



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO
PARA UNA VIVIENDA RURAL AISLADA DE LA RED EN EL DISTRITO
DE PAUCARCOLLA**

PRESENTADA POR:

UBALDO YANCACHAJLLA TITO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

PUNO, PERÚ

2021



DEDICATORIA

A la memoria eterna de mi querido padre y mis abuelos que velan espiritualmente por el bienestar de toda mi familia, y darme la seguridad completa de que no estoy solo cuando me sienta abatido por mis problemas.

Dedico a mis queridos hermanos y mi madre con todo mi cariño, y mi profundo agradecimiento por su apoyo incondicional que hace de mí cada día un mejor ser humano



AGRADECIMIENTOS

Hacer extensible mi gran sincero agradecimiento a la Escuela de Post grado de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, en especial medida al Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, y a su calificada plana docente que me ha guiado en el campo del saber y consolidación científica.

Agradezco además a todos y cada uno de aquellos quienes pusieron un granito de arena colaborando para culminar con éxito este proyecto; Dr. Germán Belizario Quispe por su orientación y tiempo donado generosamente en cada una de las facetas dentro del desarrollo y avances de este trabajo de investigación.

A las instituciones que contribuyeron al trabajo de investigación en especial al SENAMHI de Puno, por las facilidades proporcionadas.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	3
1.1.1 La energía eólica	3
1.1.2 Características de la capa límite atmosférica	13
1.1.3 Energía solar	34
1.1.4 Almacenamiento de energía	45
1.1.5 Inversores y controladores de carga	48
1.1.6 Evaluación de recursos de energía solar y eólica	49
1.2 Antecedentes	52

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema	55
2.2 Enunciados del problema	56
2.3 Justificación	56
2.4 Objetivos	57
2.4.1 Objetivo general	57
2.4.2 Objetivos específicos	57
2.5 Hipótesis	58
2.5.1 Hipótesis general	58
2.5.2 Hipótesis específicas	58



CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudio	59
3.2	Población	59
3.3	Muestra	59
3.4	Metodología de la investigación	60
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	60
3.5.1	Pasos para el análisis y diagramas de flujo del software HOMER	60

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Evaluación del recurso eólico en Paucarcolla	62
4.1.1	Tratamiento de datos	63
4.1.2	Rosa de vientos	65
4.1.3	Distribución de Weibull	66
4.2	Análisis del potencial de energía solar en Paucarcolla	69
4.3	Determinación de la demanda	72
4.3.1	Panel fotovoltaico	72
4.3.2	Turbina eólica	73
4.3.3	Batería y convertidor	75
4.4	Configuración del sistema de energía híbrida eólica y solar	75
4.4.1	Resultados obtenidos en las simulaciones	75
4.4.2	Análisis tecno económico de los resultados	79
4.4.3	Datos económicos	82
4.4.4	Impacto ambiental	82
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	85
	ANEXOS	92

Puno, 18 de octubre de 2021

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería.
TEMA: Recursos energéticos solares y eólica.
LÍNEA: Recursos Naturales y Medio Ambiente.



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Potencia por unidad de área disponible a partir del viento constante (densidad del aire = 1,225 kg/m ³)	12
2. Valores de rugosidad z_0 para algunos tipos de terreno	22
3. Capacidad de producción eólica por continentes en el mundo	23
4. Capacidad de producción eólica por países en el mundo	23
5. Centrales eólicas en el Perú	24
6. Producción de gases contaminantes en kg/MW-h	32
7. Datos de radiación solar en el Perú	43
8. Parques solares fotovoltaicas	44
9. Promedios mensuales de las velocidades del viento (m/s), años 2019 y 2020	62
10. Los valores de los parámetros de Weibull para el año 2018	67
11. Probabilidad de viento mayor o igual a 3 m/s para el año 2018	68
12. Radiación solar diaria promedio en meses	71
13. Especificaciones eléctricas del módulo solar CS6K-295MS	73
14. Componentes y sus costos del sistema optimizado híbrido eólico fotovoltaico	81
15. Tabla de valores de la estación meteorológica de Illpa	92
16. Consumo asumido para el estudio	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Patrón mundial de los vientos superficiales	5
2. Ilustración del viento geostrófico; F_p , fuerza de presión en el aire; F_c , fuerza de Coriolis.	6
3. Ilustración del gradiente de viento U_{gr} ; R , radio de curvatura	7
4. Variaciones diurnas en el flujo del viento en montañas y valles debido al calentamiento solar	9
5. Flujo de aire a través de un disco de rotor.	11
6. Perfil de velocidad experimental	19
7. Capa límite atmosférica	22
8. Velocidad del viento promedio en Paucarcolla	24
9. Atlas eólico del Perú. Departamento Puno	26
10. Densidad de potencia eólica media anual a 50 m, en el sur del Perú	27
11. Flujo de aire circulando a través del área (A) barrida por el rotor	28
12. Tipos de turbinas de eje horizontal y eje vertical y su eficiencia	30
13. Diagrama de partes que constituyen una turbina eólica.	31
14. Variación mensual de la transmisividad (H/H_o) y heliofanía relativa (n/N)	37
15. Coordenadas horizontales solares y ángulo de incidencia	39
16. Energía solar incidente diaria en Puno	41
17. Mapa de energía solar incidente diaria promedio anual	42
18. Radiación solar en Paucarcolla	44
19. Diferentes tipos de baterías de descarga profunda	47
20. Configuración esquemática del sistema híbrido autónomo	50
21. Diagrama de flujo del programa HOMER.	61
22. Promedios de velocidad del viento (m/s) según meses (1981 a 2020) y la regresión lineal correspondiente.	63
23. Reporte de la regresión lineal de la velocidad de viento(m/s) según meses (de 1981 a 2020)	64
24. Comportamiento del viento en Paucarcolla	65
25. Rosa de vientos para Paucarcolla	66
26. Función densidad de probabilidad de Weibull	69
27. Distribución de la frecuencia de la clase de vientos.	69



28. Promedios de la radiación solar según meses (1985 a 2020) y la regresión lineal correspondiente	70
29. Reporte de la regresión lineal de la radiación solar según meses (1985 a 2020)	71
30. Perfil de carga para el análisis	72
31. Curva de potencia del aerogenerador Bergey XL1	74
32. Configuración del sistema híbrido eólico-solar conectado a la red en HOMER	75
33. Resultados de la simulación HOMER	77
34. Porcentaje de producción de energía para el escenario E2	78
35. Porcentaje de producción de energía para el escenario E1	78
36. Costos e ingresos distribuidos a lo largo de la vida útil del proyecto del escenario E1.	79
37. Costos e ingresos distribuidos a lo largo de la vida del proyecto del escenario E2.	80
38. Resumen de costos por componente	80
39. Resumen de costos por rubro	81
40. Demanda asumida por meses para el estudio	93
41. Características del batería ingresado en HOMER	93
42. Características de la batería empleada.	94



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Datos de SENAMHI	92
2. Resultados computacionales con HOMER	93
3. Características técnicas de los elementos auxiliares	94



RESUMEN

El consumo creciente de electricidad impulsa el desarrollo del país. Esta demanda de electricidad ha sido abastecida principalmente por fuentes fósiles de energía el cual causa daños al medio ambiente. El objetivo de esta tesis es investigar las fuentes de energía renovable de los sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos para una casa rural aislada de la red eléctrica en Paucarcolla, Perú. El potencial eólico y solar se evalúa con datos de fuentes disponibles como SENAMHI y NASA. Para optimizar el sistema híbrido de energía eólica fotovoltaica se utilizó el programa Hybrid Optimization Model for Renewable Electric Energy (HOMER). El resultado del análisis es una lista de posibilidades de suministro de energía. También se obtuvo un costo de \$ 0,335/kWh por la energía del sistema híbrido de energía eólica fotovoltaica, lo que muestra una factibilidad económica para implementar el sistema en el sitio de estudio.

Palabras clave: energía eólica, energía fotovoltaica, sistema aislado, sistema híbrido de energía renovable.



ABSTRACT

The increasing consumption of electricity drives the development of the country. This demand for electricity has been supplied mainly by fossil energy sources which cause damage to the environment. The objective of this thesis is to investigate the renewable energy sources of hybrid wind-photovoltaic systems for a rural house isolated from the electricity grid in Paucarcolla, Peru. The wind and solar potential is evaluated with data from available sources such as SENAMHI and NASA. To optimize the hybrid photovoltaic wind energy system, the Hybrid Optimization Model for Renewable Electric Energy (HOMER) program was used. The result of the analysis is a list of power supply possibilities; A cost of \$ 0,335/kWh was also obtained for the energy of the hybrid photovoltaic wind energy system, which shows an economic feasibility to implement the system at the study site.

Keywords: Wind energy, photovoltaic energy, isolated system, hybrid renewable energy system.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el consumo creciente de electricidad impulsa el desarrollo de diferentes formas de uso de energía en todo el mundo. Esta demanda de electricidad ha sido abastecida principalmente por fuentes fósiles de energía. Con un alto impacto en la economía mundial causado por las crecientes fluctuaciones de precios de los combustibles fósiles, debido a problemas geopolíticos y/o desastres ambientales, la búsqueda de soluciones que promuevan la sostenibilidad del estilo de vida actual de las sociedades está creciendo en importancia, lo que puede salvar la creciente demanda de energía en economías emergentes como Perú.

En Perú, el suministro de electricidad se realiza principalmente a través de líneas de transmisión, lo que crea dificultades para satisfacer las regiones distantes o remotas que, debido a las características orográficas de los lugares donde viven las personas o al aislamiento geográfico, aún no están conectados a la red nacional convencional, ya que la densidad de población a suministrar es baja y no justifica grandes inversiones que representen la expansión de la red, los costos de las líneas de red y el mantenimiento de la distribución de energía.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo estudiar la viabilidad de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para la producción local de electricidad con el fin de alimentar a las comunidades rurales y determinar las circunstancias en las que un sistema de esta naturaleza se vuelve económicamente viable para un sitio específico en la zona rural de Puno.

El trabajo se ha realizado a través de la aplicación de las técnicas para verificar las fuentes de energías renovables tanto la eólica y solar.

Dentro de este marco, la investigación se ha dividido en los siguientes capítulos:

El Capítulo I, se aboca al marco teórico, y dentro de ello, los antecedentes del estudio, bases teóricas, normatividad.

El Capítulo II, contempla el planteamiento del problema y su respectiva formulación, así mismo el enunciado de los objetivos y la justificación de la investigación.



El Capítulo III, describe la metodología del estudio, iniciando con el ámbito de estudio, población y muestra, descripción de métodos por objetivos específicos, instrumentos y materiales y operacionalización de variables.

El Capítulo IV, describe los resultados y discusión del estudio, iniciando con los resultados por objetivos haciendo uso del software HOMER



CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 La energía eólica

El viento como fuente de energía ha sido utilizado por los humanos durante muchos siglos y con fines energéticos data de hace cinco mil (5000) años navegando en barcos y botes utilizados por los antiguos egipcios. Su uso ocurre a través de la conversión de energía cinética traslacional en energía cinética de rotación, usando turbinas eólicas para generar electricidad, o molinos de viento para trabajos mecánicos para bombear agua de pozos profundos (Burton *et al.*, 2011).

La energía es un factor esencial del desarrollo socio-económico sostenible y el crecimiento económico. Las fuentes renovables de energía como la energía eólica pueden ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. El viento es la forma indirecta de energía solar y siempre se está reponiendo por el sol. El viento es causado por el calentamiento diferencial de la superficie de la tierra por el sol. Se ha estimado que aproximadamente 10 millones de MW de energía están continuamente disponibles en el viento de la tierra. La energía del viento proporciona una alternativa amigable no contaminante y la seguridad energética nacional en un momento en que la disminución de las reservas mundiales de combustibles fósiles pone en peligro la sostenibilidad a largo plazo de la economía global.

La fuente original de la energía renovable contenida en el recurso eólico de la tierra es el sol. Los vientos globales son causados por diferencias de presión en la superficie de la tierra debido al calentamiento desigual de la tierra por la radiación solar. Por

ejemplo, la cantidad de radiación solar absorbida en la superficie de la tierra es mayor en el ecuador que en los polos. La variación en la energía entrante establece células convectivas en las capas inferiores de la atmósfera (la troposfera). En un modelo de flujo simple, el aire se eleva en el ecuador y se hunde en los polos. La circulación de la atmósfera que resulta de un calentamiento desigual está muy influenciada por los efectos de la rotación de la Tierra (a una velocidad de alrededor de 1670 kilómetros por hora en el ecuador, disminuyendo a cero en los polos). Además, las variaciones estacionales en la distribución de la energía solar dan lugar a variaciones en la circulación del aire.

Las variaciones espaciales en la transferencia de calor a la atmósfera terrestre crean variaciones en el campo de la presión atmosférica que hacen que el aire se mueva de alta a baja presión. Hay una fuerza de gradiente de presión en dirección vertical, pero esto generalmente se cancela por la fuerza gravitatoria descendente. Por lo tanto, los vientos soplan predominantemente en el plano horizontal, respondiendo a los gradientes de presión horizontales. Al mismo tiempo, hay fuerzas que se esfuerzan por mezclar las diferentes masas de aire de temperatura y presión distribuidas por la superficie de la tierra. Además del gradiente de presión y las fuerzas gravitatorias, la inercia del aire, la rotación de la tierra y la fricción con la superficie de la tierra (que resulta en turbulencia) afectan los vientos atmosféricos. La influencia de cada una de estas fuerzas en los sistemas eólicos atmosféricos varía según la escala de movimiento considerada.

Como se muestra en la figura 1, la circulación del viento en todo el mundo implica patrones de viento a gran escala que cubren todo el planeta. Estos afectan los vientos predominantes cercanos a la superficie. Cabe señalar que este modelo es una simplificación excesiva, ya que no refleja el efecto que las masas de tierra tienen en la distribución del viento.

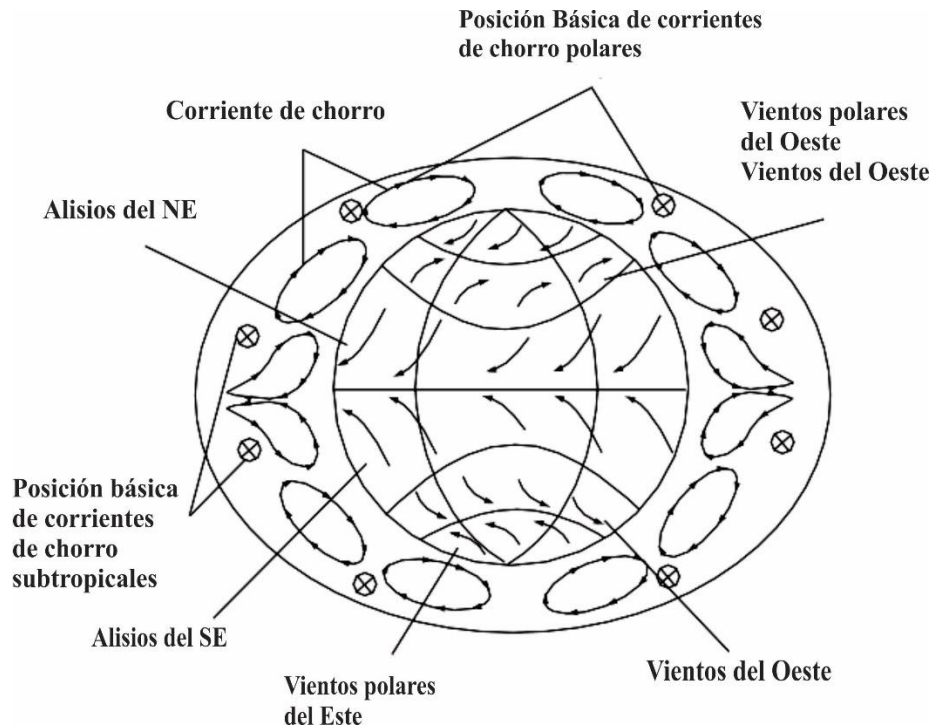


Figura 1. Patrón mundial de los vientos superficiales

Fuente: Velasco (2009).

1.1.1.1 Mecánica del movimiento del viento

En uno de los modelos más simples para la mecánica del movimiento del viento de la atmósfera, se pueden considerar cuatro fuerzas atmosféricas. Estos incluyen las fuerzas de presión, la fuerza de Coriolis causada por la rotación de la tierra, las fuerzas de inercia debidas al movimiento circular a gran escala y las fuerzas de fricción en la superficie de la tierra.

La fuerza de presión en el aire (por unidad de masa), F_p , viene dada por

$$F_p = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1.1)$$

Donde ρ es la densidad del aire y n es la dirección normal a las líneas de presión constante.

Además, $\frac{\partial p}{\partial n}$ se define como el gradiente de presión normal a las líneas de presión constante o isobaras. La fuerza de Coriolis (por unidad de masa), F_c , una fuerza ficticia causada por mediciones con respecto a un marco de referencia giratorio (la tierra), se expresa como:

$$F_c = fU \quad (1.2)$$

Donde U es la velocidad del viento y f es el parámetro de Coriolis $f = 2\omega \sin(\varphi)$ φ representa la latitud y ω la rotación angular de la tierra. Por lo tanto, la magnitud de la fuerza de Coriolis depende de la velocidad del viento y la latitud. La dirección de la fuerza de Coriolis es perpendicular a la dirección del movimiento del aire. La resultante de estas dos fuerzas, llamada viento geostrófico, tiende a ser paralela a las isobaras (ver figura 2)

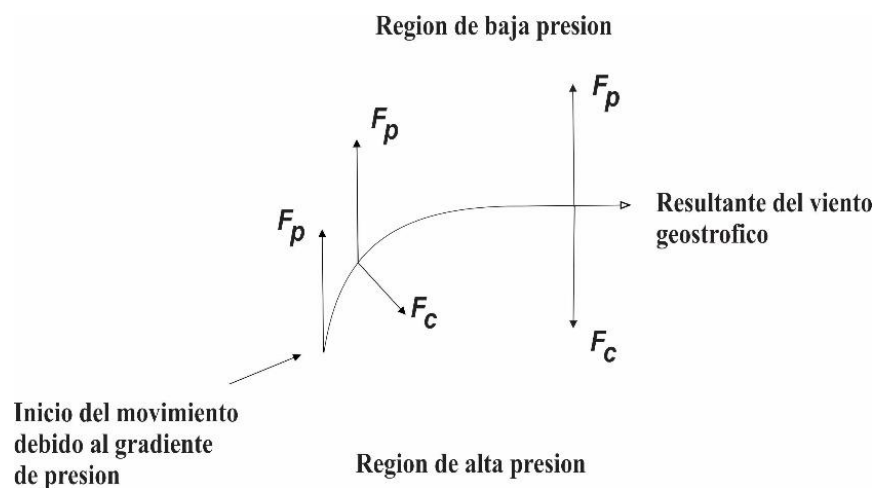


Figura 2. Ilustración del viento geostrófico; F_p , fuerza de presión en el aire; F_c , fuerza de Coriolis.

Fuente: Manwell *et al.* (2010).

La magnitud del viento geostrófico, U_g , es una función del equilibrio de fuerzas y está dada por:

$$U_g = \frac{-1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1.3)$$

Este es un caso ideal porque la presencia de áreas de alta y baja presión hace que las isobaras se curven. Esto impone una fuerza adicional sobre el viento, una fuerza centrífuga. El viento resultante, llamado viento gradiente, U_{gr} , se muestra en la figura 3. El viento de gradiente también es paralelo a las isobaras y es el resultado del equilibrio de las fuerzas:

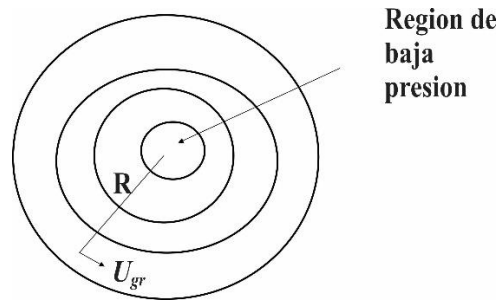


Figura 3. Ilustración del gradiente de viento U_{gr} ; R , radio de curvatura

$$\frac{U_{gr}^2}{R} = -fU_{gr} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1.4)$$

Donde R es el radio de curvatura del camino de las partículas de aire, y sustituyendo de la ecuación (1.3) por U_g da:

$$U_g = U_{gr} + \frac{U_{gr}^2}{fR} \quad (1.5)$$

Una fuerza final en el viento se debe a la fricción en la superficie de la tierra. Es decir, la superficie de la tierra ejerce una fuerza horizontal sobre el aire en movimiento, cuyo efecto es retardar el flujo. Esta fuerza disminuye a medida que la altura sobre el suelo aumenta y se vuelve insignificante por encima de la capa límite (definida como la región de la atmósfera cercana a la tierra donde las fuerzas viscosas son importantes). Por encima de la capa límite, se establece un balance de viento sin fricción y el viento fluye con la velocidad del viento de gradiente a lo largo de las isobaras. La fricción en la superficie hace que el viento se desvíe más hacia la región de baja presión. Más detalles sobre la capa límite de la tierra y sus características se darán en secciones posteriores.

Otros patrones de circulación atmosférica- El patrón de flujo de circulación general descrito anteriormente representa mejor un modelo para una superficie esférica lisa. En realidad, la superficie de la tierra varía considerablemente, con grandes masas oceánicas y terrestres. Estas diferentes superficies pueden afectar el flujo de aire debido a las variaciones en los campos de presión, la absorción de la radiación solar y la cantidad de humedad disponible. Los océanos actúan como un gran sumidero de energía. Por lo tanto, el movimiento del aire a menudo se ve afectado por la circulación oceánica. Todos estos efectos conducen a presiones diferenciales que afectan los vientos globales y muchos de los vientos regionales persistentes, como

los que ocurren durante los monzones. Además, la calefacción o el enfriamiento locales pueden provocar vientos locales persistentes de forma estacional o diaria. Estos incluyen la brisa del mar y los vientos de montaña. La circulación atmosférica a menor escala se puede dividir en circulación secundaria y terciaria (Rohatgi y Nelson, 1994). La circulación secundaria ocurre si los centros de alta o baja presión son causados por el calentamiento o enfriamiento de la atmósfera inferior. Las circulaciones secundarias incluyen lo siguiente:

- huracanes;
- circulación del monzón;
- ciclones extra tropicales.

Las circulaciones terciarias son circulaciones locales de pequeña escala caracterizadas por vientos locales.

Estos incluyen los siguientes:

- la tierra y la brisa del mar;
- vientos del valle y de la montaña;
- flujo similar al monzón;
- vientos foehn (vientos secos y de alta temperatura en el lado sotavento de las cadenas montañosas);
- tormentas eléctricas;
- tornados.

Ejemplos de circulación terciaria, vientos del valle y montaña, se muestran en la figura 4.

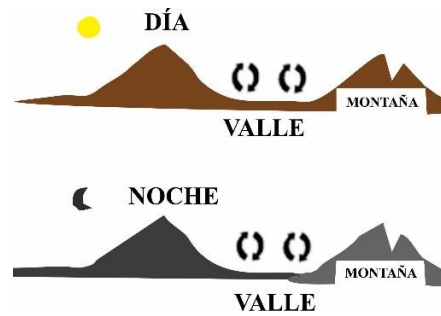


Figura 4. Variaciones diurnas en el flujo del viento en montañas y valles debido al calentamiento solar.

Fuente: López (2012)

Durante el día, el aire más cálido de la ladera de la montaña se eleva y reemplaza el aire frío más pesado por encima de él. La dirección se invierte por la noche, ya que el aire frío drena por las laderas y se estanca en el fondo del valle

La comprensión de estos patrones de viento y otros efectos locales es importante para la evaluación de posibles sitios de energía eólica.

1.1.1.2 Características temporales y espaciales del viento

Los movimientos atmosféricos varían tanto en el tiempo (segundos a meses) como en el espacio (de centímetros a miles de kilómetros). Como se discutirá en secciones posteriores, las variaciones espaciales generalmente dependen de la altura sobre el suelo y las condiciones geográficas globales y locales.

1.1.1.2.1 Variaciones en el tiempo

Siguiendo la práctica convencional, las variaciones en la velocidad del viento en el tiempo se pueden dividir en las siguientes categorías:

- interanual;
- anual;
- diurno;
- a corto plazo (ráfagas y turbulencia).

1.1.1.2.2 Variaciones debidas a la ubicación y la dirección del viento

Variaciones debidas a la ubicación

La velocidad del viento también depende mucho de las variaciones topográficas locales y de la cobertura del suelo.

Variaciones en la dirección del viento- La dirección del viento también varía en las mismas escalas de tiempo sobre las cuales varían las velocidades del viento. Las variaciones estacionales pueden ser pequeñas, del orden de 30 grados, o los vientos mensuales promedio pueden cambiar de dirección 180 grados durante un año. Las variaciones de dirección a corto plazo son el resultado de la naturaleza turbulenta del viento. Estas variaciones a corto plazo en la dirección del viento deben ser consideradas en el diseño y ubicación de la turbina eólica. Los aerogeneradores de eje horizontal deben rotar (guiñar) con los cambios en la dirección del viento. La guiñada causa cargas giroscópicas en toda la estructura de la turbina y ejerce cualquier mecanismo involucrado en el movimiento de guiñada. Los vientos cruzados debido a cambios en la dirección del viento afectan las cargas de la pala. Por lo tanto, como se discutirá más adelante, las variaciones a corto plazo en la dirección del viento y el movimiento asociado afectan la vida de fatiga de los componentes como las palas y las unidades de guiñada.

1.1.1.3 Estimación del posible recurso eólico

En esta sección se resumirá el potencial disponible del recurso eólico y sus capacidades de producción de energía a través de turbinas eólicas.

1.1.1.3.1 Energía eólica disponible

Como se ilustra en la figura 5, se puede determinar el flujo másico de aire, dm/dt , a través de un disco de rotor del área A . A partir de la ecuación de continuidad de la mecánica de fluidos, el caudal másico es función de la densidad del aire, ρ y velocidad del aire (supuesto uniforme), U , y está dado por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (1.6)$$

La energía cinética por unidad de tiempo, o potencia, del flujo está dada por:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (1.7)$$

La energía eólica por unidad de área, P/A o densidad de potencia eólica es:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (1.8)$$

Donde: A , área; U , velocidad del viento

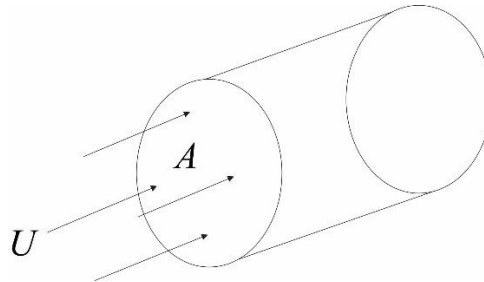


Figura 5. Flujo de aire a través de un disco de rotor.

Uno debe notar que:

- La densidad de la energía eólica es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándar (nivel del mar, 15 °C) la densidad del aire es 1,225 kg/m³.
- La potencia del viento es proporcional al área barrida por el rotor (o al diámetro del rotor al cuadrado para una máquina eólica de eje horizontal convencional).
- La densidad de la energía eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

El potencial real de producción de energía de una turbina eólica debe tener en cuenta la mecánica de fluidos del flujo que pasa a través de un rotor productor de energía, y la aerodinámica y la eficiencia de la combinación rotor/generador. En la práctica, un máximo de aproximadamente el 45% de la energía eólica disponible es aprovechado por los mejores aerogeneradores modernos de eje horizontal (Manwell *et al.*, 2010).

Tabla 1

Potencia por unidad de área disponible a partir del viento constante (densidad del aire = 1,225 kg/m³)

Velocidad del viento (m/s)	Potencia / área (W/m ²)
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550

Fuente: Manwell *et al.*(2010)

La tabla 1 muestra que la velocidad del viento, el cual es un parámetro importante e influye significativamente en la potencia por unidad de área disponible del viento.

Si se conocen velocidades promedio anuales del viento para ciertas regiones, se pueden desarrollar mapas que muestren la densidad promedio de la energía eólica sobre estas regiones. Se pueden hacer estimaciones más precisas si los promedios por hora de la velocidad, U , están disponibles por un año. Luego, se puede determinar el promedio de las estimaciones de potencia para cada hora. La densidad promedio de energía eólica, basada en promedios por hora, es:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 K_e \quad (1.9)$$

Donde \bar{U} es la velocidad media anual del viento y K_e se llama factor de patrón de energía. El factor de patrón de energía se calcula a partir de:

$$K_e = \frac{1}{N \bar{U}^3} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (1.10)$$

donde N es el número de horas en un año, 8760.

1.1.1.3.2 Estimaciones del recurso mundial

Con base en los datos de los recursos eólicos y una estimación de la eficiencia real de las turbinas de viento reales, numerosos investigadores han realizado estimaciones del potencial de energía eólica de las regiones de la tierra y de toda

la Tierra. El máximo potencial de producción de energía que se puede realizar teóricamente a partir de la energía cinética contenida en el viento es aproximadamente el 60% de la potencia disponible.

Utilizando estimaciones para los recursos eólicos regionales, se puede estimar el potencial de producción de energía (eléctrica) de la energía eólica. Es importante distinguir entre los diferentes tipos de potencial de energía eólica que pueden estimarse. Una de esas estimaciones (World Energy Council, 1993) identificó las siguientes cinco categorías:

- a) Potencial meteorológico. Esto es equivalente al recurso eólico disponible.
- b) Potencial del sitio. Esto se basa en el potencial meteorológico, pero está restringido a los sitios que están geográficamente disponibles para la producción de energía.
- c) Potencial técnico. El potencial técnico se calcula a partir del potencial del sitio, teniendo en cuenta la tecnología disponible.
- d) Potencial económico. El potencial económico es el potencial técnico que se puede realizar económicamente.
- e) Potencial de implementación. El potencial de implementación tiene en cuenta las limitaciones e incentivos para evaluar la capacidad de la turbina eólica que se puede implementar dentro de un marco de tiempo determinado.

1.1.2 Características de la capa límite atmosférica

La capa límite atmosférica, también conocida como capa límite planetaria, es la parte más baja de la atmósfera y sus características están directamente influenciadas por el contacto con la superficie de la tierra. Aquí, las cantidades físicas como la velocidad, la temperatura y la humedad relativa pueden cambiar rápidamente en el espacio y el tiempo. Por ejemplo, un parámetro importante en la caracterización del recurso eólico es la variación de la velocidad del viento horizontal con la altura sobre el suelo.

Uno esperaría que la velocidad del viento horizontal fuera cero en la superficie de la tierra y que aumentara con la altura en la capa límite atmosférica. Esta variación de la velocidad del viento con elevación se denomina perfil vertical de la velocidad del viento o cizalladura vertical del viento. En la ingeniería de energía eólica, la determinación de cizalladura del viento vertical es un parámetro de diseño importante

ya que: (1) determina directamente la productividad de una turbina eólica en una torre de cierta altura, y (2) puede influir fuertemente en la vida útil del rotor de la turbina con palas. La vida a la fatiga de la pala del rotor está influenciada por las cargas cíclicas que resultan de la rotación a través de un campo de viento que varía en la dirección vertical (Manwell *et al.*, 2010).

Hay al menos dos problemas básicos de interés con la determinación de perfiles de viento verticales para aplicaciones de energía eólica:

- Variación instantánea de las velocidades del viento en función de la altura (por ejemplo, escala de tiempo del orden de segundos).
- Variación estacional en las velocidades promedio del viento en función de la altura (p. Ej., Promedios mensuales o anuales).

Cabe señalar que estos son problemas separados y distintos, y a menudo se supone erróneamente que se puede aplicar una metodología única a ambos. Es decir, la variación de los perfiles "instantáneos" se relaciona a través de la teoría de similitud de las capas límite (Schlichting, 1979).

Por otro lado, los cambios en los promedios a largo plazo en función de la altura se relacionan con las estadísticas de la ocurrencia de varios factores influyentes, como la estabilidad atmosférica (discutida a continuación), y deben basarse en un enfoque más empírico (Justus y Mikhail, 1976).

Además de las variaciones debidas a la estabilidad atmosférica, la variación de la velocidad del viento con la altura depende de la rugosidad de la superficie y el terreno.

1.1.2.1 Densidad atmosférica y presión

Como se demuestra en la ecuación (1.8), la potencia en el viento es una función de la densidad del aire. La densidad del aire, ρ , es una función de la temperatura, T , y la presión, p , que varían con la altura. La densidad del aire seco puede determinarse aplicando la ley de los gases ideales, que se puede expresar como:

$$\rho = \frac{p}{RT} = 3.4837 \frac{p}{T} \quad (1.11)$$

Donde la densidad está en kg/m^3 , la presión está en kPa (kN/m^2), y la temperatura está en Kelvin.

El aire húmedo es ligeramente menos denso que el aire seco, pero las correcciones para la humedad del aire rara vez se utilizan.

La atmósfera estándar internacional supone que la temperatura y la presión del nivel del mar son 288,15 K y 101,325 kPa, lo que da como resultado una densidad estándar del nivel del mar de $1,225 \text{ kg/m}^3$ (ver Marks *et al.*, 1978). La presión del aire disminuye con la elevación sobre el nivel del mar.

La presión en la atmósfera estándar internacional hasta una elevación de 5000 m se aproxima muy de cerca por:

$$p = 101,29 - (0,011837)z + (4,793 \times 10^{-7})z^2 \quad (1.12)$$

Donde z es la elevación en metros y la presión está en kPa. Por supuesto, la presión real puede variar con respecto a la presión estándar a medida que cambian los patrones climáticos. En la práctica, en cualquier ubicación, las fluctuaciones de temperatura diaria y estacional tienen un efecto mucho mayor sobre la densidad del aire que los cambios diarios y estacionales en la presión y la humedad del aire.

1.1.2.2 Estabilidad de la capa límite atmosférica

Una característica particularmente importante de la atmósfera es su estabilidad: la tendencia a resistir el movimiento vertical o suprimir la turbulencia existente. La estabilidad de la capa límite atmosférica es un factor determinante para los gradientes de velocidad del viento (por ejemplo, cizalladura del viento) que se experimentan en los primeros cientos de metros sobre el suelo. La estabilidad atmosférica generalmente se clasifica como estable, neutralmente estable o inestable. La estabilidad de la atmósfera terrestre se rige por la distribución vertical de la temperatura que resulta del calentamiento radiativo o enfriamiento de su superficie y la subsiguiente mezcla convectiva del aire adyacente a la superficie. A continuación, se presenta un resumen de cómo cambia la temperatura atmosférica con la elevación (suponiendo una expansión adiabática).

1.1.2.2.1 Tasa de caída.

La tasa de caída de la atmósfera en general se define como la tasa de cambio de temperatura con la altura. Como se mostrará en el siguiente análisis, es más fácil determinar la tasa de caída calculando el cambio en la presión con la altura y usando las relaciones termodinámicas convencionales. Si la atmósfera se aproxima a un gas ideal seco (sin vapor de agua en la mezcla), la relación entre un cambio en la presión y un cambio en la elevación de un elemento fluido en un campo gravitacional viene dada por:

$$dp = -\rho g dz \quad (1.13)$$

donde p = presión atmosférica, ρ = densidad atmosférica, elevación z arriba del suelo y aceleración gravitacional g local (se supone constante aquí).

El signo negativo resulta de la convención de que la altura, z , se mide positivamente hacia arriba, y que la presión, p , disminuye en la dirección z positiva.

La primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado de gas ideal de masa unitaria sometida a un cambio de estado cuasi estático está dada por:

$$dq = du + pdv = dh - vdp = c_p dT - \frac{1}{\rho} dp \quad (1.14)$$

donde T = temperatura, q = calor transferido, u = energía interna, h = entalpía, v = volumen específico, C_p = calor específico de presión constante.

Para un proceso adiabático (sin transferencia de calor) $dq = 0$, y la ecuación (1.14) se convierte en:

$$c_p dT = \frac{1}{\rho} dp \quad (1.15)$$

1.1.2.3 Turbulencia

La turbulencia en el viento es causada por la disipación de la energía cinética del viento en energía térmica a través de la creación y destrucción de remolinos progresivamente más pequeños (o ráfagas). El viento turbulento puede tener una media relativamente constante en períodos de tiempo de una hora o más, pero en tiempos más cortos (minutos o menos) puede ser bastante variable. La variabilidad

del viento superficialmente parece ser bastante aleatoria, pero en realidad tiene características distintas. Estas características se caracterizan por una serie de propiedades estadísticas:

- intensidad de turbulencia;
- función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento;
- autocorrelación;
- escala de escala / longitud de tiempo integral;
- función de densidad espectral de potencia

El viento turbulento consiste en componentes longitudinales, laterales y verticales. La componente longitudinal, en la dirección predominante del viento, se designa como $u(z, t)$. La componente lateral (perpendicular a U) es $v(z, t)$ y la componente vertical es $w(z, t)$. Cada componente se concibe frecuentemente como consistente en un viento medio a corto plazo, por ejemplo, U , con un viento fluctuante superpuesto de media cero, \tilde{u} , agregado a él, así:

$$u = U + \tilde{u} \quad (1.16)$$

donde u = velocidad del viento longitudinal instantánea, z = altura sobre el suelo, y t = tiempo. Los componentes laterales y verticales se pueden descomponer en una media y un componente fluctuante de manera similar. En aras de la claridad, la dependencia de la altura sobre el suelo y el tiempo no se mostrará explícitamente en ecuaciones posteriores.

Tenga en cuenta que la velocidad media del viento a corto plazo, en este caso U , se refiere a la velocidad promedio del viento promediada durante un período de tiempo (corto), Δt , más largo que el tiempo característico de las fluctuaciones en la turbulencia. Este período de tiempo generalmente se toma como diez minutos, pero puede durar hasta una hora. En forma de ecuación:

$$U = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u dt \quad (1.17)$$

El viento turbulento instantáneo en realidad no se observa continuamente; en realidad se muestrea a una tasa relativamente alta. Suponiendo que el intervalo de muestra es δt , tal que $\Delta t = N_s \delta t$ donde N_s = número de muestras durante cada intervalo de corto plazo, entonces el viento turbulento puede expresarse como una

secuencia, u_i . La velocidad media del viento a corto plazo puede expresarse en forma de muestra como:

$$U = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} u_i \quad (1.18)$$

La velocidad del viento longitudinal promedio a corto plazo, U , es la que se usa con mayor frecuencia en las observaciones y se utilizará más de esa manera.

1.1.2.3.1 Intensidad de turbulencia

La medida más básica de la turbulencia es la intensidad de la turbulencia. Se define por la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad media del viento. En este cálculo, tanto la desviación media como la desviación estándar se calculan a lo largo de un período de tiempo más largo que el de las fluctuaciones turbulentas, pero más cortos que los períodos asociados con otros tipos de variaciones de la velocidad del viento (como los efectos diurnos). La duración de este período de tiempo normalmente no es más de una hora, y por convención en ingeniería de energía eólica, generalmente es de diez minutos. La frecuencia de muestreo es normalmente al menos una vez por segundo (1 Hz). La intensidad de turbulencia, TI, se define por:

$$TI = \frac{\sigma_u}{U} \quad (1.19)$$

donde σ_u es la desviación estándar, dada en forma de muestra por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_s-1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - U)^2} \quad (1.20)$$

La intensidad de la turbulencia está frecuentemente en el rango de 0.1 a 0.4. En general, las intensidades de turbulencia más altas se producen a las velocidades de viento más bajas, pero el valor límite inferior en una ubicación determinada dependerá de las características específicas del terreno y las condiciones de superficie en el sitio.

1.1.2.4 El viento estacionario: variación de velocidad del viento con altura

Como se muestra en la figura 6 (Van der Tempel *et al.*, 2006), la velocidad real del viento varía en espacio y tiempo. La velocidad real del viento, en cualquier

ubicación, también varía en tiempo y dirección alrededor de su valor medio debido al efecto de la turbulencia. De mayor importancia aquí, esta figura muestra claramente que la velocidad media del viento aumenta con la altura, lo que define el fenómeno llamado cizalladura del viento.

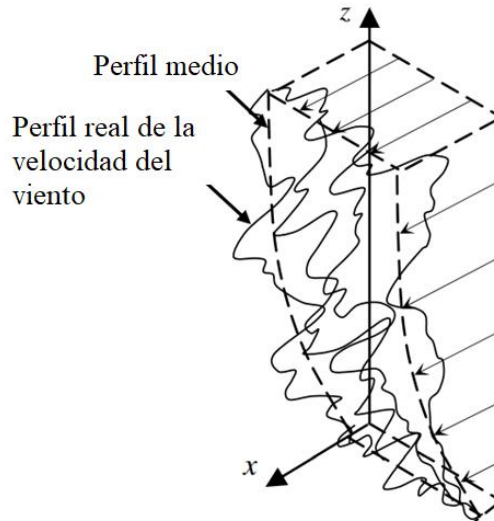


Figura 6. Perfil de velocidad experimental

Fuente: Van der Tempel *et al.* (2006)

1.1.2.4.1 Perfil logarítmico

Aunque hay varias formas de llegar a una predicción de un perfil de viento logarítmico (por ejemplo, teoría de longitud de mezcla, teoría de viscosidad de remolino y teoría de similitud), aquí se resume un análisis del tipo de longitud de mezcla proporcionado por (Wortman, 1983).

Cerca de la superficie de la tierra, la ecuación de momento se reduce a:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} \quad (1.21)$$

donde x y z son las coordenadas horizontales y verticales, p es la presión, y τ_{xz} es la tensión de corte en la dirección de x cuya normal coincide con z .

En esta región, la presión es independiente de z y los rendimientos de integración:

$$\tau_{xz} = \tau_o + z \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.22)$$

donde τ_o es el valor de superficie del esfuerzo cortante. Cerca de la superficie, el

gradiente de presión es pequeño, por lo que el segundo término en el lado derecho puede descuidarse. Además, utilizando la teoría de longitud de mezcla de Prandtl, el esfuerzo cortante se puede expresar como:

$$\tau_{xz} = \rho l^2 \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (1.23)$$

donde ρ es la densidad del aire, U la componente horizontal de la velocidad y la longitud de mezcla. Tenga en cuenta que, U se usa aquí, lo que significa que los efectos de la turbulencia se han promediado.

La combinación de ecuaciones (1.22) y (1.23) da:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \frac{U^*}{l} \quad (1.24)$$

donde

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

se define como la velocidad de fricción

Si uno asume una superficie lisa, $l = k z$, con $k = 0,4$ (constante de von Karman), entonces la ecuación (1.24) se puede integrar directamente de z_0 a z , donde z_0 es la longitud de la rugosidad de la superficie, que caracteriza la rugosidad del terreno, por lo tanto, se tiene:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1.25)$$

Esta ecuación se conoce como el perfil de viento logarítmico. La integración es desde el límite inferior de z_0 en lugar de 0 porque las superficies naturales nunca son uniformes y suaves. La tabla 2 proporciona algunas longitudes aproximadas de rugosidad superficial para varios tipos de terreno.

La ecuación (1.25) también se puede escribir como:

$$\ln(z) = \left(\frac{k}{U^*} \right) U(z) + \ln(z_0) \quad (1.26)$$

Esta ecuación se puede trazar como una línea recta en un gráfico semilogarítmico. La pendiente de este gráfico es k/U^* y de un gráfico de datos experimentales, se pueden calcular U^* y z_0 . La ley logarítmica se usa a menudo para extrapolar la velocidad del viento desde una altura de referencia, z_r , a otro nivel usando la siguiente relación:

$$U(z) / U(r) = \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right) \quad (1.27)$$

A veces, la ley logarítmica se modifica para considerar la mezcla en la superficie de la tierra, expresando la longitud de mezcla como $l = k(z+z_0)$. Cuando esto se usa, el perfil logarítmico se convierte en:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (1.28)$$

1.1.2.4.2 Perfil de ley de potencia

La ley de potencia representa un modelo simple para el perfil de velocidad del viento vertical. Su forma básica es:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha$$

donde $U(z)$ es la velocidad del viento en la altura z , $U(z_r)$ es la velocidad del viento de referencia en altura z_r , y α es el exponente de la ley de potencia.

Los primeros trabajos sobre este tema demostraron que bajo ciertas condiciones α es igual a $1/7$, lo que indica una correspondencia entre los perfiles del viento y el flujo sobre las placas planas (Schlichting, 1979).

En la práctica, el exponente α es una cantidad altamente variable. En la figura 7 se muestra la variación de la velocidad con la altura.

Tabla 2

Valores de rugosidad z_0 para algunos tipos de terreno.

Descripción del terreno	Z_0 (m)
Hielo o lodo	0,00001
Calma en mar abierto	0,0002
Mar turbulento	0,0005
Superficie de hielo	0,003
Prado de césped	0,008
Arbustos bajos	0,01
Terrenos pedregosos	0,03
Terrenos de cultivo	0,05
Terrenos con algunos árboles	0,10
Terrenos con muchos árboles, cercas y algunas construcciones	0,25
Bosques	0,50
Pueblos y suburbios	1,50
Centros de ciudades con edificios altos	3,00

Fuente: López (2012).

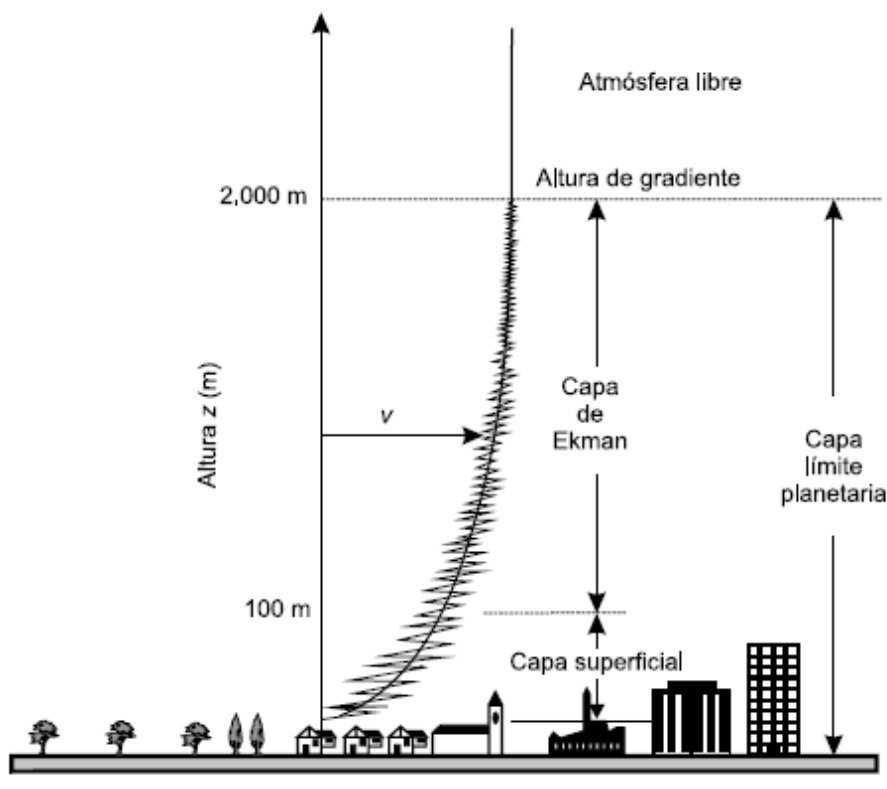


Figura 7. Capa límite atmosférica

Fuente: González y Pérez (2009).

Tabla 3

Capacidad de producción eólica por continentes en el mundo

Zona	Capacidad registrada
Mundo	676 GW
Offshore	210,5 GW
África	5,5 GW
América	176,9 GW
Asia	228,2 GW
Europa	254,9 GW
Oceanía	10,4 GW

Fuente: www.thewindpower.net/store_windfarms_view_all_es.php

Tabla 4

Capacidad de producción eólica por países en el mundo

Países	Capacidad registrada
Alemania	57 454 MW
Australia	9 221 MW
Austria	2 684 MW
Bélgica	4 038 MW
Brasil	25 348 MW
Bulgaria	644 MW
Canadá	18 026 MW
Chile	2 391 MW
China	156 447 MW
Corea del Sur	11 680 MW
Dinamarca	8 034 MW
España	23 748 MW
Estados Unidos	120 393 MW
Estonia	4 738 MW
Finlandia	4 148 MW
Francia	17 735 MW
Grecia	8 211 MW
Hungría	385 MW
India	31 695 MW
Irlanda	8 102 MW
Italia	10 912 MW
Japón	11 291 MW
Lituania	2 007 MW
México	5 947 MW
Noruega	2 501 MW
Países Bajos	8 636 MW

Polonia	16 584 MW
Portugal	5 506 MW
Reino Unido	49 145 MW
República Checa	307 MW
Rumania	3 652 MW
Suecia	13 042 MW
Taiwán	3 980 MW
Turquía	7 300 MW
Ucrania	939 MW
Uruguay	1 436 MW

Fuente: www.thewindpower.net/store_windfarms_view_all_es.php

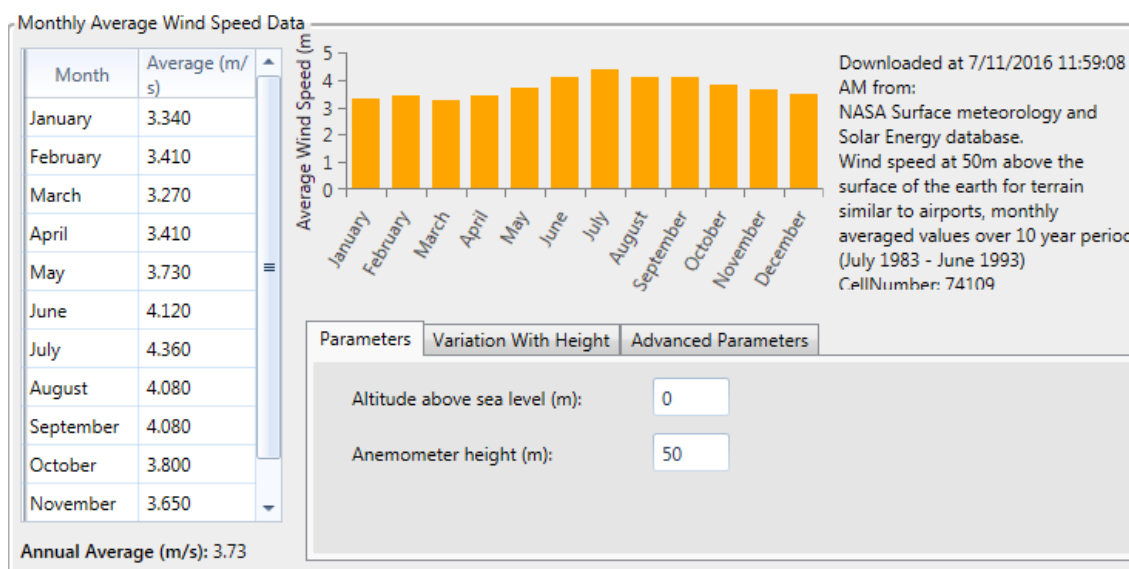


Figura 8. Velocidad del viento promedio en Paucarcolla

Fuente: NASA (s. f.)

Tabla 5

Centrales eólicas en el Perú

Nombre	Potencia (kW)	Turbinas eólicas	Offshore
Cupisnique	81 000	45	No
Mal Abrigo	250	1	No
Marcona	30 900	11	No
San Juan de Marcona	450	1	No
Talara	30 600	17	No
Tres Hermanas	97 150	33	No
Wayra I	132 000	42	No

Fuente: www.thewindpower.net/store_windfarms_view_all_es.php



En la tabla 3 se muestra la capacidad de producción eólica por continentes en el mundo destacando el continente europeo. En la tabla 4 se muestra la capacidad de producción eólica por países en el mundo donde destaca la China.

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) señaló hoy que el potencial eólico del Perú es de aproximadamente 22,450 megavatios (MW) y a la fecha se han aprovechado 239 MW en centrales de generación eléctrica, es decir 1% del potencial total. En total son cuatro los parques eólicos que operan en el país aportando 239 MW al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). En tabla 5 se muestra las centrales eólicas operativas en el Perú. En la figura 8 se muestra la velocidad del viento promedio en Paucarcolla.

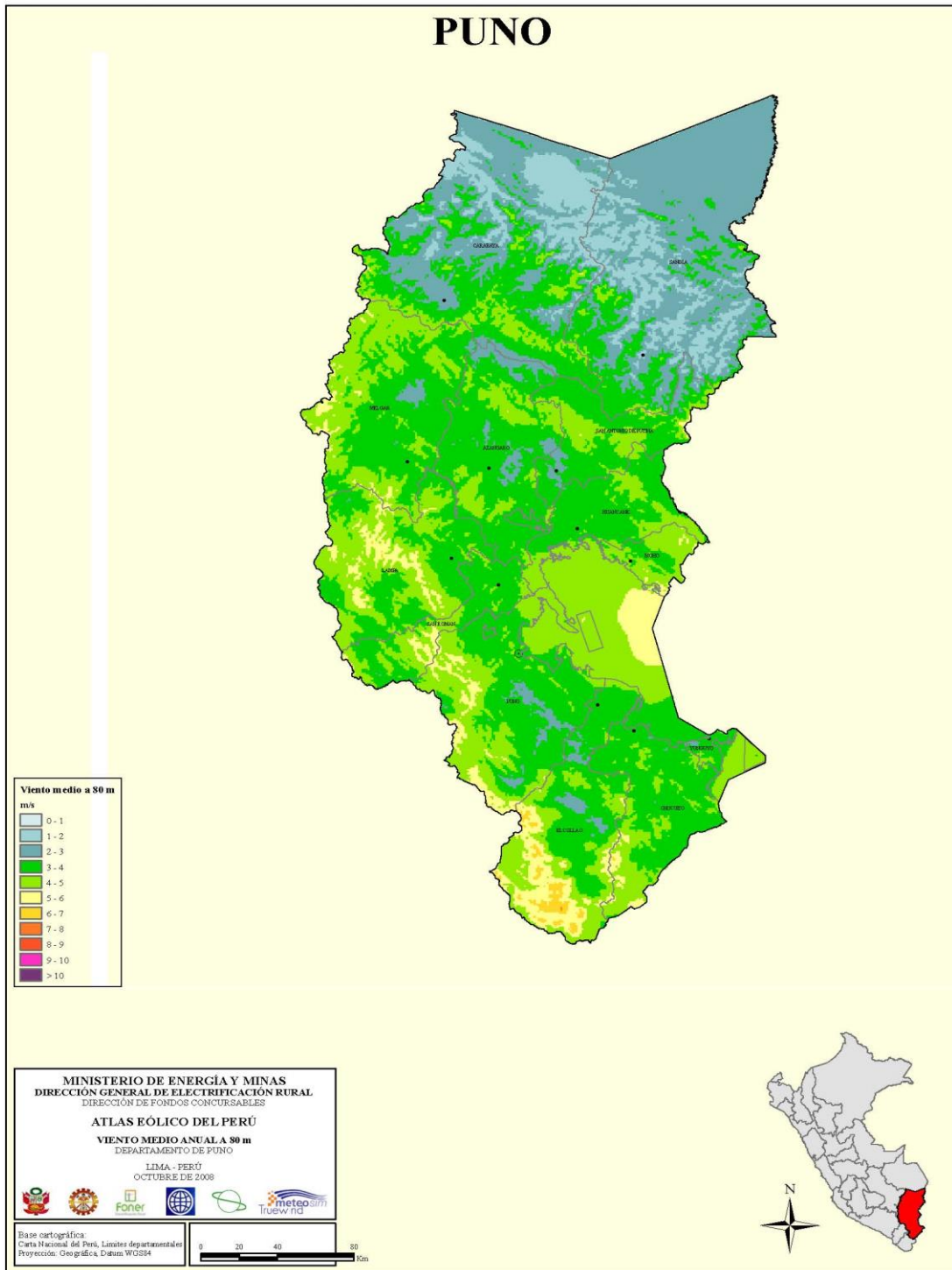


Figura 9. Atlas eólico del Perú. Departamento Puno

Fuente: Vidal (2008)

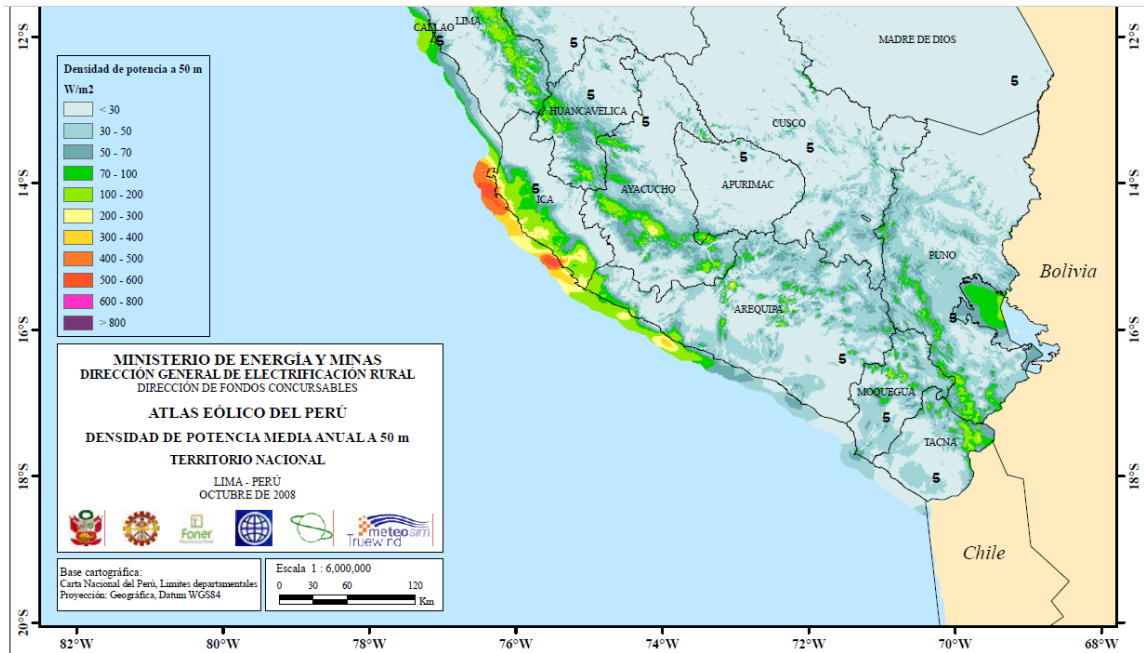


Figura 10. Densidad de potencia eólica media anual a 50 m, en el sur del Perú

Fuente: Vidal (2008)

En la figura 9 se muestra el potencial eólico del departamento de Puno a 80 metros sobre el suelo y en la figura 10 se muestra la densidad de potencia a 50 metros sobre el suelo en la zona sur del Perú.

1.1.2.5 Potencia en un tubo de corriente de aire y límite de Betz

Donde E es la energía cinética del viento con la cual trabajaremos.

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Designamos la potencia con P , también sabemos que la derivada de la energía es el cual es la potencia:

$$P = \frac{dE}{dt}$$

$$dE = \frac{1}{2}v^2 dm$$

Por lo tanto, se tiene:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2$$

También se sabe que derivada de la masa con respecto al tiempo es:

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av$$

Entonces se tiene que:

$$P = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

El teorema de Betz establece un límite máximo para la potencia que puede extraerse del flujo de un viento de velocidad v .

Analizando un flujo de aire de masa m que atraviesa el área A barrida por un rotor eólico de eje horizontal (ver figura 11). El aire se considera como fluido incompresible (densidad constante), dado que las variaciones de presión y temperatura son pequeñas. Según la ecuación de continuidad:

$$v_1 A_1 = vA = v_2 A_2 \tag{1.29}$$

El caudal másico \dot{m} se puede expresar como: $\dot{m} = \rho Av$. Siendo ρ - densidad del aire, A el área barrida por el rotor y v la velocidad a través de la sección A del rotor.

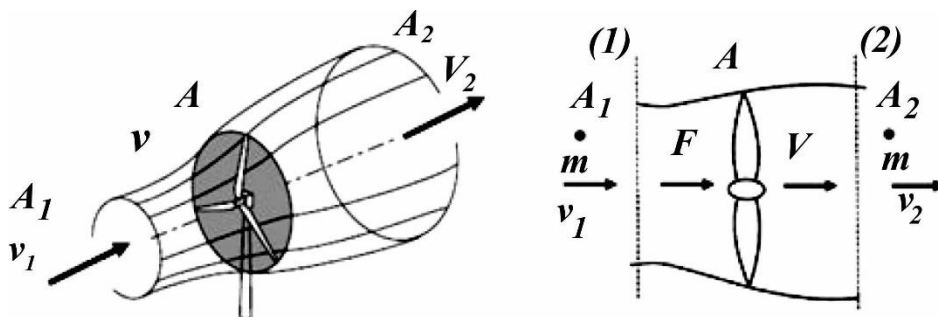


Figura 11. Flujo de aire circulando a través del área (A) barrida por el rotor

Fuente: López (2012).

A partir de la variación de la cantidad movimiento del fluido se determina la fuerza F , que el fluido ejerce sobre el rotor:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) A = \rho Av(v_1 - v_2)$$

Aplicando entre las secciones 1 y 2 el teorema de Bernoulli, y asumiendo que las áreas aproximadamente son: $A_1 = A_2 = A$, se tiene:

$$F = (P_2 - P_1) A = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \tag{1.30}$$

A partir de las expresiones anteriores se obtiene para la velocidad del viento (v) en el plano del rotor:

$$v = 0.5(v_1 + v_2) \quad (1.31)$$

Hallamos la potencia (P) como el que el producto de la fuerza F por la velocidad v ($P = F v$). Combinando las expresiones (1.30) y (1.31) se obtiene la potencia que el flujo de aire cede al rotor de la turbina:

$$P = \frac{1}{4} A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.32)$$

La condición de máxima potencia se determina por la derivada: $\frac{dP}{dv} = 0$, lo que conduce a que la máxima potencia se alcanza para una velocidad: $v_2 = \frac{v_1}{3}$

Sustituyendo en la expresión (1.32) se obtiene la potencia máxima P_{max} que teóricamente puede extraerse de un flujo de viento de velocidad v , y viene dada por:

$$P_{max} = \frac{16}{54} A \rho v_1^3 = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A v_1^3 \right) = \frac{16}{27} P_d = 0.593 P_d \quad (1.33)$$

Esta expresión constituye el teorema de Betz, según el cual la energía máxima que teóricamente puede ser aprovechada del viento es solo el 59,3% de la energía disponible (energía cinética que lleva el viento). por lo tanto, el máximo valor de C_p es igual a 0,593. En la práctica, en las modernas turbinas los valores de C_p se sitúan en el entorno de 0,5 (López, 2012).

El límite de Betz delimita la máxima energía que puede extraerse de un flujo de aire con una turbina ideal, el cual es igual al 59,3 % de la energía cinética del flujo incidente.

1.1.2.6 Tipos de turbinas eólicas.

Las clasificaciones más comunes de las turbinas eólicas tienen en cuenta el nivel de potencia, la disposición del eje de giro, la velocidad de giro del rotor y las características de operación.

Un concepto importante respecto a la clasificación de las turbinas eólicas es la velocidad específica. Esto se define como la relación entre la velocidad tangencial debida a la rotación en el extremo más alejado de la pala y la velocidad del viento

La mayoría de las turbinas eólicas (WT) son máquinas construidas para convertir la energía que contiene el viento en electricidad. La clasificación principal de esas máquinas está de acuerdo con la interacción de sus palas con el viento por las fuerzas aerodinámicas: arrastrar o levantar o una combinación de ambas; y la orientación del eje del rotor con respecto al suelo y a la torre - viento arriba o viento abajo. Según la orientación del eje, hay dos tipos: la turbina eólica de eje horizontal, o HAWT, y las turbinas eólicas de eje vertical, o VAWT (figura 12).

Entre las máquinas VAWT destacamos el Savonius (figura 12) utilizado principalmente para bombeo de agua y el Darrieus (figura 12) WT. Tienen la ventaja de recibir el viento desde cualquier dirección que no requiere mecanismos de seguimiento de la dirección del viento y que el acoplamiento entre el rotor y el generador se puede hacer a nivel del suelo, lo que permite un fácil acceso para el mantenimiento, lo que significa que las torres más pequeñas obtienen costos reducidos. La principal desventaja es que no tiene autoencendido, fluctuaciones de par altas y opciones limitadas de regulaciones a alta velocidad del viento.

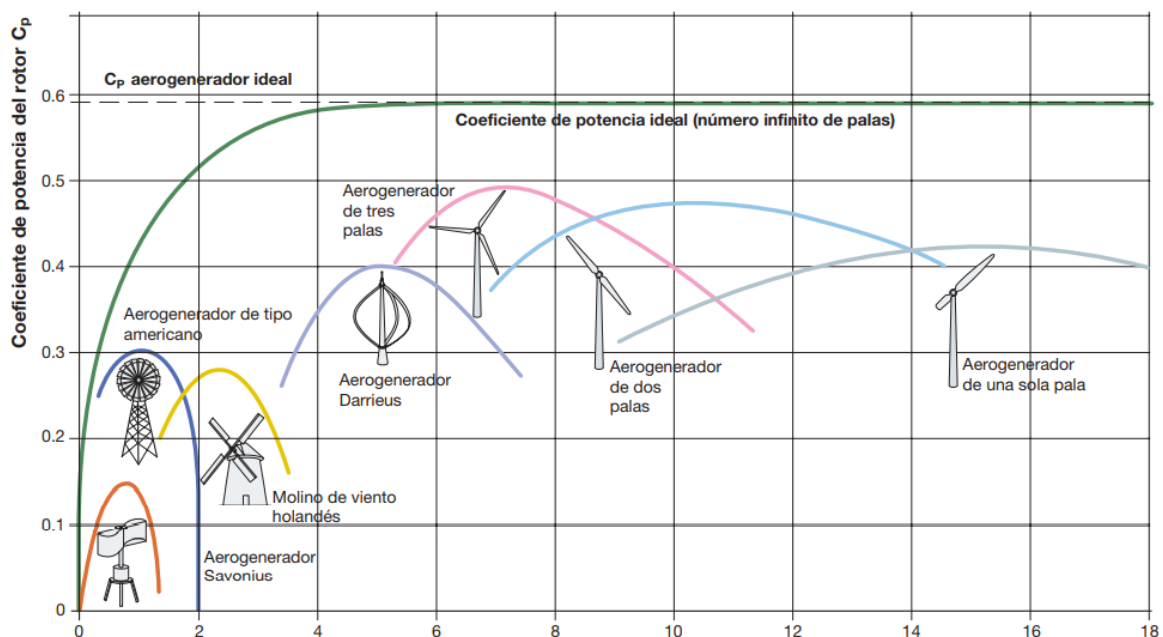


Figura 12. Tipos de turbinas de eje horizontal y eje vertical y su eficiencia

Fuente: ABB (2010).

El otro tipo es la turbina eólica de eje horizontal (HAWT) donde los rotores se mantienen perpendiculares al viento y la fuerza motriz rotatoria es la elevación y

las aspas pueden estar al frente (a favor del viento) o detrás (a favor del viento) de la torre. Los HAWT aprovechan la extracción de velocidades de viento más altas más lejos del suelo a medida que los rotores se colocan en la parte superior de una torre.

Se puede encontrar una explicación detallada de los mecanismos de trabajo de ambos tipos de WT en la literatura como (Manwell *et al.*, 2010) . En el presente trabajo, nos centraremos en los HAWT con tres palas conectadas a un cubo central, ya que es el más extendido en la industria de la energía eólica y se usa actualmente. Juntas, las palas y el cubo forman el rotor (el elemento principal para capturar energía), que están conectados a un generador eléctrico. Cuando sopla el viento, el rotor gira y el generador produce electricidad de corriente alterna (CA). Los WT con rotores de palas múltiples (20 o más palas) tienen un alto par de arranque con viento ligero y se utilizan principalmente para el bombeo de agua. La configuración principal y los componentes del HAWT se muestran en la figura 13, que consiste en una torre y una góndola montadas en la parte superior de una torre.

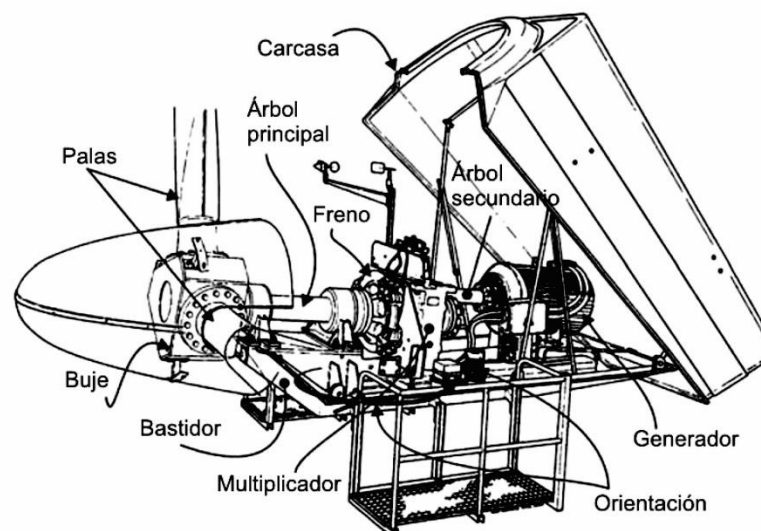


Figura 13. Diagrama de partes que constituyen una turbina eólica.

Fuente: González y Pérez (2009).

1.1.2.7 Aspectos sobre impacto ambiental

En la tabla 6 se muestra una comparación de emisiones de contaminantes para dos tipos de plantas de generación de energía, a base de carbón y gas, con los sistemas eólicos.

Tabla 6

Producción de gases contaminantes en kg/MW-h

Gas contaminante	Carbón	Gas	Turbinas eólicas
Óxidos de azufre	1,2	0,004	0
Óxidos de nitrógeno	2,3	0,002	0
Sólidos	0,8	0,0	0
Dióxido de carbono	865	650	0

Fuente: López (2012).

Las turbinas eólicas tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente en:

- Interacción con aves
- Impacto visual sobre el paisaje
- Impacto sonoro

1.1.2.8 Análisis estadístico.

Para analizar y optimizar los sitios de viento, se requiere información sobre el viento, pero no se pueden predecir con precisión variables caóticas como la dirección y la velocidad del viento. Tales variables a menudo se estudian utilizando herramientas estadísticas. Estas características se analizan en las siguientes secciones.

Velocidad media $\langle v \rangle$

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

Desviación estándar σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \langle v \rangle)^2}$$

Intensidad de turbulencia I_t

$$I_t = \frac{\sigma}{\langle v \rangle}$$

Función de distribución Weibull - La función de distribución de datos más utilizada para el viento es la distribución de Weibull, debido a la mejor descripción que proporciona en el caso de los datos del viento, en comparación con las otras funciones de distribución. Hay dos variaciones de la función Weibull dependiendo del número de parámetros utilizados. Para los datos del viento, se utilizan

principalmente dos parámetros, si v es la velocidad del viento (m/s), entonces la función distribución de probabilidad de Weibull $f(v)$, se expresa como (Khalid Saeed *et al.*, 2019)(Saleh *et al.*, 2012):

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^k \quad (1.34)$$

Donde, c (m/s) es la escala y k la forma, respectivamente. El área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad se llama función de distribución acumulativa. Entonces, la función de distribución acumulativa de Weibull se puede lograr tomando una integral de $f(v)$, denotada por $F(v)$ y dada como:

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^k \quad (1.35)$$

Estimación de indicadores de viento

La densidad de energía eólica (P_w/A) es el indicador más significativo para el viento que describe la cantidad de energía producida por diferentes velocidades del viento en un sitio seleccionado. Tanto los datos reales de la velocidad del viento medidos en un sitio como el análisis de distribución de Weibull se pueden usar para calcular la P_w/A del viento. Las fórmulas se dan como (Keyhani *et al.*, 2010 ; Khahro *et al.*, 2014):

$$\text{Densidad de Potencia} = \frac{P_w}{A} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (1.36)$$

El viento P_w/A (W/m^2) se define como la potencia en el viento (P_w) dividida por el área barrida de la turbina (A). Aquí ρ es la densidad de aire estándar, considerada principalmente como constante de $1,225 \text{ kg/m}^3$ a nivel del mar (1 atm) y 15° C . Mientras que la densidad del aire (ρ) también puede calcularse considerando los datos reales medidos en un sitio de la siguiente manera.

$$\Gamma(x) = \text{Función Gamma} = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

Para estimar la densidad del aire puede determinarse de forma indirecta conociendo la temperatura, altura sobre el nivel del mar:

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{T+273}\right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (1.37)$$

Donde ρ - densidad del aire, h - altura del lugar de estudio y T - temperatura del lugar

1.1.3 Energía solar

El sol es la principal fuente de energía responsable de sustentar toda la actividad de la vida en el mundo, como el confort térmico de la Tierra, la fotosíntesis en las plantas y todo el sistema biogeoquímico. El sol emite su energía en forma de radiación electromagnética y después de llegar a la superficie de la tierra se convierte en otro tipo de fuentes de energía y se utiliza para muchos propósitos.

Los seres humanos están utilizando la energía del Sol de dos formas principales, es decir, para la generación fotoeléctrica y la conversión térmica. Estas aplicaciones representan un gran salto para la solución de la escasez energética mundial. Por ejemplo, se estima que, de $1,76 \times 10^{15}$ TW de energía solar bruta que golpea la Tierra, 60 TW pueden convertirse económicamente en electricidad y, considerando que la estimación de la demanda mundial de energía hasta 2050 es de aproximadamente 25-30 TW, Está claro que solo la energía solar es suficiente para abastecer toda la demanda y liberar al mundo de los combustibles fósiles (Kalogirou, 2009).

Los métodos de conversión térmica de la energía solar se basan en la absorción de energía radiante por la superficie del cuerpo negro. Este puede ser un proceso complejo, que varía según el tipo de material absorbente. Implica absorción de fotones de difusión, aceleración de electrones, colisiones múltiples, pero el efecto final es el calentamiento, o la energía radiante de todas las cualidades se transforma en calor representado por el aumento de temperatura. Por ejemplo, los colectores pueden usarse para recolectar radiación solar para producir una temperatura lo suficientemente alta como para usarse directamente o convertirse en electricidad a través de procesos termo mecánicos como, por ejemplo, un ciclo de turbina de vapor (Chen, 2011).

La conversión fotoeléctrica consiste en el escape de electrones (corriente eléctrica) de la superficie de metal transparente cuando la luz con cierta frecuencia incide en esta superficie.

Un sistema fotovoltaico es una composición de todos los dispositivos utilizados para convertir fotones solares directamente en electricidad que son: panel solar, unidad de almacenamiento, regulador de carga/descarga e inversor si es necesario para convertir

la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA). En algunos casos, dependiendo del propósito, el almacenamiento puede no ser necesario (por ejemplo, conexión a la red). El elemento clave de un sistema fotovoltaico es la célula solar. Este elemento es responsable de la conversión de la radiación solar en electricidad y su función se basa en el efecto fotoeléctrico que consiste en la generación eléctrica por determinados materiales al ser expuestos a la luz.

La primera celda solar de silicio (SC) fue descubierta por un físico francés, Edmond Becquerel en 1839. Los experimentos de Becquerel demostraron que ciertos materiales producen una pequeña cantidad de electricidad cuando se exponen a la luz. Este efecto se estudió en primer lugar en metales como el silicio con un rendimiento de alrededor del 2%. La investigación prosiguió y en 1954 se logró una celda solar de silicio con una eficiencia de alrededor del 6%, reportada por Chapin, Fuller y Pearson (Chen, 2011). En cuanto a su aplicación, los SC se utilizaron por primera vez para cargar baterías del satélite de Estados Unidos (U.S. Vanguard) en 1958.

Debido a los altos costos, los SC se utilizaron inicialmente solo para fines de investigación espacial, militar y científica. Sin embargo, con la crisis energética que comenzó en la década de 1970, surgió el interés en el desarrollo de SC para fines civiles (Kalogirou, 2009).

1.1.3.1 Recursos de energía solar

La radiación solar proporciona una gran cantidad de energía a la tierra. La cantidad total de energía, que es irradiada por el sol a la superficie de la tierra, equivale aproximadamente a 10 000 veces el consumo anual de energía global (Patel, 2005).

La luz del sol, que llega a la superficie de la tierra, consta principalmente de dos componentes: la luz solar directa y la luz solar indirecta o difusa, que es la luz que ha sido dispersada por partículas de polvo y agua en la atmósfera. Las células fotovoltaicas no solo utilizan el componente directo de la luz, sino que también producen electricidad cuando el cielo está nublado. Para determinar el potencial de generación de electricidad fotovoltaica para un sitio en particular, es importante evaluar la radiación solar total promedio recibida durante el año. Lamentablemente, en la mayoría de los países en desarrollo no hay datos de radiación registrados correctamente. Lo que normalmente está disponible son los datos de duración de la

insolación. Etiopía es uno de los países en desarrollo que no ha registrado correctamente los datos de radiación solar y, como muchos otros países, lo que está disponible son los datos de duración de la insolación. Sin embargo, dado el conocimiento del número de horas de sol y las condiciones atmosféricas locales, los datos de duración de la insolación se pueden utilizar para estimar la radiación solar promedio mensual, con la ayuda de la ecuación empírica (Duffie *et al.*, 2020).

Para estimar la irradiación diaria, a nivel del suelo, para una superficie horizontal situada en lugar y día determinado se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$H_e = \frac{24r^2}{\pi} I_{sc} (h_s \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \sin(h_s))$$

Donde:

δ - Declinación

ϕ - Latitud $\rightarrow (-15,48^\circ)$

I_{sc} - Constante solar

$$I_{sc} = 1367 \frac{kW}{m^2}; \quad I_{sc} = 4,967 \frac{MJ}{m^2 h}$$

Hallamos el factor de corrección (r^2)

$$r^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360}{365} z\right)$$

Calculamos la declinación

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + z}{365}\right)$$

z - es el número día juliano

Calculamos el ángulo horario de la salida del sol (h_s)

$$\cos(h_s) = -\text{tg}(\phi) \text{tg}(\delta)$$

δ - Declinación

ϕ - Latitud $\rightarrow (-15,48^\circ)$ para Paucarcolla

Hallamos la Duración del día (N)

$$N = \left(\frac{2}{15}\right) h_s$$

Calculamos el factor de insolación (σ)

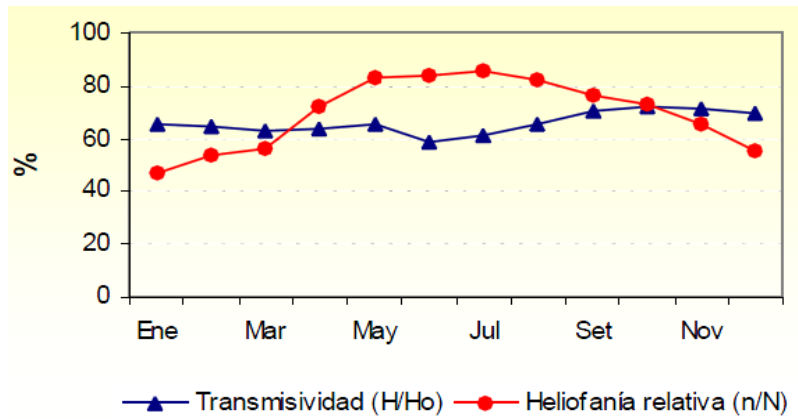


Figura 14. Variación mensual de la transmisividad (H/Ho) y heliofanía relativa (n/N)

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2003).

$$\sigma = \frac{n}{N}$$

Irradiación diaria en el suelo resulta (H_0)

$$H_0 = H_e(a + b \sigma)$$

Donde:

H_0 = es la irradiación global diaria, media mensual, sobre una superficie situada bajo la atmósfera.

H_e = es la irradiación solar diaria, media mensual, extraterrestre.

a y b - dependen del tipo de clima.

La figura 14 muestra la variación mensual de la transmisividad (H/Ho) y heliofanía relativa (n/N) para el departamento de Puno.

La declinación solar - El plano de revolución de la tierra alrededor del sol se llama eclíptica. La tierra misma gira alrededor de un eje llamado eje polar, que se inclina aproximadamente 23° desde el plano normal a la eclíptica (Iqbal, 1983), la declinación solar se obtiene mediante la siguiente ecuación (Cooper, 1969), para el día n del año.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (1.38)$$

Donde:

d_n : Día juliano

Ángulo de inclinación óptimo- El ángulo de inclinación óptimo es el ángulo donde la radiación solar alcanza la superficie perpendicularmente y maximiza la eficiencia de los colectores solares; asimismo, es el ángulo entre el plano de la superficie del colector y la horizontal, es óptimo cuando el ángulo de incidencia es mínimo para que la radiación directa sea máxima (De Bernardez *et al.*, 2008). Además, depende de la posición del sol, latitud, altitud y características geográficas. Y está determinado por (1.39) obtenido por Stanciu y Stanciu (2014). también por Herrera-Romero *et al.*, (2020).

$$\beta_{opt} = \phi - \delta \quad (1.39)$$

Donde:

ϕ : Latitud del lugar

δ : Declinación angular

Radiación solar global diaria en una superficie inclinada.

El énfasis en la importancia de inclinar un panel solar fotovoltaico es maximizar la eficiencia del proceso de generación de energía. La figura 15 ilustra los ángulos solares en una superficie inclinada.

La figura 15 muestra las coordenadas horizontales y ángulo de incidencia, donde Z: ángulo cenital, h: ángulo de altitud solar, φ : ángulo de acimut y ω : ángulo de incidencia.

La predicción de la radiación solar global en superficies inclinadas es una tarea crítica para el diseño de sistemas fotovoltaicos, simulación y evaluación del rendimiento. La estimación de la radiación solar global en una superficie inclinada es mencionado por Castejón y Santamaria (2010).

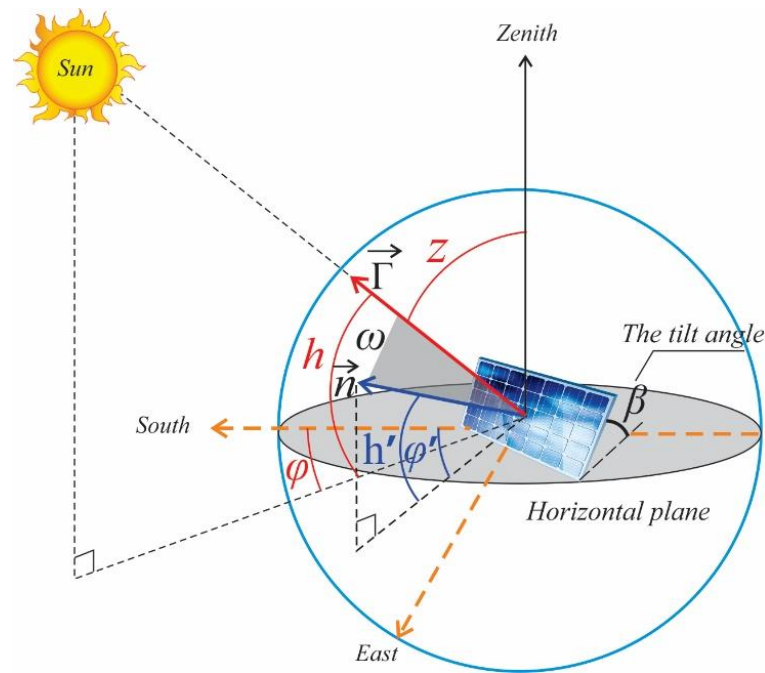


Figura 15. Coordenadas horizontales solares y ángulo de incidencia

$$R_{gsi} = \frac{R_g}{1 - 4,46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2} \quad (1.40)$$

R_{gsi} : Radiación global horizontal sobre una superficie inclinada (kWh/m^2).

R_g : Radiación global horizontal (kWh/m^2).

β_{opt} : Angulo de inclinación óptimo ($^\circ$).

Factor de irradiancia, siempre que sea posible, la superficie del generador debe estar orientada de manera óptima; sin embargo, este requisito no siempre se puede cumplir. Puede estar condicionado por la orientación de la superficie, la integración arquitectónica, la resistencia al viento, la acumulación de viento, etc. El factor de irradiancia está definido por (1.41) y (1.42) mencionado por Castejón y Santamaria (2010).

Para $15^\circ < \beta < 90^\circ$

$$FI = 1 - [1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \varphi^2] \quad (1.41)$$

Para $15^\circ \geq \beta$

$$FI = [1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{opt})^2] \quad (1.42)$$

Donde:

FI : Factor de irradiancia

β : Angulo de inclinación real ($^{\circ}$)

β_{opt} : Angulo óptimo de inclinación ($^{\circ}$)

φ : Angulo de azimuth ($^{\circ}$)

La hora pico de sol (PSH) se define como las horas de irradiación solar u horas de luz, y cuyos valores pueden variar de 3 a 7 horas diarias, según el mes y el lugar de instalación (Aparicio, 2010); Además, es una unidad que mide la radiación solar y se especifica como el tiempo en horas de una hipotética instalación solar, con una constante de irradiación de 1000 W/m^2 . Una hora pico de sol equivale a 1 kWh/m^2 o $3,6 \text{ MJ/m}^2$.

$$PSH/dia = \frac{FI \cdot R_{gsi}}{1000W/m^2} \quad (1.43)$$

El origen de la energía solar es radiactivo. El Sol es un inmenso reactor nuclear con una temperatura en la superficie exterior, la fotosfera, de unos 5900 a 6000 K. El Sol irradia cada segundo una energía de 4×10^{26} Joules en todas las direcciones del espacio, es decir que genera una potencia de 4×10^{23} kW. La energía que la Tierra recibe del Sol depende de la distancia de separación entre ellos y de la actividad solar (Chen, 2011).

En la figura 16 se tiene la radiación solar diaria en Puno para los meses de febrero, mayo, agosto, noviembre. También en la figura 17 se aprecia el mapa de energía solar incidente diaria promedio anual del Perú. En la tabla 7 se muestra los valores de la radiación media anual kW-h/m² día para distintos lugares del Perú. En la figura 18 se muestra la radiación solar en Paucarcolla.

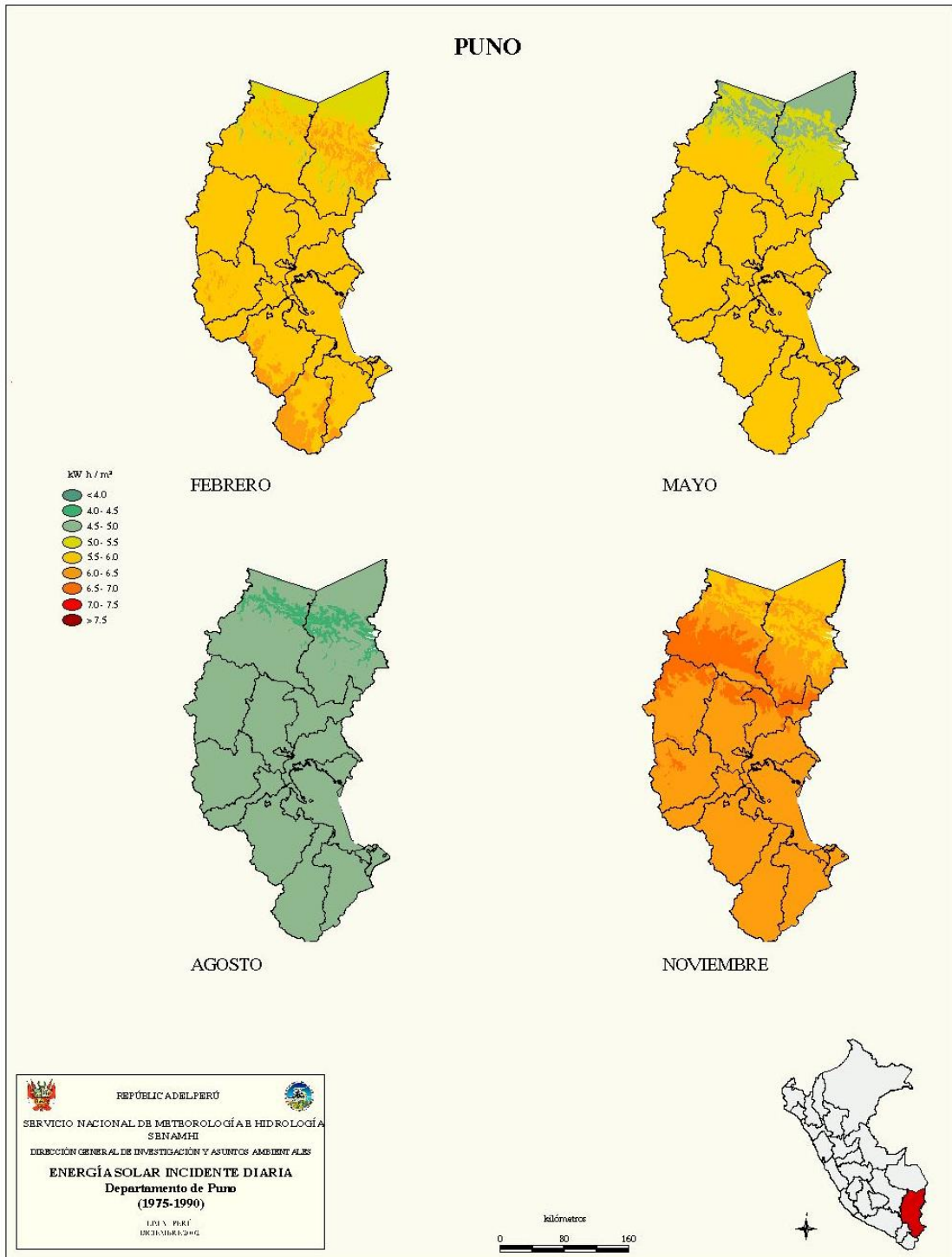


Figura 16. Energía solar incidente diaria en Puno

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2003).



Figura 17. Mapa de energía solar incidente diaria promedio anual

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2003).

Tabla 7
Datos de radiación solar en el Perú.

Departamento	Provincia	Distrito	Media anual kw- h/m ² ·dia
Tumbes	Tumbes	Corales	4,5
Piura	Talara	El Alto	4,0
Piura	Huancabamba	Huancabamba	4,7
Lambayeque	Lambayeque	Lambayeque	4,9
Lambayeque	Chiclayo	Cayaltí	5,5
La Libertad	Ascope	Casagrande	4,4
La Libertad	Ascope	Cartavio	4,8
Ancash	Santa	Nepeña	5,2
Ancash	Huaraz	Huaraz	5,1
Lima	Barranca	Paramonga	3,0
Lima	Lima	Jesús María	3,8
Lima	Lima	La Molina	3,4
Ica	Chincha	Chincha Alta	4,2
Ica	Ica	Caucato	4,8
Ica	Nazca	Marcona	4,9
Arequipa	Arequipa	Arequipa	5,3
Arequipa	Arequipa	Characato	5,3
Arequipa	Arequipa	Pampa de Majes	5,6
Moquegua	Mariscal Nieto	Moquegua	5,4
Tacna	Tarata	Paucarani	5,4
Tacna	Tacna	Calama	5,0
Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	4,5
Huánuco	Leoncio Prado	Tingo María	4,0
Huánuco	Huánuco	Huánuco	4,5
Junín	Chanchamayo	Humaya	4,7
Junín	Huancayo	Huachac	4,9
Huancavelica	Castrovirreyna	Aconococha	4,6
Ayacucho	Huamanga	Ayacucho	4,9
Apurímac	Abancay	Abancay	4,7
Cuzco	La Convención	Santa Ana	4,0
Cuzco	Cuzco	San Jerónimo	4,7
Puno	Puno	Puno	5,2
Amazonas	Bagua	Hda. Valor	4,5
San Martín	San Martín	Juan Guerra	4,0
Loreto	Maynas	Iquitos	3,7
Loreto	Requena	Requena	3,9
Ucayali	Padre Abad	Padre Abad	4,0
Ucayali	Atalaya	Yuruac-Yurua	3,1
Madre de Dios	Tahuamanú	Iberia	3,9

Fuente: Estimación de la Energía Solar. Vasquez y Lloyd (1987).

Actualmente en el Perú operan siete centrales o plantas solares fotovoltaicas ver tabla 8, la capacidad total instalada es 284,48 MW conectados al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional SEIN, en la tabla 8 se tiene los principales parques fotovoltaicos.

Tabla 8

Parques solares fotovoltaicas

Nombre	Potencia (MW)	Ubicación
Central Majes Solar	20	Arequipa
Central Solar Repartición	20	Arequipa
Central Tacna Solar	20	Tacna
Central Panamericana Solar	20	Moquegua
Central Moquegua FV	16	Moquegua
Central Rubí	144,48	Moquegua
Central Intipampa	40	Moquegua

Fuente: OSINERGMIN (2021)

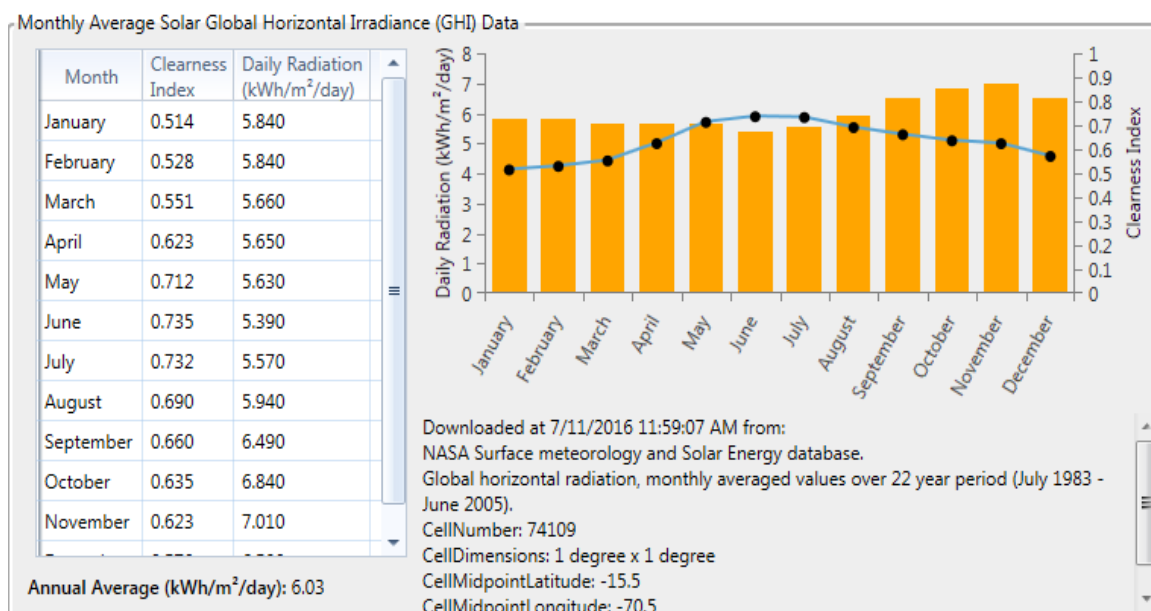


Figura 18. Radiación solar en Paucarcolla

Fuente: NASA (s. f.)

1.1.3.2 Tecnologías de células fotovoltaicas

Los modernos dispositivos comerciales fotovoltaicos emplean el silicio como material base. Las tecnologías de células solares presentes en el mercado son la monocristalina, la policristalina y la de silicio amorfo o tecnología de películas delgadas (Chen, 2011).

Células Monocristalinas. Estas células fueron las que primero se produjeron. El método Czochralski (de manera abreviada Cz) es el procedimiento típico para la

fabricación de las células monocristalinas. Primero se debe obtener silicio extremadamente puro a partir de la sílice (material muy abundante en la superficie terrestre), el cual luego se funde en un crisol junto con una pequeña proporción de boro hasta formar una masa denominada silicio tipo p a 1400 °C. Estando en estado líquido se introduce una varilla en cuyo extremo hay un cristal germen de silicio sobre el cual se van depositando otros átomos procedentes del material líquido que quedan perfectamente ordenados siguiendo la estructura del cristal.

1.1.4 Almacenamiento de energía

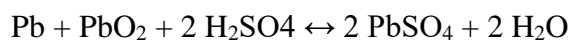
Uno de los problemas que enfrenta el sector de la producción de energía a partir de fuentes de energía renovable es el de mantener fija o constante la cantidad de electricidad producida durante un período de tiempo determinado, aunque sabiendo que a lo largo del día la producción y la demanda de electricidad fluctúan. Para superar este problema, se utilizan sistemas de almacenamiento de energía, que capturan el exceso de energía durante los períodos de baja demanda almacenándola en otras formas y la reconvierten cuando es necesario para alimentar la demanda.

En el caso de la energía generada a partir de fuentes eólicas y solares, se utilizan baterías recargables, también llamadas acumuladores. Las baterías son dispositivos electroquímicos que se utilizan para almacenar energía eléctrica convirtiéndola en cargas eléctricas en forma de iones. En caso de electrificación en áreas remotas utilizando energía solar o eólica, la batería óptima cubriría la demanda durante la noche, en días nublados y lluviosos o con velocidades de viento más bajas. Estos dispositivos también son importantes para estabilizar la gran fluctuación de voltaje producida por un módulo solar y una turbina eólica (Hankins, 2010).

1.1.4.1 Tipos de baterías

Las baterías recargables pueden ser de plomo-ácido, níquel-cadmio, hidruro metálico de níquel o de iones de litio para las que se utilizan comercialmente y a pequeña escala. Las baterías de plomo ácido son las más comunes para los sistemas de energía solar / eólica debido a su idoneidad, disponibilidad y bajo costo en comparación con los otros tipos que se utilizan más para pequeños electrodomésticos como radios y teléfonos celulares.

Baterías de plomo ácido: el principio básico de funcionamiento de las baterías de plomo-ácido se basa en la reacción de las placas de plomo recubiertas con PbO_2 (placas negativas) que se conectan al conector positivo (Pb) mientras que las placas de plomo (placas positivas) están conectadas al conector negativo. Se separan mediante un separador de cartón, plástico o algún papel microporoso y luego el conjunto se coloca en el compartimento de la batería y se sumerge en una solución acuosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4) como se muestra en la siguiente ecuación de reacción (Hankins, 2010).



Según Hankins (2010), las baterías de plomo-ácido se pueden clasificar en dos categorías: la batería automotriz (batería de arranque) y la batería de descarga profunda (ciclo profundo).

Las baterías de automóviles están diseñadas para proporcionar altos picos de corriente durante períodos cortos, lo que da como resultado una pequeña profundidad de descarga que generalmente es solo el 20% de la capacidad de carga. Este tipo de baterías se utilizan mayoritariamente para el arranque de motores, dado que al momento de arrancar el motor de arranque de un vehículo consume mucha energía por poco tiempo. Las baterías diseñadas para corrientes pico se diferencian de las estacionarias de ciclo profundo por tener más placas, pero más delgadas.

Las baterías de descarga profunda (ciclo profundo) están diseñadas para soportar descargas de hasta el 80% de su capacidad, por ejemplo, baterías de esterilla de vidrio absorbido (AGM), baterías de placa tubular y gel de electrolito cautivo / baterías OPZS u OPZV (células húmedas o de gel).

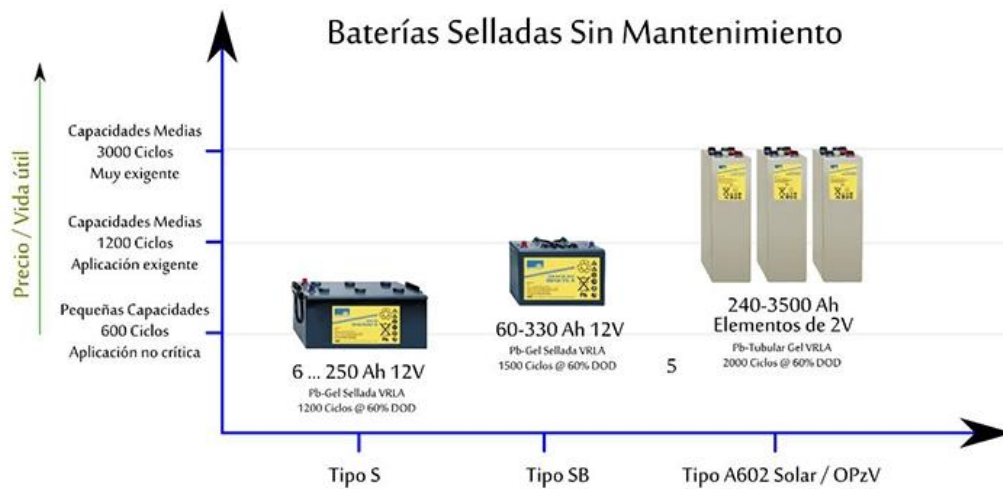


Figura 19. Diferentes tipos de baterías de descarga profunda

Fuente: Auto Solar. <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/tipos-de-baterias-para-placas-solares-en-que-se-diferencian>.

Existen diferencias entre las diferentes modificaciones de las baterías de ciclo profundo en cuanto a arquitectura, precios en el mercado y número de ciclos de vida; sin embargo, el más preferible es el último en la figura 19, el tipo de placa tubular - debido a su vida excepcionalmente larga (900 a 1200 ciclos) en comparación con cualquier otro tipo de batería de plomo-ácido.

1.1.4.2 Parámetros y características de la batería

Voltaje de la batería (V) - El voltaje nominal de una batería de plomo-ácido es por definición de 2,0 V por celda; sin embargo, esta tensión varía mucho durante la carga y descarga, en función de la corriente entregada o extraída, el tiempo transcurrido de carga o descarga, la temperatura y las características constructivas. Durante la carga rápida o si la batería está sobrecargada, el voltaje puede alcanzar los 2,5 V por celda. Durante una descarga profunda, el voltaje puede caer a 1,6 V por celda, lo que comúnmente se considera un nivel destructivamente bajo.

Capacidad de la batería (C)-La capacidad de la batería generalmente se define en amperios-hora (Ah) y es la cantidad de electricidad que la batería es capaz de proporcionar bajo ciertas condiciones, es decir, con una corriente de descarga dada hasta un cierto nivel de voltaje a una determinada temperatura. La capacidad de la batería y la corriente de descarga a menudo se indican junto con un subíndice para el tiempo de descarga en horas, es decir, C10 significa capacidad de la batería C

para un tiempo de descarga de 10 h, se usa normalmente para designar la capacidad nominal de una batería y se usa como base. para comparaciones de diferentes datos de capacidad de la batería de acuerdo con la aproximación a continuación, ya que las baterías C20 y C100 son las más útiles para sistemas independientes.

Expresión aproximada para capacidad nominal:

$$C10: C10 \sim 0,85 \times C20 \sim 0,7 \times C100$$

Límite de carga y descarga de la batería -Si la batería está conectada a la carga, su voltaje comienza a disminuir; sin embargo, si su voltaje nominal se vuelve alrededor de 1,7 a 1,85 V, la batería debe desconectarse de los electrodomésticos para evitar una profundidad de descarga destructiva (DoD) y permitir una vida útil prolongada. Si se está cargando y el voltaje supera los 2,4 V, la batería debe desconectarse para evitar la formación elevada de gas (formación de gases) (Häberlin, 2012).

Ciclo de vida versus profundidad de descarga- El ciclo de vida es el número de ciclos que puede realizar una batería antes de que su capacidad alcance el 80% de la capacidad nominal y está básicamente determinado por el tipo de batería y el DoD. Cuanto mayor sea el DoD, menor será la vida útil de todos los tipos de baterías. Se recomienda que incluso las baterías de ciclo profundo no se descarguen regularmente por debajo del 60% de DoD (40% del estado de carga) (Häberlin, 2012).

Además, todos los tipos de baterías funcionan mejor con corrientes bajas que con altas, tanto para carga como para descarga. Los procedimientos de carga / descarga lentos prolongan la vida útil de cualquier batería y permiten un alto nivel de capacidad sostenido durante todo el ciclo de vida. La carga rápida y la descarga rápida con corrientes elevadas pueden conducir fácilmente a un peor rendimiento y una vida útil más corta para cualquier tipo de batería electroquímica.

1.1.5 Inversores y controladores de carga

Los inversores son dispositivos que se utilizan para convertir la corriente eléctrica de CC en CA y viceversa. Los inversores se pueden clasificar según su forma de onda: onda cuadrada, onda cuadrada modificada y onda sinusoidal.

Los inversores de onda cuadrada tienen una salida de voltaje de control muy débil y una alta distorsión armónica, por lo que no son adecuados para uso residencial a pesar de tener los costos más bajos del mercado. Los inversores de onda cuadrada modificada, se acoplan a algunos dispositivos electrónicos (transistores de efecto de campo - FET o rectificadores controlados de silicio - SCR) que les permiten reducir la distorsión armónica que presenta el primer tipo. Sin embargo, algunos equipos residenciales tampoco pueden conectarse a este tipo de inversores. Inversores de onda sinusoidal: son los más avanzados y apropiados para fines de electrificación residencial, ya que proporcionan una señal de salida con baja distorsión armónica. Ese hecho les permite suministrar electricidad incluso a cualquier equipo, incluidos los dispositivos sensibles.

Los controladores de carga son circuitos eléctricos que se utilizan para controlar el estado de carga de las baterías. Estos dispositivos funcionan como una tecla de entrada, permitiendo que la corriente fluya hacia las baterías cuando están cargadas y cierran el flujo de corriente cuando las baterías están completamente cargadas para evitar sobrecargas. En la mayoría de los casos, los controladores están acoplados a inversores.

1.1.6 Evaluación de recursos de energía solar y eólica

La generación de energía solar o eólica no suministra electricidad a la carga de forma continua, debido a su carácter intermitente que le impide satisfacer una demanda constante en diferentes momentos. Por tanto, ambas fuentes deben considerarse formas variables de producción de energía. Su utilización por separado siempre debe tener en cuenta la variabilidad y la imprevisibilidad del recurso.

Una forma de minimizar la influencia de la intermitencia de las fuentes eólica y solar es combinar las dos fuentes en un sistema de modo que la indisponibilidad de una de ellas pueda ser compensada por la actividad de otra. Esta combinación conduce a configuraciones híbridas, que son el foco del presente estudio.

Suministro de electricidad a través de sistemas de energía híbridos

Los sistemas de energía híbrida son básicamente aquellos sistemas que consisten en dos o más fuentes de energía para la generación de energía, y pueden ser convencionales o no como la generación por eólica, solar fotovoltaica, gas natural,

gasoil, biocombustible entre otros, con el objetivo de proporcionar electricidad. o cogeneración, ya sea autónoma o conectada a red. Estos sistemas son complejos y requieren la optimización del control energético y el uso de todas las fuentes para obtener la máxima eficiencia en la entrega de energía a las unidades de consumo, manteniendo la calidad y confiabilidad especificada para cada proyecto propuesto.

Dentro del presente estudio, se propone un sistema híbrido solar-eólico aislado para la generación de electricidad y una mini red para distribuir la electricidad generada a una pequeña carga. La figura 20 ilustra el ejemplo esquemático de una configuración de sistema híbrido de este tipo.

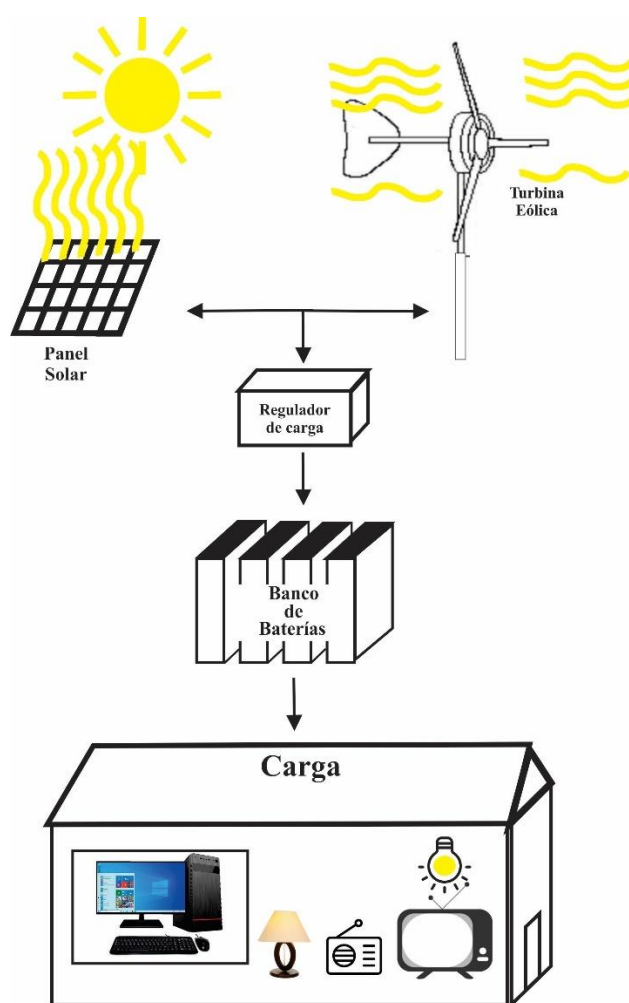


Figura 20. Configuración esquemática del sistema híbrido autónomo

El sistema combina paneles solares fotovoltaicos que producen electricidad en CC y turbinas eólicas, que pueden producir electricidad en CC o CA. Para asociar estas fuentes de electricidad a una carga y banco de baterías, cuya corriente es continua

(DC), el sistema necesita un convertidor de potencia que pueda asegurar que la corriente fluya entre los diferentes equipos y suministre a la carga indicada por “6” en la figura. sobre.

Ventajas de los sistemas de energía híbridos

Los sistemas híbridos que utilizan fuentes de energía renovable, como los recursos solares y eólicos, pueden ser factibles y una alternativa para suministrar electricidad a áreas remotas o aisladas de la red nacional y ayudar a reducir el uso de combustibles fósiles, la dependencia de combustibles costosos y reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

A continuación, se presentan las principales ventajas de los sistemas híbridos en comparación con los únicos:

- Complementariedad entre fuentes del sistema: la intermitencia de las fuentes involucradas se puede superar parcial o totalmente, asegurando la continuidad y calidad de la electricidad producida por el sistema;
- Modularidad de las fuentes involucradas: módulos fotovoltaicos, turbinas y baterías se pueden adquirir gradualmente del sistema, siempre que exista un crecimiento natural del sistema acorde con la disponibilidad de recursos financieros, potencial energético y área para la instalación del sistema;
- Los impactos socio-económicos, en general, se caracterizan como productos para el despliegue de sistemas híbridos. En la mayoría de los casos los impactos tienen características más beneficiosas que perjudiciales, especialmente cuando se tratan con sistemas de pequeña generación como se propone en el presente trabajo. También se destaca el crecimiento de la población rural, porque puede combatir el éxodo rural, el aumento de las actividades comerciales locales (bares, almacenes), agricultura, educación y telecomunicaciones, lo que es posible gracias al uso más amplio de la electricidad;

En cuanto a los impactos ambientales, se relacionan principalmente con los problemas del final de la vida útil y el reciclaje de los equipos usados, principalmente la gestión de las baterías (existe la necesidad de un programa de reciclaje); al aspecto visual y sonoro de la rotación de las palas de los aerogeneradores, y ocupación del espacio

utilizado para la instalación de los equipos del sistema híbrido. Los sistemas híbridos pueden representar una alternativa viable por criterios técnicos, financieros, sociales y ambientales, incluyendo ventajas en cuanto a la extensión de la red eléctrica o la generación eléctrica local por sistemas Diesel.

1.2 Antecedentes.

Debido al alto costo del diésel y al abaratamiento del costo de las tecnologías de las energías renovables, el abastecimiento por medio de las energías renovables es ahora competitivo con relación a las energías convencionales, hacen posible la amplia utilización de los sistemas de energías renovables aisladas de la red como los sistemas fotovoltaicos, eólicos, sistemas híbridos fotovoltaicas y eólica (Kaldellis *et al.*, 2012)

Actualmente las investigaciones se realizan para modelar, simular, dimensionar los componentes, análisis económico y en particular la optimización del sistema de energías renovables (Mikati *et al.*, 2012)

Para realizar tales investigaciones modelos de simulación y herramientas de computacionales generalmente son necesarios. Un total de 37 herramientas computacionales para analizar los sistemas de las energías renovables se han revisado en (Connolly *et al.*, 2010). Entre las herramientas más utilizadas el programa HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) es uno de los más usados (Bernal-Agustín y Dufo-López, 2009). Se llevaron a cabo diferentes análisis utilizando el HOMER en muchas partes del mundo (Glaisa *et al.*, 2014; Javed *et al.*, 2019; Rinaldi *et al.*, 2020; Izadyar *et al.*, 2016; Ali, Ahmar *et al.*, 2021; Suresh y Kiranmayi, 2020).

En Perú se realizó un análisis con HOMER en tres lugares (sin acceso a la red), y se obtuvieron valores satisfactorios (Rinaldi *et al.*, 2020), y en relación a los estudios de energías renovables se realizaron estudios de potencial eólico y solar (Tito *et al.*, 2020; Tito *et al.*, 2020).

En el Perú, existen las siguientes normas: El Decreto Legislativo 1002 de 2008, que declara de interés nacional y necesidad pública el desarrollo de la generación eléctrica a través de recursos renovables, también define como fuentes: Solar y eólica, entre otras. Luego, en 2011 (DS N° 012-2011-EM) se aprobó el nuevo reglamento de generación eléctrica con energías renovables, y en 2013 (DS N° 020-2013-EM) se aprobó el

reglamento de promoción de inversiones eléctricas, en áreas no conectadas a la red eléctrica.

El programa HOMER puede asistir para diseñar sistemas pequeños de potencia y facilita la comparación entre las tecnologías de generación de energía y un amplio rango de aplicaciones. Usando el programa HOMER para modelamiento de sistemas de energéticos renovables, simulación y análisis económico (Kaldellis *et al.*, 2007; Suresh *et al.*, 2020). También han sido realizados para estudios primarios, por ejemplo la posibilidad de lograr la autonomía energética en una isla usando generadores fotovoltaicos, turbinas eólicas y biogás (Kaldellis *et al.*, 2012).

Fue examinado un pequeño sistema híbrido Hidro fotovoltaico eólico en etiopia (Bekele y Tadesse., 2012). También se realizó un análisis del rendimiento económico de sistemas híbridos fotovoltaico diésel batería para cargas residenciales en regiones calurosas (Shaahid y Elhadidy., 2008).

Hay desarrollos para realizar un sistema híbrido solar eólico empleando baterías, se ha demostrado que los sistemas híbridos con almacenamiento de energía es técnico económicamente viable para la electrificación de rural en áreas aisladas (Yang *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2010).

Se realizaron trabajos del dimensionamiento y análisis económico de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico autónomo para electrificación rural para Lundu, Sarawak en Malasia (Afrouzi *et al.*, 2021). En otro trabajo fue estudiado la optimización y dimensionamiento del sistema híbrido de energía renovable SPV/Eólica como una perspectiva técnico económica y social (Khan *et al.*, 2021).

En la mayoría de países del tercer mundo existe actualmente un aumento en la demanda de energía a la par con un aumento de la población. Pero es también evidente que en el tercer mundo existen límites para satisfacer este aumento de la demanda de energía, especialmente en grupos de la población que no pueden hacer frente a los costos de suministro de energía. En este último punto es importante distinguir dos categorías en cuanto a las fuentes de energía, los sistemas tradicionales y los convencionales.

Los sistemas tradicionales emplean combustibles como la madera y residuos animales, han sido utilizados desde tiempos antiguos para satisfacer necesidades primarias como calor en espacios cerrados, cocinar alimentos y procesamiento de algunos productos a

pequeña escala. Sin embargo, en las últimas décadas los países del tercer mundo han visto reducida su capacidad de uso de sistemas tradicionales para satisfacer la demanda energética de una población en aumento, debido a factores como:

Una creciente deforestación de tierras para usos agrícolas y un proceso de urbanización en aumento, merman la existencia de bosques y la disponibilidad de combustibles como la leña y la biomasa. Los conflictos armados crean movilizaciones de personas hacia lugares que no proveen los recursos necesarios para su sostenimiento.

Los cambios climáticos hacen que disminuya la disponibilidad de combustibles como la biomasa, sobre todo en áreas vulnerables a la expansión de desiertos ya existentes.

Debido a estos factores es que en forma gradual los sistemas convencionales de energía han ido reemplazando a los sistemas tradicionales. Los combustibles fósiles como la gasolina y combustible diésel son usados para bombeo, molienda, tractores, medios de transporte y maquinaria diversa. Otros como el kerosene es usado para iluminación y cocina, también el gas propano es usado para cocina y generación de calor. Sin embargo, la capacidad de los sistemas convencionales para satisfacer las demandas de energía es también limitada tanto por una población en aumento como también por un incremento en sus actividades económicas, especialmente en las poblaciones rurales. En el caso del kerosene, aunque está disponible en áreas urbanas y rurales, su distribución es difícil para las poblaciones rurales y los costos suelen ser más elevados. El uso de gas propano en el ámbito rural está aún más restringido para grupos con mayor poder adquisitivo, es decir para una muy pequeña minoría.

En el caso del combustible diésel para maquinaria pesada, aunque su uso si está difundido, los costos de este combustible suelen ser más elevados en áreas rurales por lo que su uso y distribución también son limitados. Es evidente entonces que existe un abismo entre las necesidades energéticas y la capacidad, tanto de sistemas tradicionales como convencionales, para satisfacerla, especialmente en zonas rurales. Para satisfacer esta creciente demanda energética en países en vías de desarrollo es importante tener en cuenta aspectos como el desarrollo sostenible y el impacto ambiental, es allí donde las energías renovables vienen a satisfacer estos criterios y a la vez convertirse en motor de desarrollo y mejora en la calidad de vida.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema.

Los sistemas que abastecen de energía se encuentran en un punto neurálgico ya que los combustibles fósiles, que son la principal fuente de energía, es el mayor emisor de las partículas de contaminantes que están comenzando a provocar cambios climáticos en diversas partes del planeta. De continuar por este camino, es muy probable que se superen los límites que la naturaleza puede soportar, lo que podría provocar para la mayoría de las especies animales tendría dificultades para adaptarse a cambios tan intensos y rápidos. Esta situación no es considerada con la debida importancia por los gobiernos ni tampoco por las empresas energéticas privadas, pues continúan decidiendo inversiones multimillonarias buscando el aprovechamiento de las fuentes convencionales de energía, prolongando la existencia de un modelo energético insostenible.

El Perú se destaca por una amplia variedad de recursos energéticos renovables, entre ellos el eólico y solar, a su vez carece de suficientes recursos fósiles, tales como el carbón, el petróleo o el gas natural; los primeros son necesarios para hacer más sustentable la matriz energética. Con la finalidad de alcanzar un desarrollo sostenible de la matriz energética, se considera necesario que las fuentes de energía renovable (solar, eólica, mini hidráulicas) deban ser aprovechadas en todo su potencial. El presente trabajo de investigación pretende determinar una propuesta para el aprovechamiento de la energía eólica y solar en la región Puno, buscando conocer la situación actual del sector y proponer una alternativa real y factible de diversificación de la matriz energética peruana. El proceso de diversificar la matriz con energías renovables y en forma particular con la

energía eólica, solar y los sistemas híbridos eólica solar es un proceso desafiante que involucra la acción del Estado Peruano y del sector privado.

La única solución real al cambio climático se encuentra en la sustitución gradual de la energía de combustibles fósiles por las energías de fuentes renovables, acompañada necesariamente de un uso más eficiente de la energía. Sin embargo, cada vez que se presenta este planteamiento surgen preguntas como: ¿Son suficientes las fuentes existentes de energías renovables para cubrir la demanda energética? ¿Es necesario desarrollar otras fuentes de energía que cubran las supuestas limitaciones de las fuentes renovables?

2.2 Enunciados del problema.

¿Cómo generar energía eléctrica de manera eficiente, sostenible para mejorar la calidad de vida de zonas rurales en el distrito de Paucarcolla?.

¿Como determinar el potencial de aprovechamiento de los recursos renovables solar – eólico para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla?.

¿Cómo se determina la conversión del recurso renovable eólico como alternativa de generación eléctrica para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla?.

¿Como estimar los costos de la generación de la energía eléctrica del sistema de generación eólico - solar para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla?.

2.3 Justificación

Los recursos energéticos tradicionales no tienen carácter de inagotables, por el contrario, las investigaciones internacionales se encuentran en permanente búsqueda de nuevos recursos energéticos. Por otro lado, el daño ocasionado al sistema ambiental por parte de las fuentes de energía tradicionales ha alcanzado niveles críticos, al punto de formar parte de las políticas de gobiernos e instituciones internacionales dedicadas al mantenimiento del equilibrio ecológico global. El Perú no es ajeno a toda esta situación, la cual se ve agravada por el hecho de ser un país importador de hidrocarburos, además de estar experimentando el efecto del calentamiento global reflejado en la disminución de los glaciares en la cordillera de los andes, hecho que atentaría contra las futuras reservas de agua del país.

Realizar estudios que permitan el desarrollo de las energías renovables (hidráulica, solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y biomasa) y la actualización de los diseños para los sistemas eléctricos rurales (CEPLAN, 2011).

Las tecnologías contaminantes en los procesos productivos, deben ser sustituidas por tecnologías limpias basadas en procesos biológicos, energías renovables, eficiencia energética y uso de las TIC, para asegurar la sostenibilidad ambiental (PNCTI - CONCYTEC, 2006).

Las limitaciones del presente estudio están dadas por la existencia de pocos estudios respecto a las condiciones de aprovechamiento de las energías renovables debido al estado incipiente de las mismas en el país. La información existente se encuentra diseminada en distintas instituciones y entidades, tanto públicas como privadas, y en algunos casos, con acceso restringido. Adicionalmente, se tiene la limitación de la falta de expertos en el desarrollo de energía eólica, solar e híbridos solares eólica, la mayoría de personas involucradas son conocedoras del tema general de desarrollo de las energías renovables en su conjunto, mas no son expertos en el tema.

2.4 Objetivos.

2.4.1 Objetivo general.

Optimizar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

2.4.2 Objetivos específicos.

Determinar el potencial de aprovechamiento de los recursos renovables solar – eólico para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

Calcular la conversión del recurso renovable eólico como alternativa de generación eléctrica para para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

Estimar los costos de la generación de la energía eléctrica del sistema de generación eólico - solar para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

2.5 Hipótesis.

2.5.1 Hipótesis general.

La optimización del sistema híbrido eólico fotovoltaico, permitirá abastecer de energía eléctrica una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

2.5.2 Hipótesis específicas

Es posible determinar el potencial de aprovechamiento de los recursos renovables solar eólico para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

Es posible calcular la conversión del recurso renovable eólico como alternativa de generación eléctrica para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

Es posible estimar los costos de la generación de la energía eléctrica del sistema de generación eólico - solar para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla.

Variables independientes:

Características del viento en el distrito de Paucarcolla.

Intensidad de la radiación solar en el distrito de Paucarcolla.

Demanda de carga eléctrica de la comunidad.

Variables dependientes:

- Sistema eólico.
- Sistema fotovoltaico.
- Sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio.

La ubicación del distrito de Paucarcolla está entre las coordenadas geográficas 15° 41' 0" Latitud sur y 70° 5' 0" Longitud Oeste a una altura de 3827 msnm. En general, el clima es frío y seco, por sus cercanías del lago, el clima es templado por la influencia termorreguladora de las aguas del lago. Las precipitaciones pluviales son temporales que duran generalmente entre los meses de diciembre a abril, aunque suelen variar en ciclos anuales, originando inundaciones y sequías; y éste último el resto del año. La temperatura es muy digna, con marcadas diferencias entre los meses de junio y noviembre y con oscilaciones entre una temperatura promedio máxima de 20°C y una mínima de -21 °C (SENAMHI).

3.2 Población

Según el censo realizado el año 2007; la población del distrito de Paucarcolla fue de 4 864 habitantes, y mostro que 79,7 % viven en la zona rural y el 20,3 % la zona urbana. Según estimaciones realizadas por el INEI al año 2014, la población estimada es de 5 135 habitantes.

Nuestro estudio se focaliza en una familia de 8 integrantes que vive en una zona aislada de la red eléctrica.

3.3 Muestra

Los datos meteorológicos se obtuvieron de SENAMHI (<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>) y NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), años 1985- 2020.

3.4 Metodología de la investigación

Inicialmente, se realizó una revisión de la literatura para comprender mejor la situación energética y los problemas del sector energético en Puno. Diseñar un sistema híbrido eólico-solar es un nuevo concepto en el contexto del distrito Paucarcolla. De ahí se estudió la literatura relacionada. Para identificar el potencial eólico y solar de Paucarcolla, se ha analizado estudios previos llevadas a cabo en distintos lugares del mundo.

Posteriormente, se determinó el potencial de aprovechamiento de los recursos renovables solar – eólico para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla. Para lo cual se usó fuentes disponibles de base de datos.

- Datos de la NASA, Meteorología de superficie satelital y energía solar.
- Datos eólicos y solares disponibles en el SENAMHI.

Y se da una apreciación de los datos por el nivel de radiación y velocidad de viento registrado en el lugar.

Calcular la conversión del recurso renovable eólico como alternativa de generación eléctrica para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla. Para cumplir este objetivo se utiliza la función de distribución de Weibull, cuyos parámetros (k – factor de forma, c - factor de escala) son calculados con el software Matlab, también se determina la probabilidad de que el viento será mayor a 3 m/s. La rosa de viento es elaborado con el software WRPLOT View - Lakes Environmental Software (s. f.).

Estimar los costos de la generación de la energía eléctrica del sistema de generación eólico - solar para una vivienda rural aislada de la red en el distrito de Paucarcolla. Se estima los costos de los equipos que integran un sistema eólico solar. Luego se diseña y analiza un sistema híbrido eólico-solar para una vivienda rural aislada de la red en Paucarcolla para este objetivo se realiza una simulación con el software HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources).

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1 Pasos para el análisis y diagramas de flujo del software HOMER

Analizar datos eólicos y solares de las siguientes fuentes: NASA y SENAMHI. En la caracterización del potencial eólico, utilizamos la distribución de Weibull para evaluar

el potencial eólico. Diseñar y analizar un sistema híbrido eólico-solar, simular con el software HOMER. El programa HOMER usa datos de la NASA y se usó el siguiente diagrama de flujo (ver figura 21).



Figura 21. Diagrama de flujo del programa HOMER.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del recurso eólico en Paucarcolla

En la tabla 9 se muestra los promedios mensuales de las velocidades del viento (m/s), años 2019 y 2020, para el SENAMHI y NASA.

Tabla 9

Promedios mensuales de las velocidades del viento (m/s), años 2019 y 2020

Promedio mensual	Año			
	2019		2020	
	NASA	SENAMHI	NASA	SENAMHI
1	3,3	2,8	3,1	3,2
2	2,9	2,7	2,7	2,6
3	2,5	2,5	2,8	2,4
4	2,2	2,4	2,4	2,5
5	2,5	2,6	2,5	2,6
6	2,4	2,5	2,5	2,6
7	2,6	2,8	2,3	2,7
8	2,4	2,8	3,3	3,5
9	3,1	3,1	2,4	3,3
10	3,0	3,3	3,3	3,5
11	3,1	3,2	3,2	4,2
12	2,7	3,1	3,2	3,9
Promedio	2,73	2,82	2,81	3,08

Fuente: NASA (s. f.) y SENAMHI - Perú (s. f.).

Hay suficiente evidencia estadística para concluir que existe una relación lineal entre la velocidad del viento (m/s) de la NASA y el SENAMHI (el valor de $p=0,0001618$ es menor que el nivel de significancia de 0,05). La correlación es positiva y el coeficiente de correlación de Pearson es $r = 0,70$.

Utilizando la prueba de Levene, se concluye que presenta igualdad de varianzas entre los dos datos de la NASA y el SENAMHI (el valor de $p=0,4529$ es mayor que el nivel de significancia de 0,05). Sus varianzas son 0,35 y 0,48 respectivamente.

4.1.1 Tratamiento de datos

En la figura 22 se muestra los promedios de velocidad del viento (m/s) según meses (1981 a 2020) y la regresión lineal correspondiente y donde se aprecia una tendencia a ser constante la velocidad del viento.

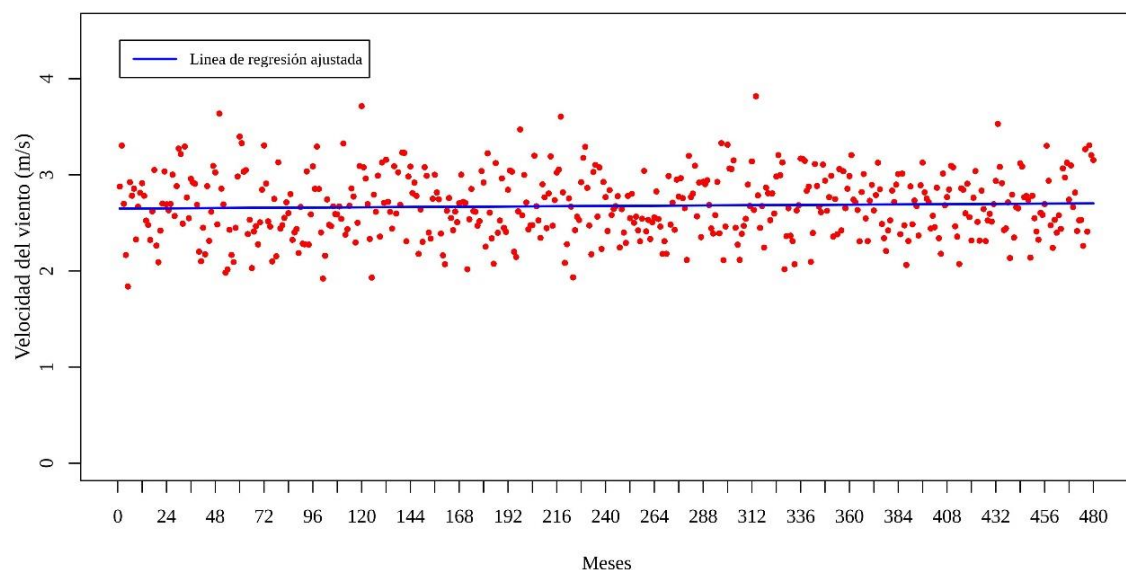


Figura 22. Promedios de velocidad del viento (m/s) según meses (1981 a 2020) y la regresión lineal correspondiente.

Se realizó un análisis estadístico, específicamente el análisis de regresión lineal, utilizando el Software Estadístico R sobre los datos de velocidad del viento para describir las características del sitio de estudio. Con la finalidad de revisar la tendencia, se empleó los datos descargados de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-espectador>) debido a los años que abarca. En la figura 22 se muestra los promedios de las velocidades del viento según meses (de 40 años desde el 1981 hasta el 2020), es decir, en la figura indicada el eje de las abscisas (horizontal): 0 es enero de 1981, 2 es febrero de 1981, 3 es marzo de 1981, así sucesivamente hasta llegar a diciembre del 2020; en dicho gráfico se muestra también la regresión lineal correspondiente. Se puede observar que el viento promedio es prácticamente constante a lo largo de los 40 años, los resultados de la regresión se muestran en la figura 23, donde, la pendiente es

de 0,0001124, es próximo a cero, considerando que la pendiente es susceptible a datos atípicos.

La fórmula de regresión lineal es: Velocidad de viento = 2,6491770+ 0,0001124*MES, la velocidad media oscila entre 1,84 y 3,82 m/s.

```
Call:
lm(formula = y ~ x)

Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q      Max
-0,8107 -0,2389 -0,0108  0,2381  1,1330

Coefficients:
(Intercept) 2,6491770 0,0305226 86,794 <2e-16 ***
x           0,0001124 0,0001100  1,023  0,307
Signif. codes:  0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 0,3338 on 478 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0,002183, Adjusted R-squared: 9,508e-05
F-statistic: 1,046 on 1 and 478 DF, p-value: 0,3071
```

Figura 23. Reporte de la regresión lineal de la velocidad de viento(m/s) según meses (de 1981 a 2020)

Se concluye que la velocidad del viento en el lugar de estudio tiende a mantenerse constante a través de tiempo.

El valor esperado para la velocidad del viento no cambiaría sin importar qué tan lejos se mueva por encima o por debajo de la línea

Correlación: $R=0,002183$, es muy baja.

Pruebas de hipótesis.

Una manera de evaluar la utilidad del modelo de regresión es probar la significancia de la relación de regresión entre las variables.

Se utilizará un nivel de significancia de: $5\% = 0,05$. Nivel de confianza: $95\%=0,95$

Hipótesis:

Ho: La pendiente = 0 (el modelo de regresión NO es útil, es decir, la velocidad del viento es constante a través del tiempo).

Ha: La pendiente $\neq 0$ (el modelo de regresión es útil).

Prueba de hipótesis:

Un p valor (en inglés: "p-value") cercano a 0, es decir, menor que el nivel de significancia de 0,05, lleva a la conclusión de rechazar la hipótesis nula. De lo contrario se falla en rechazar la hipótesis nula.

En este caso se falla en rechazar la hipótesis nula, es decir, aceptamos que la pendiente es igual a cero (debido a que el p-valor de 0,3071 no es menor que 0,05). La variable independiente meses (tiempo) NO es importante para predecir el valor de la variable dependiente velocidad del viento, esto usando la regresión lineal. No hay suficiente evidencia estadística para concluir lo contrario.

En la figura 24 se muestra los valores de viento según NASA a 50 metros sobre el suelo y se observa que en el mes de julio es de 4,36 m/s.

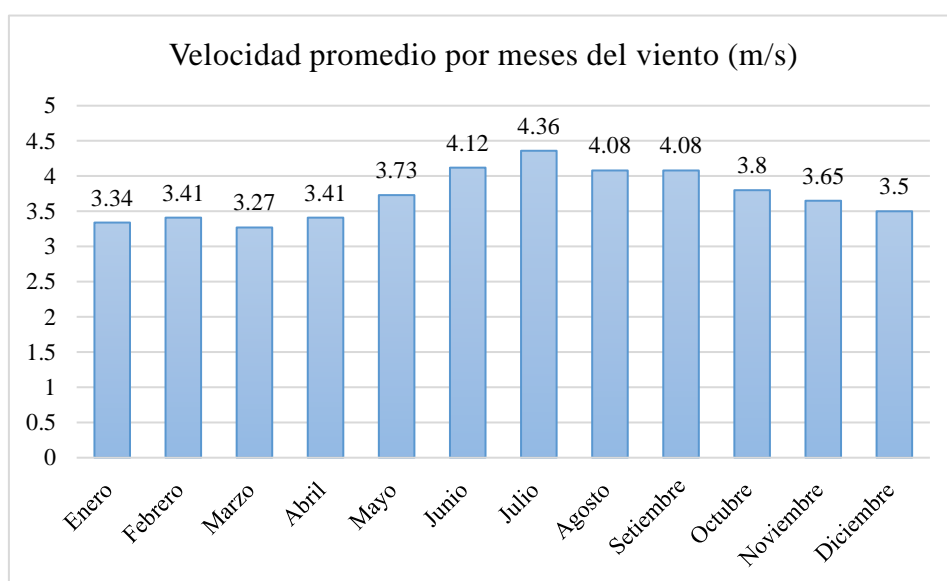


Figura 24. Comportamiento del viento en Paucarcolla

Fuente: NASA (s. f.).

4.1.2 Rosa de vientos

De acuerdo con la rosa de los vientos de la figura 25 se observan direcciones de viento predominantes a 270 grados "W" y siguiéndole 247,5 grados "WSW" y como tercer potencial de dirección predominante es a 0 grados "N"

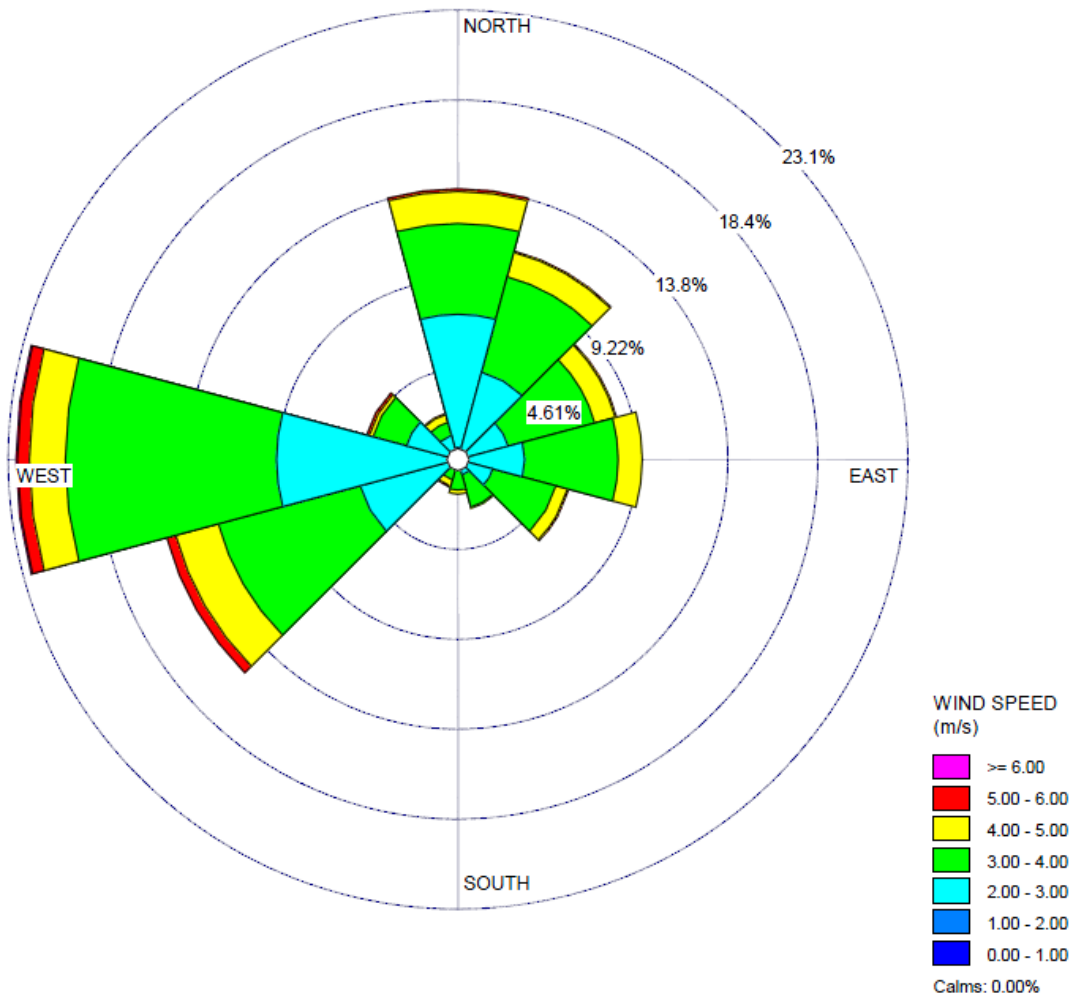


Figura 25. Rosa de vientos para Paucarcolla

4.1.3 Distribución de Weibull

Métodos para estimar los parámetros de Weibull c y k

Existen muchos métodos numéricos para calcular los parámetros de Weibull. En este estudio se comparan la técnica gráfica y el método empírico de Justus.

Método gráfico (GM)

El método gráfico utiliza la función de distribución acumulativa. La ecuación (1.34) después de algunas operaciones matemáticas se puede escribir como (Khahro *et al.*, 2014):

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \cdot \ln(v) - k \cdot \ln(c) \quad (4.1)$$

$$y = a \cdot x + b$$

En la ecuación (4.1), a es la pendiente y b es el interceptor.

$$a = k \quad y \quad c = \exp(-b/k) \quad (4.2)$$

Método empírico de Justus (EMJ)

Los parámetros k y c se pueden calcular mediante las fórmulas (4.3) y (4.4) (Justus & Mikhail, 1976).

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{promedio}} \right)^{-1.086} \quad (4.3)$$

$$c = \frac{v_{promedio}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.4)$$

Donde $v_{promedio}$ es la velocidad promedio, Γ es la función gamma.

Densidad de potencia (P_w / A)

$$\frac{P_w}{A} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

En la tabla 10 se aprecian los valores de los parámetros de Weibull analizados con los métodos empírico y gráfico y las velocidades medias mensuales (v), desviación estándar (σ), intensidad de turbulencia ($\sigma/v_{promedio}$), densidad de potencia (P_w/A).

Tabla 10

Los valores de los parámetros de Weibull para el año 2018

Meses	v_{prom}	σ	$\frac{\sigma}{v_{prom}}$	Método empírico			Método gráfico		
				c	k	P_w/A (W/m^2)	c	k	P_w/A (W/m^2)
Enero	2,89	2,03	0,82	3,19	1,45	27,64	3,14	1,40	28,22
Febrero	2,79	2,56	0,73	2,87	1,07	43,84	2,99	1,45	22,78
Marzo	2,49	1,76	0,75	2,75	1,44	17,90	2,70	1,43	17,20
Abril	2,87	1,83	0,80	3,20	1,61	23,15	3,05	1,47	23,35
Mayo	2,70	1,54	0,89	3,04	1,82	16,59	2,90	1,64	16,88
Junio	2,52	1,79	0,95	2,77	1,43	18,74	2,72	1,37	19,25
Julio	2,62	1,87	0,93	2,88	1,42	21,16	2,86	1,41	21,17
Agosto	2,92	1,94	0,79	3,25	1,54	26,17	3,18	1,47	26,84
Setiembre	3,24	2,09	0,76	3,61	1,59	34,06	3,48	1,48	34,66
Octubre	3,17	2,26	0,76	3,49	1,42	37,62	3,46	1,40	37,92
Noviembre	3,42	2,24	0,76	3,81	1,57	40,92	3,66	1,44	42,30
Diciembre	3,19	2,22	0,75	3,53	1,47	36,69	3,49	1,43	37,16
Promedios	2,89	2,03	0,82	3,20	1,49	28,71	3,13	1,45	27,31

En la tabla 10 tenemos un promedio de densidad de potencia de 28,71 (W/m^2) el cual es bajo según Manwell *et al.* (2010), por lo tanto, no es recomendable turbinas rápidas, pero si podría ser usado para turbinas de eje vertical de extracción de agua.

Tabla 11
Probabilidad de viento mayor o igual a 3 m/s para el año 2018

Meses	Método empírico $\Pr(v \geq 3)$	Método gráfico $\Pr(v \geq 3)$
Enero	0,40	0,39
Febrero	0,35	0,37
Marzo	0,32	0,31
Abril	0,41	0,38
Mayo	0,38	0,35
Junio	0,33	0,32
Julio	0,35	0,34
Agosto	0,41	0,40
Setiembre	0,48	0,45
Octubre	0,45	0,44
Noviembre	0,50	0,47
Diciembre	0,46	0,45
Promedios	0,40	0,39

En la tabla 11 se observa la probabilidad de que la velocidad del viento sea mayor a 3 m/s.

Para la obtención de la densidad de potencia disponible en el viento (WPD) se consideró una densidad del aire promedio de $\rho = 0,7934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ este valor depende de la altitud en la que se encuentra la ciudad

Los datos registrados por la temperatura y presión de la estación meteorológica del SENAMHI: $T_{promedio} = 9,55 \text{ } ^\circ\text{C}$, $P_{promedio} = 640,20 \text{ mBar}$, la altura en metros sobre el nivel del mar: $h = 3827 \text{ m.s.n.m.}$ Entonces, la densidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{9,55 + 273} \right) e^{-\left(\frac{3827}{8435} \right)}$$
$$\rho = 0,7934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

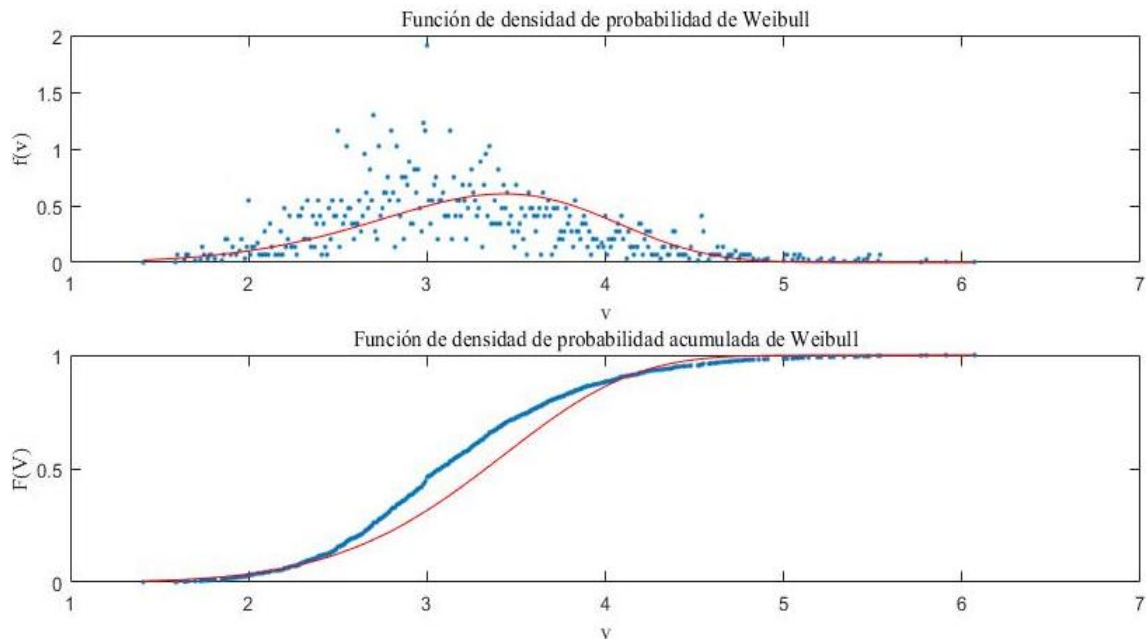


Figura 26. Función densidad de probabilidad de Weibull

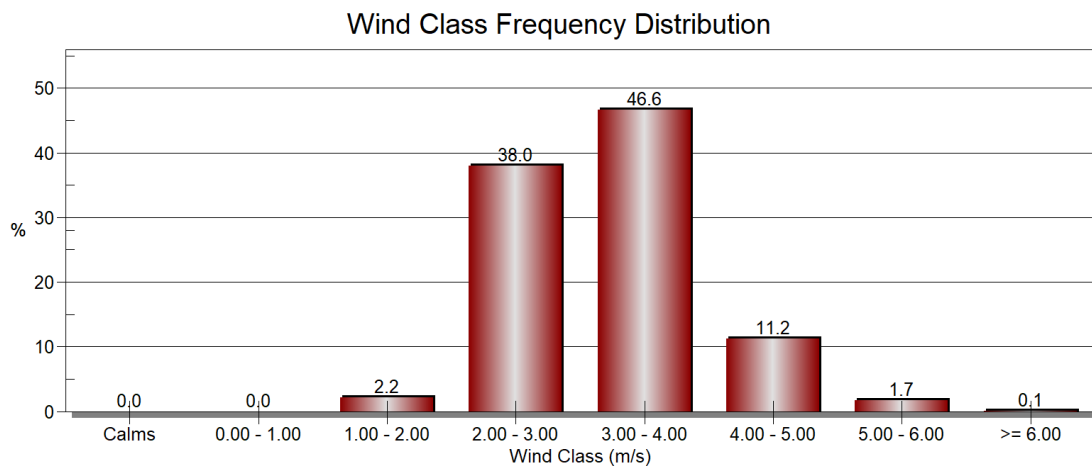


Figura 27. Distribución de la frecuencia de la clase de vientos.

En la figura 26 se tiene la gráfica de la función densidad de la probabilidad de Weibull y en la figura 27 se tiene el histograma que muestra que 46,60 % de frecuencia de la velocidad está entre 3 y 4 m/s

4.2 Análisis del potencial de energía solar en Paucarcolla

En la figura 28 se muestra el análisis de la tendencia de la serie de tiempo de la radiación solar.

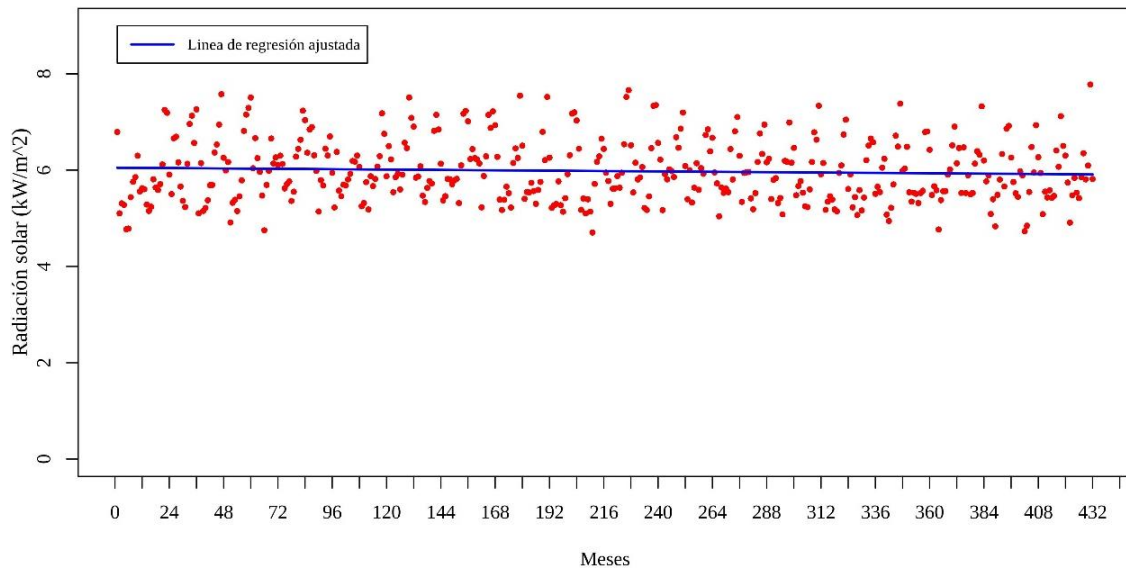


Figura 28. Promedios de la radiación solar según meses (1985 a 2020) y la regresión lineal correspondiente.

Se realizó un análisis estadístico, específicamente el análisis de regresión lineal, utilizando el Software Estadístico R, utilizando los datos de la radiación solar para describir las características del sitio de estudio.

Con la finalidad de revisar la tendencia, se empleó los datos descargados de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-acceso-espectador>) debido a los años que abarca. En la figura 28 se muestra los promedios de las radiaciones solares según meses (de 36 años desde el 1985 hasta el 2020), es decir, en la figura indicada el eje de las abscisas (horizontal): 0 es enero de 1985, 2 es febrero de 1985, 3 es marzo de 1985, así sucesivamente hasta llegar a diciembre del 2020; en dicho gráfico se muestra también la regresión lineal correspondiente. Se puede observar que la radiación solar es prácticamente constante a lo largo de los 36 años, los resultados de la regresión se muestran en la figura 29, donde, la pendiente es de $-0,0003211$ que es próximo a cero y considerando que la pendiente es susceptible a un dato atípico, se puede considerar que es casi cero.

La fórmula de regresión lineal es: Radiación Solar = $6,0507050 - 0,0003211 * \text{MES}$, la radiación media oscila entre 4,70 y 7,78 kW/m².

```
Call:
lm(formula = y ~ x)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1,27908 -0,45073 -0,09368  0,41850  1,86736

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  6,0507050  0,0610266  99,149  <2e-16 ***
x            -0,0003211  0,0002443  -1,315   0,189
---
Signif. codes:  0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,10 ' ' 1

Residual standard error: 0,6331 on 430 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0,004003,    Adjusted R-squared:  0,001687
F-statistic: 1,728 on 1 and 430 DF,  p-value: 0,1893
```

Figura 29. Reporte de la regresión lineal de la radiación solar según meses (1985 a 2020)

Se concluye que la radiación solar en el lugar de estudio tiende a mantenerse constante a través de tiempo (pendiente casi cero).

La radiación solar promedio por meses para el área de Paucarcolla se presenta en la tabla 12. Se observa un valor máximo en el mes de noviembre, y el promedio anual es de 6,03 kWh/m² /día el cual es alta según (Kalogirou, 2014)

Tabla 12

Radiación solar diaria promedio en meses

Mes	Radiación diaria (kWh/m ² /día)
Enero	5,84
Febrero	5,84
Marzo	5,66
Abril	5,65
Mayo	5,63
Junio	5,39
Julio	5,57
Agosto	5,94
Setiembre	6,49
Octubre	6,84
Noviembre	7,01
Diciembre	6,50
Promedio	6,03

Fuente: NASA (s. f.).

4.3 Determinación de la demanda

El perfil de carga no muestra el consumo medio de energía y es de 9,49 kWh/d. La figura 30 muestra el perfil de carga diaria promedio en el que se ha formado de 19:00 a 22:00 h como demanda pico que regula el tamaño del sistema. En Homer se utilizó un promedio anual escalado, también una variabilidad aleatoria (día a día 10% y timestep 20%). La carga o demanda usada está de acuerdo a la carga o demanda promedio internacional para zonal rurales.

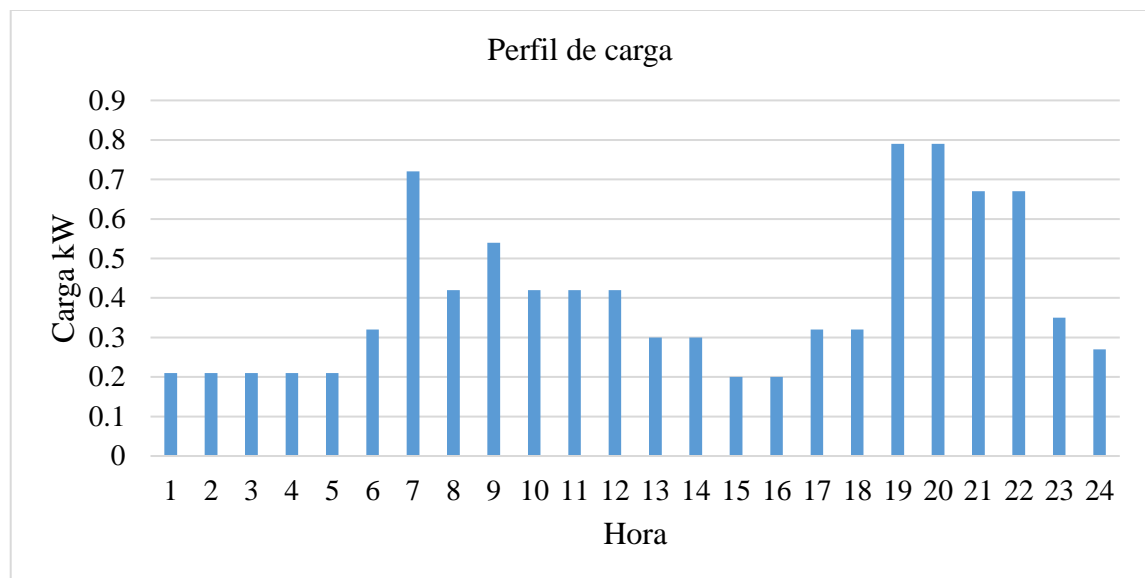


Figura 30. Perfil de carga para el análisis

4.3.1 Panel fotovoltaico

El módulo solar CSI CS6K-295MS-T4 se selecciona por su diseño que tiene una vida útil de 25 años y una eficiencia del 18,02 %. Las características eléctricas de CSI CS6K-295MS-T4 se dan en la tabla 13 y tiene 295 Watts de potencia y un rendimiento de 18,02%. El costo de instalación asumido del sistema de panel fotovoltaica de 1kW será de mil de dólares con un costo de operación y mantenimiento al 1% del costo total de inversión (Rinaldi *et al.*, 2020). El factor de reducción es del 80% durante una vida útil de 25 años.

Tabla 13

Especificaciones eléctricas del módulo solar CS6K-295MS

Número de modelo	CSI CS6K-295MS-T4
Clasificación STC	295,0 Watts
Rendimiento	18,02%
Voltaje de circuito abierto (Voc)	39,5 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9,75 A
Color del marco	Negro
Origen:	China
Tolerancia de potencia	0 / +5 Watts
Peso (libras)	40,1
Longitud (pulg)	65,0
Ancho (pulg)	39,1
Altura (pulg)	1,57

Fuente: HOMER

4.3.2 Turbina eólica

La turbina eólica más adecuada para la planta propuesta se seleccionó en función de la densidad de energía eólica, la velocidad media del viento y los requisitos de potencia del sitio. Para el diseño se eligió una turbina eólica con una potencia nominal de 1 kW a fin de aprovechar la baja velocidad del viento de manera eficiente. La figura 31 muestra la curva de potencia del aerogenerador seleccionado Bergey XL1

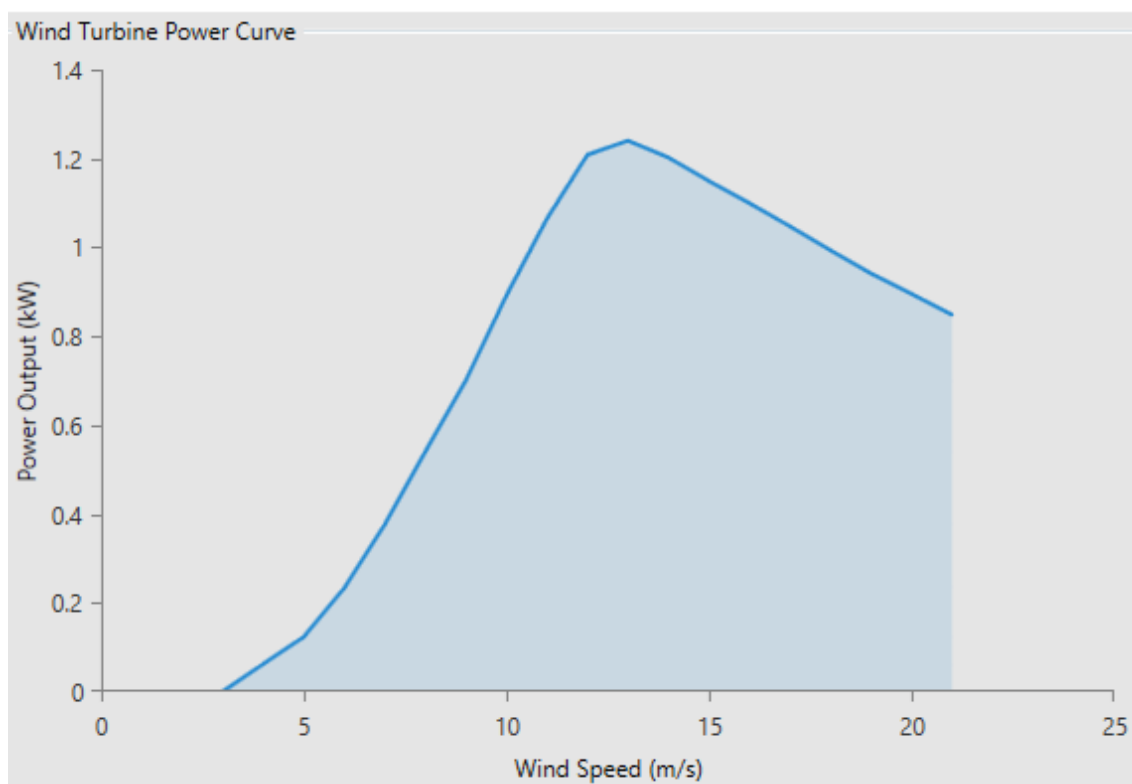


Figura 31. Curva de potencia del aerogenerador Bergey XL1

Fuente: HOMER (s. f.).

Especificaciones de la turbina XL1:

Velocidad de inicio: 3 m/s (6,7 mph)

Velocidad de corte: 2,5 m/s (5,6 mph)

Velocidad nominal del viento: 11 m/s (24,6 mph)

Potencia nominal: 1000 vatios

Velocidad de corte: ninguna

Max. Velocidad de diseño: 54 m/s (120 mph)

Tipo: 3 palas contra el viento

Diámetro del rotor: 2,5 m (8,2 pies)

Control de paso de la hoja: ninguno, paso fijo

Protección contra exceso de velocidad: AUTOFURL

Caja de cambios: Ninguna, Direct Drive

Rango de temperatura: -40 a +60 grados. C (-40 a +140 grados F)

Generador: alternador de imán permanente

Forma de salida: 12 - 48 VCC nominal.

4.3.3 Batería y convertidor

Se consideró Trojan SPRE 06 225 1,36 kWh, 226 Ah, plomo ácido inundado, con un voltaje nominal de 6 V y un rendimiento de por vida de 1 086 kWh. La hoja de datos disponible en el HOMER indica que la batería tiene una eficiencia de ida y vuelta del 80%. La vida útil de la batería es de 8 años. El capital y el costo de reemplazo de la batería se consideran \$ 160 por una unidad de batería (Hossain *et al.*, 2017). Las baterías se basan en ciclos de carga y descarga. El costo del equipo y el costo de reemplazo del convertidor se consideran de 800 \$/kW, respectivamente. La vida útil del convertidor es de 15 años, con una eficiencia del inversor del 95% y una eficiencia del rectificador del 95%.

4.4 Configuración del sistema de energía híbrida eólica y solar

El sistema híbrido eólico-solar aislado de la red consta de una red local, paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas e inversores. El software HOMER se utiliza como herramienta para realizar el análisis. La figura 32 muestra la configuración del sistema eléctrico híbrido conectado a la red. HOMER requiere información de entrada para analizar el sistema. Esas entradas se describen en detalle a continuación.

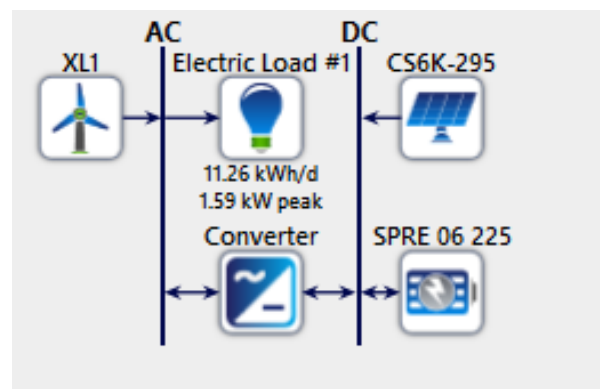


Figura 32. Configuración del sistema híbrido eólico-solar conectado a la red en HOMER

4.4.1 Resultados obtenidos en las simulaciones

En la figura 33 a continuación resume las configuraciones categorizadas del sistema modelado que describe tres variaciones de escenario principales, de los cuales se analizarán las dos primeras (definidas como E1 y E2) para la generación de electricidad. E1 es el escenario cuando solo se considera la energía solar, E2 es el escenario cuando están presentes la energía solar y eólica. Se tiene que el costo de

energía (COE) para el escenario E1 es de 0,295 \$/kWh y para el escenario E2 es de 0,335 \$/kWh. El valor de COE de la configuración óptima del estudio propuesto, es 0,335 \$/kWh, el cual es bastante competitivo con los estudios de sistemas fotovoltaicos/eólicos/baterías de la literatura que tienen valores de COE que oscilan entre 0,156 y 0,594 \$/ kWh (Al-Turjman *et al.*, 2020 ; Javed *et al.*, 2019). En el estudio de Ngan y Tan (2012) se analizaron siete configuraciones diferentes del sistema solar-eólico-diesel. El estudio infirió que, aunque solo el sistema basado en diésel tiene el COE más bajo (0.4 \$/kWh), no es una opción viable debido a las altas emisiones de carbono. Sin embargo, a pesar del valor de COE ligeramente alto (0,44 \$/kWh), el sistema fotovoltaico/eólico/diésel se recomienda como la mejor opción. En el estudio de Rehman *et al.*(2012) los autores propusieron un sistema diésel solar-eólico para una aldea remota donde inicialmente se generaba electricidad con generadores diésel y concluyeron que cada 0,5 m/s de aumento en la velocidad del viento, produce una disminución del 5% en el COE. En el estudio de Nandi y Ghosh (2009) los autores optimizaron un sistema solar/ eólico/batería para carga comunitaria, y concluyeron que el sistema de energía renovable propuesto tiene un valor de COE de 0,363 \$/kWh y el sistema es amigable con el medio ambiente ya que puede mitigar 25 toneladas de carbono por año. En el estudio realizado por Li *et al.*(2013), el sistema optimizado de energía solar/eólica/batería se desarrolla considerando los efectos de la temperatura ambiente, la variación de la carga y el ángulo de inclinación fotovoltaico (PV), y el sistema óptimo propuesto tiene un valor de COE de 1,045 \$/ kWh.

En el estudio realizado por Ma *et al.*(2014), el sistema fotovoltaico/ viento/batería se optimiza utilizando HOMER para la isla remota de Hong Kong. Los autores concluyeron que la configuración óptima del sistema propuesto para una carga de 250 kWh/día tiene un valor de COE de 0,594 \$/kWh. En el estudio de Hiendro *et al.*(2013), los autores indicaron que el viento y la batería son los componentes más importantes del sistema solar-viento-batería ya que estos dos componentes tienen la mayor contribución en el costo del sistema y el balance energético durante las horas nocturnas. En el estudio de Bhattacharjee y Acharya (2015), el sistema de energía solar-eólica a pequeña escala se analiza para la topografía de viento bajo, y concluyen que la configuración óptima propuesta del sistema fotovoltaico/eólico/ de batería tiene un valor de COE de 0,488 \$/kWh. En el estudio de Ma y Javed (2019), el dimensionamiento integrado del sistema fotovoltaico / eólico / de batería para isla

remota considerando la saturación de cada fuente de energía renovable involucrada y se obtiene un valor de COE comprendido entre 0,094 y 0,119 \$/kWh. Estudios realizado por Flavio Rinaldi *et al.* (2020), análisis de factibilidad económica y optimización de sistemas híbridos de energía renovable para electrificación rural en Perú y se obtuvo el valor de COE de 0,504 \$ / kWh para Silicucho, Puno, Perú.

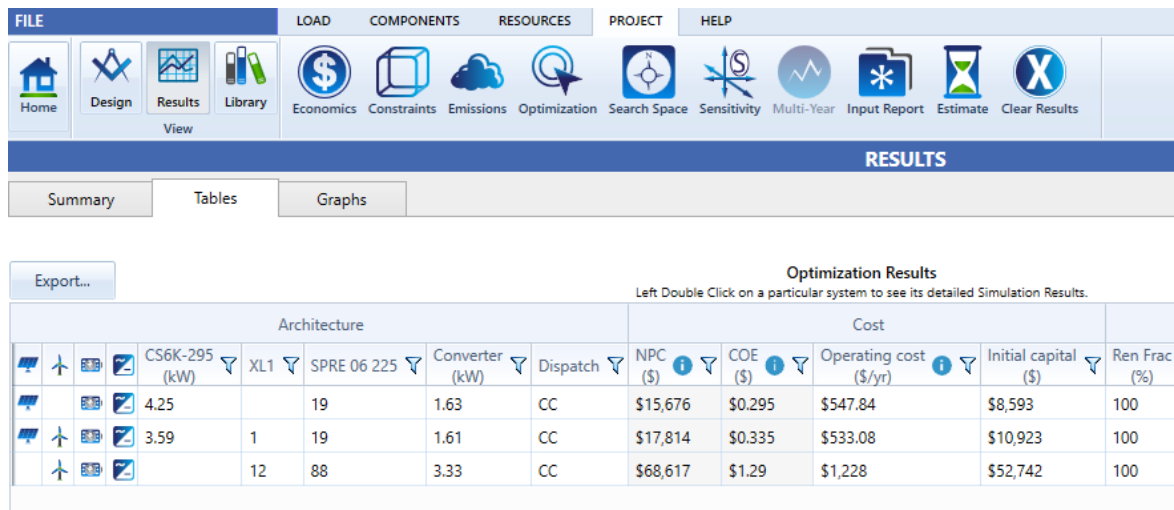


Figura 33. Resultados de la simulación HOMER

En figura 34 se aprecia el porcentaje de producción de energía para el escenario E2, el cual muestra que la generación de energía por meses tanto para la fracción solar y eólica, siendo los totales para el año en la energía solar es 7 413 kWh/año y la energía eólica 610 kWh/año, y la producción total de energía es 7 843 kWh/año

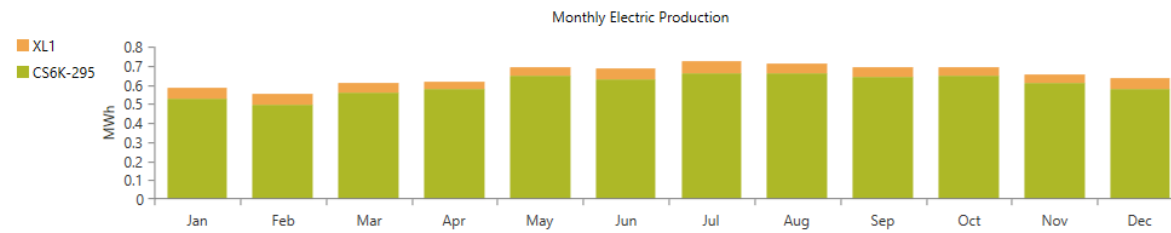
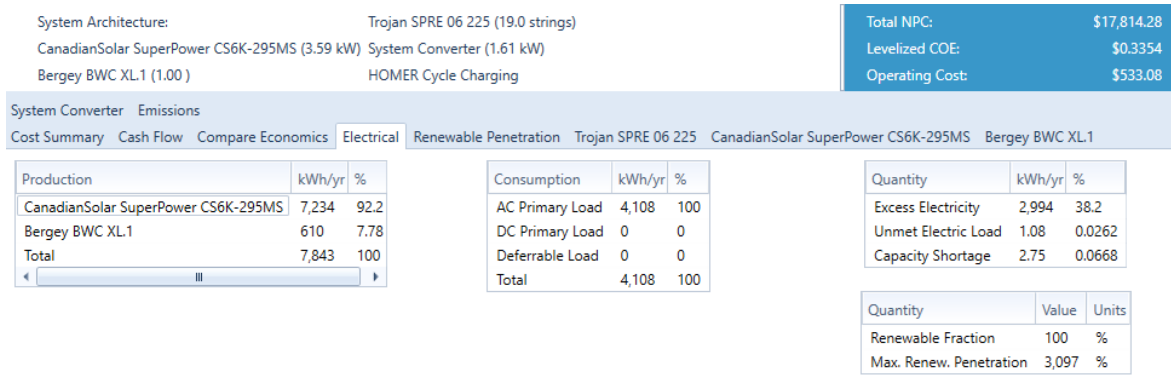


Figura 34. Porcentaje de producción de energía para el escenario E2

En figura 35 se aprecia el porcentaje de producción de energía para el escenario E1, el cual muestra que la energía solar por meses, sumando la generación total anual de 8 560 kWh/año.

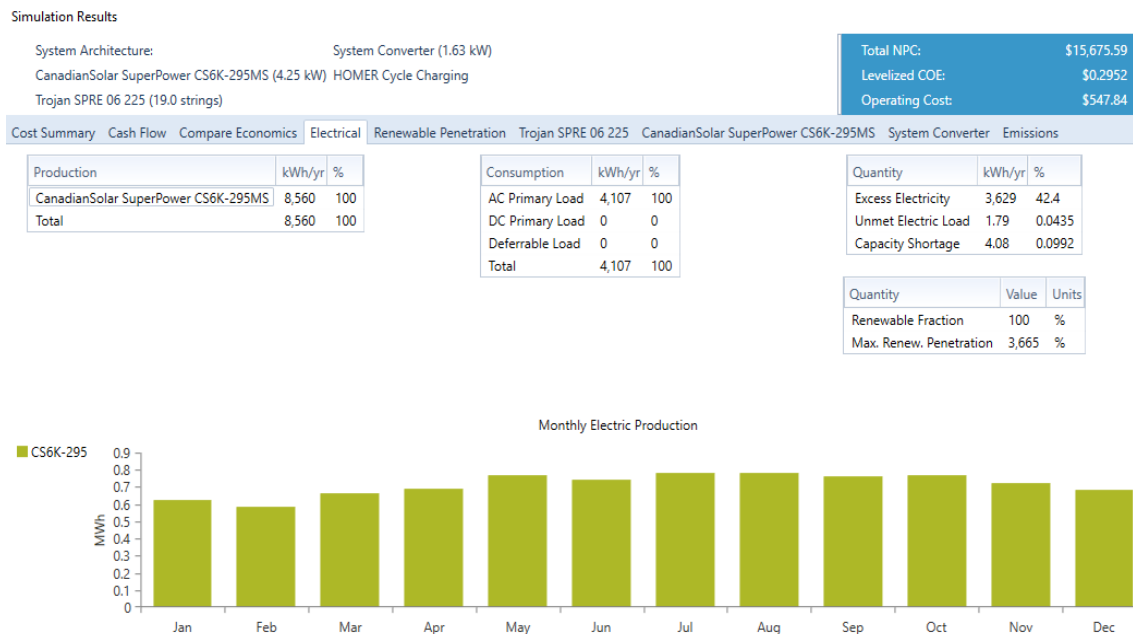


Figura 35. Porcentaje de producción de energía para el escenario E1

4.4.2 Análisis tecno económico de los resultados

En el análisis tecno económico del proyecto, cada escenario categorizado se discutirá en detalle con respecto a los parámetros técnicos y económicos resultantes de los procedimientos de simulación, y luego se elegirá el escenario que satisfaga la demanda al menor costo para su consideración adicional y que contemple la generación de energía híbrida solar y eólica.

En la figura 36 para el escenario E1 en las distintas etapas de la vida útil de 25 años, tales costos de inversión inicial, costos de reemplazo, costos de mantenimientos y otros. Se puede observar que el primer año todos los componentes requieren de un gasto inicial de inversión, luego se observa como la operación y mantenimiento (O&M) está presente cada año, Por otro lado, aproximadamente cada ocho años hay un gasto asociado a las baterías, Por último, al final del periodo de vida de la instalación se observa un ingreso que viene del convertidor y baterías.

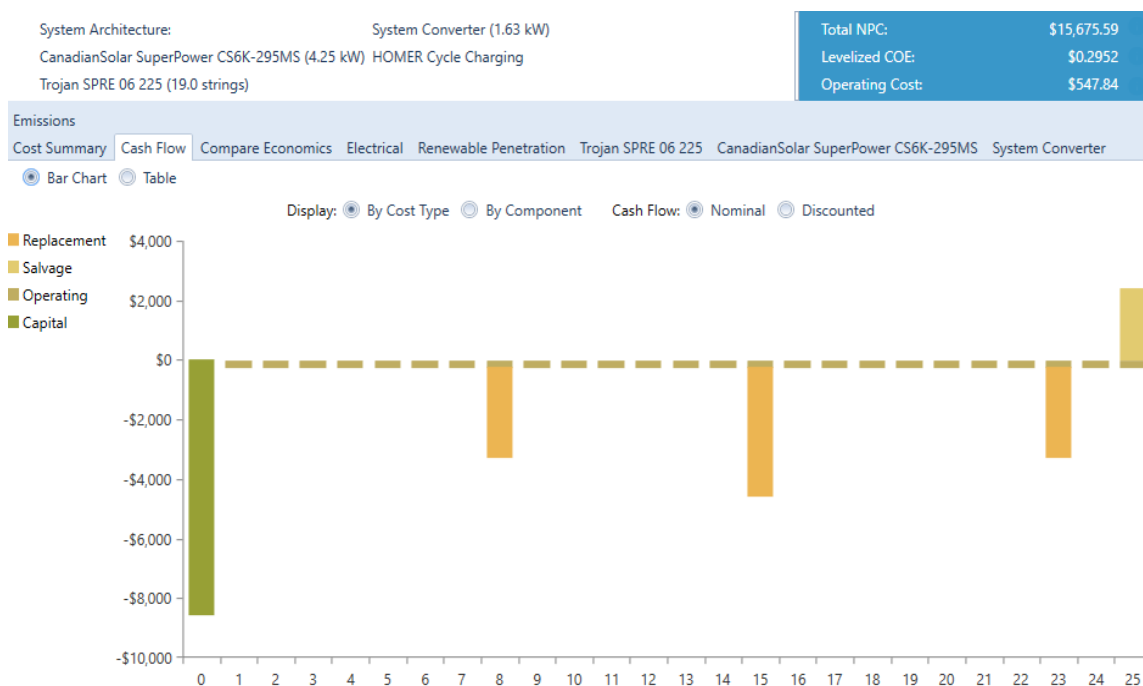


Figura 36. Costos e ingresos distribuidos a lo largo de la vida útil del proyecto del escenario E1.

En la figura 37 para el escenario E2 en las distintas etapas de la vida útil de 25 años, se puede observar los costos de inversión inicial, costos de reemplazo, costos de mantenimientos y otros. Se puede observar que el primer año todos los componentes requieren de un gasto inicial de inversión, luego se observa como la operación y

mantenimiento (O&M) está presente cada año, Por otro lado, aproximadamente cada ocho años hay un gasto asociado a las baterías, Por último, al final del periodo de vida de la instalación se observa un ingreso que viene del convertidor.

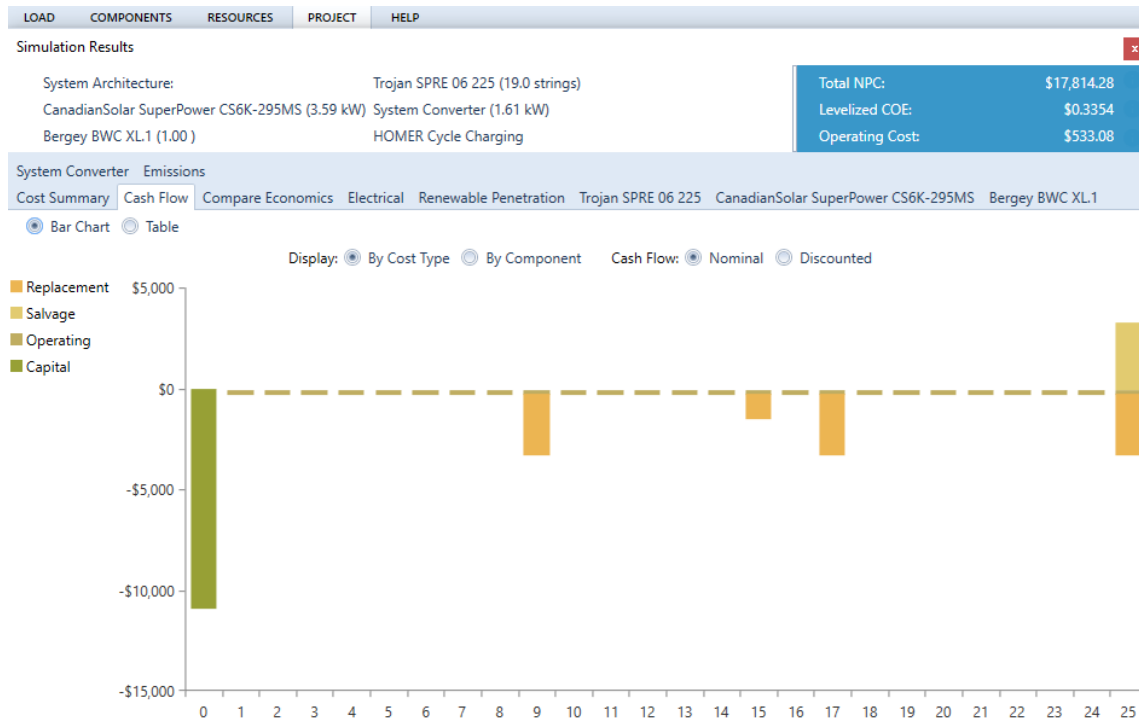


Figura 37. Costos e ingresos distribuidos a lo largo de la vida del proyecto del escenario E2.

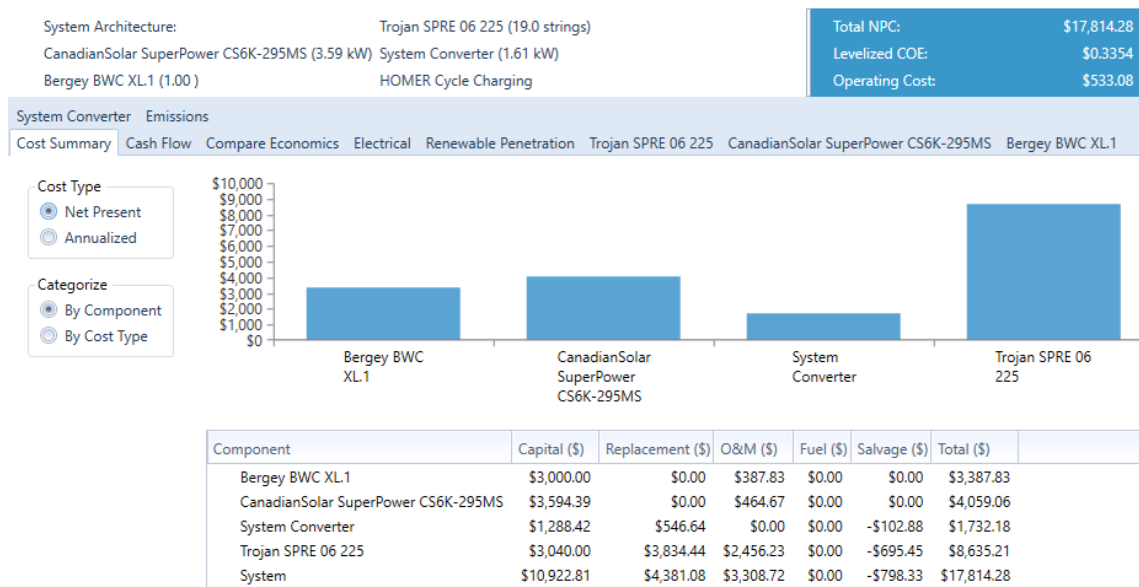


Figura 38. Resumen de costos por componente

En la figura 38 tenemos los costos por componente de equipos para el panel solar la turbina eólica, el sistema de conversión y las baterías para el escenario E2

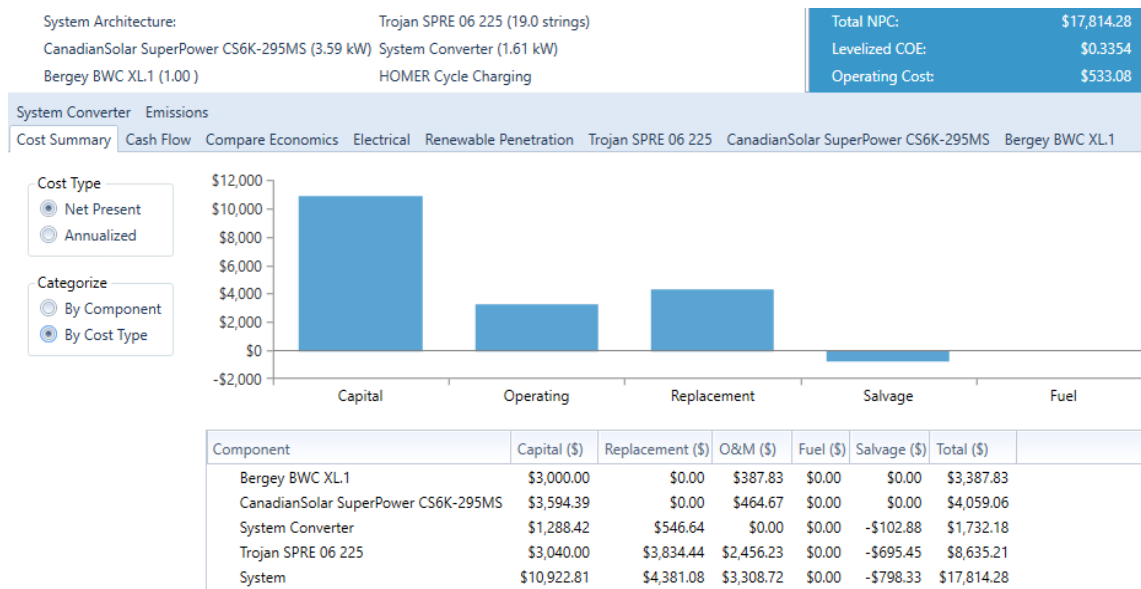


Figura 39. Resumen de costos por rubro

En la figura 39 tenemos los costos por rubro tales como el capital inicial, operación y mantenimiento, reemplazo para el escenario E2.

En la tabla 14 se muestra los componentes y sus costos del sistema optimizado para el sistema híbrido eólico fotovoltaico del caso de estudio.

Tabla 14

Componentes y sus costos del sistema optimizado híbrido eólico fotovoltaico

Componentes	Capacidad	Capital (\$)	Reemplazo (\$)	O&M (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Turbina de viento Bergey BWC XL.1	1 kW	\$3 000,00	\$0,00	\$387,83	\$0,00	\$3 387,83
Paneles solares CS6K-295MS	3,59 kW	\$3 594,39	\$0,00	\$464,67	\$0,00	\$4 059,06
Sistema de conversión	1,61 kW	\$1 288,42	\$546,64	\$0,00	-\$102,88	\$1 732,18
Baterías Trojan SPRE 06 225	19 unidades	\$3 040,00	\$3 834,44	\$2 456,23	-\$695,45	\$8 635,21
Valor inicial de Sistema híbrido		\$10 922,81	\$4 381,08	\$3 308,72	-\$798,33	\$17 814,28

4.4.3 Datos económicos

El parámetro de entrada económica para este diseño, incluida la tasa de interés real anual y la vida útil del proyecto, son necesarios para la simulación HOMER. Se supone que la vida útil de la central eléctrica es de 25 años y la tasa de interés real anual es del 10%.

4.4.4 Impacto ambiental

La energía eólica o solar no puede ser la única fuente de electricidad en una red de carga base estable, pero pueden reducir el uso de fuentes de energía convencionales. Los beneficios ambientales del sistema híbrido eólico-solar en este estudio se evaluaron en términos de emisiones evitadas. Dado que una central térmica convencional emite una determinada cantidad de contaminante por kWh de electricidad generada, se puede considerar que el sistema híbrido eólico-solar provoca una evitación de emisiones, ya que genera la electricidad con emisiones contaminantes casi nulas.

Aunque existen muchos tipos de emisiones relacionadas con la producción de electricidad, en esta tesis solo se consideraron las emisiones de CO₂. El CO₂ es el componente más grande de las emisiones de la producción de electricidad convencional y puede considerarse como el mayor impacto ambiental causado por la industria energética establecida.

La cantidad de CO₂ producida por el combustible diésel convencional es de 0,6 kg por 1 kWh. Por tanto, la reducción de CO₂ por generación energético de 4108 kWh /año sería de 2,46 toneladas de CO₂ anuales

CONCLUSIONES

A través de este trabajo se dio una idea de la situación energética y el potencial energético renovable del distrito de Paucarcolla, se identificó que tiene un potencial de generación de energía económicamente viable a partir de energía eólica y solar. Por tanto, es apto para la generación de energía eólica y solar.

Se determinó el recurso eólico y solar en el lugar de Paucarcolla, también se hizo una propuesta para su aprovechamiento con el programa HOMER para la zona de estudio.

Se realizó un estudio preliminar de costos y por lo tanto se calculó un costo de energía, la propuesta de implementar un sistema híbrido eólico fotovoltaico es viable técnica y económicamente.

Utilizando el software de simulación HOMER, se modeló un sistema híbrido de generación de energía eólica-solar aislado de la red para una ubicación seleccionada en el distrito de Paucarcolla, ubicado en la zona altiplánica de Puno. Mediante el proceso de simulación, se identificó la instalación híbrida de aerogenerador de 1 kW y un conjunto de paneles solares fotovoltaicos de 3,68 kW como el diseño más económicamente factible con un costo energético COE de \$ 0,335/kWh para suministrar una energía de 9,49 kWh/día promedio.



RECOMENDACIONES

Se recomienda la instalación del sistema híbrido estudiado en Paucarcolla, ya que es una alternativa viable.

Se recomienda investigar la viabilidad de generación de energía con sistemas híbridos eólicos fotovoltaicos en otros lugares del Perú.

Se debe tener en cuenta que cada lugar tiene sus propias características meteorológicas que podrían hacer viable la implementación de los sistemas híbridos eólicos fotovoltaicos.

BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (2010). *Cuaderno de aplicaciones técnicas. Plantas eólicas*. 1-109.
- Afrouzi, H. N., Hassan, A., Wimalaratna, Y. P., Ahmed, J., Mehranzamir, K., Liew, S. C., & Malek, Z. A. (2021). Sizing and economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic-wind system for rural electrification: A case study Lundu, Sarawak. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100191>
- Al-Turjman, F., Qadir, Z., Abujubbeh, M., & Batunlu, C. (2020). Feasibility analysis of solar photovoltaic-wind hybrid energy system for household applications. *Computers & Electrical Engineering*, 86, 106743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106743>
- Ali, F., Ahmar, M., Jiang, Y., & AlAhmad, M. (2021). A techno-economic assessment of hybrid energy systems in rural Pakistan. *Energy*, 215, 119103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119103>
- Aparicio, M. P. (2010). *Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada*. (Segunda ed).
- Bekele, G., & Tadesse, G. (2012). Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. *Applied Energy*, 97, 5-15. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.11.059>
- Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2009). Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2111-2118. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.01.010>
- Bhattacharjee, S., & Acharya, S. (2015). PV–wind hybrid power option for a low wind topography. *Energy Conversion and Management*, 89(0), 942-954. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.065>
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines. En *Wind Energy Handbook*. <https://doi.org/10.1002/9781119992714.ch3>
- Castejón, A., & Santamaria, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas* (S. A. Editex (Ed.)).

- CEPLAN. (2011). *El Perú hacia el 2021-Plan bicentenario: Resumen Ejecutivo*.
- Chen, C. J. (2011). Physics of Solar Energy. En *Physics of Solar Energy*.
<https://doi.org/10.1002/9781118172841>
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059-1082.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.09.026>
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), 333-346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4)
- De Bernardez, L. S., Battioni, M., Cutrera, M., Risso, G., Buitrago, R. H., & Garcia, N. O. (2008). Determinación del ángulo óptimo de inclinación para la instalación de módulos fotovoltaicos mediante el uso de redes neurales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 9-14.
- Duffie (Deceased), J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. En *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. <https://doi.org/10.1002/9781119540328>
- Glaisa, K. A., Elayeb, M. E., & Shetwan, M. A. (2014). Potential of Hybrid System Powering School in Libya. *Energy Procedia*, 57(0), 1411-1420.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.132>
- González, J. A. C., & Pérez, R. C. (2009). *Centrales de energías renovables : generación eléctrica con energías renovables* (UNED (Ed.)). Pearson Educación.
- Häberlin, H. (2012). Photovoltaics: System Design and Practice. En *Photovoltaics: System Design and Practice*. <https://doi.org/10.1002/9781119976998>
- Hankins, M. (2010). *Stand-alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. Earthscan.
<https://books.google.com.pe/books?id=pGonNYdoMFUC>
- Herrera-Romero, J. V., Colorado-Garrido, D., Escalante Soberanis, M. A., & Flota-Bañuelos, M. (2020). Estimation of the optimum tilt angle of solar collectors in Coatzacoalcos, Veracruz. *Renewable Energy*, 153, 615-623.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.045>

- Hiendro, A., Kurnianto, R., Rajagukguk, M., Simanjuntak, Y. M., & Junaidi. (2013). Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia. *Energy*, 59(0), 652-657. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.005>
- HOMER - Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software*. (s. f.). Recuperado 13 de febrero de 2019, de <https://www.homerenergy.com/>
- Hossain, M., Mekhilef, S., & Olatomiwa, L. (2017). Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 28, 358-366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.008>
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press.
- Izadyar, N., Ong, H. C., Chong, W. T., Mojumder, J. C., & Leong, K. Y. (2016). Investigation of potential hybrid renewable energy at various rural areas in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 139, 61-73. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.167>
- Javed, M. S., Song, A., & Ma, T. (2019). Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm. *Energy*, 176, 704-717. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.131>
- Justus, C. ~G., & Mikhail, A. (1976). Height variation of wind speed and wind distributions statistics. *Jgrl*, 3(5), 261-264. <https://doi.org/10.1029/GL003i005p00261>
- Kaldellis, J. K., Gkikaki, A., Kaldelli, E., & Kapsali, M. (2012). Investigating the energy autonomy of very small non-interconnected islands: A case study: Agathonisi, Greece. *Energy for Sustainable Development*, 16(4), 476-485. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2012.08.002>
- Kaldellis, J. K., Kavadias, K. A., & Koronakis, P. S. (2007). Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1), 57-77. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2004.12.001>
- Kaldellis, J. K., Zafirakis, D., Stavropoulou, V., & Kaldelli, E. (2012). Optimum wind-

- and photovoltaic-based stand-alone systems on the basis of life cycle energy analysis. *Energy Policy*, 50, 345-357.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.07.029>
- Kalogirou, S. A. (2009). Solar Energy Engineering. En *Solar Energy Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5>
- Kalogirou, S. A. (2014). Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition. En *Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition*.
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-07038-2>
- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M., & Abbaszadeh, R. (2010). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35(1), 188-201.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.009>
- Khahro, S. F., Tabbassum, K., Soomro, A. M., Dong, L., & Liao, X. (2014). Evaluation of wind power production prospective and Weibull parameter estimation methods for Babaurband, Sindh Pakistan. *Energy Conversion and Management*, 78, 956-967.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.062>
- Khalid Saeed, M., Salam, A., Rehman, A. U., & Abid Saeed, M. (2019). Comparison of six different methods of Weibull distribution for wind power assessment: A case study for a site in the Northern region of Pakistan. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100541.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100541>
- Khan, F. A., Pal, N., & Saeed, S. H. (2021). Optimization and sizing of SPV/Wind hybrid renewable energy system: A techno-economic and social perspective. *Energy*, 233, 121114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121114>
- Li, C., Ge, X., Zheng, Y., Xu, C., Ren, Y., Song, C., & Yang, C. (2013). Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China. *Energy*, 55(0), 263-272.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.084>
- López, M. V. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Marcombo.
- Ma, T., & Javed, M. S. (2019). Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for

- remote island considering the saturation of each renewable energy resource. *Energy Conversion and Management*, 182, 178-190.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.059>
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2014). A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy*, 121(0), 149-158.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.090>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. En *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Marks, L. S., Baumeister, T., & Avallone, E. A. (1978). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. McGraw-Hill.
<https://books.google.com.pe/books?id=uHcWwAEACAAJ>
- Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 9(3), 267-281. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- Nandi, S. K., & Ghosh, H. R. (2009). A wind–PV–battery hybrid power system at Sitakunda in Bangladesh. *Energy Policy*, 37(9), 3659-3664.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.039>
- NASA POWER / *Prediction Of Worldwide Energy Resources*. (s. f.). Recuperado 13 de enero de 2021, de <https://power.larc.nasa.gov/>
- Ngan, M. S., & Tan, C. W. (2012). Assessment of economic viability for PV/wind/diesel hybrid energy system in southern Peninsular Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 634-647.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.028>
- OSINERGMIN. (2021). *Fichas técnicas proyectos de generación de energía eléctrica en operación*.
- Patel, M. R. (2005). Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation, second edition. En *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, Second Edition*. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0001br>

- PNCTI - CONCYTEC. (2006). *Plan Nacional Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación PNCTI 2006-2021*.
- Rehman, S., Mahbub Alam, M., Meyer, J. P., & Al-Hadhrami, L. M. (2012). Feasibility study of a wind–pv–diesel hybrid power system for a village. *Renewable Energy*, 38(1), 258-268. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.028>
- Rinaldi, F., Moghaddampoor, F., Najafi, B., & Marchesi, R. (2020). Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01906-y>
- Rohatgi, J. S., & Nelson, V. (1994). *Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power*. Alternative Energy Institute, West Texas A & M University. <https://books.google.com.pe/books?id=JaBhAAAACAAJ>
- Saleh, H., Abou El-Azm Aly, A., & Abdel-Hady, S. (2012). Assessment of different methods used to estimate Weibull distribution parameters for wind speed in Zafarana wind farm, Suez Gulf, Egypt. *Energy*, 44(1), 710-719. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.021>
- Schlichting , H. (1979). *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill.
- SENAMHI - Perú. (s. f.). Recuperado 13 de enero de 2020, de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2003). *Atlas de Energía Solar del Perú*. Lima, Perú. 72.
- Shaahid, S. M., & Elhadidy, M. A. (2008). Economic analysis of hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for residential loads in hot regions—A step to clean future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 488-503. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2006.07.013>
- Stanciu, C., & Stanciu, D. (2014). Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World - A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Conversion and Management*, 81, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.016>
- Suresh, V., M., M., & Kiranmayi, R. (2020). Modelling and optimization of an off-grid

- hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas. *Energy Reports*, 6, 594-604. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.01.013>
- Tito, U. Y., Quispe-Huaman, L., & Vilca-Huayta, O.-A. (2020). Evaluation of the Peak-Sun Hour on a Tilted Surface in the City of Juliaca. *2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/INTERCON50315.2020.9220191>
- Tito, U. Y., Vilca-Huayta, O.-A., & Quispe-Huaman, L. (2020). Estimation of the Wind Energy Potential: A Case Study for a Site in the Southern Region of Peru. *2020 IEEE ANDESCON*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272028>
- Van der Tempel, J., Cerda Salzmann, D., Mulder, T. J., Koch, J. M. L., Gerner, F. W. B., Calkoen, O. F. C., Göbel, A. J., Brinkhuis, H. T., Lagers, R. C., & Van Korven, W. G. S. (2006). Der Ampelmann - Proof of concept and prototype design. *European Wind Energy Conference and Exhibition 2006, EWEC 2006*, 2.
- Vasquez, J. W., & Lloyd, P. (1972). *Estimacion de energia solar en Peru*. OLADE. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm000325.pdf>
- Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*. Editorial Reverté, S.A. https://books.google.com.pe/books?id=bl6L8E_9t1kC
- Vidal, J. (2008). *Atlas Eólico del Perú*. 87.
- Wortman, A. J. (1983). *Introduction to wind turbine engineering*.
- WRPLOT View - Lakes Environmental Software*. (s. f.). Recuperado 13 de diciembre de 2020, de <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>
- Yang, H., Lu, L., & Zhou, W. (2007). A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. *Solar Energy*, 81(1), 76-84. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2006.06.010>
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., & Yang, H. (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*, 87(2), 380-389. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.08.012>

ANEXOS

Anexo 1. Datos de SENAMHI

Tabla 15

Tabla de valores de la estación meteorológica de Illpa

Estación : ILLPA , Tipo Automtica - Hidrológica

Departamento : PUNO Provincia : PUNO Distrito : PAUCARCOLLA Ir : 2013-10
 Latitud : 15° 41' 0" Longitud : 70° 5' 0" Altitud : 3827

Día/mes/año	Temperatura (°c)			Humedad (%)	Lluvia (mm)	Presion (mb)	Velocidad del Viento (m/s)	Direccion del Viento	Nivel Medio (m)
	Prom	Max	Min						
01-Oct-2013	9.63	18.7	1.3	20.54	0	644.13	3.51	78	-999
02-Oct-2013	9.1	18.1	.6	27.04	0	645.03	3.78	88	-999
03-Oct-2013	9.34	17.5	1.4	33	0	645.5	3.07	88	-999
04-Oct-2013	10.53	18.6	2.7	40.5	0	645.28	4.19	1	-999
05-Oct-2013	10.62	17.4	4.3	41.88	0	645.2	3.95	240	-999
06-Oct-2013	9.88	16.8	3	35.45	0	645.59	4.06	303	-999
07-Oct-2013	9.92	19	.3	38.96	.1	645.95	3.13	262	-999
08-Oct-2013	8.38	17.7	-3	40.92	.2	645.88	3.83	7	-999
09-Oct-2013	8.85	17.2	-1.1	37.73	0	646.02	3.85	237	-999
10-Oct-2013	8.56	15.8	3	57.88	2.9	645.63	3.06	63	-999
11-Oct-2013	8.06	17.2	-1.9	34.08	0	644.86	4.05	24	-999
12-Oct-2013	7.89	17.2	-3.9	35.92	1.4	644.88	3.85	68	-999
13-Oct-2013	5.67	10.8	.9	80.09	12.2	645.81	3.39	111	-999
14-Oct-2013	5.34	10.3	1.7	75.17	.1	646.47	2.54	52	-999
15-Oct-2013	7.14	14.2	2.6	70.13	.9	646.68	2.29	8	-999
16-Oct-2013	9.51	18.4	.7	46.27	0	646.04	3.33	31	-999
17-Oct-2013	10	20.1	.1	29.92	0	645.75	3.23	255	-999
18-Oct-2013	9.4	18.1	-1	28.91	0	645.45	4.19	17	-999
19-Oct-2013	9.88	18.2	.9	49.32	-999	645.16	3.37	43	-999
20-Oct-2013	10.43	20	-6	24.86	0	645.03	3.6	269	-999
21-Oct-2013	10.84	19.7	.6	34.14	0	644.95	4.81	102	-999
22-Oct-2013	10.38	18.7	-1	50.25	0	644.75	3.38	13	-999
23-Oct-2013	10.86	18.9	-1	32.65	0	644.28	3.72	81	-999
24-Oct-2013	9.14	14.7	5.4	74.67	4.8	645.98	4.6	100	-999
25-Oct-2013	9.52	16.6	4.3	69.92	.6	646.63	2.93	321	-999
26-Oct-2013	10.12	15.4	6.2	66.63	11.1	646.45	3.3	66	-999
27-Oct-2013	9.37	15	3.6	73.26	2.1	645.97	3.68	67	-999
28-Oct-2013	8.1	13.5	5	78.46	10.1	646.55	3.65	70	-999
29-Oct-2013	10.17	16.7	4.2	53.91	0	645.47	2.95	51	-999
30-Oct-2013	11.13	17.6	3.8	39.21	0	644.32	3.51	33	-999
31-Oct-2013	10.15	16.8	4.6	41.71	.8	643.71	4.19	94	-999

* Fuente : SENAMHI - Oficina de Estadística

* Información sin Control de Calidad

* El uso de esta información es bajo su entera Responsabilidad

Anexo 2. Resultados computacionales con HOMER

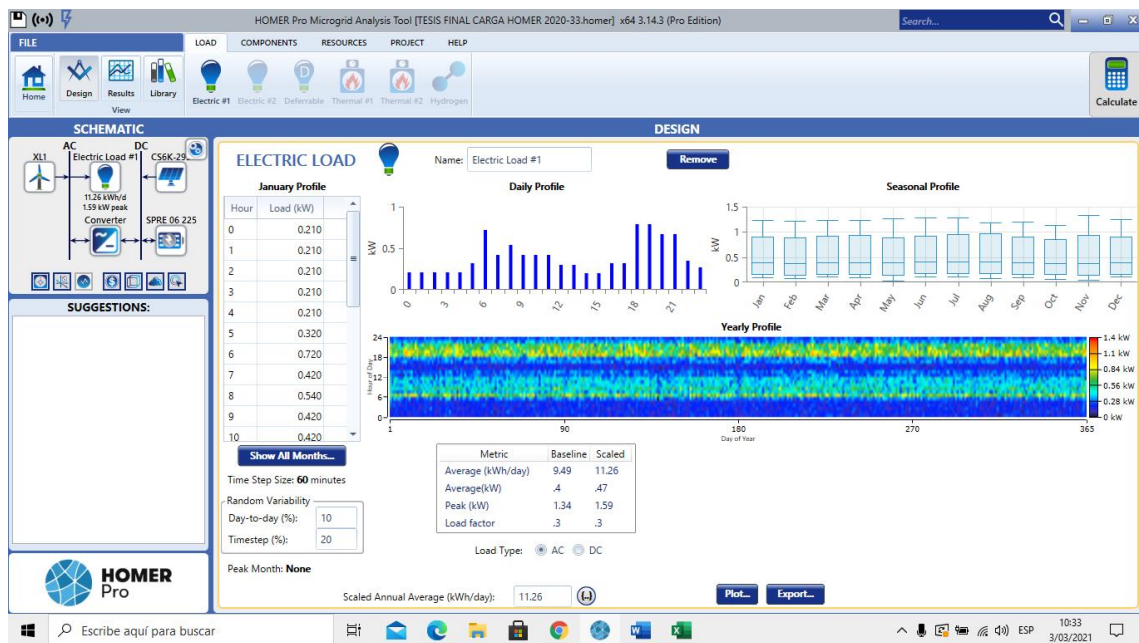


Figura 40. Demanda asumida por meses para el estudio

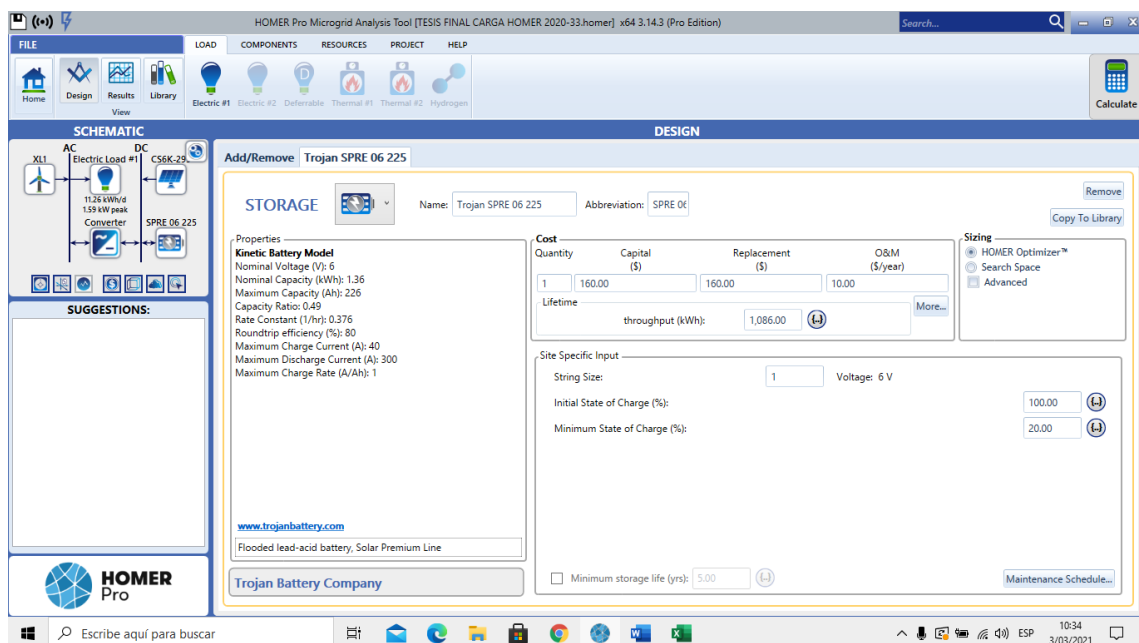


Figura 41. Características del batería ingresado en HOMER

Anexo 3. Características técnicas de los elementos auxiliares

Trojan Battery Company 6V, 229 Ah Premium Line Flooded Battery SPRE 06 255 (T-105-RE)



Renewable energy applications operate under challenging conditions such as fluctuating or extreme temperatures, remote locations and the intermittent nature of solar and wind power generation. Designed with a 10-year battery life, Trojan Battery's Premium line of flooded deep cycle batteries is specifically engineered to withstand the rigorous conditions of renewable energy applications. The Premium line incorporates advanced battery features such as Trojan's DuraGrid™, MaxGuard® XL separator and Alpha Plus® Paste technologies that provide superior performance, rugged durability and exceptionally long life. Our product strategy is focused on one simple objective - manufacture the highest quality battery available in the industry which is why our Premium line is tested to IEC standards.



Now Available With



SMART CARBON™ Deep-cycle batteries used in off-grid and unstable grid applications are heavily cycled at partial state of charge (PSOC). Operating at PSOC on a regular basis can quickly diminish the overall life of a battery, which results in frequent and costly battery replacements. To address the impact of PSOC on deep-cycle batteries in renewable energy (RE), inverter backup and telecom applications, Trojan Battery has now included Smart Carbon™ as a standard feature in its Industrial (IND) and Premium (RE) flooded battery lines.

Trojan RE Series Features:

- Smart Carbon Technology for 15% improved cycle life and faster recharge
- Improved construction for excellent performance in renewable energy applications
- 2 Year Warranty (twice as long as the standard Trojan line)

Product Specification

BCI Group Size	Type	Capacity Amp-Hours (20-Hr Rate)	Voltage	Length	Width	Height	Weight
GC2H	SPRE 06 255	229 AH	6V	10.375"	7.125"	11.75"	67 lbs.

DOD VS CYCLE LIFE IN A STATIONARY APPLICATION

Figura 42. Características de la batería empleada.

CS6K-295MS-14

Specifications

SUPERPOWER	
CSI Model Number	CS6K-295MS-T4
STC Rating	295.0 Watts
PTC Rating	270.8
Efficiency	18.02%
Open Circuit Voltage (Voc)	39.5 V
Short Circuit Current (Isc)	9.75 A
Frame Color	Black
Origin	China
Power Tolerance	0 / +5 Watts
Weight (lbs)	40.1
Length (in)	65.0
Width (in)	39.1
Height (in)	1.57

Canadian Solar CS6K-295MS SuperPower Low Price Solar Panel

The 295 watt CS6K-295MS features efficient PERC solar cells to significantly improve power performance in morning, evening and other low light conditions at a low price per watt.

- Efficient and reliable PERC Monocrystalline solar cells
- Sleek black frame with white backsheet
- PV wire w/ T4 (MC4 comparable) connectors
- Outstanding low-light performance
- Impressive 6000 Pa snow load rating
- The CS6K295MS has a reassuring power tolerance of +5W

Latest PERC Technology for High System Energy Yield

- 11% more power than conventional modules
- Excellent performance in low light
- High 270.8 PTC Rating for higher rebates or deductions

SuperPower solar panels are ideal for:

- On-grid roof-mount residential solar systems
- On-grid commercial / industrial rooftops
- Solar power stations, solar carports
- Other on-grid applications

CS6K-295MS-T4 Certifications
Management System Certificates

Canadian Solar CS6K SuperPower solar panels are certified by VDE to withstand harsh outdoor conditions including sand and salt mist.

Tabla 16

Consumo asumido para el estudio

Equipo	Potencia kW	Total de horas de uso por día	kW h
1 lámpara en la sala	0,02	5	0,10
1 fluorescente en el comedor	0,02	5	0,10
1 fluorescente en la cocina	0,02	5	0,10
1 fluorescente en el pasillo	0,02	5	0,10
1 lámpara 1er. Dormitorio	0,02	6	0,12
1 lámpara 2do. Dormitorio	0,02	6	0,12
1 foco en el baño	0,02	6	0,12
1 foco en el balcón	0,01	11	0,11
1 televisor	0,10	8	0,80
1 ordenador	0,12	8	0,96
1 equipo estéreo	0,10	8	0,80
1 plancha	1,00	0,3	0,30
1 refrigerador	0,20	24	4,80
1 PC Portátil	0,12	8	0,96
		Total	9,49 kwh-día