



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO
FOTOVOLTAICO PARA ELECTRIFICAR EL CASERÍO
ZAPOTAL EN JAYANCA EN EL DEPARTAMENTO DE
LAMBAYEQUE”**

Presentado Por:

Bach. SEGUNDO ALQUIMERES RODRIGUEZ DE LA CRUZ

Asesor:

Msc. Ing. JUAN TUMIALAN HINOSTROZA

LAMBAYEQUE – PERÚ

Marzo del 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO

ELECTRICISTA

**“DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO
FOTOVOLTAICO PARA ELECTRIFICAR EL CASERÍO
ZAPOTAL EN JAYANCA EN EL DEPARTAMENTO DE
LAMBAYEQUE”**

Presentado Por:

Bach. SEGUNDO ALQUIMERES RODRIGUEZ DE LA CRUZ

Aprobado por el Jurado Examinador

PRESIDENTE: Dr. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO

SECRETARIO: Ing. TEOBALDO JULCA OROSCO

MIEMBRO: Msc. CARLOS JAVIER COTRINA SAAVEDRA

ASESOR: Msc. JUAN ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA

Lambayeque – Perú

Marzo del 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

TITULO

**“DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO PARA
ELECTRIFICAR EL CASERÍO ZAPOTAL EN JAYANCA EN EL
DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE”**

CONTENIDOS

CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

AUTOR:

Bach. SEGUNDO ALQUIMERES RODRIGUEZ DE LA CRUZ

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

ASESOR

LAMBAYEQUE – PERÚ

Marzo del 2019

DEDICATORIA

A Dios por guiar nuestros pasos para cumplir una de nuestras metas y permitirnos vivir para seguir adelante en el camino hacia el éxito, así también por habernos dado el regalo más grande en la vida que es la familia.

A nuestros padres y hermanos por ser unas personas únicas en nuestras vidas, por tener la paciencia de enseñarnos con amor y aconsejarnos cada día de nuestras vidas siempre con frases positivas hacia el futuro.

Bach. Segundo Asquimeres Rodríguez De La Cruz

AGRADECIMIENTO

A mi asesor de tesis Msc. Ing. Juan Tumialan Hinostroza por su apoyo y colaboración en la realización de esta TESIS y así mismo por las enseñanzas brindadas.

A nuestra alma mater Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por habernos brindado los conocimientos y valores para nuestra vida profesional.

Bach. Segundo Asquimeres Rodríguez De La Cruz

RESUMEN

El objetivo principal de la presente tesis fue dimensionar un sistema eólico fotovoltaico para electrificar al Caserío el Zapotal en el distrito de Jayanca departamento de Lambayeque, el tipo de investigación fue aplicada. De donde se obtuvo que: La energía promedio diaria que necesaria para el caserío Zapotal es de 11,994 kWh. Para 25 viviendas proyectadas, 01 iglesia, 01 local comunal. Respecto de la radiación solar según el SENAMHI (Atlas 2003) se ha obtenido un valor de $4,75 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, según la NASA se ha obtenido un valor de $4,47 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, y del software METEONORM se ha obtenido un valor de $4,87 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$. Se ha considerado el menor es decir $4,47 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$. Los datos de la velocidad del viento promedio mensual para conocer los meses críticos se han obtenido de la estación meteorológica de Jayanca del SENAMHI y La velocidad de cada media hora del mes se ha obtenido de la estación meteorológica de la FIME. El sistema eólico fotovoltaico está compuesto por 01 aerogenerador AIR50-3000, 20 paneles fotovoltaicos de 150 Wp de la marca YINGLI SOLAR, 16 baterías de acumuladores 200 Ah de la marca RITAR, 02 reguladores de carga 150/60 y 01 inversor 48/5000-230 V. El presupuesto referencial del sistema eólico fotovoltaico tiene un costo referencial de S/. 242 280,91

Palabras claves: aerogenerador, panel fotovoltaico, controlador, inversor

ABSTRACT

The main objective of this thesis was to design a photovoltaic wind system to electrify the Caserío el Zapotal in the district of Jayanca department of Lambayeque, the type of research was applied. From where it was obtained that: The average daily energy that is necessary for the Zapotal farmhouse is 11,994 kWh. For 25 projected homes, 01 church, 01 local community. Regarding solar radiation according to SENAMHI (Atlas 2003), a value of 4,75 kWh / m² / day has been obtained, according to NASA a value of 4,47 kWh / m² / day has been obtained, and METEONORM software has obtained a value of 4,87 kWh / m² / day. It has been considered the smallest, that is, 4,47kWh / m² / day. The average monthly wind speed data to know the critical months have been obtained from the Jayanca weather station of SENAMHI and the speed of each half hour of the month has been obtained from the FIME weather station. The photovoltaic wind system consists of 01 AIR50-3000 wind turbine, 20 photovoltaic panels of the YINGLI SOLAR brand, 16 batteries of 200 RITAR accumulators, 02 charge regulators 150/60 and 01 inverter 48 / 5000- 230 V. The referential budget of the photovoltaic wind system has a referential cost of S /. 242 280,91

Keywords: wind turbine, photovoltaic panel, controller, inverter

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Realidad Problemática	2
1.2. Formulación del Problema	2
1.3. Delimitación de la Investigación	2
1.3.1. Delimitación espacial	2
1.3.2. Delimitación temporal	5
1.4. Justificación e Importancia de la TESIS	5
1.5. Limitaciones de la TESIS	6
1.6. Objetivos de la TESIS	6
1.6.1. Objetivo General	6
1.6.2. Objetivo Específicos	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes de Estudios.....	8
2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema desarrollado.....	15
2.2.1. Energía solar.....	15
2.2.2. Energía eólica.....	35
2.2.3. Sistema eólico fotovoltaico	50
2.2.4. Límite de Betz.....	52
2.2.5. Aerogenerador	55
2.2.6. Tipos de aerogeneradores.....	55
2.2.7. Ecuaciones para el dimensionamiento del sistema voltaico	63
2.3. Definición conceptual de la terminología empleada.	69

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	76
3.1. Tipo y diseño de investigación	76
3.2. Población y muestra.....	76
3.3. Hipótesis	76
3.4. Operacionalización de variables	76
3.5. Métodos y Técnicas de investigación.....	78
3.6. Descripción de los instrumentos utilizados.....	79
3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos	80
CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	81
4.1. Propuesta de la investigación	81
CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	83
5.1. Consumo de energía en el caserío el Zapotal.....	83
5.1.1. Consumo de energía necesaria diaria (Wh/día).....	83
5.2. Evaluación del recurso solar y eólico	87
5.2.1. Evaluación del recurso eólico	92
5.3. Dimensionamiento del sistema solar eólico	97
5.3.1. Dimensionamiento del sistema eólico.....	97
5.3.2. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	100
5.3.3. Dimensionamiento del sistema de distribución en 220 V	109
5.4. Metrado y presupuesto	115
5.4.1. Metrado y presupuesto del sistema fotovoltaico	115
5.4.2. Metrado y presupuesto de la red de distribución secundaria	116
5.4.3. Presupuesto Total.....	116
CAPITULO VI: CONCLUSIONES	117
6.1. Conclusiones.....	117
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXOS	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: escala de Beaufort.....	42
Tabla N° 2: valores de para algunos tipos de terreno	43
Tabla N° 3: Operacionalización de Variables	77
Tabla N° 4: tasa de crecimiento para el departamento de Lambayeque	83
Tabla N° 5: Consumo de energía promedio diario del caserío Zapotal	86
Tabla N° 6: Valores promedio de irradiación solar en el caserío el Zapotal según la NASA	89
Tabla N° 7: Radiación solar en el Caserío Zapotal con el software METEONORM.....	90
Tabla N° 8: Radiación solar promedio diario	91
Tabla N° 9: Comparación de los datos de radiación solar para las tres fuentes.....	91
Tabla N° 10: Distribución de frecuencias y distribución acumulada de las velocidades de viento	93
Tabla N° 11: Valores para graficar y elaborar el reajuste lineal.....	95
Tabla N° 12: Probabilidad de horas de velocidad del viento en el periodo de tiempo de los datos	97
Tabla N° 13: Características eléctricas del panel fotovoltaico	101
Tabla N° 14: Energía suministrada por el sistema eólico fotovoltaico	102
Tabla N° 15: Numero de controladores vs costo	103
Tabla N° 16: Capacidad Vs Costo de las baterías RITAR.....	104
Tabla N° 17: Características eléctricas de los conductores NYY	108
Tabla N° 18: Distancias mínimas del conductor a la superficie del terreno ...	110
Tabla N° 19: Lámparas de alumbrado y sus potencia	111
Tabla N° 20: hipótesis para usar la ecuación de TRUXA	111
Tabla N° 21: Resultados de la ecuación de cambio de estado	112
Tabla N° 22: Características De Los Postes De Concreto Armado	113
Tabla N° 23: Características de los cables autoportantes	114
Tabla N° 24: valor referencial para el suministro de materiales para el sistema fotovoltaico	115
Tabla N° 25: costo directo sistema eólico fotovoltaico	115
Tabla N° 26: Costo directo de la red de distribución secundaria	116
Tabla N° 27: Presupuesto total.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Ubicación del distrito de Jayanca en Lambayeque	3
Figura N° 2: Distribución de la radiación solar	15
Figura N° 3: Curva de irradiación diaria y horas sol pico	18
Figura N° 4: Partes de un panel fotovoltaico	20
Figura N° 5: conexión de paneles fotovoltaicos en serie	21
figura N° 6: paneles fotovoltaicos conectados en paralelo.....	22
Figura N° 7: módulos conectados en serie paralelo	23
Figura N° 8: Partes de una batería Plomo acido.....	26
Figura N° 9: Conexiones del regulador en una instalación fotovoltaica.....	29
Figura N° 10: Regulador VICTRON ENERGY	31
Figura N° 11: Inversor VICTRON ENERGY	34
Figura N° 12: Mapa del viento a 80 m promedio anual	39
Figura N° 13: Temperatura de la superficie terrestre	40
Figura N° 14: Energía útil del viento.....	44
Figura N° 15: Limite Bets	47
Figura N° 16: Componentes un sistema eólico	48
Figura N° 17: Sistema eólico fotovoltaico	52
Figura N° 18: Aerogenerador Savonius	57
Figura N° 19: Aerogenerador tipo Diarreis	58
Figura N° 20: Aerogenerador con rotor Giromill.....	59
Figura N° 21: Aerogenerador con rotor Windside	60
Figura N° 22: Aerogenerador con rotor tripala	61
Figura N° 23: aerogenerador con rotor bipala	62
Figura N° 24: Aerogenerador con rotor monopala	63
Figura N° 25: Irradiación solar en el departamento Lambayeque	88
Figura N° 26: Distribución de frecuencias	94
Figura N° 27: Distribución acumulada.....	94
Figura N° 28: Reajuste lineal	96
Figura N° 29: Aerogenerador AIR 50 3000 de 3 kW.....	98
Figura N° 30: Curva de potencia del aerogenerador AIR 50 3000 de 3 kW	99
Figura N° 31: Batería RITAR de 200 A.h	104
Figura N° 32: Inversor VICTRON ENERGY de 5 kW	106

INTRODUCCIÓN

La presente Tesis titulado “**DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO PARA ELECTRIFICAR EL CASERÍO POBLADO EL ZAPOTAL EN JAYANCA EN EL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE**”. El desarrollo de esta tesis consigna una serie de capítulos que se presentan a continuación:

Capítulo I, explica el planteamiento del problema, formando parte de ello la descripción de la situación actual, la delimitación y los objetivos.

En el capítulo II, el marco teórico de la investigación, la teoría que sustenta la investigación; el cual está compuesto por los antecedentes, la temática desarrollada producto de la revisión de literatura de acuerdo a las variables e indicadores.

En el Capítulo III, se explica la metodología de la investigación tomando en consideración los siguientes puntos: El tipo de investigación, la población, técnicas de investigación, así como el análisis estadístico de los datos.

Capítulo IV, se presenta la propuesta que dará solución a la realidad problemática.

Capítulo V, se presenta el análisis e interpretación de los resultados de las evaluaciones técnicas y económicas, tomando en cuenta los resultados de los 3 cálculos realizados, análisis de agua. Para la interpretación de los cuadros y gráficos. Finalmente se da a conocer las conclusiones a las que se llegaron, adjuntándose además los respectivos anexos.

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad Problemática

El caserío el Zapotal ubicado en Jayanca el cual cuenta con 24 viviendas, 01 local comunal, 01 iglesia y tiene un grave problema no cuenta con el servicio de energía eléctrica, En esta tesis se considera el uso de un sistema eólico fotovoltaico capaz de satisfacer la demanda de energía eléctrica de dicho caserío.

1.2. Formulación del Problema

¿Con el dimensionamiento de un sistema eólico fotovoltaico se logrará electrificar el caserío el Zapotal en el distrito de Jayanca perteneciente el departamento de Lambayeque?

1.3. Delimitación de la Investigación

1.3.1. Delimitación espacial

La presente tesis se realizó en el caserío el Zapotal ubicado en el distrito de Lambayeque perteneciente al departamento de Lambayeque.

El distrito de **Jayanca** es un distrito de la provincia peruana de Lambayeque, ubicada en el departamento homónimo. Desde el punto de vista jerárquico de la Iglesia católica, forma parte de la Diócesis de Chiclayo¹.

¹ https://es.wikipedia.org/wiki/Distrito_de_Jayanca

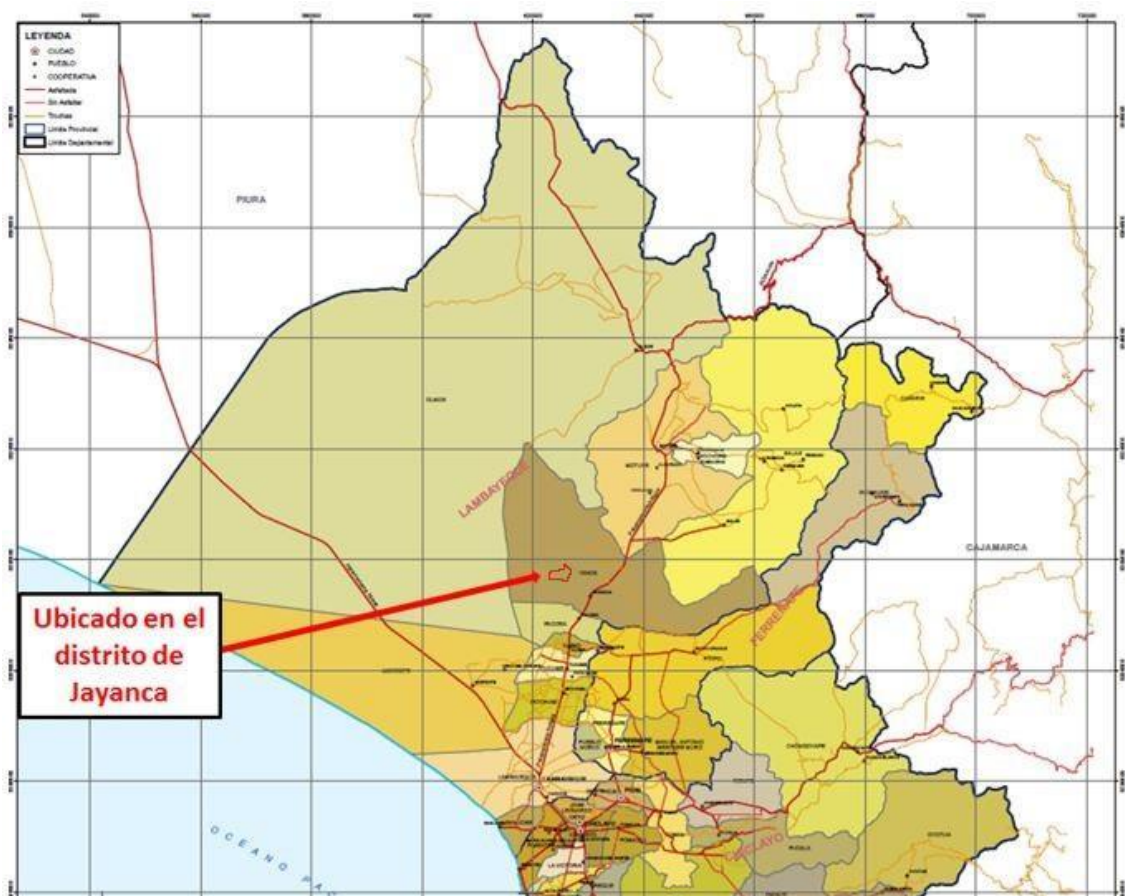


Figura N° 1: Ubicación del distrito de Jayanca en Lambayeque²

Clima³ El clima está influenciado por la corriente marina de Humboldt en la zona baja costera, su temperatura media anual es 22 °C fluctuando entre 26 °C y 19 °C (la temperatura máxima 35 °C en verano la mínima 10,5 °C en invierno). En las partes altas el clima es templado y frío, cuya temperatura oscila entre 12 y 18 °C. Las precipitaciones pluviales generalmente se presentan en los meses de febrero, marzo y abril; los meses de menor precipitación son los meses de julio y agosto. Los vientos se presentan con mayor frecuencia en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

² <https://www.adondevivir.com/propiedades/vendo-terreno-agricola-zona-de-influencia-del-51078740.html>

³ https://es.wikipedia.org/wiki/Distrito_de_Jayanca

Transporte

La accesibilidad vial del distrito se encuentra condicionada por la Carretera Panamericana Norte (Pan Am), que permite la articulación e integración con los distritos de la Provincia de Lambayeque, la Región y el país. Esta vía se encuentra asfaltada. Las vías vecinales están a nivel de trocha y mal conservadas, requieren ser mejoradas con el fin convertirlas en corredores económicos internos y mejorar las condiciones de traslado de los productos de la zona.

Entre las vías a nivel de trochas carrozables existen:

Puente Tabla - El Calvario de 3,5 km

Callejón del Coco - Jotoro de 2,5 km

El Pintor - Pampa de Lino de 3,5 km

Sector San Antonio - El Arenal - La Tomasita – Soledad –Victoria - Tomas Arellano – Achotal - Rubio de 2,5 km

Prolog. Grau (PP.JJ. El Salvador) - El Cautivote 2,5 km

Panamericana - La Viña - El Marco - El Verde

Panamericana - Los Ángeles

Panamericana - Noria Nueva

Geografía⁴

La mayoría de su territorio es llano, surcados por canales de regadío, cauces de ríos como La Leche y Motupe, así como las quebradas Anchovita, ñusca, Sondor, entre otras. Con elevaciones como los cerros Pañala, La Viña, Zurita, Pan de Azúcar, Gallinazo, Jagüey Negro, Briseño, San Antonio, Carpintero; accidentado en algunas zonas como Las Pampas, Colorada, Mirador, Mariposa y Huacas del Gallo

1.3.2. Delimitación temporal

El tiempo que duro la investigación fue de 06 meses.

1.4. Justificación e Importancia de la TESIS

Tenemos la siguiente justificación.

Justificación Científica.

Se justifica porque haciendo uso de las teorías científicas en lo referente a sistemas eólicos y fotovoltaicos, se aplica los conocimientos. Este tipo de investigación nos permite fomentar el uso de estas energías renovables como nuevas fuentes de estudio científico.

Justificación Ambiental

La reducción de consumo de combustible tiene como consecuencia directa la disminución de las emisiones de CO₂, por lo cual justifica realizar el proyecto, pues no produce impacto ambiental negativo.

⁴ https://es.wikipedia.org/wiki/Distrito_de_Jayanca

Justificación Social

Con el desarrollo y la posterior ejecución de esta tesis se logrará un aumento de la calidad de vida de los habitantes, solucionando el servicio de energía eléctrica en localidades rurales inaccesibles.

Justificación Técnica

La electrificación del caserío el Zapotal, se justifica técnicamente debido a que existe mecanismos de tecnología de última generación en aerogeneradores y equipos para el sistema fotovoltaico, en el cuál con un correcto dimensionamiento, se logra el objetivo deseado.

1.5. Limitaciones de la TESIS

Se ha considerado datos de la estación meteorológica del SENAMHI ubicado en Jayanca y datos de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UNPRG.

El dato de radiación solar se ha limitado a los datos obtenidos de la NASA, al atlas solar del SENAMHI del 2003, el atlas eólico y el uso del software METEONORM.

1.6. Objetivos de la TESIS

1.6.1. Objetivo General

Dimensionar un sistema eólico fotovoltaico para electrificar al Caserío el Zapotal

1.6.2. Objetivo Específicos

- a) Determinar la máxima demanda y la energía eléctrica promedio diaria en el caserío el Zapotal.
- b) Determinar el recurso eólico y solar en el Zapotal
- c) Dimensionar los equipos del sistema eólico fotovoltaico.
- d) presupuestar del sistema eólico fotovoltaico.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Estudios

Contexto Internacional

Según **Natalia Steve Gómez** en su tesis titulado: Energización de las Zonas no Interconectadas a partir de las energías renovables Solar y Eólica. En esta tesis nos expresa que investigan las alternativas de generación solar y eólica como soluciones de energización para centros poblados pequeños (menos de 500 habitantes) de 49 municipios que pertenecen a las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia. Primero, se realiza una revisión de la política y normatividad energética actual en Colombia, resaltando aquella relacionada con energías renovables o con las ZNI. Segundo, se analiza el potencial del recurso solar y eólico de los municipios considerados, se realizan cálculos de dimensionamiento de los sistemas de generación y, se calculan costos de generación y de capital aproximados. Finalmente, se diseña una metodología cuantitativa para evaluar las alternativas según criterios económicos; se evalúan las alternativas y se plantea una propuesta energética en donde se presentan las recomendaciones de energización para cada municipio, se plantean instrumentos económicos y se proponen fuentes de financiación.

En el proyecto se realiza un análisis de prefactibilidad económica de desarrollar proyectos de energización a partir de las alternativas solar y eólica en centros poblados pequeños de las ZNI, y de la conveniencia económica de plantear una u otra solución. En particular, se resalta la ventaja de plantear soluciones a partir de energía solar, la cual muestra ser favorable

para la mayoría de los municipios. Por otro lado, la energía eólica no muestra ser tan conveniente para los centros poblados analizados, solamente se recomienda tener en cuenta dicha alternativa en 3 de los 49 municipios. Sin embargo, se recomienda que esta alternativa sea considerada para centros poblados más grandes como cabeceras departamentales y municipales. En general la propuesta recomienda: implementar sistemas fotovoltaicos en 3 municipios, sistemas híbridos solar-eólica en 2 municipios; y analizar la conveniencia de implementar sistemas fotovoltaicos o sistemas híbridos solar-hídrico en 16 municipios, sistemas híbridos solar-hídrico o solar-diesel en 27 municipios, y sistemas híbridos hídrico-diesel u otra alternativa en 1 municipio⁵.

Así es que **Rodrigo Sebastián Topampa Agilar** y **Jorge Luis Hidalgo Guerrero** en su tesis “Análisis e implementación de una pico central híbrida solar eólica para generar 500w en la hacienda “La Merced” ubicada en el barrio Santa Ana del Pedregal, Parque Nacional Cotopaxi en el periodo 2014”, este trabajo estuvo encaminado al análisis e implementación de equipos para un sistema híbrido aprovechando los recursos eólicos y solares de la zona, como es el caso de la asociación de productores pecuarios Sincholagua, hacienda “La Merced”, para la generación de energía eléctrica, el mismo que sirvió de apoyo para trabajos de investigación a futuro. La aplicación de tecnologías limpias renovables, están orientadas a dar una solución para la búsqueda de alternativas menos contaminantes y rentables a largo plazo, esto permitirá que la asociación de productores pecuarios

⁵ (Steve Gomez 2011)

Sincholagua, hacienda “La Merced”, no dependan totalmente de las centrales hidroeléctricas que proveen de energía al país⁶.

Contexto Nacional

Estudio de la utilización de la energía eólica para la generación de electricidad en un asentamiento humano de San Juan de Marcona (Jordan Arias 2009)

El panorama actual del Perú nos indica, según datos del Ministerio de Energía y Minas (MEM), que aproximadamente 6 millones de pobladores no cuentan con el servicio básico de energía eléctrica, lo cual resulta ser un importante impedimento en el crecimiento de cualquier país; ya que lo limita de muchos beneficios y perjudica su calidad de vida al no tener acceso a las telecomunicaciones y a otros servicios que podrían perjudicar su salud. Dentro de este universo de peruanos se encuentran los pobladores de Ruta del Sol, ubicados en el Distrito de San Juan de Marcona, al sur del departamento de Ica, un asentamiento humano cuyos habitantes se dedican principalmente a la pesca y comercio, los cuales ven complicadas sus posibilidades de desarrollo por no contar con energía eléctrica.

Para encontrar la mejor solución a este problema se analizó el aprovechamiento del recurso más abundante con el que cuenta la localidad, el cual según estudios hechos por el MEM resulta ser el eólico. El asentamiento humano "Ruta del Sol", zona que fue motivo del presente estudio, tiene una población de 300 familias, con un promedio de 5

⁶ Toapanta Aguilar, Rodrigo Sebastian, y Jorge Lius Hidalgo Guerrero. «Análisis e implementación de una pico central híbrida solar eólica para generar 500w en la hacienda “La Merced” ubicada en el barrio Santa Ana del Pedregal, Parque Nacional Cotopaxi en el periodo 2014.» Ecuador, 2016

habitantes por familia (según el INEI); cada poblador requiere una potencia instalada de 60 W aproximadamente (datos de la MEM). El potencial eólico en la zona de San Juan de Marcona es aproximadamente de 100 MW, con lo cual es capaz de abastecer a todo el Departamento de Ica, cuyo consumo aproximado es de 104 MW. Estos datos, así como la frecuencia de utilización de la electricidad, permitieron dimensionar los sistemas a estudiar, los cuales resultaron de las combinaciones de dos recursos de distinto origen:

El eólico y el fósil (diésel). Se estudiaron tres distintos escenarios: Sistema eólico, híbrido (eólico-diésel) y diésel, cada uno con sus ventajas y desventajas; al analizar el aporte de cada fuente energética en el cómputo global de la energía requerida en la comunidad, se ha elaborado un análisis que contempla los costos asociados a los tres distintos escenarios. El estudio de las alternativas se basa en calcular el coste normalizado (\$/ kWh) de cada sistema, valor que facilitará la elección de la configuración más adecuada. Este proceso incluye todos los gastos asociados a un proyecto durante todo su ciclo de vida, dando por resultado el coste normalizado del sistema, (\$/ kWh). Dentro de los costos tomados para este cálculo se consideró la inversión inicial, la vida útil de los distintos componentes, los costos de operación y mantenimiento y el costo asociado al consumo del combustible⁷.

Es así como **Jorge Serván Sócola** en su tesis titulada “Análisis técnico-económico de un sistema híbrido de baja potencia eólico solar conectado a la red” donde el objetivo principal del trabajo era desarrollar una metodología

⁷ (Jordan Arias 2009)

que permita realizar un análisis técnico económico de un sistema de generación de baja potencia, que utilice recursos energéticos renovables y que se encuentra conectado a la red eléctrica.

Como primer paso nos dice se debe determinar la demanda energética. Para el desarrollo de su tesis, se ha escogido como caso de estudio, un usuario que desea implementar el uso de fuentes energéticas renovables, como medio de abastecimiento energético para su vivienda ubicada en la playa de Cangrejos, perteneciente al distrito de Paita.

Posterior al cálculo de la demanda energética, se realizó un análisis en estado estacionario con la finalidad de evaluar el potencial energético disponible en la zona. Se Utilizó la data meteorológica de radiación solar y velocidad del viento, tomada en el lugar de emplazamiento del proyecto por el radar de la Universidad de Piura, luego se calculó el potencial solar y eólico disponibles y se procede a dimensionar correctamente el sistema para la demanda energética calculada previamente.

Dimensionado el sistema se procedió a seleccionar los componentes principales que lo conforman, se realizan los cálculos para el dimensionamiento del cableado y protecciones eléctricas del sistema, y se selecciona el tipo de estructuras de soporte, así como la ubicación con mejores prestaciones dentro del área de emplazamiento.

Seleccionado todos los componentes de la instalación y el presupuesto inicial requerido, se identificaron los egresos e ingresos anuales del

proyecto, con la finalidad de evaluar económicamente la instalación y analizar los factores claves que garanticen la rentabilidad del proyecto⁸.

Contexto Local

Según **Llauce Chozo Anthony Joel** en su tesis titulado “Implementación de sistema fotovoltaico para reducir el consumo de combustibles fósiles en la generación eléctrica en el restaurant el Cruceñito, ubicado en el Km 90, carretera a Lambayeque-Piura” Nos dice que el restaurant está en un lugar donde no hay el servicio eléctrico en redes de baja tensión, se optó por la implementación de un sistema fotovoltaico comercial, remplazando la generación eléctrica de un motor diésel. El objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar técnica y económicamente la implementación de un sistema fotovoltaico (SFV) autónomo en la generación de energía eléctrica, y así proponer que estos sistemas sean implementados a comunidades de nuestra región que aún no cuentan con el suministro eléctrico, además de contribuir a la reducción de emisiones de CO₂, así mismo capacitar a la población sobre la gran importancia que tiene la energía solar y sus diferentes aplicaciones. Por otra parte este tipo de tecnología presenta numerosas ventajas: instalación simple, emplea una fuente de energía limpia y gratuita, su operación es automática y silenciosa, requiere poco mantenimiento y es amigable con el ambiente.

Para el desarrollo del proyecto se realizó el estudio de la máxima demanda de energía eléctrica en el restaurant “El Cruceñito” propiedad del Sr. Orlando Santamaría Baldera y así aplicarla al diseño. Se tuvo en cuenta la

⁸ Servan Socola, Jorge. «Análisis técnico-económico de un sistema híbrido de baja potencia eólico solar conectado a la red.» Piura, 2014.

radiación solar existe en la región de Piura usando datos estadísticos de NASTEC y de esta manera poder seleccionar los componentes a utilizar. La orientación del panel fotovoltaico tendrá la inclinación adecuada para captar la mayor radiación posible y nuestro sistema sea lo más eficiente posible. La potencia requerida para el sistema es de 870 Wp, que se obtuvo según cálculos realizados, y cada panel tendrá una potencia de 145 Wp para que su funcionamiento sea con total eficiencia.

Al realizar el presente trabajo se logró determinar que el sistema fotovoltaico autónomo a implementar si es económicamente rentable, satisfaciendo la demanda eléctrica considerada en el proyecto, el cual me permitirá reducir el consumo de combustible diésel en 912 galones/año. Se recomienda difundir y apoyar la investigación sobre este tipo de tecnología y así desarrollar proyectos en beneficio de comunidades que aún no tienen el servicio de electricidad en sus domicilios⁹.

⁹ Llauce Chozo , Anthony Joel. «Implementación de sistema fotovoltaico para reducir el consumo de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica en el restaurant el Cruceñito, ubicado en el km 901, carretera Lambayeque – Piura”.» Lambayeque, 2016.

2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema desarrollado

2.2.1. Energía solar

La radiación solar absorbida por la atmósfera terrestre no es aprovechada al 100%. Según el Instituto Geofísico del Perú, en términos generales, el 24% de la radiación llega directamente, el 21% de la radiación no llega directamente. Mientras que el 29% se pierde en el espacio (Valdiviezo Salas 2014).

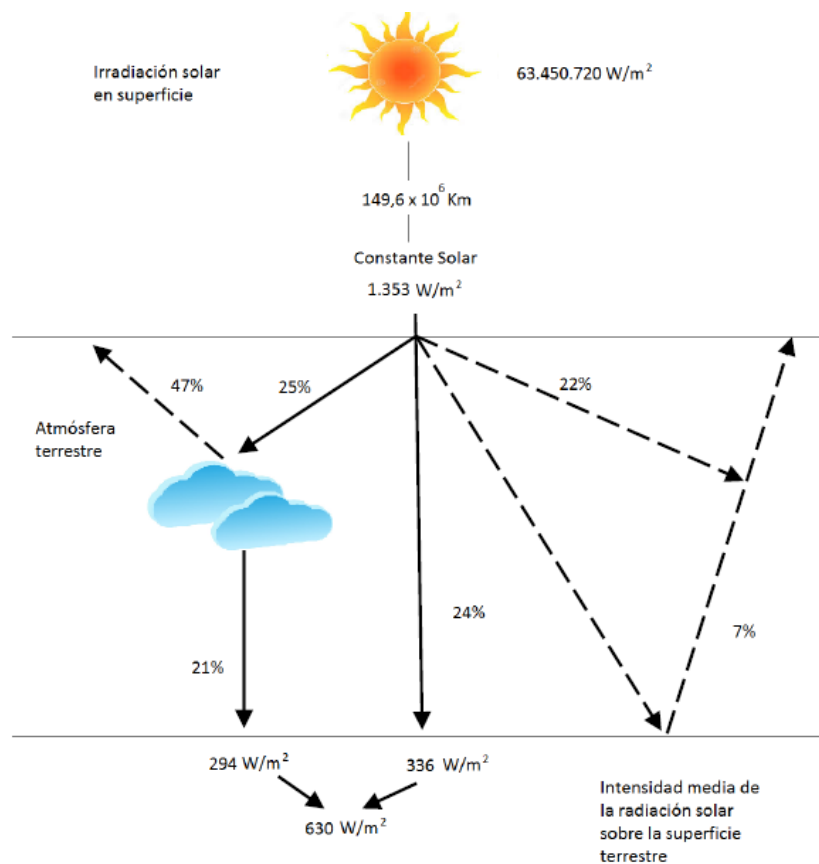


Figura N° 2: Distribución de la radiación solar¹⁰

¹⁰ (Valdiviezo Salas 2014)

Existen tres componentes de la radiación solar:

Directa: Es la que proviene del sol, sin desviar su paso por la atmósfera.

Difusa: Sufre cambios debidos a la reflexión difusión en la atmósfera.

Albedo: Es la que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas, puede ser directa o difusa.

2.2.1.1. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la energía procedente del sol que se convierte en energía eléctrica de forma directa, sin ninguna conversión intermedia. Se produce mediante generadores fotovoltaicos compuesto por módulos fotovoltaicos conectados entre sí que a su vez están compuestos por unidades básicas denominadas células solares o fotovoltaicas. (Agustin Castejon s.f.)

El conjunto de módulos fotovoltaicos que componen un generador forma una superficie plana que tiene que ser expuesta a la luz del sol para producir energía eléctrica. La inclinación y la orientación adecuadas de dicha superficie son fundamentales para conseguir una conversión eficiente de energía solar en energía eléctrica (Bernave Chagua y Castillo Quiroz 2017).

Para conseguir este objetivo es necesario conocer un conjunto de conceptos básicos y la terminología utilizada para describir el movimiento de la tierra alrededor del sol, definir una posición sobre la superficie de la tierra y cuantificar la cantidad de energía solar recibida

en una superficie situada en un lugar determinado. (Bernave Chagua y Castillo Quiroz 2017)

2.2.1.2. Horas pico solar

La **hora solar pico** (HSP) es una unidad que mide la irradiación solar y se define como la energía por unidad de superficie que se recibiría con una hipotética irradiancia solar constante de $1\,000\text{ W/m}^2$.

Una hora solar pico equivale a $3,6\text{ MJ/m}^2$ o, lo que es lo mismo, 1 kWh/m^2 , tal y como se muestra en la siguiente conversión:

Interpretación grafica¹¹

Si se representa en un gráfico la distribución horaria de la irradiación incidente sobre la superficie terrestre se observa que los niveles varían a lo largo del día. Gráficamente, la hora pico solar se interpreta como una función de valor constante que delimita la misma área que la distribución antes mencionada.

Así, la hora solar pico nos indica el número de horas al día en las que se recibe una irradiación solar de $1\,000\text{ W/m}^2$. Si se cumplieran el resto de condiciones estándar, sería el número de horas al día en las que un panel fotovoltaico proporcionaría su potencia pico. Multiplicando HSP

¹¹ https://es.wikipedia.org/wiki/Hora_solar_pico

por potencia pico, obtendríamos la energía que proporciona un panel fotovoltaico (sin considerar las pérdidas que suelen ser de un 20 %).

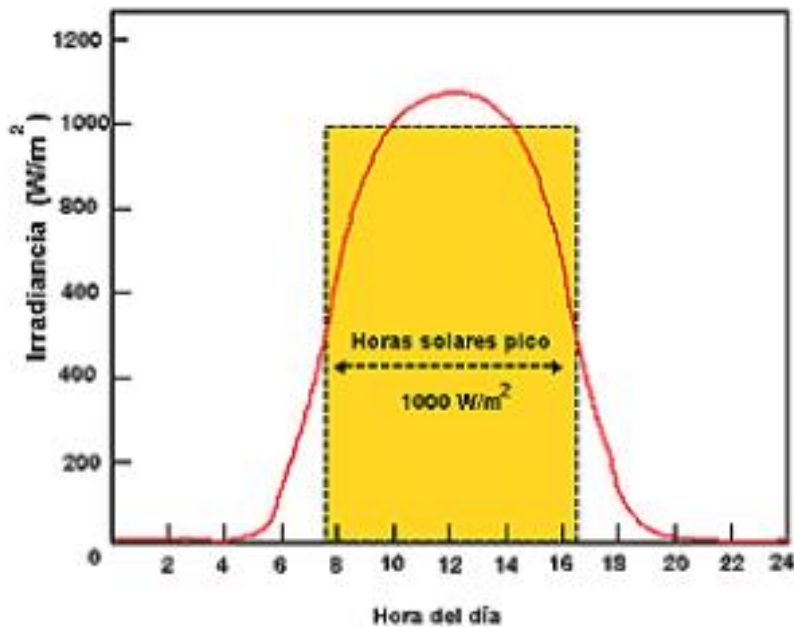


Figura N° 3: Curva de irradiación diaria y horas sol pico¹²

2.2.1.3. Componentes de un sistema solar fotovoltaica de generación eléctrica

2.2.1.4. Paneles fotovoltaicos

Los módulos o paneles fotovoltaicos son estructuras que están compuestas por células fotovoltaicas. Por lo general contienen entre 40 y 80 células fotovoltaicas y su tamaño varía entre los 0,80 m^2 y los 2 m^2 , pero el más utilizado es el módulo plano de 36 células que produce voltaje suficiente para alimentar una batería de 12 V.

¹² FUENTE: http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html

Generalmente se puede decir que los módulos se encuentran conformados por los siguientes componentes

Cubierta exterior. - Es de vidrio templado ya que es resistente y permite el paso de la radiación solar. Su función es la de proteger a todos los componentes del panel de los fenómenos atmosféricos.

Capas encapsulante.- Principalmente son de silicona, etil-vinilo-acetileno (EVA) o polivinilo butiral o de cualquier material que tenga buena transmisión de la radiación solar y que no se degrade ante los rayos ultravioletas. Su función, aparte de adherir las cubiertas, es la de amortiguar las posibles vibraciones e impactos.

Protección posterior. - Por lo general es de materiales acrílicos, siliconas, pero actualmente los más utilizados son: TEDLAR o EVA. Sirve para proteger al panel de los agentes atmosféricos, principalmente de la humedad.

Marco de soporte. - Es de aluminio anodizado o de acero inoxidable. Sirve para dar soporte a todo el conjunto y como elemento de unión mecánica entre módulos.

Contactos eléctricos. - Son cables de cobre que permiten recoger a la energía que entrega el módulo y se encuentran en la parte posterior del módulo en una caja que los protege de la humedad. También

pueden estar compuestos por elementos de protección como diodos de bypass que lo protegen de las sombras parciales.

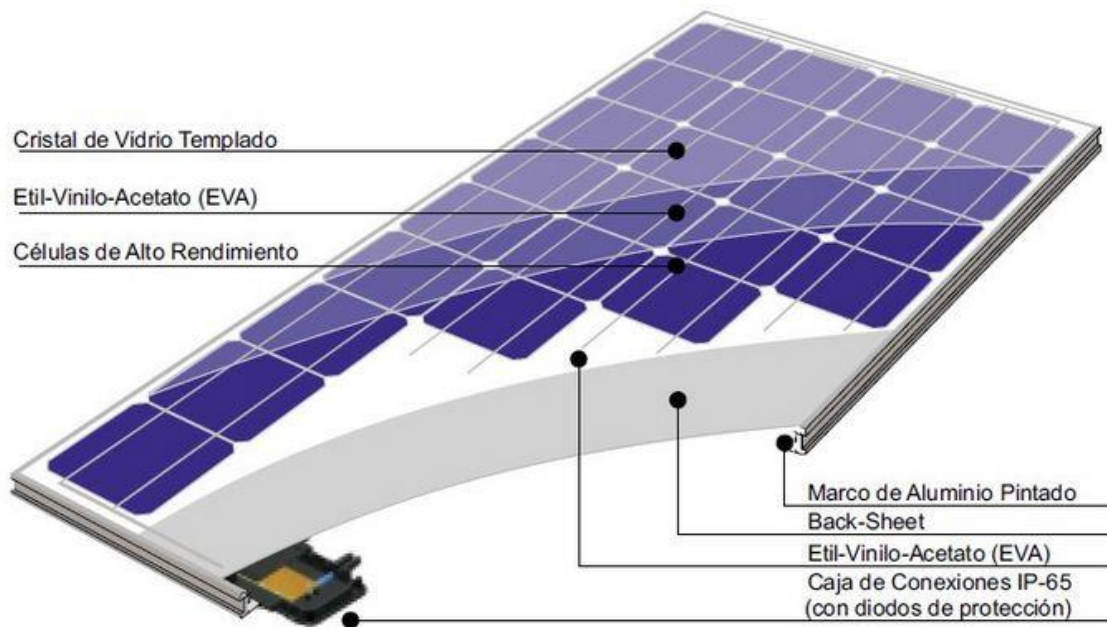


Figura N° 4: Partes de un panel fotovoltaico¹³

Circuitos en serie y en paralelo de las fuentes de energía Cada módulo o batería tiene un valor de voltaje o amperaje y pueden conectarse entre sí para obtener el voltaje deseado para el sistema:

Circuito en serie: Se forma cuando se conectan el terminal positivo (+) de un módulo al terminal negativo (-) de otro módulo, para incrementar el voltaje. La conexión en serie no aumenta la corriente producida o el amperaje (figura 5). Ejemplo: Si se requiere un arreglo de 24 V y 3 A, a partir de dos paneles de 12 V y 3 A, al conectarlos en serie, la potencia se suma.

¹³ <http://eliseosebastian.com/elementos-con-panel-solar-fotovoltaico/>

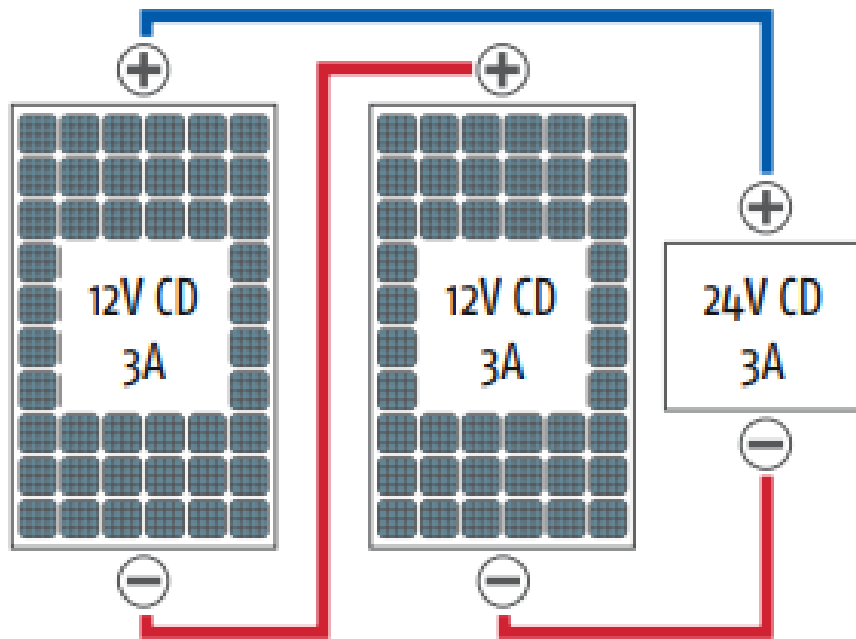


Figura N° 5: conexión de paneles fotovoltaicos en serie¹⁴

Circuito en paralelo: La conexión de módulos se hace entre los terminales de positivo (+) a positivo (+) y de negativo (-) a negativo (-). Cuando las fuentes se conectan en paralelo, las cargas se suman y el voltaje aplicado al circuito permanece igual. Se utiliza para aumentar el amperaje o corriente de un sistema (figura 6).

¹⁴ <http://energiayambienteandina.net/pdf/WCS%20-%20CAPACITACI%C3%92N%20E%20INSTALACI%C3%92N%20DE%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>

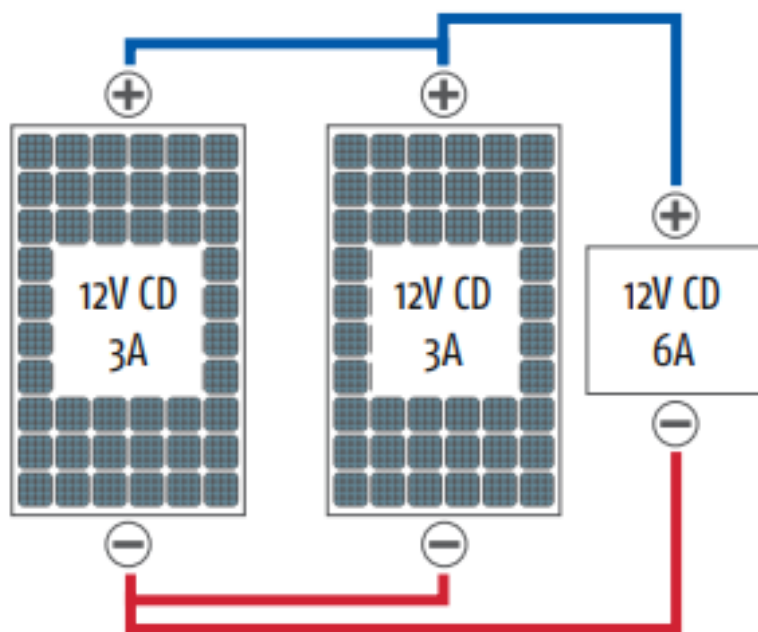


figura N° 6: paneles fotovoltaicos conectados en paralelo¹⁵

Circuitos en serie y en paralelo: Los circuitos pueden usar una mezcla de conexiones en serie y en paralelo para obtener los voltajes y las corrientes necesarios. En la figura 7, se conectan en modo serie-paralelo cuatro módulos de 12 V y 3 A. Los módulos se conectan en serie de dos en dos, lo que incrementa el voltaje a 24 V. Cada tira se conecta en paralelo incrementando la corriente a 6 A. El resultado es un sistema de 24 V CD y 6 A.

¹⁵ <http://energiayambienteandina.net/pdf/WCS%20-%20CAPACITACI%C3%92N%20E%20INSTALACI%C3%92N%20DE%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>

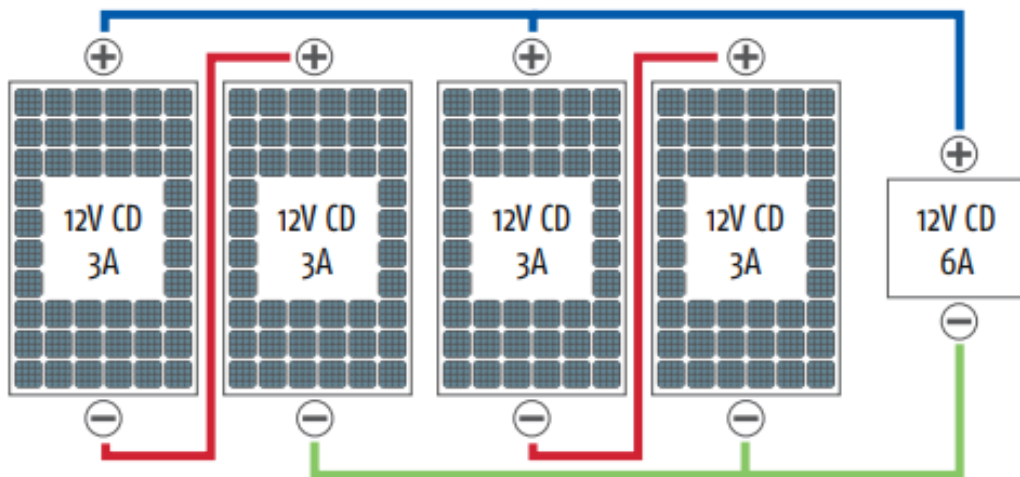


Figura N° 7: módulos conectados en serie paralelo¹⁶

2.2.1.5. Baterías

Las baterías (o acumuladores), sirven para acumular la energía que los paneles generan diariamente, y así poderla usar en horas donde la energía consumida es superior a la generada, como sucede de noche. Otra importante función de las baterías es la de proveer una intensidad de corriente superior a la que el dispositivo fotovoltaico puede entregar. Tal es el caso de un motor, que en el momento del arranque puede demandar una corriente de 4 a 6 veces su corriente nominal durante unos pocos segundos. Además, el acumulador proporciona un voltaje estable y constante independiente de las condiciones de incidencia luminosa, que puede ser lo más adecuado para el funcionamiento de los aparatos eléctricos. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Al acumulador que ha de ser usado para aplicaciones solares se le debe exigir el cumplimiento de unas condiciones básicas, como son:

¹⁶ <http://energiayambienteandina.net/pdf/WCS%20-%20CAPACITACI%C3%92N%20E%20INSTALACI%C3%92N%20DE%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>

Aceptar todas las corrientes de carga que suministre el panel solar.

Mantenimiento nulo o mínima.

Fácil transporte e instalación.

Baja auto descarga.

Rendimiento elevado.

Larga vida.

Una batería está constituida por uno o varios elementos electroquímicos capaces de transformar una energía potencial química en energía eléctrica. Cuando las reacciones químicas que se producen son irreversibles, la batería puede usarse solo una vez y recibe el nombre de primaria (por ejemplo, las pilas). Si las reacciones químicas son reversibles y se puede recargar el elemento convirtiendo la energía eléctrica en química, la batería es denominada secundaria (por ejemplo, las baterías propiamente dichas). Las baterías se componen esencialmente de dos electrodos sumergidos en un electrolito donde se producen las reacciones químicas en los procesos de carga o descarga. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Tipos de baterías.

Se encuentran diferentes tipos de baterías en el mercado, pero fundamentalmente se pueden hacer dos grandes grupos: las de níquel-cadmio (Ni-Cd) y las de plomo-acido. Las primeras presentan unas cualidades excepcionales, pero debido a su elevado precio se usan con menos frecuencia. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Por el contrario, las baterías de plomo-acido en sus diferentes versiones son las más usadas para las aplicaciones solares, adaptándose a cualquier corriente de carga, teniendo un precio razonable.

Baterías de plomo-acido. Este tipo de baterías se aplican ampliamente en los sistemas de generación fotovoltaicos. Más del 90% del mercado corresponde a este tipo de baterías, que en general, y siempre que puedan realizarse un mantenimiento. Son las que mejor se adaptan a los sistemas de generación fotovoltaica. Están compuestas por dos electrodos inmersos en un electrolito de ácido sulfúrico diluido en agua. El electrolito puede estar en el recipiente en forma de líquido o de gel. Los dos electrolitos son uno de dióxido de plomo (ánodo) y otro de plomo metálico (cátodo). (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Existen varios tipos, siendo las de plomo-antimonio (Pb-Sb) y plomo-calcio (Pb-Ca) las más comunes.

Composición de una batería solar de Pb-acido

En términos simples la batería de plomo-acido se compone de los siguientes elementos:

Placa positiva construida con oxido de plomo (PbO_2).

Placa negativa formada por plomo esponjoso.

Separadores, que tiene como fin separar las placas evitando el contacto eléctrico.

Electrolito, formado por ácido sulfúrico diluido en agua.

Carcasa, construida de material plástico (polietileno o propietileno, normalmente) y que está encargada de contener los anteriores elementos.

Terminales de conexión.

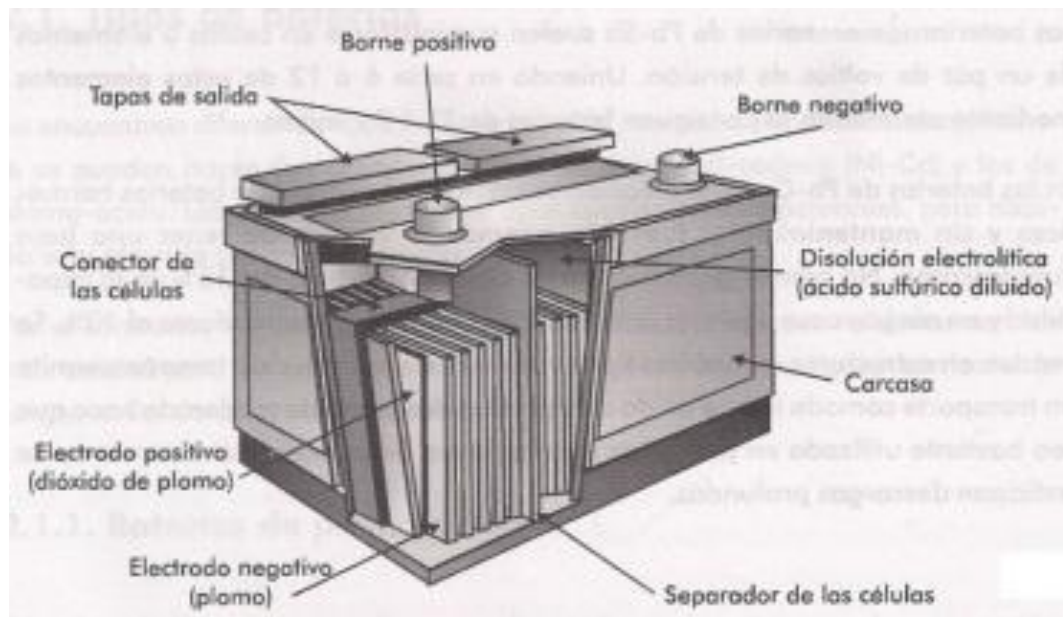


Figura N° 8: Partes de una batería Plomo ácido

Baterías de Níquel-cadmio. Las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) o alcalinas, tienen una estructura física similar a las de plomo-ácido. Las placas son de acero inoxidable, con depresión es donde se coloca el material activo, y en lugar de plomo, se utiliza hidróxido de níquel para las placas positivas y Oxido de cadmio para las negativas. El electrolito es hidróxido de potasio, que forma parte del proceso químico como conductor, y que suele ser una disolución acuosa al 20%. Se requiere una fina capa de aceite en la superficie superior para evitar su oxidación por el oxígeno del ambiente. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013) Durante la descarga el oxígeno pasa de la placa positiva a la negativa, dando lugar a Oxido de cadmio. Es durante la carga cuando el oxígeno vuelve a pasar dela placa negativa a la positiva.

El electrolito juega un papel de mero conductor, motivo por el que apenas sufre, todo lo contrario que en las baterías de plomo, no siendo peligroso, ya que no es ácido y además no produce el típico fenómeno de la

sulfatación. Las materias activas se encuentran en las placas en forma de polvo, contenidas en bolsas de fleje de acero perforado. Las placas positivas y negativas están separadas de tal forma, que las burbujas de gas que se desprenden al final de la descarga ascienden libremente a lo largo de la placa ejerciendo una libre circulación del electrolito, lo que evita la formación de puentes entre las placas, que son la causa de su cortocircuito. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Las baterías de níquel-cadmio están diseñadas específicamente para aplicaciones fotovoltaicas. El voltaje nominal de un elemento de batería de Ni-Cd es de 1,2 V, en lugar de los 2 V de los elementos de batería de plomo-acido. Las baterías de Ni-Cd aguantan procesos de congelación y descongelación sin ningún efecto sobre su comportamiento. Las altas temperaturas tienen menos incidencia que en las de plomo-acido. Los valores de auto descargan oscilan entre 3 y 6% al mes.

Les afectan menos las sobrecargas. Pueden descargarse totalmente sin sufrir daños. Su capacidad para aceptar un ciclo de cargo es independiente de la temperatura. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

El costo de una batería de Ni-Cd es mucho más elevado que el de una de plomo acido; no obstante, tiene un mantenimiento mes bajo y una vida mes largo, por lo que, en ciertas aplicaciones, su costo por ciclo de vida útil puede resultar mes bajo. Esto las hace aconsejables para lugares aislados o de acceso peligroso. Las baterías de Ni-Cd no pueden probarse con la misma fiabilidad que las de plomoacido.

Por tanto, si es necesario controlar el estado de carga, las baterías de Ni-Cd (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Capacidad. Es la cantidad de energía que puede suministrar la batería en unas determinadas condiciones de trabajo. Se expresa en amperios-hora (Ah). La capacidad de almacenaje de energía de una batería depende de la velocidad de descarga. Teóricamente una batería de 200 Ah puede suministrar 200 A durante una hora, o 50 A durante 4 horas, etc. Pero existen factores que pueden hacer variar la capacidad de la batería. En general si la batería se descarga a un nivel más lento, su capacidad aumenta ligeramente, si el ritmo es más rápido la capacidad se reducirá. Cuanto mayor es el tiempo de descarga, mayor es la cantidad de energía que la batería entrega un tiempo de descarga típico en sistemas fotovoltaicos es 100 h. También al igual que para módulos solares puede definirse el voltaje de circuito abierto y el voltaje en carga. Las baterías tienen un voltaje nominal que suele ser de 2, 6, 12, 24 V, aunque siempre varíe durante los distintos procesos de operación. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

Es importante el voltaje de carga, que es la tensión necesaria para vencer la resistencia que opone el acumulador a ser cargado. La capacidad se ve influenciada por la temperatura de la batería y la de su ambiente. Si una batería se cataloga a una temperatura de 25 grados, temperaturas más bajas reducen su capacidad significativamente, y las temperaturas más altas provocarían un ligero aumento de su capacidad, pero esto último puede incrementar la pérdida de agua, disminuyendo así el número de ciclos de vida de la batería. (Chona Suarez y Robles Cervantes 2013)

2.2.1.6. Reguladores de carga

Para que la instalación fotovoltaica funcione correctamente, hay que instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías. Este elemento recibe el nombre de regulador y tiene como misión evitar situaciones de carga y sobre descarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil.

El regulador trabaja por tanto en las dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería (figura 23).

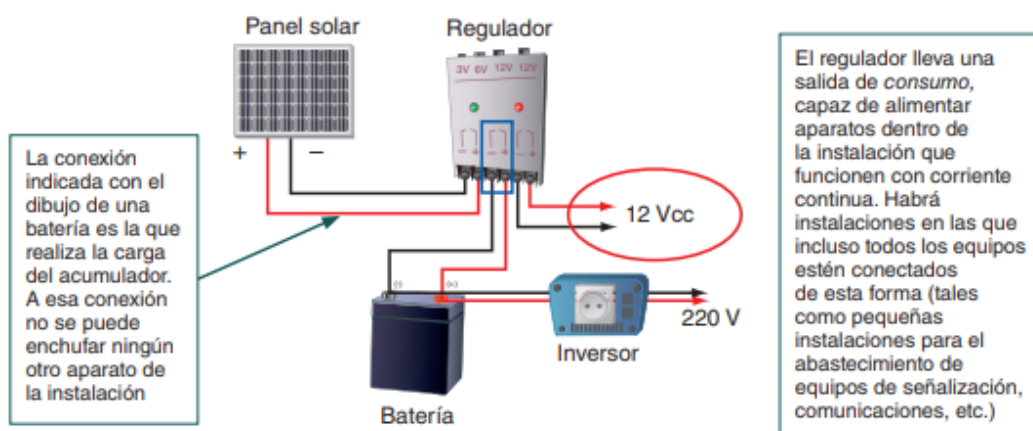


Figura N° 9: Conexiones del regulador en una instalación fotovoltaica¹⁷

Dado que los módulos solares tienen una tensión nominal mayor que la de la batería, si no existiera regulador se podrían producir sobrecargas.

¹⁷ <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

El motivo de que esta tensión nominal de los paneles sea así se debe fundamentalmente a dos razones:

Atenuar posibles disminuciones de tensión por el aumento de la temperatura.

Asegurar la carga correcta de la batería. Para ello la tensión V_{OC} del panel deberá ser mayor que la tensión nominal de la batería. El dimensionado de la instalación solar se realiza de manera que se asegure el suministro de energía en las peores condiciones de luminosidad del sol. Por ello se toman como referencia los valores de irradiación en invierno. Esto puede provocar que en verano la energía aportada por los módulos solares sea en ocasiones casi el doble de los cálculos estimados, por lo que, si no se conecta el regulador entre los paneles y las baterías, el exceso de corriente podría llegar incluso a hacer hervir el electrolito de los acumuladores, con el riesgo que ello conlleva.

Existen Reguladores aptos para su ubicación tanto en el interior como a la intemperie. En cualquier caso, se puede alojar al regulador dentro de un armario especial para el uso en intemperie.



Figura N° 10: Regulador VICTRON ENERGY¹⁸

2.2.1.7. Inversores¹⁹

El generador FV produce corriente continua. En sistemas fotovoltaicos autónomos para poder utilizar cargas en corriente alterna se necesita un dispositivo electrónico, denominado inversor, que convierta la corriente continua en corriente alterna. Habitualmente en sistemas fotovoltaicos autónomos el inversor está conectado a una batería, mientras en un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica el inversor está conectado directamente al generador fotovoltaico.

Las funciones principales de los inversores son: inversión DC/AC, modulación de la onda alterna de salida y regulación del valor eficaz de la tensión de salida. Los inversores que se pueden encontrar normalmente pueden ser monofásicos o trifásicos a 50 Hz, con

¹⁸ <http://cpmsolar.com/producto/vitron-energy-controlador-de-carga-smartsolar-mppt-25085/>

¹⁹ http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf

diferentes voltajes nominales de entrada con un amplio rango de potencias disponibles, de unos pocos vatios hasta varios megavatios. Pueden operar conectados a baterías o directamente al generador FV y pueden estar conectados a diferentes consumos o inyectar energía en la red eléctrica. Los inversores pueden clasificarse en función de la forma de onda de la tensión de salida:

De onda cuadrada.

De onda modificada o quasisenoidal.

De onda senoidal (muy parecida a la onda de la red eléctrica).

Los inversores de onda cuadrada son los más económicos. Se basan en un simple “chopeado” de la potencia DC de entrada, con muy poca modulación o filtrado. La onda resultante tiene un gran contenido en armónicos no deseados. La distorsión armónica total (THD) es bastante elevada, en torno al 40%, y su rendimiento está en torno al 50- 60%. La potencia de sobrecarga es baja, del 10-20% de la potencia nominal. Su regulación de voltaje también es muy baja. Se suelen utilizar con pequeñas cargas inductivas o resistivas, aunque algunos tipos de cargas pueden no operar satisfactoriamente.

Los inversores de onda semisenoidal o quasisenoidal presentan una THD del 20% y sus rendimientos son mayores del 90%. Son utilizados en electrificación rural para alimentar los electrodomésticos más habituales, incluyendo ordenadores y equipos musicales. Algunas cargas como las impresoras láser, los microondas y los relojes (que

pueden adelantar un 50%) pueden presentar problemas de operación con este tipo de inversores.

Los inversores senoidales tienen un cuidadoso filtrado de la señal generada. En general son la mejor opción para la alimentación de cargas AC, no presentando ningún problema en relación con la THD o estabilidad de la tensión. Algunos tipos de consumos electrónicos como los equipos de telecomunicaciones o instrumentación delicada pueden requerir su utilización. Los inversores que producen ondas senoidales se están imponiendo sobre el resto de inversores que están dejando de ser utilizados, incluso para las aplicaciones más simples.

Para cargas inductivas, como es el caso de los motores, la forma de la onda que llega al motor debe aproximarse lo más posible a una onda senoidal o a una onda PWM cuyos primeros armónicos se presenten a muy alta frecuencia, ya que el máximo rendimiento en el giro del motor se produce por el armónico fundamental a una frecuencia de 50 Hz. Cualquier otro armónico presente en la onda que llegue al motor no produce giro, sin embargo, disipa calor por efecto Joule como I^2R , lo que provoca calentamientos en las bobinas de cobre y cuerpo del motor y por tanto pérdidas de rendimiento. A menudo estos armónicos son los responsables de la degradación y destrucción de los aislamientos de las bobinas.

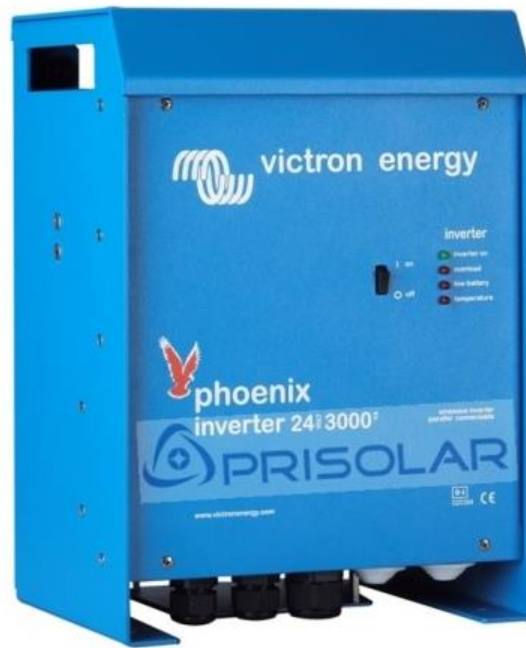


Figura N° 11: Inversor VICTRON ENERGY²⁰

La regulación del valor eficaz de la tensión de salida en inversores autónomos suele realizarse mediante control PWM. Ya que la tensión DC de entrada al inversor varía, también lo hace la producción de corriente de carga y en consecuencia la tensión de apagado de los interruptores de los semiconductores que forman el inversor. Como consecuencia la duración de los pulsos de la onda de salida debe ser modulado (estrechándolo o ensanchándolo). En algunos inversores la regulación de la tensión de salida se realiza con ayuda de transformadores o regulando la tensión antes del inversor.

El funcionamiento general de un inversor está basado en puentes de interruptores de semiconductores de potencia con un ciclo controlado

²⁰ <https://www.prisolar.com/onda-sinusoidal-pura/322-inversor-victron-phoenix-24-3000.html>

de apertura y cierre generando ondas de pulsos variables (cuantos más pulsos menor distorsión armónica y mayor proximidad a la onda pura senoidal).

2.2.1.8. Configuración y arreglos fotovoltaicos

2.2.2. Energía eólica

2.2.2.1. Energía eólica en el Perú²¹

Enel, a través de su subsidiaria **Enel Green Power Perú (“EGPP”)**, ha iniciado la construcción de Wayra I1, su primer parque eólico en el Perú, ubicado en el distrito de Marcona, en la Región Ica. La planta, donde las primeras turbinas eólicas están siendo actualmente instaladas, tendrá una capacidad instalada de 132 MW y, una vez terminada, será el parque eólico más grande del país.

“La construcción del primer parque eólico de Enel en el Perú promueve nuestra presencia en el país y muestra nuestro gran compromiso con el mercado peruano de energía renovable”, dijo Antonio Cammisecra, Responsable de Enel Green Power. “Estamos dedicados por completo a desarrollar nuevos proyectos que contribuirán con la diversificación de nuestra presencia en el país. Nuestra meta en Perú es convertirnos en la compañía líder en energía renovable, que consideramos ser clave para el desarrollo sostenible a nivel local y nacional”.

²¹ <https://www.evwind.com/2017/09/04/eolica-en-peru-enel-construye-el-parque-eolico-mas-grande-con-132-mw/>

El Grupo Enel invertirá aproximadamente 165 millones de dólares en la construcción del nuevo parque eólico, que es una de las inversiones consideradas dentro de su plan estratégico actual. El proyecto, que espera entrar en servicio en el primer semestre de 2018, está respaldado por un contrato de concesión para suministro de electricidad por 20 años, firmado con el Ministerio de Energía y Minas del Perú.

La nueva instalación de energía eólica, que consta de 42 aerogeneradores con más de 3 MW cada uno, será capaz de generar alrededor de 600 GWh (Gigawatts-hora) al año, lo que equivale a las necesidades de consumo anuales de más de 480,000 hogares peruanos, mientras evitará la emisión de casi 288,000 toneladas de CO₂ en la atmósfera por año. La energía producida por el parque eólico será entregada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) a través de la subestación Poroma. En línea con el modelo de Creación de Valor Compartido (CSV, por sus siglas en inglés) adoptado por el Grupo Enel, cuyo objetivo es combinar el desarrollo empresarial con las necesidades de la comunidad local, EGPP está llevando a cabo un plan enfocado en fomentar oportunidades de generación de ingresos en las áreas vecinas al proyecto eólico. El plan, que incluye cursos de capacitación empresarial para mujeres y apoyo para que ellas establezcan sus propios negocios, se está implementando en coordinación con las autoridades y comunidades locales. El Grupo Enel se adjudicó en el 2016 el derecho a firmar los contratos de suministro de energía para Wayra I1 tras la cuarta licitación pública de energía

renovable lanzada por el regulador peruano de energía OSINERGMIN. Con un total de 326 MW de capacidad eólica, solar e hidroeléctrica adjudicados en la licitación, se espera que, para el 2018, EGPP se convierta en el principal actor renovable en el Perú y la única empresa que opere plantas de tres tecnologías renovables diferentes en el país.

El Grupo Enel está presente en el sector de generación peruano a través de EGPP, que también está construyendo la central solar Rubí de 180 MW y la central hidroeléctrica Ayanunga de 20 MW, así como a través de Enel Generación Perú y Enel Generación Piura, que cuentan con una capacidad instalada combinada de alrededor de 2 GW. El Grupo también opera en el sector de distribución del país a través de Enel Distribución Perú, que atiende a casi 1,4 millones de clientes en la región de Lima. Enel Green Power, la división de energías renovables del Grupo Enel, se dedica al desarrollo y a la operación de energías renovables en todo el mundo, con presencia en Europa, América, Asia, África y Oceanía. Enel Green Power es líder mundial en el sector de energía verde, con una capacidad gestionada de alrededor de 39 GW proveniente de una combinación de generación que incluye energía eólica, solar, geotérmica, hidroeléctrica y de biomasa, y está a la vanguardia en la integración de tecnologías innovadoras como sistemas de almacenamiento en plantas de energía renovable.

Potencial eólico en el Perú

Respecto a evaluaciones del recurso eólico en el Perú, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) elaboró un primer mapa eólico en

1983, en base a información recogida por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y el propio ITINTEC.(ver figura N° 3)

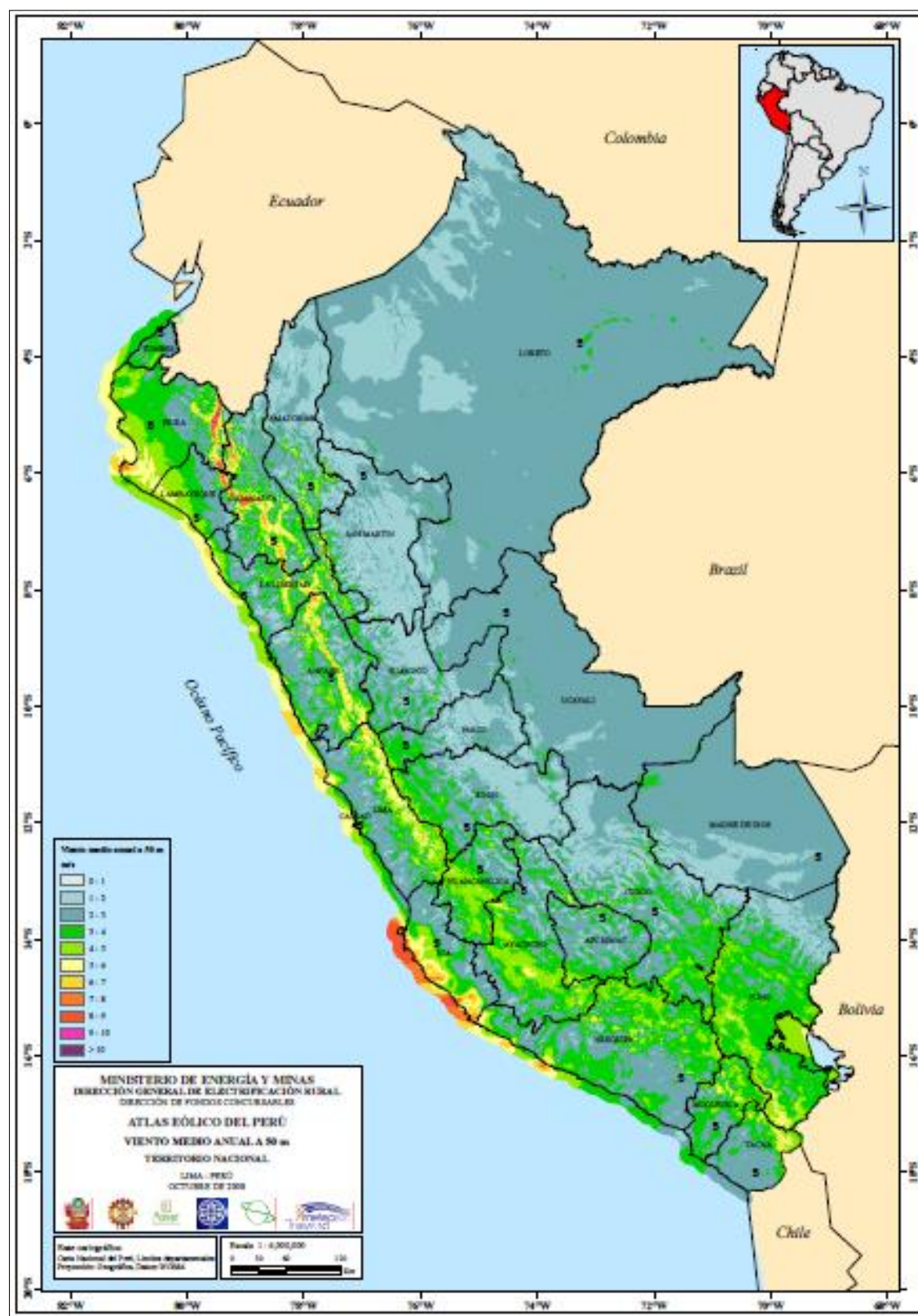


Figura N° 12: Mapa del viento a 80 m promedio anual²²

²² Atlas eólico

2.2.2.2. El viento²³

La tierra recibe 174 petavatios de radiación solar, aproximadamente el 30% regresa al espacio mientras que las nubes, los océanos y las masas terrestres absorben la restante. Esta absorción de radiación solar provoca un calentamiento de la masa terrestre, dicho calentamiento no es homogéneo en toda la superficie, sino que las zonas a 0° de latitud se encuentran más calientes que las del resto del globo.

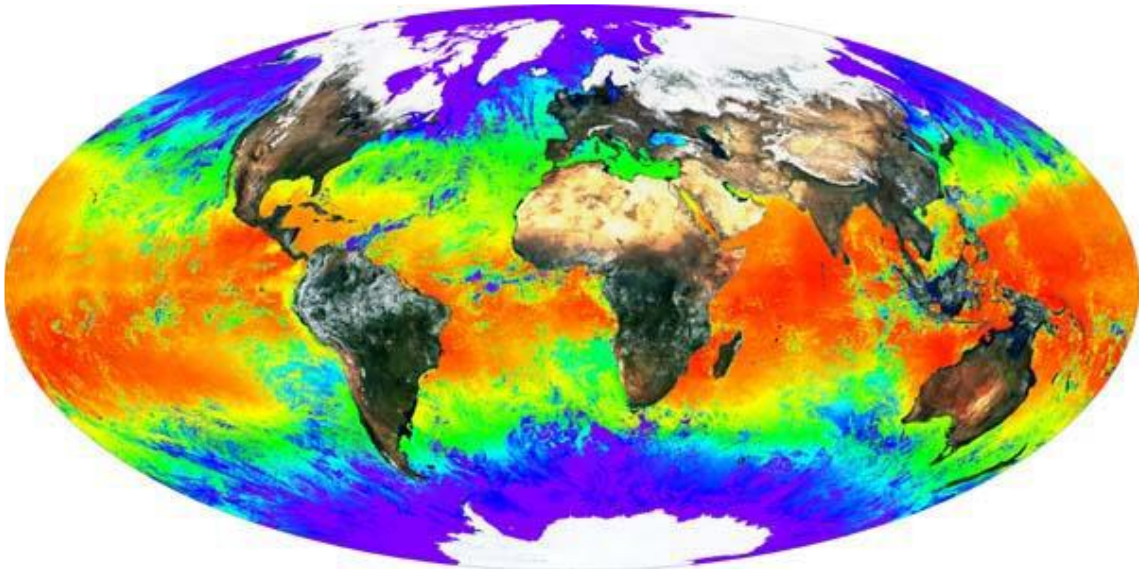


Figura N° 13: Temperatura de la superficie terrestre²⁴

Esta diferencia de temperatura provoca que el viento ascienda desde el ecuador hacia los polos y vuelva a descender cuando se enfría, ya que el aire se desplaza desde las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión. La rotación de la tierra genera que el viento sople en la dirección paralela a las isóbaras en las latitudes medias y altas, en sentido contrario a las agujas del reloj en las zonas ciclónicas y directo

²³ <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16217/02.-Memoria.pdf?sequence=50>

²⁴ <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16217/02.-Memoria.pdf?sequence=50>

en las anticiclónicas. En el hemisferio sur los sentidos son contrarios a los mencionados.

Además, hay que tener en cuenta que el agua y la tierra se calientan a diferentes velocidades, durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar provocando una baja presión relativa que favorece la entrada de aire del mar. Durante la noche sucede el fenómeno contrario.

Todas estas variaciones de la temperatura y por consiguiente de la presión son las que originan las corrientes de aire, siendo de gran importancia su comprensión y conocimiento a la hora de elegir el mejor emplazamiento para un parque eólico.

La dirección del viento se designa por la dirección desde donde sopla el viento, proporcionada por la veleta, la velocidad de este se mide con el anemómetro estableciéndose una escala llamada “escala de Beaufort” que clasifica el viento en función de su velocidad.

Tabla N° 1: escala de Beaufort

Número de Beaufort	Denominación	Velocidad viento Km/h	Efectos en tierra
0	Calma	0 a 1	Calma, el humo asciende verticalmente
1	Ventolina	2 a 5	El humo indica la dirección del viento
2	Brisa muy débil	6 a 11	El humo indica la dirección del viento
3	Brisa débil	12 a 19	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	Brisa moderada	20 a 28	Se levantan polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	Brisa fuerte	29 a 38	Oscilan árboles pequeños
6	Viento	39 a 49	Se agitan ramas gruesas, dificultad para mantener el paraguas abierto
7	Viento fuerte	50 a 61	Los árboles gruesos oscilan
8	Temporal	62 a 74	Se rompen las ramas de los árboles, dificultad para caminar
9	Temporal fuerte	75 a 88	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	Temporal duro	89 a 102	Árboles arrancados, daños en construcciones
11	Temporal muy duro	103 a 117	Estragos abundantes en construcciones
12	Temporal huracanado	> 118	Destrucción total

Fuente: <http://tprlconstruccion.blogspot.com/2009/05/escala-de-beaufort.html>

2.2.2.3. Variación vertical del viento

La forma en que la velocidad del viento varía con la altura depende del transporte vertical de cantidad de movimiento de las capas altas de la atmósfera hacia las bajas, éste se produce por medio de la turbulencia atmosférica. A su vez, la turbulencia atmosférica depende de la estabilidad de la atmosfera y de la superficie del terreno.

Empíricamente se han determinado expresiones que describen esta variación del viento con la altura, las cuales van desde las más simples, como la conocida ley potencial. (MINEM 2016)

$$V(h) = V_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha}$$

Dónde:

V (h) = Velocidad promedio del viento no conocida a una altura (m/s)

Vref. = Velocidad promedio del viento conocida a una altura (m/s)

H = Altura a la que se desea conocer V (h) (m)

Href. = Altura a la que se midió Vref. (m)

α = Coeficiente de rugosidad.

Tabla N° 2: valores de para algunos tipos de terreno

TIPO DE TERRENO	EXPONENTE α
Lugares llanos con hielo o hierba.	0,08 – 0,12
Lugares llanos (mar, costa).	0,14
Terrenos poco accidentados.	0,13 – 0,16
Zonas rústicas.	0,2
Terrenos accidentados o bosques.	0,2 – 0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades.	0,25 – 0,4

Fuente: (Hualpa Mamani 2006, pag. 27)

2.2.2.4. Ley de Bets

La función de los aerogeneradores es interceptar la energía del viento que pasa a través de la zona de barrido del rotor para transformarla así en electricidad (Fernandez zayas 2010).

El viento con una masa “m” que se mueve a una velocidad V genera energía cinética E_c que es calculada mediante la fórmula:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \dots (1)$$

Así, la energía cinética del viento es directamente proporcional a la densidad del aire. A presión atmosférica normal y a 15° C el aire pesa unos 1,225 kg/m³, aunque la humedad, el calor y las bajas presiones resultan en menores densidades.

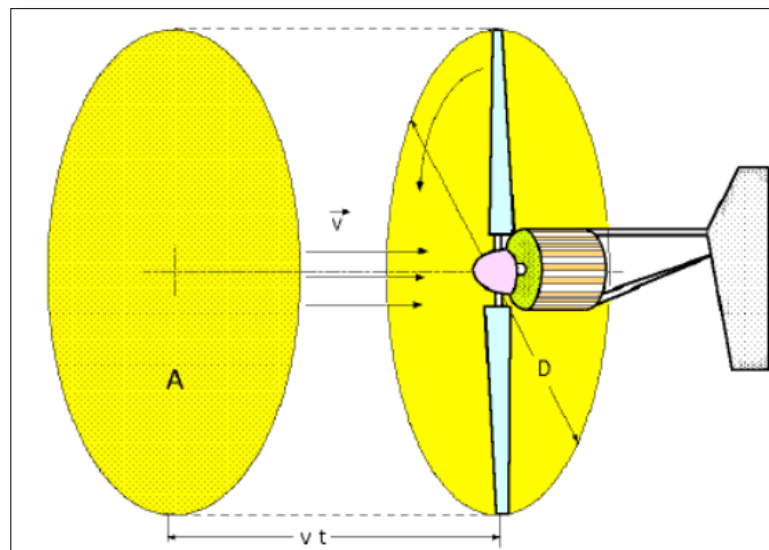


Figura N° 14: Energía útil del viento²⁵

²⁵ http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/eolica_2014u1_1.pdf

Al expresar la energía cinética del viento que pasa por el área transversal **A** por unidad de tiempo obtenemos la ecuación para calcular la potencia eólica (**P**) mostrada en la siguiente expresión:

$$P = \frac{\rho AV^2}{2} \dots (2)$$

Donde:

P = Potencia (W)

ρ= Densidad del aire (Kg/m³)

A = Área del barrido del rotor (m²)

V = Velocidad del viento (m/s)

La ecuación (2) nos indica que es necesario tener en cuenta las características del aire donde se va a ubicar un aerogenerador puesto que a bajas temperaturas el aire es más denso, a humedades altas la densidad baja y a grandes altitudes sobre el nivel del mar la densidad también es menor, estos aspectos son importantes a tomar en cuenta para poder aprovechar al máximo el potencial eólico.

El área del rotor de un aerogenerador es importante pues determina cuanta energía del viento va a ser capturada, son directamente proporcionales. Ya que el área de un aerogenerador depende del cuadrado de su diámetro, entonces al duplicar el diámetro estaríamos obteniendo 4 veces más energía. La cantidad de energía que posee el viento varía con la tercera potencia de su velocidad media, por ejemplo: si la velocidad del viento se duplica, la energía del viento aumentaría en 8 veces (2³).

La fórmula (2), muestra la potencia disponible a partir del viento. Sin embargo, no toda esta potencia puede ser extraída por un aerogenerador.

El porcentaje teórico máximo de extracción de potencia que un aerogenerador puede obtener a partir de una masa de aire en movimiento es un 59,3 %. Este valor fue calculado en 1919 por el científico alemán Albert Betz, por lo que se le conoce como Límite de Betz, el cual como muestra la figura N°6; varía para distintas familias y tipos de turbinas eólicas.

Si bien el Límite de Betz está en torno al 60 %, solo las turbinas con dos o tres aspas se aproximan a ese valor, llegando a un límite máximo real cercano al 50%, como se muestra en la figura 6. Esta razón explica en parte porque la industria eólica ha preferido utilizar tres aspas por sobre dos, en parte debido a que las velocidades de vientos aprovechables por la turbina de tres aspas poseen mayor frecuencia. Además, las turbinas de dos aspas presentan mayores grados de inestabilidad aerodinámica que las turbinas de tres aspas, lo que impone una mayor complejidad a la operación y control de estas, implicando esfuerzos mecánicos cíclicos inconvenientes sobre la torre de sujeción.

Dado que el proceso de conversión de energía eólica a energía mecánica tiene una eficiencia asociada al coeficiente de potencia (C_p), de la fórmula 3, se desprende que la potencia generable viene dada por la expresión:

$$P = \frac{C_D \rho A V^3}{2} \dots (3)$$

Cada tipo de aerogenerador presenta distintos rendimientos para regímenes de vientos dados, lo que se muestra en los distintos valores para coeficientes potencia.

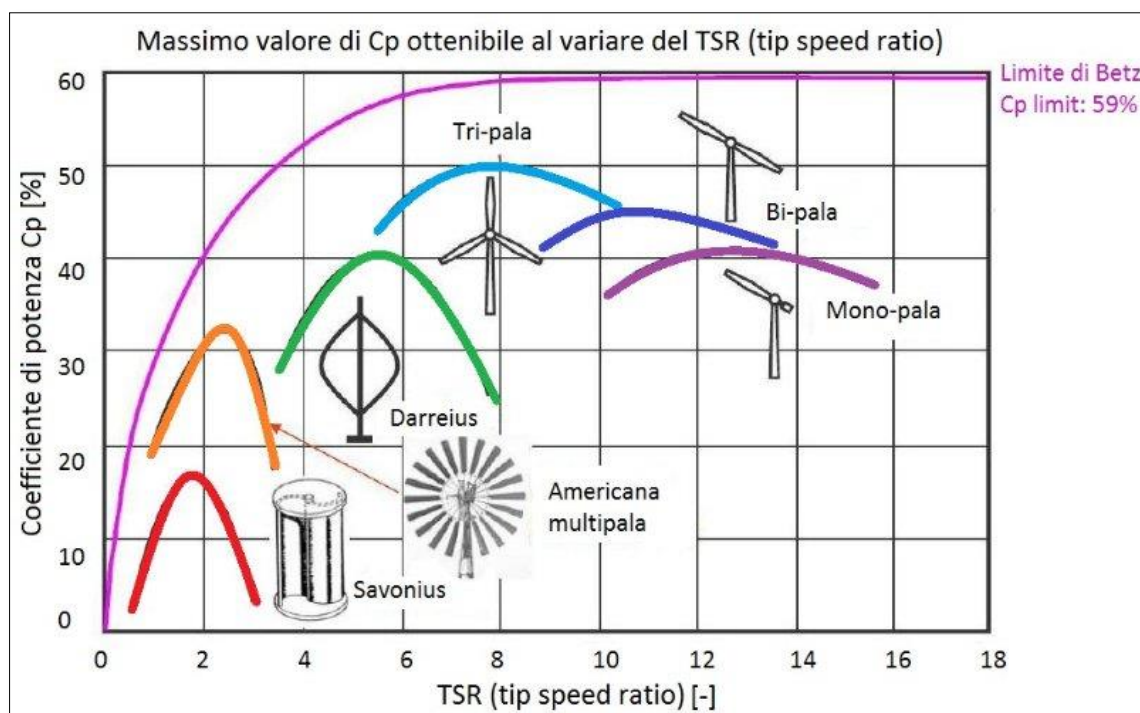


Figura N° 15: Limite Bets²⁶

2.2.2.5. Componentes de un sistema de generación eólica

Un Sistema Eólico, consiste en la integración de varios componentes que, con una o más funciones específicas, pueden suplir la demanda eléctrica impuesta por la carga, usando como combustible la energía eólica.

Los sistemas eólicos están conformados de los siguientes componentes (ver figura N° 4)

El aerogenerador o parque eólico: son las maquinas que se encargan de capturar la energía del viento y transformarla en energía eléctrica. a. Está formado por las palas, el buje, el equipo multiplicador de potencia, los ejes de alta y baja velocidad, el generador, que deben proporcionar la energía necesaria para el consumo.

²⁶ <https://www.linkedin.com/pulse/le-turbine-eoliche-il-vento-la-legge-di-betz-e-i-venditori-fina>

El regulador de carga: el regulador de carga asegura que la batería funcione en condiciones apropiadas, evitando la sobrecarga y sobre descarga de la misma, fenómenos ambos muy perjudiciales para la vida de la batería.

La batería: se encarga de almacenar parte de la energía producida por los aerogeneradores (la que no se consume inmediatamente) para disponer de ella en periodos de baja o nula irradiación solar.

El inversor: es el encargado de convertir la electricidad continua que produce el conjunto aerogeneradores-baterías en tensión de alimentación acta para la carga. Existen dos tipos de inversores: los de continua-alterna (DC/AC) y los inversores continua- continua (CC/CC).

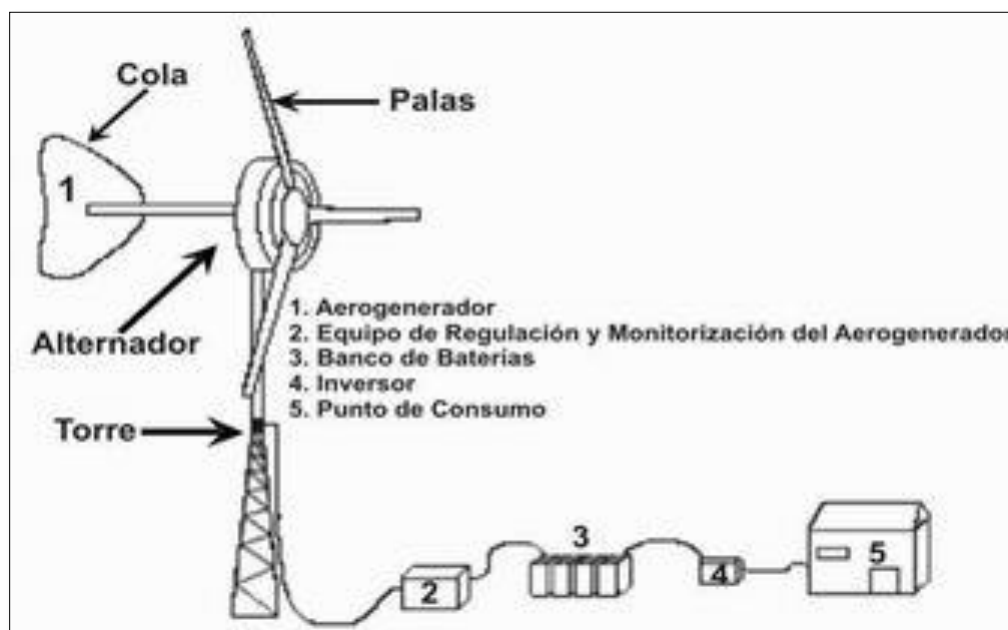


Figura N° 16: Componentes un sistema eólico²⁷

3.1.4. PRINCIPALES VENTAJAS.

²⁷ <http://www.monografias.com/trabajos61/sistema-hibrido-eolico-fotovoltaico/sistema-hibrido-eolico-fotovoltaico2.shtml>

- a) Es un tipo de energía renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía que llega a la tierra procedente del sol.
- b) Nunca se acabará.
- c) Es una energía limpia ya que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- d) Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo, en zonas desérticas, próximas a la costa, en laderas áridas y muy empinadas para ser cultivables.

3.1.5. PRINCIPALES APLICACIONES.

Las aplicaciones de la energía eólica de forma autónoma están basadas principalmente en las necesidades de pequeñas comunidades o de tareas agrícolas, pudiendo sintetizar en los siguientes puntos:

- a) En la electrificación rural y viviendas aisladas donde llevar energía eléctrica por medio de la red general sería demasiado costosa y por lo tanto no cuentan con este servicio. En este caso, la instalación de un aerogenerador es ampliamente rentable.
- b) Bombeo de agua y riego.
- c) Acondicionamiento y refrigeración de almacenes.
- d) Refrigeración de productos agrarios.
- e) Secado de cosechas.
- f) Calentamiento de agua.
- g) Alumbrado y usos eléctricos diversos.

2.2.3. Sistema eólico fotovoltaico

En muchas ocasiones el dimensionado de la instalación fotovoltaica por sí sola se encuentra por debajo del margen de seguridad que garantiza la cobertura del suministro eléctrico todo el año, ya sea por motivos económicos o bien porque se dispone de otra fuente de generación eléctrica que completará la generada por la instalación.

Incluso aunque el dimensionado sea el correcto se pueden producir puntas de consumo muy por encima del habitual, o simplemente, tener periodos anormalmente largos de tiempo nublado y que por diferentes necesidades se deba garantizar en cualquier situación. Por tanto, en estos casos se recomienda disponer de algún sistema de generación auxiliar que permita hacer frente con seguridad ante las circunstancias mencionadas, garantizando así un estado de carga aceptable en los acumuladores y una prolongación de su vida útil. Estos sistemas son una combinación entre un sistema fotovoltaico y otra fuente de suministro de energía eléctrica complementaria que no se trate de la red eléctrica, como son los generadores diésel o eólicos, pequeñas plantas hidroeléctricas y, en general, cualquier otro tipo de fuente energética.

Uno de los sistemas de generación está formado por un módulo de paneles fotovoltaicos que mediante su regulador de carga está conectado a los acumuladores, mediante un rectificador, se conectan a las baterías para, en casos extremos, poder cargar los acumuladores. No obstante, el diseño óptimo de sistemas híbridos es muy complicado, debido a la variabilidad de la energía solar y la demanda de carga, así como las características no

lineales de algunos componentes. Aunque son muchos los resultados que muestran las ventajas de un sistema híbrido frente a un sistema que sólo utiliza paneles fotovoltaicos o aerogeneradores como fuente de energía. Y tiene las siguientes ventajas

La generación eólica no produce gases ni residuos.

Cada Kwh de electricidad generada por el viento evita que se contamine 1Kg de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera.

Es inagotable mientras exista el sol y la atmósfera, continuará existiendo el viento.

La instalación es rápida no mayor a 3 meses.

No destruye la naturaleza y el suelo para la agricultura.

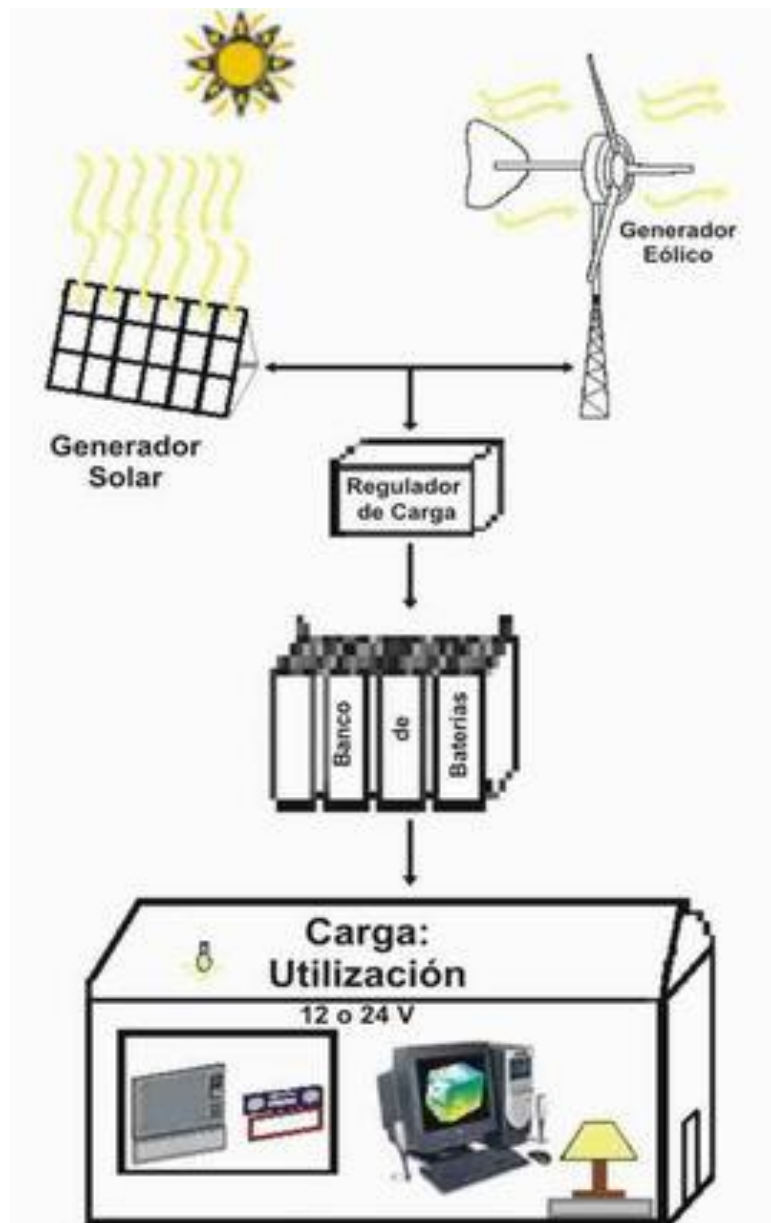


Figura N° 17: Sistema eólico fotovoltaico²⁸

2.2.4. Límite de Betz²⁹

2.2.4.1. Distribución de Weibull

Matemáticamente se puede expresar la caracterización del viento, obtenida a lo largo de los años, a partir de datos empíricos de diferentes estudios de

²⁸ <https://www.monografias.com/trabajos61/sistema-hibrido-eolico-fotovoltaico/sistema-hibrido-eolico-fotovoltaico2.shtml>

²⁹ (Fernandez zayas 2010)

implantación de parques eólicos. Se trata de la ley de distribución de Weibull de la velocidad del viento. Se ha comprobado que la velocidad del viento sigue aproximadamente una densidad de distribución de este tipo.

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]}$$

Donde:

K: parámetro de forma

C: Parámetro de escala

Distribución acumulativa: indica la probabilidad para que la velocidad del viento no se supere el valor de x y viene dado por la siguiente expresión:

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = \int_0^v \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} dv \dots (6)$$

$$= 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \dots (7)$$

Distribución acumulativa complementaria: indica la probabilidad para que la velocidad supere el valor de x , y viene dado por la siguiente expresión:

$$1 - \int_0^v f(v) dv = 1 - \int_0^v \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} =$$

$$1 - 1 + e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \dots (8)$$

Determinación de los parámetros de la función densidad de probabilidad de WEIBULL

Para determinar los parámetros debemos transformar la función de distribución acumulada en una función lineal

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \text{ entonces: } e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} = 1 - F(v)$$

$$\frac{1}{e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k}} = 1 - F(v) \text{ entonces: } \frac{1}{1-F(v)} = e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Aplicando logaritmo neperiano tenemos

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(v)}\right) = \ln\left(e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right) \dots (9)$$

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

Nuevamente aplicamos logaritmo neperiano

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

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(v)}\right)\right) = k \cdot \ln\left(\frac{v}{c}\right)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(v)}\right)\right) = k \cdot \ln(v) - k \cdot \ln(c) \dots (10)$$

La ecuación anterior responde a la ecuación de una recta de la forma:

$$y = kx + b \dots (11)$$

$$y = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - F(v)} \right) \right) \dots (12)$$

$$x = \ln(v) \dots (13)$$

$$b = -k \cdot \ln(C) \dots (14)$$

Identificados K y C, reemplazamos en la ecuación de Weibull

$$f(v) = \frac{k}{C} \cdot \left(\frac{v}{C} \right)^{k-1} \cdot e \left[- \left(\frac{v}{C} \right)^k \right]$$

2.2.5. Aerogenerador

Los aerogeneradores son las máquinas que se encargan de capturar la energía del viento y transformarla en energía eléctrica.

2.2.6. Tipos de aerogeneradores

En función de la potencia: De pequeña potencia, hasta 10 kW

De mediana potencia, desde 10 kW hasta 100 kW

De gran potencia, superiores a 100 kW

En función de la disposición del eje de giro:

2.2.6.1. Generadores de eje vertical: Sus principales ventajas son que no necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador, etc., son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costos de montaje. Sus desventajas frente a otro tipo de aerogeneradores son sus menores eficiencias, la necesidad de sistemas exteriores de arranque en algunos modelos, y que el desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesaria que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada.

Aerogenerador con rotor Savonius: Es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos desplazados respecto su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro, como se muestra en la figura N° 7. Se suele mejorar su diseño dejando un espacio entre ambas caras para evitar la sobre presión en el interior de la parte cóncava. Pueden construirse superponiendo varios elementos sobre el eje de giro (Toapanta Agular y Hidalgo Guerrero 2016).

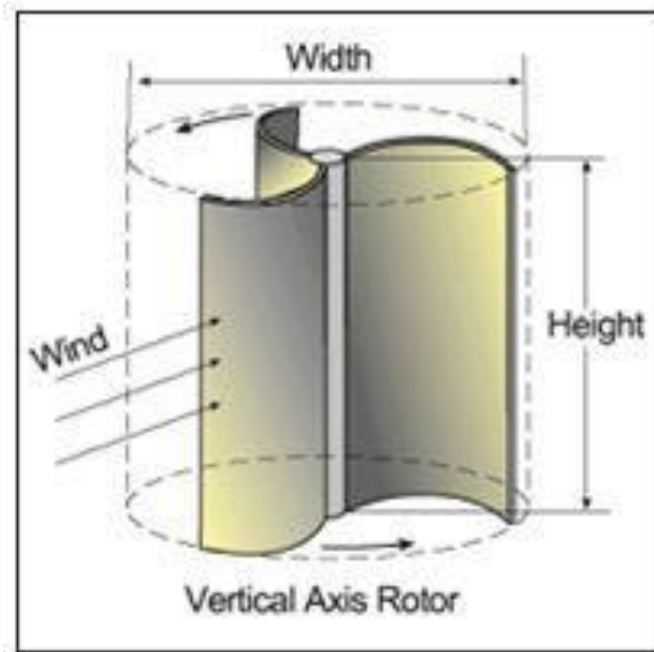


Figura N° 18: Aerogenerador Savonius³⁰

Aerogenerador con rotor Darrieus: Patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Troposkien, aunque puede utilizarse también catenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas, como se muestra en la figura N° 8, como los necesarios en los generadores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque (Toapanta Aguilar y Hidalgo Guerrero 2016).

³⁰ <https://www.pinterest.es/pin/610097080741366414/?autologin=true>



Figura N° 19: Aerogenerador tipo Darrieus³¹

Aerogenerador con rotor Giromill: Este tipo de generadores también fueron patentados por G.J.M. Darrieus. Consisten en palas verticales 8 unidas al eje por unos brazos horizontales, como se indica en la figura N° 9, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor

³¹ <http://energiaeolica1101-2016.blogspot.pe/2016/05/>

aprovechamiento de la fuerza del viento (Toapanta Aguilar y Hidalgo Guerrero 2016).



Figura N° 20: Aerogenerador con rotor Giromill³²

Aerogenerador con rotor Windside: Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal (Toapanta Aguilar y Hidalgo Guerrero 2016), como se muestra en el figura N°10.

³² http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html



Figura N° 21: Aerogenerador con rotor Windside³³

2.2.6.2. Aerogeneradores de eje horizontal

En la actualidad la gran mayoría de los aerogeneradores que se construyen conectados a red son tripalas de eje horizontal. Los aerogeneradores horizontales tienen una mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de rotación por lo que necesitan caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro, además debido a la construcción elevada sobre torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura (Toapanta Aguilar y Hidalgo Guerrero 2016).

³³ http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html

El modelo de eje horizontal puede subdividirse a su vez por el número de palas empleado, por la orientación respecto a la dirección dominante del viento y por el tipo de torre utilizada:

Aerogenerador con rotor tripala: Es el más empleado en la actualidad, consta de 3 palas colocadas formando 120° entre sí. Un mayor número de palas aumenta el peso y costo del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor número de palas para fines generadores de energía de forma comercial, aunque si para fines mecánicos como bombeo de agua etc. (Toapanta Aguilar y Hidalgo Guerrero 2016), la cual se indica en la figura N° 11



Figura N° 22: Aerogenerador con rotor tripala³⁴

Aerogenerador con rotor bipala: Ahorra el peso y costo de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan

³⁴ <http://www.diariorenovables.com/2016/11/asi-son-los-aerogeneradores-que-instalara-iberdrola-en-el-parque-eolico-marino-de-wikinger.html>

mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos, como se muestra en el gráfico N° 12 Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante y amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre (Toapanta Aguilar y Hidalgo Guerrero 2016) .



Figura N° 23: aerogenerador con rotor bipala³⁵

Aerogenerador con rotor monopala. Tienen, en mayor medida, los mismos inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo como se indica en el gráfico N° 13.

³⁵http://energiasrenovablescanariasonline.es/epages/0c70ee15-4116-4266-8853-b1ed6ca485d3.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/0c70ee15-4116-4266-8853-b1ed6ca485d3/Products/106



Figura N° 24: Aerogenerador con rotor monopala³⁶

2.2.7. Ecuaciones para el dimensionamiento del sistema voltaico

a) Proyección de la población

$$P_{20} = P_0(1 + i)^n \dots (1)$$

Donde:

Po: Población actual

P₂₀ : Población proyectada al año 20

i: Taza de crecimiento poblacional

b) Para calcular la energía que debe suministrar el sistema eólico fotovoltaico.

a la carga que satisface la energía demandada por los usuarios, depende

³⁶ <http://energiaeolica1101-2016.blogspot.pe/2016/05/>

de un factor de pérdidas el cual es función de los factores de pérdida de los equipos que componen el sistema.

$$E_{sistema} = E_{carga}/F \dots (2)$$

Donde F

$$F = 1 - \left[\frac{f_a x N}{p_d} \right] - f_b - f_i - f_j \dots (3)$$

Se consideran los siguientes valores para los factores de pérdida de

f_a : Fracción de energía perdida por autodescarga

f_b : Factor de perdidas debido al a eficiencia de la batería

f_i : Factor de perdidas debido a la eficiencia del inversor

f_j : Factor de perdidas global debido al calentamiento conexiones,

etc.

P_d : Profundidad de descarga máxima de las baterías

c) Para hallar los parámetros “K” y “C” de la distribución de WEIBULL

recta expresada en la ecuación:

$$Y = K \cdot x + B \dots (4)$$

Hacemos que:

$$Y = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - F(v)} \right) \right) \dots (5)$$

$$X = \ln(v) \dots de (6)$$

$$B = -k \cdot \ln(C) \dots de (7)$$

d) Dimensionamiento del generador fotovoltaico

Paneles fotovoltaicos conectados en serie es de:

$$\text{Numero de modulos en serie } (N_{mserie}) = \frac{\text{voltaje de trabajo } (V_T)}{\text{Tension del modulo } (V_{panel})} \dots (8)$$

Número de ramas conectadas en paralelo

$$\text{Numero de ramas en paralelo } (N_{rparalelo}) = \frac{\text{Total de modulos } (N_{panles})}{\text{Numero de modulos en serie } (N_{mserie})} \dots (9)$$

e) Para el dimensionamiento de baterías utilizaremos las siguientes ecuaciones

$$C_T = (N_D \times E_{elec}) / (P_{Dmax} \times V_T) \dots (10)$$

Donde:

C_T = Capacidad mínima del banco de baterías, expresada en Ah.

N_D = Número de días de autonomía.

E_{elec} = Energía eléctrica total media diaria (Wh/día).

P_{Dmax} = Profundidad máxima de descarga:

V_T = Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico

El número de baterías a conectarse en serie se obtiene de la siguiente ecuación.

$$N_{baterias\ en\ serie} = \frac{V_{tension\ de\ trabajo}}{V_{Tension\ de\ la\ bateria}} \dots (11)$$

Para calcular el número de ramas de baterías en paralelo en paralelo

$$N_{\text{ramas de baterías paralelo}} = C_{\text{banco}} / C_{\text{de la batería seleccionada}} \dots (12)$$

- f) Para el dimensionamiento del regulador calcularemos la corriente eléctrica mínima que debe tener el regulador con la siguiente ecuación

$$I_{\text{mínimo del regulador}} = 1,25 \times I_{\text{Cortocircuito del panel}} \times N_{\text{Pmf}} \dots (13)$$

El número de reguladores para la instalación con la siguiente ecuación

$$N_{\text{reguladores}} = I_{\text{mínimo del regulador}} / I_{\text{regulador seleccionado}} \dots (14)$$

- g) Para el cálculo de los inversores se considerará las siguientes ecuaciones

$$Potencia \text{ de entrada al inversor} = \frac{Potencia \text{ de la carga}}{Rendimiento \text{ del inversor}} \dots (15)$$

Para calcular el número de inversores

$$N_{\text{inversores}} = \frac{Potencia \text{ de entrada del inversor}}{Potencia \text{ del inversor seleccionado}} \dots (16)$$

- h) Para el cálculo de los conductores eléctricos se tendrá en cuenta la corriente eléctrica de diseño para cada tramo con las siguientes ecuaciones

Para el tramo generador fotovoltaico – controlador, la corriente está dado por ($I_{MAX\ mf}$):

$$I_{MAX\ mf} = 1,25 \times I_{Cortocircuito\ del\ panel} \times N_{ramas\ en\ paral.\ x\ regulador} \dots (17)$$

Para el tramo controlador- inversor, la corriente eléctrica esta dado por ($I_{MAX\ inv}$):

$$I_{MAX\ inv} = 1,25 \times P_{inversor} / (V_{tension\ de\ trabajo} \times \eta_{inversor}) \dots (18)$$

Para el cálculo de la sección mínima del conductor eléctrico tenemos lo siguiente

$$S_{CABLE} = \frac{2 \times L \times I}{56 \times \Delta V} \dots (19)$$

Donde:

S_{CABLE} = Sección mínima recomendada [mm^2].

L = Longitud tramo [m].

I = Corriente para cada tramo de la instalación [A].

ΔV = Caída máxima permitida para cada tramo [V].

- i) Para determinar el Angulo óptimo de inclinación de los paneles solares aremos uso de la siguiente ecuación:

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 \times |\varphi|) \dots (20)$$

donde:

β_{opt} : Angulo de inclinación optimo

$|\varphi|$: Latitud del lugar sin signo

La fórmula para calcular la caída de tensión en redes aéreas es la siguiente:

$$\Delta V = KxLxIx10^{-3} \dots (21)$$

Donde:

I = Corriente eléctrica que recorre el circuito, en A

L = Longitud del tramo, en m

K = Factor de caída de tensión

Para los cálculos mecánicos de la red de distribución secundaria usaremos la ecuación de cambio de estado TRUXA

$$\sigma_F^2 \left[\sigma_F + E\alpha(t_f - t_i) + \frac{W_{ri}^2 * L^2 * E}{24 * A^2 * \sigma_i^2} - \sigma_i \right] = \frac{W_{rF}^2 * L^2 * E}{24 * A^2} \dots (22)$$

Donde:

σ_i : Esfuerzo admisible en la hipótesis inicial (Kg/mm²)

σ_F : Esfuerzo admisible en la hipótesis final (Kg/mm²)

W_{ri} : Peso resultante en la hipótesis inicial (Kg/m)

W_{rF} : Peso resultante en la hipótesis final (Kg/m)

t_i : Temperatura en la hipótesis inicial (°C)

t_F : Temperatura en la hipótesis final (°C)

σ : Coeficiente de dilatación lineal (°C⁻¹)

E : Módulo de elasticidad (Kg/mm²)

A : Sección (mm²)

L : Vano (m)

Para calcular el vano básico usaremos la siguiente ecuación

$$Vano\ Basico = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^3}{\sum_{i=1}^n L_i}} \dots (23)$$

2.3. Definición conceptual de la terminología empleada.

Aerogenerador: Máquina que transforma la energía del viento en energía eléctrica.

Amperio o ampere: Es la unidad de intensidad de corriente eléctrica. Es la cantidad de electricidad que pasa por un conductor por un segundo. La corriente está relacionada con la potencia expresada en watts o vatios de la siguiente forma $P \text{ (watts)} = I \text{ (amperes)} \times V \text{ (volts)}$.

Anemómetro: instrumento que se utiliza para medir la velocidad del viento. Sus señales son empleadas por el controlador electrónico para conectar el aerogenerador cuando el viento alcance la velocidad de arranque. Si la velocidad es superior a la de corte, el ordenador parará el aerogenerador para evitar desperfectos en el mismo.

Bridas: Las secciones de la torre de un aerogenerador son atornilladas utilizando bridas de acero laminado en caliente, soldada a los extremos de cada sección de la torre.

Buje: Centro del rotor donde se acoplan las palas.

Coeficiente de potencia: El coeficiente de potencia mide la eficiencia con la que el aerogenerador convierte la energía eólica en electricidad. Se obtiene dividiendo la potencia eléctrica disponible entre la potencia eólica de entrada.

Combustible fósil: Se considera combustible fósil al carbón, petróleo y el gas natural o sus derivados de ellos

Conexión directa a red: En la conexión directa a red el generador está directamente conectado a la red de corriente alterna, generalmente trifásica.

Contaminación: Cualquier alteración física, química o biológica del aire. El agua o la tierra que produce daños a los organismos vivos.

Curva de potencia: Es un gráfico que indica cual será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades de viento.

Densidad de potencia: La densidad de potencia calcula la distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento. Se obtiene multiplicando la potencia de cada velocidad del viento por la probabilidad del viento de la gráfica de Weibull.

Densidad del aire: La energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen, esto es, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

Disponibilidad: Relación entre el número de horas en las que un aerogenerador produce energía y el número de horas en que han existido velocidades de viento dentro del rango de funcionamiento del aerogenerador.

Energía Cinética: La energía cinética de un cuerpo es una energía que surge en el fenómeno del movimiento. Está definida como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde su posición de equilibrio hasta una velocidad dada.

Gases invernadero: Son los gases que permiten pasar las radiaciones solares, pero no permiten pasar hacia el exterior de la atmosfera la radiación infrarroja emitida por la tierra. Esto modifica el equilibrio térmico de la tierra y puede originar incrementos en la temperatura de la tierra.

Góndola: Es donde se encuentran el multiplicador y el generador eléctrico, dos de los componentes claves del aerogenerador. Para acceder al interior de la góndola ha de hacerse desde la torre de la turbina. El rotor del aerogenerador, formado por las palas y el buje, está situado a la izquierda de la góndola.

Hertzio o Hz: Medida de frecuencia o Numero de ciclos de onda por segundo.

Isoventas: Líneas de un mapa eólico que unen puntos de igual velocidad media de viento, debiendo ser especificadas previamente las condiciones de determinación de la velocidad media.

Mapa eólico: Mapa en donde se consignan diversos datos de tipo eólico, tales como velocidades medias de viento, direcciones predominantes, regularidad.

Multiplicador: Sistema mecánico inverso al reductor de velocidad que mediante un conjunto de engranajes comunica al eje arrastrado o de salida una velocidad de giro mayor que la del eje motor o de entrada.

Mecanismo de orientación: es utilizado en el aerogenerador para girar el rotor de la turbina en contra del viento, de forma que pase a través del roto la mayor proporción de viento.

Multiplicador: es el sistema mecánico que mediante un conjunto de engranes comunica al eje de salida una velocidad de giro mayor que al eje de entrada.

Número de horas equivalentes: Parámetro usado en la caracterización del aprovechamiento de la energía eólica que es igual a la razón entre la energía generada durante un año y la potencia nominal de la máquina.

Pala: Elemento del aerogenerador que por aprovechamiento aerodinámico transforma la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del generador.

Parque eólico: Instalación eólica que comprende varios aerogeneradores y su infraestructura eléctrica, de medición y control correspondiente.

Potencia: Cantidad de energía consumida por unidad de tiempo. Unidad de potencia W (watt), un Kilowatt (KW) son 1 000 Watts, un Mega watt (MW) son

1 000 000 watts

Red eléctrica: Conjunto de líneas de transmisión, subestaciones eléctricas y obras conectadas entre sí para la conducción de energía eléctrica

Rosa de vientos: Gráfico que representa la frecuencia con la que se produce la velocidad de viento en las distintas direcciones.

Sistema hidráulico: El sistema hidráulico restaura los frenos aerodinámicos del aerogenerador.

Torre: Soporta la góndola y el rotor. Es mejor cuanto más alta ya que a mayor altura mayores velocidades de viento. Las torres pueden ser tubulares, de celosía o concreto.

Unidad de refrigeración: La unidad de refrigeración está compuesta por un ventilador eléctrico y una unidad de refrigeración de aceite. El primero se utiliza para enfriar el generador eléctrico y el segundo para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.

Veleta: Es un accesorio utilizada para medir la dirección del viento, envía sus señales al controlador electrónico de forma que éste pueda girar el aerogenerador en contra del viento utilizando el mecanismo de orientación.

Velocidad de arranque: Velocidad mínima de viento por encima de la cual el rotor comienza a girar.

Velocidad de corte: Velocidad máxima de viento por encima de la cual rotor deja de suministrar potencia al eje motor.

Velocidad de diseño nominal: Velocidad del viento incidente para la cual se obtiene la potencia máxima.

Velocidad máxima crítica: Velocidad del viento a la que se pone en funcionamiento los sistemas de parada de emergencia en previsión sobre cargas mecánicas peligrosas.

Velocidad media anual del viento: Valor medio del módulo de la velocidad del viento en un emplazamiento y altura dados a lo largo de un año.

Inversor

Equipo que transforme la corriente continua procedente del regulador en corriente alterna para alimentar las cargas

Caja de conexión: Caja a donde se llevan los cables para realizar las conexiones.

Regulador: Se encarga de controlar la carga de las baterías, así como la descarga y evitar cargas o descargas excesivas

Condiciones de prueba estándar: Condiciones en las cuales se prueban los módulos fotovoltaicos en laboratorio (1 kWh/m² de radiación solar, 25°C de temperatura de la celda solar y espectro solar correspondiente a una masa de aire de 1,5).

Consumo eléctrico: Número de Watts hora (Wh) o Kilowatts hora (kWh) utilizados para que funcione un aparato eléctrico durante un tiempo. Depende de la potencia del aparato y del tiempo que esté funcionando.

Corriente de corto circuito: Corriente que se mide en condiciones de corto circuito en los terminales de un módulo.

Corriente de máxima potencia: Corriente correspondiente al punto de máxima potencia.

Masa de aire: Medida de la distancia que atraviesa la luz en la atmósfera en su trayectoria hacia la superficie terrestre.

Voltaje de circuito abierto: Voltaje que se mide en los terminales sin carga de un sistema fotovoltaico.

Voltaje de máxima potencia: Voltaje correspondiente al punto de máxima potencia.

Watt pico: Unidad de medida de un módulo solar fotovoltaico, que significa la cantidad de potencia máxima que puede generar el módulo a

condiciones estándar de funcionamiento (1000 W/m^2 , 25°C y 1,5 de masa de aire).

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación es Aplicada: La investigación aplicada busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto³⁷. En este caso aplicaremos los conocimientos para electrificar el caserío el Zapotal utilizando la energía eólica y energía solar.

3.2. Población y muestra

La población está conformada por las unidades de vivienda ya las cargas especiales del caserío Zapotal en Jayanca.

No se utilizó técnica de muestreo puesto que se trabajará con toda la población.

3.3. Hipótesis

Si se dimensiona un sistema eólico fotovoltaico entonces se electrificara el caserío el Zapotal ubicado en el distrito de Jayanca.

3.4. Operacionalización de variables

³⁷ <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>

Tabla N° 3: Operacionalización de Variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores
Variable independiente Sistema eólico fotovoltaico	Los sistemas híbridos son una tecnología preparada para responder a la demanda de los consumidores a través de la combinación de dos energías renovables. De esta forma, se resuelven los problemas que cada uno tiene de forma individual y al mismo tiempo se potencian todas sus virtudes ³⁸ .	Dimensionamiento del sistema eólico y el sistema fotovoltaico.	Data de la radiación solar de diferentes fuentes. Data de velocidad y dirección del viento. Selección del aerogenerador (Kw) . potencia y unidades de paneles fotovoltaico (kWp). Controladores, baterías (Ah), inversores (P), elementos de protección
Variable dependiente Electrificación rural	comprende el conjunto de medios y elementos útiles para la <u>generación</u> , el <u>transporte</u> y la <u>distribución</u> de la <u>energía eléctrica</u> . Este conjunto está dotado de mecanismos de control, seguridad y protección ³⁹ .	Determinar la energía promedio diaria, la tensión de salida	Energía promedio diaria. (W.h) Tensión de suministro (V) Potencia (W)

Fuente: Elaborado por el propio Autor

³⁸ <https://inarquia.es/sistema-hibrido-fotovoltaico-eolico-mixto>

³⁹ https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico

3.5. Métodos y Técnicas de investigación

Utilizamos el método deductivo por que se han considerado características generales del uso de energías renovables, para llegar a conocer hechos particulares como es la energía solar y la energía eólica en la generación de energía eléctrica, que han permitido cumplir con los objetivos de la investigación.

Las técnicas empleadas son las siguientes:

a) Observación:

Que consistió en observar y registrar al detalle las características eléctricas de las cargas existentes; estos datos fueron registrados por el investigador.

b) La Entrevista

Se realizó al propietario de las viviendas del centro poblado con la finalidad de conocer las cargas existentes y además las cargas que podría utilizar al implementarse el sistema eólico fotovoltaico.

c) El análisis documental

Este instrumento de medición se utilizará para registrar los datos que se van obteniendo en los instrumentos llamados fichas.

3.6. Descripción de los instrumentos utilizados

Los instrumentos utilizados en el presente trabajo de investigación; son distintos para cada una de las variables como las etapas del trabajo efectuado.

En la técnica de la observación en esta técnica se usó un cuaderno de apuntes y lo más importante es que a través de esta técnica conoceremos la realidad en la que viven los habitantes del caserío el Zapotal.

En la técnica del análisis documental la guía de Análisis de Documentos: Se han revisado las diversas normas técnicas peruanas e internacionales relacionadas con la línea de investigación, tesis, libros convenientes para la investigación.

En la técnica de la entrevista se usó un cuaderno y lapicero, La entrevista, es la comunicación interpersonal establecida entre el investigador y el sujeto de estudio a fin de obtener respuestas verbales a los interrogantes planteados sobre el problema propuesto. Se considera que este método es más eficaz que el cuestionario, ya que permite obtener una información más completa.

A través de ella el investigador puede explicar el propósito del estudio y especificar claramente la información que necesite; si hay interpretación errónea de las preguntas permite aclararla, asegurando una mejor respuesta⁴⁰.

⁴⁰ <http://manuelgalan.blogspot.com/2009/05/la-entrevista-en-investigacion.html>

3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos

Una de las etapas importantes de la investigación es el análisis estadístico y la interpretación de los datos, porque aquí es donde se obtienen las conclusiones.

La información obtenida en el presente trabajo de investigación, como son datos de radiación solar, máxima demanda eléctrica y la energía generada con el sistema convencional y fotovoltaico, se han organizado en tablas y gráficas de barras utilizando el MS Excel 2016, gracias a ello se ha podido dar respuestas al problema planteado.

Una medida de tendencia central que se ha utilizado es la media aritmética, la cual permitió expresar en forma resumida los datos de energía eléctrica consumida diaria.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Propuesta de la investigación

Para lograra electrificar el caserío el Zapotal que se encuentra ubicado en el Distrito de Jayanca, departamento de Lambayeque.

se propone el dimensionamiento de un sistema eólico fotovoltaico.

Para lo cual se propone o siguiente:

a) Aerogenerador. En este se considerará un aerogenerador de acuerdo a la velocidad del viento en el lugar cual esta implementado con su controlador de carga

b) Generador Fotovoltaiico: Que estará formado por un conjunto de paneles fotovoltaicos, se tendrá en cuenta una marca reconocida y la potencia que sea comercializables es decir fácil de poder adquirirlo. El número de paneles fotovoltaicos se determinará en función de la máxima demanda de la carga.

b) Controlador de carga solar: De marca reconocida con la capacidad de corriente eléctrica de tal manera que pueda soportar la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico y la potencia suficiente para que no se produzcan sobrecargas.

c) Banco de batería: Se considerará baterías de marca reconocida por ejemplo RITAR y la capacidad se seleccionará en función de la energía de la carga y los días de autonomía.

d) El inversor: Con la finalidad de transformar la corriente eléctrica en CD a AC y poder suministrarle a la carga los 220 V y a una frecuencia de 60 Hz.

e) Red de distribución en 220 V:

Con la finalidad de poder llevar la energía desde el sistema eólico fotovoltaico a cada uno de las viviendas y así lograr su aprovechamiento por parte de los habitantes.

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Consumo de energía en el caserío el Zapotal.

El caserío Zapotal está constituido por 17 viviendas 01 local comunal y 01 iglesia, es decir un total de 19 lotes.

La información sobre los electrodomésticos que se utilizaran en las viviendas del caserío el Zapotal.

5.1.1. Consumo de energía necesaria diaria (Wh/día)

Para determinar la energía tota promedio diaria necesitamos proyectar la población para 20 años.

La tasa de crecimiento del departamento de Lambayeque.

Tabla N° 4: tasa de crecimiento para el departamento de Lambayeque⁴¹

DEPARTAMENTOS	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015
PERU	1.7	1.6	1.5	1.3
COSTA				
Callao	2.6	2.3	2.1	1.8
Ica	1.7	1.5	1.3	1.2
La Libertad	1.8	1.7	1.5	1.3
Lambayeque	2.0	1.9	1.7	1.5
Lima	1.9	1.7	1.5	1.3
Moquegua	1.7	1.6	1.4	1.3
Piura	1.3	1.2	1.1	0.9
Tacna	3.0	2.7	2.4	2.1
Tumbes	2.8	2.6	2.3	2.0

El valor promedio de las tasas de crecimiento de la Tabla N° 4 es de: 1,78 %

⁴¹ https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0015/cap-52.htm

Utilizando la ecuación (1)

Donde:

Po: Población actual (57 habitantes)

P₂₀ : Población proyectada al año 20

i: Taza de crecimiento poblacional (1,46%)

Reemplazando los datos obtenemos:

$$P_{20} = 57(1 + 0,0178)^{20} \approx 80 \text{ personas}$$

Usaremos la siguiente relación para calcular el número de viviendas proyectadas

Para el cálculo del número de viviendas consideraremos la hipótesis de que el número de personas por unidad de viviendas permanece en el tiempo, por lo que el número de viviendas es de 25

Alumbraba de vías Publicas

El número de puntos de iluminación (PI), se calculó según lo establecido en la norma DGE Alumbrado de vías públicas en áreas rurales⁴², el mismo que se presenta a continuación.

a. Determinación del consumo de energía mensual por alumbrado público (CMAP):

$$CMAP = KALPxUN \dots (21)$$

Donde:

CMAP = Consumo mensual de alumbrado público en kW-h.

⁴² (RD017-2003-EM 2003)

KALP = Factor de AP en kW-h / usuario – mes. Dicho factor es el correspondiente al sector típico 4: KALP=3,3

NU = Número de usuarios de la localidad (17)

$$CMAP = 56,10 \text{ kW.h}$$

b. Cálculo del número de punto de iluminación (PI):

$$PI = \frac{CMAP \times 1000}{NHMAP \times PPL} \dots\dots (22)$$

Donde:

PI = Puntos de iluminación.

CMAP = Consumo mensual de alumbrado público en kW-h.

NHMAP = Número de horas mensuales del servicio alumbrado público (horas/mes).

PPL = Potencia nominal promedio de la lámpara de alumbrado público en watts (60 W).

La cantidad de Puntos de iluminación (PI) en caso de ser decimal se debe redondear al número inferior.

El número de horas diarias de alumbrado público considerado debe estar comprendido entre 8 y 12 horas; mayormente 12 horas. (

$$NHMAP = 12 \times 30 = 360)$$

Reemplazando los datos en la siguiente formula obtenemos:

$$PI = \frac{CMAP \times 1000}{NHMAP \times PPL} = \frac{56,10 \times 1000}{360 \times 60} \approx 2$$

Tabla N° 5: Consumo de energía promedio diario del caserío Zapotal

Carga	Potencia (W)	Cantidad	Horas Diarias de uso	Consumo diario promedio (Wh)	Potencia (W)
1. Unidad de vivienda: 25					
Lamparas	8	3	4	96	24
Radio	10	1	5	50	10
Carga de celular	5	3	1	15	15
Televisor	60	1	3	180	60
Sub total				341,00	109
2. Local comunal: 1					
Lamparas	8	2	3	48	16
Radio	10	1	4	40	10
Televisor	60	1	3	180	60
Carga de celular	5	1	2	10	5
Sub total				278,00	91
3. Iglesia: 1					
Lamparas	8	3	3	72	24
Radio	10	1	4	40	10
Carga de celular	5	1	2	10	5
Sub total				122,00	39
4. Alumbrado publico: 4					
Lamparas	60	2	12	1440	120
Sub total				1440,00	120
5. Reserva					
				1629	150
Total				11994,00	4106

fuentes: Elaborado por el propio Autor

De la Tabla N° 5, la energía promedio diaria para el caserío el Zapotal es de 11,994 kWh

Para determinar la energía que debe suministrar el aerogenerador más el generador fotovoltaico hay que tener en cuenta las pérdidas en los conductores eléctricos debido al efecto Joule, la eficiencia de los reguladores, la eficiencia del inversor, etc. Entonces en vista de esta situación se calcula un factor global (F) que tiene en cuenta todos estos efectos

Utilizando las ecuaciones (2) y (3)

Se consideran los siguientes valores para los factores de pérdida de

f_a : Fracción de energía perdida por autodescarga =0,005

f_b : Factor de perdidas debido al a eficiencia de la batería=0,05

f_i : Factor de perdidas debido a la eficiencia del inversor=0,13

f_j : Factor de perdidas global debido al calentamiento conexiones,
etc.=0,05

P_d : Profundidad de descarga máxima de las baterías=0,7

Reemplazando en (3) obtenemos que $F = 0,76$

Ahora reemplazando en (2) obtenemos que la energía que suministra el sistema a la carga es de:

$$E_{sistema} = \frac{E_{carga}}{F} = \frac{11\,944}{0,76} = 15\,715\, W.h$$

$$E_{sistema} = 15\,715\, W.h$$

5.2. Evaluación del recurso solar y eólico

Atlas de energía solar del Perú, del cual podemos obtener la radiación solar máxima y mínima, para el departamento de Lambayeque⁴³, observamos que la radiación solar más desfavorable varía entre 4,5 kWh/m²/día y 5 kWh/m²/día por lo que se considerará el valor promedio de 4,75 kWh/m²/día.

⁴³ SENAMHI. (2003). *Atlas de energia solar del Peru*.

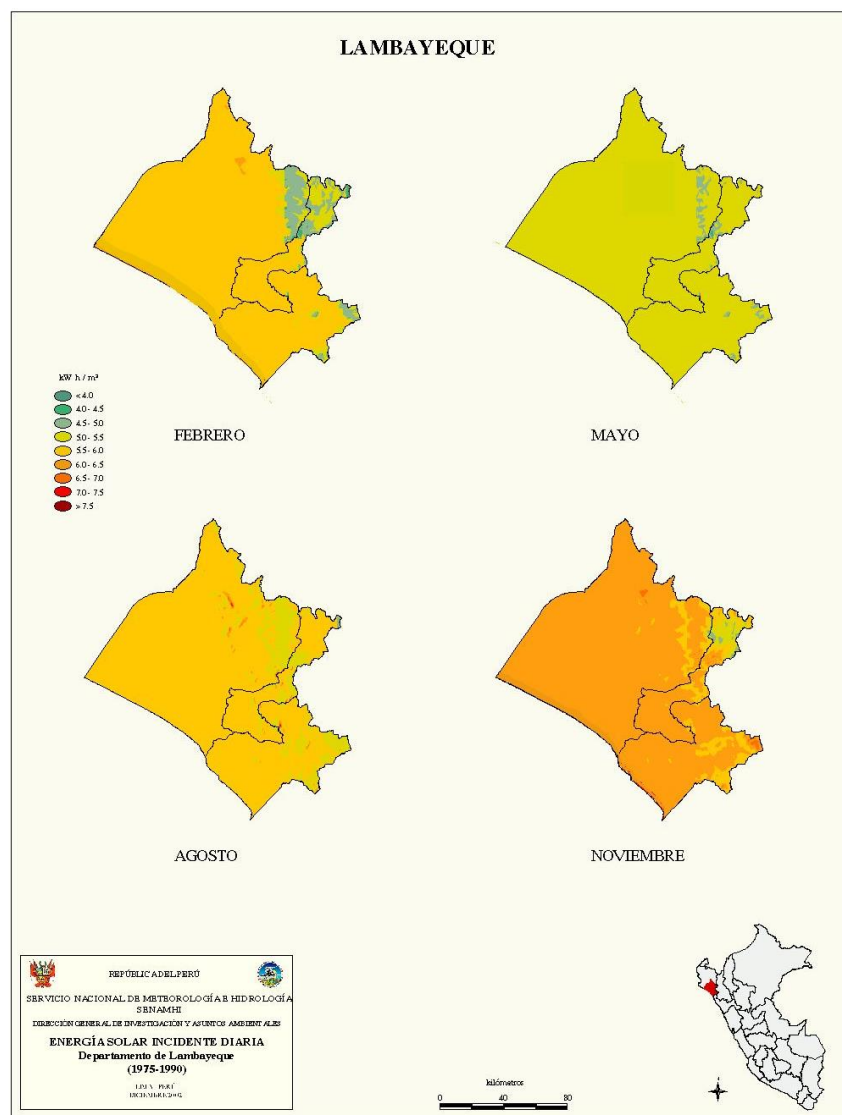


Figura N° 25: Irradiación solar en el departamento Lambayeque⁴⁴

Datos de la NASA

Con los datos de latitud y longitud del caserío Zapotal⁴⁵.

Longitud: -79.7484900000

Latitud: -6.36906666700

⁴⁴ <https://deltavolt.pe/phocadownload/Lambayeque.jpg>

⁴⁵ <http://sige.inei.gob.pe/test/atlas/>

Tabla N° 6: Valores promedio de irradiación solar en el caserío el Zapotal según la NASA

Northern boundary
-6
Western boundary Center Eastern boundary
-80 Latitude -6.5 -79
 Longitude -79.5
Southern boundary
-7

Parameters for Sizing and Pointing of Solar Panels and for Solar Thermal Applications:

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m²/day)

Lat -6.369 Lon -79.748	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	5.70	5.55	5.84	5.38	4.88	4.47	4.48	4.91	5.59	5.95	5.98	5.86	5.38

Minimum And Maximum Difference From Monthly Averaged Insolation (%)

Lat -6.369 Lon -79.748	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Minimum	-16	-19	-13	-19	-15	-25	-23	-14	-9	-13	-10	-16
Maximum	12	14	9	12	10	16	16	11	11	11	13	11

[Parameter Definition](#)

fuelle: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>








La irradiación solar más desfavorable es en el mes de junio con un valor de 4,47 kWh/m²/día.

Software METEONORM

Consultando el software METEONORM, obtenemos los datos de radiación solar a nivel de departamento tal como se muestra en la siguiente tabla de donde se obtiene que el valor de la radiación solar más baja es de 4,87 kWh/m²/día

Tabla N° 7: Radiación solar en el Caserío Zapotal con el software METEONORM

Caserio el Zapotal

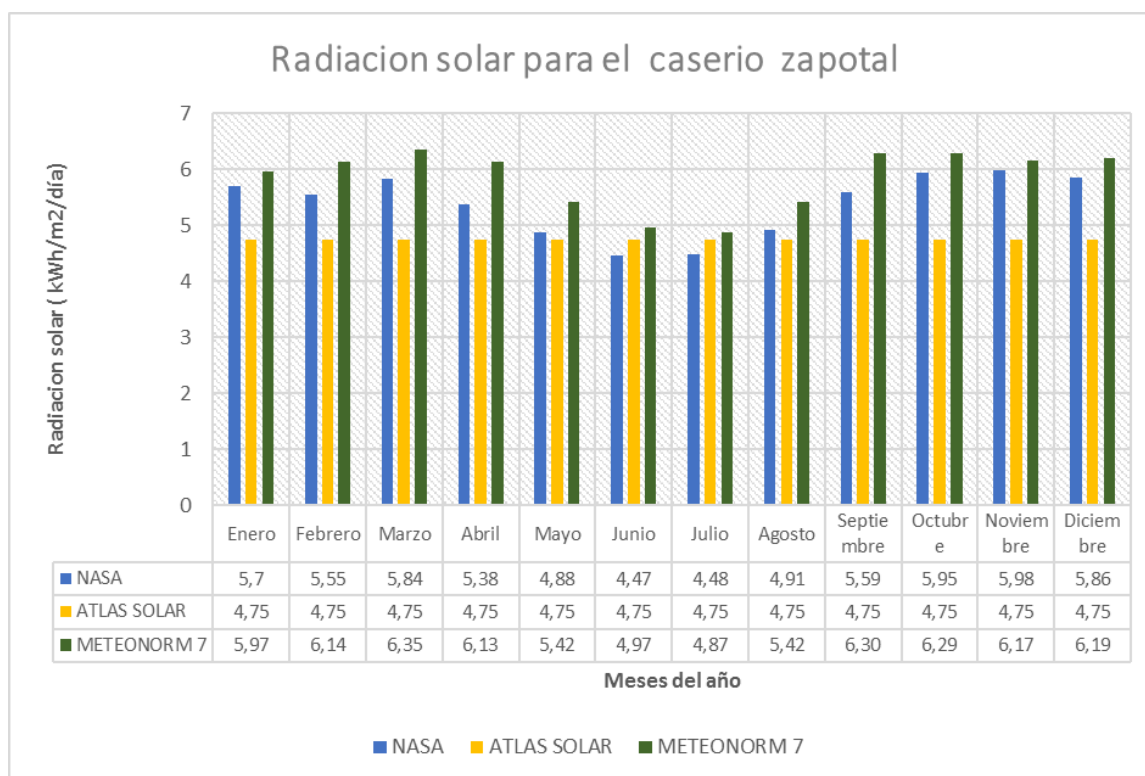
 Radiación	 Temperatura	 Precipitación	 Duración de la insolación				
 Radiación global diaria		 Temperatura diaria			 Tabla de datos		
	Gh kWh/m ²	Dh kWh/m ²	Bn kWh/m ²	Ta °C	Td °C	FF m/s	
Enero	185	74	157	24.3	18.7	5.1	
Febrero	172	77	133	25.7	19.6	4.4	
Marzo	197	75	171	25.7	19.7	4.2	
Abril	184	65	172	23.7	18.1	4.9	
Mayo	168	64	159	21.3	16.2	5.4	
Junio	149	59	142	19.9	15.5	4.9	
Julio	151	67	132	19.6	15.3	4.7	
Agosto	168	72	142	19.3	15	4.8	
Setiembre	189	71	165	19.1	14.6	5.5	
Octubre	195	76	167	19.6	14.7	5.6	
Noviembre	185	75	162	20.6	15.5	5.5	
Diciembre	192	79	162	22.4	17.1	5.4	
Año	2136	854	1864	21.8	16.7	5	

Fuente: Software METEONORM

Tabla N° 8: Radiación solar promedio diario⁴⁶

Mes	Gh(kWh/m2)	días del mes	Gh(kWh/m2/día)
Enero	185	31	5,97
febrero	172	28	6,14
Marzo	197	31	6,35
Abril	184	30	6,13
Mayo	168	31	5,42
Junio	149	30	4,97
Julio	151	31	4,87
Agosto	168	31	5,42
Septiembre	189	30	6,30
Octubre	195	31	6,29
Noviembre	185	30	6,17
Diciembre	192	31	6,19

Tabla N° 9: Comparación de los datos de radiación solar para las tres fuentes

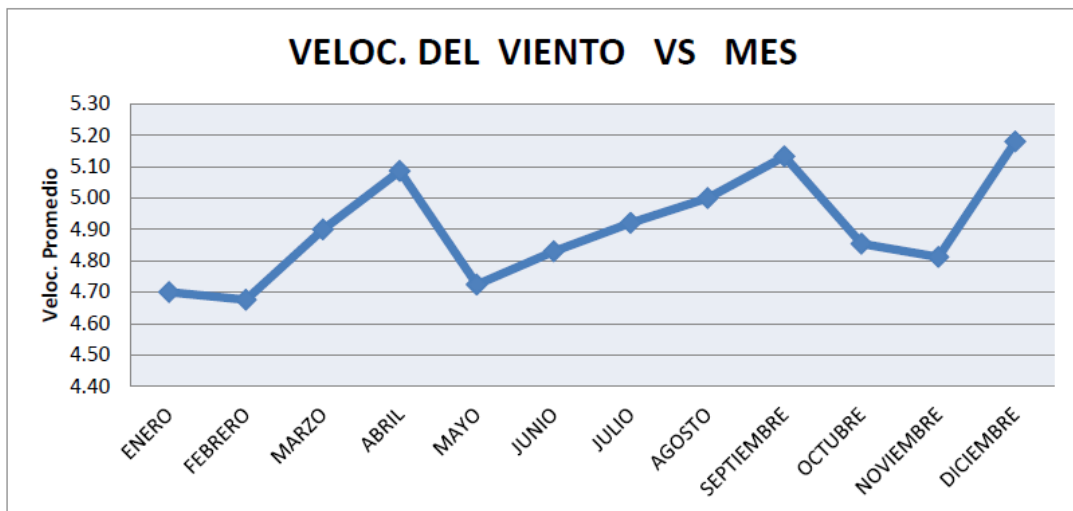


De los datos anteriores la radiación solar en el caserío el Zapotal es de
4,47 kWh/m²/día

⁴⁶ Fuente: elaboración propia

5.2.1. Evaluación del recurso eólico

Para la evaluación del recurso eólico se ha tomado los datos de la velocidad del viento promedio mensual para un periodo de un año ta como se muestra en la tabla siguiente:



De donde se observa que uno de los meses más críticos , es decir con menor velocidad promedio de viento mensual es el mes de Mayo.

Del a estación meteorológica de la FIME obtenemos los datos de la velocidad del viento para el mes de mayo (ANEXO 01) datos cada 15 minutos.

Los datos de velocidad de viento se procesan de modo que se tenga el número de veces en que se repite cada velocidad de viento (Distribución de frecuencias) y el número de veces acumuladas en el periodo de estudio año en que la velocidad del viento es menor a un valor dado (Distribución acumulada).

El número total de datos es de: 2 976

Los datos de la estación meteorológica de la FIME son a una altura de 20 m por lo que aplicando la ley exponencial (Hellman) los pasamos a 12 m que es la altura a la cual trabajaremos (ANEXO 02) y luego elaboramos la tabla N° 10 de frecuencias

Tabla N° 10: Distribución de frecuencias y distribución acumulada de las velocidades de viento

V (M/S)	DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS	DISTRIBUCIÓN ACUMULADA	DISTRIBUCIÓN ACUMULADA PORCENTUAL
1	8	8	0,00269
2	163	171	0,05746
3	426	597	0,20060
4	1298	1895	0,63676
5	485	2380	0,79973
6	463	2843	0,95531
7	97	2940	0,98790
8	33	2973	0,99899
9	3	2976	1,00000
10	0	2976	1,00000

Fuente: Elaborado por el propio Autor

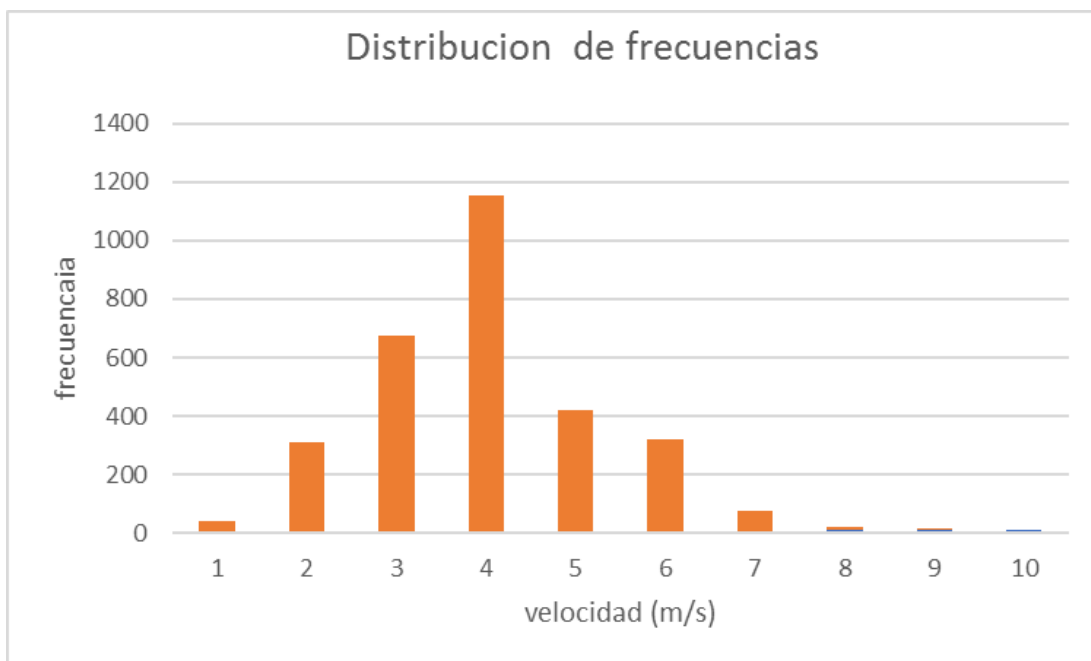


Figura N° 26: Distribución de frecuencias

Fuente: elaboración del autor

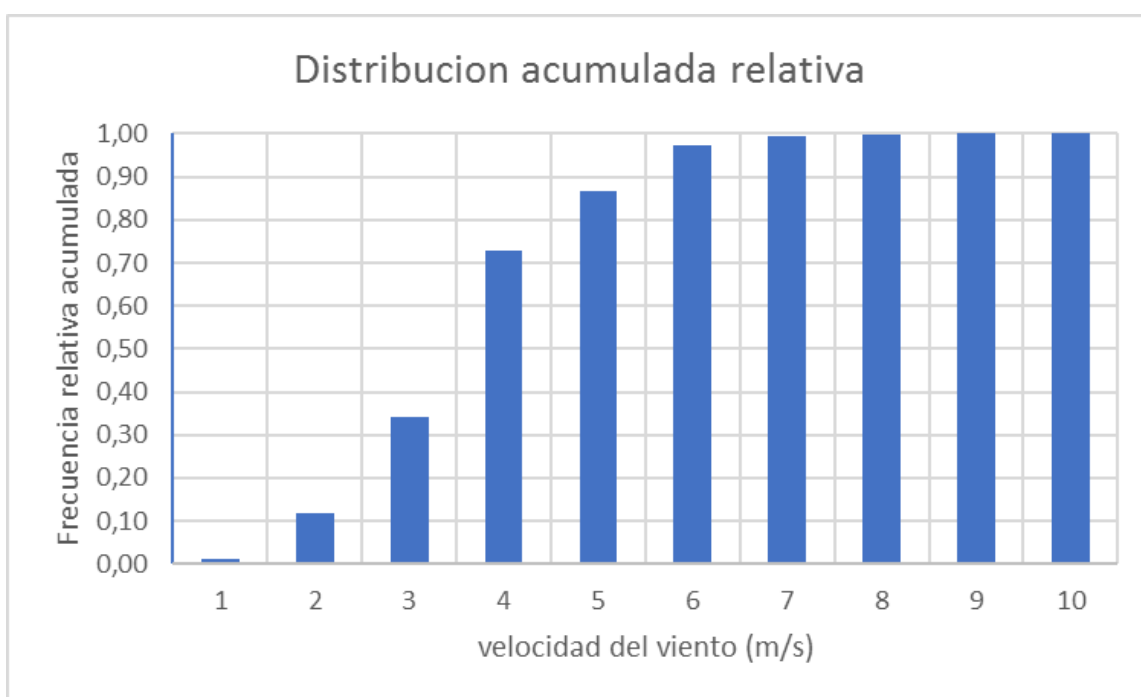


Figura N° 27: Distribución acumulada

Fuente: elaboración del autor

De los valores de la tabla N° 10 se utilizan para dar forma a la recta expresada en la ecuación:

(4) (5) (6) (7)

$$Y = K \cdot x + B \dots (4)$$

Hacemos que:

$$Y = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - F(v)} \right) \right) \dots de (5)$$

$$X = \ln(v) \dots de (6)$$

$$B = -k \cdot \ln(C) \dots de (7)$$

Donde “*k*” es el parámetro de forma y “*C*” el parámetro de escala. Al graficar los valores de *X* vs *Y* , se obtiene lo siguiente

Haciendo una regresión lineal con los datos obtenidos los parámetros de la ecuación de Weibull

Tabla N° 11: Valores para graficar y elaborar el reajuste lineal

Velocidad(m/s)	ln(v)	ln(ln(1/(1-F(v))))
1	0,0000	-5,9175
2	0,6931	-2,8272
3	1,0986	-1,4966
4	1,3863	0,0126
5	1,6094	0,4751
6	1,7918	1,1340
7	1,9459	1,4850
8	2,0794	1,9315

Fuente: Elaborado por el propio Autor

Graficamos los puntos de la tabla N° 14 en Excel tal como se muestra en la figura N° 28 y le hacemos un reajuste lineal

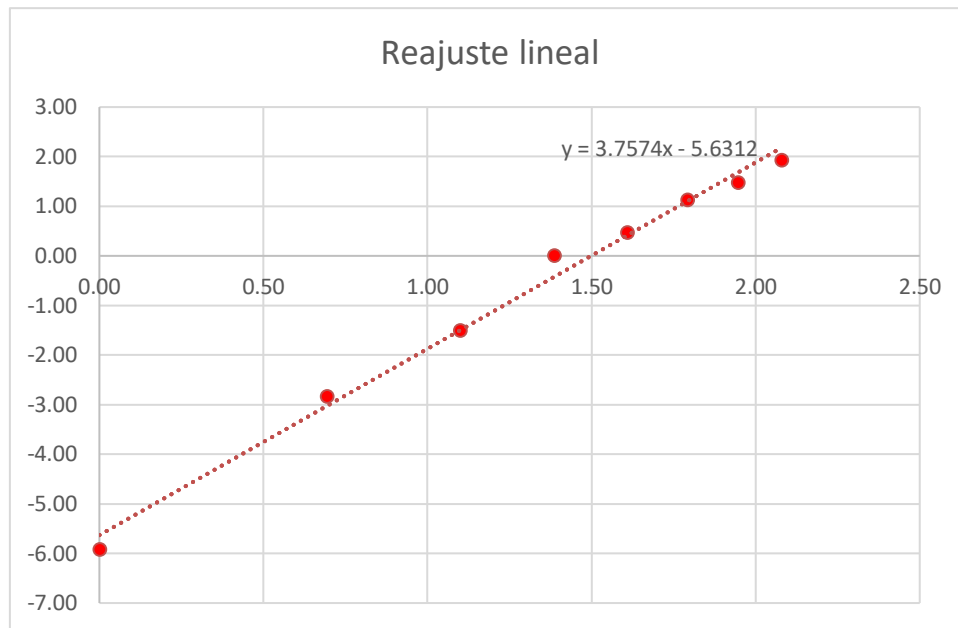


Figura N° 28: Reajuste lineal

Fuente: Elaborado por el propio Autor

Y obtenemos la función lineal

$$Y = 3,7574X - 5,6312 \dots (9)$$

Entonces identificando los términos se obtiene que:

$$k = 3,7574$$

$$b = -4,2491 \text{ de donde obtenemos que } C = 3,9557$$

Si se sustituyen los valores determinados de forma y escala en la función de Weibull, se obtiene la siguiente función de probabilidad:

$$f(v) = \left(\frac{3,0899}{3,9557}\right) \left(\frac{v}{3,9557}\right)^{3,0899-1} e^{-\left(\frac{v}{3,9557}\right)^{3,0899}} \dots (16)$$

A partir de esta función se podrán determinar las horas del día aprovechables según la velocidad del viento.

Tabla N° 12: Probabilidad de horas de velocidad del viento en el periodo de tiempo de los datos

velocidad (m/s)	f(v)	# horas
0	0,000000	0,00
1	0,043489	32,36
2	0,166308	123,73
3	0,286371	213,06
4	0,284008	211,30
5	0,162048	120,56
6	0,049827	37,07
7	0,007541	5,61
8	0,000507	0,38
9	0,000014	0,01

Fuente: Elaborado por el propio Autor

5.3. Dimensionamiento del sistema solar eólico

5.3.1. Dimensionamiento del sistema eólico

Para el sistema eólico se propone utilizar un aerogenerador AIR 50 3000 de REVOSOLAR R.L (ANEXO 03).



Figura N° 29: Aerogenerador AIR 50 3000 de 3 kW⁴⁷

⁴⁷ <http://www.revosolar.com/tienda-online-solar/es/aerogeneradores/297-aerogenerador-air-50-3000.html>

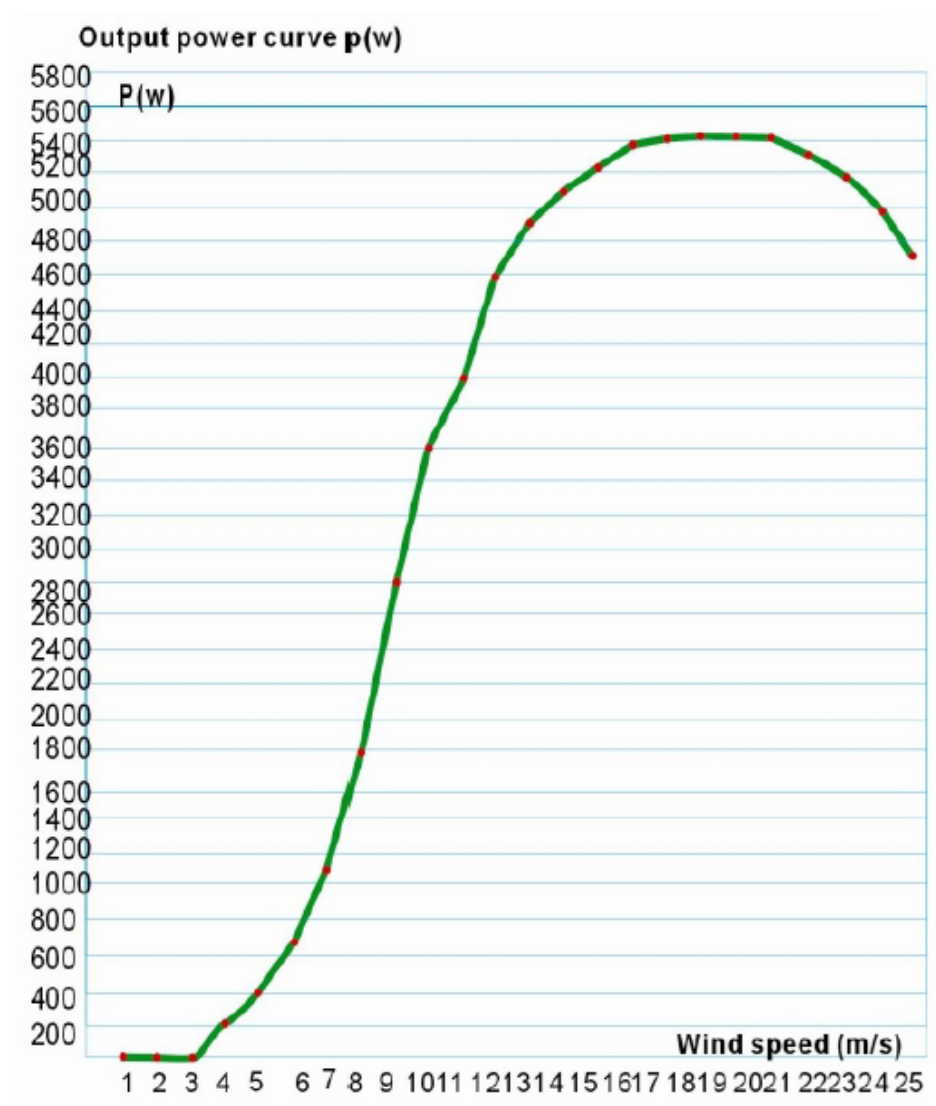


Figura N° 30: Curva de potencia del aerogenerador AIR 50 3000 de 3 kW⁴⁸

⁴⁸ <http://www.revosolar.com/tienda-online-solar/es/aerogeneradores/297-aerogenerador-air-50-3000.html>

velocidad (m/s)	Potencia (W)	horas	Energia (wh)
0	0	0,00	0,00
1	0	32,36	0,00
2	0	123,73	0,00
3	20	213,06	4261,20
4	200	211,30	42260,32
5	400	120,56	48225,49
6	650	37,07	24096,28
7	1100	5,61	6171,46
8	1600	0,38	603,17
9	2500	0,01	25,18
10	3600	0,00	0,34

La energía total suministrada por el aerogenerador es de 125 643,44 kW.h y considerando los 31 días del mes, entonces la energía promedio diaria entregado por el aerogenerador es de: 4 053,01 kW.h/día

5.3.2. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

5.3.2.1. Dimensionamiento del generador fotovoltaico

En la parte fotovoltaica se considera trabajar con 20 paneles fotovoltaicos de la marca YINGLI SOLAR DE 150 Wp (ANEXO 04) cuyas características se muestran en la siguiente tabla N° 13

Tabla N° 13: Características eléctricas del panel fotovoltaico⁴⁹

JS 150 SERIES

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module name			JS 150	JS 145	JS 140	JS 135	JS 130
Module type				YLxxxP-17b			
Power output	P_{max}	W	150	145	140	135	130
Power output tolerances	ΔP_{max}	%		+/- 5			
Module efficiency	η_m	%	15.0	14.5	14.0	13.5	13.0
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V	18.5	18.2	18.0	17.8	17.5
Current at P_{max}	I_{mpp}	A	8.12	7.99	7.77	7.60	7.42
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	22.9	22.5	22.3	22.0	21.7
Short-circuit current	I_{sc}	A	8.61	8.47	8.30	8.12	8.00

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

De las ecuaciones (8) y (9) calculamos el número de paneles fotovoltaicos en serie y numero de ramas en paralelo:

De (8)

La tensión de trabajo será de 48 V

$$N_{mserie} = 48/12$$

$$N_{mserie} = 4$$

De (9)

$$\text{Numero de ramas en paralelo}(N_{rparalelo}) =$$

$$\frac{20}{4} = 5$$

La energía diaria que entregara el generador fotovoltaico es de:

$$20 \times 150 \times 4,47 = 13\,410 \text{ W.h}$$

⁴⁹ http://www.meicosolar.com/wp-content/uploads/2017/08/JS150P-17b_EN_201503_v03.pdf

Se usaran 20 paneles fotovoltaicos YINGLI SOLAR de 150 Wp

5.3.2.2. Balance de energía

El sistema eólico fotovoltaico que se propone suministran:

Tabla N° 14: Energía suministrada por el sistema eólico fotovoltaico

	Equipos	Energía
Aerogenerador	01 Aerogenerador de	4 053,01 kW.h/día
Generador fotovoltaico	20 paneles fotovoltaicos de 150 Wp de la marca YINGLI SOLAR	13 410,00 kW.h/día
Total		17 463,01 kW.h/día

De la tabla N° 14, la energía que puede suministrar el sistema eólico fotovoltaico es de 17 463,01 kW.h/día y la que requiere la carga es de

$$E_{sistema} = 15\,715\,W.h$$

Por lo que se concluye entonces que el sistema eólico fotovoltaico es capaz de suministrar energía eléctrica a la carga.

5.3.2.3. Dimensionamiento del controlador fotovoltaico

En el dimensionamiento del controlador, la corriente eléctrica mínima del regulador dado por las ecuaciones (13) y (14)

$$I_{\text{minimo del regular}} = 1,25 \times 8,61 \times 10 = 107,63 \text{ A}$$

El número de controladores fotovoltaicos se seleccionará considerando los controladores VICTRON ENERGY (ANEXO 05) con una capacidad de corriente de 60 A,

Tabla N° 15: Numero de controladores vs costo

Marca	Capacidad	Costo (S/.)	Cantidad	Costo total (S/.)
VICTRON ENERGY	45	2033,15	3	6099,45
VICTRON ENERGY	60	2259,04	2	4518,08
VICTRON ENERGY	100	3506,04	2	7012,08
VICTRON ENERGY	70	3533,31	2	7066,62
VICTRON ENERGY	85	3621,13	2	7242,26

Fuente: elaboración propia del autor

De la ecuación (14)

$$N_{\text{reguladores}} = 107,63 / 60 = 1,794 \approx 2$$

Se usaran 02 controladores VICTRON ENERGY de 60 A

5.3.2.4. Dimensionamiento del banco de baterías

Tendremos en consideración que la energía suministrada a la carga por el sistema eólico fotovoltaico es de: (17 463,01 kW.h/día)x(0,76)=13 271,89 kW.h/día

Ahora para el dimensionamiento de baterías utilizaremos las ecuaciones

(10), (11) y (12)

Con los siguientes datos:

$N_{\text{autonomia}} = \text{Número de días de autonomía} = 2.$

$P_D = 0,7.$

$V_T = 48 \text{ V}.$

$$C_T = (2 \times 13\,271,89) / (0,7 \times 48)$$

$$C_T = 789,99 \text{ Ah}$$

Proponemos el uso de baterías RITAR de 200 Ah (ANEXO 06),

Tabla N° 16: Capacidad Vs Costo de las baterías RITAR⁵⁰

Marca	Capacidad (A.h)	Costo de la batería (S/.)	Tension de la batería	Total de baterías	Costo total (S/.)	Capacidad total (A.h)
RITAR	100	729,31	12	32	23337,92	800
RITAR	150	1089,86	12	24	26156,64	900
RITAR	200	1393,06	12	16	22288,96	800
RITAR	260	2540,28	12	16	40644,48	1040

por ser de marca reconocida y además de capacidad ampliamente comerciable



Figura N° 31: Batería RITAR⁵¹ de 200 A.h

El número de baterías que deben conectarse en serie:

⁵⁰ Fuente: elaboración propia del autor

⁵¹ <https://autosolar.pe/pdf/Ficha-tecnica-1704429.pdf>

$$N_{S\ bat.} = 48/12$$

$$N_{S\ bat.} = 4\ baterías$$

El número de baterías que deben conectarse en paralelo

$$N_{P\ bat.} = C_T / C_{bat.}$$

Donde:

$N_{P\ bat.}$ = Número de baterías conectados en paralelo.

C_T = Capacidad total del banco de baterías (Ah).

$C_{bat.}$ = Capacidad individual de una batería (Ah).

$$N_{P\ bat.} = 789,99 / 200$$

$$N_{P\ bat.} = 3,95 \approx 4$$

Luego el número total de baterías es de 16

5.3.2.5. Dimensionamiento del inversor

Teniendo en cuenta que la potencia instalada de la carga es de:

4076 W. Entonces de las ecuaciones (15) y (16) tenemos los siguientes

$$Potencia\ de\ entrada\ al\ inversor = \frac{Potencia\ de\ la\ carga}{Rendimiento\ del\ inversor}$$

$$Potencia\ de\ entrada\ al\ inversor = \frac{4,106}{0,94} = 4,37\ kW$$

Por lo tanto, se trabajará con un inversor de la marca VICTRON ENERGY de 5 kW (ANEXO 07)



Figura N° 32: Inversor⁵² VICTRON ENERGY de 5 kW

5.4.5. Dimensionamiento de los conductores eléctricos

Utilizando las ecuaciones (17) (18) y (19) seleccionamos los conductores eléctricos tal como se muestra a continuación:

**Cálculo del conductor en el tramo campo fotovoltaico –
regulador $\Delta V \leq 3 \%$**

Haciendo uso de la Ecuación (17) tenemos:

$$I_{MAX\ mf} = 1,25 \times 8,61 \times 5 = 53,81\ A$$

Haciendo uso de la Ecuación (18) tenemos:

$$S_{CABLE} = 2 \times L \times I / (56 \times \Delta V)$$

$$S_{CABLE} = 2 \times 7 \times 53,82 / (56 \times 1,44)$$

$$S_{CABLE} = 9,34\ mm^2$$

⁵² <https://autosolar.pe/pdf/Ficha-tecnica-3003019.pdf>

De la Tabla N° 17, seleccionamos el conductor **10 mm² NYY**

Cálculo del conductor en el tramo regulador – batería $\Delta V \leq 1 \%$

$$I_{MAX\ mf} = 1,25 \times 8,61 \times 5 = 53,81\ A$$

$$S_{CABLE} = 2 \times L \times I / (56 \times \Delta V)$$

$$S_{CABLE} = 2 \times 3 \times 53,81 / (56 \times 0,48)$$

$$S_{CABLE} = 12,01\ mm^2$$

De la Tabla N° 17, seleccionamos el conductor **16 mm² NYY**

Cálculo del conductor en el tramo regulador – inversor $\Delta V \leq 1 \%$

$$I_{MAX\ inv} = 1,25 \times 5\ 000 / (2 \times 48 \times 0,94) = 69,26\ A$$

Haciendo uso de la Ecuación **15** tenemos:

$$S_{CABLE} = 2 \times L \times I / (56 \times \Delta V)$$

$$S_{CABLE} = 2 \times 2 \times 69,26 / (56 \times 0,48)$$

$$S_{CABLE} = 10,31\ mm^2$$

De la Tabla N° 17, seleccionamos el conductor **16 mm² NYY**

Tabla N° 17: Características eléctricas de los conductores NYY



TABLA DE DATOS TECNICOS NYY DUPLEX

CALIBRE	N° HILOS	ESPESORES		DIÁMETRO EXTERIOR	PESO	CAPACIDAD DE CORRIENTE (*)		
		AISLAMIENTO	CUBIERTA			ENTERRADO	AIRE	DUCTO
N° x mm²		mm	mm	mm	(Kg/Km)	A	A	A
2x1x6	1	1	1.4	15.4	218	77	58	62
2x1x10	1	1	1.4	17	307	105	80	85
2x1x16	7	1	1.4	19.3	454	136	108	112
2x1x25	7	1.2	1.4	22.5	672	170	140	140
2x1x35	7	1.2	1.4	24.6	880	205	175	170

fuelle: Catalogo de INDECO⁵³ (ANEXO 08)

5.3.2.6. Angulo óptimo de inclinación:

El Angulo de inclinación óptima de una superficie fija se usa a ecuación (20)

sabiendo que la latitud es de

Latitud: -6.36906666700

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 \times |-6,369|)$$

$$\beta_{opt} = 8,09^{\circ}$$

luego el ángulo óptimo es de 8,09°, consideraremos 15° con la finalidad de evitar la acumulación de polvo humedad.

⁵³ <http://www.promelsa.com.pe/pdf/1016482.pdf>

5.3.3. Dimensionamiento del sistema de distribución en 220 V

De acuerdo con la norma: Bases para el Diseño de Líneas y redes Secundarias con Conductor Autoportante para Electrificación Rural. (RD031-2003-EM 2003) Donde estipula que la caída máxima de tensión en la red secundaria es de 7,0 % de la tensión nominal.

En la red de distribución secundaria se ha considerado usar el conductor 2x16/25 y 1x16/25

5.3.3.1. Cálculos eléctricos

5.3.3.2. Máxima caída de tensión permisible

El conductor eléctrico propuesto debe cumplir dos criterios, debe tener una capacidad de corriente mayor que la que requiere la carga y la caída máxima de tensión entre la subestación de distribución y el extremo terminal más alejado de la red no deberá exceder el 7,0 % de la tensión nominal.

De la fórmula (21) para calcular la calidad de tensión es la siguiente:

$$\Delta V = KxLxIx10^{-3}$$

Donde:

I = Corriente eléctrica que recorre el circuito, en A

L = Longitud del tramo, en m

K = Factor de caída de tensión

Los valores de K, se pueden observar en la

Por capacidad de corriente:

consideraremos la potencia del inversor

$$I_{MAX\ carga} = 5\ 000 / (220)$$

$$I_{MAX\ carga} = 25,25\ A$$

Del anexo N° 9, la capacidad de corriente del conductor propuesto es de 64 A, por lo tanto

$$\text{Como: } 12,63\ A < 64\ A$$

Por caída de tensión:

5.3.3.3. Distancias mínimas del conductor a superficie del terreno

Tabla N° 18: Distancias mínimas del conductor a la superficie del terreno

Disposición	Carreteras y avenidas	Calles y Caminos	Áreas no transitables por vehículos	Calles y caminos en zonas rurales
Al cruce	6,5 m	5,5 m	4,0 m	5,5 m
A lo largo	5,5 m	5,0 m	4,0 m	4,5 m

Fuente: Elaborado por el propio Autor

CARGAS DE ALUMBRADO PÚBLICO

Los puntos de iluminación se han establecido según la Norma DGE de Alumbrado de Vías Públicas vigente para la zona; por lo tanto, en este caso la iluminación corresponde exclusivamente a lo indispensable y de acuerdo a los requerimientos de un sistema rural, limitándose únicamente a las plazas públicas, calles principales y/o vías de acceso a la localidad. (Sector Típico 3).

Tabla N° 19: Lámparas de alumbrado y sus potencia⁵⁴

Tipo de Lámpara	Pot. de Lámpara (W)	Pérdidas (W)	Total (W)
Vapor de Sodio	50	10	60

Fuente:

Los cálculos mecánicos tienen la finalidad de determinar las tensiones y flechas en las diversas condiciones de operación.

5.3.3.4. Hipótesis de estado

Para los cálculos mecánicos del conductor las hipótesis de estado se define sobre la base de los factores meteorológicos, tal como se observa en la tabla N° 20.

Tabla N° 20: hipótesis para usar la ecuación de TRUXA

HIPÓTESIS N° 1: Condición de máximo esfuerzo	Temperatura: 5°C. Velocidad de viento: 70 Km/h.
HIPÓTESIS N° 2: Condición de mayor duración (EDS)	Temperatura: Media anual (entre 15 y 25°C, salvo excepciones) 15° C. Velocidad de viento: Nula.

⁵⁴ (RD031-2003-EM 2003)

HIPÓTESIS N°3: Condición de flecha máxima	Temperatura: 40°C. Velocidad de viento: Nula.
--	--

Fuente: CNE

5.3.3.5. Esfuerzos mecánicos en el conductor portante

- a) El esfuerzo del conductor portante de aleación de aluminio será en todos los casos, de 52,3 N/mm², aproximadamente 18 % del esfuerzo de rotura del conductor.
- b) El esfuerzo máximo del conductor no superará 176 N/mm².
- c) Cuando, debido a la presencia de hielo, los esfuerzos en el conductor portante sobrepasarán lo máximo establecido, consultor podrá adoptar un esfuerzo EDS menor a 52,3 N/mm².

Tabla N° 21: Resultados de la ecuación de cambio de estado

Vano (m)	75
HIP. I σ (Kg/mm ²) f (m)	9,20 1,21
HIP. II σ (Kg/mm ²) f (m)	5,44 0,83
HIP. III σ (Kg/mm ²) f (m)	3,44 1,31

Fuente: elaboración propia de autor

Altura del poste:

Para postes con respecto al suelo se considera una distancia mínima de 5,50 m. La distancia del vértice del poste al inicio del gancho de suspensión será de 0,30 m

La flecha según los vanos y tipo de conductores.

La longitud de empotramiento será:

$$\text{Atura de empotramiento} = \frac{H}{10} + 0,2. . (23)$$

La altura necesaria del poste será:

$$H = \frac{H}{10} + 0,2 + D_{\min} + F_{\max} + H_c$$

Donde:

H : Altura del poste en metros.

D_{mín} : distancia mínima al terreno en metros.

F_{máx} : Flecha máxima en metros.

H_c : Distancia del punta del poste al conductor más bajo en metros.

Para: D_{mín} = 5,5 m. y F_{máx} = 1,31 m. Tenemos H = 7,8 m.

Por lo tanto, la utilización de postes de concreto de 8,00 m. de longitud se justifica.

Tabla N° 22: Características De Los Postes De Concreto Armado

Longitud del poste (m)	8	8
Longitud de empotramiento del poste (m)	1,0	1,0
Diámetro mínima en la cabeza (mm)	120	120
Diámetro mínima en la base (mm)	240	240

Diámetro de empotramiento (mm)	225	225
Altura donde se aplica la fuerza del viento (m)	3,14	3,14
Carga de trabajo a 0,15 m de la cabeza (kg)	200	300
Carga de rotura (kg)	400	400
Masa por unidad (kg)	385	406

Fuente: Elaborado por el propio Autor

Con relación a los soportes para redes secundarias utilizaremos la norma: especificaciones técnicas de soportes normalizados para líneas y redes primarias para electrificación rural⁵⁵

Tabla N° 23: Características de los cables autoportantes⁵⁶

FORMACION	SECCION DEL CONDUCTOR PORTANTE (mm ²)	DIAM. EXTERIOR TOTAL (mm)	MASA TOTAL (kg/m)	MODULO DE ELAST. DEL PORTANTE (kN/mm ²)	COEFICIEN. DE DILAT. TERMICA (1/°C)
3x35+16/25	25	20,0	0,481	60,82	21x10-6
3x25+16/25	25	18,5	0,397	60,82	21x10-6
3x16+16/25	25	16,5	0,310	60,82	21x10-6
3x35/25	25	20,0	0,419	60,82	21x10-6
3x25/25	25	18,5	0,336	60,82	21x10-6
3x16/25	25	16,5	0,249	60,82	21x10-6
2x35+16/25	25	20,0	0,362	60,82	21x10-6
2x25+16/25	25	18,5	0,307	60,82	21x10-6
2x16+16/25	25	16,5	0,249	60,82	21x10-6
2x16/25	25	16,5	0,187	60,82	21x10-6
1x16/25	25	16,5	0,125	60,82	21x10-6

⁵⁵ (RD024-2003-EM 2003)

⁵⁶ (RD031-2003-EM 2003)

5.4. Metrado y presupuesto

5.4.1. Metrado y presupuesto del sistema fotovoltaico

Tabla N° 24: valor referencial para el suministro de materiales para el sistema fotovoltaico⁵⁷

Descripción	Costo/unitario (S/.)	Costo (S/.)
01 Aerogenerador IR 50 3000	26 164,00	26 164,00
01 Torre de 12 m + controlador eólico	14 019,93	14 019,93
20 paneles solares YINGLI SOLAR 150 Wp	629,33	12 586,60
16 Baterías RITAR de 200 Ah	1 393,06	22 288,96
01 Inversor VICTRON ENERGY de 5 kW	8 789,62	8 789,62
05 estructura para 4 paneles solares	1 152,32	5 761,60
02 Controladores 150/60	2 259,02	4528,04
Accesorios	500,00	500,00
Total, del Suministro		94 638,75

En cuanto a los gastos en capacitación, Se consideran S/. 2 500,00 para gastos de capacitación del personal.

Tabla N° 25: costo directo sistema eólico fotovoltaico

Descripción	Costo (S/.)
Suministro de materiales	94 638,75
Montaje electromecánico	9 463,88
Transporte de materiales	5 678,33
Costo directo	109,780,95

Fuente: Elaborado por el propio Autor

⁵⁷ Fuente: elaboración propia del autor

5.4.2. Medrado y presupuesto de la red de distribución secundaria

Tabla N° 26: Costo directo de la red de distribución secundaria

Descripción	Costo (S/.)
Suministro de materiales	39 481,76
Montaje electromecánico	14 702,92
Transporte de materiales	3 948,18
Costo directo	58 132,85

fuelle: Elaborado por el propio Autor

5.4.3. Presupuesto Total

Tabla N° 27: Presupuesto total

Descripción	Costo (S/.)
Costo Directo de la red de distribución secundaria	58 132,85
Costo directo del sistema eólico fotovoltaico	109 780,95
Total	167 913,80
Gastos generales	16 791,38
Utilidades	16 791,38
Costo total sin I.G.V.	201 496,56
I.G.V.	38 284,35
Costo referencial	239 780,91
Capacitación a los pobladores	2 500,00
Presupuesto Total	242 280,91

fuelle: Elaborado por el propio Autor

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

- a) La energía promedio diaria que necesaria para el caserío Zapotal es de 11,994 kWh. Para 25 viviendas proyectadas, 01 iglesia, 01 local comunal.
- b) según el SENAMHI (Atlas 2003) se ha obtenido un valor de 4,75 kWh/m²/día, según la NASA se ha obtenido un valor de 4,47 kWh/m²/día, y del software METEONORM se ha obtenido un valor de 4,87 kWh/m²/día. Se ha considerado el menor es decir 4,47kWh/m²/día. Los datos de la velocidad del viento promedio mensual para conocer los meses críticos se han obtenido de la estación meteorológica de Jayanca del SENAMHI y La velocidad de cada media hora del mes se ha obtenido de la estación meteorológica de la FIME
- c) Se dimensiono el sistema eólico fotovoltaico el cual está compuesto por 01 aerogenerador AIR50-3000, 20 paneles fotovoltaicos de 150 Wp de la marca YINGLI SOLAR, 16 baterías de acumuladores 200 Ah de la marca RITAR, 02 reguladores de carga 150/60 y 01 inversor 48/5000-230 V.
- d) El sistema eólico fotovoltaico tiene un costo referencial de S/. 242 280,91

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Agustin Castejon, German Santamaria. *instalaciones solares fotovoltaicas*. España, s.f.
- 2) Alvarado Guanin, Christian Rene. «ILUMINACIÓN AUTOSUSTENTABLE FOTOVOLTAICO PARA UNA PARADA DE BUSES Y SU VALLA INFORMATIVA DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE DE CUENCA.» 2015.
- 3) Bernave Chagua, Isidro, y Cesar Alvaro Castillo Quiroz. «Estudio experimental de la eficiencia de un módulo de generación eléctrica híbrida solar-eólica para la EPIME–Puno, 2015.» Puno, 2017.
- 4) Castejon, Agustin. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. España, 1998.
- 5) Cerdan Cabrera, Ana Maria. «DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR-EÓLICO PARA CONSUMO DE AGUA EN CABAÑAS ECOTURÍSTICAS EN LA PITAYA, VERACRUZ, MÉXICO.» Andalucía, 2011.
- 6) Chona Suarez, Raul Alexander, y Jhonnys Miguel Robles Cervantes. «DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA TRADICIONAL DE PANEL SOLAR DE PEQUEÑA ESCALA UBICADO EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA.» Barranquilla, 2013.
- 7) DGE-MINEM. «Ley de conseciones electricas y su reglamento.» 2009.
- 8) Diaz Corcobado, Tomas. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Mexico, 2008.
- 9) E. ALCOR. *INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS*. s.f.
- 10) electricidad, Reglamento de Seguridad e higiene ocupacional del subsector. «Reglamento de Seguridad e higiene ocupacional del subsector electricidad.» peru, 2001.
- 11) Fernandez zayas, Jose Lius. «Diseño de un aerogenerador de eje vertical.» Mexico, 2010.
- 12) Guerra Baeza, Luis David. «Estudio de factibilidad técnico/económica de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para escuelas de Quinchao.» Santiago De Chile, 2013.
- 13) Hualpa Mamani, Maimer Tomas. «Estudio de factibilidad de sistemas hibridos eolico solar en el departamento de Moquegua.» lima, 2006.
- 14) IEA. «World energy Outllok.» 2016.

- 15)Indeco. «Catalogo de cables NYY -DUPLEX.» s.f.
- 16)Ixtebe Portabelle, Cilveti. «Proceso de creacion de una planta solar fotovoltaica conectada a red.» Barcelona, 2010.
- 17)Jochin Barrios, Carmencita De los Angeles. «Diseño de un sistema solar fotovoltaico aisado para el suministro de energia electrica ala comunidad Buena Vista, San Marcos.» Guatemala, 2008.
- 18)Jordan Arias, Joaquin. «Estudio de la utilización de la energía eólica para la generación de electricidad en un asentamiento humano de San Juan de Marcona.» Lima, 2009.
- 19)Llauce Chozo , Anthony Joel. «Implementación de sistema fotovoltaico para reducir el consumo de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica en el restaurant el Cruceñito, ubicado en el km 901, carretera Lambayeque – Piura».» Lambayeque, 2016.
- 20)Llauce Chozo, Anthony Joel. «“Implementación de sistema fotovoltaico para reducir el consumo de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica en el restaurant el Cruceñito, ubicado en el km 901, carretera Lambayeque – Piura”.» Lambayeque, 2016.
- 21)MINEM. «Atlas eolico del peru.» Lima, 2016.
- 22)MINEM, DGE. «Codigo Nacional de Eelectricidad Suministro.» 2001.
- 23)Muñoz Anticon, Delfor Flavio. «Aplicacion de la energia solar para electrificacion rural en zonas marginales del pais.» Lima, 2005.
- 24)Nuñez Rehbein, Fabian Alonso. «Utilización de sistema de energías renovables no convencionales híbrido solar-eólico, aplicado al sistema de iluminación del borde costero de la ciudad de Puerto Montt.» chile, 2012.
- 25)PEREIRA RIVEIRO, FRANCISCO DE ASSIS. «PROYECTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUMINACION PUBLICA.» 2002.
- 26)RD017-2003-EM. «“Alumbrado de vías públicas en áreas rurales” .» Lima, 2003.
- 27)RD024-2003-EM. «especificaciones técnicas de soportes normalizados para líneas y redes primarias para electrificación rural .» Lima, 2003.
- 28)RD031-2003-EM. «Bases para el Diseño de Líneas y redes Secundarias con Conductor Autoportante para Electrificación Rural.» LIOMA, 2003.
- 29)Sanchez Quiroga, David. «Sistema de energia solar fotovoltaica aislada para vivienda unifamiliar aislada.» 2012.
- 30)SENAMHI. «Atlas de energia solar del Peru.» 2003.

- 31) Servan Socola, Jorge. «Análisis técnico-económico de un sistema híbrido de baja potencia eólico solar conectado a la red.» Piura, 2014.
- 32) Steve Gomez, Natalia. «Energización de las Zonas no Interconectadas a partir de las energías renovables Solar y Eólica.» Bogota, 2011.
- 33) TECSUP. *Generación de energía fotovoltaica.pdf* - TECSUP. s.f.
- 34) Toapanta Aguilar, Rodrigo Sebastian, y Jorge Lius Hidalgo Guerrero. «Análisis e implementación de una pico central híbrida solar eólica para generar 500w en la hacienda “La Merced” ubicada en el barrio Santa Ana del Pedregal, Parque Nacional Cotopaxi en el periodo 2014.» Ecuador, 2016.
- 35) Valdiviezo Salas, Paulo Daniel. «Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP.» Lima, 2014.
- 36) Velazquez Cespedes, Roberto Andres. «Proyecto de instalación solar fotovoltaica en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Santiago de Chile.» tesis, Universidad de Santiago de Chile, Santiago-Chile, 2012.

ANEXOS

ANEXO N°01. DATOS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA JAYANCA (SENAMHI)

ANEXO N°02. VELOCIDAD DEL VIENTO A 12 m DE ALTURA

ANEXO N°03. FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR AIR 50-3000

ANEXO N°04. FICHA TÉCNICA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS YINGLI SOLAR DE 150 Wp

ANEXO N°05. FICHA TÉCNICA DEL CONTROLADOR 150 /60 VICTRON ENERGY

ANEXO N°06. FICHA TÉCNICA DE LA BATERÍA RITAR DE 200 A.h

**ANEXO N°07. FICHA TÉCNICA DEL INVERSOR VICTRON ENERGY
5000 W**

ANEXO N°08. FICHA TÉCNICA DE CABLES NYY

ANEXO N°09. CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES AUTOPORTANTES

ANEXO N°10. SISTEMA EÓLICO FOTOVOLTAICO

ANEXO N° 11. METRADO Y PRESUPUESTO DE LA RED SECUNDARIA

ANEXO N° 12. RED DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA (220 V)