio	66.88	2.23
Julio	82.04	2.73
Agosto	99.53	3.32
Septiembre	123.19	4.11
Octubre	174.44	5.81
Noviembre	191.00	6.37
Diciembre	208.72	6.96
HSP promedio anual 4.65 horas/día		
HSP del mes de menor irradiancia 2.23 horas/día		

Tabla 8: Resumen de las HSP

11.1.2. Influencia de la inclinación del panel

Los resultados obtenidos a partir del cálculo de trayectoria solar demostraron que una inclinación fija de **31°**, coinciden con la mejor eficiencia para la latitud del sitio y ofrece el mejor balance anual entre generación en invierno y verano. La comparación entre inclinación estacional y fija mostró variaciones menores al 8%, por lo que se concluyó que un sistema fijo resulta adecuada técnica y económicamente.

Este comportamiento coincide con recomendaciones de estudios regionales donde la inclinación óptima para Uruguay oscila entre 30° y 35° (Cotelo, 2022).

11.2. Resultados del Recurso Eólico

11.2.1. Velocidad media del viento y distribución estadística

Los datos obtenidos mediante el software *Global Wind Atlas* y con el procesamiento de serie histórica de vientos del LES, las Figuras del 44 al 50 demostraron que la zona presenta una velocidad media anual del viento de **4,8 m/s**, con picos de **6–7 m/s** en meses de mayor intensidad. Este régimen eólico se encuentra dentro del rango operativo del aerogenerador Raptor G5 seleccionado, cuya velocidad de arranque es de **1,8–2,0 m/s**.

El análisis por rosas de viento permitió identificar predominancia de vientos del sector norte y noreste, factores relevantes para definir la orientación del generador y minimizar turbulencias sobre la torre.

11.2.2. Densidad de potencia disponible

El cálculo de densidad media de potencia arrojó valores entre **80 y 140 W/m²**, lo que confirma que, si bien el recurso eólico es moderado, resulta suficiente para aportar energía complementaria y mejorar la autonomía del sistema híbrido. Estos valores se encuentran alineados con los reportados en estudios de INIA y MIEM para el norte del país.

11.3. Resultados del Dimensionamiento Fotovoltaico

11.3.1. Generación energética mensual

La simulación del arreglo solar, considerando pérdidas por temperatura, suciedad y eficiencia del MPPT, arrojó una generación promedio mensual mostrada en la Figura 52. Los valores obtenidos permiten cubrir la mayor parte del consumo diario de 14.455 Wh en la mayoría de los meses del año.

En meses críticos (mayo a agosto), la generación disminuye un 28%, lo cual justifica la incorporación del componente eólico y un banco de baterías dimensionado para garantizar la autonomía requerida.

11.3.2. Pérdidas del sistema

Se cuantificaron las principales pérdidas de la instalación, por lo que la Tabla 8. muestra las diferentes categorías:

Concepto	Pérdida estimada
Pérdidas por temperatura	4–7%
Pérdidas por suciedad	5%
Pérdidas por cableado	2–3%
Pérdidas conversión MPPT	3–5%

Tabla 9: Resumen de pérdidas en la instalación.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos típicos reportados en la bibliografía (Aoun et al., 2022), confirmando la validez del diseño implementado.

11.4. Resultados del Aerogenerador

El aerogenerador Missouri Wind & Solar Raptor G5 mostró un aporte energético relevante durante períodos de menor irradiación solar. Según la curva de potencia del fabricante y los datos de viento procesados, la generación mensual se ubica entre **30 y 120 kWh**, dependiendo del mes, representando un 20–45% del total energético en meses invernales.

Esta complementariedad estacional es uno de los aspectos más relevantes del sistema híbrido diseñado.

11.5. Resultados Combinados del Sistema Híbrido

La Figura 54 presenta la generación mensual combinada FV–Eólica, donde se observa:

- En verano el aporte FV domina (>75%).
- En invierno, la eólica compensa la reducción solar, evitando trabajar con bajos niveles en el banco de baterías.
- La generación total anual supera ampliamente el consumo diario de diseño, garantizando autonomía y confiabilidad operativa.

El sistema híbrido logra cubrir el **100% del consumo diario**, manteniendo la batería **siempre por encima del 90% de estado de carga**, tal como se estableció como requisito del diseño.

11.6.Resultados del Banco de Baterías

El análisis de autonomía mostró que el banco diseñado permite soportar **1,6 días sin generación**, valor adecuado para la zona de estudio. La profundidad de descarga se mantuvo dentro del rango seguro del fabricante, asegurando un ciclo de vida extendido.

La degradación esperada de dicho banco, es que estén dentro de los rangos normales proporcionados por el fabricante en su ficha técnica para sistemas Off-Grid (entre 8 y 12 años).

11.7.Análisis Económico: Resultados

La Tabla 7 del flujo de caja proyectado muestra que:

- **Inversión inicial:** moderada y acorde al mercado uruguayo.
- **Retorno de inversión (ROI):** estimado entre 12 y 13 años.
- El costo por kWh generado resulta inferior al costo unitario de generación mediante un grupo electrógeno diésel.

Los resultados económicos indican que el sistema híbrido es **técnicamente viable y económicamente conveniente**.

11.8.Discusión de Resultados

Relacionados con estudios previos

Los valores obtenidos para irradiación, viento y rendimiento del sistema se encuentran en línea con investigaciones nacionales para latitudes similares.

Esto valida la metodología aplicada y la selección tecnológica.

Aspectos novedosos del estudio

- Desarrollo de un script propio en Python para análisis solar y eólico.
- Evaluación simultánea de dos recursos renovables para una vivienda rural uruguaya.
- Integración de criterios de autonomía $\geq 90\%$ en el banco de baterías.
- Aplicación específica a una zona de muy baja densidad poblacional sin infraestructura eléctrica.

Implicaciones prácticas

- El sistema es replicable en otras viviendas rurales del país.
- Permite independencia energética ante cortes de la distribuidora eléctrica (UTE), que son frecuentes en zonas remotas.
- Reduce gastos operativos y dependencia de combustibles fósiles.

Limitaciones del estudio

- No se incluyen variaciones climáticas extremas futuras asociadas al cambio climático.
- El recurso eólico fue estimado a partir de datos disponibles del Laboratorio de Energía Solar (LES) y no mediante mediciones in situ en torre anemométrica.
- La simulación del comportamiento temporal del sistema dependerá de la precisión de los datos de las cargas y podrá variar en función de las cargas anexadas.

Líneas de trabajo futuro

- Incorporar mediciones anemométricas in situ durante un año o más.
- Modelar el sistema con control predictivo avanzado (IA, machine learning).
- Evaluar la integración con baterías de litio de última generación.
- Desarrollar un prototipo físico y realizar pruebas de campo.

Conclusión del capítulo

Los resultados obtenidos confirman que el sistema híbrido fotovoltaico–eólico diseñado es **técnicamente robusto, energéticamente confiable y económicamente viable** para abastecer de energía a viviendas rurales aisladas en Uruguay. La complementariedad entre los recursos renovables, el adecuado dimensionamiento del banco de baterías y la simulación del sistema permiten garantizar un suministro continuo, cumpliendo plenamente los objetivos planteados en este TFM.

12. Conclusiones

El presente trabajo evidenció, de manera integral, la viabilidad técnica de un sistema mixto fotovoltaico-eólico aislado destinado a abastecer de forma continua la demanda energética de una vivienda rural sin acceso confiable a la red eléctrica.

A partir de una caracterización climática, basada en datos como, horarios de irradiancia global, temperatura ambiente, ángulo de incidencia y velocidad del viento, se establecieron los parámetros fundamentales que condicionan el aprovechamiento solar y viento en el emplazamiento de estudio. De igual modo, el levantamiento detallado del perfil de carga residencial permitió determinar con precisión la potencia pico y la energía diaria necesarias, diferenciando entre consumos críticos y máximos, así como el factor de simultaneidad real de los equipos.

Sobre esta base se seleccionaron y dimensionaron los componentes clave como lo son los:

Módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino, regulador MPPT, banco de baterías con profundidad de descarga segura e inversor adecuado a las cargas previstas.

El proceso de dimensionamiento, integró pérdidas por temperatura, suciedad y orientación, garantizando un margen de seguridad suficiente para cubrir la demanda en los periodos de menor disponibilidad solar. El estudio mostro que la optimización del ángulo de incidencia incrementa significativamente la energía fotovoltaica captada y el aporte de la generación eólica con los aerogeneradores elegidos, le dieron una buena robustez al sistema.

La validación dinámica mediante simulaciones anuales en Python, corroboró el desempeño energético del sistema bajo condiciones reales, verificando que el estado de carga de las baterías se mantiene dentro de rangos operativos seguros durante todo el año.

En conjunto, los resultados confirman que la metodología aplicada, desde la caracterización climática y el modelado detallado de la demanda hasta el dimensionamiento de componentes y la verificación por simulación, constituye un marco robusto y replicable para diseñar soluciones fotovoltaicas-eólicas aisladas en contextos rurales. El sistema propuesto representa una alternativa energética sostenible, escalable y operativamente segura, capaz de mejorar la calidad de vida en comunidades desoladas y de contribuir a la reducción de la brecha de acceso a la energía en regiones con infraestructura eléctrica limitada.

13. Citas Bibliográficas:

- Abella, M. A. (s.f.). Sistemas fotovoltaicos [Tesis de maestría, CIEMAT].
- Alvarado Ladrón de Guevara, J. (2018). Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica aislada [Disponible en: https://oa.upm.es/52204/1/PFC_JORGE_ALVARADO_LADRON_DE_GUEVARA.pdf]
- Amazings, N. (2024). Las características del espectro solar [Accedido: 24 abr. 2025]. <https://noticiasdelaciencia.com/art/51649/las-caracteristicas-del-espectro-solar>.
- Aoun, N., Saheb-Koussa, D., Malek, A., y Haddadi, A. (2022). Methodology for predicting the PV module temperature based on actual and estimated weather data [Energy Conversion and Management: X, Vol. 14, 100182].
- Autoconsumo Web. (s.f.). Orientación e inclinación de los paneles solares fotovoltaicos. <https://autoconsumoweb.es/orientación-e-inclinación-paneles-solares-fotovoltaicos/>
- Bamisile, O., Acen, C., Cai, D., Huang, Q., y Staell, I. (2025). The environmental factors affecting solar photovoltaic output [DOI: 10.1016/j.rser.2024.115073; Handle RePEc: RePEc: eee: rensus:v:208:y:2025:i:c:s1364032124007998]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124007998>
- Betancur, M. T. (2016). Diseño e implementación de un regulador solar de potencia de bajo peso para controlar la carga de la batería de un vehículo solar. [Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Pereira] [Trabajo de Grado].
- Diversidad Climática: Elementos del Clima (s.f.).
- Blog de Ingeniería Industrial. (2023). Irradiancia, irradiación y radiación solar [Consultado el 25 de abril de 2025]. <https://blogs.udima.es/ingenieria-industrial/irradiancia-irradiación-y-radiación-solar/>
- Bottinelli, M., Peretti, G., Meyer, E., y Ionescu, A. (2013).
- Core.ac.uk. (2023). Análisis de pérdidas por suciedad en plantas fotovoltaicas [Accedido a través de CORE; contenido original de proyecto sobre ensuciamiento en sistemas FV]. <https://core.ac.uk/reader/288501860>


- Cotelo, R. B. (2022, diciembre). Optimización de diseño de plantas solares fotovoltaicas [Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Republica] [Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía]. http://les.edu.uy/tesis/master_rafael-bruno.pdf
- Dexen. (s.f.). Celda Solar Monocristalina.
- Electricidad, S. (2021). Ángulos solares y su importancia para el diseño de sistemas fotovoltaicos.
- Fiallos Chamorro, D. D. (2020, octubre). Determinación del punto óptimo de potencia de paneles fotovoltaicos en base a variables difusas mediante el modelo de Liu Jordan [Disponible en el repositorio institucional (UPS TTS187). Accedido el 3 de agosto de 2025]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19344/1/UPS%20-%20TTS187.pdf>
- Gala García, J. (2022). Análisis y dimensionado de los convertidores CC/CA [Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática].
- Guijarro, J. L., Mas, J. M., Leguizamón, J. G., Corbella, C. A., Galindo, A., Pelli, M. L., Ramos, M., y Velaz Ortiz, R. (s.f.). Apoyo Movimiento Aparente del Sol – FAU
- Krannich Solar México. (2025). Un poco de geometría solar para los que inician en el sector. <https://krannich-solar.com/mx-es/blog/un-poco-de-geometria-solar-para-los-que-inician-en-el-sector/>
- Martínez Velastegui, M. A., y Mora Cotto, A. B. (2022). Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica en vivienda en zona rural donde no llega el tendido eléctrico situado en el Golfo de Guayaquil Comunidad Masa 2 [Asesor: Carlos Fernando Chávez Córdova; 99 p.]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22810/1/UPS-GT003826.pdf>
- Ministerio de Energía de Chile. (2020, diciembre). Sistemas de Almacenamiento con Energía Solar Fotovoltaica en Chile.
- Ministerio de Industria, E. y M. (2020). Diagnóstico sobre los problemas de acceso a la energía eléctrica en Uruguay.
- Redway Battery. (s.f.). ¿Cómo afecta el ángulo de incidencia a la eficiencia de la energía solar?
- SACLIMA Solar Fotovoltaica. (2024). Como optimizar una instalación con reguladores MPPT [Accessed: 14 Sep. 2024]. <https://www.saclimafotovoltaica.com/reguladores-mppt/>

- SFE Solar. (s.f.). Equipos fotovoltaicos y baterías solares - Parte III
- Universidad de Investigación y Desarrollo (UDI). (2020). FDC 125 WA-SS [Accedido: 19 abr. 2025]. [http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/8311/FDC % 20125 % 20WA - SS. pdf? sequence=1](http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/8311/FDC%20125%20WA-SS.pdf?sequence=1)
- Universidad Técnica de Cotopaxi. (2024). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto para la gestión de la energía en redes eléctricas inteligentes [Repositorio Digital - Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador].
- Vizcaya Romero, A. (2020, febrero). Calculo y diseño de una instalación fotovoltaica en una escuela en Bouak (Costa de Mar I) [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid].
- García, J. A. (s.f.). Aplicación de la energía solar fotovoltaica en una vivienda unifamiliar. <https://www.monografas.com/trabajos-pdf5/aplicación-energía-solar-fotovoltaica-vivienda-unifamiliar/aplicación-energía-solar-fotovoltaica-vivienda-unifamiliar>.
- Merchan, R. A. P., y Medina, J. P. V. (2022). Valoración del rendimiento de paneles solares basado en el ángulo de inclinación.
- Moragues, J., & Rapallini, A. (1990). Conservación del medio ambiente a través del empleo de fuentes nuevas y renovables y del uso racional de la energía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, (1), 83-102.
- Kirby, R. S. (1990). *Engineering in history*. Courier Corporation.
- del Tajo, C. H. (2024). Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.
- Calle Pobre, J. M. (2020). Estudio de viabilidad de instalación fotovoltaica para vivienda unifamiliar.
- Durañona, V. (2012). Actualización de la estadística de vientos extremos para Uruguay. *In II Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Vientos (CLIV)(La Plata, 5, 6 y 7 de diciembre de 2012)*.
- Gurín, M., Cornalino, E., De Vera, A., Draper, A., Terra, R., Abal, G., ... & Chaer, R. (2016). Análisis de complementariedad de los recursos eólico y solar para su utilización en la generación eléctrica en gran escala en Uruguay.
- UTE. (2021, junio). Reglamento de baja tensión: Instalaciones interiores o receptoras. Capítulo II: Anexo (N.5/Anexo) [PDF]. <https://portal.ute.com.uy/sites/default/files/files-cuerpo-paginas/C-02-anexo.pdf>

ANEXOS 1

Los datos estadísticos utilizado en este trabajo, como son los de irradiación y velocidad de vientos, se pueden encontrar en el sitio abajo descrito y a continuación se adjunta una abreviación de Excel utilizado.

- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., Muse, P., (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. Energy Procedia 57:1237-1246, 10.1016/j.egypro.2014.10.072. <http://les.edu.uy/productos/>

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO PARA APLICACIONES DE ENERGÍA SOLAR RIVERA - PLANILLA HORARIA													 LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA								
Versión 2.4, junio de 2024																					
ESTACIÓN RIVERA			VARIABLES METEOROLÓGICAS						COLUMNAS DE METADATOS												
LAT: -30,90 (deg).			GHI - Irradiancia global en plano horizontal (W/m2).						DOY - Día Juliano (día del año).												
LON: -55,54 (deg).			DNI - Irradiancia directa en incidencia normal (W/m2).						MES - Mes del año.												
ALT: 240 metros s.n.m.			GT120 - Irradiancia global en plano inclinado a 20° (W/m2).						DIA - Día del mes.												
			GT135 - Irradiancia global en plano inclinado a 35° (W/m2).						HS - Hora del día.												
			GT145 - Irradiancia global en plano inclinado a 45° (W/m2).						IDT - Tiempo desde inicio del año (en días).												
DATOS APORTADOS			GT160 - Irradiancia global en plano inclinado a 60° (W/m2).						CZ - Coseno del ángulo zenital.												
INUMET, Uruguay.			GT190 - Irradiancia global en plano inclinado a 90° (W/m2).						AS - Azimut solar (deg).												
INIA, Uruguay.			TAM - Temperatura de aire ambiente (°C).						AS - Altura solar (deg).												
UTE, Uruguay.			HRE - Humedad relativa (%).																		
LES/UdelaR, Uruguay.			PAM - Presión atmosférica (hPa).																		
HORA UTC (GMT-0)			VV10 - Módulo de velocidad de viento a 10 metros (m/s).																		
			DV10 - Dirección de velocidad de viento a 10 metros (deg).																		
			VV20 - Módulo de velocidad de viento a 20 metros (m/s).																		
			DV20 - Dirección de velocidad de viento a 20 metros (deg).																		
MEMORIA TÉCNICA: Año Meteorológico Típico para Aplicaciones de Energía Solar (AMTUs): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay. R. Alonso-Suárez et al (2016). Disponible en: http://les.edu.uy																					
DOY	MES	DIA	HS	IDT	GHI	DNI	GT120	GT135	GT145	GT160	GT190	TAM	HRE	PAM	VV10	DV10	VV20	DV20	CZ	AS	GS
1	1	1	0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	28,0	70	1011,1	3,2	118	4,7	89	####	0,0	0,0
1	1	1	1	0,042	0	0	0	0	0	0	0	27,2	71	####	3,6	112	4,7	100	####	0,0	0,0
1	1	1	2	0,083	0	0	0	0	0	0	0	26,2	77	####	4,0	104	4,6	110	####	0,0	0,0
1	1	1	3	0,125	0	0	0	0	0	0	0	25,8	79	####	4,1	95	4,5	116	####	0,0	0,0
1	1	1	4	0,167	0	0	0	0	0	0	0	25,1	84	####	3,7	80	4,3	117	####	0,0	0,0
1	1	1	5	0,208	0	0	0	0	0	0	0	24,8	85	####	3,3	65	4,0	115	####	0,0	0,0
1	1	1	6	0,250	0	0	0	0	0	0	0	24,2	87	####	3,0	55	3,7	113	####	0,0	0,0
1	1	1	7	0,292	0	0	0	0	0	0	0	23,6	88	1011,1	2,8	47	3,8	122	####	0,0	0,0
1	1	1	8	0,333	0	0	0	0	0	0	0	23,2	88	####	2,7	41	3,4	125	####	0,0	0,0
1	1	1	9	0,375	27	100	15	14	14	13	12	24,3	83	####	2,4	42	2,7	124	####	2,7	####
1	1	1	10	0,417	195	497	122	64	46	47	48	25,0	79	####	2,0	50	2,9	120	####	14,6	####
1	1	1	11	0,458	405	648	335	263	209	122	80	27,4	71	####	1,6	59	4,5	117	####	27,0	####
1	1	1	12	0,500	622	778	565	486	419	303	101	29,2	65	####	1,6	59	4,1	121	####	39,8	-35,5
1	1	1	13	0,542	809	852	769	689	614	475	136	30,8	62	####	2,2	50	4,0	127	####	52,6	-88,2
1	1	1	14	0,583	948	892	923	843	762	608	216	32,8	58	####	2,9	42	4,1	110	####	65,4	-77,9
1	1	1	15	0,625	1028	910	1012	932	849	687	264	33,7	49	####	3,2	63	4,3	131	####	77,3	-54,7
1	1	1	16	0,667	1044	913	1030	951	867	703	274	34,8	42	####	3,4	195	4,3	144	####	81,5	23,9
1	1	1	17	0,708	996	903	976	896	814	655	245	35,3	41	####	3,6	327	4,9	136	####	71,6	69,3
1	1	1	18	0,750	885	875	854	773	695	548	180	35,8	37	####	3,5	332	5,1	145	####	59,1	83,6
1	1	1	19	0,792	721	820	672	593	521	392	110	35,6	39	####	3,1	227	4,9	140	####	46,2	92,0
1	1	1	20	0,833	509	696	446	372	312	212	94	35,0	42	####	2,7	116	5,3	121	0,551	33,4	98,7
1	1	1	21	0,875	295	563	223	159	112	63	67	33,7	46	####	2,7	82	5,0	136	####	20,8	105,1

- A continuación, se presenta a modo de ejemplo el script en Python utilizado para generar la gráfica del promedio mensual de vientos en el sitio, con los datos del Excel anteriormente mencionado.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Nombre del archivo a cargar
nombre_archivo = "Historicos_de_vientos1.xlsx"

# Definición de las columnas de interés
# Columna MES - Mes del año. - Asumimos Columna C (índice 2)
# Columna Wind Speed [m/s] (Velocidad del viento) - Asumimos Columna Q (índice 16)

# 1. Leer el archivo CSV, ajustando el encabezado y seleccionando columnas
try:
    df = pd.read_csv(
        nombre_archivo,
        header=26,
        usecols=['MES - Mes del año.', 'Wind Speed [m/s]'],
        sep=',',
        encoding='latin1'
    )

    # 2. Renombrar las columnas para facilitar el manejo
    df.columns = ['Mes', 'Velocidad_Viento']

    # 3. Limpieza y conversión de datos
    # Forzar la conversión a numérico para ambas columnas
    df['Mes'] = pd.to_numeric(df['Mes'], errors='coerce', downcast='integer')
    df['Velocidad_Viento'] = pd.to_numeric(df['Velocidad_Viento'], errors='coerce')

    # Eliminar filas con valores faltantes (NaN) después de la conversión
    df = df.dropna(subset=['Mes', 'Velocidad_Viento'])

    # Asegurarse de que 'Mes' sea un entero
    df['Mes'] = df['Mes'].astype(int)

    # 4. Agrupar los datos por mes y calcular la velocidad promedio
    # Esto genera una Serie de Pandas con 12 valores, uno para cada mes
    promedio_mensual = df.groupby('Mes')['Velocidad_Viento'].mean().reset_index()

    # 5. Generar la gráfica de barras

    # Mapeo de números de mes a nombres para mejor visualización
    nombres_meses = [
        'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun',
        'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dic'
    ]

    plt.figure(figsize=(12, 6))

    # Crear el gráfico de barras
    plt.bar(
        promedio_mensual['Mes'],
        promedio_mensual['Velocidad_Viento'],
        color='teal',
        alpha=0.7
    )

    # Configurar títulos y etiquetas
    plt.title('Velocidad Promedio del Viento por Mes (m/s)', fontsize=16)
    plt.xlabel('Mes del Año', fontsize=12)
    plt.ylabel('Velocidad Promedio del Viento (m/s)', fontsize=12)

    # Configurar el eje X con los nombres de los meses
    plt.xticks(promedio_mensual['Mes'], nombres_meses)
    plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.5)

    # 6. Mostrar la gráfica
    plt.show()

except FileNotFoundError:
    print(f"Error: El archivo '{nombre_archivo}' no se encontró.")
except Exception as e:
    print(f"Ocurrió un error inesperado al procesar los datos: {e}")
```

