



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

“Propuesta de un sistema de generación híbrido eólico fotovoltaico conectado a red para suministrar con energía eléctrica a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque.”

Presentado por:

Bach. Granados Moreno Miguel Angel

Asesor:

Msc. Ing. Villalobos Cabrera Jony

**Lambayeque – Perú
2019**



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

“Propuesta de un sistema de generación híbrido eólico fotovoltaico conectado a red para suministrar con energía eléctrica a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque.”

Presentado por:

Bach. Granados Moreno Miguel Angel

Aprobado por el Jurado Examinador:

PRESIDENTE: DR. ANÍBAL JESUS SALAZAR MENDOZA

SECRETARIO: M.Sc. AMADO AGUINAGA PAZ

MIEMBRO: ING. ROBINSON TAPIA ASENJO

ASESOR: M.Sc. JONY VILLALOBOS CABRERA

Lambayeque – Perú
2019



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

TESIS

Título

“Propuesta de un sistema de generación híbrido eólico fotovoltaico conectado a red para suministrar con energía eléctrica a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque.”

CONTENIDO

CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN
CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS
CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN ECONÓMICA
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
CAPÍTULO IX: ANEXOS

Autor: Bach. GRANADOS MORENO MIGUEL ANGEL

PRESIDENTE

SECRETARIO

MIEMBRO

ASESOR

Lambayeque – Perú
2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mis queridos padres, **VICTOR GENARO GRANADOS BRAVO Y LUZGARDA BENIGNA MORENO BARTOLO**; por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, porque gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo y un privilegio el ser su hijo, pues son los mejores padres.

A mis hermanas, **Maryann y Lilliann**, por estar siempre acompañándome, y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

Agradecimiento

Un agradecimiento especial **A DIOS**, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi asesor, el **INGENIERO JONY VILLALOBOS CABRERA**; por su paciencia, sus consejos y orientación a lo largo del desarrollo de mi tesis, ya que sin su tiempo y compromiso brindado esto no hubiera sido posible.

A los señores **ADMINISTRATIVOS Y DOCENTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**, por su buena disposición al permitirme tan amablemente acceder a cada uno de los ambientes de la facultad.

Y a todas las personas que me han apoyado abriéndome sus puertas y compartiendo sus conocimientos para que este trabajo se realice con éxito.

Resumen

El presente trabajo de investigación describe un proyecto de generación de energía mediante fuentes de energía limpia para la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, la cual se encuentra ubicada en el departamento de Lambayeque, provincia y distrito de Lambayeque. Con el presente proyecto se pretende abastecer con energía eléctrica parte de la demanda total de la facultad, demostrando técnicamente es factible el uso de energías renovables no convencionales aplicadas en zonas urbanas con acceso a una red pública ya existente.

El tipo de instalación es descentralizado pues está conformado por dos sistemas híbridos de baja potencia conectados a red ubicados estratégicamente, los que permiten consumir la energía en el mismo lugar en el que se genera y vertiendo excedentes a la propia red eléctrica de la universidad. Se ha visto necesaria la utilización de 34 paneles fotovoltaicos de 270 Wp de potencia cada uno, conectados en serie, además de un total de dos aerogeneradores de 2500 W, agrupados para cumplir condiciones de voltaje y corriente necesarias. Entre ellos hacen un total de 14180 W de potencia instalada.

El lugar de estudio en la presente tesis está ubicado en las coordenadas de latitud: $-6^{\circ} 42' 33.87''$ S, longitud: $-79^{\circ} 54' 13.93''$ W, y a una altura: 17 msnm, la misma que se encuentra dentro de un área delimitada de aproximadamente 8000 m² de los cuales sólo 660 m², pertenecientes a los techos de los pabellones de la facultad, están disponibles para la distribución de los equipos de generación. La data meteorológica tomada como base para la realización de este proyecto se obtuvo de la estación semiprofesional de la misma facultad, que para su uso se hizo una comparación con la base de datos meteorológicos de la NASA, concluyendo en valores similares y en su aceptación para su utilización.

Esta propuesta ofrece un análisis de compatibilidad entre los equipos seleccionados, simplicidad de instalación y un plan de mantenimiento para los mismos; así también, un análisis económico en base a costos reducidos de operación y mantenimiento, e indicadores financieros.

Palabras clave: Energías renovables no convencionales, paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, sistemas híbridos.

Abstract

The present research work describes a project of power generation using clean energy sources for the faculty of Mechanical engineering and Electrical Engineering from the National University Pedro Ruiz Gallo, which is located in the department of Lambayeque, province and district of Lambayeque. With the present project it is intended to supply with electric energy part of the total demand of the faculty, demonstrating it is technically feasible the use of non-conventional renewable energies applied in urban areas with access to a public network already existing.

The type of installation it is decentralized because it is formed by the two hybrid systems, low-power, connected to network strategically located, which allow you to consume the energy in the same place that generates and pouring surplus to the electricity of the university. It has been seen necessary to use 34 photovoltaic modules of 270 Wp power each, connected in series, in addition to a total of two wind turbines of 2500 W, which are grouped together to meet conditions of voltage and current required. Between them they make a total of 14180 W of installed power.

The place of study in the present thesis is located at the coordinates of latitude: -6° 42' 33.87" S, longitude: -79° 54' 13.93" W, and a height: 17 m, is the same that is found within a delimited area of approximately 8000 m², of which only 660 m², belonging to the ceilings of the pavilions of the faculty, are available for the distribution of the generation equipment.

The weather data taken as a basis for the realization of this project was obtained from the station semi-professional of the same faculty, for its use is made a comparison with the meteorological data from the NASA, concluding on similar values and their acceptance for use.

This proposal offers an analysis of the compatibility between the selected computers, simplicity of installation and a maintenance plan for the same; so also, an economic analysis on the basis of reduced costs of operation and maintenance, and financial indicators.

Keywords: Non-conventional renewable energies, photovoltaic panels, wind turbines, systems hybrid.

Índice General

CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Realidad Problemática.....	3
1.1.1. Internacional	3
1.1.2. Nacional	4
1.1.3. Local	4
1.2. Situación actual de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	5
1.3. Formulación del Problema	5
1.4. Delimitación de la investigación	6
1.4.1. Características de la zona en Estudio	6
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	10
1.6. Limitación de la Investigación	11
1.7. Objetivos de la Investigación	11
1.7.1. Objetivo General:	11
1.7.2. Objetivos Específicos:	11
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	13
2.1. Antecedentes.....	13
2.2. Sistemas Híbridos	15
2.3. Tipos de Sistemas Híbridos	15
2.3.1. Sistema Híbrido Autónomo	16
2.3.2. Sistemas Híbridos conectados a red.....	18
2.4. Configuración de un Sistema Híbrido	21
2.4.1. Subsistema de generación y abastecimiento de energía.....	21
2.4.2. Subsistema de acumulación de energía.....	25
2.4.3. Subsistema de Conversión	25
2.4.4. Subsistema de control, monitoreo y registro.....	26
2.5. Componentes de un Sistema Híbrido	26

2.5.1.	Aerogeneradores	27
2.5.2.	Paneles Solares	30
2.5.3.	Regulador o controlador de Carga	40
2.5.4.	Inversor	42
2.5.5.	Medidores de Energía	45
2.6.	Factores que influyen en un Sistema Híbrido	46
2.6.1.	Aspectos del emplazamiento a tener en cuenta	48
2.6.2.	Evolución de los costos	49
2.7.	Dimensionamiento del Sistema	50
2.7.1.	Método Propuesto para el dimensionamiento del Sistema	50
2.7.2.	Determinación de la demanda de Energía	52
2.7.3.	Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables	53
2.8.	Tratamiento de la energía generada y sus excedentes.....	57
2.9.	Marco legal e institucional.....	59
2.10.	Cambio climático	61
2.10.1.	Comercio de Emisiones	63
2.10.2.	Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	64
2.10.3.	Acuerdo de París y COP 21	65
2.10.4.	Reducción de emisiones de CO2	67
CAPÍTULO III: MARCO METODOLOGICO		68
3.1.	Tipo y diseño de investigación	68
3.2.	Población y muestra	68
3.3.	Hipótesis.....	68
3.4.	Operacionalización de variables	69
3.5.	Métodos y técnicas de investigación.....	69
3.6.	Descripción de los instrumentos utilizados	70
3.7.	Análisis estadístico e interpretación de datos	71
3.7.1.	Medidas de tendencia central.....	71

3.7.2.	Medidas de dispersión	71
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN		72
4.1.	Propuesta de investigación.....	72
4.2.	Montaje de equipos	72
4.3.	Plan de acción	73
4.3.1.	En el ámbito tecnológico:	73
4.3.2.	En el ámbito comercial:	73
4.3.3.	En el ámbito político:	74
CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		75
5.1.	Cálculo de la demanda de energía eléctrica	75
5.1.1.	Determinación de la Demanda de Potencia y Energía	75
5.1.2.	Características de ambientes y cargas presentes	75
5.1.3.	Procedimiento de cálculo de la demanda de energía	80
5.2.	Cálculo del potencial energético del lugar.....	92
5.2.1.	Cálculo del potencial eólico	92
5.2.2.	Cálculo del potencial solar	96
5.3.	Dimensionamiento del sistema y selección de equipos	100
5.3.1.	Selección de equipos	101
5.3.2.	Dimensionamiento del Sistema Eléctrico.....	123
5.4.	Ubicación del Sistema Híbrido.....	126
CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN ECONÓMICA		127
6.1.	Presupuesto del Proyecto.....	127
6.1.1.	Presupuesto de los Equipos Principales	127
6.1.2.	Presupuesto del Sistema Eléctrico	127
6.1.3.	Presupuesto de Estructuras	129
6.1.4.	Presupuesto de Transporte, Instalación y Mano de Obra.....	129
6.1.5.	Presupuesto General	130
6.2.	Análisis económico.....	130

6.2.1.	Conceptos financieros.....	131
6.2.2.	Egresos del Proyecto	133
6.2.3.	Ingresos del proyecto	135
6.2.4.	Flujo de fondos del proyecto	136
6.3.	Recuperación de la inversión.....	140
6.4.	Incentivos para mejorar la rentabilidad	141
6.4.1.	Normativa nacional e internacional	141
6.4.2.	Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL).....	143
6.4.3.	Estimación de la reducción de emisiones de CO2.....	143
6.4.4.	Créditos de Carbono (CER)	144
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		145
7.1.	Conclusiones	145
7.2.	Recomendaciones	147
CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		148
CAPÍTULO IX: ANEXOS.....		151

Índice de Figuras

Figura 1.- Distribución de la velocidad media del viento a lo largo del territorio peruano.....	7
Figura 2.- Energía solar promedio anual incidente en la región Lambayeque..	8
Figura 3.- Ubicación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UNPRG.	8
Figura 4.- Ubicación de la estación meteorológica de la FIME - Imagen satelital.	9
Figura 5.- Diagrama de instalación de un Sistema híbrido autónomo.	16
Figura 6.- Esquema de instalación de un sistema híbrido conectado a red. ..	19
Figura 7.- Diagrama de configuración de un Sistema híbrido conectado a red.	21
Figura 8.- Conexión de 8 módulos fotovoltaicos (2Sx4P) mostrando los diodos de protección.	23
Figura 9.- Fuerzas que actúan sobre una sección de pala en movimiento. ...	24
Figura 10.- Partes principales de un aerogenerador de eje horizontal.	27
Figura 11.- Efecto fotovoltaico sobre una celda fotovoltaica.	30
Figura 12.- Junta N-P en equilibrio.	32
Figura 13.- Parámetros eléctricos de una celda fotovoltaica.....	34
Figura 14.- Conexión estándar de módulos solares en cadena.	36
Figura 15.- Conexión de módulos solares con técnicas de salto de rana.	36
Figura 16.- Conjunto de baterías tubulares OPzS, aptas para aplicaciones solares y eólicas.	41
Figura 17.- Diagrama de los principales factores que influyen en un sistema híbrido.....	47
Figura 18.- Metodología de dimensionamiento del sistema híbrido.	52
Figura 19.- Emisiones de GEI.	62
Figura 20.- Mapa del Acuerdo de París, junio del 2017.	66
Figura 21.- Demanda total de energía para cada día de la semana.	85
Figura 22.- Curva de carga para el día lunes.....	86
Figura 23.- Curva de carga para el día martes.	86
Figura 24.- Curva de carga para el día miércoles.	87
Figura 25.- Curva de carga para el día jueves.	87
Figura 26.- Curva de carga para el día viernes.	88

Figura 27.- Curva de carga para el día sábado.	88
Figura 28.- Curva de carga para el día domingo.	89
Figura 29.- Resumen de las curvas de cargas.	89
Figura 30.- Potencia promedio y potencia máxima semanal.....	90
Figura 31.- Gráfica de Weibull para determinar los parámetros del mes de enero.	92
Figura 32.- Variación de la irradiación solar en un día.....	97
Figura 33.- NHE de radiación para un ángulo de inclinación de 9°.	98
Figura 34.- Combinación de paneles solares con aerogeneradores Zonhan.	102
Figura 35.- Combinación de paneles solares con aerogeneradores Bornay.	102
Figura 36.- Combinación de paneles solares con aerogeneradores Southwest Wind.....	103
Figura 37.- Energía producida por la primera combinación vs demanda mensual.	107
Figura 38.- Energía producida por la segunda combinación vs demanda mensual.	109
Figura 39.- Energía producida por la tercera combinación vs demanda mensual.	112
Figura 40.- Energía producida por la cuarta combinación vs demanda mensual.	114
Figura 41.- Energía producida por la quinta combinación vs demanda mensual.	116
Figura 42.- Energía producida por la sexta combinación vs demanda mensual.	118
Figura 43.- Diagrama unifilar del sistema híbrido eólico fotovoltaico conectado a red.....	124

Índice de tablas

Tabla 1.- Combinaciones de fuentes renovables para sistemas híbridos.....	15
Tabla 2.- Clasificación y tipos de aerogeneradores.	28
Tabla 3.- Proveedores nacionales e internacionales de aerogeneradores.	29
Tabla 4.- Proveedores de paneles solares en el mercado nacional e internacional.....	39
Tabla 5.- Proveedores de reguladores en el mercado nacional e internacional.	40
Tabla 6.- Proveedores de inversores on-grid en el mercado nacional e internacional.....	45
Tabla 7.- Proveedores de medidores de energía en el mercado nacional e internacional.....	46
Tabla 8.- Costo promedio de instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas.	49
Tabla 9.- Distribución de edificios por grupos.	53
Tabla 10.- Operacionalización de variables.	69
Tabla 11.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 1.....	76
Tabla 12.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 2.	76
Tabla 13.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 3.....	76
Tabla 14.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 4.....	77
Tabla 15.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 5.....	77
Tabla 16.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 6.....	77
Tabla 17.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 7.....	78
Tabla 18.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 8.....	78
Tabla 19.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 9.....	79
Tabla 20.- Potencia total demandada por las cargas de iluminación exterior..	79
Tabla 21.- Horario de funcionamiento y energía demandada por las cargas de los ambientes de funcionamiento diario.	81
Tabla 22.- Período típico, días y tiempo de uso, de las cargas presentes en los ambientes de funcionamiento semanal.	83
Tabla 23.- Energía demandada por las cargas de los ambientes de funcionamiento semanal.	84
Tabla 24.- Demanda energética, diaria y semanal, para cada día de la semana.	85

Tabla 25.- Potencia promedio y potencia máxima para cada día de la semana.	90
Tabla 26.- Demanda Energética Anual.	91
Tabla 27.- Valores de la función gamma respecto al parámetro k.....	93
Tabla 28.- Valores de los parámetros estadísticos de todos los meses.	94
Tabla 29.- Cantidad de horas por mes para un año estándar de 8760 horas..	95
Tabla 30.- Porcentaje de incidencia del viento a lo largo del año para un determinado valor de velocidad.	95
Tabla 31.- Horas al mes para un determinado valor de velocidad a lo largo del año.....	95
Tabla 32.- Promedios mensuales de irradiancia y radiación global en el plano horizontal al día en la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.....	96
Tabla 33.- Radiación global diaria promedio para una inclinación óptima de 9°.	97
Tabla 34.- Número de horas efectivas al día de radiación estándar, por meses.	98
Tabla 35.- Distribución de cargas para cada sistema híbrido.	100
Tabla 36.- Demanda promedio diaria, por grupos y total.	100
Tabla 37.- Demanda energética mensual, por grupos.	101
Tabla 38.- Número de paneles solares requeridos por cada modelo para cubrir la demanda energética anual, para el Grupo 1.....	104
Tabla 39.- Primera combinación y datos generales de los equipos que la conforman.	105
Tabla 40.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan-2500 con equipos de conexión a red.	105
Tabla 41.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Era Solar ESPMC 270 con equipos de conexión a red.	105
Tabla 42.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la primera combinación.....	106
Tabla 43.- Segunda combinación y datos generales de los equipos que la conforman.	108
Tabla 44.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan-2500 con equipos de conexión a red.	108

Tabla 45.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Canadian Solar CS6U-330P con equipos de conexión a red.....	108
Tabla 46.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la segunda combinación.	109
Tabla 47.- Tercera combinación y datos generales de los equipos que la conforman.	110
Tabla 48.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan-3000 con equipos de conexión a red.	110
Tabla 49.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Era Solar ESPMC 270 con equipos de conexión a red.	111
Tabla 50.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la tercera combinación.....	111
Tabla 51.- Cuarta combinación y datos generales de los equipos que la conforman.	113
Tabla 52.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Era Solar ESPMC 270 con equipos de conexión a red.	113
Tabla 53.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la cuarta combinación.	113
Tabla 54.- Quinta combinación y datos generales de los equipos que la conforman.....	115
Tabla 55.- Detalles de compatibilidad entre los paneles Canadian Solar CS6U-330P con equipos de conexión a red.	115
Tabla 56.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la quinta combinación.	115
Tabla 57.- Sexta combinación y datos generales de los equipos que la conforman.	117
Tabla 58.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan 2500 con equipos de conexión a red.	117
Tabla 59.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la sexta combinación.	117
Tabla 60.- Cuadro comparativo de las características principales de cada combinación.....	119
Tabla 61.- Resultados de los sistemas híbridos seleccionados.	120
Tabla 62.- Descripción de las líneas eléctricas del diagrma unifilar.	125

Tabla 63.- Descripción de los componentes del sistema.	125
Tabla 64.- Presupuesto de los equipos principales del sistema híbrido.	127
Tabla 65.- Presupuesto de conductores para corriente continua y alterna.	127
Tabla 66.- Presupuesto del sistema de puesta a tierra.	128
Tabla 67.- Presupuesto de tableros de entrada y salida del inversor.	128
Tabla 68.- Presupuesto del tablero de protección y medida.	129
Tabla 69.- Presupuesto general del sistema eléctrico.	129
Tabla 70.- Presupuesto de las estructuras de soporte de equipos.	129
Tabla 71.- Presupuesto de transporte, instalación y mano de obra.	129
Tabla 72.- Presupuesto total de los sistemas híbridos conectados a red.	130
Tabla 73.- Vida útil de los principales equipos del sistema híbrido.	134
Tabla 74.- Depreciación de los principales equipos del sistema híbrido.	137
Tabla 75.- Análisis económico del proyecto, bajo la primera representación de ingresos.	138
Tabla 76.- Análisis económico del proyecto, bajo la segunda representación de ingresos.	139
Tabla 77.- Indicadores financieros para ambos análisis económicos.	140

Introducción

En el caso de sistemas híbridos, de baja potencia e interconectados a la red eléctrica, el estudio es incipiente en el Perú debido al bajo costo de la energía eléctrica convencional y la falta de información sobre el uso y beneficios de las energías renovables. Parte de la información utilizada en esta tesis ha sido desarrollada en países europeos, norteamericanos y recientemente, con un gran dinamismo, en países asiáticos como China.

En el primer capítulo se explica la realidad problemática y situación actual de la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Se formulan el problema, la hipótesis, la delimitación y justificación del problema. Seguidamente se describen las limitaciones de la investigación así como sus respectivos objetivos. El segundo capítulo detalla los antecedentes, el concepto de sistema híbrido, sus diferentes tipos y configuraciones existentes. Se explican los aspectos generales a tener en cuenta para la instalación de un sistema híbrido de baja potencia conectado a red. Del mismo modo se hace un análisis para identificar las barreras y limitaciones de estos sistemas.

En el tercer capítulo se explica el marco metodológico, empezando por mencionar el tipo y diseño de investigación empleado, continuando con la población y muestra seleccionada, para de esta manera describir la hipótesis. Dentro del mismo capítulo se detalla la operacionalización de las variables descritas para este proyecto, los métodos y técnicas de investigación, y la utilización de los instrumentos empleados para ello.

En el cuarto capítulo se describe la propuesta de investigación, así también el montaje de los equipos que conforman el mismo. Adjunto a lo anterior se describe un plan de acción para reducir a mediano plazo las barreras y limitaciones que presenta una instalación como la propuesta en esta tesis.

En el quinto capítulo, mediante la evaluación (métodos estadísticos) de los recursos presentes y utilizando la data meteorológica seleccionada, se desarrolla una estimación del potencial energético presente en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Seguidamente se preseleccionan algunos equipos presentes, tanto en el mercado nacional como internacional, con el fin de comparar su capacidad de generación. A continuación, para la dimensión del sistema híbrido, se analizan diferentes combinaciones a partir de las

especificaciones técnicas de los equipos preseleccionados. Luego se selecciona la combinación que demuestre la mejor compatibilidad y arroje las mejores prestaciones. Del mismo modo se diseña y dimensiona el sistema de puesta a tierra, cableado y protecciones del sistema eléctrico.

Para el capítulo seis, en base a lo analizado, se obtiene el presupuesto general inicialmente requerido para la adquisición e instalación del proyecto. Posterior a ello se realiza un análisis económico, que permitirá evaluar la rentabilidad del proyecto y determinar qué pautas y medidas deben existir para garantizar la viabilidad económica del sistema híbrido.

En la parte final se describen las conclusiones como resultado de la investigación y se precisan algunas recomendaciones para proyectos futuros que tomen como base lo desarrollado en esta tesis.

CAPÍTULO I: PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad Problemática

El crecimiento del consumo de energía eléctrica en el mundo ha dado paso al uso desmesurado de combustibles fósiles en la generación de energía. Tanto es así que el creciente uso de recursos térmicos como el carbón y el gas natural ha sido vertiginoso, sobre todo si es comparado con la producción energética proveniente de recursos hídricos.

El incremento de los costos en las tarifas del suministro eléctrico ha sido algunas de las consecuencias que ha traído consigo y que hoy en día forman parte de una realidad problemática global.

1.1.1. Internacional

- Estados Unidos se afianza como el principal productor y consumidor de gas natural en el mundo. Para el año 2015 sus principales fuentes para la producción de energía eléctrica son: el carbón, generando el 34% de electricidad a través de 511 plantas eléctricas, y el gas natural, que ha generado el 30% de electricidad con 1740 plantas eléctricas.¹
- En España el suministro de energía eléctrica desde la red pública viene convirtiéndose en una segunda opción para las viviendas y algunos pequeños negocios, esto desde que se acabó advirtiendo de la posible subida del costo de la energía eléctrica, produciéndose el famoso “Grid Parity”. En términos generales, el 2018 supuso un encarecimiento del 10% en las facturas eléctricas de los hogares españoles, según un informe de la organización de consumidores Facua², que ha calculado el comportamiento de la factura de electricidad por una familia media española, esto se traduce en un incremento que ha oscilado entre los 70 y los 80€ por familia.

¹ Fuente: <http://www.sectorelectricidad.com/15515/mapa-de-fuentes-de-generacion-electrica-en-usa/>

² Fuente: Memoria 2017 Facua: Consumidores en acción. Organización española sin fines de lucro dedicada a la defensa de los derechos de los consumidores.

1.1.2. Nacional

- Con el descubrimiento del gas de Camisea, y su transporte hasta la costa, la generación térmica con gas natural cubre el 34,1% de la demanda de potencia eléctrica nacional.³ En pocos años esta fuente de energía se ha convertido en una de las principales del país, no sólo para la generación de electricidad sino también para el transporte y la industria en general.
- No se puede pasar desapercibidas las pérdidas ocasionadas en la transmisión (efecto joule) desde las grandes centrales generadoras hasta los puntos de consumo. Estas pérdidas representan hasta el 6% de la energía generada y es principalmente debido a ellas que el costo de la energía para usuarios finales se ve encarecida.⁴

1.1.3. Local

- La Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG) cuenta con un suministro eléctrico procedente de la Red Pública (SEIN), la cual es administrada por la concesionaria Electronorte S.A. (ENSA). En los últimos años la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica ha sufrido un crecimiento en su infraestructura lo que conlleva a un aumento de su potencia instalada, por ejemplo en iluminación, y por ende de su capacidad de consumo eléctrico. Hasta el momento se registran un promedio de 630 luminarias repartidas en los 96 ambientes de la facultad, haciendo un promedio de 33kW de potencia instalada⁵ sólo en iluminación, representado ésta el 35% de la potencia instalada total de la FIME.
- Se puede mencionar además que en la etapa de distribución también hay pérdidas de energía, técnicas y no técnicas (fraude, hurto de energía, errores de lectura de medidores y facturación, etc.), que llegan hasta el 10% y no se puede evitar, dichas pérdidas son pagadas por todos los usuarios en la facturación mensual.⁶

³ Dato obtenido de la referencia [01], pág. 1.

⁴ Dato obtenido de la referencia [02], pág. 2.

⁵ La lista de luminarias registradas por cada ambiente se muestran en la sección 5.1.2.

⁶ Dato obtenido de la referencia [27], pág. 92.

Las pérdidas en transmisión y un creciente consumo de energía eléctrica en usuarios finales no son las principales preocupaciones, otros factores como la situación ambiental actual del planeta hacen que cada vez se busquen nuevas alternativas que sean capaces de mantener la estabilidad de todos los sectores de consumo, y cuanto más urgente, cambiar la política energética nacional.

El Perú, tiene la visión de contar con una matriz energética diversificada con énfasis en generación de energía en base a los Recursos Energéticos Renovables No Convencionales (RER), dado que producen un mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono.

1.2. Situación actual de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

En diferentes puntos de la UNPRG se han instalado módulos solares para recolección de data meteorológica y en la FIME se han creado laboratorios dentro de los cuales uno de ellos ha sido destinado para el entrenamiento en Energías Renovables. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha implementado una instalación como la planteada en este estudio, esto debido a que aún no se cuenta con la aprobación de un reglamento.

Cabe mencionar que dentro de la agenda de proyectos de la FIME está el implementar un sistema fotovoltaico para abastecer la iluminación exterior de la misma, esto con el propósito de impulsar el uso de tecnologías limpias.

1.3. Formulación del Problema

Al describir brevemente la situación actual de la facultad en el acápite anterior, se formula el problema de la siguiente manera:

¿Es posible suministrar con energía eléctrica a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, utilizando energías renovables?

1.4. Delimitación de la investigación

La investigación se desarrolló en los interiores de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, en los ambientes de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, contando con el apoyo del decano, y el personal administrativo/docente, puesto que facilitaron los instrumentos y permitieron el acceso a los diferentes ambientes de la facultad, aulas y laboratorios, para lograr así el desarrollo de la presente investigación. La universidad está ubicada en la calle Juan XXIII 391, teniendo la facultad entrada directa por la Calle Huamachuco y la carretera Lambayeque-Chiclayo.

1.4.1. Características de la zona en Estudio

La zona en estudio presenta las siguientes principales características:

- Cuenta con una estación meteorológica semiprofesional de la cual se pudo obtener datos de la irradiación solar y velocidad del viento, propias del lugar.
- Las fuentes de energía predominantes en el lugar de estudio son la luz solar y el viento, donde la primera tiene mayor presencia.
- Según el atlas eólico del Perú, la velocidad media del viento en esta zona de nuestro litoral es de tipo moderado con medias anuales de 4 a 5 m/s (figura 1), lo cual indica al emplazamiento podría ser un sitio adecuado para la instalación de un aerogenerador.
- Según el atlas solar del Perú, la energía solar promedio anual incidente en la zona de estudio es de un nivel regular – moderado, con medias anuales de 4 a 5.5 kWh/m² (figura 2), lo cual indica al emplazamiento podría ser un sitio adecuado para la instalación de módulos fotovoltaicos.
- La cercanía en la distribución de edificios hacen un buen punto de estudio para la implementación de un proyecto de este tipo, además de servir como herramienta de enseñanza para el alumnado de la facultad, y universidad en general.

La Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo se encuentra en la provincia de Lambayeque en el departamento de Lambayeque, entre los km 779 - 780 de la panamericana Norte, como se aprecia en la figura 3.

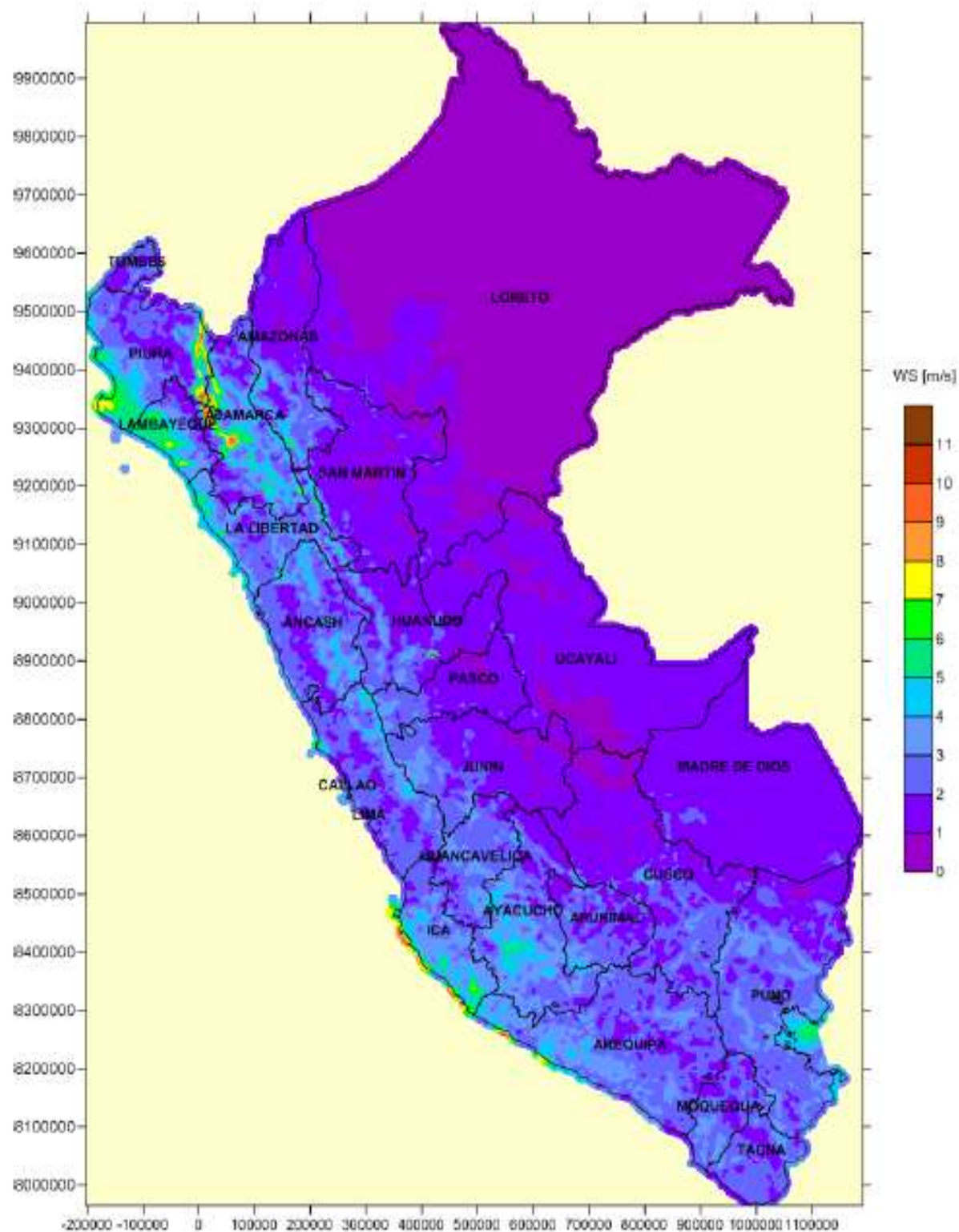


Figura 1.- Distribución de la velocidad media del viento a lo largo del territorio peruano.⁷

⁷ Fuente: Atlas eólico del Perú 2016. OSINERGMIN.

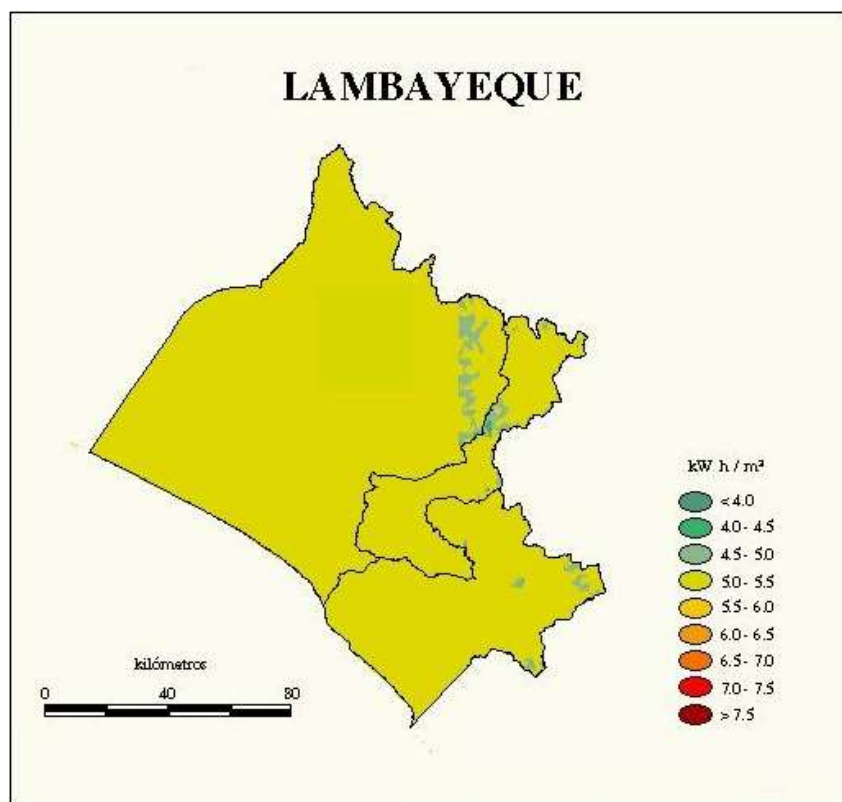


Figura 2.- Energía solar promedio anual incidente en la región Lambayeque.⁸



Figura 3.- Ubicación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UNPRG.⁹

⁸ Fuente: Atlas de Energía Solar del Perú 2003. SENAMHI.

⁹ Fuente: Google Maps.

La ubicación geográfica, donde se realizaría la instalación del sistema híbrido de la FIME, responde a las siguientes coordenadas geográficas:

- Latitud: -6.708625
- Longitud: -79.904295

En coordenadas UTM su equivalente es: 17 M 544829.40, 1128213.63.

La ubicación de la estación meteorológica semiprofesional se encuentra dentro de la delimitación del proyecto (figura 4). Se ha decidido utilizar los datos tomados en el área de la estación meteorológica por encontrarse en un área geográficamente poco accidentada y con edificios bajos alrededor de esta, lo que evita algún tipo de sombra, o cambios bruscos en la velocidad y dirección del viento.

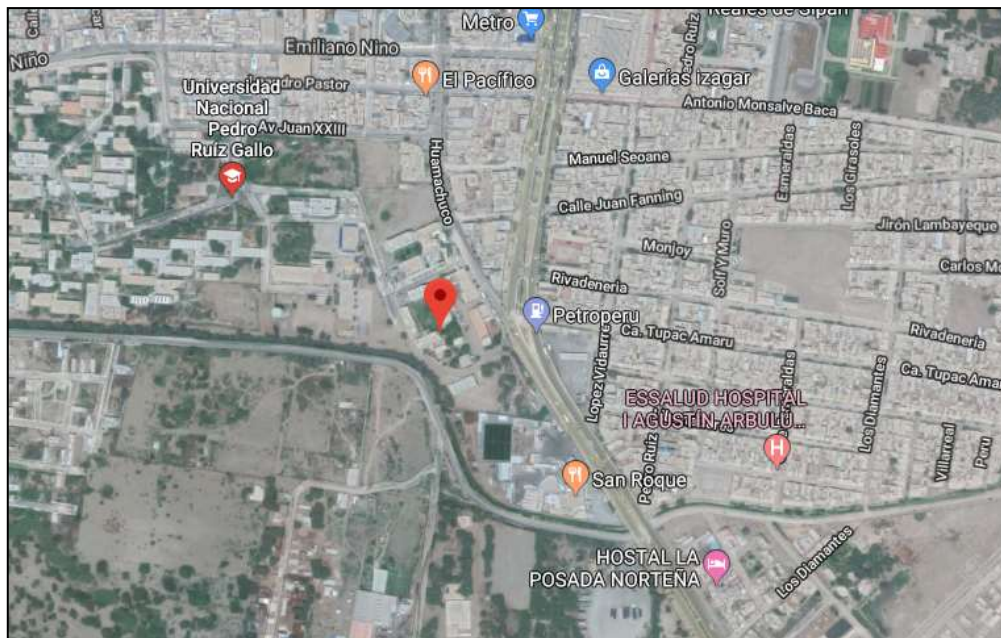


Figura 4.- Ubicación de la estación meteorológica de la FIME - Imagen satelital.¹⁰

En la parte inferior izquierda de la imagen satelital se observa presencia de zonas poco accidentadas, conformada en su mayoría por pampas y zonas de sembrío.

¹⁰ Fuente: Google Earth.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

- Con la realización de esta investigación se pretende lograr que cualquier persona, empresa u organización, pueda realizar un proyecto similar, siendo capaz de consumir su propia energía que produce y reduciendo el monto en su factura de luz; o no sólo eso, sino que a futuro como en otros países, puedan inyectar al sistema los excedentes de energía, pudiendo ganar dinero con ello.
- Este método de generación puede proporcionar décadas de crecimiento para el suministro de energía en usuarios finales, reduciendo de esta forma las pérdidas que se registran en el transporte de energía las grandes centrales generadores hasta los usuarios finales y el impacto ambiental como resultado de la generación con recursos fósiles.
- Con el diseño de un sistema híbrido conectado a red en base sólo a fuentes renovables de energía se mostrará a la población que la combinación de dos fuentes, como el sol y el viento en un mismo sistema, es complementaria sin la necesidad de adicionar un banco de acumulación de energía, o de acoplar un sistema auxiliar, abaratando el costo de la inversión inicial.
- Se hace de conocimiento acerca de la existencia de programas internacionales que financian iniciativas emergentes, capaces de producir energía limpia, volviéndolas económicamente viables. Del mismo modo se da a conocer que gracias a las innovaciones de la tecnología se puede recuperar más del 95% de los materiales empleados,¹¹ esto con el propósito de ser una alternativa realmente menos contaminante.
- Con la aplicación de un proyecto similar en nuestra facultad, sin dejar de mencionar que son las universidades las llamadas a dar el ejemplo, se contribuye a la renovación de nuestra matriz energética.

¹¹ Fuente: http://www.pvcycle.org/pvcycle_document/recycling-of-pv-modules/

1.6. Limitación de la Investigación

Si bien es cierto que este tipo de instalaciones resultan rentables a largo plazo una de las principales limitaciones que tienen es el costo de la inversión inicial ya que este tipo de tecnologías son muy caras aún, además de la falta de normativas que regulen estas instalaciones y fomenten la creación de las mismas, razón por la cual muchos han optado por dar un paso al costado. A diferencia de otros países, como en el caso de España, que invitan a sus ciudadanos, empresarios u organizaciones a instalar un sistema fotovoltaico que les permita satisfacer sus necesidades energéticas.

Para nuestro caso, en la actualidad, se espera la aprobación de normativas que establezcan incentivos y fijen las tarifas correspondientes para este tipo de instalaciones; por otro lado, alrededor del mundo se vienen desarrollando nuevas tecnologías que han permitido la fabricación de equipos más sofisticados, y de mayor eficiencia.

1.7. Objetivos de la Investigación

El presente trabajo de investigación tiene por objetivos los siguientes:

1.7.1. Objetivo General:

- Proponer un sistema de generación híbrido eólico fotovoltaico conectado a red como alternativa de autoconsumo para suministrar con energía eléctrica a la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UNPRG.

1.7.2. Objetivos Específicos:

- Determinar demanda anual de energía eléctrica correspondiente a la iluminación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Evaluar el potencial energético eólico solar disponible dentro del área en el que se encuentra la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

- Calcular y seleccionar los equipos que conforman el sistema híbrido conectado a red, así como la ubicación de los mismos.
- Realizar la evaluación económica del proyecto.

CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

Diversas organizaciones alrededor del mundo, así como instituciones y empresas privadas dentro del país, están siendo conscientes del daño que se está ocasionando a nuestro ecosistema debido a la utilización indiscriminada de los combustibles fósiles y radioactivos. Ante la preocupante situación se han venido planteando nuevos desafíos que permitan dar solución a los problemas y consecuencias que han traído consigo los tradicionales métodos de generación y distribución de la energía eléctrica. Tal es así que según:

JOSUÉ FLORES MONDRAGÓN, JUAN PABLO LAZCANO LÓPEZ (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO - 2015) en su trabajo de tesis para licenciatura, "SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA CASA HABITACIÓN CON TARIFA DAC".

El autor tiene como principal objetivo estructurar un sistema de suministro de energía (eólico fotovoltaico), que cumpla con requisitos básicos de costo inicial bajo, suministro confiable de energía, durabilidad aceptable y que pueda satisfacer la demanda domiciliar básica en zonas urbanas.

Por consiguiente se busca reducir el consumo de la red eléctrica para mantener el subsidio de la tarifa residencial de bajo consumo, tratando de establecer un acoplamiento eficiente entre los sistemas eólico y fotovoltaico.

Al final se verifica la eficiencia y datos en general de los equipos seleccionados según las especificaciones del fabricante.

El estudio da como resultado que la idea de un sistema híbrido eólico fotovoltaico puede ser factible dependiendo de las condiciones climatológicas y en algunos casos es posible que sea la mejor opción, pero no siempre. Por tal motivo, es preciso realizar un estudio riguroso de las condiciones climatológicas para determinar si es viable el sistema híbrido.

JOSEPH JISKRA HÜBNER (GERENTE GENERAL DE BRISOL PERÚ - 2016) en uno de sus proyectos realizados con energías renovables, "SISTEMA

HIBRIDO EÓLICO SOLAR PARA AUTOCONSUMO DEL EDIFICIO DE AULAS DE LA UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO”.

La empresa Recursos Energéticos Renovables instaló 101 paneles solares en la fachada y la terraza del edificio de aulas de la universidad, adicionalmente colocó 2 turbinas eólicas de eje vertical en la parte más alta de esta edificación, además de un banco de baterías que brindan un grado de autonomía ante eventualidades. Los equipos están conectados a la red eléctrica existente mediante equipos inteligentes llamados inversores que aseguran que lo primero que se consuma sea la energía proveniente de las fuentes renovables.

En horas punta se puede generar hasta un 30% de toda la capacidad que requiere el edificio de aulas generales de la universidad. Por ende, se tiene un ahorro de ahorro de energía eléctrica del 30%.

Es el primer edificio híbrido, implementado por la universidad, porque recibe de dos fuentes de energía renovable: eólica y solar adicionalmente de la convencional.

JORGE SERVÁN SÓCOLA (UNIVERSIDAD DE PIURA - 2014) en su trabajo de tesis para optar el grado de Ingeniero Mecánico Eléctrico, “ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE BAJA POTENCIA EÓLICO SOLAR CONECTADO A RED”.

El objetivo principal del trabajo era desarrollar una metodología 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.

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. Determinando como primer paso la demanda energética, y el posterior cálculo del potencial solar y eólico para un dimensionamiento correcto del sistema.

Seleccionados todos los componentes se identificaron los egresos e ingresos anuales del proyecto y se realizó el correspondiente análisis económico para un horizonte de 20 años.

2.2. Sistemas Híbridos

Un sistema híbrido es aquel que combina en una sola instalación varias fuentes energéticas, ya sean renovables (solar fotovoltaica, eólica, mini hidráulica, biomasa, biogás, geotérmica, mareomotriz) o no renovables (nuclear, petróleo, gas natural, carbón), todas estas conectadas a una mini-red de distribución, siendo capaces trabajar en conjunto mediante un sistema de control. Estos pueden o no incluir un banco de baterías para acumular la energía producida.

Dichos sistemas, al ser híbridos, presentan la peculiaridad de proporcionar energía eléctrica de manera continua y en una forma más confiable, haciendo posible su aplicación en viviendas, negocios, instituciones e incluso en caseríos o comunidades enteras.

2.3. Tipos de Sistemas Híbridos

Los sistemas híbridos son capaces de abastecer tanto a zonas que ya cuentan con un servicio eléctrico como a zonas aisladas, donde en las primeras se puede (o no) tener la capacidad de inyectar energía a la red pública.

La asociación o combinación de las fuentes dependerá de los recursos existentes en la zona de estudio, y su conexión a red dependerá de factores como la ubicación de la red eléctrica, el nivel de tensión y la distancia a la misma.

Tabla 1.- Combinaciones de fuentes renovables para sistemas híbridos.¹²

Combinaciones de fuentes de energías
Solar fotovoltaica + Respaldo
Solar fotovoltaica / Eólica + Respaldo (opcional)
Eólica / Minihidráulica
Biomasa / Solar fotovoltaica
Mareomotriz / Eólica
Solar fotovoltaica / Solar térmica

Para casos especiales, es recomendable disponer de algún sistema de generación auxiliar (respaldo) que permita hacer frente a diferentes eventualidades, como la ausencia de alguna fuente a lo largo del día o consumo de las cargas al mismo tiempo, buscando un estado de carga aceptable para

¹² Elaboración propia.

prolongar al máximo su vida útil. Entonces podríamos decir que estas combinaciones de fuentes pueden presentarse de dos formas:

- Sistemas híbridos autónomos (aislados)
- Sistemas híbridos, de conexión a red (autoconsumo)

2.3.1. Sistema Híbrido Autónomo

Los sistemas autónomos, comúnmente llamados sistemas aislados, son precisamente aquellos que operan sin estar conectados a una red de distribución de electricidad, y están dotados estrictamente por un banco de almacenamiento de energía para asegurar su autonomía.

Para garantizar la entrega de energía por un determinado periodo de tiempo, lo que se plantea, en la mayoría de los casos, es la adición de un banco de baterías, con una capacidad de almacenamiento capaz de abastecer la demanda energética cuando las fuentes principales de generación proporcionan una cantidad de energía menor a la requerida.

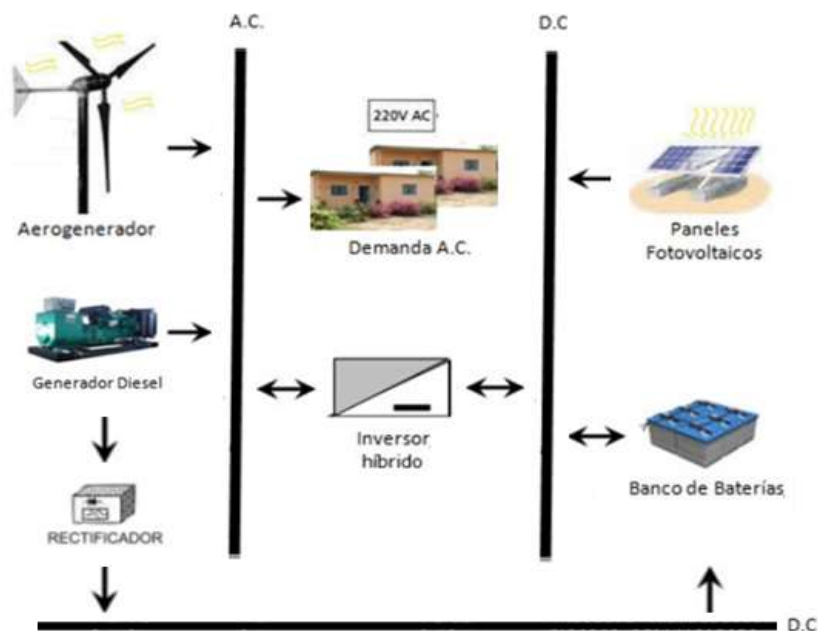


Figura 5.- Diagrama de instalación de un Sistema híbrido autónomo.¹³

¹³ Imagen extraída de la referencia [03], fig. 1.3.

2.3.1.1. Sistema fotovoltaico con grupo electrógeno¹⁴

Este sistema no utiliza exclusivamente fuentes renovables sino que además, para los tiempos en que el sistema fotovoltaico no está produciendo, la mayoría de los sistemas hacen uso de un grupo generador alimentado por un motor que emplea combustibles fósiles, esto le permite generar energía eléctrica en cualquier momento y en cualquier lugar donde se necesite.

La correcta elección del grupo electrógeno será fundamental para lograr el máximo aprovechamiento de la inversión, minimizando problemas y optimizando el gasto. Estos sistemas también suelen sumar a sus filas un banco de baterías, que de ser necesario, el motor puede suministrar la energía faltante y cargarlas. Cabe señalar que añadir un motor hace al sistema más complejo necesitando de un sistema de control para operar en forma automática.

2.3.1.2. Sistema eólico fotovoltaico

Se contempla esta posibilidad, cuando en el lugar de la instalación hay presencia de sol y viento, por lo que es necesario conocer con detalle el potencial eólico y solar de un lugar antes de decidirse por esta opción. Los picos en los que operan los sistemas eólicos y fotovoltaicos ocurren en diferentes etapas del día y del año, donde un sistema híbrido conformado por estas dos fuentes podría ser una opción con alta probabilidad de cubrir todos los requerimientos de energía que un sistema de consumo le pueda demandar.

Para los tiempos en que ni el generador eólico ni el solar estén produciendo, la mayoría de los sistemas híbridos aislados proporcionan energía a través de baterías que han sido cargadas durante la presencia de ambas fuentes.

La compensación entre fuentes energéticas a lo largo del año es la principal ventaja que ofrece un sistema híbrido eólico-solar autónomo, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para el autoconsumo en zonas rurales.

¹⁴ Información elaborada con la referencia [03], sección 1.1.3.3.

2.3.1.3. Sistema eólico – fotovoltaico, con Grupo Electrónico

Este tipo de sistema sigue los lineamientos del sistema anterior con el incremento en paralelo de un grupo de generación de emergencia electrónico con motor de gasolina o diésel el cual, mediante un rectificador/cargador, se conecta a las baterías para poder cargarlas y en casos extremos disponer de esa energía almacenada.

“Los tres dispositivos de generación: los módulos fotovoltaicos, el aerogenerador y el grupo electrónico están conectados en paralelo al regulador de carga, pero adicionalmente el grupo electrónico puede ser conectado a la demanda parcial o total de la carga”¹⁵.

2.3.2. Sistemas Híbridos conectados a red

Hoy en día ya es posible aprovechar la energía de fuentes renovables presentes en localidades que ya cuentan con un servicio eléctrico procedente de una red pública, ya sea reduciendo parcialmente el consumo mensual e inyectando excedentes a la red pública, cubriendo una demanda adicional imprevista, o vendiendo el total de la energía generada a la distribuidora, dándose esto último en países desarrollados.

A diferencia de los sistemas autónomos, este tipo de sistemas conectados a red no son instalados para cubrir una necesidad, sino más bien para mejorar el servicio ya existente y por otras características que se nombran a continuación:

- Se encuentra conectado a la red con la finalidad de abastecer en paralelo a una determinada carga, disminuyendo el monto mensual facturado.
- Para el caso donde se busque sólo inyectar energía a la red pública se logra un aumento en la eficiencia del sistema interconectado, ya que si la energía se genera cerca del punto de consumo, las pérdidas en transmisión disminuyen.
- La corriente alterna generada por el sistema híbrido puede sincronizarse gracias a los diferentes equipos que la conforman. Esto es, en el caso del

¹⁵ Información elaborada con la referencia [03], pág. 5.

Perú, a una tensión estable de 220V en monofásica y 380V en trifásica, y con una frecuencia de 60 Hz.

- Menores costes de servicio, dado que después de la inversión inicial, la facturación mensual se verá reducida por los bajos costos de operación y mantenimiento.
- Este tipo de sistemas brindan una alternativa en la protección del medioambiente, dado que se deja de emitir dióxido de carbono u óxidos de nitrógeno durante el proceso de generación.

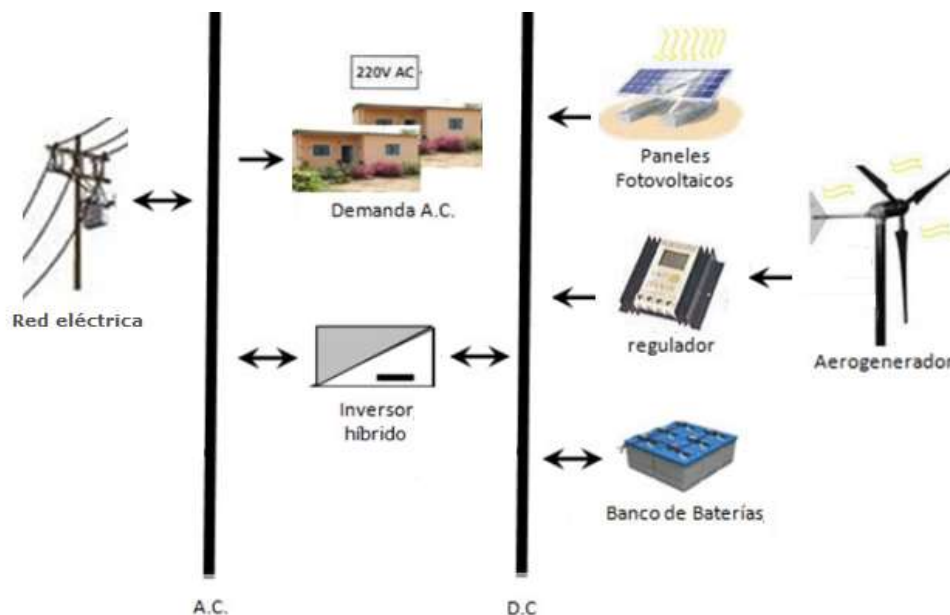


Figura 6.- Esquema de instalación de un sistema híbrido conectado a red.¹⁶

2.3.2.1. Sistemas híbridos conectados a red, con baterías

Teniendo claro el concepto de un sistema híbrido de conexión a red, donde precisamente una de las fuentes es la red pública, se puede considerar adicionar un banco de baterías para casos especiales. En una sección anterior se mencionó que, a diferencia de un sistema autónomo, un sistema conectado a red es aquel que, en lugar de usar un banco de baterías o un grupo electrógeno, utiliza el suministro de energía de la red eléctrica para garantizar la entrega de energía a las cargas. Ahora, cuando se evalúa un proyecto ya sea residencial o comercial, de pequeña o gran escala, siempre es necesario evaluar las cargas a

¹⁶ Esquema elaborado con la fuente: <http://www.esconorte.com.uy/html/documentos/sistemas-hibridos.html/>.

alimentar y qué es lo que se quiere lograr. Un sistema híbrido conectado a red con baterías, es recomendable cuando el potencial energético del lugar es óptimo; cuando se utilizan equipos críticos que no se pueden quedar sin energía a causa de un corte imprevisto del servicio (apagón), o por si se da el caso de que la inyección a red no está permitida quedando el banco de baterías para almacenar los excedentes de energía. En un sistema de estos, la energía generada es transmitida directamente al tablero general, así lo primero que se consume es la producida y sólo cuando ésta no puede cubrir el consumo, se empieza a cubrir lo que falta con la energía proveniente de la “calle”, quedando el banco de baterías como un sistema auxiliar de respaldo ante casos eventuales como ausencia de las fuentes naturales (cambios climatológicos) y los apagones (mantenimiento de redes).

De ser el caso en el que se diseñe un banco de baterías, se debe considerar que el sistema de almacenamiento debe ser lo suficientemente grande para satisfacer las necesidades de energía cuando existan estos periodos sin carga. Por un tema de un alto costo en la inversión inicial estos bancos de almacenamiento con baterías no son los más recomendables cuando se cuenta con energía proveniente de la red, pero existen excepciones donde los sistemas conectados a red sí cuentan con una reserva adicional por baterías, ya sea en grandes negocios, fábricas, o en algún emplazamiento que cuente con necesidades energéticas más rigurosas.

2.3.2.2. Sistemas híbridos de baja potencia conectados a red.

Este tipo de instalaciones al no necesitar de un banco de baterías como respaldo logran un ahorro en el costo de inversión inicial (figura 10), marcando una gran diferencia. Siendo los de baja potencia aquellos que abastecen una pequeña parte (o la totalidad) de la demanda de energía eléctrica de algún domicilio, departamento o pequeño negocio. Por tal motivo, estos sistemas son mucho más sencillos que aquellos destinados para proyectos de generación a mayor escala, lo que significa que el número de componentes en general es menor. Además, en estas pequeñas instalaciones más frecuentes, se emplean tecnologías muy fiables y con un mantenimiento básico.

La principal ventaja de estos es que al ser una instalación sencilla (sin baterías) tiene una mayor probabilidad de ser compatible con la red pública. La principal desventaja que muestran estos sistemas es que en algunos casos se diseñan para funcionar en modo isla, es decir, si la red pública se cae (apagones), se dejaría de recibir la energía generada por las fuentes de energía limpia.

2.4. Configuración de un Sistema Híbrido

Por un tema de fácil instalación, un sistema híbrido se puede dividir en subsistemas tal y como se muestra en la figura 11:

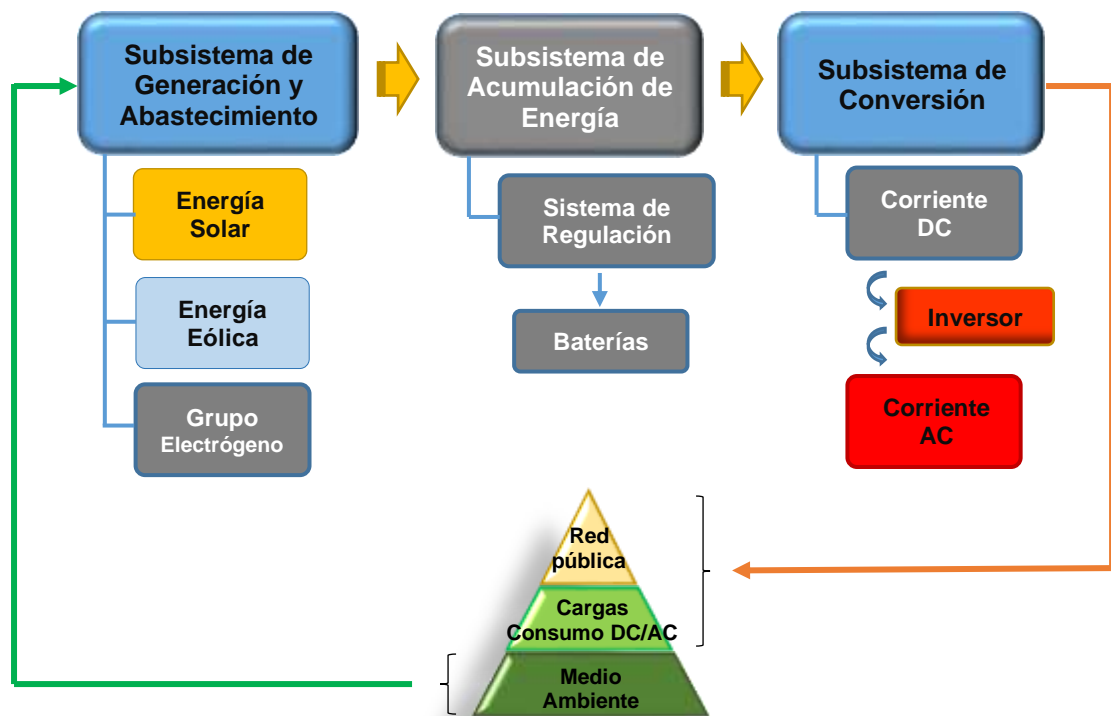


Figura 7.-Diagrama de configuración de un Sistema híbrido conectado a red.¹⁷

2.4.1. Subsistema de generación y abastecimiento de energía

Para un correcto funcionamiento un sistema híbrido debe contar con una serie de equipos y dispositivos seleccionados adecuadamente. Para el caso de un sistema híbrido de conexión a red, los equipos de mayor importancia son los de

¹⁷ Elaboración propia.

la parte de generación y abastecimiento dado que son los que proporcionan la energía al sistema.

Los paneles solares, los aerogeneradores y/o los grupos electrógenos (en algunos casos) forman el bloque de generación y abastecimiento. La selección y el número de componentes para el bloque de generación dependen de varios factores, como son la radiación solar del lugar, la velocidad del viento, el valor energético de la carga, la máxima potencia de salida por cada equipo generador. Gran parte de la energía eléctrica que se genera puede ser consumida por diferentes cargas. Se dice gran parte, porque es imposible utilizar toda la energía generada debido a las pérdidas que ocurren durante el proceso.

2.4.1.1. Generación fotovoltaica¹⁸

La generación solar fotovoltaica se da gracias al sistema de generación eléctrica que se basa en el aprovechamiento de la luz e irradiación emitida por el sol como recurso renovable. Esta parte está conformada por el conjunto de módulos fotovoltaicos comúnmente llamados paneles solares, y se pueden encontrar conectados en serie, en paralelo o de forma mixta.

La producción de energía eléctrica depende, en gran medida, de tres factores: las condiciones climatológicas reales durante el periodo de referencia (un día, un mes, un año); el rendimiento de los módulos fotovoltaicos utilizados en la configuración; y por último la cantidad de insolación que puede ser captada por los módulos fotovoltaicos, que es función, a su vez, de la orientación que puedan tener los módulos con respecto al sol. Debe tomarse en consideración la reducción del efecto de las sombras originadas por las estructuras próximas a los módulos fotovoltaicos al momento de realizar la distribución de los módulos fotovoltaicos que forman parte del segmento de generación. De no considerarse el efecto de las sombras, la generación de energía eléctrica se verá sensiblemente reducida en determinadas horas del día, lo que producirá a su vez un deterioro prematuro de los módulos.

¹⁸ Información elaborada con la referencia [04].

Hoy en día, este último punto se corrige mediante la introducción de unos elementos llamados **diodos de paso** (bypass), que cortocircuitan los módulos sombreados, impidiendo que actúen como carga y se sobrecalienten. Figura 8 Debe resaltarse la diferencia entre los diodos de paso y los diodos de bloqueo, cuyo propósito consiste en evitar, durante las noches o durante los periodos de baja irradiación, que la corriente eléctrica no se dirija desde las baterías hacia los módulos fotovoltaicos, pues esto causarían inevitables consecuencias como: la descarga de las primeras y el posible envejecimiento prematuro de los segundos. Determinados fabricantes pueden incluir alguno de estos diodos integrados en sus módulos fotovoltaicos.

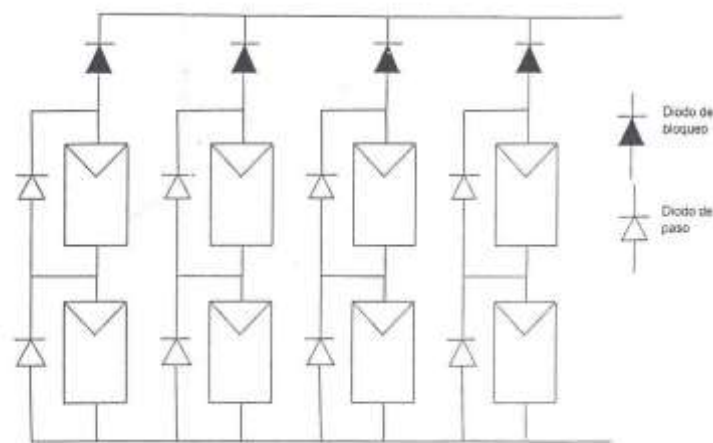


Figura 8.- Conexión de 8 módulos fotovoltaicos (2Sx4P) mostrando los diodos de protección.¹⁹

2.4.1.2. Generación eólica

La energía eólica tiene su origen en el sol, ya que éste es responsable de que se produzca el viento. La radiación solar es absorbida por la atmósfera de la tierra de forma irregular debido a diversos factores: nubosidad, orografía, océanos, originando que el aire se caliente, dilate y ascienda para las zonas de mayor impacto solar; mientras que el aire que se enfría, se comprime y desciende para las zonas de menor impacto. El aire frío desciende sometido a alta presión, mientras que el aire caliente asciende sometido a baja presión. Esta

¹⁹ Imagen extraída de la referencia [04].

diferencia de presiones hace que el aire tienda a desplazarse desde las zonas de alta presión a las zonas de baja presión, llamándose a este movimiento, viento. Cabe mencionar que una pequeña porción del flujo total solar²⁰ (aproximadamente 1% o 10^{15} vatios) se convierte en movimiento atmosférico o viento. Este viento es aprovechado por los aerogeneradores mediante sus palas convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual acciona un generador que produce energía eléctrica. Hoy en día los álabes o “palas” de un aerogenerador han adquirido un diseño aerodinámico (figura 9) que les permite extraer la mayor cantidad de energía del viento.

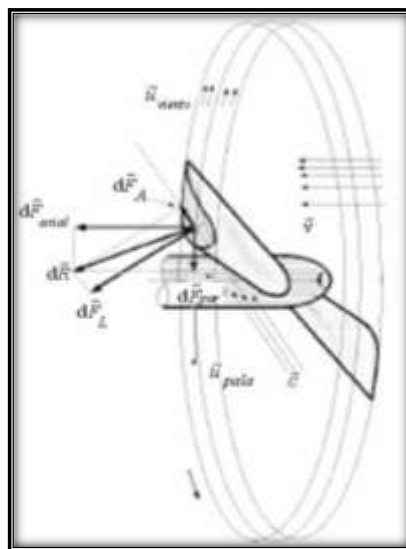


Figura 9.- Fuerzas que actúan sobre una sección de pala en movimiento.²¹

2.4.1.3. Grupo Electrónico²²

Un grupo electrógeno es el conjunto formado por un generador eléctrico, encargado de producir electricidad, y un motor de combustión interna que mueve al generador.

El motor de combustión interna es una máquina térmica que tiene por objeto transformar la energía química de un combustible en energía mecánica. La energía química puede provenir de diferentes fuentes primarias como la gasolina o el diésel.

²⁰ Información elaborada con la referencia [05].

²¹ Imagen extraída de la referencia [06].

²² Información elaborada con la referencia [07].

El alternador es una máquina capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Al girar una espira cuyos extremos están unidos a dos anillos, bajo la influencia de un campo magnético uniforme Norte – Sur, se induce una fuerza electromotriz (*fem*) alterna, cuya polaridad depende del sentido del campo y su valor del flujo que lo atraviesa.

2.4.2. Subsistema de acumulación de energía

Es la parte del sistema donde se almacena la energía para ser utilizada en un momento determinado, mostrándose como respaldo con el objeto de disponer de ella en los períodos de viento flojo, de baja radiación, o cortes de la red pública (imprevistos o por mantenimiento). Para el presente proyecto no se ha considerado contar con un sistema de acumulación pero se hace mención con fines de conocimiento.

Un bloque de acumulación puede estar conformado por tres componentes: el banco de baterías, el controlador de carga y el fusible de protección.

2.4.3. Subsistema de Conversión

Además de los equipos generadores, existen otros componentes sin los cuales el sistema no podría funcionar y menos aún conectarse a la carga de consumo, entre estos destacan los inversores de corriente.

“El bloque denominado carga representa los circuitos de entrada hacia la vivienda, edificio o negocio. La caja de fusibles permite la separación del área de consumo. Esto facilita la desconexión de una sección en caso de necesitarse reparar o ampliar esa parte del circuito”²³. Esta opción es muy ventajosa cuando esa sección sufre un cortocircuito, ya que podría contarse con energía eléctrica en otra sección del edificio. Otra ventaja es que la corriente de cortocircuito de un sector es siempre menor que la del total de la carga. Esta división de la corriente de carga, como veremos al abordar los detalles de diseño, abarata el costo de la instalación.”

²³ Información elaborada con la referencia [08].

En el bloque de generación la corriente generada y suministrada por los equipos es continua, y aunque hoy en día existe un mercado especializado en aparatos que funcionan en CC a 12 y 24 V, para este estudio, se hace recomendable el plantearse la implementación de un **inversor** que transforma la corriente continua en alterna a 220V y 60 Hz, que son las características de la corriente suministrada por la compañía eléctrica.

2.4.4. Subsistema de control, monitoreo y registro²⁴

Es recomendable instalar un sistema de control parcialmente redundante con sensores de radiación solar, velocidad de viento, de temperaturas, precipitaciones y otros, que permita realizar pronósticos más acertados.

Para la monitorización de los datos propios del sistema híbrido es recomendable la incorporación, en forma permanente, de una data logger que arroje valores de voltaje, corriente, potencia de entrada y salida. Existen equipos inversores que cuentan con plataformas virtuales vía wifi que permiten visualizar estos valores en tiempo real. Estas lecturas facilitarán la evaluación rápida y dinámica del funcionamiento del mismo.

De no tenerse un componente dedicado a monitorear el estado de carga de los equipos, la ejecución de un plan de mantenimiento constituye el mecanismo que permitiría extender al máximo la vida útil de cada componente.

2.5. Componentes de un Sistema Híbrido

Un sistema híbrido está compuesto por una serie de equipos y dispositivos que permiten su correcto funcionamiento. Como se ha mencionado antes, los equipos de mayor importancia son aquellos equipos generadores, dado que proporcionarán la energía al sistema, pero además existen otros dispositivos sin los cuales el sistema no podría funcionar, y menos aún, conectarse a la carga de consumo y red eléctrica.

²⁴ Información elaborada con la referencia [08].

2.5.1. Aerogeneradores

“Los aerogeneradores o turbinas de viento como también se les conocen, son máquinas que se encargan de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Su principio de funcionamiento se basa en aprovechar el flujo del viento para hacer girar las palas del rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica”.²⁵

Los componentes o partes principales que conforman a un aerogenerador, se detallan en la figura 10, puede darse el caso que algún equipo no necesite alguno de estos componentes, y esto dependerá del tipo y nivel de potencia de cada modelo de aerogenerador.

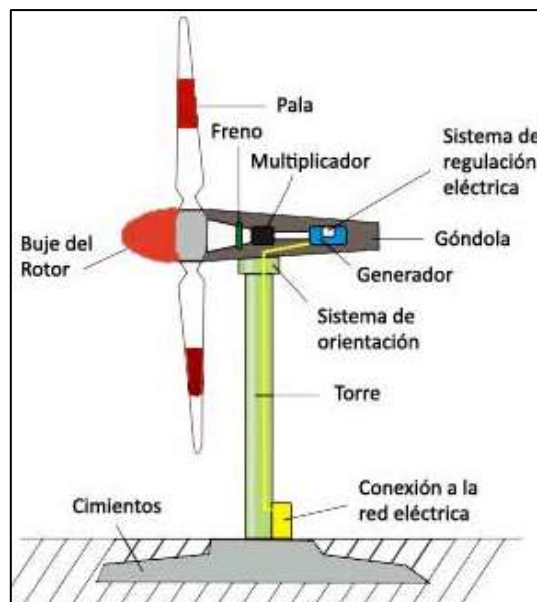


Figura 10.- Partes principales de un aerogenerador de eje horizontal.²⁶

2.5.1.1. Clasificación de los Aerogeneradores

Existen aerogeneradores de distintos tipos y modelos, clasificados como se muestran en la tabla 2:

²⁵ Definición elaborada en base a la información de: <http://www.aerogeneradores.com/>

²⁶ Fuente: <http://www.antusolar.cl/energia-eolica/>

Tabla 2.- Clasificación y tipos de aerogeneradores.²⁷

Según su eje	Aerog. de eje vertical
	Aerog. de eje horizontal
Según el número de palas	Aerog. Multipala
	Aerog. rápidos
Según el rotor	Aerog. de barlovento
	Aerog. de sotavento
Según su potencia	Microaerogeneradores
	Pequeños aerogeneradores
	Grandes aerogeneradores
	Aerogeneradores multimegavat

2.5.1.2. Parámetros característicos del aerogenerador

- **Velocidad de arranque:** Es la velocidad del viento para la cual el generador comienza a suministrar potencia útil. En aerogeneradores rápidos tripala de eje horizontal acostumbra a ser del orden de unos 4 a 5 m/s. Por debajo de estos umbrales, el generador no produce potencia eléctrica.
- **Velocidad nominal:** Es la velocidad del viento para la que se alcanza la potencia nominal del aerogenerador. En rotores tripala de eje horizontal suele estar comprendida entre 12 y 15 m/s.
- **Velocidad de parada:** Es la velocidad del viento a la cual el rotor se detiene por la acción de los sistemas de regulación y control, para evitar el riesgo de sufrir algún daño dada la elevada velocidad del viento. En rotores tripala, esta velocidad se sitúa en el rango de 25 a 30 m/s.
- **Velocidad de supervivencia:** Es la velocidad del viento por encima de la cual el aerogenerador puede dañarse a pesar de estar parado. Acostumbra a situarse en el entorno de los 70 m/s.

2.5.1.3. Modelos presentes en el mercado nacional e internacional

Debido a la poca fomentación del uso de la energía eólica, dentro del país, no existen productores nacionales de aerogeneradores de una potencia mayor a 1 kW, existen sólo algunos proveedores oficiales de determinadas marcas.

²⁷ Elaboración propia.

A nivel internacional se pueden encontrar productores de aerogeneradores en distintos países, usualmente cada productor desarrolla sus equipos dentro de una gamma de potencias, para el presente estudio se ha recopilado información de productores de aerogeneradores de micro y mini potencia²⁸, de países como España, China, Argentina, Dinamarca, y otros.

Tabla 3.- Proveedores nacionales e internacionales de aerogeneradores.²⁹

Nacionales	Internacionales
Yueging Zonhan Windpower Co. (Proveedor nacional: Proviento SAC)	preVent GmbH
Urban Green Energy (BRISOL)	Bornay
	Aeolos
	Southwest Wind Power

Las especificaciones técnicas y los precios de los diferentes modelos de aerogeneradores se detallan en la sección Anexo F.1.

2.5.1.4. Energía producida y costo de adquisición

La energía que puede ser aprovechada de un aerogenerador se calcula a partir de su curva de potencia y las frecuencias horarias para cada intervalo de la velocidad del viento a lo largo del año. Multiplicando estos dos valores se obtiene la energía producida por cada modelo de aerogenerador seleccionado, como se señala en la ecuación 2.1.

El costo de la energía producida, se calcula dividiendo el precio CIF del aerogenerador, entre el valor de energía calculado con la ecuación 2.1. Igualmente en el Anexo F se detalla la cantidad de energía anual producida y el costo del kWh de cada aerogenerador, clasificado de acuerdo a su modelo y marca.

$$E_w = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x t_i}{1000} \quad (2.1)$$

Donde:

E_w = Energía anual producida por el aerogenerador (kWh)

i = Valor de velocidad del viento (m/s)

²⁸ Se considera como micro aerogeneradores a aquellos con una potencia menor 20kW y como mini aerogeneradores a aquellos con una potencia inferior a 100 kW.

²⁹ Elaboración propia.

P_i = Valor de potencia a la velocidad i según curva del aerogenerador (W)

t_i = Número de horas al año de viento a la velocidad i (h)

2.5.2. Paneles Solares

Son dispositivos compuestos por celdas (células fotovoltaicas), que se encargan de convertir la radiación procedente del sol en energía eléctrica, donde la tensión y la corriente varían con el nivel de radiación, con el nivel de la temperatura y por otros factores meteorológicos.

Cabe resaltar que desde el punto de vista del diseño y dimensionamiento del sistema híbrido en su conjunto, se debe tomar atención sobre el tipo de estructura sobre la cual se apoyarán los módulos fotovoltaicos: fija o móvil, y, si este último fuera el caso, cabe preguntar: ¿Las posiciones son reguladas manualmente o son reguladas automáticamente de forma continua? ¿El seguimiento de la radiación se realiza a un eje o a dos ejes? Las respuestas a estas preguntas se resuelven a lo largo del desarrollo de esta tesis.

- Efecto fotovoltaico

La palabra fotovoltaico(a) está formada por la combinación de dos palabras de origen griego: **foto**, que significa luz, y **voltaico** que significa eléctrico. El nombre resume la acción de estas celdas: transformar, directamente, la energía luminosa en energía eléctrica.

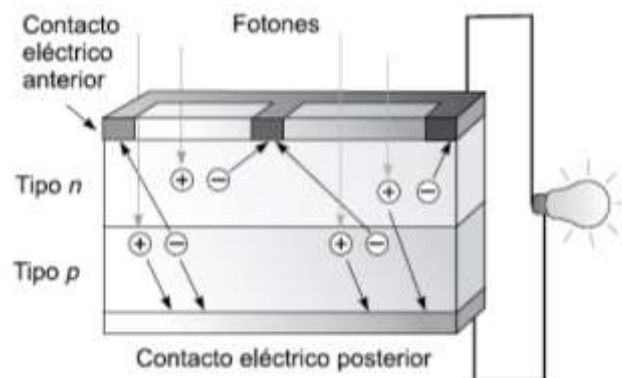


Figura 11.- Efecto fotovoltaico sobre una celda fotovoltaica.³⁰

³⁰ Imagen extraída de la referencia [13] pág. 254, fig. 6.26.

Para tener un conocimiento conceptual del fenómeno fotovoltaico se introducirá el concepto de material semiconductor y junta N-P.

- **Material semiconductor**

Se comenzará estableciendo que un material conductor, como el cobre o el aluminio, permite el fácil paso de una corriente eléctrica porque tiene un gran número de cargas libres dentro del mismo. Un material es un no-conductor (aislador), como el vidrio o el plástico, porque no tiene cargas libres dentro de él. El silicio es el material más usado en la fabricación de células fotovoltaicas. En su forma cristalina pura, es un semiconductor, con muy pocas cargas libres dentro de él. Su resistividad es muy elevada.

Usando un proceso llamado difusión por implantación (o dopaje) se puede introducir pequeñas cantidades de otros elementos químicos, los que permiten decrecer el valor inicial de la resistividad, creando, al mismo tiempo, zonas con diferentes tipos de carga.

- **Junta N-P**

La celda fotovoltaica utiliza dos tipos de materiales semiconductores, el tipo N y el tipo P. El semiconductor P dispone de más huecos libres, o portadores mayoritarios, que de electrones libres, o portadores minoritarios, pero la carga neta del mismo es neutra. Lo contrario sucede con el semiconductor de tipo N, en el que los portadores mayoritarios son los electrones, pero también en conjunto dispone de una carga neutra. Al colocar parte del semiconductor de tipo P junto a otra parte de semiconductor de tipo N, debido a la ley de la difusión los electrones de la zona N, con alta concentración de los mismos, tienden a dirigirse a la zona P, que apenas los tiene, sucediendo lo contrario con los huecos, que tratan de dirigirse de la zona P a la N, propiciando su encuentro y neutralización en la zona de unión. Al encontrarse un electrón con un hueco desaparece el electrón libre, que pasa a ocupar el lugar del hueco, y por lo tanto también desaparece este último, formándose en dicha zona de unión una estructura estable y neutra (sin cargas). La acumulación de estas cargas a ambos lados de

la juntura crea una diferencia de voltaje que impide la continuación del desplazamiento inicial, la corriente de desplazamiento se anula. Se dice entonces, que la juntura N-P ha alcanzado el estado de equilibrio. Figura 12

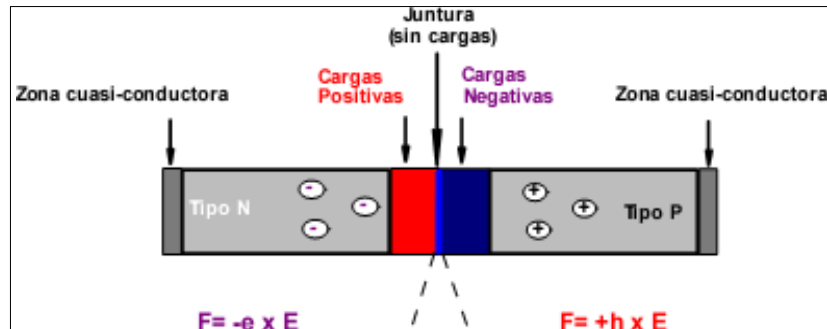


Figura 12.- Junta N-P en equilibrio.³¹

2.5.2.1. Clasificación de los Paneles Solares ³²

Según el tipo de celda:

- Paneles solares monocristalinos:

Formados por un solo cristal de silicio puro, cuentan con una ligera mayor eficiencia que los policristalinos (en el orden de 17 a 18%), sin embargo, su precio es mayor debido al costoso proceso de fabricación. Estos presentan un color oscuro característico.

Es recomendable su implementación en lugares que tienen clima nublado debido a que este tipo de paneles tienden a absorber mejor la radiación en las condiciones climáticas mencionadas.

- Paneles solares policristalinos:

Formados por pequeñas partículas de silicio cristalizado, son los más comerciales por su relación costo-eficiencia. Presentan una eficiencia en el orden de 15 a 16%. Presenta un color azul marino característico.

³¹ Fuente: www.wikiciencia.org/electronica.

³² Fuente: Curso de Paneles Solares. Leaf Energy, 2019.

Es recomendable su implementación en lugares que tienen un clima cálido ya que el efecto de la temperatura sobre este tipo de paneles es menos en comparación de los paneles monocristalinos.

- **Paneles solares amorfos:**

Son los paneles solares menos eficientes, usados generalmente para aplicaciones pequeñas como por ejemplo: calculadoras y relojes.

Según el número de celdas:

- **Paneles solares de 36 celdas:**

Son paneles cuya distribución de celdas es de 4x9. Son implementados principalmente en sistemas autónomos de 12V para aplicaciones rurales o para consumos bajos.

El rango de potencias comerciales de los paneles solares de 36 celdas oscila entre los 40W y 180W.

- **Paneles solares de 60 celdas:**

Son paneles cuya distribución de celdas es de 6x10. Son implementados principalmente en sistemas conectados a red. Para poder ser implementados en sistemas autónomos de 24V o 48V se recomienda utilizar un regulador con seguidor de máxima potencia (MPPT).

El rango de potencias comerciales de los paneles solares de 60 celdas oscila entre los 250W y 280W.

- **Paneles solares de 72 celdas:**

Son paneles cuya distribución de celdas es de 6x12. Son implementados principalmente en sistemas autónomos de 24V o 48V para aplicaciones de mediana potencia. Usualmente se acoplan para obtener un generador solar de mayor capacidad.

El rango de potencias comerciales de los paneles solares de 72 celdas oscila entre los 300W y 350W.

2.5.2.2. Parámetros característicos ³³

Los parámetros característicos de una celda fotovoltaica son los siguientes:

- **Corriente de cortocircuito (I_{sc}):** Es la corriente en la celda cuando sus bornes están cortocircuitados, es decir $V=0$.
- **Tensión de circuito abierto (V_{oc}):** Es la tensión cuando no hay carga conectada, es decir $I=0$ (circuito abierto).
- **Potencia máxima (P_{max}):** Potencia correspondiente al punto de la curva i-v, para esta potencia se obtiene el producto de la corriente óptima (I_{Pmax}) y la tensión óptima (V_{Pmax}). También se llama potencia pico.
- **Tensión nominal (V_{NomPan}):** Tensión para la que está diseñado (tensión nominal DC en donde se conectará el panel).
- **Eficiencia (η):** Es la razón entre la máxima potencia que se puede obtener del módulo fotovoltaico y la radiación incidente sobre la superficie del panel.

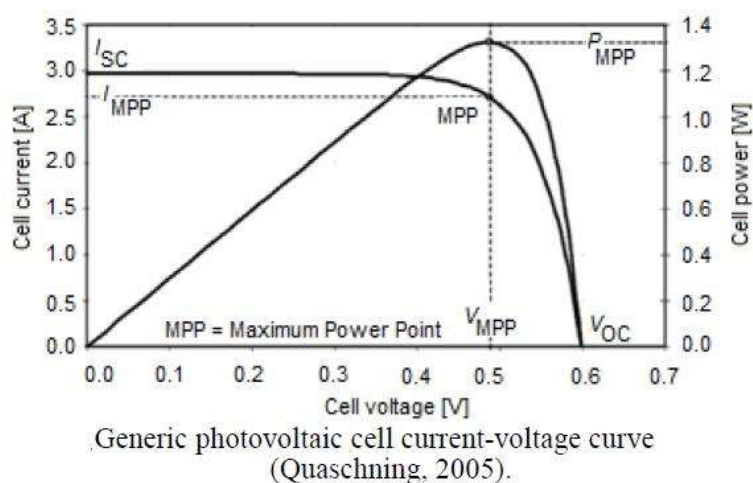


Figura 13.- Parámetros eléctricos de una celda fotovoltaica.³⁴

³³ Información elaborada con la referencia [14].

³⁴ Fuente: <https://jmirez.wordpress.com/2011/03/28/j218-curvas-genericas-de-corriente-y-voltaje-en-celulas-solares/>

2.5.2.3. Conexión de paneles solares

El conexionado de paneles solares se puede dar de 3 maneras:

- **Conexión en serie**

Es el método de conexión más sencillo y consiste en conectar el polo positivo de un panel con el polo negativo del siguiente, con el fin de obtener la suma de las tensiones de cada panel. El valor de la intensidad no varía.

- **Conexión en paralelo**

Consiste en conectar los polos positivos de los paneles a un mismo terminal y los polos negativos de los mismos a otro terminal, con el fin de obtener la suma de las intensidades de cada panel. Además se necesitarán de una serie de componentes adicionales para realizar una conexión estanca y duradera.

- **Conexión mixta**

La conexión mixta en serie-paralelo sirve para incrementar además del voltaje la intensidad, es el tipo de conexión necesario cuando trabajamos en sistemas de 48V con un mínimo de 4 placas de 24V. Este sistema exige que el número total de paneles sea par. Como existen reguladores PWM de 48V, podemos hacer un sistema de este voltaje a base de paneles de 12V y de 24V. Si usamos un regulador MPPT podremos usar cualquier tipo de paneles como también los de 60 células, lo que debe tener en cuenta es no sobrepasar el voltaje máximo admitido por el controlador/inversor de carga.

2.5.2.4. Técnicas de conexionado de paneles solares

- **Conexión estándar en cadena (Daysi chain)**

Cada panel solar se conecta con el siguiente paneles utilizando la conexión serie positivo con negativo. Al llegar al final de la cadena (o string) el último cable

positivo se debe alargar hasta la caja de conexiones. De esta forma, es necesario utilizar al menos 1 metro de cable por cada panel de la cadena para volver a la caja de conexiones. Además, el exceso de cables de cada panel solar debe ser enrollado y fijado a la estructura con bridas o presillas para evitar que cuelguen. Con el consiguiente desaprovechamiento de cable y además posibles problemas por curvas demasiado anguladas que pueden obstruir el paso de corriente y calentamiento de los cables. En la figura 14 podemos ver una conexión estándar de paneles solares en serie utilizando la conexión en cadena.

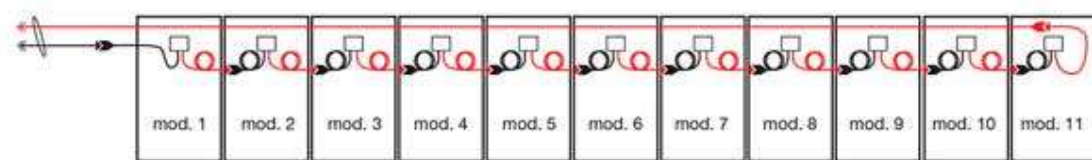


Figura 14.- Conexión estándar de módulos solares en cadena.³⁵

- Conexión con técnica de salto de rana (leapfrog wiring)

En cambio, utilizando el método de la rana (leapfrog wiring), los paneles solares se conectan saltando un panel solar hasta llegar al final de la cadena, posteriormente se vuelve conectando los paneles solares que han quedado libres. La conexión de paneles solares en serie utilizando este método permite ahorrar costes de cableado en las instalaciones solares. En la figura 15 los paneles solares están numerados siguiendo el orden de conexión.

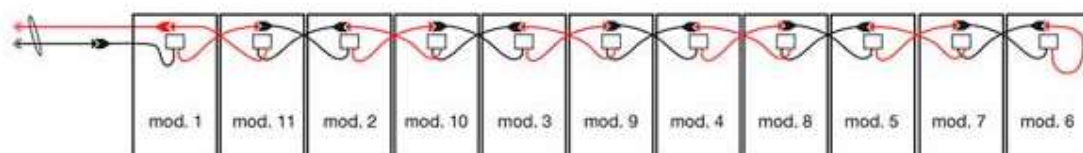


Figura 15.- Conexión de módulos solares con técnicas de salto de rana.³⁶

³⁵ Fuente: <https://www.monsolar.com/blog/conexion-serie-de-paneles-solares-leapfrog-wiring-o-salto-de-la-rana/>

³⁶ Fuente: <https://www.monsolar.com/blog/conexion-serie-de-paneles-solares-leapfrog-wiring-o-salto-de-la-rana/>

En los dos casos, la conexión en cada string es la misma, los paneles solares están todos conectados en serie, lo único que podría cambiar son las posiciones de los paneles solares. De esta forma, en la segunda técnica se utiliza los propios cables de los paneles solares para recorrer la cadena de ida y vuelta y llegar así a la caja de conexiones sin necesidad de alargar ningún cable. Este método, aunque poco conocido y poco frecuente en instalaciones pequeñas, se está empezando a utilizar en todas las grandes plantas solares para abaratar costes de instalación, ya que en una gran planta solar el ahorro es considerable.

2.5.2.5. Factores de pérdida del Panel Fotovoltaico

- Pérdidas por efecto de variación de la temperatura:

“El aumento en la temperatura afecta las características eléctricas de los paneles, ocasionando en un aumento marginal de la corriente que a efectos prácticos se considera casi constante, y en una disminución notablemente más apreciable del valor de la tensión; lo cual ocasiona en una disminución de la potencia entregada por el panel, y por ende una menor eficiencia del mismo.”³⁷
La temperatura de trabajo de una celda solar depende de la temperatura ambiente y del valor de la radiación. Se calcula empleando la ecuación 2.2:³⁸

$$T_c = T_a + G * \frac{TONC-20}{800} \quad (2.2)$$

Donde:

T_c = Temperatura de trabajo de la celda (°C)

T_a = Temperatura ambiente (°C)

$TONC$ = Temperatura de operación nominal de la celda (°C)

G = Valor de radiación estándar (W/m²)

El valor de la temperatura de operación nominal de la célula (TONC) es un parámetro que se obtiene de las especificaciones técnicas de los módulos

³⁷ Concepto desarrollado en base a la información de la referencia [15], pág. 18.

³⁸ Información extraída de la referencia [16], pág. 26, ec.13.

fotovoltaicos, toma valores que van de 43 a 49°C y si no se dispone de él se asume 45°C como un valor razonable. El valor del rendimiento del panel solar por efecto de la variación de la temperatura, se encuentra analíticamente empleando la ecuación:

$$\eta_{PS,T} = \frac{100\% - 0.48\frac{\%}{^{\circ}\text{C}} * (T_c - T_a)}{100\%} \quad (2.3)$$

- **Pérdidas por variación del valor de la potencia nominal³⁹**

Los módulos fotovoltaicos obtenidos de un proceso de fabricación industrial no son todos idénticos, lo que representa una variación del valor de la potencia nominal referida a las condiciones estándar de medida. Generalmente, los fabricantes garantizan que la potencia nominal de un módulo fotovoltaico se encuentra dentro de una banda que oscila entre $P \pm 3\%$ o $P \pm 5\%$. Realmente, suele suceder que la potencia generada se sitúa en la banda inferior de potencias garantizada por el fabricante.

- **Pérdidas en el sistema eléctrico**

Este tipo de pérdidas se origina por la caída de tensión cuando una determinada corriente circula por un conductor de un material y sección determinados, tanto en la parte DC como en la parte AC. Se minimizan dimensionando adecuadamente la sección de los conductores en función de la corriente que circula por ellos.

2.5.2.6. Modelos presentes en el mercado nacional e internacional

La avanzada tecnología que se requiere para la fabricación de las celdas fotovoltaicas conlleva a que su producción se realice fuera del Perú, pero existen varios proveedores que comercializan estos productos a nivel nacional. A nivel internacional hay fabricantes de paneles solares en muchos países alrededor del

³⁹ Concepto elaborado con información de la referencia [17] sección 5.1, pág. 21.

mundo, para el presente estudio se ha recopilado información de distintos fabricantes de países como China, España, Canadá, Colombia, etc.

Tabla 4.- Proveedores de paneles solares en el mercado nacional e internacional.⁴⁰

Nacionales	Internacionales
Eco Green Energy, por Proviento SAC	Victron Energy
Simax, por Proviento SAC	Atersa
Canadian Solar, por Delta Volt	Exiom

Las especificaciones técnicas de los diferentes modelos de paneles solares se detallan en el Anexo F.2.

2.5.2.7. Energía producida y costo de adquisición

La energía incidente a un panel solar se calcula multiplicando el valor de potencia máxima de cada panel, por el número de horas efectivas calculadas. Toda esta energía no puede ser aprovechada debido a las pérdidas internas explicadas en el apartado 2.5.2.5. Para calcular la energía generada que puede ser aprovechada por cada panel se utiliza la ecuación 2.4:

$$E_S = \frac{P_{max} \times NHE \times \eta_T \times \eta_P \times \eta_E}{1000} \quad (2.4)$$

Donde:

- E_S = Energía anual producida por cada panel fotovoltaico
- P_{max} = Potencia pico del panel fotovoltaico
- NHE = Número de horas efectivas al día
- η_T = Rendimiento por efecto de variación de la temperatura
- η_P = Rendimiento por efecto de variación de la potencia nominal
- η_E = Rendimiento del sistema eléctrico

En el Anexo F.2 se detalla la cantidad de energía anual producida, clasificados de acuerdo a su modelo y marca.

⁴⁰ Elaboración propia.

2.5.3. Regulador o controlador de Carga

Los reguladores de voltaje o controladores de carga son dispositivos de protección que proveen al sistema una mayor confiabilidad y seguridad durante su operación. En el caso de un sistema con paneles solares conectado a red sin baterías, el uso de controladores de carga junto a los paneles es innecesario. Para el caso de un sistema híbrido de conexión a red con paneles y aerogeneradores se añadirá un controlador por cada aerogenerador, esto debido a que su función principal es controlar la carga sobre el aerogenerador de modo que optimice la velocidad y no ocurra el caso de que la turbina opere en vacío con el consiguiente peligro de embalamiento del rotor.

Para aquellos casos, donde sea necesaria la implementación de baterías, cualquier función de control para su recarga lo realizará el inversor.

La información de controladores de carga para aerogeneradores de micro y mini potencia conectados a la red es muy escasa, tanto el mercado nacional como internacional. En el presente estudio se cuenta con información de una sola marca de controlador de carga comercializado dentro del mercado nacional (de fabricación China) que posee un amplio margen de voltaje de entrada y salida, así como una alta potencia nominal de funcionamiento, que lo hace ideal para cualquiera de los modelos de aerogeneradores estudiados.

El precio y especificaciones técnicas de este controlador de carga se encuentran detallados en el Anexo F.3.

Tabla 5.- Proveedores de reguladores en el mercado nacional e internacional.⁴¹

Nacionales	Internacionales
Ningbo Ginlong T Co., por Proviento SAC	--

2.5.3.1. Baterías

Dispositivo electroquímico el cual almacena energía en forma química, pudiendo obtenerse de ella energía en forma de electricidad, usando procedimientos electroquímicos reversibles.

⁴¹ Elaboración propia.

En sistemas solares y eólicos (aislados) las baterías tienen que dar la energía sobre un tiempo relativamente largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Estas baterías son relativamente pesadas, debido al plomo, y están compuestas por celdas de 2 voltios nominales que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios (estas últimas para aplicaciones especiales). La figura 16 muestra baterías líquidas para aplicaciones solares y eólicas. El sistema autónomo las baterías son consideradas el talón de Aquiles.



Figura 16.- Conjunto de baterías tubulares OPzS, aptas para aplicaciones solares y eólicas.⁴²

Un banco de baterías representa gran parte de la inversión y a su vez tienen frecuentemente la vida más corta de toda la instalación. Las baterías de tipo ciclo profundo tienen capas de plomo gruesas que además brindan la ventaja de significativamente prolongar su vida con el inconveniente de que estas representan riesgos importantes por ejemplo para la salud y el medio ambiente; por tanto, reducir su frecuencia de cambio contribuye significativamente a disminuir estos peligros.

La vida de las baterías aparte de la edad, se mide en la cantidad de ciclos de carga y descarga que se determinan a cierta profundidad de descarga a una temperatura específica (normalmente a 20 o 25°C). Además ésta es traducida en años, asumiendo un ciclo por día. Aparte de la calidad de fabricación y del tipo, el tiempo de vida útil depende sobretodo de un correcto manejo de las mismas.

⁴² Fuente: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>.

2.5.4. Inversor

Los inversores son aquellos componentes que se encargan de transformar la corriente continua, procedente de los subsistemas de generación o de los componentes de almacenamiento, en corriente alterna bajo los parámetros adecuados de tensión y frecuencia requeridos para alimentar la gran mayoría de cargas o para hacer conexiones a una red pública.

La conversión de CC a CA se lleva a cabo con una eficiencia que oscila entre el 75 y el 91%. Esto significa que las pérdidas varían entre el 9 y el 25% de la potencia suministrada a la entrada. Los valores porcentuales más elevados corresponden a los modelos que manejan un bajo valor de potencia. Esto se debe a que el consumo del circuito del inversor no crece proporcionalmente con el aumento de la potencia que éste puede manejar.

La tensión de salida de un inversor en función del tiempo puede ser representada por una gráfica (**forma de onda**) porque proporciona las características de la onda de salida. Estos inversores son⁴³:

2.5.4.1. Inversores para sistemas autónomos (off-grid)

Son conectados en los bornes del banco de baterías, del cual deben tolerar el rango de variación de su tensión de entrada. En su mayoría se tienen disponibles inversores monofásicos con potencias menores a 6kW.

Según su tipo de onda:

- Inversores de onda senoidal pura

Su onda de salida es exactamente como la onda de la red eléctrica, puede ser utilizada para cualquier tipo de equipos, desde luminarias, hasta motores de baja potencia y equipos sensibles. Presentan una eficiencia aproximada del 90%.

⁴³ Fuente: Curso de Paneles Solares. Leaf Energy, 2019.

- **Inversores de onda senoidal modificada**

Su tipo de onda es parecida a la senoidal pura y principalmente son utilizados para luminarias y equipos eléctricos poco sofisticados. No se deben utilizar para equipos sensibles ni motores pues presentan una eficiencia ligeramente inferior.

- **Inversores de onda cuadrada**

Son inversores artesanales útiles solamente para energizar luminarias siendo no recomendable su uso ya que la onda de salida genera muchos armónicos e interferencias, reduciendo la vida útil de las cargas que se conectan a ellas.

Según su corriente de arranque:

- **Inversores de alta frecuencia**

Se caracterizan por tener una potencia de arranque del doble de su potencia nominal.

- **Inversores de baja frecuencia**

Los inversores de baja frecuencia cuentan con un transformador interno que permite brindar de una potencia de arranque del triple de su potencia nominal. Los inversores de baja frecuencia cuentan con un mayor peso, dimensiones y costo que los inversores de alta frecuencia. Su uso es ideal para el arranque de motores.

2.5.4.2. Inversores para sistemas conectados a red (on-grid)

Son conectados directamente a un generador fotovoltaico y a un aerogenerador a través de un controlador de carga eólico. Estos tienen que soportar el rango de la tensión proporcionada por dichos generadores en todas las condiciones de trabajo. Disponen de seguidor de máxima potencia (MPP) y utilizan como referencia de control la corriente alterna de la red.

“Los tipos de inversores y su conexión dependen, fundamentalmente, de su potencia nominal.”⁴⁴ Para aquellos inversores o suma de inversores cuya potencia nominal sea menor o igual a 5kW, la conexión a red debe ser monofásica, mientras que si excede los 5kW de potencia nominal la conexión deberá ser trifásica con un desequilibrio entre fases inferior a dicho valor. La conexión trifásica puede realizarse con un único inversor o con la conexión en paralelo de tres inversores monofásicos.

Atendiendo a la forma de onda, los inversores en instalaciones conectadas a red deben presentar una onda senoidal pura, debido a que a la salida, la forma de onda debe ser prácticamente idéntica a la de la red eléctrica general.

- **Inversores solares de cadena (string)**

Son inversores que permiten la conexión de varias ramas de módulos fotovoltaicos, cada una con su propio seguidor MPP, aunque disponen de una única etapa inversora. Se fabrican en un rango de potencias de 1kW a 10kW para inversores monofásicos y de 4kW a 50kW para inversores trifásicos.

- **Microinversores**

Son inversores que van directamente instalados en el módulo fotovoltaico, principalmente utilizado para aplicaciones de baja potencia (250W a 500W). Presenta como principal ventaja que en caso de avería de un microinversor no afecta el funcionamiento de los demás Microinversores conectados en paralelo.

- **Inversores híbridos**

“Son inversores inteligentes bidireccionales diseñados para interactuar con la red eléctrica. Si bien es imprescindible estar conectados a la red eléctrica para que funcionen (no necesitan baterías) permiten generar un ahorro de energía mediante la utilización de Paneles Solares y/o Aerogeneradores. El equipo gestiona las diferentes fuentes de energía de manera inteligente, permitiendo

⁴⁴ Fuente: RD 1699/2011 de la norma española.

alimentar los consumos eléctricos desde la energía procedente de las placas solares, generadores eólicos y/o desde la red eléctrica de apoyo alternativamente, optimizando al máximo el aprovechamiento de las energías renovables (solar y/o eólica) y el ahorro de la energía consumida de la red. Además, en el caso de fallo de red eléctrica, muchos de estos inversores pueden trabajar en Isla, aportando la energía desde fuentes renovables directamente al consumo.”⁴⁵

Debido a la poca fomentación en el país de la aplicación de sistemas híbridos conectados a la red, no existe diversidad de productores nacionales de inversores para estas aplicaciones. La información recopilada para el presente estudio ha sido de fabricantes de países como China y USA.

Tabla 6.- Proveedores de inversores on-grid en el mercado nacional e internacional.⁴⁶

Nacionales	Internacionales
Fronius (Proveedor nacional: Auto Solar)	Ningbo Ginlong Technologies Co
InfiniSolar (Proveedor nacional: Auto Solar)	Schneider Electric
SMA (Proveedor nacional: Delta Volt)	

Los precios y especificaciones técnicas de los diferentes modelos de inversores se encuentran detallados en el Anexo F.4.

2.5.5. Medidores de Energía

Los medidores de energía o también conocidos como medidores de facturación, son aquellos dispositivos encargados de cuantificar la cantidad de energía entrante a un sistema de cargas o la cantidad de energía saliente de un sistema de generación. Existe un tipo especial de medidores de energía eléctrica, llamados medidores bidireccionales, que cuantifican tanto la energía que uno adquiere de la red, como la energía excedente inyectada a la misma. La adquisición y colocación de estos dispositivos dependerá del país en el cual se

⁴⁵ Información elaborada con la fuente: <https://www.austro.com.ar/prodrenovable/generadores-eolicos/generadores-eolicos-2-2/>

⁴⁶ Elaboración propia.

está realizando la instalación y del contrato que se tenga con la empresa distribuidora.

Tabla 7.- Proveedores de medidores de energía en el mercado nacional e internacional.⁴⁷

Nacionales	Internacionales
Stronger (Proveedor nacional: Ingesa Norte)	Elster

Los precios y especificaciones técnicas de estos modelos de medidores se encuentran detallados en el Anexo F.5.

2.6. Factores que influyen en un Sistema Híbrido ⁴⁸

Un estudio adecuado de un sistema híbrido se hace mucho mejor por investigación separada de cada uno de los factores. Si esto se hace de una manera exhaustiva, las limitaciones son establecidas. Existen dos factores independientes que son claves en el diseño y operación de sistemas de generación con energías renovables: ***el tiempo y la localización.***

La ubicación, definida como la localización exacta en términos de latitudes, longitudes y altitudes, es naturalmente un punto inicial para cualquier análisis de sistemas con energías renovables. La razón de esto es que conduce directamente la información sobre el clima, sobre los recursos de energía y sobre las necesidades del usuario.

En relación con el lapso de tiempo, existen varios temas relacionados que deben ser considerados, tanto como para términos a corto y largo plazo. Aspectos a largo plazo son claramente ilustrados por el cambio de clima a lo largo de las estaciones, donde la magnitud del cambio depende de la localización. Las necesidades de los usuarios y la disponibilidad de la energía, también podrían ser temporales. Estos efectos, de largo plazo, también influyen en el diseño de los sistemas híbridos.

⁴⁷ Elaboración propia.

⁴⁸ Información elaborada con la referencia [10].

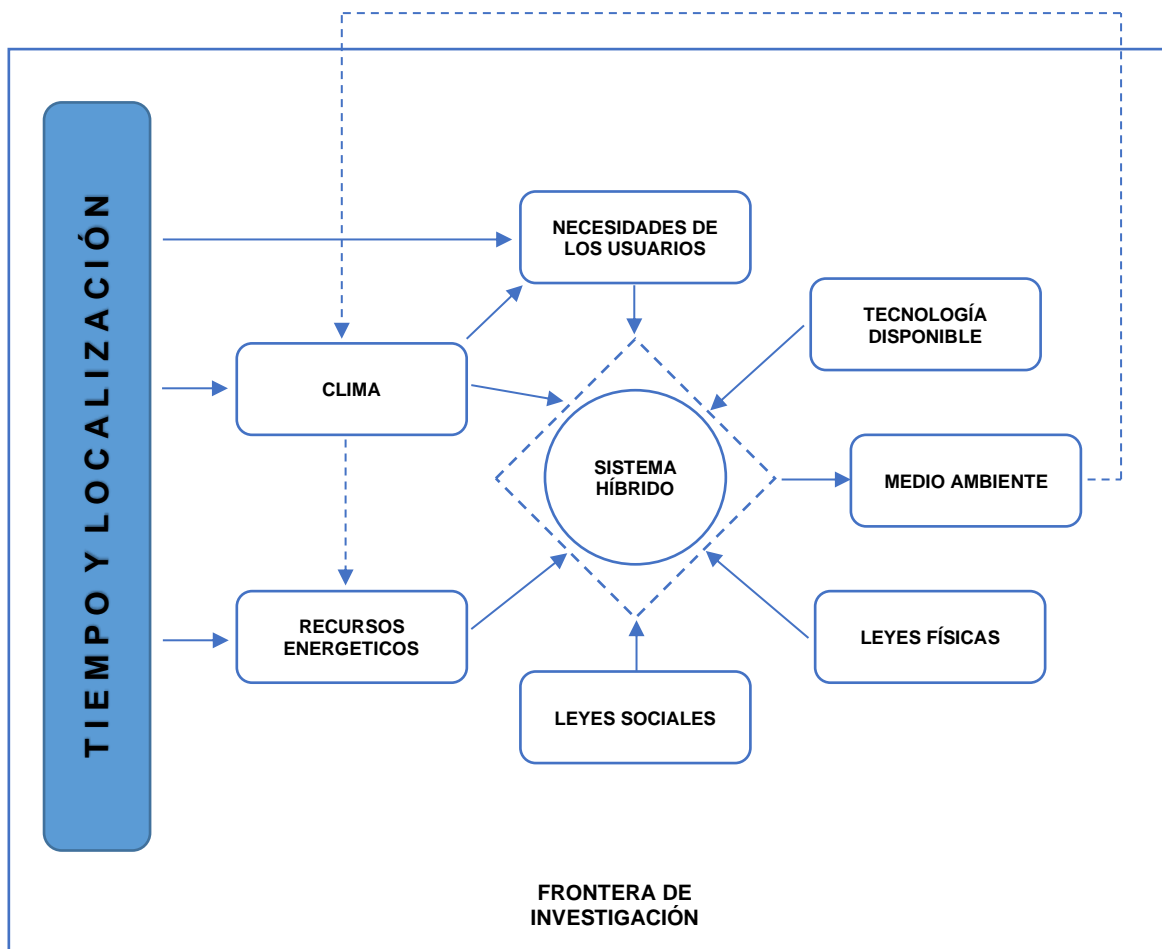


Figura 17.- Diagrama de los principales factores que influyen en un sistema híbrido.⁴⁹

El fundamento o base para la decisión por una u otra configuración y su adherencia o no a la red eléctrica dependerá varios factores. Una visión global de los factores que influyen en un sistema híbrido de generación se muestra en la figura 17. Estos factores son: (1) las necesidades y requerimientos de los usuarios, (2) el clima, (3) los recursos de energía, (4) el medio ambiente (5) las leyes físicas de la naturaleza, (6) las leyes sociales o normativas, y (7) la tecnología actual disponible. Ellos son considerados como procesos externos y por lo tanto, están señalados por los cuadrados con las esquinas redondeadas. El límite en torno al sistema se indica por un cuadrado, mientras que la influencia de los factores en los procesos, o en el propio sistema, se dibujan con líneas que apuntan en la dirección de causa y efecto.

⁴⁹ Diagrama elaborado con información de la referencia [10].

2.6.1. Aspectos del emplazamiento a tener en cuenta

Es muy importante tener en cuenta los aspectos sociales y legales dentro de una delimitación donde se proyecta instalar un sistema híbrido para poder tomar decisiones, esto debido a que algunos factores pueden alterar e incluso poner fin a los planes para la instalación de este tipo de sistemas. En general, las zonas rurales son las menos afectadas por estas cuestiones; por ejemplo, en algunos distritos, áreas o urbanizaciones se restringen estructuras de una determinada altura, aunque frecuentemente es posible que existan excepciones como es la de este caso. Para casos residenciales es posible obtener más información de las restricciones y ordenanzas sobre la planificación urbana de la zona y los requerimientos de edificación, sólo hay que ponerse en contacto con el área de planificación urbana y edificaciones de las municipalidades correspondientes. Estas pueden indicar si se requiere obtener un permiso de construcción e incluso pueden proporcionar una lista de todos los requerimientos.

“Adicionalmente para evitar objeciones públicas imprevistas, especialmente contaminación visual que ocasionaría, es preferible comunicar los planes de la instalación a las autoridades encargadas, pues son quienes podrían objetar una posible obstrucción de su visibilidad o una molestia a causa del ruido. Para el caso de una instalación eólica el nivel de ruido de un mini aerogenerador moderno está entre los 52 y 55 dB (o según fabricante), esto significa que el ruido producido puede ser comparable a un refrigerador en funcionamiento, lo que podría ser menos perjudicial para usuarios residenciales que cuenten con casas de 3 pisos a más”⁵⁰. Esto último beneficiaría a aquellos sistemas que cuenten con generación fotovoltaica puesto que se evitarían sombras aledañas.

En el caso de un sistema conectado a la red, como el que se maneja en el presente estudio, deberá ser responsabilidad de la compañía eléctrica el proporcionar una descripción escrita de los costes, así como los términos y las condiciones relacionados con la conexión. Así también, los requerimientos para la seguridad y los dispositivos de acondicionamiento de la potencia eléctrica, servicios mensuales adicionales, la inspección eléctrica de la instalación y el precio al cual la compañía distribuidora compraría la electricidad inyectada o en todo caso definir concretamente que tipo de acuerdo se va a llevar a cabo en el

⁵⁰ Información elaborada con la referencia [09], pág.3.

trato de la energía importada y exportada. Debido a esto se recomienda tener preparado un diagrama (que incluya planos eléctricos) del sistema de generación proyectado y un plan con los puntos principales del desarrollo del proyecto.

2.6.2. Evolución de los costos

Se ha experimentado muchas variaciones en el costo de las instalaciones tanto eólicas, fotovoltaicas y mixtas; esto desde el inicio de su comercialización en el mercado internacional, con notables reducciones del costo, hasta su comercialización incluso en el mercado nacional. Actualmente se ha situado a las instalaciones fotovoltaicas en rangos promedios de 3 a 5 \$/Wp y a las instalaciones eólicas de 2 a 8 \$/Wp. El costo del sistema depende de la capacidad instalada, cuando más grande sea ésta, menor será el costo; esto quiere decir que este tipo de instalaciones serán adecuadas para usuarios residenciales o comerciales con un consumo regular de energía eléctrica.

De manera más clara, en la tabla 8 se aprecia la relación inversa entre la capacidad instalada y el costo total de la instalación para sistemas fotovoltaicos y eólicos.

Tabla 8.- Costo promedio de instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas.⁵¹

Tipo de instalación	Costo promedio de la instalación [\$/kW]	Desviación estándar del costo de instalación [±\$/kW]
Solar PV <10 kW	4779	820
Solar PV 10 – 100 kW	4425	537
Solar PV 100 – 1000 kW	3671	673
Solar PV 1 – 10 MW	3383	614
Eólica <10 kW	8286	1254
Eólica 10 – 100 kW	6066	887
Eólica 100 – 1000 kW	3567	887
Eólica 1 – 10 MW	2242	417

⁵¹ Fuente: International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable Power Generation Costs in 2014”, January 2015.

2.7. Dimensionamiento del Sistema⁵²

Los criterios utilizados para dimensionar un sistema híbrido autónomo son diferentes a los de un sistema conectado a la red. Para el primero, el criterio que se toma es atender más la confiabilidad del sistema, entendiendo por confiabilidad el asegurar el buen funcionamiento del mismo procurando que los fallos en el sistema sean mínimos, dentro de unos márgenes que se establecen según el tipo de sistema. Para nuestro caso, por el contrario, el criterio que se utiliza en el dimensionamiento de un sistema híbrido de conexión a red no es necesariamente el buscar la menor cantidad de fallos sino la máxima energía generada anualmente. El dimensionamiento para este caso se hará buscando que el rendimiento del sistema sea lo más elevado posible, y que a lo largo de un año permita conseguir la máxima aportación energética. Puesto que está conectado a la red eléctrica, los posibles fallos del sistema no son tan cruciales como en un sistema aislado.

El dimensionamiento de un sistema híbrido de conexión a red se puede realizar mediante numerosos métodos, desde algunos muy complejos que requieran un programa de simulación, hasta otros más simples que pueden realizarse mediante el uso de algunas ecuaciones y hojas de cálculo. En este capítulo se presenta un método que sea comprensible por su sencillez y a la vez que sirva como primera aproximación en el dimensionamiento de un sistema híbrido de conexión a red.

2.7.1. Método Propuesto para el dimensionamiento del Sistema

Como se mencionó en la sección anterior, los criterios que son utilizados para dimensionar un sistema híbrido autónomo son diferentes y en algunos casos contrapuestos a los usados en el dimensionamiento de un sistema de conexión a red.

Para este caso se busca maximizar la eficiencia del sistema al menor costo posible, debido a que el respaldo que proporciona la red a la carga energética,

⁵² Para el desarrollo de esta sección se ha utilizado la información proporcionada por la referencias [03], [04], y [18].

minimiza el impacto ocasionado por los fallos del sistema, los que sí son cruciales en el caso de un sistema autónomo.

El dimensionar un sistema aislado, buscando conseguir la más alta confiabilidad, conlleva a un sobredimensionamiento de la potencia de los equipos que lo conforman, afectando la eficiencia del sistema al producir energía con un alto costo de generación. Dado que el sistema en estudio se encontrará conectado a la red el criterio de selección que se buscará maximizar será el de cubrir la demanda de energía en el mes con menos presencia de las fuentes renovables disponibles.

En el esquema de la figura 18 se explica claramente el método de dimensionamiento de nuestro sistema híbrido, el cual consiste en preseleccionar diferentes modelos de paneles solares y aerogeneradores en función del valor de la energía anual demandada, calculada en el capítulo 5. Se pretende con este método que cualquier usuario pueda comprender el dimensionamiento de tales sistemas.

Con las especificaciones técnicas de los equipos (Anexo F), y los datos del potencial energético del lugar del emplazamiento del proyecto (sección 5.2), se determina la energía que es capaz de producir cada panel fotovoltaico y aerogenerador estudiado en la presente tesis. Con estos valores se procede a realizar diversas combinaciones entre los equipos generadores, verificando que la energía generada por cada combinación sea mayor a la demanda energética del sistema de iluminación estimado.

Se seleccionará la combinación que tenga una mejor relación de compromiso entre el costo de generación de energía, compatibilidad técnica de los equipos seleccionados y ajuste mensual entre la demanda y energía producida, procurando así, satisfacer durante la mayor cantidad de meses del año el consumo de energético, sin llegar a sobredimensionar excesivamente el sistema híbrido.

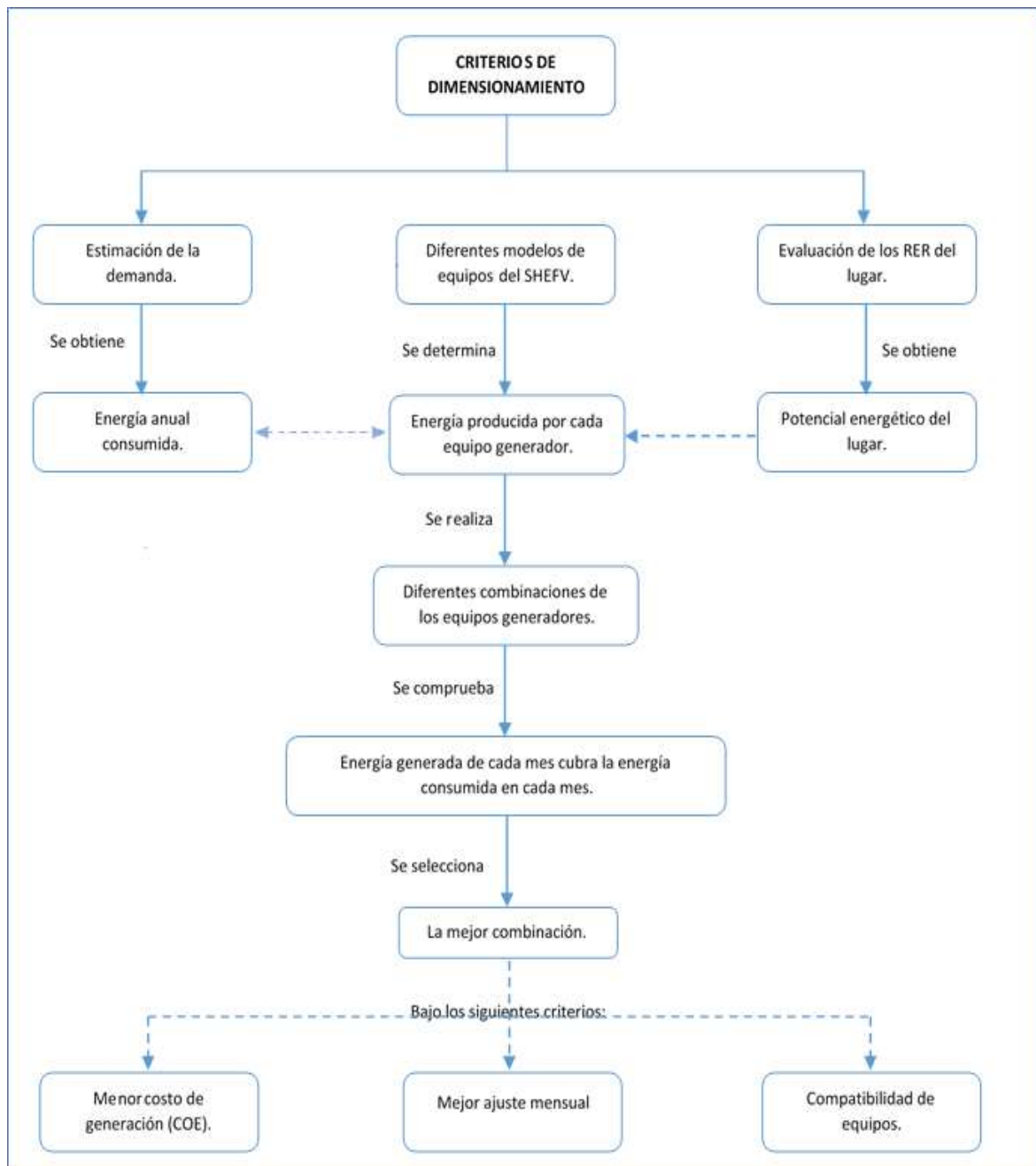


Figura 18.- Metodología de dimensionamiento del sistema híbrido.⁵³

2.7.2. Determinación de la demanda de Energía

Se contemplan dos métodos para determinar la demanda de energía de las cargas asociadas a la iluminación:

⁵³ Elaboración propia.

- El primer método consiste en elaborar una lista de todas las lámparas; posteriormente, con el valor de potencia y el tiempo de utilización definidos, se procede a determinar la energía demandada.
- El segundo método consiste en colocar un sistema de adquisición de datos (equipo de medición) junto al medidor de consumo eléctrico, con la capacidad de almacenar datos sobre mediciones del consumo de energía en un lapso de tiempo (días), con un determinado paso temporal (minutos).

Los edificios que conforman la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica se muestra en la tabla 9.

Tabla 9.- Distribución de edificios por grupos.⁵⁴

Pabellón	Edificio
--	N°1 Oficinas administrativas
--	N°2 Lab. de energía y máquinas térmicas
--	N°3 Lab. de electricidad y máquinas eléctricas
--	N°4 Parque energético
A	N°5 Pabellón de Cómputo
B	N°6 Nuevo pabellón de laboratorios
C	N°7 Pabellón de aulas
D	N°8 Oficina general de Calidad Universitaria
	N°9 Taller de Producción FIME

2.7.3. Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables

El proceso de evaluación de los recursos energéticos eólico y solar, permite obtener la información necesaria para el posterior cálculo de la energía que suministrará el sistema híbrido.

Tanto en Lambayeque como en el norte costero, a lo largo del día y del año se observa una variación en la presencia del viento y luz solar. Por ejemplo a lo largo del año durante el invierno el viento es intenso y la radiación solar es baja, mientras que durante el verano ocurre lo contrario.

La data, que es base para este proceso de evaluación, ha sido proporcionada por la estación semiprofesional de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo ubicado específicamente en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, lugar

⁵⁴ La distribución de los distintos edificios se aprecia a detalle en el Anexo A.

donde se centra el presente estudio. La data brindada por la estación meteorológica en la zona, proporciona información desde enero del 2015 a diciembre de 2015, y algunos meses de los dos años siguientes.

Dado que el dimensionamiento del sistema se obtendrá a partir de una base de datos meteorológicos, se tendrá que optar algún método de optimización para obtener el mejor escenario.

“Existen dos métodos empleados: el primero es el **Método anual del promedio mensual**, que determina la energía de cada fuente a lo largo de un año, y un segundo método es el **Método de los peores meses**, que en lugar de evaluar la entrega anual de energía de cada fuente, evalúa mes a mes el peor escenario para cada fuente energética y a partir de esos datos se optimiza el dimensionamiento del sistema”.⁵⁵

Para efectos de análisis se utilizará una combinación de ambos métodos, evaluando de manera mensual el potencial energético de cada fuente, con la finalidad de abastecer la demanda promedio en cada uno de los meses del año, sin llegar sobredimensionar excesivamente el sistema.

2.7.3.1. Evaluación del Recurso Eólico

El 3% de la energía solar que alcanza la superficie es convertida en energía eólica (3.6×10^{12} kW), y el 35% de esta energía es disipada en una franja de 1 kilómetro sobre la superficie de la tierra (1.2×10^{12} kW). A continuación, y para nuestro caso, se determinará cuánta es la energía eólica aprovechable de acuerdo a las características propias de cada aerogenerador.

2.7.3.1.1. Evaluación de los datos de la velocidad del viento

La información sobre la velocidad de viento se procesa de tal modo que se pueda obtener el número de horas al año de ocurrencia de una determinada velocidad de viento (distribución de frecuencias) y el número de horas acumuladas en el año en que la velocidad del viento es menor a un valor dado (distribución

⁵⁵ También conocidos como “Yearly average monthly method” y “Worst months method” respectivamente. Estos son mencionados en la sección 5.2.1 de la referencia [21].

acumulada). Para esta situación es ideal contar con la mayor cantidad de datos (en el orden de los minutos), y dado que los datos brindados por la estación meteorológica de la facultad son quinceminutales, al momento de calcular la energía que pueda brindar el sistema, se tendrá que dividir cada uno de estos valores entre 4.

El valor de velocidad de viento indicado en realidad corresponde a un intervalo de velocidad, así por ejemplo, para las frecuencias colocadas para una velocidad de 1m/s se consideran las ocurrencias de velocidad de viento mayores a 0,5 m/s y menores a 1,5 m/s. Las velocidades menores a 0,5 m/s no han sido consideradas en el análisis, asimismo el hecho de que hay datos omitidos por deficiencias en el registro de datos.

2.7.3.2. Análisis estadístico y determinación de los parámetros estadísticos

El análisis estadístico se utiliza para estimar el potencial eólico en un determinado lugar, es decir, se usa básicamente para estimar la velocidad del viento a lo largo de un período de tiempo determinado. Para esto, y como ya se explicó en la sección anterior, es necesario conocer mayor cantidad de información que para el recurso solar. Esto debido a que la distribución de la velocidad del viento no es tan predecible como la radiación solar, y posee un factor aleatorio, que hace que el recurso deba describirse mediante una función de distribución.

La función de distribución que mejor se adapta a la variabilidad del viento es “La función de densidad de probabilidad de Weibull”. Esta función requiere el conocimiento de 2 parámetros: el parámetro de forma k y el parámetro de escala c . Ambos parámetros son función de la velocidad media \bar{U} y de la desviación estándar σ_u .

La Función de densidad de probabilidad de Weibull $\rho(U)$ y la función de distribución acumulada $F(U)$, adquieren la siguiente forma:

$$\rho(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2.5)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2.6)$$

Utilizando los datos registrados de viento se traza una línea recta, con los valores de la velocidad U en el eje de las abscisas y los valores de $F(U)$. Tomando función logarítmica en la ecuación anterior:

$$\ln\left[\ln(1 - F(U))^{-1}\right] = k * \ln(U) - k * \ln(c) \quad (2.7)$$

Los valores hallados para $F(U)$ que se detallan en las tablas C.1 a C.12 del Anexo C se utilizan para dar forma a la recta expresada en la ecuación 2.7, de la siguiente forma:

$$Y = k * X + B \quad (2.8)$$

Comparando ambas ecuaciones, se tiene:

$$Y = \ln(\ln[1 - F(U)]^{-1}) \quad (2.9)$$

$$X = \ln(U) \quad (2.10)$$

$$B = -k * \ln(c) \quad (2.11)$$

2.7.3.1. Evaluación del Recurso Solar

Para la evaluación del recurso solar es necesario saber la latitud exacta del lugar de la instalación y es importante definir la terminología asociada a las magnitudes solares. Se conoce como irradiancia a la potencia incidente por unidad de superficie (usualmente en W/m^2), mientras que insolación o irradiación corresponde a la energía incidente por unidad de superficie en un tiempo determinado (usualmente en Wh/m^2 -día).

2.7.3.1.1. Evaluación de los datos de irradiación solar

El promedio mensual de irradiancia y radiación global en el plano horizontal que se tiene al día, se muestran en la tabla 31 para cada mes del año. Posteriormente, con estos datos se evalúa la energía por unidad de área, que serán capaz de entregar los paneles fotovoltaicos a distintas inclinaciones, para de esta manera determinar la inclinación óptima de los paneles. El cálculo del ángulo óptimo de inclinación se explica detalladamente en el Anexo E de la presente tesis.

2.8. Tratamiento de la energía generada y sus excedentes

La energía eléctrica generada por un sistema de fuentes renovables, con conexión a red, puede ser utilizada bajo dos representaciones:

i. Primera representación (Reducción del monto facturado por el consumo de energía eléctrica)

Dentro de esta representación se presentan dos formas de autoconsumo:

- **Autoconsumo sin excedentes.-** Estas instalaciones necesitarán un equipo de inyección cero que garantice que no se vierte nada de energía a la red. Como condición se establece que la potencia instalada será menor a la contratada por el usuario, facturando así el mínimo establecido en la tarifa del contrato del suministro normal. Su tramitación administrativa es mínima.

- **Autoconsumo con excedentes.-** Son aquellas instalaciones que en ciertos momentos van a inyectar sobrantes de energía generada a la red eléctrica, por ejemplo una vivienda en las horas del día con un consumo mínimo, una institución en los días no laborables, o una industria en paradas por mantenimiento. Para esta modalidad distinguimos dos bloques importantes:

Modalidad con excedentes acogidos a compensación: En esta modalidad la empresa distribuidora o comercializadora compensará en nuestra factura

eléctrica la *energía vertida a la red*, otorgando un plazo de algunos meses para ser “reclamada” por el usuario. A esta modalidad, sin duda la más relevante del RD, podrán acogerse usuarios con potencias instaladas inferiores a 100 Kw.

Modalidad con excedentes no acogida a compensación simplificada: Estas instalaciones son aquellas mayores de 100 Kw, cuyos excedentes van a ser volcados a la red pero en régimen de venta, no de compensación. El precio de la energía vertida será el dispuesto por la legislación de instalaciones generadoras de electricidad.

La empresa distribuidora se encarga de registrar la energía sobreproducida. Esta representación es más común en aquellos países donde recién se está comenzando a incentivar el crecimiento de sistemas de generación de energía limpia en usuarios finales, y en los cuales ya existe un conjunto de incentivos promulgados por el gobierno que facilita la amortización del capital inicial de la instalación.

ii. Segunda representación (Venta de energía eléctrica generada)

La energía producida por el sistema es reconocida por la empresa distribuidora de energía eléctrica a un precio determinado, usualmente un tanto menor a su costo de venta de la energía. Esta forma de contrato de compra y venta es común en países donde se lleva muchos años contribuyendo con el desarrollo y crecimiento de microrredes con sistemas de generación de energía limpia, y donde la energía eléctrica suministrada ha adquirido un alto costo con el pasar de los años. El precio de la energía vendida será el dispuesto por la legislación de las grandes generadoras de electricidad.

Dado que el Perú es un país donde aún no existen normativas para pequeños sistemas de generación conectados a red, la primera representación para el tratamiento de los excedentes energéticos es la que mejor se adaptaría.

2.9. Marco legal e institucional

- Decreto de Ley N° 25844 de la LCE

Toda unidad generadora de energía que pretenda ingresar al Mercado Eléctrico Peruano, deberá registrarse bajo la Ley de Concesiones Eléctricas (LCE).

- Decreto de Ley N° 1002 de la LCE

A continuación se mencionarán algunos artículos y modificaciones del decreto legislativo: “Promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables”, que deben tenerse en cuenta:

- El artículo 1° menciona que se tiene por objeto promover el aprovechamiento de los “Recursos Energéticos Renovables” (RER) para mejorar la calidad de vida de la población y proteger el medio ambiente, mediante la promoción de la inversión en la producción de electricidad.
- El artículo 3° del mismo decreto nos define como RER a los recursos energéticos tales como biomasa, eólico, solar, geotérmico y mareomotriz. Energía hidráulica, cuando la capacidad instalada no sobrepase los 20 MW.
- La modificación del artículo 3° menciona que se requiere la concesión definitiva para el desarrollo de la generación de energía eléctrica con RER para una potencia instalada mayor a 500 kW.
- El artículo 10° que trata sobre la investigación sobre energía renovables, menciona que el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas y los Gobiernos Regionales, implementará los mecanismos y acciones correspondientes para el desarrollo de proyectos de investigación sobre energías renovables, promoviendo la participación de universidades, instituciones técnicas y organizaciones de desarrollo especializadas en la materia.

Se aprecia que en el Decreto Ley N°1002 y en otros asociados a éste como lo son el Decreto Supremo N° 009-93-EM (Reglamento de la LCE) y la Ley N°28832

“Ley para asegurar el desarrollo eficiente de la generación eléctrica”, no se hace alusión alguna a sistemas de micro generación menores a 500 kW, por lo que se aprecia un vacío dentro de la promoción e incentivo del uso de los recursos renovables, como fuentes de generación de baja potencia dentro de nuestro país.

- Código Nacional de Electricidad – Utilización

En este se hace mención a sistemas solares conectados a la red:

- En la Sección 350 “Sistemas solares fotovoltaicos”, sólo se mencionan las consideraciones respecto a la instalación y protección de estos sistemas.
- La Sección 430 “Interconexión de fuentes de producción de energía eléctrica” del Código Nacional de Electricidad - Utilización, “Se aplica a la instalación del equipamiento de generación de energía eléctrica de propiedad del usuario (autoprodutor o empresa autorizada) conectado y operado en paralelo con el sistema eléctrico del suministro público de energía eléctrica.”

En la sección antes mencionada, se señala que el requerimiento general para el montaje de la interconexión, debe efectuarse de acuerdo a unos requisitos de los concesionarios de servicio de electricidad. Entre estos requisitos tenemos a los siguientes:

- La empresa distribuidora de electricidad debe ser previamente consultada antes de planificar una interconexión.
- La interconexión no debe afectar la seguridad de la operación del sistema de la empresa suministradora.
- La energía emitida por un generador autoprodutor, cuando se conecte en paralelo con el sistema de la empresa suministradora, no debe afectar en forma adversa la tensión, frecuencia o la forma de onda del sistema al cual se conecta.

El primer requerimiento señalado es el de mayor importancia, puesto que de la respuesta recibida se llevará a cabo el estudio de los demás requisitos.

- Decreto Legislativo N° 1221

Con este decreto el estado busca mejorar la regulación de la distribución de electricidad. Este decreto incluye, en su artículo 2, generación Distribuida:

'Los usuarios del servicio público de electricidad que disponen de equipamiento de generación eléctrica renovable no convencional o de cogeneración, hasta la potencia máxima establecida para cada tecnología, tienen derecho a disponer de ellos para su propio consumo o pueden inyectar sus excedentes al sistema de distribución, sujeto a que no afecte la seguridad operacional del sistema de distribución al cual está conectado.'

Una vez en vigencia, que depende de la publicación del respectivo reglamento, cualquier persona o entidad puede instalar su sistema propio y conectarse a la red pública dentro de los límites a establecer.

2.10. Cambio climático

El incremento de la temperatura media de la superficie de la tierra registrada en los últimos años del siglo XX ha sido de más de 6°C y las estimaciones de su incremento están entre 1.4°C y 5.8°C para el año 2100. Este fenómeno ha provocado una profunda preocupación en la comunidad científica y en los gobiernos de todo el mundo, pues implica no solo un cambio rápido y profundo de las condiciones climáticas, sino que también tendría efectos insospechados sobre la flora y la fauna en nuestro planeta.

El aumento de la temperatura, o calentamiento global, es atribuido al proceso de industrialización experimentado desde hace siglo y medio y está relacionado con el desarrollo de tecnologías que han requerido cada vez más del uso y la combustión de petróleo y sus derivados, de carbón y la tala de bosques, así como con algunos métodos de explotación agrícola. El crecimiento productivo ha traído consigo efectos colaterales como el incremento de los gases de efecto invernadero (figura 19) en nuestra atmósfera, sobre todo de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Estos gases se producen de forma natural en nuestro

planeta y contribuyen directamente a la vida en la Tierra, pues impiden que parte del calor solar traspase la atmósfera y regrese al espacio de tal modo que sin ellos el mundo sería un lugar frío y deshabitado, pero cuando se rompe el equilibrio natural de sus emisiones y estas se incrementan artificialmente la temperatura aumenta y el clima se modifica.

Las consecuencias de este fenómeno pueden ser nefastas. Así, el nivel del mar subió entre 10 y 20 centímetros durante el siglo XX y se espera un aumento de entre 9 y 88 centímetros como consecuencia de la disminución de los glaciares y los casquetes polares; lo cual provocaría inundaciones, desaparición de algunas ciudades, contaminación de las reservas de agua dulce, migraciones masivas, desabastecimiento y disminución de la extensión de tierra y la producción agrícola. El calentamiento global se convierte entonces en un problema producto del desarrollo actual que afecta a todo el mundo y su mitigación depende en especial de la voluntad política de los países desarrollados, pues son ellos los que en gran medida, junto con las potencias emergentes, causan estos problemas.

Bajo el Protocolo de Kyoto, los países entonces miembros, adicionalmente a las políticas y medidas domésticas para la reducción de emisiones, pudieron alcanzar sus metas de reducción de emisiones mediante dos mecanismos internacionales de flexibilidad:

- EL comercio de emisiones
- Transacciones basadas en proyectos (Mecanismo de Desarrollo Limpio).



Figura 19.- Emisiones de GEI.⁵⁶

⁵⁶ Fuente: <http://noticias-ambientales-internacionales.blogspot.com/2015/04/importante-promesa-de-reduccion-de-geis.html>.

2.10.1. Comercio de Emisiones

El comercio de derechos de emisión permite la compra venta de los derechos de emisión creados y asignados entre los países miembros del Anexo I. Esos derechos representan cantidades de emisión que se podrían liberar sin incurrir en una falta con las metas de reducción establecidas por Protocolo de Kyoto. El emitir menos de lo permitido, deja un margen de permisos de emisión (o derechos de emisión) que pueden ser vendidos a otros países que, por varias razones, no lograron emitir menos de lo establecido.

2.10.1.1. Bonos de carbono

Un bono de carbono es un certificado transable que equivale a una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) capturada de la atmósfera; este puede ser adquirido por individuos y empresas interesadas en la reducción de su huella de carbono, ya sea voluntariamente o en cumplimiento de sus compromisos de reducción de emisiones. Los bonos de carbono son un mecanismo de desarrollo limpio creado y desarrollado bajo el Protocolo de Kyoto para mitigar las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en los países desarrollados, y fomentar el desarrollo sostenible y la inclusión social en los países en desarrollo. Este comercio de emisiones se basa en dos puntos principales:

- No importa cuán distantes sean los países en la transacción, el efecto de reducción de CO₂ tiene un efecto global. Por tanto se permiten transacciones entre países muy distantes geográficamente.
- En términos ambientales, no es tan importante si se reducen las emisiones hoy o en unos años. Dado el tiempo de permanencia de los GEI en la atmósfera; el efecto ambiental de evitar las emisiones el día de hoy o en unos años es el mismo, siempre y cuando realmente se evite la emisión.

2.10.2. Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)⁵⁷

El protocolo contempla un acuerdo, denominado mecanismo de desarrollo limpio (MDL), con el cual se intenta canalizar la asistencia a las naciones en desarrollo incluyendo en sus proyectos una externalidad positiva vinculada con la implementación de tecnologías limpias, aquellas que contribuyen a mitigar y disminuir las emisiones de GEI.

El objetivo central de los mecanismos de desarrollo limpio es ayudar a los países en vías de desarrollo a alcanzar un crecimiento sustentable y asistir a los países desarrollados en el cumplimiento de sus cuotas de reducción de emisiones.

Este mecanismo promueve la inversión de empresas privadas en proyectos que utilicen tecnologías limpias, como la construcción de hidroeléctricas, centrales a gas de ciclo combinado, parques solares, parques eólicos, proyectos agrícolas y de forestación.

Asimismo, estos proyectos están sujetos al principio de adicionalidad, el cual está dirigido a evitar que se beneficien del incentivo de los BONOS DE CARBONO aquellos proyectos que en circunstancias normales se hubieran realizado de todas maneras. Por tanto, exige que la reducción de emisiones de carbono del proyecto sea el resultado de acciones deliberadas con este fin.

Tras una verificación, el MDL premia a estos proyectos con certificados de reducción de emisiones (CER, por la sigla en inglés certified emission reductions), cada uno de los cuales es equivalente a una tonelada de dióxido de carbono que se deja de emitir a la atmósfera. Estos CERs se pueden vender luego a países desarrollados que los necesiten para cubrir sus cuotas de reducción comprometidas.

Dentro de esta óptica se genera un doble compromiso, pues los países industrializados se obligan a cumplir con sus metas de reducción y los países en desarrollo se comprometen a generar condiciones favorables para la implementación de estas actividades en sus territorios.

O sea, este mecanismo no pretende lograr que las grandes empresas cambien su matriz energética pues sería demasiado caro e inviable, lo que persigue es inducir a las grandes transnacionales (o a sus subsidiarias) a invertir en

⁵⁷ Información elaborada con la referencia [11].

proyectos de tecnología limpia propios, premiando su compromiso por reducir la emisión de gases nocivos en el planeta.

Es por ello que el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) representa también para el Perú una posibilidad de dar un valor agregado a proyectos ambientales de reducción de gases de efecto invernadero. Se pueden realizar proyectos en diversos ámbitos como el de generación de energía, gestión de residuos, transporte, desarrollo forestal, entre otros, que no hubieran sido posibles sin la aplicación de este mecanismo.

2.10.3. Acuerdo de París y COP 21

Después del Protocolo de Kyoto, para un segundo período, se dio el Acuerdo de París, el cual reunía por primera vez a todas las naciones en una causa común en base a sus responsabilidades históricas, presentes y futuras.

Para el primer día en que el acuerdo se abría para su periodo de firma en la sede de las Naciones Unidas en Nueva York, 22 de abril de 2016, 175 Partes (174 países y la Unión Europea) firmaron el Acuerdo de París y 15 de ellos han depositado sus instrumentos de ratificación la siguiente semana.

El objetivo principal de este acuerdo universal es mantener el aumento de la temperatura en este siglo muy por debajo de los 2 grados centígrados, e impulsar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura incluso más, por debajo de 1,5 grados centígrados sobre los niveles preindustriales.

El límite de los 1,5 grados centígrados es significativamente una línea de defensa más segura frente a los peores impactos del cambio climático.

Además, el acuerdo busca reforzar la habilidad para hacer frente a los impactos del cambio climático.

El Acuerdo de París y los resultados de la conferencia de la ONU sobre el clima (COP 21) cubren áreas cruciales consideradas esenciales para una conclusión emblemática:

- Mitigación: reducir las emisiones lo suficientemente rápido como para lograr el objetivo de temperatura.
- Un sistema de transparencia y de balance global; una contabilidad para la acción climática.

- Adaptación: fortalecer la habilidad de los países para hacer frente a los impactos climáticos.
- Pérdidas y daños: fortalecer la habilidad para recuperarse de los impactos climáticos.
- Apoyo: incluido el apoyo financiero para que las naciones construyan futuros limpios y resilientes.



Figura 20.- Mapa del Acuerdo de París, junio del 2017.⁵⁸

A la vez que establecen una dirección a largo plazo, los países alcanzarán un pico de emisiones, lo antes que les sea posible, y seguirán presentando planes nacionales de acción climática que detallen sus objetivos futuros.

Esto se construye a partir del impulso sin precedentes que suponen los esfuerzos realizados, hasta ahora, por 188 países que han contribuido al nuevo acuerdo con sus planes de acción climática, que de manera drástica van a ralentizar el ritmo de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

El nuevo acuerdo establece además el principio de que los futuros planes nacionales no serán menos ambiciosos que los existentes, lo que supone que estos 188 planes de acción climática constituyen una base y cimientos firmes para una ambición mayor.

Los países someterán sus planes climáticos actualizados, denominados contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), cada cinco años con las que irá aumentando la ambición en el largo plazo.

⁵⁸ Fuente: UNFCCC, Business Insider.

En resumen, las decisiones acordadas en la COP 21 han aportado un torrente de luz al futuro de las energías renovables. La comunidad internacional ha entendido la obligación de robustecer la transición hacia una economía baja en carbono por el futuro sostenible del planeta. El clima de consenso internacional en favor de la descarbonización de la economía constituye un marco muy favorable para el impulso de las tecnologías energéticas limpias.

2.10.4. Reducción de emisiones de CO₂

Alrededor del mundo, el 42% del total de emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI) pertenecen al sector eléctrico, mientras que en Perú el 18% del total de las emisiones pertenecen a dicho sector. La mayor parte de la energía que se consume en el mundo, proviene de hidrocarburos, ya sea gas, diesel o carbón. Estas fuentes limitadas afectan al medio ambiente debido a los gases tóxicos que emiten pues contribuyen en gran parte al evidente cambio climático, preocupante y fácilmente observable alrededor del mundo.

Debido a presiones financieras, y al aumento en los precios de la energía, las grandes compañías buscan mantener su reputación realizando instalaciones de energía limpia, lo que provoca un ahorro en su consumo mensual de energía, y a la par, una reducción de sus emisiones de CO₂. La reducción de emisiones de CO₂ supone:

- Una reducción de los costos operativos de un negocio a largo plazo;
- Una reducción de la exposición del mismo a costos potenciales por la implantación de nuevas políticas de gobierno y regionales. Así en países como el Reino Unido, el Plan de Eficiencia Energética ya ha sido puesto en marcha y las empresas participantes deberán pagar una tasa de aproximadamente 15 € por tonelada de CO₂ emitida.

Las fuentes RER evitan la emisión de gases como CO₂ y CH₄, que son los que se emiten con el uso de combustibles como el carbón y derivados del petróleo.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLOGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

Los tipos de investigación empleados en la presente tesis son:

- **Investigación descriptiva**

Este tipo de investigación permite exponer las características de los sistemas seleccionados y sus componentes como las variables que intervienen en la realidad (radiación solar, velocidad del viento, energía fotovoltaica y energía eólica).

- **Investigación explicativa**

Esta investigación permite hacer un análisis e interpretación del comportamiento de diversas combinaciones de equipos para dar la más óptima solución al problema en cuestión.

- **Investigación teórica**

Permite hacer uso del conocimiento y base teórica del campo de la ingeniería para dar una solución en el diseño de sistema empleado.

3.2. Población y muestra

Para el presente estudio de implementación de sistemas híbridos netamente renovables, en la ciudad de Lambayeque, se identificó que la muestra es igual a la población siendo esta las instalaciones eléctricas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

3.3. Hipótesis

Mediante el diseño de un sistema híbrido eólico fotovoltaico de autoconsumo conectado a red, es posible suministrar con energía eléctrica a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

3.4. Operacionalización de variables

Tabla 10.- Operacionalización de variables.⁵⁹

TIPO DE VARIABLE	DEFINICION	TÉCNICA	INSTRUMENTOS	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE: Sistema híbrido eólico fotovoltaico.	Dimensionamiento del Sistema híbrido eólico fotovoltaico conectado a Red.	<ul style="list-style-type: none"> - Lectura crítica. - Observación. - Recolección de datos. - Cálculo por computadora. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fichas de investigación. - Resumen. - Especificaciones técnicas. - Equipos de medición. - Software de cálculo. - Listas de chequeo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial Solar - Potencial eólico - Mes desfavorable. - Energía eléctrica generada. - Tecnología. - Factibilidad del proyecto.
VARIABLE DEPENDIENTE: Suministrar con energía eléctrica a la FIME usando energías renovables.	Cálculo de la demanda promedio mensual de la energía eléctrica correspondiente a la iluminación de la FIME.	<ul style="list-style-type: none"> - Investigación. - Observación. - Entrevista. 	<ul style="list-style-type: none"> - Guías de matrícula. - Instrumentos de medición. - Software de cálculo. - Fichas de observación. - Planos. - Fotografías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energía promedio consumida al día y al mes. - Tensión del suministro actual. - Frecuencia del suministro actual.

3.5. Métodos y técnicas de investigación

- Lectura crítica

Se utilizó la lectura crítica para el análisis más profundo de textos y, en nuestro caso, data meteorológica, empleando la estadística para la recopilación e interpretación de los datos numéricos registrados.

- Observación

Se realizó una observación directa de las azoteas de los edificios de la facultad donde se podría desarrollar el proyecto, y en la cual aún no existen instalaciones de este tipo cuando se tiene un laboratorio dispuesto para ello, siendo este el principal motivo de la realización del proyecto.

En cuanto al acceso a dichas áreas se observó que está limitada sólo por una puerta metálica, quedando accesible sólo a personal autorizado.

⁵⁹ Elaboración propia.

- **Entrevista**

Con esta técnica se recopiló información para establecer el horario de funcionamiento de las cargas de iluminación en cada uno de los ambientes de la facultad, ya sean oficinas, aulas, laboratorios, etc.

3.6. Descripción de los instrumentos utilizados

- **Fichas de investigación**

Se realizaron lecturas informativas y comprensivas de los textos, descubriendo todo aquello que es de importancia e interés, para la redacción de la presente tesis, mediante el subrayado y marcaje de textos mediante asteriscos, corchetes, etc. Posteriormente se elaboraron las fichas de investigaciones con ideas concisas y referencias exactas de algún concepto importante.

- **Resumen**

Este instrumento se utilizó para extraer los puntos e ideas principales tanto de los distintos trabajos de investigación, revistas, libros, documentos, normas, leyes del ámbito nacional como de otros países y que se utilizaron como base para el desarrollo de la investigación.

- **Listas de chequeo**

Se utilizó para elaborar el marco conceptual y metodológico del presente trabajo de investigación basándose en fuentes de información científica, normas y leyes emitidas de acuerdo al tema tanto por entidades nacionales relacionadas (MINEM) como internacionales (España y otros).

- **Planos**

Nos permite tener un mejor enfoque de la ubicación del sistema y la distribución de sus componentes dentro del emplazamiento.

- **Fotografías**

Tiene la finalidad de evidenciar el desarrollo del trabajo y la presencia del desarrollador en el lugar.

3.7. Análisis estadístico e interpretación de datos

3.7.1. Medidas de tendencia central

- **Media (promedio)**

La media de un conjunto de números, conocida comúnmente como promedio, es la suma de los datos dividida entre el número total de datos.

3.7.2. Medidas de dispersión

- **Distribución de Weibull**

Es una función que se puede utilizar para describir la frecuencia de la distribución de velocidades del viento.

- **Rango (intervalo)**

Indica la dispersión entre los valores extremos de una variable, y se calcula como la diferencia entre el mayor y el menor valor de la variable. Se denota como **R**.

- **Desviación estándar**

La desviación estándar mide el grado de dispersión de los datos con respecto a la media, se denota como **s**.

CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Propuesta de investigación

Con la finalidad de continuar incentivando el uso de tecnologías limpias en la comunidad Lambayecana, se propone un sistema híbrido eólico fotovoltaico conectado a red como alternativa de suministro eléctrico para la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Con el presente proyecto se busca cubrir parte del consumo anual de energía de la facultad, tomando como base su consumo anual total de iluminación.

4.2. Montaje de equipos

Los equipos que conformarían el sistema híbrido y que será seleccionados más adelante, necesitan para su correcta operación y funcionamiento, la adquisición e instalación de unas estructuras de soporte, cuyo montaje debe realizarse de una manera adecuada y siguiendo una serie de pautas y recomendaciones, que permitan al sistema aprovechar al máximo el potencial energético de los recursos estudiados, operando con un rendimiento cercano al esperado.

Como torre de soporte para los aerogeneradores se recomienda una torre basculante de tipo poste tubular de 3 metros de altura, esto por varias razones. Para la instalación del aerogenerador sobre la torre será conveniente usar un sistema de polea.

En el caso de los paneles fotovoltaicos se recomienda que sean montados sobre estructuras metálicas tipo mesa, las cuales deben poseer una altura mínima (0.8m) que supere la sombra producida por el perímetro de las azoteas, del mismo modo deberán tener la capacidad de regular el grado de inclinación de los paneles, garantizar la sujeción y soporte de estos, y ser lo suficientemente resistentes a agentes medioambientales como la lluvia y el viento.

Las pautas principales para el montaje de los equipos, en sus respectivas estructuras, se encuentran detalladas en el Anexo H de esta tesis.

4.3. Plan de acción

Se plantea un plan de acción para reducir a mediano plazo las barreras y/o limitaciones que han sido mencionadas anteriormente:

4.3.1. En el ámbito tecnológico:

- Desarrollo de una nueva y mejor tecnología, con procesos automáticos de fabricación, que permitan reducir los costos de producción de los diferentes tipos de paneles solares y aerogeneradores de baja potencia.
- Investigación y ensayos en materiales que permitan la fabricación de paneles solares con mayores eficiencias que los actuales.
- Investigación sobre la optimización de rotores de aerogeneradores para poder obtener mejores desempeños a bajos regímenes de viento, así como estudios sobre diseños más innovadores de las palas y torres de soporte.
- Mayor inversión en investigación sobre mejoras de los componentes electrónicos que permitan reducir las pérdidas de energía, elevando así la eficiencia en la generación.
- Instalar un mayor número de estaciones meteorológicas, en sitios con alto o mediano potencial energético en base a fuentes de energía renovable; y en especial en aquellos lugares donde existe una mayor demanda de recursos básicos como el agua, la electricidad y las comunicaciones.
- Proponer métodos de prueba en lugares en condiciones extremas, para cada uno de los diferentes modelos de los equipos generadores, esto permitirá realizar constantes mejoras en el diseño. De esta manera se podría aumentar la confiabilidad de los sistemas e incluso extender su tiempo de vida.

4.3.2. En el ámbito comercial:

- Contar con una mayor diversidad de modelos de aerogeneradores de baja potencia, de eje horizontal y vertical, dentro del mercado nacional para su uso dentro de emplazamientos urbanos.
- Capacitaciones especializadas, para autoconsumidores (pequeños generadores), dentro del ámbito técnico como del profesional; relacionada con el estudio, diseño,

montaje de proyectos de energía limpia, así como también en la gestión de la energía producida por los mismos.

- Contar con una mayor participación de productos de generación de energía limpia dentro del mercado nacional, así como un mejor entrenamiento del personal dedicado a la instalación de estos sistemas. Con el interés creciente mostrado por la población se logrará un aumento paulatino de proveedores nacionales de equipos y dispositivos, con los estándares necesarios para interconectarse a la red pública.

4.3.3. En el ámbito político:

- Desarrollar una estrategia para trabajar con políticas de estado, reglamentos y normativas específicas que favorezcan el desarrollo de proyectos de energías limpias en zonas urbanas.
- Fomentar información por distintos medios de comunicación y en centros de educación, tanto privados como estatales, sobre los usos, beneficios y características de las energías renovables no convencionales. De igual manera propagar información acerca de los requerimientos y permisos en edificaciones dentro del área urbana.
- Promoción de incentivos estatales como la reducción o exoneración de impuestos, ofrecimiento de planes de crédito con bajos intereses, o un atractivo plan para el tratamiento de excedentes de energía en los con acuerdos de compra y venta.
- Implementación de estrategias o programas por parte del gobierno, para la obtención de fondos con la venta de bonos de carbono.
- Creación de una ley o reglamento que exija a las empresas distribuidoras, la participación de un determinado porcentaje de usuarios, de baja y mediana potencia, dentro de la red eléctrica. Esto promoverá el desarrollo de una serie de bases para la interconexión de los pequeños productores, y la reducción de trámites y barreras burocráticas.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Cálculo de la demanda de energía eléctrica

El cálculo de la demanda para el sistema de iluminación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica se hizo en base a una rutina típica de la misma. Esta rutina se pudo determinar mediante las guías de matrícula que es en donde se describen los horarios de funcionamiento de las aulas y laboratorios, y mediante una entrevista personal realizada a los respectivos trabajadores que laboran en las distintas oficinas administrativas.

5.1.1. Determinación de la Demanda de Potencia y Energía

No es posible la ejecución del segundo procedimiento para la determinación del consumo de energía de las cargas de iluminación debido a diversos factores como:

- i) La facultad no cuenta con un medidor propio,
- ii) El tablero de distribución de la facultad no es exclusivo de esta, pues salen circuitos para diferentes sectores de la universidad, y
- iii) A lo largo de los años, y por diversas necesidades, se ha realizado más de una derivación para cargas que no son propias de la facultad.

Entonces, por tales motivos, en la presente tesis se empleará el primer método de cálculo, por lo que es necesario establecer un registro de las cargas presentes en cada ambiente de la facultad:

5.1.2. Características de ambientes y cargas presentes

A continuación se detalla la distribución de ambientes, y cargas presentes, con su respectiva potencia total demandada y frecuencia de utilización, diaria o semanal (Ver tabla 11 a la 19). Es importante mencionar que la iluminación de los ambientes de la facultad por lo general es requerida durante el día, pero existen usos aleatorios a lo largo de la semana.

Tabla 11.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 1.⁶⁰

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 1 OFICINAS ADMINISTRATIVAS.	1º	Departamento Académico de Mecánica	FC	1	32	32	Diario
		Oficina de Asuntos Pedagógicos	FC	2	32	64	Diario
		Oficina de Recaudación	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH.1	FC	1	32	32	Diario
		Oficina de Grados y Títulos	FC	2	32	64	Diario
		PASILLOS Int. 1.1	FC	3	32	96	Diario
	2º	Decanato	FC	1	32	32	Diario
		Secretaría de Decanato	FC	1	32	32	Diario
		Oficina de Escuela Profesional	FC	1	32	32	Diario
		Oficina de Investigación	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.2	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.3	FC	1	32	32	Diario
		Oficina de Administración	FC	2	32	64	Diario
		Ambiente 'XX'	FC	1	32	32	Semanal
		PASILLOS Int. 1.2	FC	3	32	96	Diario

Tabla 12.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 2.⁶¹

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 2 LAB. DE ENERGÍA Y MÁQUINAS TÉRMICAS	1º	Lab. de Energía y Máquinas Térmicas	FT	12	40	480	Semanal
		Oficina LEMT	FC	1	32	32	Diario
		Almacén LEMT	FC	1	32	32	Diario
		Unidad de Archivos	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.4	FC	1	32	32	Diario

Tabla 13.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 3.⁶²

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 3 LAB. DE ELECTRICIDAD Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS	1º	Lab. de Electricidad y Máquinas Eléctricas LEME	FT	18	36	648	Semanal
		Oficina LEME	FT	2	36	72	Diario
		Almacén LEME	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH.5	FC	1	32	32	Diario

⁶⁰ Elaboración propia.

⁶¹ Elaboración propia.

⁶² Elaboración propia.

Tabla 14.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 4.⁶³

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 4 PARQUE ENERGÉTICO	1°	Taller de Ensamblaje de Motores CI	FT	1	32	32	Semanal
		Parque Hidráulico	---	0	0	0	Semanal

Tabla 15.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 5.⁶⁴

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 5 PABELLON DE AULAS, LAB DE CÓMPUTO Y BIBLIOTECA.	1°	Aula Multimedia N°1	FT	16	40	640	Semanal
		Aula Multimedia N°2	FT	16	40	640	Semanal
		Biblioteca	FT	24	36	864	Diario
		PASILLOS Ext. 5.1	FC	9	32	288	Diario
	2°	Aula FIME N°2	FT	24	36	864	Semanal
		Auditorium FIME	FT	24	40	960	Semanal
		PASILLOS Ext. 5.2	FC	10	32	320	Diario
	3°	Lab. de Instalaciones Eléctricas	FT	38	36	1368	Semanal
		Aula FIME N°3	FT	16	36	576	Semanal
		PASILLOS Ext. 5.3	FC	7	32	224	Diario
	4°	CEIFIME	FT	30	36	1080	Semanal
		Sala de Defensa Personal	FT	24	36	864	Semanal
		PASILLOS Ext. 5.4	FC	5	32	160	Diario

Tabla 16.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 6.⁶⁵

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 6 NUEVO PABELLON DE LABORATORIOS	1°	Lab. de Máq. Eléctricas	FT	36	35	1260	Semanal
		Lab. Neumática e Hidráulica	FT	36	35	1260	Semanal
		SS.HH.6	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH.7	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH. Minusválidos 1	FC	1	32	32	Diario
		PASILLOS Ext. 6.1	FC	21	32	672	Diario
	2°	Lab. de Energías Renovables	FT	36	35	1260	Semanal
		Lab. de Procesos Industriales	FT	36	35	1260	Semanal
		SS.HH.8	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH.9	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH. Minusválidos 2	FC	1	32	32	Diario
		PASILLOS Ext. 6.2	FC	21	32	672	Diario
	3°	Lab. de Robótica y Mecatrónica	FT	36	35	1260	Semanal
		Lab. de PLC.	FT	36	35	1260	Semanal
		SS.HH.10	FC	2	32	64	Diario

⁶³ Elaboración propia.

⁶⁴ Elaboración propia.

⁶⁵ Elaboración propia.

		SS.HH.11	FC	2	32	64	Diario
		SS.HH. Minusválidos 3	FC	1	32	32	Diario
		PASILLOS Ext. 6.3	FC	21	32	672	Diario
	4º	Explanada de Paneles Fotovoltaicos	Fc	52	18	936	Diario
		Área de Baterías	FT	4	35	140	Diario
		Cubículo de Limpieza	FC	1	32	32	Diario
		Almacén	FT	4	35	140	Semanal
		PASILLOS Ext. 6.4	FC	13	32	416	Diario

Tabla 17.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 7.⁶⁶

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 7 PABELLON DE AULAS	1º	Aula FIME N°4	FT	24	36	864	Semanal
		Aula FIME N°5	FT	24	36	864	Semanal
		SS.HH.12	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.13	FC	1	32	32	Diario
		PASILLOS Ext. 7.1.1	FC	7	32	224	Diario
		PASILLOS Ext. 7.1.2	LED	4	16	64	Diario
	2º	Aula FIME N°6	FT	24	36	864	Semanal
		Aula FIME N°7	FT	24	36	864	Semanal
		SS.HH.14	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.15	FC	1	32	32	Diario
		PASILLOS Ext. 7.2	FC	12	32	384	Diario
	3º	Aula FIME N°8	FT	24	36	864	Semanal
		Aula FIME N°9	FT	24	36	864	Semanal
		SS.HH.16	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.17	FC	1	32	32	Diario
		PASILLOS Ext. 7.3	FC	12	32	384	Diario

Tabla 18.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 8.⁶⁷

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 8 OFICINA GENERAL DE CALIDAD UNIVERSITARIA	1º	Of. General de Calidad Universitaria	FT	2	36	72	Diario
		Sala de Reuniones 8.1.1	FT	6	36	216	Semanal
		Sala de Reuniones 8.1.2	FC	2	32	64	Semanal
		PASILLOS Int. 8.1	FC	5	32	160	Diario
	2º	Secretaría	FC	8	32	256	Diario
		Tribunal de Honor 8.2.1	FC	4	32	128	Semanal
		Tribunal de Honor 8.2.2	FT	4	36	144	Semanal
		PASILLOS Int. 8.2	FC	5	32	160	Diario
	3º	Und. De Proyectos y Obras - SERVIFIME	FC	8	36	288	Diario
		Of. De Responsabilidad Social	FC	8	36	288	Diario
		PASILLOS Int. 8.3	FC	5	32	160	Diario

⁶⁶ Elaboración propia.

⁶⁷ Elaboración propia.

Tabla 19.- Potencia total demandada por los ambientes del edificio N° 9.⁶⁸

EDIFICIO/ESPACIO	NIVEL	AMBIENTE	TIPO DE LUMIN.	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn TOTAL [W]	FREC. DE USO
N° 9 TALLER DE PRODUCCIÓN FIME	1º	Taller de Metal Mecánica FIME	FT	40	32	1280	Semanal
		Ambiente 'XXX'	FC	1	32	32	Diario
		Oficina de Titulación	FC	1	32	32	Diario
		SS.HH.18	FC	1	32	32	Diario
	2º	Of. Taller de Metal Mecánica	FC	4	32	128	Diario
		SS.HH.19	FC	1	32	32	Diario
		Centro Federado - CEFIME	FC	3	32	96	Semanal

Esto hace un total de 967 lámparas, conformadas por 4 lámparas LED de 16W, 52 lámparas de 18W, 271 lámparas de 32W, 224 lámparas de 35W, 348 lámparas de 36W, y 68 lámparas de 40W.

Además, se ha considerado una demanda para exteriores de la facultad con el uso de 20 lámparas AP de 50W cada una. En la tabla 20 se detalla cada una, con su tiempo de uso, y su respectiva energía total demandada al día.

Tabla 20.- Potencia total demandada por las cargas de iluminación exterior.⁶⁹

ILUMINACION EXTERIOR	TIPO DE LUMINARIA	CANT. LAMPARAS	Pn UNIT. [W/Lamp.]	Pn OTAL [W]	TIEMPO DE USO POR DIA [hh:mm]	FREC. DE USO	ENERGIA [Wh/día]
1	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
2	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
3	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
4	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
5	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
6	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
7	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
8	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
9	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
10	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
11	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
12	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
13	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
14	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
15	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
16	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
17	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
18	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
19	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
20	Faro LED	1	50	50	03:30	Diario	175
		20		1000			3500

⁶⁸ Elaboración propia.

⁶⁹ Elaboración propia.

Entonces, para un tiempo de uso promedio de 3.5 horas diarias, se obtiene una demanda energética diaria de exteriores de 3500 Wh, donde la potencia horaria promedio será de 1000 W.

5.1.3. Procedimiento de cálculo de la demanda de energía

Se verifica que las luminarias de cada ambiente de la facultad no funcionan ni a la misma hora, ni todos los días, sino de acuerdo a la necesidad que se presente. Por lo tanto, se plantea el siguiente procedimiento:

- 1) Elaborar un horario para las luminarias de aquellos ambientes que cuenten con un funcionamiento diario, en base a una rutina típica de un ciclo ordinario (guías de matrícula). Ver tabla 21.
- 2) De igual modo, elaborar un horario para aquellas luminarias de los ambientes que tengan un funcionamiento semanal (no diario). Ver tabla 22 y 23.
- 3) De acuerdo al uso de las luminarias en los ambientes con funcionamientos diarios o semanales, se puede elaborar una tabla del consumo energético y obtener la curva de carga para cada día de la semana. Ver figura 26 a la 32.

En la tabla 20 se muestra el cálculo de la demanda de Potencia y Energía para las luminarias de los ambientes de funcionamiento diario (lunes a viernes).

Tabla 21.- Horario de funcionamiento y energía demandada por las cargas de los ambientes de funcionamiento diario.⁷⁰

AMBIENTE / HORA	POT	HORAS DIARIAS Lun-Vie	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	TOTAL
Departamento Academico de Mecánica	32.00	00:30											16.00														16.00
Oficina de Asuntos Pedagógicos	64.00	08:00									64.00	64.00	64.00	64.00	64.00		64.00	64.00	64.00								512.00
Oficina de Recaudación	64.00	08:00									64.00	64.00	64.00	64.00	64.00		64.00	64.00	64.00								512.00
SS.HH.1	32.00	00:30											5.33			5.33			5.33								16.00
Oficina de Grados y Títulos	64.00	08:00									64.00	64.00	64.00	64.00	64.00		64.00	64.00	64.00								512.00
PASILLOS Int. 1.1	96.00	02:00																	96.00	96.00							192.00
Decanato	32.00	05:00									32.00	32.00	32.00	32.00	32.00												160.00
Secretaría de Decanato	32.00	08:00									32.00	32.00	32.00	32.00	32.00		32.00	32.00	32.00								256.00
Oficina de Escuela Profesional	32.00	08:00									32.00	32.00	32.00	32.00	32.00		32.00	32.00	32.00								256.00
Oficina de Investigación	32.00	08:00									32.00	32.00	32.00	32.00	32.00		32.00	32.00	32.00								256.00
SS.HH.2	32.00	00:30											5.33			5.33			5.33								16.00
SS.HH.3	32.00	00:30											5.33			5.33			5.33								16.00
Oficina de Administración	64.00	08:00									64.00	64.00	64.00	64.00	64.00		64.00	64.00	64.00								512.00
PASILLOS Int. 1.2	96.00	02:00																	96.00	96.00							192.00
Oficina LEMT	32.00	03:00												32.00					32.00	32.00							96.00
Almacén LEMT	32.00	00:30									5.33								5.33		5.33						16.00
Unidad de Archivos	32.00	05:00									32.00	32.00	32.00	32.00	32.00												160.00
SS.HH.4	32.00	00:30									5.33				5.33					5.33							16.00
Oficina LEME	72.00	05:00										72.00	72.00	72.00					72.00	72.00							360.00
Almacén LEME	64.00	00:30									10.67								10.67		10.67						32.00
SS.HH.5	32.00	00:30									5.33				5.33					5.33							16.00
Biblioteca	864.00	06:00									864.00	864.00	864.00	864.00	432.00				864.00	432.00							5184.00
PASILLOS Ext. 5.1	288.00	02:00																			288.00	288.00					576.00
PASILLOS Ext. 5.2	320.00	02:00																			320.00	320.00					640.00
PASILLOS Ext. 5.3	224.00	02:00																			224.00	224.00					448.00
PASILLOS Ext. 5.4	160.00	02:00																			160.00	160.00					320.00
SS.HH.6	64.00	01:00											21.33				21.33				21.33						64.00
SS.HH.7	64.00	01:00											21.33				21.33				21.33						64.00
SS.HH. Minusválidos 1	32.00	00:20													5.33												5.33
PASILLOS Ext. 6.1	672.00	02:00																			672.00	672.00					1344.00
SS.HH.8	64.00	00:00											16.00				16.00				16.00						48.00
SS.HH.9	64.00	00:00											16.00				16.00				16.00						48.00
SS.HH. Minusválidos 2	32.00	00:00																									0.00
PASILLOS Ext. 6.2	672.00	00:00																									0.00
SS.HH.10	64.00	00:00																									0.00
SS.HH.11	64.00	00:00																									0.00
SS.HH. Minusválidos 3	32.00	00:00																									0.00
PASILLOS Ext. 6.3	672.00	00:00																									0.00
Explanada de Paneles Fotovoltaicos	936.00	00:00																									0.00

⁷⁰ Tabla elaborada con la información brindada por las guías de matrícula de la FIME.

Area de Baterías	140.00	00:00																									0.00
Cubículo de Limpieza	32.00	00:20										5.33			5.33												10.67
PASILLOS Ext. 6.4	416.00	00:00																									0.00
SS.HH.12	32.00	00:30									5.33				5.33					5.33							16.00
SS.HH.13	32.00	00:15									2.67				2.67					2.67							8.00
PASILLOS Ext. 7.1.1	224.00	02:00																			224.00	224.00					448.00
PASILLOS Ext. 7.1.2	64.00	02:00																			64.00	64.00					128.00
SS.HH.14	32.00	00:30									5.33				5.33					5.33							16.00
SS.HH.15	32.00	00:15									2.67				2.67					2.67							8.00
PASILLOS Ext. 7.2	384.00	02:00																			384.00	384.00					768.00
SS.HH.16	32.00	00:30									5.33				5.33					5.33							16.00
SS.HH.17	32.00	00:15									2.67				2.67					2.67							8.00
PASILLOS Ext. 7.3	384.00	02:00																			384.00	384.00					768.00
Of. General de Calidad Universitaria	72.00	05:00									72.00	72.00	72.00	72.00	72.00												360.00
PASILLOS Int. 8.1	160.00	02:00									160.00	160.00															320.00
Secretaría	256.00	05:00									256.00	256.00	256.00	256.00	256.00												1280.00
PASILLOS Int. 8.2	160.00	02:00									160.00	160.00															320.00
Und. De Proyectos y Obras - SERVIFIME	288.00	05:00									288.00	288.00	288.00	288.00	288.00												1440.00
Of. De Responsabilidad Social	288.00	00:00																									0.00
PASILLOS Int. 8.3	160.00	02:00									160.00	160.00															320.00
Ambiente 'XXX'	32.00	01:00									32.00																32.00
Oficina de Titulación	32.00	06:00									32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00											192.00
SS.HH.18	32.00	00:30									5.33		5.33		5.33												16.00
Of. Taller de Metal Mecánica	128.00	02:00												128.00	128.00												256.00
SS.HH.19	32.00	00:30									5.33		5.33		5.33												16.00
ILUMINACION EXTERIOR	1000.00	03:30																			500.00	1000.00	1000.00	1000.00			3500.00
POTENCIA HORARIA [W]			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2501.33	2485.33	2117.33	2160.00	1680.00	48.00	426.67	352.00	1544.00	762.67	3310.67	3720.00	1000.00	1000.00	0.00	0.00	23108.00
ENERGIA DIARIA [kWh/día]			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	2.49	2.12	2.16	1.68	0.05	0.43	0.35	1.54	0.76	3.31	3.72	1.00	1.00	0.00	0.00	23.11

El horario normal de clases de la facultad es de lunes a viernes pero existen ambientes que tienen funcionamiento los días sábados y domingos. EL horario de funcionamiento para las cargas de dichos ambientes se muestra en las tablas B.1 y B.2 del Anexo B.

Tabla 22.- Período típico, días y tiempo de uso, de las cargas presentes en los ambientes de funcionamiento semanal.⁷¹

AMBIENTE	POT [W]	LUN [hrs]	MAR [hrs]	MIE [hrs]	JUE [hrs]	VIER [hrs]	SAB [hrs]	DOM [hrs]
Ambiente 'XX'	32	00:30				00:30		
Lab. de Energía y Máquinas Térmicas	480	02:00	03:30	04:30	02:30	02:30		
Lab. de Electricidad y Máquinas Eléctricas LEME	648	04:00	04:30	03:00	05:00	03:00		
Taller de Ensamblaje de Motores CI	32		01:00			01:00		
Parque Hidráulico	0							
Aula Multimedia N°1	640	01:45	05:50	03:45	04:10	02:50		
Aula Multimedia N°2	640	06:45	03:20	03:20	01:45	05:00		
Aula FIME N°2	864	06:00	06:00	06:00	06:00	06:00		
Auditorium FIME	960			03:00		03:00	05:00	05:00
Lab. de Control y Automatización	1368				02:00	02:00		
Aula FIME N°3	576	06:30	06:00	06:30	06:00	05:00		
CEIFIME	1080	03:00		03:00		03:00		
Sala de Defensa Personal	864		02:00		02:00			
Lab. de Electricidad y Máq. Eléctricas	1260	02:30	03:20	03:20	02:30	01:45		
Lab. Neumática Hidráulica	1260		02:00		02:00			
Lab. De Automatización y Control Industrial	1260							
Lab. Instrumentación y Procesos Industriales	1260							
Lab. Mec. Industrial Mecánica y Robótica	1260							
Lab. Energía Renovable	1260							
Almacén	140	00:20		00:20		00:20		
Aula FIME N°4	864	05:00	05:00	06:30	04:00	05:45		
Aula FIME N°5	864	04:30	06:40	05:30	06:45	04:45		
Aula FIME N°6	864	06:00	05:50	04:30	05:45	03:45		
Aula FIME N°7	864	05:00	04:15	07:00	06:30	02:30		
Aula FIME N°8	864	06:30	02:30	06:15	06:45	03:00		
Aula FIME N°9	864	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00		
Sala de Reuniones 8.1.1	216	01:00			01:00			
Sala de Reuniones 8.1.2	64	01:00			01:00			
Tribunal de Honor 8.2.1	128		01:00			01:00		
Tribunal de Honor 8.2.2	144		01:00			01:00		
Taller de Metal Mecánica FIME	1280		02:00		02:00		02:00	
Centro Federado - CEFIME	96	06:00		06:00		06:00		

Con los datos de la tabla 22, se calcula la demanda de Potencia y Energía para las luminarias de los ambientes de funcionamiento semanal. (Tabla 23)

⁷¹ Tabla elaborada con la información brindada por las guías de matrícula de la FIME.

Tabla 23.- Energía demandada por las cargas de los ambientes de funcionamiento semanal.⁷²

AMBIENTE	LUN [W*Hrs]	MAR [W*Hrs]	MIE [W*Hrs]	JUE [W*Hrs]	VIE [W*Hrs]	SAB [W*Hrs]	DOM [W*Hrs]
Ambiente 'XX'	16.00	0.00	0.00	0.00	16.00	0.00	0.00
Lab. de Energía y Máquinas Térmicas	960.00	1680.00	2160.00	1200.00	1200.00	0.00	0.00
Lab. de Electricidad y Máquinas Eléctricas LEME	2592.00	2916.00	1944.00	3240.00	1944.00	0.00	0.00
Taller de Ensamblaje de Motores CI	0.00	32.00	0.00	0.00	32.00	0.00	0.00
Parque Hidráulico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aula Multimedia N°1	1120.00	3733.33	2400.00	2666.67	1813.33	0.00	0.00
Aula Multimedia N°2	4320.00	2133.33	2133.33	1120.00	3200.00	0.00	0.00
Aula FIME N°2	5184.00	5184.00	5184.00	5184.00	5184.00	0.00	0.00
Auditorium FIME	0.00	0.00	2880.00	0.00	2880.00	4800.00	4800.00
Lab. de Control y Automatización	0.00	0.00	0.00	2736.00	2736.00	0.00	0.00
Aula FIME N°3	3744.00	3456.00	3744.00	3456.00	2880.00	0.00	0.00
CEIFIME	3240.00	0.00	3240.00	0.00	3240.00	0.00	0.00
Sala de Defensa Personal	0.00	1728.00	0.00	1728.00	0.00	0.00	0.00
Lab. de Electricidad y Máq. Eléctricas	3150.00	4200.00	4200.00	3150.00	2205.00	0.00	0.00
Lab. Neumática Hidráulica	0.00	2520.00	0.00	2520.00	0.00	0.00	0.00
Lab. De Automatización y Control Industrial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lab. Instrumentación y Procesos Industriales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lab. Mec. Industrial Mecánica y Robótica	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lab. Energía Renovable	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Almacén	46.67	0.00	46.67	0.00	46.67	0.00	0.00
Aula FIME N°4	4320.00	4320.00	5616.00	3456.00	4968.00	0.00	0.00
Aula FIME N°5	3888.00	5760.00	4752.00	5832.00	4104.00	0.00	0.00
Aula FIME N°6	5184.00	5040.00	3888.00	4968.00	3240.00	0.00	0.00
Aula FIME N°7	4320.00	3672.00	6048.00	5616.00	2160.00	0.00	0.00
Aula FIME N°8	5616.00	2160.00	5400.00	5832.00	2592.00	0.00	0.00
Aula FIME N°9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sala de Reuniones 8.1.1	216.00	0.00	0.00	216.00	0.00	0.00	0.00
Sala de Reuniones 8.1.2	64.00	0.00	0.00	64.00	0.00	0.00	0.00
Tribunal de Honor 8.2.1	0.00	128.00	0.00	0.00	128.00	0.00	0.00
Tribunal de Honor 8.2.2	0.00	144.00	0.00	0.00	144.00	0.00	0.00
Taller de Metal Mecánica FIME	0.00	2560.00	0.00	2560.00	0.00	2560.00	0.00
Centro Federado - CEFIME	576.00	0.00	576.00	0.00	576.00	0.00	0.00
TOTAL	48556.67	51366.67	54212.00	55544.67	45289.00	7360.00	4800.00
ENERGIA [kWh/día]	48.56	51.37	54.21	55.54	45.29	7.36	4.80

En la tabla 24 se muestra la demanda energética total para cada día de la semana:

⁷² Elaboración propia.

Tabla 24.- Demanda energética, diaria y semanal, para cada día de la semana.⁷³

Día	DEMANDA USO DIARIO	DEMANDA DE USO SEMANAL	DEMANDA TOTAL DE ENERGÍA
	[kWh/día]	[kWh/día]	[kWh/día]
Lunes	23.11	48.56	71.66
Martes	23.11	51.37	74.47
Miércoles	23.11	54.21	77.32
Jueves	23.11	55.54	78.65
Viernes	23.11	45.29	68.40
Sábado	3.67	7.36	11.03
Domingo	3.67	4.80	8.47
PROMEDIO	17.55	38.16	55.72

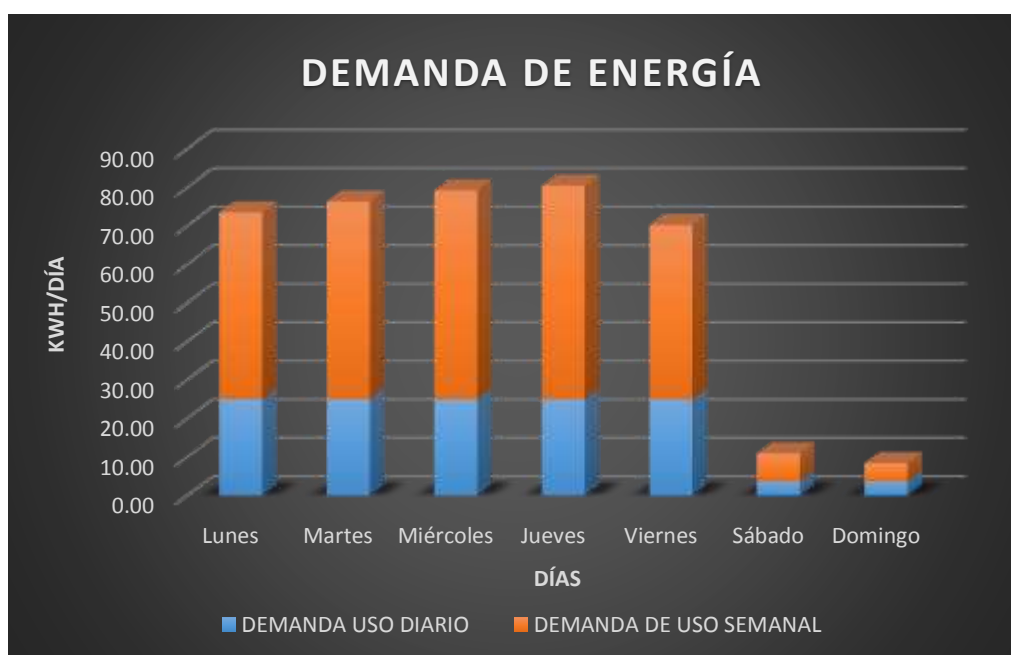


Figura 21.- Demanda total de energía para cada día de la semana.⁷⁴

Luego, los cuadros de carga para cada día de la semana, se muestran a continuación:

⁷³ Elaboración propia.

⁷⁴ Elaboración propia.

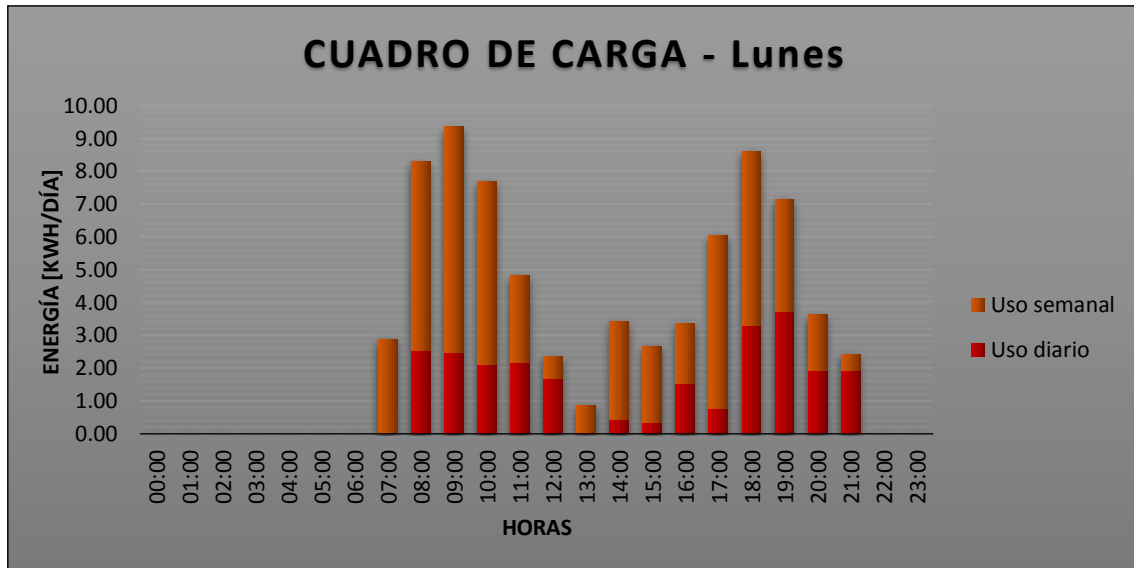


Figura 22.- Curva de carga para el día lunes.⁷⁵

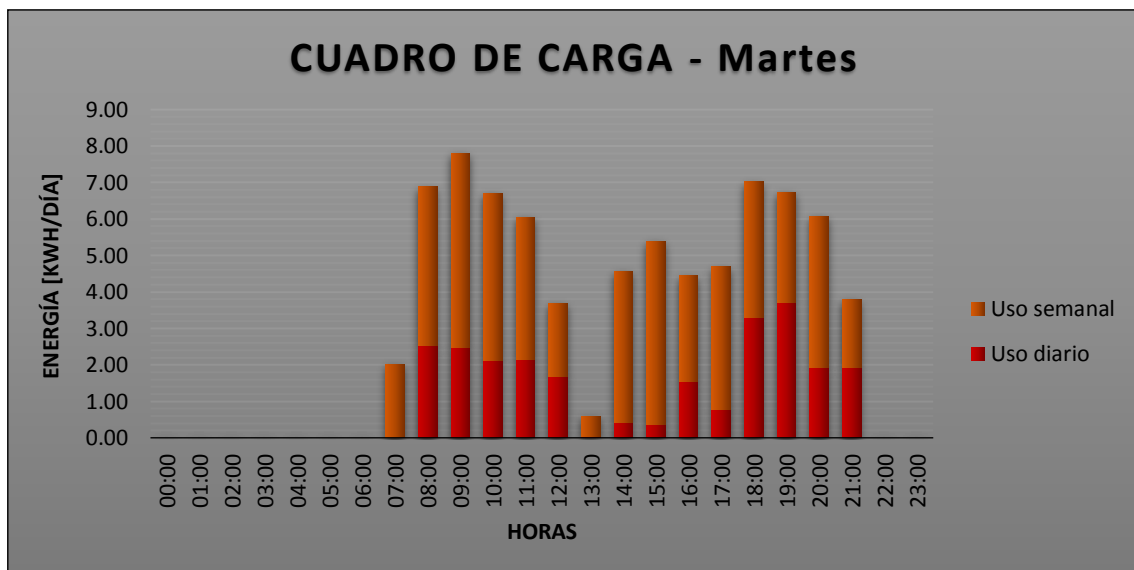


Figura 23.- Curva de carga para el día martes.⁷⁶

⁷⁵ Elaboración propia.

⁷⁶ Elaboración propia.

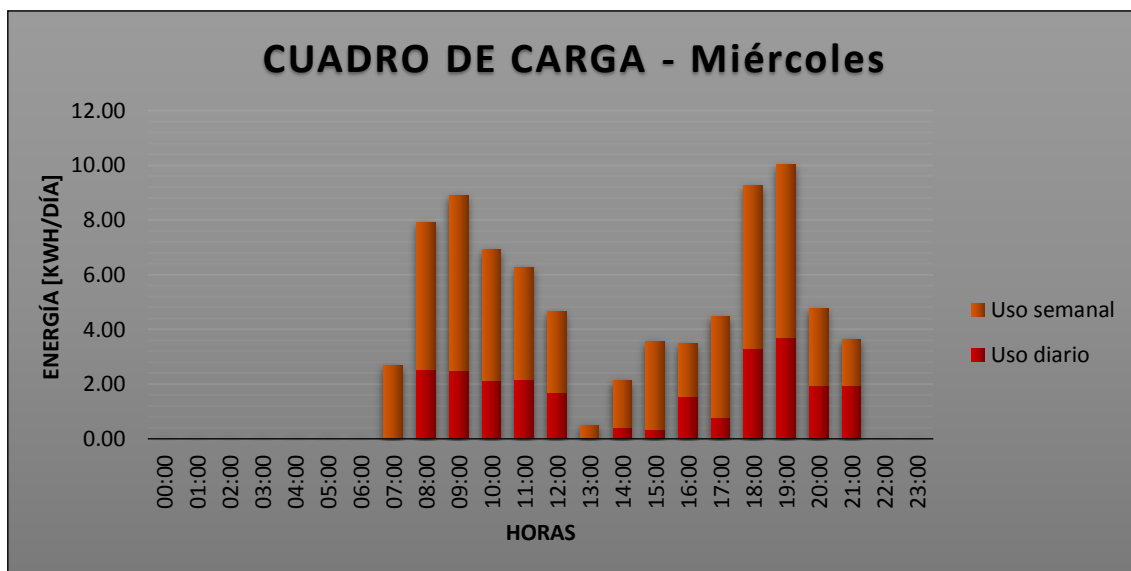


Figura 24.- Curva de carga para el día miércoles.⁷⁷

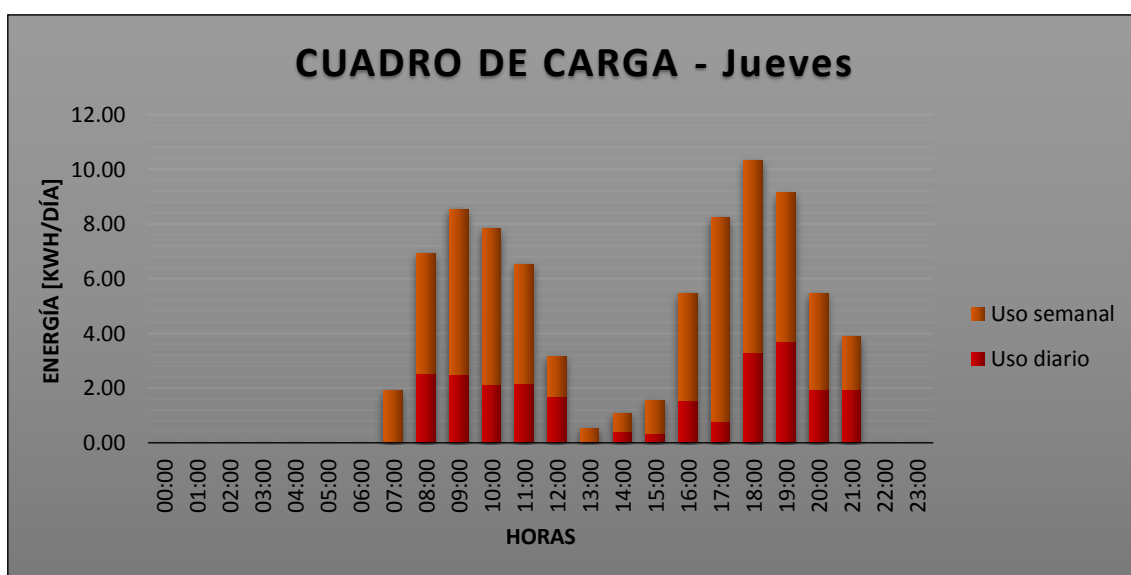


Figura 25.- Curva de carga para el día jueves.⁷⁸

⁷⁷ Elaboración propia.

⁷⁸ Elaboración propia.

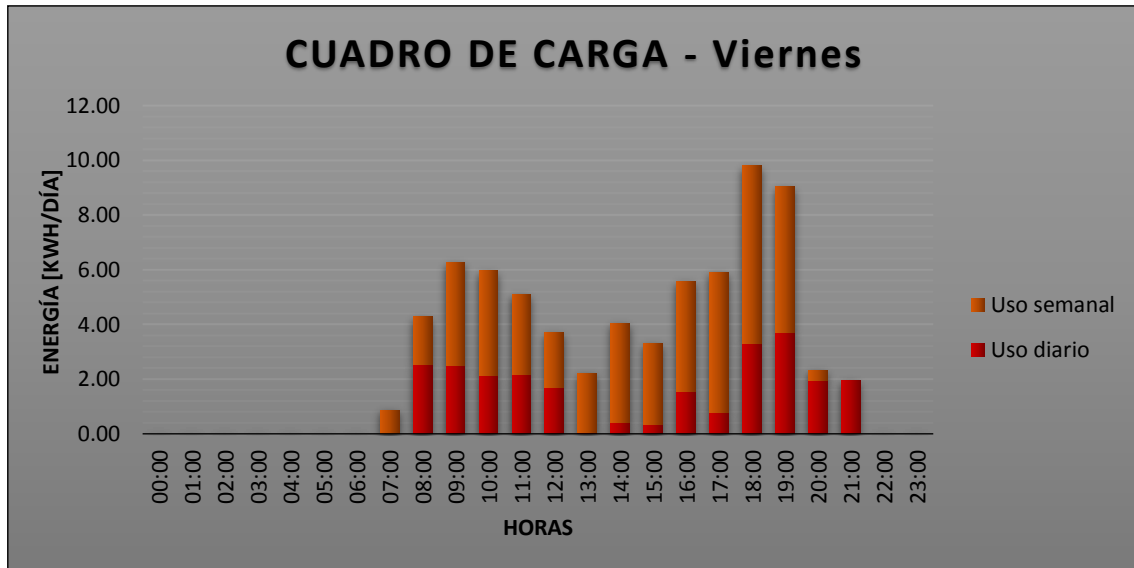


Figura 26.- Curva de carga para el día jueves.⁷⁹

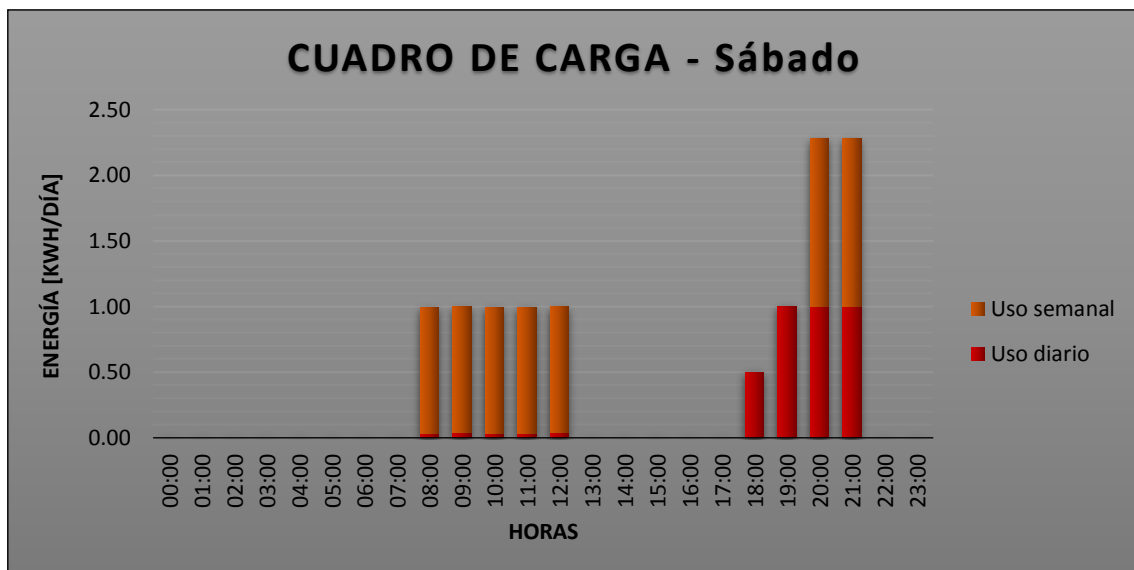


Figura 27.- Curva de carga para el día sábado.⁸⁰

⁷⁹ Elaboración propia.

⁸⁰ Elaboración propia.

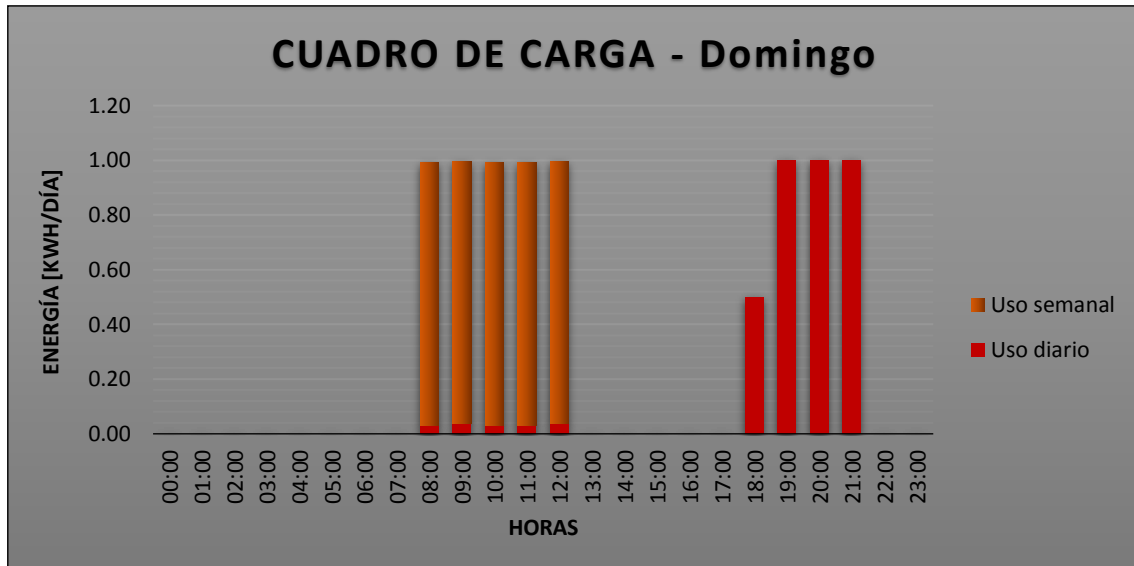


Figura 28.- Curva de carga para el día domingo.⁸¹

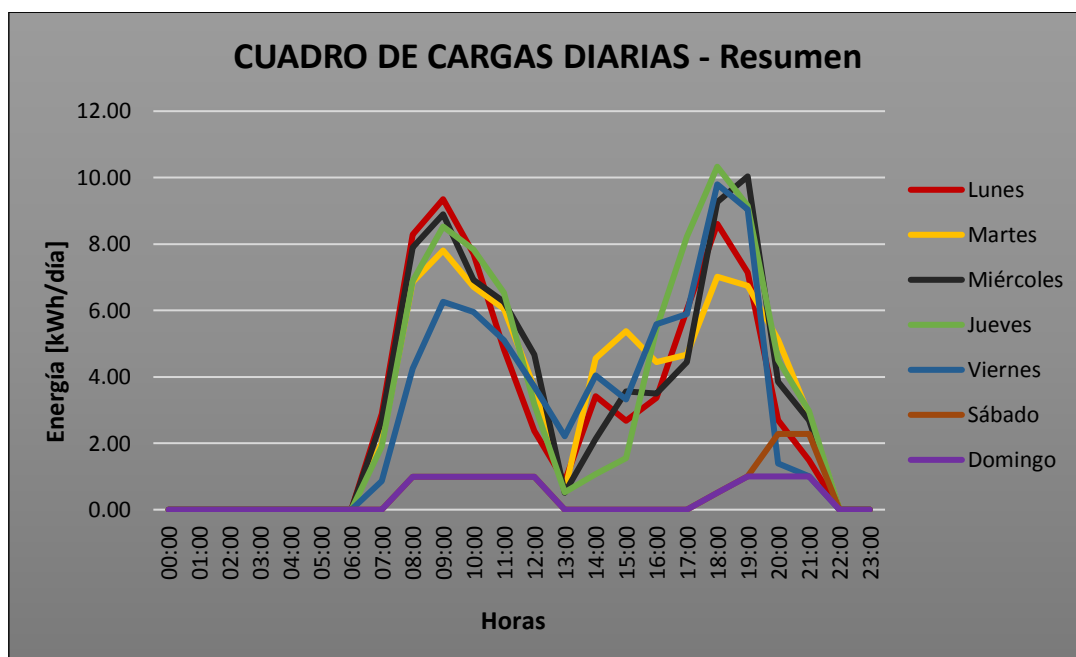


Figura 29.- Resumen de las curvas de cargas.⁸²

⁸¹ Elaboración propia.

⁸² Elaboración propia.

Con la información proporcionada por las figuras 26 a la 32 y las tablas 11 a la 24, se puede determinar la potencia promedio y potencia máxima consumida a lo largo de la semana de la siguiente manera:

$$Potencia_{promedio} = \frac{Energía\ diaria_{Total}}{24\ hrs} \quad (5.1)$$

$$Potencia_{Máxima} = MAX[Potencia\ horaria] \quad (5.2)$$

En la tabla 25 y figura 30, se aprecian los valores de la potencia promedio y potencia máxima, por día y a lo largo de una semana.

Tabla 25.- Potencia promedio y potencia máxima para cada día de la semana.⁸³

Día	Potencia promedio	Potencia máxima
	[W]	[W]
Lunes	2986.03	9349.33
Martes	3103.11	7805.33
Miércoles	3221.67	10036.00
Jueves	3277.19	10328.00
Viernes	2849.88	9796.67
Sábado	459.61	2280.00
Domingo	352.94	1000.00

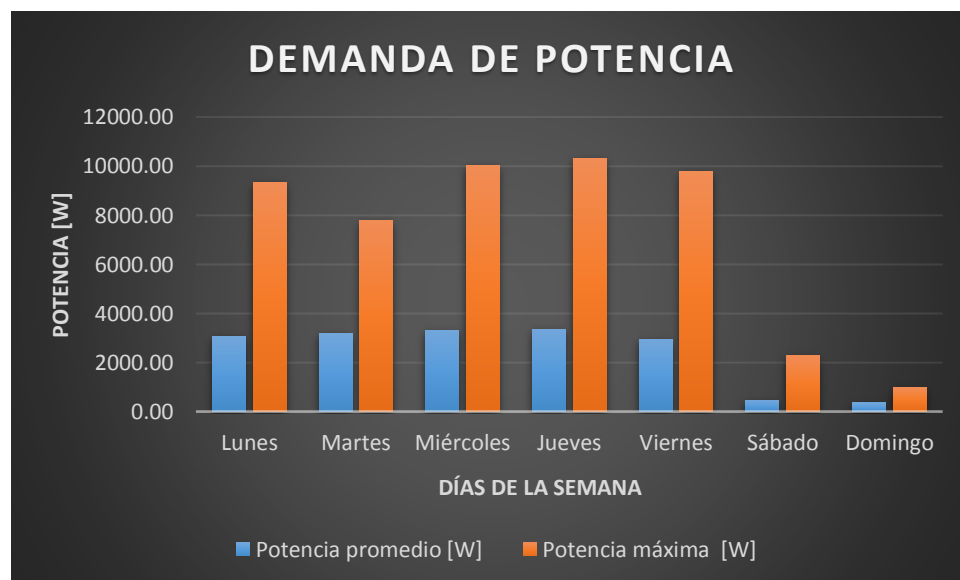


Figura 30.- Potencia promedio y potencia máxima semanal.⁸⁴

⁸³ Elaboración propia.

⁸⁴ Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 24, al tener una demanda de energía promedio de 57.09 kWh/día, donde para un año regular (multiplicando por 365) se tendría una demanda de 20837.85 kWh/año. En nuestro caso el año es irregular por lo que se ajustaría la demanda anual de energía descartando los días de aquellos ambientes en los que no existan labores en temporadas vacacionales.

Para el ajuste se ha tomado en cuenta dos ciclos lectivos al año con una duración de 4.5 meses cada uno, lo que hace un total de 9 meses de labores académicas y administrativas. Para el resto de meses no se registran labores académicas pero sí existen labores administrativas, entonces para dicho tiempo sólo se considera la iluminación de los ambientes correspondientes.

En la tabla 26 se muestra la demanda energética de iluminación para un año irregular de la FIME:

Tabla 26.- Demanda Energética Anual.⁸⁵

Mes	# de días	Demanda Total de Energía [kWh/mes]
Enero	31	1727.19
Febrero	28	1560.04
Marzo	31	1727.19
Abril	30	1671.47
Mayo	31	960.68
Junio	30	180.33
Julio	31	1727.19
Agosto	31	1727.19
Septiembre	30	1671.47
Octubre	31	1727.19
Noviembre	30	925.90
Diciembre	31	187.25
Total	365	15793.09

Entonces como se explicó anteriormente, en un año irregular como en el caso de la FIME se tiene una demanda anual promedio de 15793.09 kWh/año para iluminación.

⁸⁵ Elaboración propia.

5.2. Cálculo del potencial energético del lugar

La data tomada para la realización del siguiente trabajo de investigación fue la información existente registrada en el 2015, dentro de las delimitaciones del proyecto, por la estación meteorológica semiprofesional de la facultad; de igual forma, aquellos diseños de sistemas híbridos que permiten combinar las diferentes formas fuentes de para un mejor aprovechamiento.

5.2.1. Cálculo del potencial eólico

Siguiendo el modelo estadístico de la probabilidad de Weibull, se procede a evaluar mes a mes el potencial eólico en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

A continuación se explica a detalle el procedimiento para obtención de los parámetros estadísticos para el mes de enero, el cual es análogo al procedimiento de obtención de parámetros para los demás meses del año.

Utilizando las ecuaciones de la sección 2.7.3.2, se trazan los valores de X e Y en una gráfica tal y como se muestra en la figura 31:

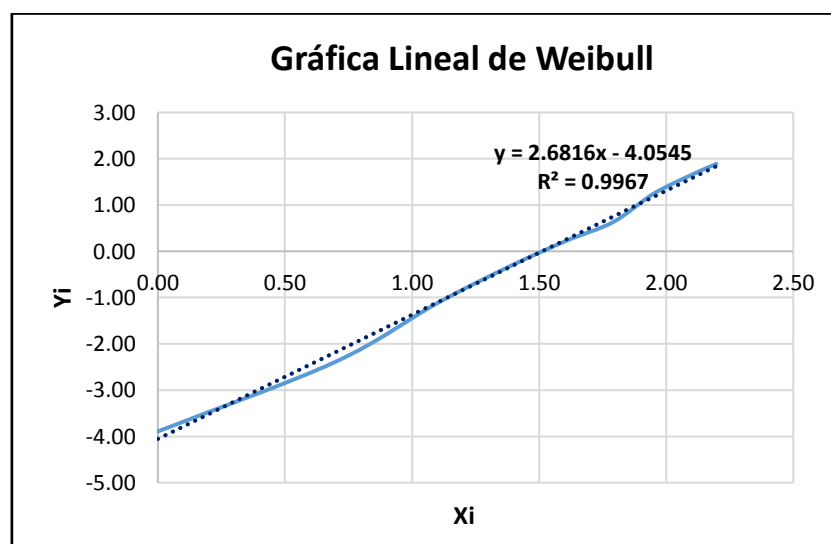


Figura 31.- Gráfica de Weibull para determinar los parámetros del mes de enero.⁸⁶

⁸⁶ Elaboración propia.

En la figura anterior, se aprecia la siguiente ecuación de la recta de ajuste para los valores dados:

$$Y = 2.6816X - 4.0545$$

La recta construida en la figura anterior corresponde a la forma dada en la ecuación 2.8, identificando los términos correspondientes se deduce que:

$$k = 2.6816$$

Usando la ecuación 2.11 se tiene:

$$c = 4.535659$$

Para determinar el valor de $k = 2.6816$, se debe realizar una interpolación entre los valores de $k = 2.5$ y $k = 3.0$ de la segunda columna de la tabla 27.

Tabla 27.- Valores de la función gamma respecto al parámetro k .⁸⁷

k	$r \left(1 + \frac{1}{k}\right) = \frac{\bar{U}}{c}$	$r^k \left(1 + \frac{1}{k}\right)$	G	$\frac{G}{r^k} \left(1 + \frac{1}{k}\right)$
1.00	1.000000	1.000000	1.002000	100.25%
1.25	0.931384	0.914978	0.915200	100.02%
1.50	0.902745	0.857724	0.857333	99.95%
1.60	0.896574	0.839727	0.839250	99.94%
1.70	0.892244	0.823802	0.823294	99.94%
1.80	0.889287	0.809609	0.809111	99.94%
1.90	0.887363	0.796880	0.796421	99.94%
2.00	0.886227	0.785398	0.785000	99.95%
2.10	0.885694	0.774989	0.774667	99.96%
2.20	0.885625	0.765507	0.765273	99.97%
2.30	0.885915	0.756835	0.756696	99.98%
2.40	0.886482	0.748873	0.748833	100.00%
2.50	0.887264	0.741535	0.741600	100.01%
3.00	0.892979	0.712073	0.712667	100.08%
3.50	0.899747	0.690910	0.692000	100.16%
4.00	0.906402	0.674970	0.676500	100.23%

La velocidad media \bar{U} en función de los parámetros k y c , se define como:

⁸⁷ Tabla redactada con información de la referencia [8] pág. 39, Fig. 3.8.

$$\bar{U} = c * \Gamma_{\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (5.3)$$

Entonces, interpolando para $k = 2.6816$:

$$\Gamma_{\left(1+\frac{1}{k}\right)} = \frac{\bar{U}}{c} = 0.8908$$

Por lo tanto para un valor de $c = 4.535659$:

$$\bar{U} = 4.0405 \text{ m/s.}$$

El valor de la velocidad media obtenido, no es el igual a la media aritmética de todos los valores que tenemos, y que usualmente es un tanto más elevado, sino que es el valor que nos indica que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de $\bar{U} = 4.0405 \text{ m/s}$ y la otra mitad soplará a más de $\bar{U} = 4.0405 \text{ m/s}$.

Se realizó el mismo procedimiento para los demás meses del año, y se obtienen sus respectivos parámetros estadísticos, los que se resumen en la tabla 28.

Tabla 28.- Valores de los parámetros estadísticos de todos los meses.⁸⁸

Mes	k	c	U
Enero	2.6816	4.535659	4.040498
Febrero	2.9619	4.326545	3.862401
Marzo	2.5143	4.315598	3.839586
Abril	2.7530	4.704544	4.193213
Mayo	3.0431	4.543152	4.059567
Junio	2.7384	4.641251	4.136342
Julio	2.8868	4.585174	4.090959
Agosto	2.7324	4.731653	4.216718
Septiembre	2.3815	4.373583	3.887253
Octubre	2.7093	4.726947	4.211786
Noviembre	2.8270	4.589499	4.092965
Diciembre	2.6768	4.547464	4.050866

Con los valores de la tabla 28 y la ecuación 2.5, se determina la probabilidad y cantidad de horas en que incide el viento con un determinado valor de velocidad. Multiplicando el porcentaje obtenido por la cantidad de horas de cada mes, se determina la cantidad de horas mensuales para cada valor de velocidad, según la distribución de horas a lo largo del año, mostrada en la tabla 29.

⁸⁸ Elaboración propia.

Tabla 29.- Cantidad de horas por mes para un año estándar de 8760 horas.⁸⁹

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cantidad de Horas	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744

Los porcentajes de probabilidad obtenidos y la cantidad de horas mensuales para cada valor de velocidad a lo largo del año, se resume en la tabla 30 y en la tabla 31 respectivamente.

Tabla 30.- Porcentaje de incidencia del viento a lo largo del año para un determinado valor de velocidad.⁹⁰

U (m/s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	4.57	3.82	6.20	3.82	3.01	4.03	3.51	3.85	6.88	3.97	3.76	4.56
2	13.35	13.61	15.73	11.88	11.54	12.36	12.01	11.81	15.82	11.95	12.27	13.29
3	21.21	23.80	22.50	19.90	21.62	20.41	21.08	19.66	21.52	19.68	20.97	21.10
4	23.44	26.57	22.73	23.22	26.19	23.42	24.79	22.95	21.45	22.81	24.32	23.35
5	19.01	19.59	17.11	19.96	21.36	19.70	20.53	19.87	16.56	19.69	20.15	19.01
6	11.39	9.33	9.72	12.71	11.49	12.23	11.90	12.86	10.08	12.78	11.91	11.47
7	4.99	2.75	4.15	5.93	3.90	5.53	4.71	6.16	4.86	6.19	4.92	5.08
8	1.57	0.48	1.32	1.99	0.79	1.79	1.23	2.15	1.86	2.20	1.38	1.63
9	0.35	0.05	0.31	0.47	0.09	0.41	0.20	0.54	0.56	0.56	0.26	0.37
10	0.05	0.00	0.05	0.08	0.01	0.06	0.02	0.09	0.13	0.10	0.03	0.06
11	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 31.- Horas al mes para un determinado valor de velocidad a lo largo del año.⁹¹

U (m/s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL
1	34.01	25.65	46.17	27.52	22.39	29.03	26.15	28.67	49.56	29.53	27.04	33.96	379.67
2	99.31	91.45	117.05	85.54	85.85	88.98	89.37	87.89	113.90	88.94	88.38	98.87	1135.52
3	157.80	159.96	167.39	143.30	160.86	146.99	156.82	146.30	154.95	146.43	151.01	156.99	1848.79
4	174.38	178.53	169.12	167.21	194.88	168.62	184.47	170.72	154.41	169.68	175.13	173.75	2080.90
5	141.41	131.66	127.33	143.69	158.94	141.87	152.74	147.80	119.21	146.51	145.07	141.47	1697.68
6	84.72	62.73	72.30	91.50	85.48	88.05	88.52	95.67	72.59	95.10	85.73	85.35	1007.76
7	37.14	18.49	30.88	42.69	29.02	39.84	35.02	45.87	35.02	46.03	35.44	37.81	433.24
8	11.71	3.20	9.84	14.31	5.89	12.90	9.14	16.01	13.37	16.36	9.96	12.10	134.78
9	2.61	0.31	2.31	3.37	0.67	2.92	1.51	3.99	4.02	4.19	1.85	2.74	30.49
10	0.40	0.02	0.40	0.55	0.04	0.45	0.15	0.69	0.95	0.76	0.22	0.43	5.05
11	0.04	0.00	0.05	0.06	0.00	0.05	0.01	0.08	0.17	0.09	0.02	0.05	0.62
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.06

⁸⁹ Elaboración propia.⁹⁰ Elaboración propia.⁹¹ Elaboración propia.

5.2.2. Cálculo del potencial solar

Para la evaluación del potencial solar se empleó un modelo matemático con el que se trabajaron los promedios mensuales (tabla 32), obteniendo la radiación solar máxima para un ángulo de inclinación óptimo de los módulos fotovoltaicos.

Tabla 32.- Promedios mensuales de irradiancia y radiación global en el plano horizontal al día en la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.⁹²

Mes	Promedio Mensual de Irradiancia [W/m ²]	Radiación Global en el plano Horizontal al día [kWh/m ² día]
Enero	259.028	5.570
Febrero	270.628	5.819
Marzo	272.661	5.863
Abril	232.837	5.007
Mayo	173.740	3.736
Junio	154.868	3.330
Julio	177.034	3.807
Agosto	186.503	4.010
Septiembre	223.405	4.804
Octubre	236.826	5.092
Noviembre	254.682	5.476
Diciembre	258.790	5.565
Promedio Anual	225.083	4.840

Bajo el modelo matemático, para determinar la mayor radiación posible, se obtiene un ángulo óptimo de inclinación de 9° en dirección norte (Anexo E), es decir, la superficie inclinada del panel se encontrará orientada hacia el norte con una inclinación de 9° respecto a la horizontal. En la tabla 33 se detalla los valores de radiación global diaria promedio para dicha inclinación.

Para días despejados y con atmósfera muy limpia, rara vez se realizan mediciones de irradiancia con valores superiores a los 1000 W/m². Este valor ha sido adoptado por la industria como estándar para indicar las características de operación de paneles solares.

La irradiancia varía a lo largo de un día, desde que amanece hasta que anochece. La figura 32 muestra una variación típica de la irradiancia solar en un día. El área bajo la curva es la energía radiante incidente en Wh/m² de superficie.

⁹² Elaboración propia.

Tabla 33.- Radiación global diaria promedio para una inclinación óptima de 9° .⁹³

Mes	β_{opt}
Enero	5.323
Febrero	5.688
Marzo	5.917
Abril	5.240
Mayo	4.002
Junio	3.609
Julio	4.124
Agosto	4.224
Septiembre	4.905
Octubre	5.030
Noviembre	5.267
Diciembre	5.284
PROMEDIO	4.884
ENERGIA ANUAL [kWh/m ²]	1782.797

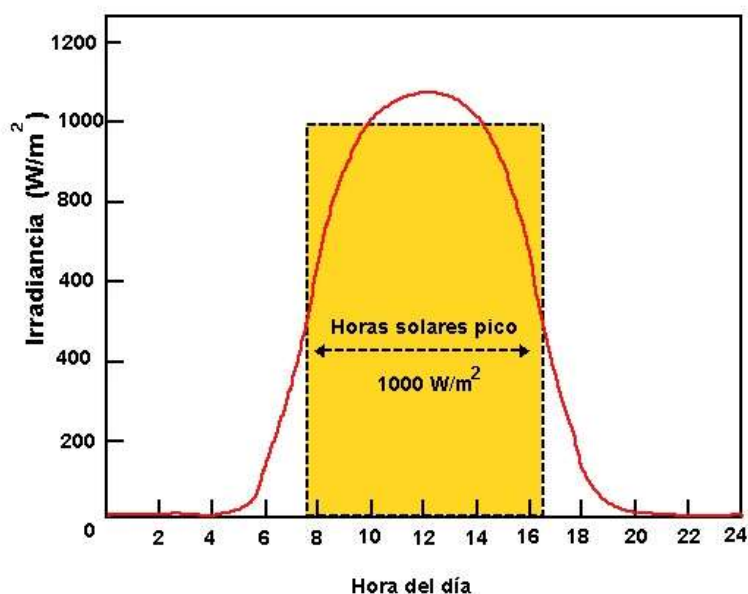


Figura 32.- Variación de la irradiación solar en un día.⁹⁴

Dividiendo esta área entre el valor estándar de irradiación de 1000 W/m² se obtiene un número de horas efectivas al día (NHE), en las cuales dicho lugar estaría recibiendo la intensidad radiante estándar de 1000 W/m².

⁹³ Elaboración propia, utilizando la información presentada en la tabla E.6 del anexo E.

⁹⁴ Figura obtenida de la referencia [12], pág. 15, fig. 03.

En la tabla 34 se muestran los números de horas efectivas al día de radiación estándar para cada mes del año, y en la figura 33 se aprecia su variación anual.

Tabla 34.- Número de horas efectivas al día de radiación estándar, por meses.⁹⁵

Mes	NHE
Enero	5.323
Febrero	5.688
Marzo	5.917
Abril	5.240
Mayo	4.002
Junio	3.609
Julio	4.124
Agosto	4.224
Septiembre	4.905
Octubre	5.030
Noviembre	5.267
Diciembre	5.284
NHE promedio [h]	4.884
NHE anuales [h]	1782.797

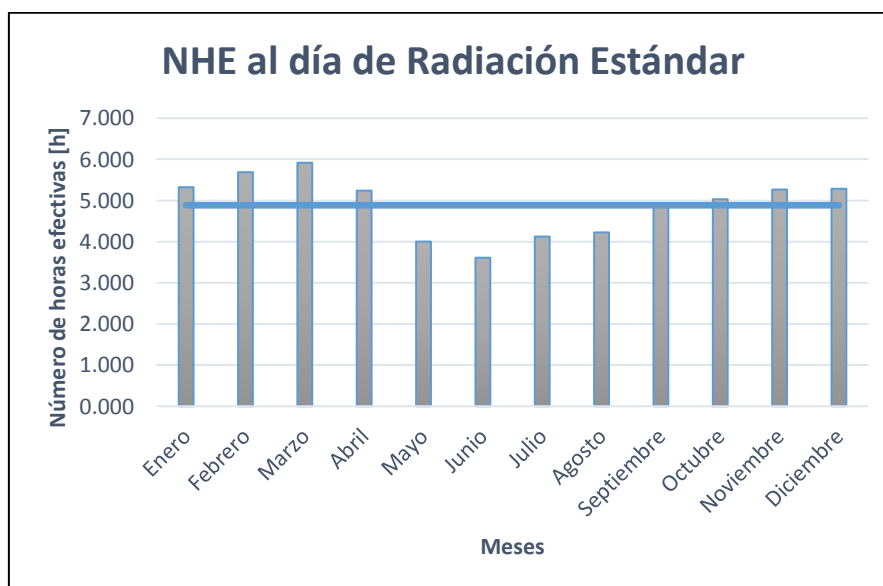


Figura 33.- NHE de radiación para un ángulo de inclinación de 9°.⁹⁶

Como se observa en los gráficos, en Lambayeque durante el invierno el viento es más abundante y la radiación solar es baja, mientras que durante el verano ocurre lo contrario para ambos casos. Entonces debido a que los picos de

⁹⁵ Elaboración propia.

⁹⁶ Elaboración propia.

operación de los sistemas eólicos y fotovoltaicos ocurren en diferentes etapas del año y del día, un sistema de autoconsumo de conexión a red, conformado por estas dos fuentes renovables, sería una buena opción con alta probabilidad de aportación a lo largo del día y durante todo el año. Esta característica de complementariedad de las fuentes energéticas a lo largo del año es la principal ventaja que ofrece un sistema híbrido eólico-solar conectado a red, en comparación a la instalación en forma individual de un sistema fotovoltaico y un sistema eólico. Esta combinación de fuentes convierte a este tipo de sistemas en la alternativa ideal, incluso, para proyectos destinados a la electrificación de zonas aisladas, siempre y cuando se cuente con un volumen importante de los recursos renovables.

A continuación se resumen los resultados obtenidos:

- La radiación global diaria promedio, a lo largo del año y para un ángulo óptimo de 9° , fue de 4.884 kWh/m² - día. Esto quiere decir que la mayor radiación se captará para una inclinación de 9° hacia el norte. Se considera que la radiación en el lugar es moderada, aceptable.
- La determinó que la velocidad media del viento, a lo largo del año, y a una altura mínima de 15 m, fue de 4.06 m/s con una dirección 191° Sur - Sur Sudeste (Anexo D). Esto quiere decir que la mitad del tiempo la velocidad del viento estuvo por debajo de 4.06 m/s y la otra mitad por encima de este valor. Se observó de igual modo que la velocidad promedio del viento es de 4.5 a 5 m/s, lo que se considera moderadamente aceptable debido a que la gran mayoría de turbinas eólicas empiezan a generar energía eléctrica a partir de 3 m/s.

Por lo tanto, con el número de horas efectivas al día, y con el rendimiento por efecto de variación de la temperatura indicada por el fabricante, se podrá obtener la producción anual de energía por cada panel estudiado en esta tesis.

De igual manera, con las horas efectivas de viento para cada intervalo de velocidades, y con la curva de potencia brindada por el fabricante, se podrá determinar la energía eléctrica entregada por cada aerogenerador estudiado.

5.3. Dimensionamiento del sistema y selección de equipos

El cálculo de la demanda de energía se explica a detalle en la sección 5.1, y los resultados obtenidos permitieron determinar una demanda energética promedio a lo largo de un día.

Por poca disponibilidad de espacio para los equipos generadores y para evitar un sobredimensionamiento de conductores se ha decidido repartir la carga de iluminación para que sea cubierta por 2 sistemas híbridos de baja potencia (Tabla 35).

Cabe mencionar que a futuro existe la posibilidad de ser modificado por diversos factores como cubrir una mayor parte de la demanda total de la facultad.

Tabla 35.- Distribución de cargas para cada sistema híbrido.⁹⁷

Grupo de cargas	Pabellón	Edificio
1	--	Nº1 Oficinas administrativas
	--	Nº2 Lab. de energía y máquinas térmicas
	--	Nº3 Lab. de electricidad y máquinas eléctricas
	--	Nº4 Parque energético
	A	Nº5 Pabellón de Cómputo
2	B	Nº6 Nuevo pabellón de laboratorios
	C	Nº7 Pabellón de aulas
	D	Nº8 Oficina general de Calidad Universitaria
		Nº9 Taller de Producción FIME

Al igual que en la Tabla 24, se determina la demanda promedio diario para cada grupo de cargas, tal y como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36.- Demanda promedio diaria, por grupos y total.⁹⁸

Grupo	Nº1	Nº2	TOTAL
Demanda diaria promedio [kWh]	27.210	28.51	55.72

A partir de estos valores, y siguiendo el mismo criterio de cálculo, se obtiene la demanda de energía en un año irregular de 365 días para que sea abastecida por dos sistemas híbridos. (Tabla 37)

⁹⁷ Elaboración propia.

⁹⁸ Elaboración propia.

Tabla 37.- Demanda energética mensual, por grupos.⁹⁹

Mes	# de días	Demanda Grupo #1	Demanda Grupo #2	Demanda Total de Energía [kWh/mes]
Enero	31	843.51	883.68	1727.19
Febrero	28	761.88	798.16	1560.04
Marzo	31	843.51	883.68	1727.19
Abril	30	816.30	855.17	1671.47
Mayo	31	490.84	469.84	960.68
Junio	30	127.83	52.50	180.33
Julio	31	843.51	883.68	1727.19
Agosto	31	843.51	883.68	1727.19
Septiembre	30	816.30	855.17	1671.47
Octubre	31	843.51	883.68	1727.19
Noviembre	30	472.06	453.84	925.90
Diciembre	31	133.00	54.25	187.25
Total	365	7835.77	7957.33	15793.09

Para el dimensionamiento y selección de equipos, en cada sistema se ha considerado una demanda 10% mayor; todo esto para cubrir aquellas pérdidas que no hayan sido previstas, como la eficiencia del inversor y la disminución del rendimiento del sistema, propias del envejecimiento.

5.3.1. Selección de equipos

A manera de resumen se realizará el proceso de dimensionamiento analizando diferentes combinaciones de equipos existentes en el mercado nacional e internacional para cubrir la demanda del primer grupo de cargas, y al final de esta sección se mostrarán las combinaciones seleccionadas para ambos grupos.

En los gráficos mostrados desde la figura 34 a la figura 36, se visualizan todas las combinaciones de equipos estudiados, presentes en el mercado nacional e internacional, capaces de cubrir la demanda para el primer sistema híbrido. A partir de ellos se seleccionarán las mejores alternativas y se analizarán según los criterios especificados en la figura 38, con la finalidad de encontrar la mejor opción entre todas. De igual forma se hará una evaluación para cubrir la demanda asignada para el segundo sistema híbrido.

⁹⁹ Elaboración propia.

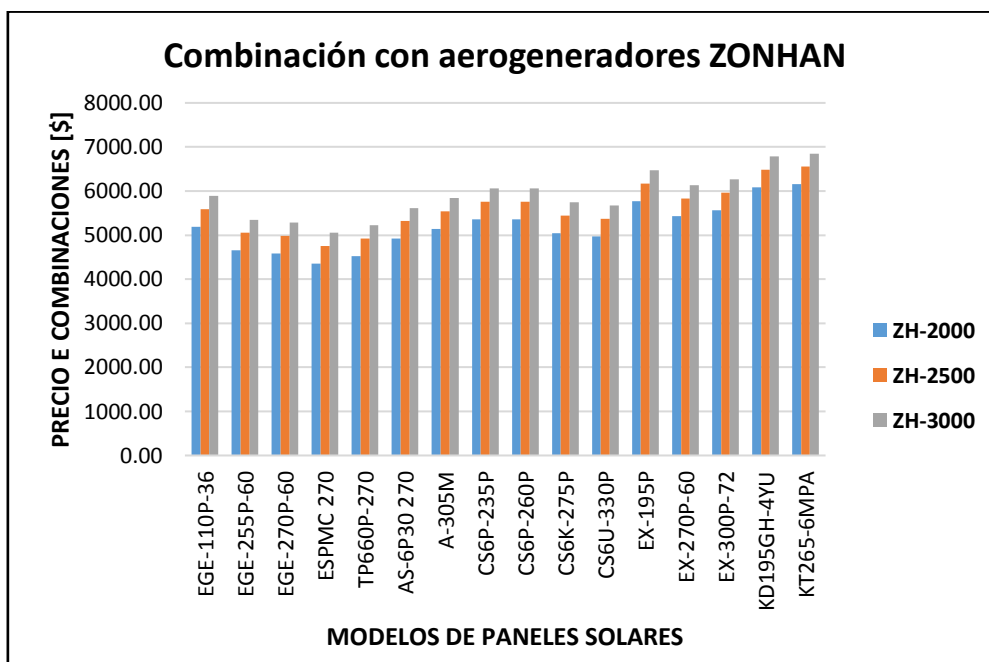


Figura 34.- Combinación de paneles solares con aerogeneradores Zonhan.¹⁰⁰

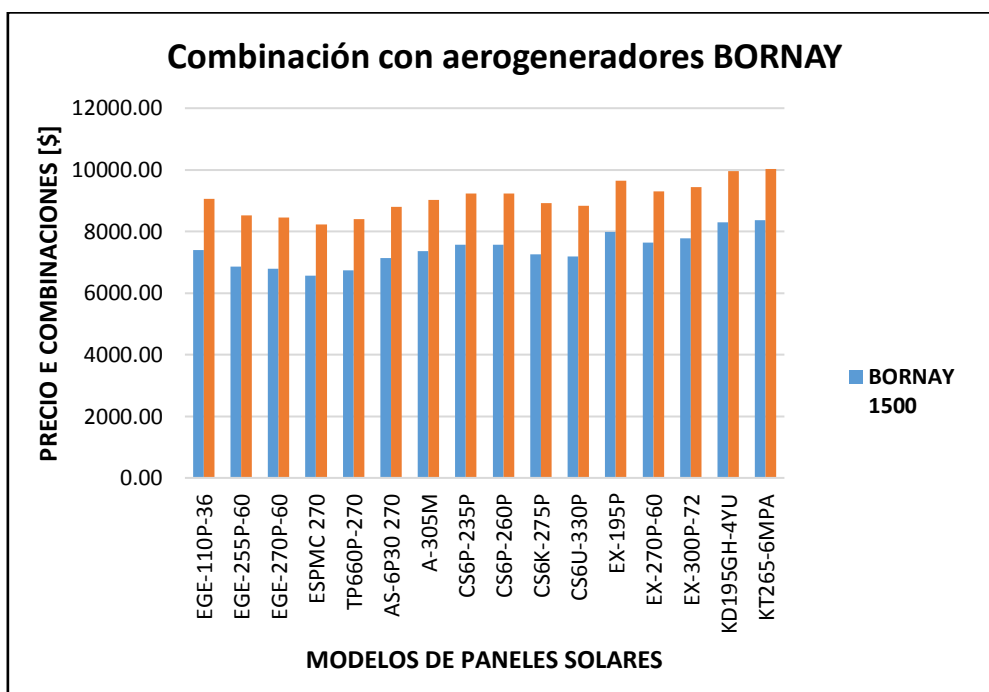


Figura 35.- Combinación de paneles solares con aerogeneradores Bornay.¹⁰¹

¹⁰⁰ Elaboración propia

¹⁰¹ Elaboración propia.

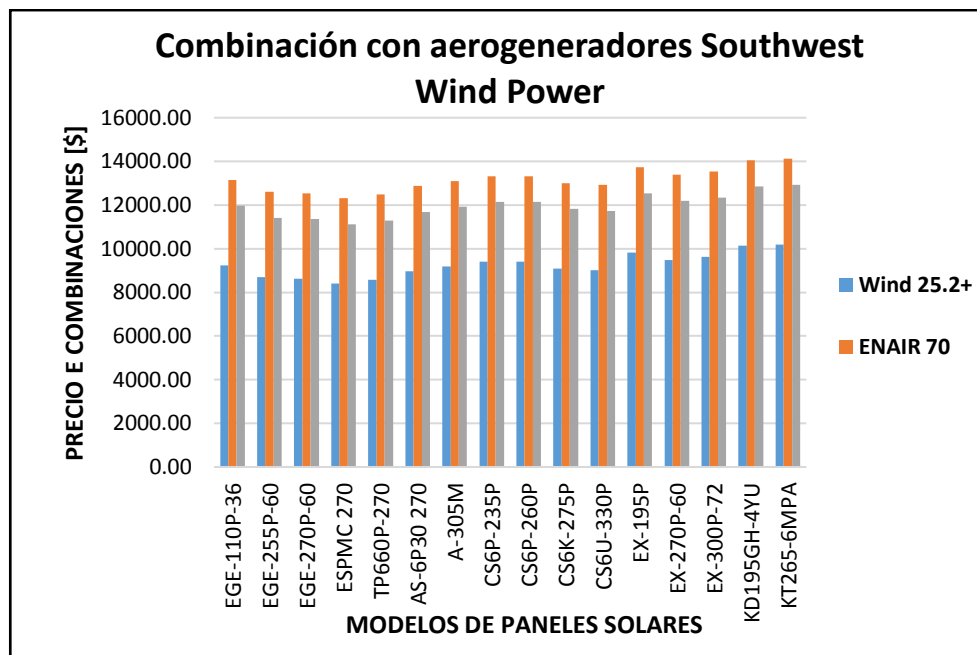


Figura 36.- Combinación de paneles solares con aerogeneradores Southwest Wind.¹⁰²

Se aprecia que las combinaciones presentadas en la figura 34 son aquellas que muestran los mejores precios, con diferencias que fluctúan entre los 4000 y 7000 dólares, si son comparadas con aquellas combinaciones presentadas en las figuras 35 y 36.

Se seleccionarán 3 de las 48 combinaciones mostradas anteriormente en la figura 34, y que al mismo tiempo sean la mejor opción para cada uno de los 3 modelos de aerogeneradores presentados en el gráfico.

Para realizar una adecuada selección, se elegirá a aquellas que posean el menor costo de adquisición y que tengan una adecuada compatibilidad técnica entre todos sus componentes. Posteriormente se realizará una comparación entre la energía generada por cada sistema seleccionado y la demanda energética mensual.

También serán analizados sistemas 100% fotovoltaicos y sistemas 100% eólicos, para poder comparar las diferencias entre ellos, aquella combinación que tenga el mejor ajuste se elegirá como el sistema híbrido a utilizar. En la tabla 38, que se muestra a continuación, se aprecia la cantidad de paneles que serían requeridos por cada modelo para cubrir la demanda anual promedio.

¹⁰² Elaboración propia.

Tabla 38.- Número de paneles solares requeridos por cada modelo para cubrir la demanda energética anual, para el Grupo 1.¹⁰³

Item	Marca	Modelo	Energía [kWh anual]	Precio unitario [\$]	Cantidad	Precio total [\$]
1	Eco Green Energy	EGE-50P-36	79.37	90.00	109	9810.00
2	Eco Green Energy	EGE-110P-36	174.61	100.00	50	5000.00
3	Eco Green Energy	EGE-255P-60	404.78	180.00	22	3960.00
4	Eco Green Energy	EGE-270P-60	428.59	190.00	21	3990.00
5	Era Solar	ESPMC 270	428.59	169.36	21	3556.55
6	Talesum	TP660P-270	427.39	184.63	21	3877.13
7	AmeriSolar	AS-6P30 270	427.39	220.71	21	4634.97
8	VICTRON ENERGY	SPP81-12	126.99	141.79	68	9641.64
9	VICTRON ENERGY	SPP101-12	158.74	177.91	55	9784.97
10	ATERSA	A-150P	238.11	187.87	37	6951.11
11	ATERSA	A-305M	484.15	265.35	18	4776.24
12	Canadian Solar	CS6P-235P	365.34	220.80	24	5299.20
13	Canadian Solar	CS6P-260P	404.21	239.20	22	5262.40
14	Canadian Solar	CS6K-275P	427.53	232.20	21	4876.20
15	Canadian Solar	CS6U-330P	513.04	275.20	17	4678.40
16	EXIOM	EX-195P	308.67	218.75	28	6124.96
17	EXIOM	EX-270P-60	418.58	267.35	21	5614.40
18	EXIOM	EX-300P-72	465.09	307.86	19	5849.38
19	KYOCERA	KD195GH-4YU	303.16	224.50	29	6510.36
20	KYOCERA	KT265-6MPA	411.98	305.24	21	6410.09
21	Nousol	NSL90M	142.86	225.10	61	13730.90
22	Nousol	NSL195M	308.67	344.12	28	9635.46
23	Nousol	NSL250P	395.74	415.95	22	9150.90

Según las capacidades mostradas anteriormente, se han preseleccionado 6 combinaciones capaces de satisfacer la demanda anual requerida para el primer grupo de cargas.

A continuación se detallan los equipos que las conforman, su compatibilidad técnica para su interconexión, y el mejor ajuste mensual entre la energía generada por cada uno.

Para la selección de equipos en cada combinación se tuvo en cuenta el método del peor mes:

¹⁰³ Elaboración propia.

5.3.1.1. Primera Combinación

Esta combinación se encuentra conformada por los siguientes equipos:

Tabla 39.- Primera combinación y datos generales de los equipos que la conforman.¹⁰⁴

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Aerogenerador	Zonhan	ZH-2500	1	2890.00	2890.00
Panel solar	Era Solar	ESPMC 270	16	169.36	2709.75
Controlador eólico	Ningbo Ginlong T Co.	GCB-20K	1	883.82	883.82
Inversor Híbrido.	Yueqing Zonhan Windpower Co	GC-10K	1	2955.90	2955.90
TOTAL				1ra	9439.47

Luego se detallan los datos de compatibilidad entre los equipos principales de esta combinación:

Tabla 40.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan-2500 con equipos de conexión a red.¹⁰⁵

Equipo	Aerogenerador	Controlador eólico		Inversor Híbrido.	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Voltaje	230 Vac	30-500 Vac	30-750 Vcd	30-750 V	220/230 V
Corriente máx.	13.0	40 Aac	40 Adc+30 Arms	33 A	14.5 A
Potencia nominal	2500	20 kW	8 kW	9500 W	10000 W
Potencia máxima	3000	20 kW	12 kW	11000 W	10000 W

Tabla 41.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Era Solar ESPMC 270 con equipos de conexión a red.¹⁰⁶

Equipo	Arreglo PV			Inversor Solar H.	
	Panel solar	String 1	String 2	Entrada	Salida
Voltaje	31.8 Vdc	254.4 Vdc	254.4 Vdc	250-820 V	220/230 V
Corriente máx.	8.5 Adc	8.5 Adc	8.5 Adc	22 A	14.5 A
Potencia nominal	< 270 W	< 2160 W	< 2160 W	9500 W	10000 W
Potencia máxima	270 Wp	4320 Wp		11000 W	10000 W

Los paneles solares han sido conectados en serie y siguiendo la técnica del salto de rana, de esta manera se ha podido alcanzar el voltaje necesario para ser

¹⁰⁴ Elaboración propia.

¹⁰⁵ Elaboración propia.

¹⁰⁶ Elaboración propia.

conectados junto al inversor híbrido y a la vez se ha ahorrado unos cuantos metros de conductor.

La energía eléctrica generada por el viento se calcula utilizando la ecuación 3.11 con la información de la tabla 31, donde se aprecian las horas mensuales para un determinado valor de velocidad a lo largo del año, y con los valores de la curva de potencia del aerogenerador Zonhan ZH-2500, detallados en la tabla F.2 del anexo F.

La energía eléctrica generada por la luz del sol se calcula utilizando la ecuación 3.14 con la información de la tabla 34, donde se aprecia el número de horas efectivas al día de radiación solar estándar a lo largo del año, y con los valores de potencia máxima y rendimientos del panel solar ESPMC 270, detallados en la tabla F.12 del anexo F.

En la tabla 42 se presenta la comparación entre la energía generada por la primera combinación y la demanda energética mensual.

Tabla 42.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la primera combinación.¹⁰⁷

Mes	Demanda total de energía [kWh/mes]	Energía eólica aprovechada [kWh/mes]	Energía solar aprovechada [kWh/mes]	Diferencia [kWh/mes]
Enero	843.51	342.18	634.71	133.38
Febrero	761.88	281.40	612.62	132.14
Marzo	843.51	312.96	705.53	174.98
Abril	816.30	353.99	604.61	142.30
Mayo	490.84	341.83	477.18	328.17
Junio	127.83	345.30	416.49	633.96
Julio	843.51	348.12	491.72	-3.67
Agosto	843.51	369.81	503.65	29.96
Septiembre	816.30	312.54	566.00	62.25
Octubre	843.51	369.29	599.84	125.62
Noviembre	472.06	337.70	607.73	473.37
Diciembre	133.00	343.89	630.12	841.01
TOTAL	7835.77	4059.02	6850.20	3073.45

¹⁰⁷ Elaboración propia.

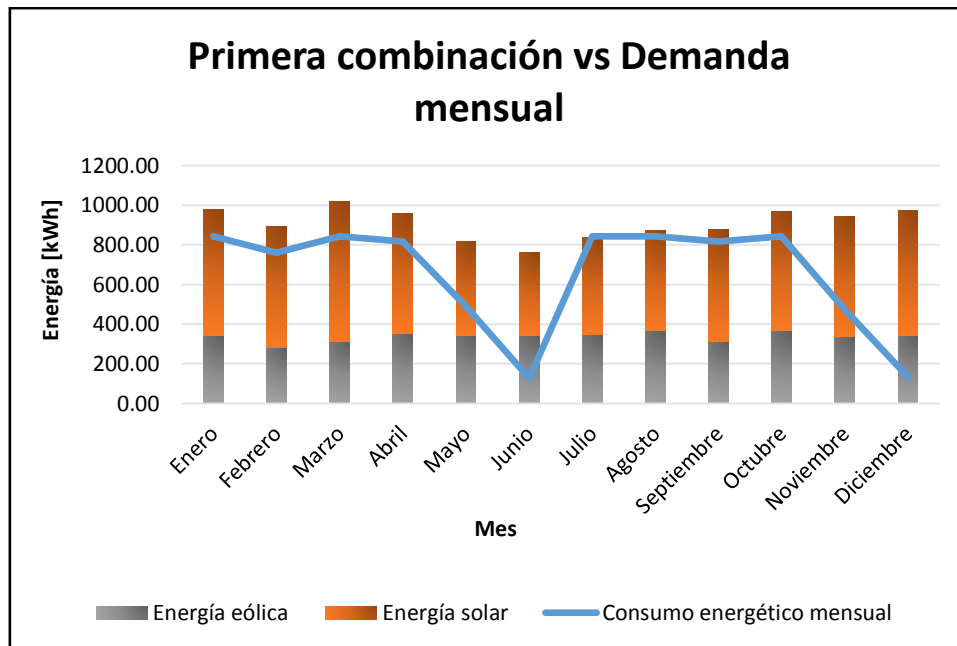


Figura 37.- Energía producida por la primera combinación vs demanda mensual.¹⁰⁸

En la tabla 42 y figura 37 se aprecia que el sistema híbrido tiene la capacidad de cubrir la demanda energética a lo largo de todo el año. La energía anual excedente es de 3073.45 kWh, los cuales se pueden utilizar por cualquiera de las dos modalidades de la primera representación del tratamiento de excedentes energéticos, explicados en la sección 2.8. Para nuestro caso estos excedentes serían vertidos dentro de la red de la universidad para ser aprovechados por otras cargas.

Considerando la cantidad total de energía producida, la energía solar representa el 62.79% y la eólica el 37.21% del total. La potencia nominal del sistema es de 6820 W. El valor de la energía y potencia, considerando solamente el costo de adquisición de los equipos principales, es de 0.87 \$/kWh y 1.38 \$/kW respectivamente.

Mediante el mismo procedimiento de cálculo se realizará el análisis de las demás combinaciones.

¹⁰⁸ Elaboración propia.

5.3.1.2. Segunda combinación

Esta combinación se encuentra conformada por los siguientes equipos:

Tabla 43.- Segunda combinación y datos generales de los equipos que la conforman.¹⁰⁹

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Aerogenerador	Zonhan	ZH-2500	1	2890.00	2890.00
Panel solar	Canadian Solar	CS6U-330P	14	275.20	3852.80
Controlador eólico	Ningbo Ginlong T Co.	GCB-20K	1	883.82	883.82
Inversor Híbrido.	Yueqing Zonhan Windpower Co	GC-10K	1	2955.90	2955.90
TOTAL				2da	10582.52

Luego se detallan los datos de compatibilidad entre los equipos principales de esta combinación:

Tabla 44.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan-2500 con equipos de conexión a red.¹¹⁰

Equipo	Aerogenerador	Controlador eólico		Inversor Híbrido.	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Voltaje	230 Vac	30-500 Vac	30-750 Vcd	30-750 V	220/230 V
Corriente máx.	13.0	40 Aac	40 Adc+30 Arms	33 A	14.5 A
Potencia nominal	2500	20 kW	8 kW	9500 W	10000 W
Potencia máxima	3000	20 kW	12 kW	11000 W	10000 W

Tabla 45.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Canadian Solar CS6U-330P con equipos de conexión a red.¹¹¹

Equipo	Arreglo PV			Inversor Solar H.	
	Panel solar	String 1	String 2	Entrada	Salida
Voltaje	37.2 Vdc	260.4 Vdc	260.4 Vdc	250-820 V	220/230 V
Corriente máx.	8.88 Adc	8.88 Adc	8.88 Adc	22 A	14.5 A
Potencia nominal	< 330 W	< 2310 W	< 2310 W	9500 W	10000 W
Potencia máxima	330 Wp	4620 Wp		11000 W	10000 W

Los paneles solares han sido conectados en serie y siguiendo la técnica del salto de rana, de esta manera se ha podido alcanzar el voltaje necesario para ser conectados junto al inversor híbrido y a la vez se ha ahorrado unos cuantos

¹⁰⁹ Elaboración propia.

¹¹⁰ Elaboración propia.

¹¹¹ Elaboración propia.

metros de conductor. A continuación se presenta la comparación entre la energía generada por la segunda combinación y la demanda energética mensual.

Tabla 46.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la segunda combinación.¹¹²

Mes	Demanda total de energía [kWh/mes]	Energía eólica aprovechada [kWh/mes]	Energía solar aprovechada [kWh/mes]	Diferencia [kWh/mes]
Enero	843.51	342.18	664.80	163.46
Febrero	761.88	281.40	641.65	161.17
Marzo	843.51	312.96	738.96	208.41
Abril	816.30	353.99	633.27	170.95
Mayo	490.84	341.83	499.79	350.78
Junio	127.83	345.30	436.23	653.70
Julio	843.51	348.12	515.02	19.63
Agosto	843.51	369.81	527.52	53.83
Septiembre	816.30	312.54	592.83	89.07
Octubre	843.51	369.29	628.26	154.04
Noviembre	472.06	337.70	636.53	502.17
Diciembre	133.00	343.89	659.99	870.87
TOTAL	7835.77	4059.02	7174.86	3398.11

En la figura 38 se visualiza de manera gráfica el ajuste entre la demanda energética mensual y la energía generada por el sistema híbrido.

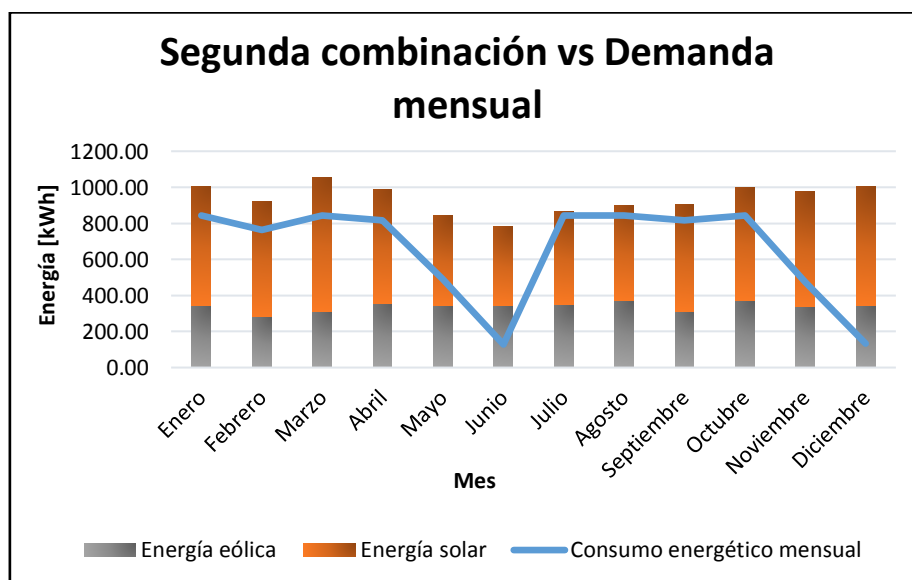


Figura 38.- Energía producida por la segunda combinación vs demanda mensual.¹¹³

¹¹² Elaboración propia.

¹¹³ Elaboración propia.

En este caso la combinación 2 también tiene la capacidad de cubrir la demanda energética a lo largo de todo el año. La energía anual excedente es de 3308.11 kWh, los cuales se pueden utilizar por cualquiera de las dos modalidades de la primera representación del tratamiento de excedentes energéticos, explicados en la sección 2.8. Para esta combinación la energía solar aprovechada representa el 63.87% y la eólica el 36.13% del total. La potencia nominal del sistema es de 7120 W. El valor de la energía y potencia, considerando solamente el costo de adquisición de los equipos principales, es de 0.94 \$/kWh y 1.49 \$/kW respectivamente.

5.3.1.3. Tercera combinación

Esta combinación se encuentra conformada por los siguientes equipos:

Tabla 47.- Tercera combinación y datos generales de los equipos que la conforman.¹¹⁴

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Aerogenerador	Zonhan	ZH-3000	1	3190.00	3190.00
Panel solar	Era Solar	ESPMC 270	16	169.36	2709.75
Controlador eólico	Ningbo Ginlong T Co.	GCB-20K	1	883.82	883.82
Inversor Híbrido.	Yueqing Zonhan Windpower Co	GC-10K	1	2955.90	2955.90
TOTAL				3ra	9739.47

Luego se detallan los datos de compatibilidad entre los equipos principales de esta combinación:

Tabla 48.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan-3000 con equipos de conexión a red.¹¹⁵

Equipo	Aerogenerador	Controlador eólico		Inversor Híbrido.	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Voltaje	230 Vac	30-500 Vac	30-750 Vcd	30-750 V	220/230 V
Corriente máx.	15.2	40 Aac	40 Adc+30 Arms	33 A	14.5 A
Potencia nominal	3000	20 kW	8 kW	9500 W	10000 W
Potencia máxima	3500	20 kW	12 kW	11000 W	10000 W

¹¹⁴ Elaboración propia.

¹¹⁵ Elaboración propia.

Tabla 49.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Era Solar ESPMC 270 con equipos de conexión a red.¹¹⁶

Equipo	Arreglo PV			Inversor Solar H.	
	Panel solar	String 1	String 2	Entrada	Salida
Voltaje	31.8 Vdc	254.4 Vdc	254.4 Vdc	250-820 V	220/230 V
Corriente máx.	8.5 Adc	8.5 Adc	8.5 Adc	22 A	14.5 A
Potencia nominal	< 270 W	< 2160 W	< 2160 W	9500 W	10000 W
Potencia máxima	270 Wp	4320 Wp			11000 W

Los paneles solares han sido conectados en serie y siguiendo la técnica del salto de rana, de esta manera se ha podido alcanzar el voltaje necesario para ser conectados junto al inversor híbrido y a la vez se ha ahorrado unos cuantos metros de conductor.

A continuación se presenta la comparación entre la energía generada por la combinación y la demanda energética mensual.

Tabla 50.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la tercera combinación.¹¹⁷

Mes	Demanda total de energía [kWh/mes]	Energía eólica aprovechada [kWh/mes]	Energía solar aprovechada [kWh/mes]	Diferencia [kWh/mes]
Enero	843.51	355.88	634.71	147.09
Febrero	761.88	290.95	612.62	141.69
Marzo	843.51	326.57	705.53	188.59
Abril	816.30	368.10	604.61	156.41
Mayo	490.84	352.88	477.18	339.22
Junio	127.83	358.94	416.49	647.60
Julio	843.51	360.46	491.72	8.67
Agosto	843.51	384.91	503.65	45.06
Septiembre	816.30	327.66	566.00	77.36
Octubre	843.51	384.60	599.84	140.93
Noviembre	472.06	350.13	607.73	485.80
Diciembre	133.00	357.74	630.12	854.86
TOTAL	7835.77	4218.83	6850.20	3233.26

En la figura 39 se visualiza de manera gráfica el ajuste mensual entre la demanda energética mensual y la energía generada por el sistema híbrido de esta combinación.

¹¹⁶ Elaboración propia.

¹¹⁷ Elaboración propia.

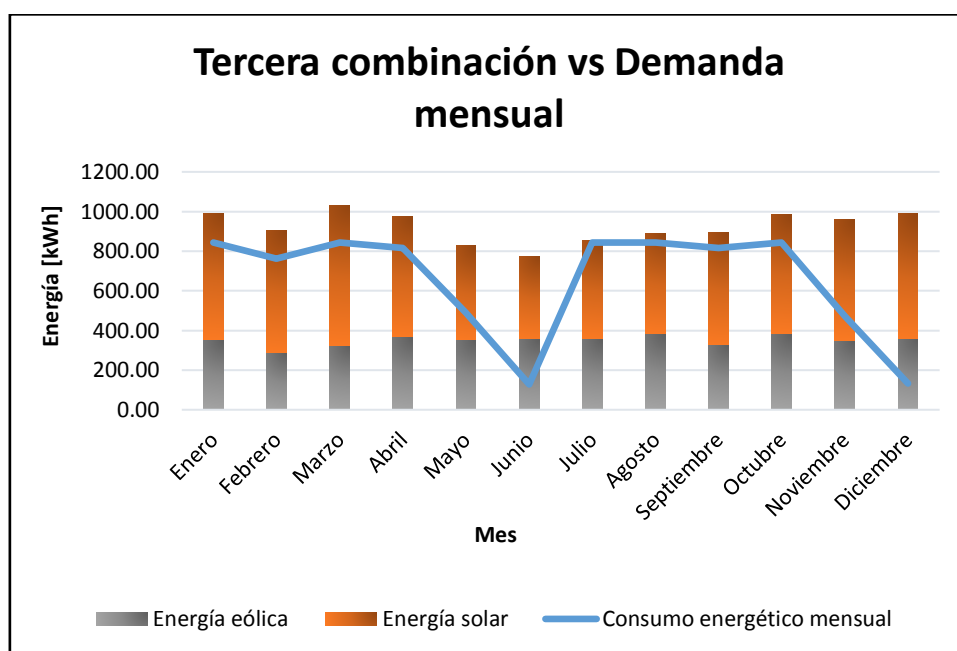


Figura 39.- Energía producida por la tercera combinación vs demanda mensual.¹¹⁸

En este caso la combinación 3 también tiene la capacidad de cubrir la demanda energética a lo largo de todo el año. La energía anual excedente es de 3233.26 kWh, los cuales se pueden utilizar según lo explicado en la sección 2.8. Para esta combinación la energía solar aprovechada representa el 38.11% y la eólica el 61.89% del total. La potencia nominal del sistema es de 7320 W. El valor de la energía y potencia, considerando solamente el costo de adquisición de los equipos principales, es de 0.88 \$/kWh y 1.33 \$/kW respectivamente.

5.3.1.4. Cuarta combinación

Esta combinación se encuentra conformada por los siguientes equipos:

¹¹⁸ Elaboración propia.

Tabla 51.- Cuarta combinación y datos generales de los equipos que la conforman.¹¹⁹

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Panel solar	Era Solar	ESPMC 270	28	169.36	4742.07
Inversor Solar H.	FRONIUS	PRIMO 6.0-1	1	2313.07	2313.07
TOTAL				4ta	7055.13

Luego se detallan los datos de compatibilidad entre los equipos principales:

Tabla 52.- Detalles de compatibilidad entre los paneles solares Era Solar ESPMC 270 con equipos de conexión a red.¹²⁰

Equipo	Arreglo PV			Inversor Solar H.	
	Panel solar	String 1	String 2	Entrada	Salida
Voltaje	31.8 Vdc	445.2 Vdc	445.2 Vdc	80 - 1000 V	230 V
Corriente máx.	8.5 Adc	8.5 Adc	8.5 Adc	18 A / 18 A	26.1 A
Potencia nominal	< 270 W	< 3780 W	< 3780 W	9000 W	6000 W
Potencia máxima	270 Wp	7560 Wp		9000 W	6000 W

Los paneles solares han sido conectados en serie y siguiendo la técnica del salto de rana, de esta manera se ha podido alcanzar el voltaje necesario para ser conectados junto al inversor híbrido y a la vez se ahorraría algunos metros de conductor.

Tabla 53.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la cuarta combinación.¹²¹

Mes	Demanda total de energía [kWh/mes]	Energía eólica aprovechada [kWh/mes]	Energía solar aprovechada [kWh/mes]	Diferencia [kWh/mes]
Enero	843.51	0.00	1110.75	267.24
Febrero	761.88	0.00	1072.08	310.20
Marzo	843.51	0.00	1234.67	391.16
Abril	816.30	0.00	1058.07	241.77
Mayo	490.84	0.00	835.06	344.22
Junio	127.83	0.00	728.86	601.03
Julio	843.51	0.00	860.51	17.00
Agosto	843.51	0.00	881.39	37.88
Septiembre	816.30	0.00	990.51	174.21
Octubre	843.51	0.00	1049.71	206.20
Noviembre	472.06	0.00	1063.53	591.46
Diciembre	133.00	0.00	1102.72	969.72
TOTAL	7835.77	0.00	11987.85	4152.09

¹¹⁹ Elaboración propia.

¹²⁰ Elaboración propia.

¹²¹ Elaboración propia.

En la tabla 53 se presenta la comparación entre la energía generada por la combinación y la demanda energética mensual.

En la figura 40 se visualiza de manera gráfica el ajuste mensual entre la demanda energética mensual y la energía generada por el sistema híbrido de esta combinación.

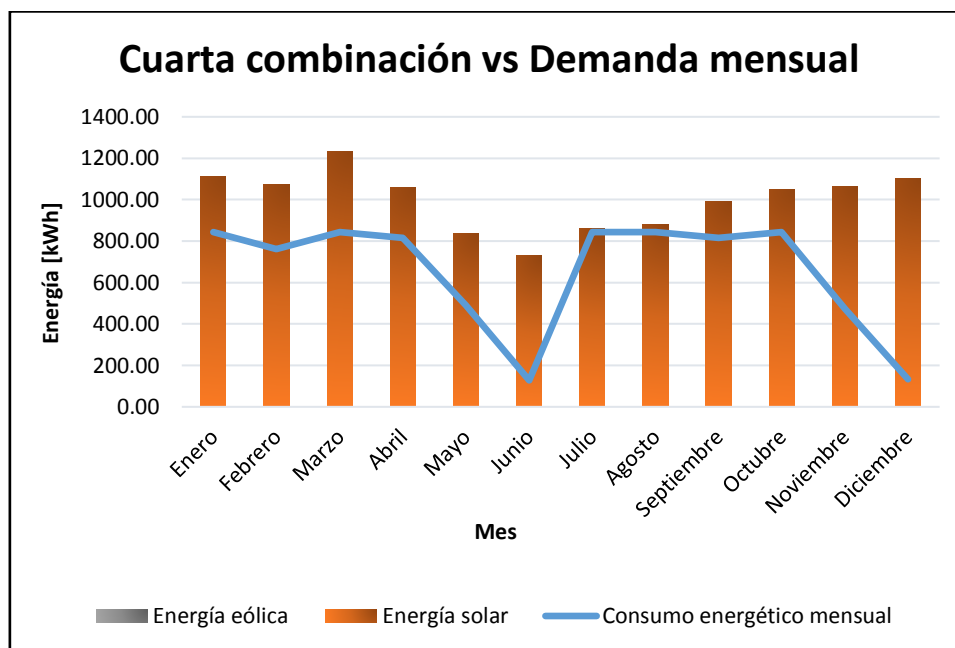


Figura 40.- Energía producida por la cuarta combinación vs demanda mensual.¹²²

En este caso la combinación 4 también tiene la capacidad de cubrir la demanda energética a lo largo de todo el año. La energía anual excedente es de 4152.09 kWh, los cuales se pueden utilizar según lo explicado en la sección 2.8.

Para esta combinación la energía solar aprovechada representa el 100% del total y la potencia nominal del sistema es de 7560 W. El valor de la energía y potencia, considerando solamente el costo de adquisición de los equipos principales, es de 0.59 \$/kWh y 0.93 \$/kW respectivamente.

5.3.1.5. Quinta combinación

Esta combinación se encuentra conformada por los siguientes equipos:

¹²² Elaboración propia.

Tabla 54.- Quinta combinación y datos generales de los equipos que la conforman.¹²³

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Panel solar	Canadian Solar	CS6U-330P	24	275.20	6604.80
Inversor Solar H.	FRONIUS	PRIMO 6.0-1	1	2313.07	2313.07
TOTAL				5ta	8917.87

Luego se detallan los datos de compatibilidad entre los equipos principales de esta combinación:

Tabla 55.- Detalles de compatibilidad entre los paneles Canadian Solar CS6U-330P con equipos de conexión a red.¹²⁴

Equipo	Arreglo PV			Inversor Solar H.	
	Panel solar	String 1	String 2	Entrada	Salida
Voltaje	37.2 Vdc	446.4 Vdc	446.4 Vdc	80 - 1000 V	230 V
Corriente máx.	8.88 Adc	8.88 Adc	8.88 Adc	18 A / 18 A	26.1 A
Potencia nominal	< 330 W	< 3960 W	< 3960 W	9000 W	6000 W
Potencia máxima	330 Wp	7920 Wp		9000 W	6000 W

A continuación se presenta la comparación entre la energía generada por la combinación y la demanda energética mensual.

Tabla 56.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la quinta combinación.¹²⁵

Mes	Demanda total de energía [kWh/mes]	Energía eólica aprovechada [kWh/mes]	Energía solar aprovechada [kWh/mes]	Diferencia [kWh/mes]
Enero	843.51	0.00	1139.65	296.14
Febrero	761.88	0.00	1099.97	338.09
Marzo	843.51	0.00	1266.79	423.28
Abril	816.30	0.00	1085.60	269.30
Mayo	490.84	0.00	856.79	365.94
Junio	127.83	0.00	747.83	620.00
Julio	843.51	0.00	882.90	39.39
Agosto	843.51	0.00	904.33	60.82
Septiembre	816.30	0.00	1016.28	199.98
Octubre	843.51	0.00	1077.02	233.51
Noviembre	472.06	0.00	1091.20	619.13
Diciembre	133.00	0.00	1131.41	998.41
TOTAL	7835.77	0.00	12299.76	4463.99

¹²³ Elaboración propia.

¹²⁴ Elaboración propia.

¹²⁵ Elaboración propia.

En la figura 41 se visualiza de manera gráfica el ajuste mensual entre la demanda energética mensual y la energía generada por el sistema solar de esta combinación.

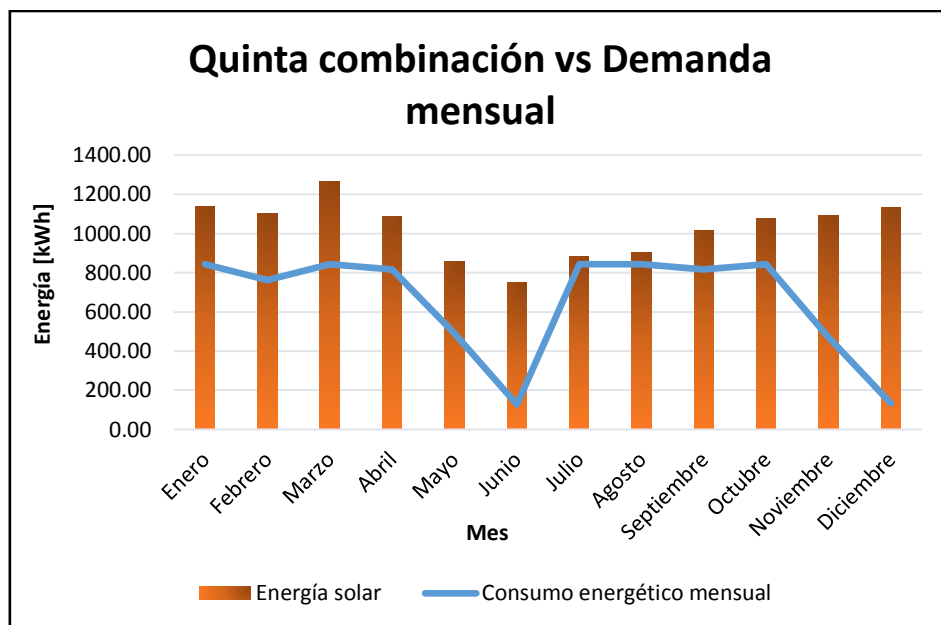


Figura 41.- Energía producida por la quinta combinación vs demanda mensual.¹²⁶

En este caso se tiene un sistema de generación solar el cual tiene la capacidad de cubrir la demanda energética a lo largo de todo el año. La energía anual excedente es de 4463.99 kWh, los cuales se pueden utilizar según lo explicado en la sección 2.8. Para esta combinación la energía solar aprovechada representa el 100% del total, y la potencia nominal del sistema es de 7920 W. El valor de la energía y potencia, considerando solamente el costo de adquisición de los equipos principales, es de 0.73 \$/kWh y 1.13 \$/kW respectivamente.

5.3.1.6. Sexta combinación

Esta combinación se encuentra conformada por los siguientes equipos:

¹²⁶ Elaboración propia.

Tabla 57.- Sexta combinación y datos generales de los equipos que la conforman.¹²⁷

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Aerogenerador	Zonhan	ZH-2500	3	2890.00	8670.00
Controlador eólico	Ningbo Ginlong T Co.	GCB-20K	3	883.82	2651.46
Inversor eólico H.	Ningbo Ginlong T Co.	GCI-5K-2G-W	3	1604.80	4814.40
TOTAL				6ta	16135.86

Luego se detallan los datos de compatibilidad entre los equipos principales:

Tabla 58.- Datos de compatibilidad del aerogenerador Zonhan 2500 con equipos de conexión a red.¹²⁸

Equipo	Aerogenerador	Controlador eólico		Inversor Híbrido.	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Voltaje	230 Vac	30-500 Vac	30-750 Vcd	600 V	220/230 V
Corriente máx.	13.0	40 Aac	40 Adc+30 Arms	25 A	23.8 A
Potencia nominal	2500	20 kW	8 kW	5800 W	5000 W
Potencia máxima	3000	20 kW	12 kW	5800 W	5000 W

A continuación se presenta la comparación entre la energía generada por la combinación y la demanda energética mensual.

Tabla 59.- Datos de demanda energética mensual y energía generada por la sexta combinación.¹²⁹

Mes	Demanda total de energía [kWh/mes]	Energía eólica aprovechada [kWh/mes]	Energía solar aprovechada [kWh/mes]	Diferencia [kWh/mes]
Enero	843.51	1026.53	0.00	183.02
Febrero	761.88	844.20	0.00	82.32
Marzo	843.51	938.89	0.00	95.38
Abril	816.30	1061.96	0.00	245.66
Mayo	490.84	1025.50	0.00	534.65
Junio	127.83	1035.89	0.00	908.06
Julio	843.51	1044.36	0.00	200.85
Agosto	843.51	1109.44	0.00	265.93
Septiembre	816.30	937.63	0.00	121.33
Octubre	843.51	1107.87	0.00	264.36
Noviembre	472.06	1013.11	0.00	541.05
Diciembre	133.00	1031.66	0.00	898.65
TOTAL	7835.77	12177.05	0.00	4341.28

¹²⁷ Elaboración propia.

¹²⁸ Elaboración propia.

¹²⁹ Elaboración propia.

En la figura 42 se visualiza de manera gráfica el ajuste mensual entre la demanda energética mensual y la energía generada por el sistema solar de esta combinación.

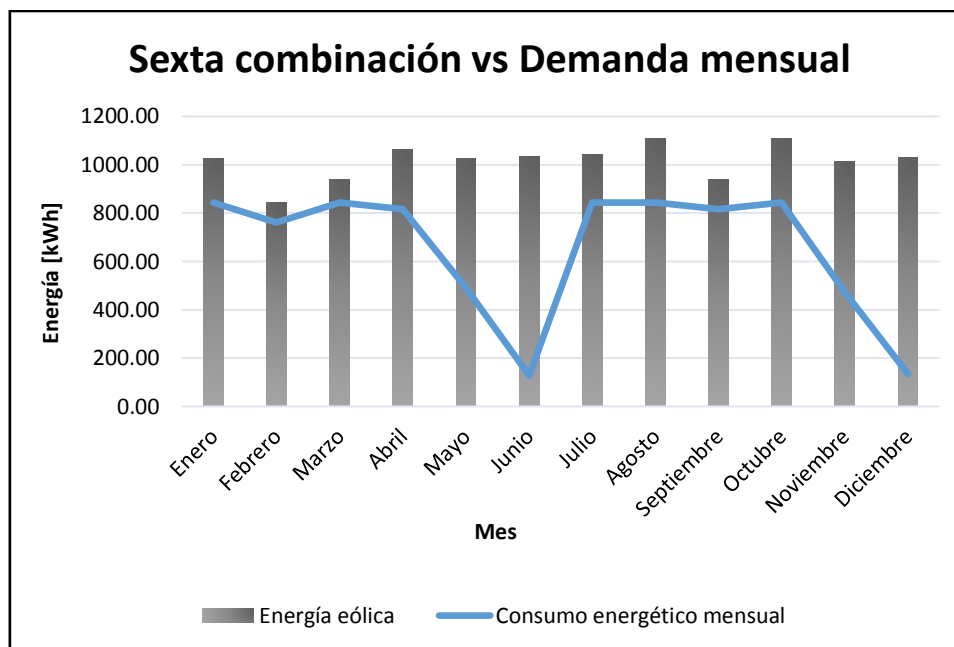


Figura 42.- Energía producida por la sexta combinación vs demanda mensual.¹³⁰

En este caso se tiene un sistema de generación eólico, el cual no tiene la capacidad de cubrir la demanda energética de los meses de febrero, marzo y septiembre. La energía anual excedente es de 4341.28 kWh, los cuales se pueden utilizar según lo explicado en la sección 2.8.

Para esta combinación la energía eólica aprovechada representa el 100% del total. La potencia nominal del sistema es de 7500 W. El valor de la energía y potencia, considerando solamente el costo de adquisición de los equipos, es de 1.33 \$/kWh y 2.15 \$/kW respectivamente.

¹³⁰ Elaboración propia.

5.3.1.7. Combinación seleccionada

Para seleccionar aquella combinación con las mejores características, se debe elegir a aquel sistema que tenga la mejor relación de compromiso entre el costo y la eficiencia para abastecer la demanda a lo largo del tiempo.

A continuación, en la tabla 60, se muestra un cuadro comparativo entre las características más resaltantes de las 6 combinaciones.

Tabla 60.- Cuadro comparativo de las características principales de cada combinación.¹³¹

Combinación	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta
Tipo de sistema	Híbrido	Híbrido	Híbrido	Solar	Solar	Eólico
Energía generada [kWh/año]	10909.22	11233.88	11069.03	11987.85	12299.76	12177.05
Energía excedente [kWh/año]	3073.45	3398.11	3233.26	4152.09	4463.99	4341.28
Energía eólica [%]	37.21%	36.13%	38.11%	0.00%	0.00%	100.00%
Energía solar [%]	62.79%	63.87%	61.89%	100.00%	100.00%	0.00%
Sobredimensionamiento ¹³² [%]	28.17%	30.25%	29.21%	34.64%	36.29%	35.65%
Potencia instalada [W]	6820	7120	7320	7560	7920	7500
Precio de compra [\$]	9439.47	10582.52	9739.47	7055.13	8917.87	16135.86
Costo de la potencia [\$/kW]	1.38	1.49	1.33	0.93	1.13	2.15
Costo de la energía [\$/kWh]	0.87	0.94	0.88	0.59	0.73	1.33

Todas las combinaciones analizadas son sistemas conectados a red y no cuentan con un banco de baterías como respaldo secundario.

Analizando las 3 primeras combinaciones, que son híbridas, la que presenta las mejores prestaciones es la primera combinación. Sus características más resaltantes son:

- El precio de adquisición de los equipos es el más bajo de todas las combinaciones híbridas.
- El costo de potencia instalada y el de generación de energía son los más bajos de las 3 combinaciones. (Dichos valores son referenciales, y han sido utilizados para evaluar todas las combinaciones en igualdad de condiciones).
- Para la combinación seleccionada se tiene un sobredimensionamiento del 28.17%, capaz de cubrir las pérdidas ocasionadas por el rendimiento variable del

¹³¹ Elaboración propia.

¹³² Se obtiene dividiendo el valor de energía excedente entre la demanda energética anual.

inversor, producto del envejecimiento del sistema, y otras pérdidas no consideradas en el análisis técnico del mismo.

Para las combinaciones solares 4 y 5, presentan las siguientes desventajas:

- Ofrecen una producción irregular de energía durante el día puesto que por sí sola esta fuente no está siempre presente.
- Mayor exposición en casos de fallas, esto quiere decir que presentan una menor confiabilidad en comparación con las híbridas.

En el caso de la 6° combinación (eólica), muy aparte de ser la combinación de mayor adquisición, existe una mayor dificultad si se desea incrementar la potencia instalada, esto debido a que se tiene que recurrir a cambiar todo el equipo generador o rediseñar el sistema para convertirlo en un sistema híbrido, impactando significativamente la rentabilidad del proyecto. Por lo que una vez más queda claro que para dimensionar un sistema híbrido es necesario identificar todas las combinaciones posibles que ofrezcan un determinado nivel de satisfacción o fiabilidad.

Siguiendo el mismo criterio de selección se realizó el cálculo para el segundo grupo de cargas, y los resultados se muestran en la tabla 61:

Tabla 61.- Resultados de los sistemas híbridos seleccionados.¹³³

Grupo de Cargas	# 1	# 2
Tipo de sistema	Híbrido	Híbrido
Demanda de grupo [kWh/año]	7835.77	7957.33
Energía generada [kWh/año]	10909.22	11765.49
Energía excedente [kWh/año]	3073.45	3808.17
Energía eólica [%]	37.21%	34.50%
Energía solar [%]	62.79%	65.50%
Sobredimensionamiento [%]	28.17%	32.37%
Potencia instalada [W]	6820	7360
Precio de compra [\$]	9439.47	9778.19

Después de haber evaluado diferentes combinaciones para ambos sistemas híbridos de baja potencia, los equipos seleccionados se resumen a continuación:

¹³³ Elaboración propia.

- **Aerogeneradores**

Tomando en cuenta el bajo costo de adquisición, la calidad de los equipos, y la cantidad de energía generada, se seleccionaron un total de 2 aerogeneradores de eje horizontal de 2500 W cada uno, los que hacen una potencia instalada de 5 kW. Los aerogeneradores son de la marca “Zonhan” y son comercializados en el mercado nacional por el distribuidor “Proviento S.A.C.”.

- **Paneles Solares**

Considerando que el bajo costo de adquisición, la calidad de los equipos, y la cantidad de energía generada, se seleccionaron un total de 34 módulos fotovoltaicos policristalinos de 270 W cada uno, los que hacen una potencia instalada de 9.18 kW. Todos los paneles son de la marca “Era Solar” y son comercializados en el mercado nacional por el distribuidor “Autosolar Energía del Perú S.A.C.”.

- **Inversores híbridos DC/AC**

Según la demanda calculada para cada sistema y la potencia nominal de los equipos generadores, los inversores híbridos seleccionados fueron: 2 inversores trifásicos de 10 kW 230/400Vac 60Hz, cada uno. Los inversores son de la marca “Yueqing Zonhan Windpower Co” y son comercializados en el mercado nacional por el distribuidor “Proviento S.A.C.”.

La marca Zonhan cuenta con una plataforma virtual, que a través de un Smart meter se sincroniza al inversor, asegurando que lo primero que se consuma sea la energía generada, permitiendo de esta manera visualizar cuánta energía generada está siendo consumida, cuánta es la energía excedente y cuánta energía de la red está siendo requerida, todo esto en tiempo real.

La combinación óptima para la generación es crucial para lograr un sistema híbrido de generación económicamente viable, ambientalmente amigable, y operativamente fiable.

5.3.1.8. Cálculo del Factor de Planta

Seleccionados los equipos principales que conforman el sistema híbrido, se puede proceder a calcular los factores de planta (también conocidos como factores de carga) del sistema.

El factor de planta de una central eléctrica es el cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente de forma anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, es decir generando con la potencia nominal de los equipos.

El factor de planta de un sistema de generación se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$F_P = \frac{E_{REAL}}{E_{PC}} \times 100\% \quad (5.4)$$

Donde:

F_P = Factor de planta (%)

E_{REAL} = Energía real generada (kWh)

E_{PC} = Energía generada a plena carga (kWh)

Empleando la ecuación 5.4 se procede a calcular los factores de planta:

El factor de planta del sistema híbrido para las cargas del grupo 1 será:

$$F_{P_{solar,G1}} = \frac{10909.22 \text{ kWh/año}}{6.82 \text{ kW} \times 8760 \text{ h/año}} \times 100\%$$

$$F_{P_{solar}} = 18.26\%$$

El factor de planta del sistema híbrido para las cargas del grupo 2 será:

$$F_{P_{solar,G1}} = \frac{11765.49 \text{ kWh/año}}{7.36 \text{ kW} \times 8760 \text{ h/año}} \times 100\%$$

$$F_{P_{solar}} = 18.25\%$$

5.3.2. Dimensionamiento del Sistema Eléctrico

El interconexión entre los diferentes equipos que conforman un sistema híbrido conectado a la red, requieren la presencia de una serie de dispositivos de protección ante fallas como cortocircuitos o sobretensiones; así mismo es de vital importancia dimensionar correctamente el cableado que va a ser utilizado, para minimizar las pérdidas y lograr un funcionamiento del sistema acorde a los parámetros necesarios para su conexión a la red.

En aquellos países donde la presencia de sistemas híbridos conectados a la red es común, el gobierno regula su instalación empleando una serie de reglamentos estipulados dentro de distintas normativas. Entonces, como en nuestro país no los hay, para dimensionar el sistema eléctrico se utilizará el modelo establecido dentro de España y una serie de estándares internacionales que garantizan una correcta instalación.

Los detalles y cálculos necesarios para la elección y dimensionamiento de los conductores eléctricos, el sistema de puesta a tierra y las protecciones para cada línea eléctrica dentro del interconexión del sistema híbrido se encuentran detallados en el Anexo G de esta tesis.

Para los tramos de corriente continua se utilizarán conductores unipolares de cobre con nivel de aislamiento 0,6/1kV con aislamiento en PVC. El tipo de instalación será de conductores con doble aislamiento en tubos en montaje adosado, o empotrados en obra según la definición del Reglamento Eléctrico de Baja Tensión (REBT-España) en la sección ITC - BT - 19.¹³⁴

En la figura 43 se representa el diagrama unifilar del tipo de sistema híbrido seleccionado.

¹³⁴ Dato obtenido de la referencia [23], ITC-BT-19, pág. 199.

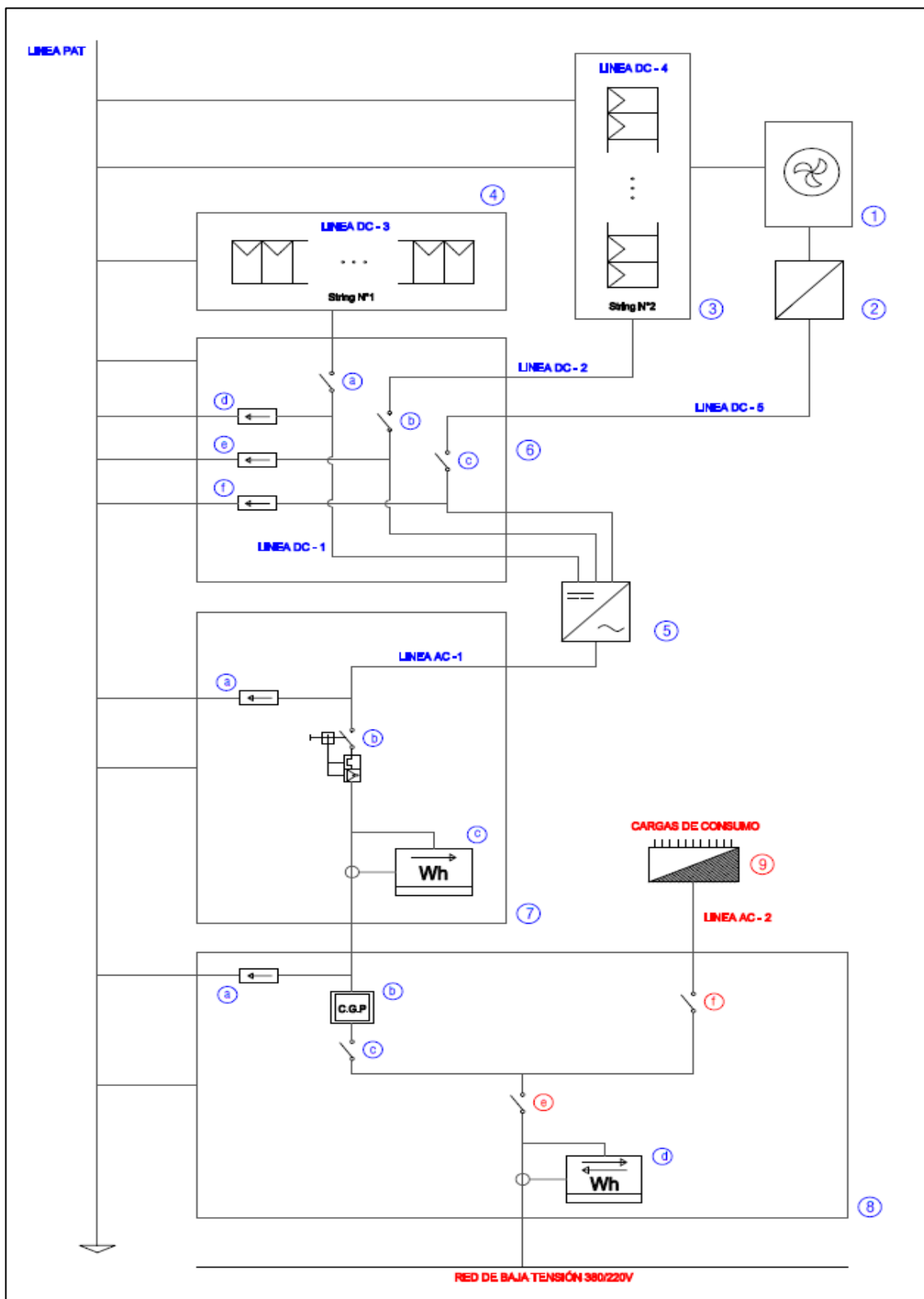


Figura 43.- Diagrama unifilar del sistema híbrido eólico fotovoltaico conectado a red.¹³⁵

¹³⁵ Elaboración propia.

En la tabla 62 se detalla las especificaciones técnicas de cada línea eléctrica, y en la tabla 63 se describen cada uno de los ítems, del diagrama unifilar.

Tabla 62.- Descripción de las líneas eléctricas del diagrama unifilar.¹³⁶

Línea	Descripción	Tipo de cable	Marca
DC-1/DC-2	Línea eléctrica entre arreglo PV e inversor	SET concéntrico 0.6/1 kV 2x4mm ² RE	Indeco
DC-3/DC-4	Línea interpaneles	CB/THW-90 4mm ²	Indeco
DC-5	Línea eléctrica entre aerogenerador e inversor	SET concéntrico 0.6/1 kV 2x10mm ² RE	Indeco
AC-1	Línea eléctrica entre inversor y tablero de protección.	NYY(80°)-C 0.6/1kV 2x6mm ² FB	Indeco
PAT	Línea de puesta a tierra principal	Cable THW-90 16mm ² 450/750V de 7 hilos	Indeco
	Línea de puesta a tierra de las estructuras metálicas	Cable CBT/THW-90 6mm ²	Indeco

La línea AC - 2, es la línea eléctrica actual que conecta un tablero con la red eléctrica actual, por tal motivo no se incluye dentro de los cálculos.

Tabla 63.- Descripción de los componentes del sistema.¹³⁷

Item	Cant.	Descripción
1	1 / 1	Aerogenerador Zonhan 2500.
2	1 / 1	Controlador eólico.
3 / 4	16 / 18	Paneles solares Era Solar ESPMC 270.
5	1 / 1	Inversor híbrido Ningbo Ginlong T. GC-10K
6	1 / 1	Tablero de entrada de corriente continua del inversor
6 - a,b,c	3 / 3	Interruptor termomagnético BK63H bipolar DC de 25A, marca LSis.
6 - d,e,f	3 / 3	Descargador de sobretensiones clase C bipolar DC de 20kA de poder de corte, marca Schneider.
7	1 / 1	Tablero de salida de corriente alterna del inversor
7 - a	1 / 1	Descargadores de sobretensiones clase C para AC, 4P de 15kA, marca Revalco.
7 - b	1 / 1	Interruptor combinado termomagnético de 4x25A/30mA, 230/400V, poder de corte de 10kA (con reconexión automática), marca Revalco.
7 - c	1 / 1	Medidor de energía consumida monodireccional.
8	1 / 1	Tablero de protección y medida.
8 - a	1 / 1	Descargadores de sobretensiones clase B para AC, 4P de 20kA, marca Revalco.
8 - b	1 / 1	Fusibles monofásicos de 60A, marca DfElectric. (caja general de protección)
8 - c	1 / 1	Interruptor de caja moldeada 4P-40A, poder de corte 35kA, marca Bticino.
8 - d	1 / 1	Medidor de energía consumida bidireccional (Smart Meter).

¹³⁶ Elaboración propia: Los detalles de la elección y dimensionamiento de los conductores eléctricos se encuentran detallados en el Anexo G.

¹³⁷ Elaboración propia: Los detalles de la elección y dimensionamiento de los conductores eléctricos se encuentran detallados en el Anexo G.

5.4. Ubicación del Sistema Híbrido

Las ubicaciones para los sistemas híbridos, se seleccionaron estratégicamente buscando cumplir las siguientes condiciones:

- Lugar relativamente espacioso para la correcta ubicación de los equipos de conversión y tableros de control.
- Lugar de fácil acceso para su libre operación y mantenimiento por personal calificado.
- Lugar con la ventilación necesaria o que se encuentre a temperatura ambiente para la correcta operación de los equipos.
- Lugar que carezca de material inflamable y cuente con los equipos de control de incendios para cualquier eventualidad.
- Lugar delimitado y correctamente señalizado.

La ubicación de cada sistema híbrido, dentro del circuito general de la FIME, se muestra en la figura A.5 del Anexo A.

CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN ECONÓMICA

En esta sección se muestra la lista de precios de los equipos y materiales seleccionados, especificados por cada grupo de cargas:

6.1. Presupuesto del Proyecto

6.1.1. Presupuesto de los Equipos Principales

Tabla 64.- Presupuesto de los equipos principales del sistema híbrido.¹³⁸

Equipo	Cant. SHFV 1	Cant. SHFV 2	Precio Unit. [\$]	TOTAL
Aerogenerador Zonhan 2500W	1	1	2890.00	5780.00
Panel solar EraSolar ESPMC 270	16	18	169.36	5758.22
Controlador eólico N. Ginlong CGB-20K	1	1	883.82	1767.64
Inversor híbrido Zonhan GC-10K	1	1	2955.90	5911.80
TOTAL				19217.66

6.1.2. Presupuesto del Sistema Eléctrico¹³⁹

Tabla 65.- Presupuesto de conductores para corriente continua y alterna.¹⁴⁰

Denominación	Unidad	Cant. SHFV 1	Cant. SHFV 2	Precio Unit. [\$]	TOTAL
SET concéntrico 0.6/1 kV 2x4mm ² RE	m	37.0	51.0	0.91	80.06
SET concéntrico 0.6/1 kV 2x10mm ² RE	m	28.0	26.0	2.43	131.25
CB/THW-90 4 mm ²	m	42.0	42.0	0.67	56.28
YYY(80°)-C 0,6/1 kV 3 - 1x6 mm ²	m	15.0	15.0	3.51	105.30
Curva Conduit 90 EMT 1"	und	2.0	2.0	1.12	4.48
Conector Conduit ZN EMT 1" UL	und	6.0	6.0	0.51	6.13
Unión Conduit Z EMT 1" UL	und	3.0	3.0	0.51	3.06
Tubería Conduit EMT 1" de 3m	und	5.0	5.0	3.84	38.40
Tubería Conduit Flexible Galvanizado 1"	m	35.0	35.0	0.80	56.04
Caja de paso metálica de 20x20cm	und	2.0	2.0	2.88	11.52
Caja de paso metálica de 15x15cm	und	2.0	2.0	1.92	7.69
Riel unistrut de acero inoxidable 30x50x3000mm	und	1.0	1.0	27.50	55.00
Abrazadera unistrut para tubería de 1"	und	14.0	14.0	0.42	11.67
TOTAL					566.87

¹³⁸ Elaboración propia.

¹³⁹ El costo de cada componente del sistema eléctrico ha sido proporcionado por los proveedores nacionales INGESA NORTE, N&B electricidad industrial S.R.L. y Promotores eléctricos S.A.

¹⁴⁰ Elaboración propia. El precio de cambio utilizado ha sido de 1\$=S/.3.31 tomado al 31/03/2019.

Tabla 66.- Presupuesto del sistema de puesta a tierra.¹⁴¹

Denominación	Unidad	Cant. SHFV 1	Cant. SHFV 2	Precio Unit. [\$]	TOTAL
Cable THW-90 16mm2 450/750V de 7 hilos, cubierta amarilla	m	22.5	22.5	1.82	81.90
Cable CB/THW-90 6mm2, cubierta amarilla	m	21.5	21.5	0.79	33.97
Varilla de cobre de 5/8" de sección x 2.4m de largo.	und	1.0	1.0	45.28	90.56
Tierra de chakra (saco 30kg)	und	10.0	10.0	2.27	45.40
Cemento conductivo Reducrete (saco 25kg)	und	1.0	1.0	22.03	44.06
Caja de registro de cemento + tapa	und	1.0	1.0	5.58	11.16
Terminal de cobre de 90A	und	2.0	2.0	1.06	4.24
Terminal de cobre de 10A	und	7.0	7.0	0.18	2.52
Curva pvc 90° 3/4"	und	1.0	1.0	0.32	0.64
Tubería eléctrica pvc 3/4" de 3m	und	1.0	1.0	1.60	3.20
Curva Conduit 90° EMT 3/4"	und	1.0	1.0	1.12	2.24
Conector Conduit ZN EMT 3/4"-UL	und	2.0	2.0	0.32	1.28
Unión Conduit Z EMT 3/4"-UL	und	4.0	4.0	0.32	2.56
Tubería Conduit EMT 3/4" de 3m	und	4.0	4.0	2.57	20.54
Tubería conduit flexible FLEXIGUARD PVC de 3/4"	m	20.0	20.0	0.80	32.02
Caja de paso metálica de 30x30cm	m	1.0	1.0	3.45	6.90
Conector de bronce tipo AB	und	1.0	1.0	1.22	2.44
Riel unistrut de acero inoxidable 30x50x3000mm	und	1.0	1.0	27.50	55.00
Abrazadera para riel unistrut para tubería de 3/4"	und	8.0	8.0	0.38	6.14
TOTAL					446.78

Tabla 67.- Presupuesto de tableros de entrada y salida del inversor.¹⁴²

Denominación	Unidad	Cant. SHFV 1	Cant. SHFV 2	Precio Unit. [\$]	TOTAL
Tablero de distribución de salida de corriente alterna, marca Delixi.	und	2	2	34.13	136.52
01 INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO BK63H C2X25A DC, BIPOLAR, marca LSis.	und	3	3	11.35	68.10
01 ITD rearmable de 4x25A/30mA, 230/400V, poder de corte de 10kA, marca Revalco.	und	1	1	104.88	209.76
03 Descargadores de sobretensiones clase C bipolar para CC, 2P de 10kA, marca Schneider.	und	3	3	87.13	522.78
01 Descargadores de sobretensiones clase C para AC, 4P de 15kA, marca Revalco.	und	1	1	185.82	371.64
TOTAL					1308.80

¹⁴¹ Elaboración propia. El precio de cambio utilizado ha sido de 1\$=S/.3.31 tomado al 31/03/2019.¹⁴² Elaboración propia. El precio de cambio utilizado ha sido de 1\$=S/.3.31 tomado al 31/03/2019.

Tabla 68.- Presupuesto del tablero de protección y medida.¹⁴³

Denominación	Unidad	Cant. SHFV 1	Cant. SHFV 2	Precio Unit. [\$]	TOTAL
Tablero de protección y medida p/uso en exteriores, marca Delixi	und	1	1	34.88	69.76
01 Descargadores de sobretensiones clase B para AC, 4P de 20kA, marca Revalco.	und	1	1	185.82	371.64
01 IT fijo en caja moldeada CDM7-125M de 4P-40A, poder de corte 35kA, marca Delixi.	und	1	1	162.39	324.79
Fusible cerámico cilíndrico de 40A con caja de protección.	und	4	4	4.99	39.92
Medidor de energía monofásico bidireccional	und	1	1	46.91	93.81
Medidor de energía monofásico unidireccional	und	1	1	16.55	33.10
TOTAL					933.02

Tabla 69.- Presupuesto general del sistema eléctrico.¹⁴⁴

Componentes	SHFV 1 [\$]	SHFV 2 [\$]	TOTAL
Conductores eléctricos	279.50	287.37	566.87
Sistema de puesta a tierra	223.39	223.39	446.78
Tablero de entrada y salida del inversor	654.40	654.40	1308.80
Tablero de protección y medida	466.51	466.51	933.02
TOTAL	1623.80	1631.68	3255.48

6.1.3. Presupuesto de Estructuras

Tabla 70.- Presupuesto de las estructuras de soporte de equipos.¹⁴⁵

Equipo	SHFV 1 [\$]	SHFV 2 [\$]	TOTAL
Estructura tipo poste para aerogenerador	185.00	185.00	370.00
Estructura tipo mesa para paneles fv.	500.00	500.00	1000.00
TOTAL	685.00	685.00	1370.00

6.1.4. Presupuesto de Transporte, Instalación y Mano de Obra

Tabla 71.- Presupuesto de transporte, instalación y mano de obra.¹⁴⁶

Equipo	SHFV 1 [\$]	SHFV 2 [\$]	TOTAL
Costo de mano de obra para instalaciones eléctricas	350.00	350.00	700.00
Transporte, instalación y montaje de aerogenerador	600.00	600.00	1200.00
Transporte y montaje de estructuras para paneles solares	400.00	400.00	800.00
TOTAL	1350.00	1350.00	2700.00

¹⁴³ Elaboración propia. El precio de cambio utilizado ha sido de 1\$=S/.3.31 tomado al 31/03/2019.

¹⁴⁴ Elaboración propia.

¹⁴⁵ Elaboración propia. Los precios han sido proporcionados por Proviento S.A.C.

¹⁴⁶ Elaboración propia. Los precios han sido proporcionados por Proviento S.A.C.

6.1.5. Presupuesto General

Tabla 72.- Presupuesto total de los sistemas híbridos conectados a red.¹⁴⁷

Equipo	Costo Total SHFV 1 [\$]	Costo Total SHFV 2 [\$]	TOTAL
Equipos principales.	9439.47	9778.19	19217.66
Sistema eléctrico.	1623.80	1631.68	3255.48
Estructuras.	685.00	685.00	1370.00
Transporte, instalación y mano de obra.	1350.00	1350.00	2700.00
SUB TOTAL (USD)	13098.27	13444.87	26543.14
IGV¹⁴⁸ 18% (USD)	2357.69	2420.08	4777.77
TOTAL (USD)	15455.96	15864.94	31320.91

En el proceso de dimensionamiento se pudo comprobar de primera mano que mientras mayor sea la potencia instalada y energía generada, menor será el costo de inversión inicial.

Para la selección de los equipos se ha tenido en cuenta aquellos presentes en el mercado nacional, de esta manera se evita el costo de importación.

6.2. Análisis económico

Aquello que otorga el paso decisivo entre el diseño y la ejecución de un proyecto, es un análisis de factibilidad económica. Para que un sistema alcance esta factibilidad, la inversión que se tiene proyectada debe mostrar un adecuado retorno, en un horizonte de tiempo adecuado. En un análisis económico se considera que el financiamiento es mediante el uso de un capital propio.

El análisis económico se puede realizar mediante diferentes métodos, ya sea por el método de análisis de inversiones, o el método de los años de recuperación de la inversión realizada. Este último es el que ha sido empleado para el análisis del proyecto desarrollado en la presente tesis.

En el caso del análisis para la segunda representación de ingresos, este capital invertido, deberá ser analizado en el tiempo utilizando una tasa de costo de oportunidad del capital la cual permitirá obtener unos indicadores financieros sobre la rentabilidad del proyecto.

¹⁴⁷ Elaboración propia.

¹⁴⁸ Impuesto General a las Ventas.

6.2.1. Conceptos financieros

En el análisis económico de un proyecto de inversión se utilizan una serie de indicadores financieros, entre estos se encuentran el Costo de Oportunidad del Capital (COK), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Retorno de la Inversión (ROI).

Se definirá brevemente el concepto de cada uno de estos indicadores, para un mejor entendimiento del análisis del proyecto.

6.2.1.1. Costo de Oportunidad del Capital (COK)

Conocido como **tasa de descuento**, costo de oportunidad del accionista o costo del capital propio. Es el rendimiento esperado de la mejor alternativa de inversión con un riesgo similar al del proyecto en ejecución. No es un indicador de rentabilidad y sirve para evaluar el aporte propio.

La determinación del COK depende del grado de riesgo (riesgo similar al de mi proyecto) y del número de oportunidades que tengo para invertir mi capital. Es decir, está en función de los rendimientos en el mercado que tiene la compañía y el valor generado para el propietario o los accionistas. El COK nos ayuda a saber si existe alguna mejor alternativa, con igual riesgo, en la que podríamos invertir.

En general, es más importante calcular correcta, precisa y minuciosamente el Flujo de Caja que el valor del COK. En muchos casos el sistema financiero es el que fija el valor del COK para evaluar proyectos.

En el caso que el inversionista sea una persona natural, la mejor inversión que se puede realizar con un riesgo mínimo, es la inversión del capital dentro de una entidad bancaria con una determinada tasa de interés. La tasa de interés promedio, en moneda extranjera, dentro del mercado financiero nacional es de 2.24%.¹⁴⁹

¹⁴⁹ Información extraída de la página web de la Superintendencia de Banca y Seguros del Perú (SBS): http://www.sbs.gob.pe/app/stats/TasaDiaria_6B.asp.

6.2.1.2. Valor Anual Neto (VAN)

También conocido como Valor neto actual (VNA), valor actualizado neto o valor presente neto (VPN). Es el valor actual de la inversión y los flujos netos, es decir, flujos en los cuales en cada período ya se efectuó el cálculo de ingresos menos egresos del proyecto. En pocas palabras, el VAN es un criterio de inversión que permite conocer cuánto se va a ganar o perder con tal inversión.

La tasa de descuento que se utiliza es el COK, esta tasa se puede considerar como un costo adicional del proyecto, que castiga los beneficios futuros (ya que los disminuye) debido a que hoy éstos no son efectivos. El criterio de decisión es el siguiente:

- $VAN > 0$, El valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios. Es recomendable realizar la inversión.
- $VAN = 0$, El proyecto de inversión no generará ni beneficios ni pérdidas. Es decir, la rentabilidad que proporcionan las alternativas es la misma. La realización del proyecto es indiferente.
- $VAN < 0$, El proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado. No es recomendable realizar la inversión.

6.2.1.3. Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

Es una tasa (expresada en porcentaje) que indica una medida relativa de la rentabilidad promedio periódica que generan los fondos que permanecen invertidos en el proyecto. Desde un punto de vista matemático, la TIR es aquella tasa de interés que hace igual a cero el VAN de un flujo de fondos. El criterio de decisión para la TIR es el siguiente:

- $TIR > COK$, es recomendable realizar la inversión. En este caso, la tasa de rendimiento interno que obtenemos es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida a la inversión.
- $TIR = COK$, es indiferente que se elija el proyecto o se invierta en la mejor alternativa. Es decir, la rentabilidad que proporcionan es la misma. En esta

situación, la inversión podrá llevarse a cabo si mejora la posición competitiva de la empresa y no hay alternativas más favorables.

- $TIR < COK$, no es conveniente realizar el proyecto. No se alcanza la rentabilidad mínima que le pedimos a la inversión.

Conocidos ambos conceptos, se puede evaluar el grado de rentabilidad del proyecto para las representaciones antes mencionadas.

6.2.1.4. Retorno de la Inversión (ROI)

Es un indicador financiero que permite determinar el periodo de tiempo en el cual la inversión realizada puede ser recuperada. Para su cálculo se utiliza el valor de flujo de fondos netos del proyecto (total), actualizados con la tasa de descuento COK.

6.2.2. Egresos del Proyecto

Los egresos anuales del proyecto en estudio, están conformados por el costo de operación y mantenimiento del sistema, y el costo de reemplazo de algunos equipos al finalizar su período de vida útil.

6.2.2.1. Costo anual de operación y mantenimiento

Existen muchas fuentes bibliográficas que proporcionan información acerca de los costos anuales de operación y mantenimiento para este tipo de instalaciones. Para el presente proyecto la fuente a considerar ha sido la siguiente:

- **Según AWEA**

Según la American Wind Energy Association (AWEA)¹⁵⁰ y el Departamento de energía de EE.UU.¹⁵¹, el costo anual promedio de operación y mantenimiento

¹⁵⁰ Información obtenida de: "AWEA - Small Wind Turbine Global Market Study of 2008"

¹⁵¹ Información obtenida de: "U.S. Department of Energy - Solar Technologies Market Report of 2010"

para sistemas de baja potencia conectados a red, es equivalente al 1% de costo inicial de la instalación.

Entonces, para la presente tesis, el valor que será considerado para el análisis económico del proyecto es el que asciende al 1% del costo inicial lo que equivale a 314.09 dólares al año.

6.2.2.2. Costo de reemplazo de equipos

El cálculo del costo de reemplazo involucra un flujo de efectivo que no es anual, sino que viene determinado por el tiempo de vida del componente. Este costo de reemplazo involucra a aquellos componentes del sistema, cuyo tiempo de vida es menor a la duración del proyecto o al horizonte de tiempo establecido.

El tiempo de vida útil estimado de los equipos es proporcionado generalmente por el fabricante del mismo, de no ser así hay numerosas fuentes bibliográficas al respecto. En la tabla 73 se señala los tiempos de vida esperados para cada uno de los equipos principales y cuyo precio de adquisición es notablemente representativo frente al capital inicial de instalación.

Tabla 73.- Vida útil de los principales equipos del sistema híbrido.¹⁵²

Equipo	Paneles Solares	Aerogeneradores	Controlador es eólicos	Inversores híbridos	Instalaciones
Vida útil (años)	25	20	15	20	25

El fabricante de los paneles solares garantiza, en los primeros 10 años de funcionamiento, un rendimiento mínimo del 90% de lo esperado; y después de los 25 años de funcionamiento, un rendimiento mínimo del 80%. De acuerdo a las especificaciones de los fabricantes, se garantiza una vida útil de 15 años para cada inversor. Con respecto al sistema eléctrico y las estructuras de montaje, el tiempo de vida útil es mayor a los 25 años, con la realización de un adecuado mantenimiento.

¹⁵² Información obtenida de las especificaciones técnicas del fabricante.

Para el caso de los sistemas seleccionados en esta tesis, los únicos equipos que deberán ser reemplazados son los controladores eólicos, cuya reinversión de capital se efectuará en el año 15 del horizonte de años.

6.2.3. Ingresos del proyecto

Se menciona, en la sección 2.8 de la presente tesis, que existen dos representaciones usualmente utilizadas para el tratamiento de los excedentes energéticos.

Dado que en el Perú aún no se ha publicado norma que reglamente los márgenes del costo de compra y venta de energía para peguemos generadores conectados a red, no es factible utilizar la segunda representación de ingresos. En cambio la primera representación de ingresos, mediante el autoconsumo de energía acogido o no a compensación, es la que mejor se adapta a la situación actual del país. Es muy importante tener en cuenta este factor para poder realizar un buen ajuste entre la demanda y la energía producida.

Para hacer un cálculo acertado de los ingresos en los periodos del horizonte, no sólo necesitamos conocer el costo de la energía, también debemos conocer cuánto aumenta cada año el costo de la energía según la tarifa eléctrica contratada.

De acuerdo a los pliegos tarifarios aplicables para clientes finales, calculados por la Gerencia de Regulación de tarifas de OSINERGMIN, se tiene que:

- La tarifa contratada por la UNPRG es la MT4, estipula que el costo actual de energía activa es de 20.60 ctm. S/. /kW.h, esto es 0.0622 US\$ /kWh incluyendo el IGV. Para los últimos 20 años se verifica un incremento promedio anual de 4.63% hasta la fecha, según ELECTRONORTE (Para inicios del año 2000 el costo de la energía para usuarios con tarifa MT4 fue de 10.17 ctm. S/./kWh incrementándose para el 2019 en un 111% hasta los 21.54 ctm. S/./kWh).¹⁵³

¹⁵³ Fuente: <https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegosTarifariosUsuarioFinal.aspx?Id=140000>

Se realizará el análisis económico bajo la primera representación de ingresos, en la modalidad de autoconsumo con excedentes acogido a compensación, y para la segunda representación de ingresos en régimen de compra y venta. Posteriormente se analizará qué factores garantizan la rentabilidad del sistema, así también, se analizará qué pautas y medidas deberán adoptarse para lograr la viabilidad económica del proyecto.

6.2.4. Flujo de fondos del proyecto

El flujo de fondos es un reporte que nos presenta las entradas y salidas de dinero de una organización, empresa, entidad o institución, durante un período de tiempo. El análisis del flujo de fondos, se determina mediante la diferencia entre los ingresos y egresos generados anualmente por el proyecto. El análisis económico del presente estudio se encuentra exonerado del pago de impuesto a la renta, esto por tratarse de una entidad educativa del estado.¹⁵⁴

Para aquel caso de una empresa, negocio o vivienda particular, sí es considerado el impuesto a la renta. Tomando como ejemplo el presupuesto de la presente tesis, se considera el impuesto a la renta del 29.5%¹⁵⁵ (vigente), por lo que se deberá calcular la depreciación anual de los activos de la instalación, en función del tiempo de su vida útil, con el propósito de que se obtenga una menor utilidad operativa para que los impuestos extraídos sean los mínimos. Entonces la utilidad neta será igual a la utilidad operativa afectada por el pago de impuesto a la renta. Posterior a ellos se vuelve a adicionar el monto total depreciado y el valor de rescate de los equipos que no han culminado su tiempo de vida útil al final del horizonte.

El monto total de los equipos principales será extraído del cálculo presupuestal del proyecto y se les adicionará el IGV. El monto de las instalaciones es igual a la suma del monto del sistema eléctrico y las estructuras de soporte, los cuales serían extraídos de la tabla 71.

¹⁵⁴ Fuente: SUNAT. Ley del impuesto a la renta. Capítulo IV: De las inafectaciones y exoneraciones.

¹⁵⁵ Fuente: Tasas para la determinación del Impuesto a la Renta Anual. SUNAT.

En la tabla 74 se muestra el monto anual depreciado:

Tabla 74.- Depreciación de los principales equipos del sistema híbrido.¹⁵⁶

Equipo	Paneles solares	Aerogeneradores	Controladores eólicos	Inversores Híbridos	Instalaciones
Tiempo de depreciación	25 años	20 años	15 años	20 años	25 años
Monto total [Inc. IGV]	6794.70	6820.40	2085.82	6975.92	5458.06
Monto anual depreciado	271.79	341.02	139.05	348.80	218.32

Cabe resaltar que de considerarse el pago anual del impuesto a la renta este será nulo en aquellos periodos donde la utilidad operativa tiene un valor negativo. Usualmente cuando se tiene una utilidad operativa negativa en algún periodo del proyecto, ésta se utiliza para amortizar y disminuir el pago de impuesto a la renta en los siguientes períodos, en los cuales la utilidad tiene un valor positivo.

Se utilizará un horizonte de tiempo de 20 años para realizar el análisis económico bajo la modalidad antes mencionada. En la tabla 75 se muestra la recuperación de la inversión y el monto ahorrado al final del horizonte; en la tabla 76 se muestra el flujo de fondos proyectado y los indicadores financieros principales para la segunda representación de ingresos (caso compra de energía de la red y venta total de la energía generada).

¹⁵⁶ Elaboración propia.

Tabla 75.- Análisis económico del proyecto, bajo la primera representación de ingresos.¹⁵⁷

Año		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Inversión inicial	-31320.91																				
INGRESOS																					
Precio de energía [US\$/kWh]	0.065	0.068	0.071	0.075	0.078	0.082	0.085	0.089	0.093	0.098	0.102	0.107	0.112	0.117	0.123	0.128	0.134	0.140	0.147	0.154	0.161
Energía generada [kWh]		22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71
Ingresos anuales [US\$]		1543.88	1615.35	1690.13	1768.38	1850.25	1935.90	2025.52	2119.29	2217.41	2320.06	2427.47	2539.85	2657.43	2780.45	2909.17	3043.85	3184.76	3332.20	3486.46	3647.87
EGRESOS																					
Costo por O&M [US\$]		-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21
Costo por reemplazo de equipos [US\$]																-1767.64					
Egresos anuales [US\$]		-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-2080.85	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21	-313.21
Utilidad operativa [US\$]		1230.67	1302.14	1376.93	1455.17	1537.04	1622.69	1712.31	1806.09	1904.20	2006.85	2114.26	2226.64	2344.22	2467.24	828.32	2730.64	2871.55	3018.99	3173.25	3334.66
Impuestos a la renta (29.5%) [US\$]																					
Utilidad neta [US\$]		1230.67	1302.14	1376.93	1455.17	1537.04	1622.69	1712.31	1806.09	1904.20	2006.85	2114.26	2226.64	2344.22	2467.24	828.32	2730.64	2871.55	3018.99	3173.25	3334.66
Valor de rescate [US\$]																					3255.17
Flujo de fondos [US\$]	-31320.91	1230.67	1302.14	1376.93	1455.17	1537.04	1622.69	1712.31	1806.09	1904.20	2006.85	2114.26	2226.64	2344.22	2467.24	828.32	2730.64	2871.55	3018.99	3173.25	6589.83
Flujo de fondos (@2.24%) [US\$]	-31320.91	1203.71	1245.71	1288.39	1331.77	1375.88	1420.73	1466.35	1512.77	1560.00	1608.08	1657.02	1706.87	1757.63	1809.34	594.14	1915.72	1970.44	2026.22	2083.09	4231.14
Valor recuperado [US\$]	-31320.91	-30117.20	-28871.49	-27583.10	-26251.32	-24875.44	-23454.71	-21988.36	-20475.60	-18915.60	-17307.52	-15650.50	-13943.63	-12186.01	-10376.67	-9782.53	-7866.81	-5896.38	-3870.16	-1787.06	2444.08

¹⁵⁷ Elaboración propia. Modelo de análisis económico basado en las normas internacionales “Institute of International Finance”.

Tabla 76.- Análisis económico del proyecto, bajo la segunda representación de ingresos.¹⁵⁸

Año		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Inversión inicial	-31320.91																				
DEPRECIACIÓN DE EQUIPOS																					
Depreciación total [US\$]		-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98	-1318.98
INGRESOS																					
Precio de energía [US\$/kWh]	0.059	0.061	0.064	0.067	0.070	0.073	0.077	0.080	0.084	0.088	0.092	0.096	0.101	0.105	0.110	0.115	0.121	0.126	0.132	0.138	0.145
Energía generada [kWh]		22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71	22674.71
Ingresos anuales [US\$]		1389.49	1453.82	1521.12	1591.54	1665.22	1742.31	1822.97	1907.37	1995.67	2088.05	2184.72	2285.86	2391.68	2502.41	2618.25	2739.46	2866.29	2998.98	3137.82	3283.08
EGRESOS																					
Precio de energía [US\$/kWh]	0.065	0.068	0.071	0.075	0.078	0.082	0.085	0.089	0.093	0.098	0.102	0.107	0.112	0.117	0.123	0.128	0.134	0.140	0.147	0.154	0.161
Energía consumida [kWh]		15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09	15793.09
Costo por O&M [US\$]		313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21	313.21
Costo por reemplazo de equipos [US\$]																-1767.64					
Egresos anuales [US\$]		-1388.53	-1438.31	-1490.40	-1544.90	-1601.92	-1661.58	-1724.00	-1789.31	-1857.65	-1929.15	-2003.96	-2082.23	-2164.13	-2249.81	-2407.11	-2433.27	-2531.42	-2634.11	-2741.56	-2853.98
Utilidad operativa [US\$]		-1318.02	-1303.48	-1288.26	-1272.34	-1255.68	-1238.25	-1220.01	-1200.93	-1180.96	-1160.07	-1138.22	-1115.35	-1091.42	-1066.39	-2807.83	-1012.79	-984.11	-954.11	-922.72	-889.87
Impuestos a la renta (29.5%) [US\$]		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Utilidad neta [US\$]		-1318.02	-1303.48	-1288.26	-1272.34	-1255.68	-1238.25	-1220.01	-1200.93	-1180.96	-1160.07	-1138.22	-1115.35	-1091.42	-1066.39	-2807.83	-1012.79	-984.11	-954.11	-922.72	-889.87
Depreciación [US\$]		1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98	1318.98
Valor de rescate [US\$]																					3841.10
Flujo de fondos [US\$]	-31320.91	0.96	15.50	30.72	46.64	63.30	80.73	98.97	118.05	138.02	158.91	180.76	203.63	227.56	252.59	-1488.85	306.19	334.87	364.87	396.26	4270.20
Flujo de fondos (@2.24%) [US\$]	-31320.91	0.94	14.83	28.75	42.69	56.67	70.69	84.75	98.88	113.07	127.33	141.67	156.10	170.62	185.24	-1067.92	214.81	229.78	244.89	260.13	2741.77
Valor recuperado [US\$]	-31320.91	-31319.97	-31305.13	-31276.39	-31233.70	-31177.03	-31106.35	-31021.60	-30922.72	-30809.65	-30682.31	-30540.64	-30384.55	-30213.93	-30028.69	-31096.61	-30881.80	-30652.01	-30407.13	-30147.00	-27405.23

¹⁵⁸ Elaboración propia. Modelo de análisis económico basado en las normas internacionales “Institute of International Finance”.

En la primera tabla bajo la primera representación se muestra el análisis en base al costo de la energía según la tarifa contratada de la UNPRG, la MT4; para la segunda representación en la segunda tabla, se ha utilizado un precio compra según tarifa (MT4) y un precio de venta un 10% menor al precio de compra. Esto debido a que no existe otra referencia dentro del marco normativo nacional que permita utilizar algún otro valor de compra o venta.

El valor rescate que aparece en el análisis económico de las tablas 75 y 76, hace referencia al valor contable de aquellos activos que no han cumplido su tiempo de vida útil, este el caso de los paneles solares y las instalaciones eléctricas, los cuales tienen un tiempo de vida 5 años mayor al horizonte de tiempo del proyecto. Así también, los controladores eólicos al ser reemplazados en el año 15 del proyecto, sólo se llegan a depreciar durante 5 años después de su primer cambio, por lo cual tienen un valor contable de 10 años al final del horizonte de tiempo del análisis económico.

6.3. Recuperación de la inversión

Los indicadores financieros obtenidos, aplicando las fórmulas de VAN y TIR, para ambas representaciones se muestran a continuación en el cuadro comparativo de la tabla 77.

Tabla 77.- Indicadores financieros para ambos análisis económicos.¹⁵⁹

	Primera Representación (Autoconsumo)	Segunda Representación (Compra y venta)
Precio de la energía [\$/kWh]	0.0622 \$/kWh (MT4), +4.63% anual	Compra: 0.0622 \$/kWh (MT4), +4.63% anual Venta: 0.0622 \$/kWh – 10%
VAN [\$]	2444.08	-27405.23
TIR	2.89%	-8.63%
ROI [Años]	19	--

Interpretando los resultados del mejor escenario se tiene que bajo la primera representación de ingresos se obtiene una VAN positiva lo cual indica que el proyecto es ejecutable, del mismo modo se obtiene una TIR que es menor a la tasa de interés promedio anual en moneda extranjera¹⁶⁰ (2.24%) lo que indica que el proyecto es rentable. Se puede observar también que el retorno de la

¹⁵⁹ Elaboración propia. Datos obtenidos de las tablas 75 y 76.

¹⁶⁰ <http://www.sbs.gob.pe/app/pp/EstadisticasSAEEPPortal/Paginas/TIActivaTipoCreditoEmpresa>

inversión se da en el décimo noveno año del horizonte por lo tanto será necesario buscar opciones para mejorar la rentabilidad del proyecto estudiado y disminuir el tiempo de recuperación de la inversión.

En el caso de la segunda representación de ingresos, donde el costo compra de la energía tiene un mayor valor que el de venta, no se logra amortizar el costo de la instalación dentro de los años del horizonte, lo que lógicamente lo hace menos rentable en comparación con la primera representación de ingresos.

6.4. Incentivos para mejorar la rentabilidad

En el mundo, la demanda social a favor de las energías limpias se ha traducido en el establecimiento de normativas que priman un vertido a la red de la energía excedente generada con sistemas fotovoltaicos, eólicos, o mixtos, subvencionando la inversión de este tipo de instalaciones.

Se considera que un usuario que invierta en este tipo de instalaciones querrá recuperar su inversión en diez años o menos, ya que periodos de recuperación superiores, son disuasorios incluso para las personas con alta conciencia medioambiental.

Entonces, como opciones para mejorar la rentabilidad del proyecto, se detallan los siguientes incentivos:

6.4.1. Normativa nacional e internacional

El gobierno peruano ha creado el marco legal de las energías renovables y el marco institucional del sector eléctrico, con los que pretende fomentar las energías renovables que son trascendentales para el país, ya que implica impulsar la diversificación de la matriz energética y con ello un avance hacia una política de seguridad energética y de protección del medio ambiente.

Del mismo modo permitirá fomentar la competencia de los proyectos con energías renovables e incentivar la investigación científica e innovación tecnológica que permitan hacer competitivas a las diversas tecnologías de energía limpia.

6.4.1.1. Marco nacional

Ahora, es necesaria la creación de normativas claras y concisas que faciliten el proceso burocrático para la implementación de estas instalaciones, sin ningún tipo de trabas que ralenticen su ejecución, incentivando a la población a optar por las diversas alternativas de energía limpia.

En muchos casos no es conveniente para las empresas distribuidoras que sus clientes instalen sistemas de generación interconectados a la red pública. Sin embargo, en algunos casos la empresa distribuidora puede informar acerca de la posibilidad de incentivos o subvenciones, por parte del estado, para la inversión y/o primas disponibles para sistemas que emplean recursos renovables.

En nuestro país se aprecia claramente que no existe alguna ley ni normativa específica para la ejecución de proyectos de autoconsumo en base a fuentes renovables. De momento, sólo se viene evaluando una propuesta de reglamento para generación distribuida, la cual se espera sea publicada para fines del presente año.

6.4.1.2. Normativa española

A diferencia de otros países, como España, ya se vienen trabajando leyes tales como el decreto RD 1578/2008 donde se especificaba que se retribuía aproximadamente 5 veces el valor de la tarifa media o de referencia por kWh generado para instalaciones fotovoltaicas de baja y media potencia, lo que hace mucho más factible (desde el punto de vista económico) la instalación de un sistema de este tipo, debido a la alta inversión inicial que se debe hacer.

También está el recién aprobado Real Decreto 244/2019, promulgado el 6 de abril de este año, donde se especifica que es posible la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a red bajo distintas modalidades de autoconsumo, sin excedentes y con excedentes, y acogidos a compensación o no.

Esto es una prueba de que ya existen normas y reglamentos para pequeños autoconsumidores de energía, además de incentivos que vuelven económicamente factibles la instalación de sistemas de este tipo, al ser tratados y remunerados de manera diferente que los grandes productores.

Precisamente en nuestro estudio se tomó como base la normativa técnica española, y se ajustó el dimensionamiento de cada sistema híbrido presentado en esta tesis de acuerdo a lo estipulado en ella.

6.4.2. Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)

Los MDL permiten que los países con metas de reducción de emisiones de GEI's, puedan adquirir los CER de proyectos ejecutados en países en desarrollo. El Perú también ha ratificado su compromiso con el cuidado del medio ambiente a través del Acuerdo de París, lo que le ha permitido beneficiarse de este mecanismo a través de distintos programas a nivel nacional.

6.4.3. Estimación de la reducción de emisiones de CO₂

Para calcular la reducción de emisiones se requiere saber la energía anual generada. Se utilizará la siguiente expresión:

$$Emisiones\ CO_2 = Energía_{generada,anual} * F_e \quad (6.1)$$

Donde el Factor de Emisión (Fe), para el sistema eléctrico interconectado nacional, tiene un valor igual a 0,612 Tn CO₂ eq/MWh.¹⁶¹

Se tiene que la energía total generada total es de 20407.24 kWh/año, y aplicando la ecuación 6.1, se obtiene:

$$Emisiones_{CO_2} = 20407.24 \frac{kWh}{año} * 0.612 \frac{Tn\ CO_2}{MWh}$$

$$Emisiones_{CO_2} = 12.49\ Tn \frac{CO_2}{año}$$

Evaluando para el horizonte de 20 años:

$$Emisiones_{CO_2, 20\ años} = Emisiones_{CO_2} * 20 años = 249.8\ TnCO_2$$

¹⁶¹ Valor obtenido por el método AMS-ID (FONAM Perú 2009).

6.4.4. Créditos de Carbono (CER)

Actualmente el precio de los CER se cotiza en 25.65 \$¹⁶², con lo que para nuestro caso se obtendría un valor de ingresos anuales de sólo 320.36 \$, pero que serían muy significativos para la recuperación de lo invertido. Cabe resaltar que sólo los MDL certificados podrán generar CER's para ser tranzados en el mercado, y dado que el costo del proceso de certificación es muy elevado, en Perú se reserva este mecanismo de apalancamiento para proyectos con una generación anual de energía eléctrica mucho más elevada, como la producida por los parques solares o eólicos. Por este motivo el uso de fondos obtenidos mediante la venta de bonos de carbono no ha sido considerado dentro del análisis económico de este proyecto, pero se debe tener presente cuando se realice el estudio de viabilidad de un proyecto de generación de mayor escala.

Se sabe que en el Perú se han venido desarrollando programas que implementan proyectos de cocinas solares en diferentes zonas rurales del país, de esta manera se ha evitado el consumo de combustibles como la leña y el carbón mejorando la calidad de vida al evitar la generación de humo dentro de las viviendas, y cuidando el medio ambiente al reducir las emisiones de dióxido de carbono. Específicamente, en convenio con la empresa Microsol, se ha desarrollado un sistema para el acceso a los CER, y posterior venta de bonos de carbono. De esta manera se han logrado generar tres procesos de certificación de bonos de carbono y para el 2014 se ha concluido la auditoría de un cuarto proceso de certificación de bonos y se ha dado inicio a los trabajos para un quinto proceso.

De igual manera, se podrían impulsar programas que promuevan el reconocimiento de bonos de carbono para proyectos de autoconsumo de baja potencia, como el estudiado en la presente tesis.

¹⁶² Precio referenciado al 29/05/2019 según: <https://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-streaming-chart>

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Con el método empleado para determinar la demanda de iluminación en la FIME se pudo determinar el cuadro de cargas de cada día de la semana, esto permitió justificar el uso de ambas fuentes renovables: sol y viento, esto por su aporte a lo largo del día y del año. Así también se pudo determinar que la mayor parte del consumo, correspondiente a la iluminación, pertenece a las aulas de clase representado por un 20% del total anual.
- Para la evaluación de las fuentes eólica y solar se utilizó la data proporcionada por la estación meteorológica semiprofesional de la FIME. Como resultado del análisis de los datos solares se pudo determinar que la mayor radiación solar se captaría si cada módulo fotovoltaico se instala con una inclinación de 9° hacia el norte, arrojando un total de 4.884 kWh/m² – día. Por otro lado, resultado del análisis de los datos eólicos, se determinó que la velocidad media del viento, a lo largo del año, y a una altura mínima de 15 m, fue de 4.06 m/s lo que significó que la mitad del tiempo la velocidad del viento estuvo por debajo de dicho valor y la otra mitad por encima. Así mismo, con las rosas de viento se constató que el viento tuvo una dirección 191° Sur - Sur Sudeste lo que quiere decir que el viento corre de sur a norte con una ligera desviación hacia el Nor Este.
- Finalmente, por un tema de poco espacio para el montaje de los equipos generadores, se utilizaron las azoteas de los edificios para tal propósito. Mismo motivo por el cual se consideró repartir la demanda total para ser abastecida por dos sistemas híbridos conectados a red, donde el primero estuvo compuesto por un aerogenerador de eje horizontal de 2500 W, 16 paneles policristalinos de 270 Wp, un controlador eólico y un inversor trifásico de 10 kW de potencia. Para el segundo sistema híbrido se necesitó de un aerogenerador de eje horizontal de 2500 W, 18 paneles policristalino de 270 Wp, un controlador eólico y un inversor trifásico de

10 kW. Dichos equipos no sólo han sido elegidos bajo un requerimiento de demanda energética y para un mejor aprovechamiento de las fuentes, también se ha tenido en cuenta que cumplan con las normativas establecidas para un correcto funcionamiento.

- Mediante un análisis económico, bajo la representación de ingresos seleccionada (autoconsumo con excedentes) y tomando en cuenta un precio de la energía activa según tarifa vigente (MT4), se concluyó que, como resultado de un flujo de caja proyectado para un horizonte de 20 años, el retorno de la inversión se dará en el año 19 dejando una VAN de 2444.08 \$ y arrojando una TIR de 2.89, siendo esta última mayor que la tasa promedio en moneda extranjera 2.24. Con esto se determinó que el proyecto podría ejecutarse siempre y cuando se planteen opciones para mejorar la rentabilidad del mismo y así reducir el tiempo de retorno de la inversión, logrando de esta manera la viabilidad no sólo técnica sino también económica del proyecto.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que con un adecuado plan de incentivos o cofinanciamiento por parte de empresas privadas, un sistema híbrido conectado a red como el propuesto en el presente estudio, puede lograr una factibilidad económica y no sólo técnica, permitiendo de esta manera una generación de energía más descentralizada.

7.2. Recomendaciones

- Para el cálculo de la demanda de energía eléctrica es recomendable usar facturas mensuales de luz, esto evitará un dimensionamiento excesivo del sistema híbrido. Se recomienda reubicar los circuitos exclusivos de la facultad en un tablero independiente, esto permitirá llevar un mejor control en la gestión de la energía.
- Para un mejor pronóstico de las fuentes renovables de energía se recomienda contar con una data meteorológica de una mayor cantidad de años, esto permitirá contar con una mejor predicción del potencial energético del lugar. Conjuntamente será aconsejable renovar la calibración de los equipos que conforman la estación meteorológica así como también realizar el mantenimiento preventivo de la misma.
- En aquellos lugares seleccionados como ubicación de cada sistema híbrido, se recomienda contar con equipos contra incendios en el exterior de dichos ambientes ante cualquier emergencia, así como limitar la operación de los mismos sólo a personal capacitado.
- Con lo antes mencionado en el análisis económico, no quiere decir que se declare desde ya no viable este tipo de proyectos en nuestro país, sino que se recomienda realizar un análisis económico más minucioso, para lo cual se deberá dialogar y analizar detenidamente todos los aspectos involucrados con el área comercial y técnica de la empresa distribuidora correspondiente, para que permita determinar el alcance, magnitud y limitaciones del proyecto que se planee realizar.
- De publicarse lo más pronto posible el reglamento para generación distribuida, se podrían organizar programas que permitan tener acceso a las certificaciones CER, pudiendo obtener fondos por la venta de créditos de carbono los que permitan amortizar en menos tiempo el costo inicial de la instalación.

CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [01] Informe estadístico preliminar del subsector eléctrico en abril del 2017.
- [02] Anuario estadístico MINEM: Balance y Principales Indicadores Eléctricos 2017.
- [03] Cruz Lazo E. G. (2010). Diseño y simulación del comportamiento de un sistema híbrido de potencia. (Tesis). Universidad de Piura, Piura.
- [04] Ibáñez Plana, M., Rosell Polo, J., Rosell Urrutia, J. (2004). Tecnología solar. 1º Ed. Madrid: Mundi-Prensa.
- [05] Ph.D., M.Sc., Ing. Álvaro Pinilla S. (1977). Manual de aplicación de la energía eólica. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías alternativas INEA, Colombia.
- [06] Fernández Díez, Pedro. (1993). Energía eólica. 1º ed. Universidad de Cantabria, España.
- [07] Gilberto-Enriquez-Harper. El LIBRO PRACTICO-de-los-Generadores-Transformadores-y-Motores-Eléctricos. Mexico, 2004. Ed. Limusa.
- [08] Ing. Héctor L. Gasquet (2004). MANUAL teórico práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos. 1º ed, Texas.
- [09] Sistemas eólicos pequeños para generación de Electricidad. Una guía para consumidores en los EE.UU., pag3. Departamento de Energía, EE.UU.
- [10] Ulleberg, Ø. (1998). Stand-alone Power Systems for the future. (Tesis doctoral). University of Science and Technology Trondheim, Noruega.
- [11] Guía del desarrollo limpio: Una introducción a los mercados de créditos de carbono y al mecanismo de desarrollo limpio. UNEP (2007).

- [12] Portillo Franquelo, P. (Ed.1985). Energía solar. Madrid: Editorial Pirámide.
- [13] C. González José. Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables. ULPGC, UNED. 2009, Madrid.
- [14] Guaquín Soto, C.J. (2011). Metodología para el abastecimiento eléctrico por un sistema híbrido conectado a la red, aplicado a la posta de Boyeruca. (Tesis de grado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- [15] C. Herrejón J. Estudio de Sistemas de Bombeo Fotovoltaicos. (Tesis de maestría). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. México, 2009.
- [16] Carrión Pérez, P.A. Módulos fotovoltaicos. 1º Ed, 2008, Cuenca. Universidad de Castilla-La Mancha.
- [17] F. Ferichola J. Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil (Tesis).
- [18] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering. Pág.13-21.
- [19] D. Yogi Goswami y Frank Kreith, Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook. 2007, Pág. 5-10.
- [20] R. Serrano J. M. Sistema fotovoltaico conectado a red en vivienda situada en la sierra de Madrid. (Tesis de maestría). Madrid, 2009.
- [21] Aerogenerador Bornay. Manual de usuario-Montaje, operación y mantenimiento. España.
- [22] Instalaciones Técnicas Complementarias.- ITC-BT-18: Instalaciones de puesta a tierra. España.

[23] Norma REBT_España - Instrucciones técnicas complementarias. AENOR, 2002.

[24] Dufo-López, R. & Bernal-Agustín, J.L. Multi-objective design of PV-wind-dieselhydrogen-battery systems. Renewable Energy.

[25] Ley de Impuesto a la Renta – SUNAT. Capítulo IV: De las inafectaciones y exoneraciones.

[26] Dr. Alberto Ríos Villacorta. Futuro de la energía en Perú: Estrategias energéticas sostenibles. Lima-Perú, 2016.

[27] Ministerio de Energía y Minas. Uso eficiente de la energía: Guía metodológica para docentes de secundaria. Lima-Perú. www.minem.gob.pe

CAPÍTULO IX: ANEXOS

Anexo A

Planos de distribución de los ambientes de la FIME.

Anexo B

Demanda de energía en los días Sábados y Domingos.

Tabla B.1.- Horario de ambientes de uso diario, para los días sábados y domingos.¹⁶³

	Periodo típico de uso	Días típicos de uso	Horarios de uso
Oficina de titulación	5h, 2 veces por semana	Sábado y domingo	08:00 – 13:00
SS.HH. 18	20min, 2 veces por semana	Sábado y domingo	09:00 – 09:10 12:00 – 12:10
Iluminación exterior	3h 30min, 2 veces por semana	Sábado y domingo	18:30 – 22:00

Tabla B.2.- Horario de funcionamiento y energía demandada por los ambientes de uso diario, del día sábado y domingo.¹⁶⁴

AMBIENTE / HORA	POT	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	18:00	19:00	20:00	21:00	TOTAL
Oficina de Titulación	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00					160.00
SS.HH.18	32.00		5.33			5.33					10.67
Iluminación exterior	1000.00						500.00	1000.00	1000.00	1000.00	3500.00
POTENCIA HORARIA [W]		32.00	37.33	32.00	32.00	37.33	500.00	1000.00	1000.00	1000.00	3670.67
ENERGIA DIARIA [kWh/día]		0.032	0.037	0.032	0.032	0.037	0.5	1.0	1.0	1.0	3.67

¹⁶³ Elaboración propia.

¹⁶⁴ Elaboración propia.

Anexo C

Distribución de frecuencias de velocidad del viento

▪ Enero

Tabla C.1.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de enero.¹⁶⁵

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	60	15.00	15.00	0.02018843
2	197	49.25	64.25	0.08647376
3	568	142.00	206.25	0.27759085
4	708	177.00	383.25	0.51581427
5	596	149.00	532.25	0.71635262
6	390	97.50	629.75	0.84757739
7	355	88.75	718.50	0.96702557
8	77	19.25	737.75	0.99293405
9	17	4.25	742.00	0.99865410
10	4	1.00	743.00	1.00000000
11	0	0.00	743.00	1.00000000
12	0	0.00	743.00	1.00000000

▪ Febrero

Tabla C.2.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de febrero.¹⁶⁶

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	38	9.50	9.50	0.01414217
2	132	33.00	42.50	0.06326758
3	772	193.00	235.50	0.35057685
4	774	193.50	429.00	0.63863044
5	421	105.25	534.25	0.79531076
6	333	83.25	617.50	0.91924079
7	181	45.25	662.75	0.98660216
8	28	7.00	669.75	0.99702270
9	7	1.75	671.50	0.99962784
10	1	0.25	671.75	1.00000000
11	0	0.00	671.75	1.00000000
12	0	0.00	671.75	1.00000000

¹⁶⁵ Elaboración propia.

¹⁶⁶ Elaboración propia.

▪ **Marzo**

Tabla C.3.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de marzo.¹⁶⁷

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	68	17.00	17.00	0.02304304
2	363	90.75	107.75	0.14605219
3	624	156.00	263.75	0.35750593
4	625	156.25	420.00	0.56929854
5	517	129.25	549.25	0.74449339
6	403	100.75	650.00	0.88105727
7	215	53.75	703.75	0.95391393
8	120	30.00	733.75	0.99457811
9	14	3.50	737.25	0.99932226
10	2	0.50	737.75	1.00000000
11	0	0.00	737.75	1.00000000
12	0	0.00	737.75	1.00000000

▪ **Abril**

Tabla C.4.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de abril.¹⁶⁸

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	47	11.75	11.75	0.01638201
2	149	37.25	49.00	0.06831649
3	550	137.50	186.50	0.26002091
4	658	164.50	351.00	0.48936912
5	721	180.25	531.25	0.74067619
6	286	71.50	602.75	0.84036250
7	247	61.75	664.50	0.92645521
8	156	39.00	703.50	0.98082956
9	53	13.25	716.75	0.99930289
10	2	0.50	717.25	1.00000000
11	0	0.00	717.25	1.00000000
12	0	0.00	717.25	1.00000000

¹⁶⁷ Elaboración propia.

¹⁶⁸ Elaboración propia.

▪ **Mayo**

Tabla C.5.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de mayo.¹⁶⁹

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	38	9.50	9.50	0.01277311
2	133	33.25	42.75	0.05747899
3	426	106.50	149.25	0.20067227
4	947	236.75	386.00	0.51899160
5	835	208.75	594.75	0.79966387
6	367	91.75	686.50	0.92302521
7	150	37.50	724.00	0.97344538
8	67	16.75	740.75	0.99596639
9	11	2.75	743.50	0.99966387
10	1	0.25	743.75	1.00000000
11	0	0.00	743.75	1.00000000
12	0	0.00	743.75	1.00000000

▪ **Junio**

Tabla C.6.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de junio.¹⁷⁰

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	49	12.25	12.25	0.01712688
2	160	40.00	52.25	0.07305138
3	540	135.00	187.25	0.26179657
4	658	164.50	351.75	0.49178609
5	689	172.25	524.00	0.73261098
6	449	112.25	636.25	0.88954911
7	190	47.50	683.75	0.95595945
8	85	21.25	705.00	0.98566935
9	34	8.50	713.50	0.99755330
10	7	1.75	715.25	1.00000000
11	0	0.00	715.25	1.00000000
12	0	0.00	715.25	1.00000000

¹⁶⁹ Elaboración propia.

¹⁷⁰ Elaboración propia.

▪ **Julio**

Tabla C.7.- D Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de julio.¹⁷¹

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	49	12.25	12.25	0.01662708
2	131	32.75	45.00	0.06107906
3	449	112.25	157.25	0.21343739
4	779	194.75	352.00	0.47777401
5	929	232.25	584.25	0.79300984
6	324	81.00	665.25	0.90295215
7	174	43.50	708.75	0.96199525
8	84	21.00	729.75	0.99049881
9	27	6.75	736.50	0.99966067
10	1	0.25	736.75	1.00000000
11	0	0.00	736.75	1.00000000
12	0	0.00	736.75	1.00000000

▪ **Agosto**

Tabla C.8.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de agosto.¹⁷²

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	60	15.00	15.00	0.02018843
2	140	35.00	50.00	0.06729475
3	342	85.50	135.50	0.18236878
4	906	226.50	362.00	0.48721400
5	681	170.25	532.25	0.71635262
6	390	97.50	629.75	0.84757739
7	272	68.00	697.75	0.93909825
8	147	36.75	734.50	0.98855989
9	31	7.75	742.25	0.99899058
10	3	0.75	743.00	1.00000000
11	0	0.00	743.00	1.00000000
12	0	0.00	743.00	1.00000000

¹⁷¹ Elaboración propia.

¹⁷² Elaboración propia.

▪ **Septiembre**

Tabla C.9.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de septiembre.¹⁷³

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	112	28.00	28.00	0.03938115
2	209	52.25	80.25	0.11286920
3	519	129.75	210.00	0.29535865
4	650	162.50	372.50	0.52390999
5	665	166.25	538.75	0.75773558
6	302	75.50	614.25	0.86392405
7	219	54.75	669.00	0.94092827
8	117	29.25	698.25	0.98206751
9	50	12.50	710.75	0.99964838
10	1	0.25	711.00	1.00000000
11	0	0.00	711.00	1.00000000
12	0	0.00	711.00	1.00000000

▪ **Octubre**

Tabla C.10.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de octubre.¹⁷⁴

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	64	16.00	16.00	0.02159244
2	132	33.00	49.00	0.06612686
3	409	102.25	151.25	0.20411606
4	672	168.00	319.25	0.43083671
5	860	215.00	534.25	0.72098516
6	398	99.50	633.75	0.85526316
7	250	62.50	696.25	0.93960864
8	136	34.00	730.25	0.98549258
9	41	10.25	740.50	0.99932524
10	2	0.50	741.00	1.00000000
11	0	0.00	741.00	1.00000000
12	0	0.00	741.00	1.00000000

¹⁷³ Elaboración propia.

¹⁷⁴ Elaboración propia.

- **Noviembre**

Tabla C.11.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de noviembre.¹⁷⁵

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	52	13.00	13.00	0.01820091
2	119	29.75	42.75	0.05985299
3	503	125.75	168.50	0.23591180
4	886	221.50	390.00	0.54602730
5	551	137.75	527.75	0.73888694
6	335	83.75	611.50	0.85614281
7	264	66.00	677.50	0.94854743
8	130	32.50	710.00	0.99404970
9	16	4.00	714.00	0.99964998
10	1	0.25	714.25	1.00000000
11	0	0.00	714.25	1.00000000
12	0	0.00	714.25	1.00000000

- **Diciembre**

Tabla C.12.- Distribución de frecuencias y frecuencia acumulada de las velocidades del viento para la FIME de la UNPRG, para el mes de diciembre.¹⁷⁶

Velocidad m/s (U)	Distribución de frecuencias p(U)	Número de Horas	Distribución Acumulada P(U)	F(U)
1	60	15.00	15.00	0.02025658
2	191	47.75	62.75	0.08474004
3	532	133.00	195.75	0.26434841
4	908	227.00	422.75	0.57089804
5	464	116.00	538.75	0.72754895
6	314	78.50	617.25	0.83355841
7	272	68.00	685.25	0.92538825
8	205	51.25	736.50	0.99459824
9	14	3.50	740.00	0.99932478
10	2	0.50	740.50	1.00000000
11	0	0.00	740.50	1.00000000
12	0	0.00	740.50	1.00000000

¹⁷⁵ Elaboración propia.

¹⁷⁶ Elaboración propia.

Anexo D

Evaluación de la dirección del viento

D.1.- Frecuencia y duración de medidas

Mucho tiene que ver, el fin para el que se hagan medidas de viento, o el uso que se les pueda dar a estos datos. Por ejemplo, la presión atmosférica, que varía muy lentamente, basta con realizar medidas cada 3 horas. Para las temperaturas, bastan los valores horarios.

En cambio, para una evaluación precisa del potencial eólico, es recomendable tomar muestras de valores de viento con una frecuencia de 5 a 10 segundos, y promedios en intervalos de 10 minutos a 1 hora. Para análisis detallados como estudios específicos de características de viento, como de ráfagas o turbulencias, se requieren frecuencias de toma de datos iguales o superiores a 1 Hz o intervalos de promedio del orden de 1 minuto.

Entonces queda claro que la duración de las medidas también depende directamente del propósito de las mismas. Para nuestro caso, al instalar aerogeneradores en un determinado emplazamiento, las directrices que se trataron de seguir fueron:

- Medir durante un periodo de tiempo, lo más largo, práctico y económicamente posible.
- Medir en cada estación del año, dado que los patrones de la velocidad y dirección del viento son relativamente estacionales.
- Comparar con las medidas de otros lugares vecinos donde estén disponibles datos correspondientes a largos periodos de tiempo.
- Comparar las medidas con las tendencias regionales a largo plazo, ya que existen evidencias de que ocurren significantes variaciones climatológicas en la velocidad del viento.

D.2.- Dirección del viento

La data de viento obtenida se trata estadísticamente, esto con el fin de obtener la distribución por rumbos de las direcciones y la distribución por frecuencias de las velocidades.

La distribución de direcciones de viento es de vital importancia a la hora de ubicar un aerogenerador o un conjunto de ellos, teniendo mucho que ver el tipo de terreno en el que se va a realizar dicha instalación.

De igual forma, es importante saber la variabilidad direccional del régimen de vientos al que debe responder el sistema de orientación de estos equipos. La representación más habitual, en la que se expresa el porcentaje de tiempo en el que el viento tiene una determinada dirección, es la de la rosa de los vientos. Normalmente, también se refleja la distribución de velocidades de viento para cada intervalo direccional.

Las cuatro direcciones principales expresados en la Rosa de Vientos son: Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (W). Se consideran hasta 32 entre estos y los intermedios, aunque los primordiales y más usados son los que se muestran a continuación en la tabla D.1, cada uno con su equivalencia en grados del azimut.

Tabla D.1.- Puntos principales e intermedios más usados en la Rosa de Vientos.¹⁷⁷

Abreviatura	Dirección	Grados
NNE	Norte Noreste	22.5°
NE	Noreste	45.0°
ENE	Este Nordeste	67.5°
E	Este	90.0°
ESE	Este Sudeste	112.5°
SE	Sudeste	135.0°
SSE	Sur Sudeste	157.5°
S	Sur	180.0°
SSW	Sur Sudoeste	202.5°
SW	Sudoeste	225.0°
WSW	Oeste Sudeste	247.5°
W	Oeste	270.0°
WNW	Oeste Noroeste	292.5°
NW	Noroeste	315.0°
NNW	Norte Noroeste	337.5°
N	Norte	360.0°

¹⁷⁷ Fuente: <http://www.canaltiempo21.com/capitulo-6-el-viento/>

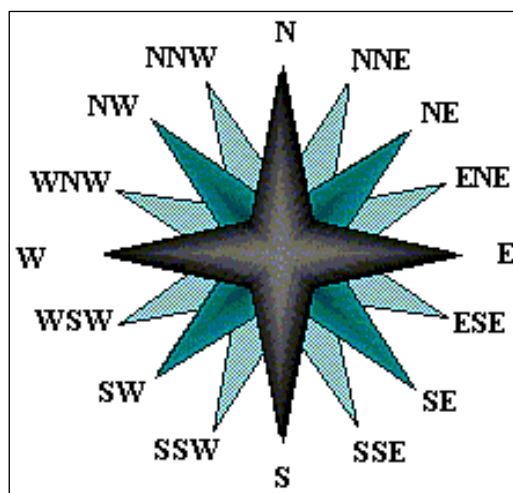


Figura D.1.- Representación gráfica Rosa de Vientos: Los 16 rumbos colaterales.¹⁷⁸

Con la información de dirección del viento contenido en la data meteorológica brindada por la FIME, se procede a evaluar de manera mensual la distribución de direcciones a través de la rosa de vientos. A continuación, en las figuras D.2 a la D.13, se muestran las Rosas de Viento para cada mes del año.

¹⁷⁸ Fuente: <http://www.canaltiempo21.com/capitulo-6-el-viento/>

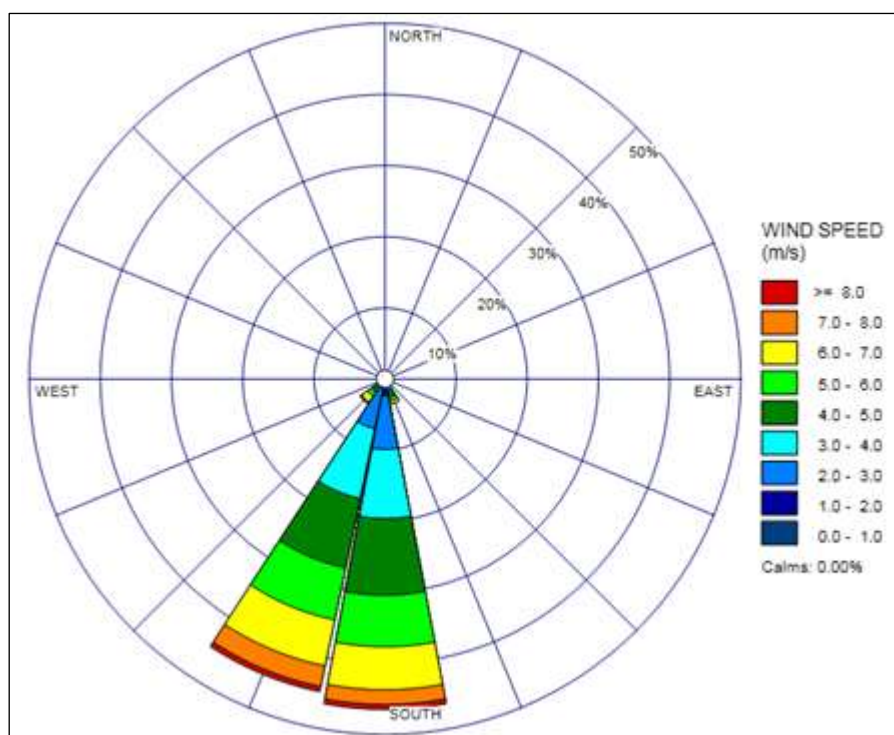


Figura D.2.- Rosa de vientos para el mes de enero.¹⁷⁹

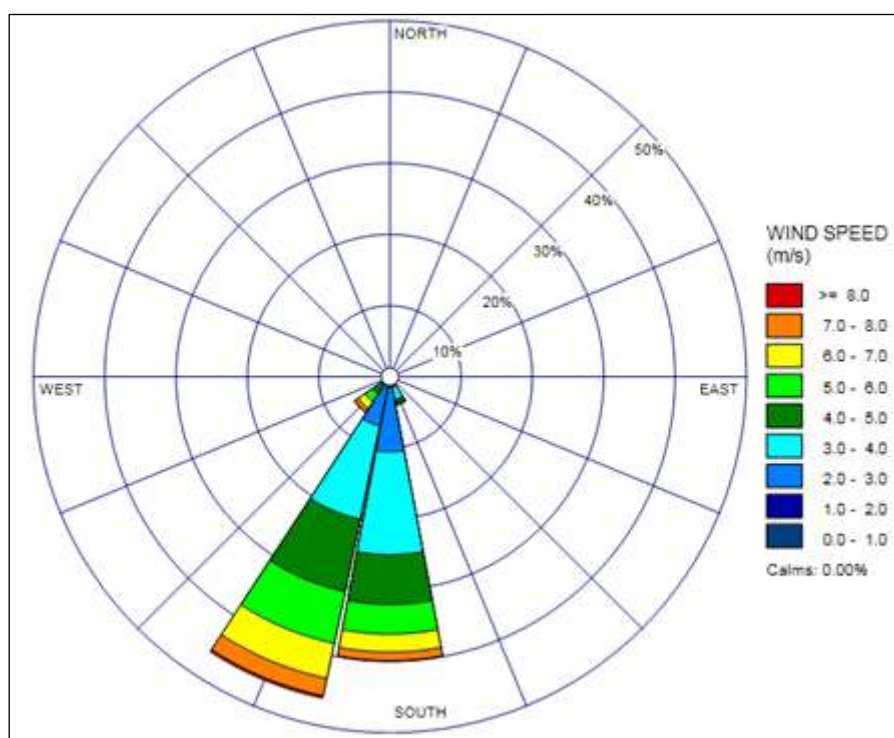


Figura D.3.- Rosa de vientos para el mes de febrero.¹⁸⁰

¹⁷⁹ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

¹⁸⁰ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

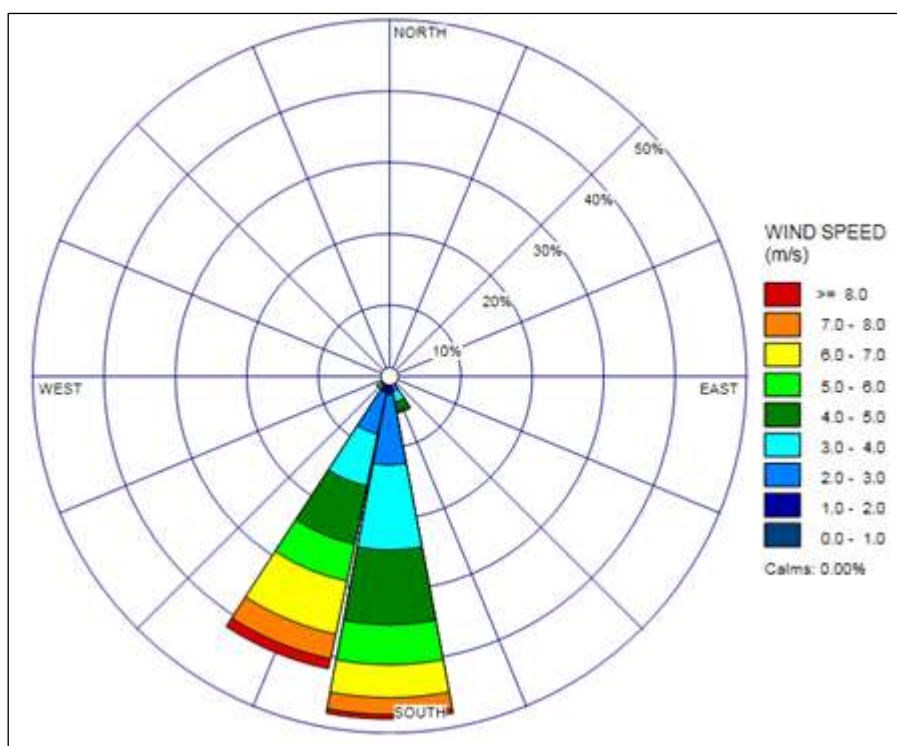


Figura D.4.- Rosa de vientos para el mes de marzo.¹⁸¹

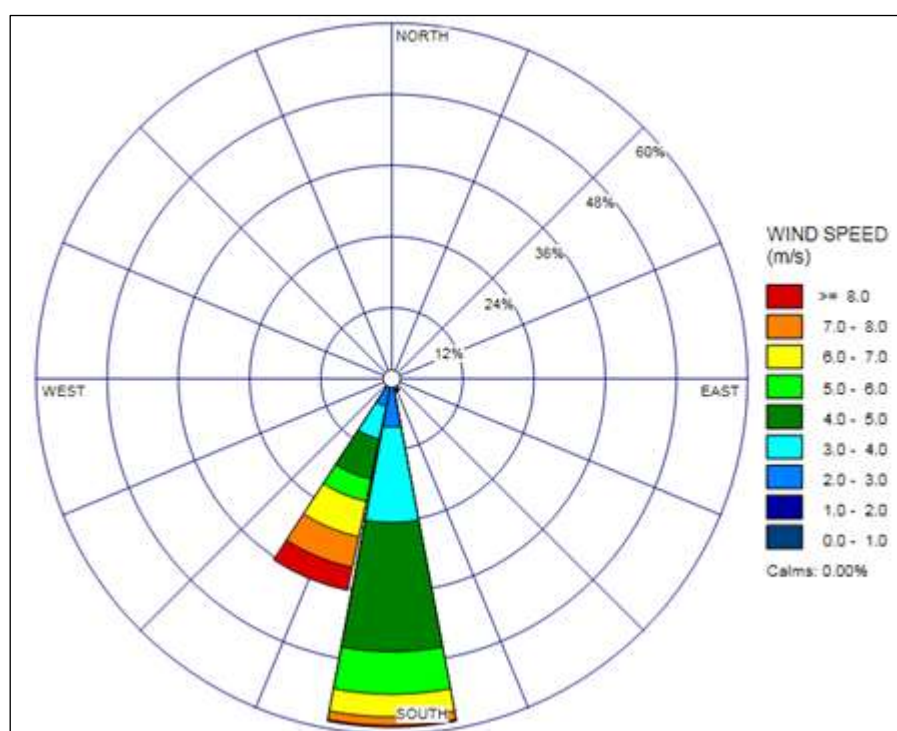


Figura D.5.- Rosa de vientos para el mes de abril.¹⁸²

¹⁸¹ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

¹⁸² Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

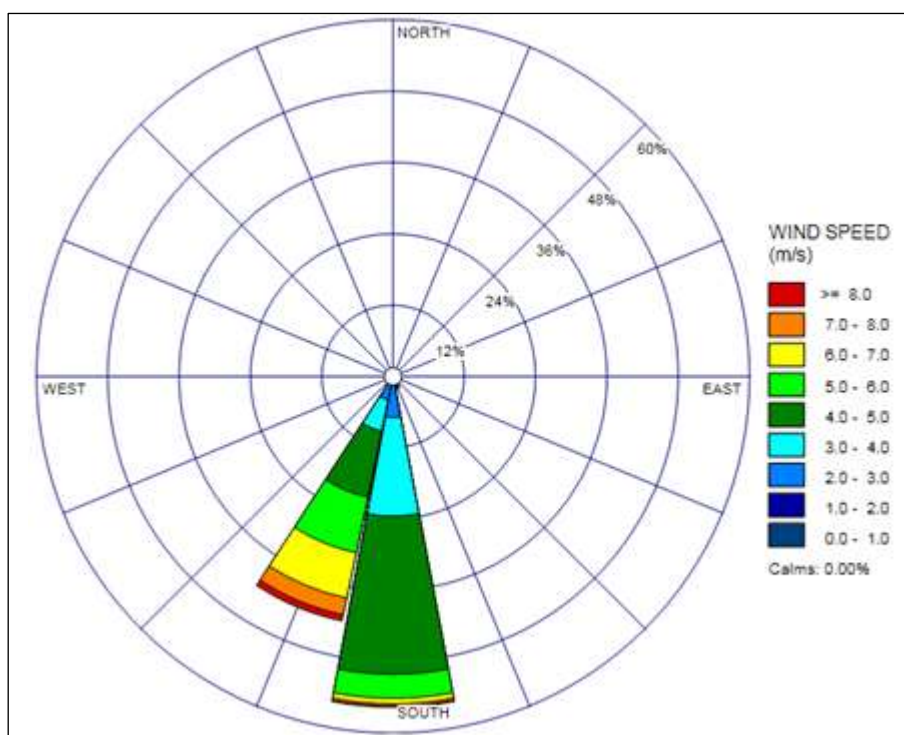


Figura D.6.- Rosa de vientos para el mes de mayo.¹⁸³

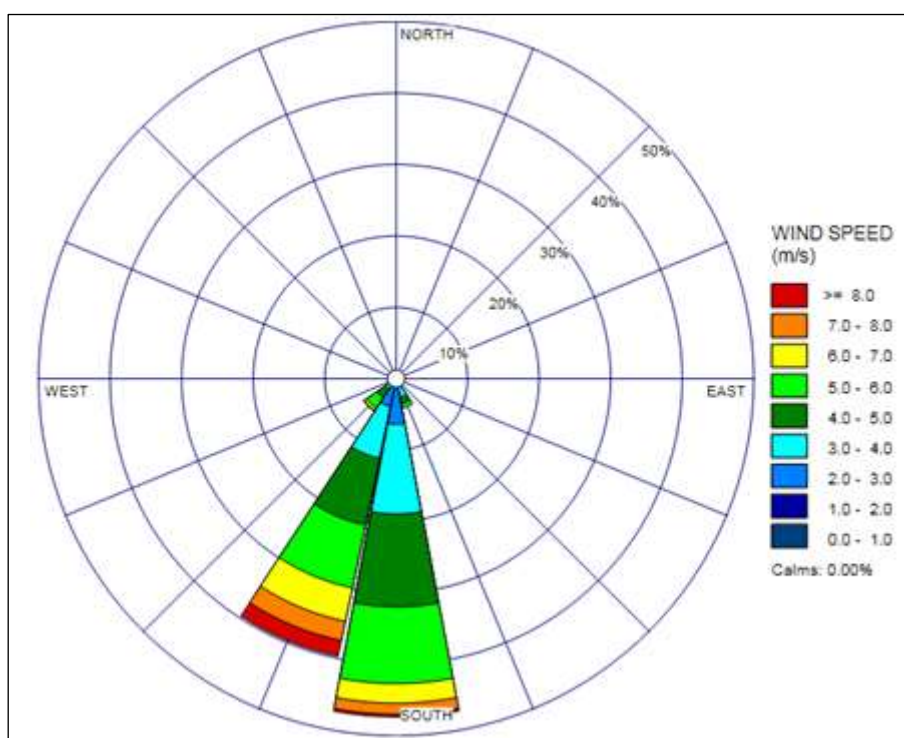
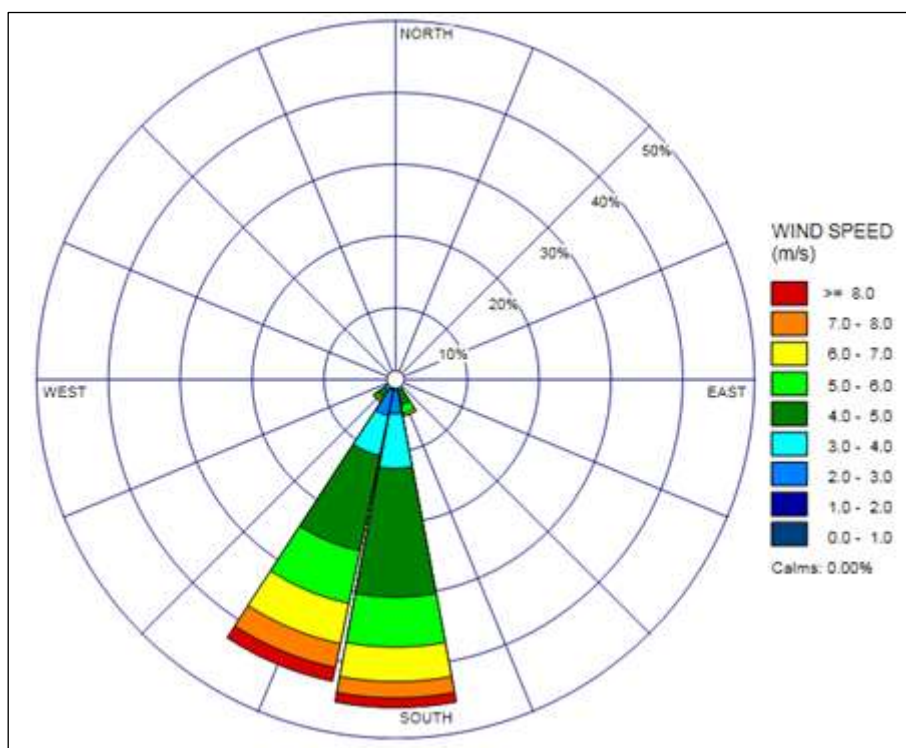
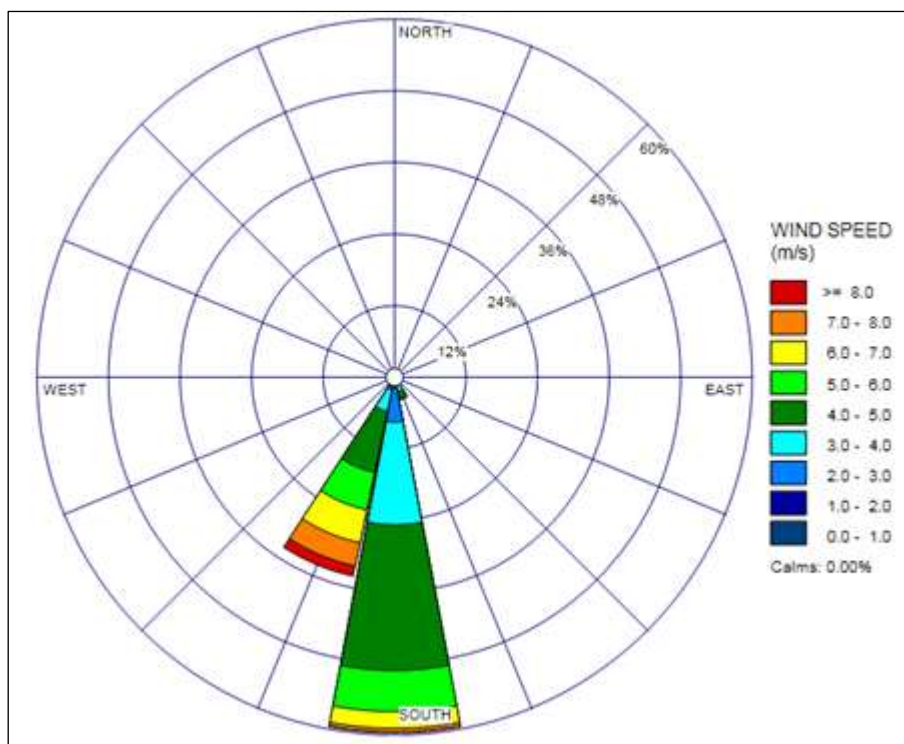


Figura D.7.- Rosa de vientos para el mes de junio.¹⁸⁴

¹⁸³ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

¹⁸⁴ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.



¹⁸⁵ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

186 Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

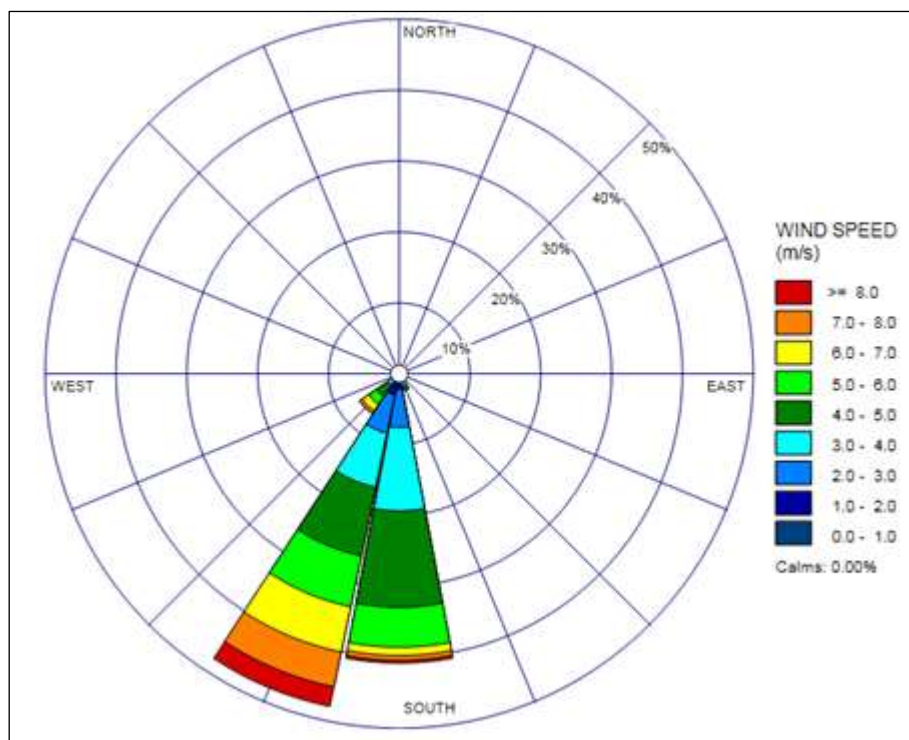


Figura D.10.- Rosa de vientos para el mes de septiembre.¹⁸⁷

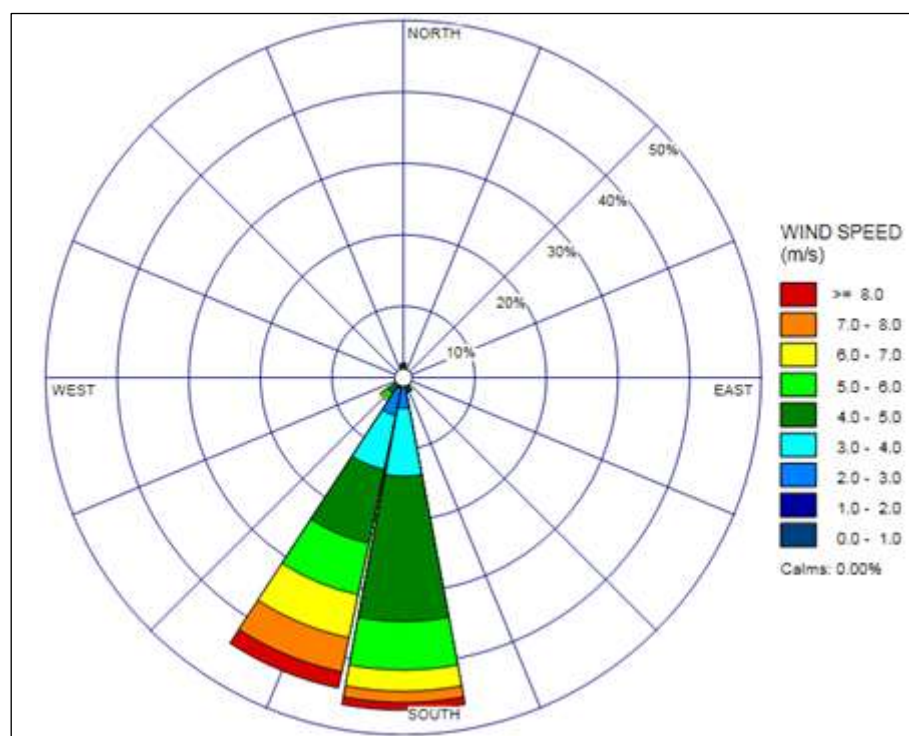


Figura D.11.- Rosa de vientos para el mes de octubre.¹⁸⁸

¹⁸⁷ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

¹⁸⁸ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

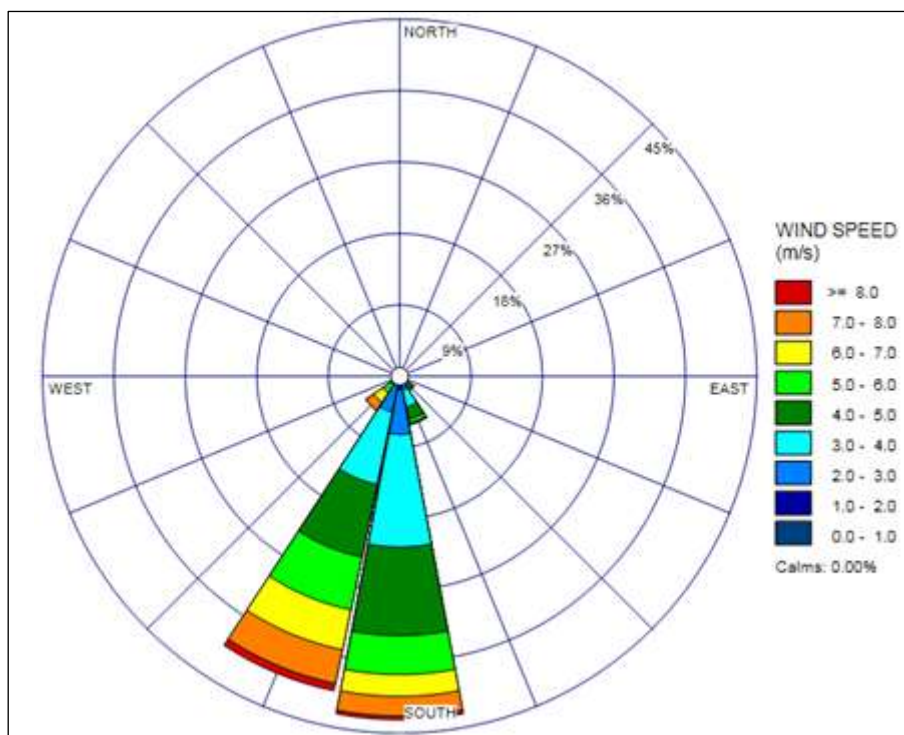


Figura D.12.- Rosa de vientos para el mes de noviembre.¹⁸⁹

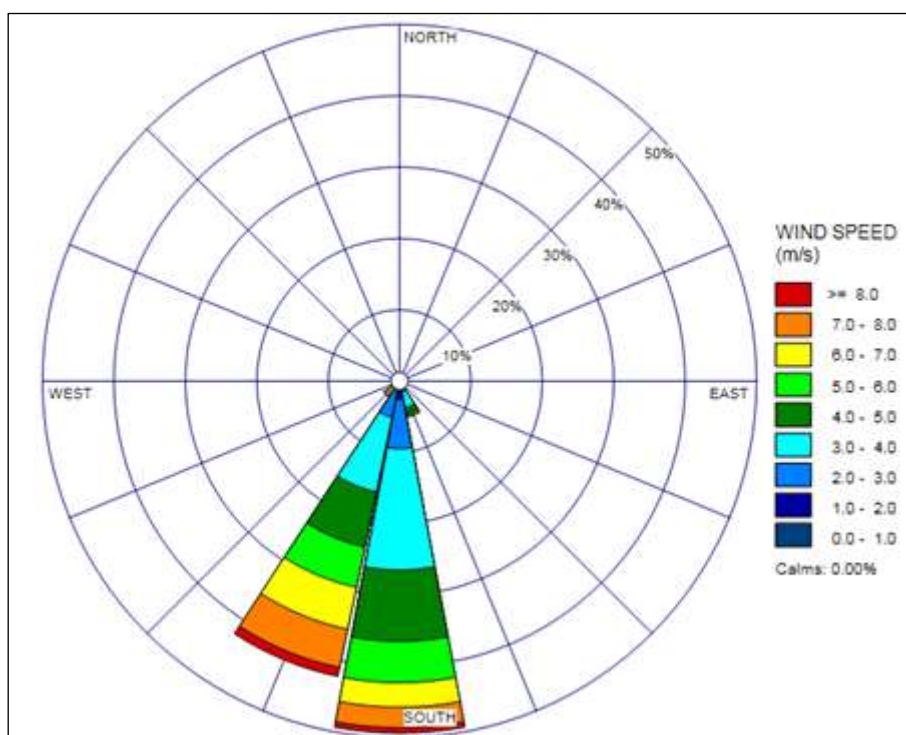


Figura D.13.- Rosa de vientos para el mes de diciembre.¹⁹⁰

¹⁸⁹ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

¹⁹⁰ Elaboración propia. Software WRPLOT View Versión 7.0.0.

En la tabla D.2 se detalla un resumen de los valores promedio de la dirección óptima del viento a lo largo del año, obtenidos a partir de la información de la distribución de velocidades para cada intervalo direccional y el porcentaje del tiempo en el cual el viento presenta una determinada dirección, lo cual se muestra explícitamente en los gráficos de la rosa de vientos para cada mes del año.

Tabla D.2.- Cálculo de la dirección óptima promedio del viento.¹⁹¹

Mes	Dirección	Grados
Enero	S – SSW	191°
Febrero	S – SSW	193°
Marzo	S – SSW	189°
Abril	S – SSW	188°
Mayo	S – SSW	189°
Junio	S – SSW	190°
Julio	S – SSW	187°
Agosto	S – SSW	190°
Septiembre	S – SSW	194°
Octubre	S – SSW	192°
Noviembre	S – SSW	189°
Diciembre	S – SSW	189°
PROMEDIO ANUAL	S - SSW	190.08°

Se aprecia en la tabla D.2, una dirección anual promedio óptima de 190° aproximadamente, en la dirección comprendida entre los puntos Sur y Sur Sudeste, coincidente con la dirección de los vientos alisios¹⁹² presentes en la región del emplazamiento.

¹⁹¹ Elaboración propia.

¹⁹² Son aquellos vientos que soplan regularmente en los océanos Pacífico y Atlántico, en las zonas tropicales hacia el ecuador, desde más o menos 30 grados y en los dos hemisferios, o sea en el sur hacia el norte y en el norte hacia el sur y en ambos un poco hacia el este. Estos vientos son relativamente constantes.

Anexo E

Distribución de Paneles Fotovoltaicos

E.1.- Relación Sol-Tierra

La radiación solar extraterrestre varía durante el año, para lo cual existe un factor corrector de la excentricidad de la eclíptica (ε_0), que puede ser descrita mediante la ecuación E.1:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \quad (\text{E.1})$$

Siendo:

- r_0 : La distancia media Tierra-Sol
- r : La distancia en el momento en que se desea calcular
- d_n : El número de orden del día a evaluar (por ej. 1 de enero corresponde a 1, y 31 de diciembre a 365).

La ecuación E.1 asume una velocidad angular constante.

El plano del ecuador no es paralelo al plano de la trayectoria terrestre alrededor del sol (eclíptica). El plano del ecuador mantiene la misma dirección durante el año, con una inclinación de 23.45° sobre el plano de la eclíptica, lo que da lugar a un ángulo que varía desde 23.45° hasta -23.45° llamado declinación (δ) y que corresponde al ángulo entre la recta sol-tierra y el plano del ecuador. A los 23.45° ocurre el solsticio de verano, y a los -23.45° el solsticio de invierno. La declinación (δ) puede estimarse mediante la ecuación E.2.

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{284+d_n}{365}\right) \quad (\text{E.2})$$

“Las relaciones geométricas entre un plano de alguna orientación asociada a un lugar de la tierra en algún momento y la relación solar entrante, suelen

describirse mediante la posición del sol relativa a ese plano a través de variados ángulos.”¹⁹³

Se pueden mencionar:

- Latitud (\emptyset): el ángulo respecto a la ubicación, al norte o sur del Ecuador ($-90^\circ \leq \emptyset \leq 90^\circ$), donde el norte corresponde a 90° .
- Inclinación (β): el ángulo entre el plano de la superficie en análisis y la horizontal ($0 \leq \beta \leq 180^\circ$), si $\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene una componente que enfrenta hacia abajo.
- Ángulo azimut (γ): es el ángulo formado entre la dirección sur y la proyección del punto sobre el horizonte ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$), siendo positivo hacia el oeste. Se le llama horizonte al círculo formado por el lugar geométrico de los puntos con elevación 0° .
- Ángulo horario (ω): Corresponde al desplazamiento angular del sol, en este u oeste debido a la rotación de la tierra sobre su eje en 15° por hora, $\omega = 0$ al mediodía, en la mañana negativo y en la tarde positivo.
- Ángulo de incidencia (θ): el ángulo entre la recta que une la superficie con el sol y la normal a la superficie.
- Se definen también ángulos que describen la posición del sol en el cielo:
- Ángulo cenital solar (θ_z): el ángulo entre la vertical y la línea al sol, es decir el ángulo de incidencia del rayo de luz sobre una superficie horizontal
- Altitud (α_s): el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir el complemento del cenital.
- Ángulo azimut solar (γ_s): es el desplazamiento angular entre la proyección del rayo de luz sobre el plano horizontal y el vector que apunta al sur (Figura E.1 b). Los desplazamientos hacia el este son negativos y hacia el oeste positivos.

Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital solar. Su valor se encuentra entre 0° y 90° cuando el sol está sobre el horizonte, así

¹⁹³ Concepto extraído de la referencia [13], Sección 1.6, Pág. 12-13.

para $\beta = 0$ se tiene la ecuación E.3. Mientras que para el cálculo del azimut solar (γ_s) se tiene la ecuación E.4.

$$\delta \cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) = \sin(\alpha_s) \quad (E.3)$$

$$\cos(\gamma_s) = \frac{(\sin(\alpha_s) \sin(\phi) - \sin(\delta))}{\cos(\alpha_s) \cos(\phi)} \quad (E.4)$$

En la figura E.1 se definen los ángulos que permiten describir el movimiento del sol con respecto a una ubicación.

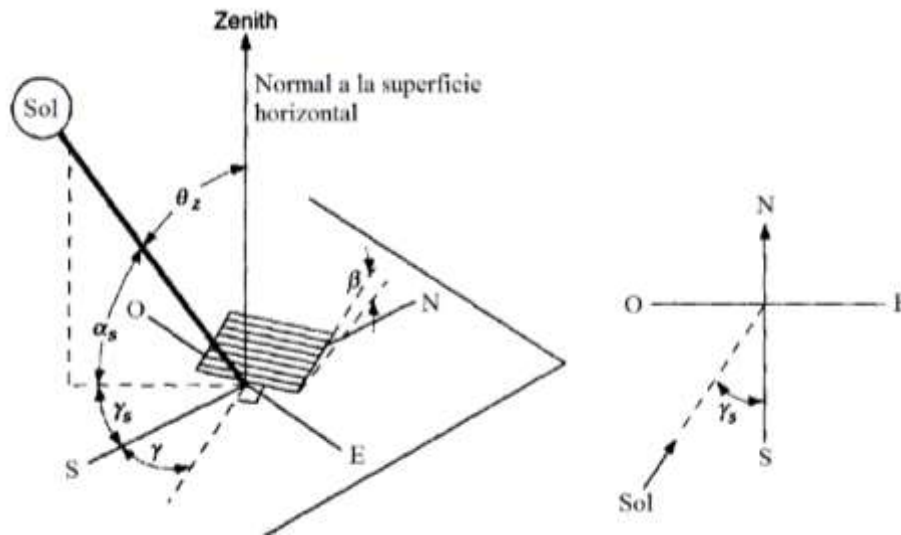


Figura E.1.- a) Ángulo cenital solar, inclinación, ángulo azimut solar para una superficie inclinada, b) Plano mostrando el ángulo azimut solar.¹⁹⁴

Como una simplificación de cálculos, se utiliza el concepto de día representativo del mes, que corresponde al día en que la declinación corresponde a la declinación media del mes. A través de esta simplificación, sólo se necesita calcular la insolación para ese día, en vez de calcularlos para todos los días del mes. En la tabla E.1 se informa respecto a los días representativos para cada mes y la declinación asociada.

¹⁹⁴ Concepto extraído de la referencia [18], Sección 1.6, Pág. 12-13.

Tabla E.1.- Días representativos de los meses y declinación asociada.¹⁹⁵

Mes	Día Representativo [η]	Día del año [d_n]	Declinación [δ]
Enero	17	17	-20.9
Febrero	16	47	-13.0
Marzo	16	75	-2.4
Abril	15	105	9.4
Mayo	15	135	18.8
Junio	11	162	23.1
Julio	17	198	21.2
Agosto	16	228	13.5
Septiembre	15	258	2.2
Octubre	15	288	-9.6
Noviembre	14	318	-18.9
Diciembre	10	344	-23.0

Con el valor de la latitud de la zona y de la declinación obtenida de tabla E.1 se puede calcular el ángulo de salida del sol ω_s a través de la ecuación E.5:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\delta) * \tan(\emptyset)) \quad (\text{E.5})$$

Siendo:

ω_s : Ángulo de salida del sol

\emptyset : Latitud

δ : Declinación

E.2.- Radiación extraterrestre diaria

La energía que proviene del sol antes de atravesar la superficie terrestre se denomina radiación extraterrestre diaria β_d^0 y es muy superior a la que se encuentra sobre la superficie de la Tierra.

“El sol es una fuente de energía, que la genera en forma de radiación a una tasa de 3.8×10^{22} [kW], y una pequeña fracción es interceptada por la tierra, la cual

¹⁹⁵ Concepto extraído de la referencia [18], Sección 1.6, Pág. 14-15.

corresponde a 1.8×10^{14} [kW] siendo el 60% el que logra llegar a la superficie terrestre.”¹⁹⁶

Se determina con la ecuación E.6.

$$B_d^0 = \frac{24}{\pi} B_0 \varepsilon_0 (\cos \delta * \cos \phi * \sin \omega_s + \omega_s (\pi/180) \sin \delta \sin \phi) \quad (E.6)$$

Donde:

B_0 : Constante solar que tiene un valor establecido de 1353 W/m².¹⁹⁷

Dado que ε_0 es un factor corrector asociado a la geometría elíptica de la tierra, este valor tiene efecto para evaluaciones diarias, pero resulta igual a 1 para estimaciones mensuales.

E.3.- Índice de claridad¹⁹⁸

El índice de claridad k_t representa la transparencia de la atmósfera, y corresponde a la razón entre la radiación global y la radiación extraterrestre.” Esta se calcula empleando la ecuación E.7:

$$k_t = \frac{G_0(0)}{B_d^0} \quad (E.7)$$

Donde:

k_t : Índice de claridad

B_d^0 : Radiación extraterrestre diaria kWh/m² día

$G_0(0)$: Radiación global kWh/m² día

A partir del índice de claridad de la zona k_t y mediante las correlaciones de Liu-Jordan, se encuentra el valor del índice de claridad difuso k_d mediante la expresión E.8.¹⁹⁹

¹⁹⁶ Información elaborada con la referencia [19].

¹⁹⁷ Valor extraído de la referencia [18], Sección 1.2, Pág. 5-6.

¹⁹⁸ Información elaborada con la referencia [14].

¹⁹⁹ Expresión extraída de la referencia [06].

$$k_d = 1.39 - 4.07 * k_t + 5.531 * k_t^2 - 3.108k_t^3 \quad (E.8)$$

E.4.- Radiación global sobre una superficie horizontal

La radiación solar extraterrestre pasa a través de la atmósfera, una parte de esta es absorbida y la otra reflejada por el aire y el vapor de agua. Otra parte sufre dispersión debido a las moléculas de aire, vapor de agua, aerosoles y demás partículas. La parte de radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra esencialmente sin cambios en la dirección es llamada radiación directa. La radiación dispersada que alcanza la superficie es llamada radiación difusa. A la radiación procedente del suelo que corresponde a la reflexión de la radiación incidente se le llama radiación de albedo. Entonces se tiene que la radiación resultante total (directa + difusa + albedo) es denominada radiación global.

Para una superficie horizontal no se considera la radiación de albedo, esto debido a que no sería posible la desviación de los rayos del sol al suelo y luego hacia una horizontal. Las expresiones con las que pueden ser calculadas las componentes se definen a continuación:

La radiación difusa $D_d(0)$ se calcula utilizando la ecuación E.9.

$$D_d(0) = k_d * G_0(0) \quad (E.9)$$

La radiación directa $B_d(0)$ es igual al valor de la radiación global menos el valor de la radiación difusa, tal como se representa en la ecuación E.10.²⁰⁰

$$B_d(0) = G_0(0) - D_d(0) \quad (E.10)$$

Con los valores de los promedios mensuales de radiación global en el plano horizontal al día que se muestran en la tabla 4.6, se obtiene los valores de cada una de sus componentes (radiación directa y difusa) haciendo uso de las ecuaciones E.9, y D.10.

Los valores mensuales se representan en la tabla E.2.

²⁰⁰ Información elaborada con la referencia [03].

Tabla E.2.- Componentes de la Radiación Global [kWh/m² día] sobre un plano horizontal en la FIME.²⁰¹

Mes	$G_0(0)$	d_n	δ	ω_s	B_d^0	k_t	k_d	$D_d(0)$	$B_d(0)$
Enero	5.570	17	-20.92	95.231	10.78	0.517	0.335	1.865	3.705
Febrero	5.819	47	-12.95	93.146	10.66	0.546	0.311	1.808	4.011
Marzo	5.863	75	-2.42	90.577	10.20	0.575	0.288	1.688	4.175
Abril	5.007	105	9.41	87.733	9.31	0.538	0.317	1.589	3.417
Mayo	3.736	135	18.79	85.344	8.34	0.448	0.397	1.484	2.252
Junio	3.330	162	23.09	84.164	7.82	0.426	0.420	1.398	1.932
Julio	3.807	198	21.18	84.695	8.05	0.473	0.374	1.423	2.384
Agosto	4.010	228	13.45	86.728	8.92	0.450	0.396	1.586	2.424
Septiembre	4.804	258	2.22	89.471	9.90	0.485	0.362	1.741	3.063
Octubre	5.092	288	-9.60	92.312	10.55	0.483	0.365	1.857	3.236
Noviembre	5.476	318	-18.91	94.688	10.76	0.509	0.342	1.871	3.605
Diciembre	5.565	344	-23.05	95.826	10.77	0.516	0.335	1.865	3.700

E.5.- Radiación global sobre una superficie inclinada

Para una superficie en alguna orientación inclinada como la mostrada en la figura E.2 (en el hemisferio norte), el ángulo de incidencia θ , se puede deducir del hecho que la superficie con inclinación β hacia el norte o sur tiene la misma relación angular con el rayo de radiación, que una superficie horizontal con una latitud artificial $(\phi - \beta)$.

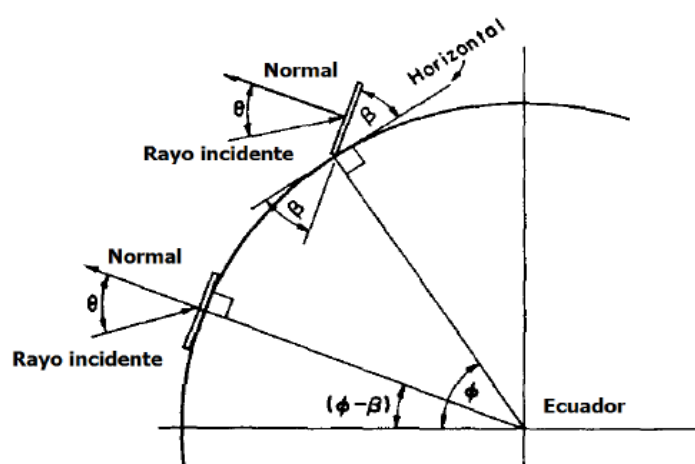


Figura E.2.- Sección de la Tierra mostrando β , θ , ϕ , y $(\phi - \beta)$ para el hemisferio norte.²⁰²

²⁰¹ Elaboración propia.

²⁰² Imagen extraída de la referencia [14].

Si la latitud ϕ es menor a cero, al encontrarse al sur de la línea ecuatorial, como sucede en el caso estudio de la tesis, los ángulos de la latitud ϕ y la inclinación β , para el cálculo del ángulo de salida $\omega_s(\beta)$, se suman, como se aprecia en la ecuación E.11, en caso el estudio se refiriera al hemisferio norte estos ángulos se restarían como ya se mencionó anteriormente.

$$\omega_s(\beta) = \cos^{-1}(-\tan \delta * \tan(\phi + \beta)) \quad (E.11)$$

Calculado el ángulo de salida para una determinada inclinación, es posible determinar el parámetro R_b , que viene a ser la relación entre la componente directa de la radiación solar sobre una superficie inclinada y la radiación directa sobre una superficie horizontal. Este parámetro se define con la ecuación E.12:

$$R_b = \frac{\omega_{ss} * \sin \delta * \sin(\phi + \beta) + \cos \delta * \cos(\phi + \beta) * \sin \omega_{ss}}{\omega_s * \sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \sin \omega_s} \quad (E.12)$$

Donde:

$$\omega_{ss} = \text{MIN}[\omega_s; \omega_s(\beta)]$$

Es decir ω_{ss} viene a ser el valor mínimo, entre ángulo de salida para una posición horizontal y para una posición con una inclinación β .

E.5.1.- Radiación de albedo²⁰³

Para la determinación de la radiación del albedo, es necesario conocer el coeficiente de albedo o reflectividad (ρ_{ref}), que corresponde a la relación entre la energía reflejada y la energía incidente sobre la superficie del suelo. En la tabla E.3 se enuncian valores aproximados de la reflectividad de suelos.

²⁰³ Información elaborada con la referencia [14].

Tabla E.3.- Coeficiente de albedo o reflectividad.²⁰⁴

Tipo de superficie	Reflectividad
Bosque	0.06 - 0.2
Suelo cultivado	0.07 – 0.14
Asfalto seco	0.09 – 0.15
Cultivos Herbáceos	0.12 – 0.25
Situación urbana	0.14 – 0.22
Césped	0.15 – 0.25
Asfalto mojado	0.18
Césped fresco	0.26
Tejas rojas	0.33
Acero	0.35
Nieve mojada	0.55 – 0.75
Aluminio	0.85

Se procede a calcular las componentes para la radiación incidente para distintas inclinaciones, representadas con el símbolo β perteneciente al ángulo de inclinación. Las expresiones para las componentes de la radiación global son:

Radiación directa para una superficie con inclinación β , utilizando la ecuación E.13.

$$B_d(\beta) = B_d(0) * R_b \quad (\text{E.13})$$

Radiación difusa para una superficie con inclinación β , utilizando la ecuación E.14.

$$D_b(\beta) = D_d(0) * \frac{1+\cos\beta}{2} \quad (\text{E.14})$$

Radiación de albedo para una superficie con inclinación β , utilizando la ecuación E.15.

$$A_d(\beta) = G_0(0) * \left(\frac{1-\beta}{2}\right) * \rho_{ref} \quad (\text{E.15})$$

A continuación, en la tabla E.4 se muestran los valores de radiación global sobre una superficie, calculados para diferentes ángulos de inclinación.

²⁰⁴ Información elaborada con la referencia [14].

Tabla E.4.- Valores de radiación global en [kWh/m² día] sobre una superficie para diferentes ángulos de inclinación.²⁰⁵

β°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
0	5.570	5.819	5.863	5.007	3.736	3.330	3.807	4.010	4.804	5.092	5.476	5.565
1	5.547	5.810	5.875	5.037	3.769	3.364	3.846	4.038	4.820	5.090	5.458	5.538
2	5.523	5.799	5.885	5.067	3.801	3.398	3.884	4.064	4.834	5.087	5.438	5.510
3	5.498	5.787	5.894	5.095	3.832	3.430	3.921	4.090	4.848	5.082	5.417	5.481
4	5.471	5.774	5.901	5.122	3.863	3.462	3.957	4.115	4.860	5.076	5.394	5.451
5	5.444	5.759	5.907	5.148	3.892	3.493	3.992	4.138	4.871	5.069	5.371	5.420
6	5.415	5.743	5.912	5.173	3.921	3.523	4.026	4.161	4.881	5.061	5.347	5.387
7	5.386	5.726	5.915	5.196	3.949	3.553	4.060	4.183	4.890	5.052	5.321	5.354
8	5.355	5.708	5.916	5.219	3.976	3.581	4.092	4.204	4.898	5.042	5.294	5.320
9	5.323	5.688	5.917	5.240	4.002	3.609	4.124	4.224	4.905	5.030	5.267	5.284
10	5.290	5.667	5.916	5.259	4.027	3.636	4.154	4.243	4.911	5.018	5.238	5.248
11	5.256	5.645	5.913	5.278	4.051	3.663	4.184	4.261	4.915	5.004	5.208	5.211
12	5.221	5.621	5.909	5.295	4.074	3.688	4.213	4.278	4.918	4.990	5.177	5.172
13	5.185	5.597	5.904	5.311	4.097	3.713	4.240	4.294	4.921	4.974	5.145	5.133
14	5.148	5.571	5.897	5.326	4.118	3.736	4.267	4.309	4.922	4.957	5.112	5.093
15	5.110	5.543	5.889	5.339	4.138	3.759	4.292	4.323	4.922	4.939	5.078	5.051

En la tabla E.5 se aprecian los valores anuales promedio de radiación global diaria y energía por unidad de área que se puede obtener al año, para cada ángulo de inclinación.

²⁰⁵ Elaboración propia.

Tabla E.5.- Valores de radiación global en [kWh/m² día] sobre una superficie para diferentes ángulos de inclinación.²⁰⁶

β°	Radiación Global Diaria promedio [kWh/m ² día]	Energía Anual [kWh/m ²]
0	4.8400	1766.584
1	4.8492	1769.956
2	4.8574	1772.937
3	4.8645	1775.527
4	4.8705	1777.724
5	4.8754	1779.528
6	4.8793	1780.937
7	4.8821	1781.953
8	4.8838	1782.573
9	4.8844	1782.797
10	4.8839	1782.627
11	4.8824	1782.060
12	4.8797	1781.099
13	4.8760	1779.742
14	4.8712	1777.991
15	4.8653	1775.845

Se aprecia en la tabla E.4, que se obtiene una mayor cantidad de energía anual para un ángulo de **inclinación de 9°**, con un aprovechamiento mayor de 16.21 kWh/m² con respecto a una posición completamente horizontal.

Para contrastar el anterior resultado, se puede utilizar el siguiente método aproximado de cálculo (ecuación E.16)²⁰⁷ que emplea directamente la latitud del lugar en estudio, arrojando como resultado un ángulo aproximado de 8.33°.

$$\beta_{ap} = 3.7 + 0.69 * |\phi| \quad (E.16)$$

$$\beta_{aprox} = 3.7 + 0.69 * |-6.7086| = 8.33^\circ$$

La anterior ecuación es válida para aplicaciones de utilización anual que busquen la máxima captación de energía solar a lo largo del año.

Ahora, utilizando la ecuación E.17, se puede obtener de manera aproximada, el valor de radiación global para el ángulo de inclinación óptimo previamente calculado.

²⁰⁶ Elaboración propia.

²⁰⁷ Fuente: Apuntes master en energía solar fotovoltaica MASTER-D ESPAÑA.

$$G_0(\beta) = \frac{G_0(0)}{1-4.46*10^{-6}*\beta-1.19*10^{-4}*\beta^2} \quad (E.17)$$

Los resultados obtenidos de radiación global diaria promedio real y aproximada se comparan en la tabla E.6 y figura E.4.

Tabla E.6.- Comparación de valores de radiación global diaria promedio reales y aproximados.²⁰⁸

Mes	β_{opt}	β_{aprox}
Enero	5.323	5.637
Febrero	5.688	5.890
Marzo	5.917	5.934
Abril	5.240	5.067
Mayo	4.002	3.781
Junio	3.609	3.370
Julio	4.124	3.853
Agosto	4.224	4.059
Septiembre	4.905	4.862
Octubre	5.030	5.154
Noviembre	5.267	5.543
Diciembre	5.284	5.632
PROMEDIO	4.884	4.899
ENERGIA ANUAL	1782.797	1787.990

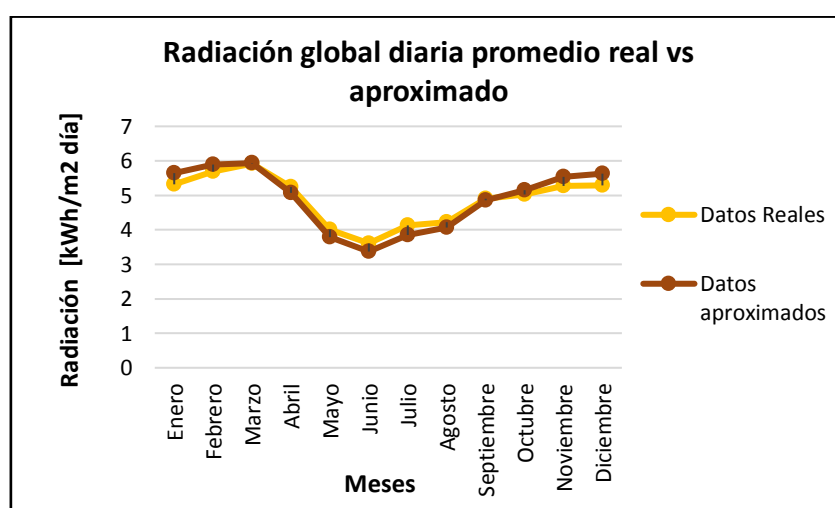


Figura E.3.- Radiación global diaria promedio real vs aproximada.²⁰⁹

²⁰⁸ Elaboración propia.

²⁰⁹ Elaboración propia.

El ángulo 8.33° calculado con el uso de las ecuaciones de aproximación numérica es muy similar al valor de 9° calculado con las relaciones geométricas. El error entre ambos resultados es sólo de 0.35%, y esto se aprecia no solo en el resultado promedio, sino en la tendencia de los valores mes a mes, representada en la figura E.3.

E.6.- Orientación de los paneles fotovoltaicos

A la hora de diseñar este tipo de instalaciones solares, es muy importante decidir la orientación de los paneles ya que interesará que los paneles capten la mayor cantidad de radiación solar posible. Esta orientación puede ser impuesta por el emplazamiento donde vamos a instalar los paneles, como es el caso de tejados con una cierta orientación, o libre si la ubicación lo permite, como extensiones de terreno llanas.

Según el Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDAE) de España, la orientación se define por el ángulo llamado azimut (γ), que es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar, como se ve en la figura E.4. Los valores típicos son 0° para los módulos al norte, 180° para módulos al sur, -90° para módulos orientados al este y $+90^\circ$ para módulos orientados al oeste.

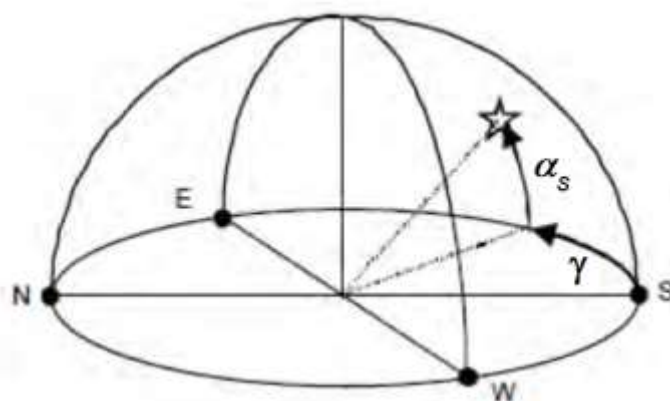


Figura E.4.- Representación del ángulo azimut (γ) y altura solar (α_s)²¹⁰

²¹⁰ XVIII Simposio peruano de energía solar, Cajamarca 12-16/11/2018. <http://www.perusolar.org/xxv-simposio-de-energia-solar-cajamarca-2018/>

E.7.- Separación entre filas de Paneles fotovoltaicos

Las sombras causadas por obstáculos circundantes varían a lo largo del día, dependiendo de la latitud del lugar, la fecha y la hora; causando pérdidas de radiación solar en los captadores. Se suele tener dos situaciones en las que se podría generar sombras:

- Entre captadores de la instalación solar
- Por edificios, árboles, montañas, etc.

La distancia mínima entre líneas de colectores debe de ser la adecuada para que la sombra de la arista superior de una fila se proyecte, como mucho, sobre la arista inferior siguiente. Este cálculo se debe realizar teniendo en cuenta el mediodía solar del día más desfavorable cuando la altura solar sea mínima. Habitualmente en el días más desfavorable del periodo de utilización, la instalación no debería tener más del 5% de la superficie útil de captadores cubierta por sombras. Un equipo de energía solar resultará inoperante cuando el 20% de su superficie de captación este bajo sombra.

En este apartado se calculara la distancia mínima de separación entre las distintas filas de módulos solares que componen el generador fotovoltaico para que no se produzcan sombras de unos módulos sobre otros.

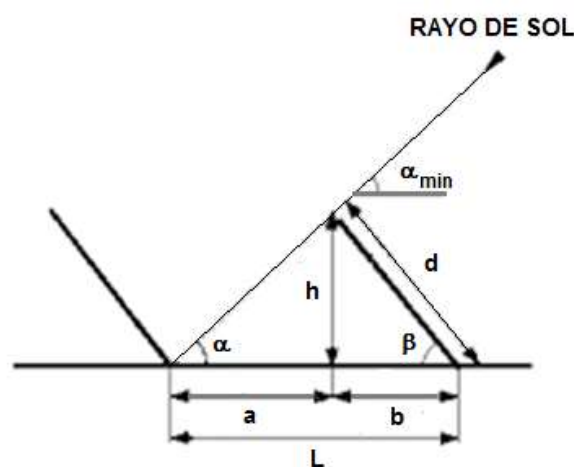


Figura E.5.- Distancia mínima entre dos filas de aerogeneradores.²¹¹

²¹¹ Elaboración propia.

Para determinar la distancia mínima de separación (L), se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{d * \sin \beta}{\tan \alpha}$$
$$b = d * \cos \beta$$

Donde:

d : longitud del panel solar

β : ángulo de inclinación del panel solar

α : ángulo mínimo de la radiación directa respecto a la horizontal

Por lo tanto, reemplazando los valores en las ecuaciones antes mencionada, se tiene que la distancia mínima entre los extremos inferiores de dos paneles consecutivos resultará de la suma de la distancia $a = 0.15$ m y la proyección de la longitud del panel sobre el suelo, es decir, $b = \cos 9^\circ \times 1.64$ m = 1.62 m; en total cada fila de paneles estará separada una distancia de 1.77 m, como mínimo.

Anexo F

Especificaciones técnicas de los Equipos

F.1.- Aerogeneradores

A continuación desde la tabla F.1 a la F.8, se detallan las especificaciones técnicas y el costo por kWh generado, de los diferentes modelos de aerogeneradores, los cuales han sido clasificados en función a su marca y modelo.

Tabla F.1.- Especificaciones técnicas de los aerogeneradores Zonhan.²¹²

AEROGENERADORES			
DATOS			
Modelo	ZH-1500	ZH-2000	ZH-2500
Fabricante	Zonhan	Zonhan	Zonhan
Distribuidor Nacional	Proviento SAC-Perú	Proviento SAC-Perú	Proviento SAC-Perú
País	China	China	China
CARACTERISTICAS FISICAS			
Tipo	Eje horizontal	Eje horizontal	Eje horizontal
Diámetro del rotor (m)	3.2	3.2	3.8
Número de álabes	3	3	3
Material de los álabes	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio
Peso del aerogenerador (kg)	56	68	88
Regulación de Velocidad	Plegado de cola	Plegado de cola	Plegado de cola
Método de frenado	Autofrenado	Autofrenado	Autofrenado
CARACTERISTICAS DE OPERACION			
Velocidad de arranque (m/s)	2.5	2.5	2.5
Velocidad nominal (m/s)	9	10	10
Velocidad de parada (m/s)	25	25	25
Velocidad de supervivencia (m/s)	45	45	45
Potencia nominal P _n (W)	1500	2000	2500
Potencia máxima P _{max} (W)	1800	2800	3000
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
Voltaje de trabajo	DC 24/48V AC 120/230V (opcional))	DC 24/48V AC 120/230V (opcional)	DC 24/48V AC 120/230V (opcional)

²¹² Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido proporcionadas por el distribuidor nacional Proviento S.A.C.

Tabla F.2.- Energía anual generada y costo por kWh producido por cada aerogenerador Zonhan.²¹³

DATOS		ZH-1500		ZH-2000		ZH-2500	
Velocidad [m/s]	Horas al año	Potencia [W]	Energía [kWh/año]	Potencia [W]	Energía [kWh/año]	Potencia [W]	Energía [kWh/año]
1	379.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1135.5	12.5	14.2	22.0	25.0	50.0	56.8
3	1848.8	50.0	92.4	110.0	203.4	210.0	388.2
4	2080.9	140.0	291.3	240.0	499.4	450.0	936.4
5	1697.7	250.0	424.4	355.0	602.7	625.0	1061.1
6	1007.8	398.0	401.1	505.0	508.9	875.0	881.8
7	433.2	595.0	257.8	750.0	324.9	1125.0	487.4
8	134.8	1025.0	138.2	1100.0	148.3	1375.0	185.3
9	30.5	1510.0	46.0	1600.0	48.8	1650.0	50.3
10	5.0	1750.0	8.8	2100.0	10.6	2000.0	10.1
11	0.6	1800.0	1.1	2410.0	1.5	2375.0	1.5
12	0.1	1700.0	0.1	2700.0	0.2	2750.0	0.2
TOTAL	8755		1675.48		2373.58		4059.02
Precio CIF (USD)			2090.00		2490.00		2890.00
Precio \$/kWh			1.25		1.05		0.71

Los modelos de aerogeneradores que se especifican en la tabla F.1, son de procedencia China, pero poseen un proveedor en el mercado nacional que los distribuye de acuerdo al requerimiento que se les solicite, al precio mostrado en la tabla F.2, en un plazo máximo de 3 meses.

²¹³ Elaboración propia. Las horas al año señaladas han sido extraídas de la Tabla 4.5 del capítulo 4.1, el precio de estos equipos han sido otorgados por el proveedor nacional Proviento S.A.C.

Tabla F.3.- Especificaciones técnicas de los aerogeneradores Bornay.²¹⁴

AEROGENERADORES			
DATOS			
Modelo	BORNAY 1500	BORNAY 3000	BORNAY 6000
Fabricante	Bornay	Bornay	Bornay
Distribuidor Nacional	--- / CLER-Colombia	--- / CLER-Colombia	--- / Proviento-Perú
País	España	España	España
CARACTERISTICAS FISICAS			
Tipo	Eje horizontal	Eje horizontal	Eje horizontal
Diámetro del rotor (m)	2.86	4	4
Número de álabes	2	2	3
Material de los álabes	Fibra de vidrio / carbono	Fibra de vidrio / carbono	Fibra de vidrio / carbono
Peso del aerogenerador (kg)	41	93	107
Regulación de Velocidad	Pasivo por inclinación	Pasivo por inclinación	Pasivo por inclinación
Método de frenado	Freno por regulador electrónico	Freno por regulador electrónico	Freno por regulador electrónico
CARACTERISTICAS DE OPERACION			
Velocidad de arranque (m/s)	3.5	3.5	3.5
Velocidad nominal (m/s)	12	12	12
Velocidad de parada (m/s)	14	14	14
Velocidad de supervivencia (m/s)	60	60	60
Potencia nominal P _n (W)	1500	3000	6000
Potencia máxima P _{max} (W)	1700	3500	7500
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
Voltaje de trabajo	DC 24/48V AC 120V	DC 24/48V AC 120/230V	DC 48V AC 120/230V

²¹⁴ Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido obtenidas de la siguiente página web: <http://www.bornay.com/es/productos/aerogeneradores/>

Tabla F.4.- Energía anual generada y costo por kWh producido por cada aerogenerador Bornay.²¹⁵

DATOS		BORNAY 1500		BORNAY 3000		BORNAY 6000	
Velocidad [m/s]	Horas al año	Potencia [W]	Energía [kWh/año]	Potencia [W]	Energía [kWh/año]	Potencia [W]	Energía [kWh/año]
1	379.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1135.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1848.8	125.0	231.1	125.0	231.1	250.0	462.2
4	2080.9	250.0	520.2	450.0	936.4	750.0	1560.7
5	1697.7	405.0	687.6	875.0	1485.5	1400.0	2376.8
6	1007.8	600.0	604.7	1125.0	1133.7	1800.0	1814.0
7	433.2	800.0	346.6	1520.0	658.5	2550.0	1104.8
8	134.8	1000.0	134.8	1900.0	256.1	3300.0	444.8
9	30.5	1125.0	34.3	2250.0	68.6	4250.0	129.6
10	5.0	1250.0	6.3	2500.0	12.6	5000.0	25.2
11	0.6	1400.0	0.9	2870.0	1.8	5500.0	3.4
12	0.1	1550.0	0.1	3120.0	0.2	5750.0	0.3
TOTAL	8755		2566.48		4784.49		7921.68
Precio FOB (USD)			3985.84		5393.21		
Costo de importación (18%)			717.45		970.78		
Precio CIF (USD)			4703.29		6363.99		18000.00
Precio \$/kWh			1.83		1.33		2.27

Se aprecia que para un mismo valor de potencia nominal, la energía producida por la marca Bornay respecto a la de marca Zonhan, como se muestra en la tabla F.2, es mayor, esto se debe a que los modelos de aerogeneradores Bornay son fabricados para trabajar a velocidades medianas, pero su costo de fabricación es mucho más elevado, sumado a esto el costo de importación.

Los modelos de esta marca son comercializados en el mercado Español, tanto para aplicaciones aisladas como interconectadas a la red eléctrica. Cabe rescatar que existen diversos proveedores en Latinoamérica que permitirían reducir los costos de importación considerados en la tabla F.4.

²¹⁵ Elaboración propia. Las horas al año señaladas han sido extraídas de la Tabla 4.5 del capítulo 4.1, el precio de estos equipos Bornay han sido solicitado al proveedor indicado vía correo electrónico cler-energia@bornay.com, a excepción de Bornay 6000 que es vendido en el mercado nacional por el distribuidor Proviento S.A.C. Se ha considerado que el costo de importación promedio es de 20%, y el tipo de cambio utilizado es de 1€=1.14\$, tomado al 31/03/2019.

Tabla F.5.- Especificaciones técnicas de los aerogeneradores Southwest Wind Power.²¹⁶

AEROGENERADORES			
DATOS			
Modelo	Whisper 200	Skystream 3.7	Whisper 500
Fabricante	Southwest Wind Power	Southwest Wind Power	Southwest Wind Power
Distribuidor Nacional	Energía Innovadora	Energía Innovadora	Energía Innovadora
País	USA	USA	USA
CARACTERISTICAS FISICAS			
Tipo	Eje horizontal	Eje horizontal	Eje horizontal
Diámetro del rotor (m)	2.7	3.72	4.5
Número de álabes	3	3	2
Material de los álabes	Fibra de carbono reforzado con fibra de vidrio	Compuesto reforzado con fibra de vidrio	Fibra de carbono reforzado con fibra de vidrio
Peso del aerogenerador (kg)	30	77	70
Regulación de Velocidad	Control electrónico	Frenado electrónico	Control electrónico
Método de frenado	Freno automático electrónico	Frenado electrónico con relé redundante	Freno automático electrónico
CARACTERISTICAS DE OPERACION			
Velocidad de arranque (m/s)	3.1	3.5	3.4
Velocidad nominal (m/s)	11.6	9	10.5
Velocidad de parada (m/s)	25	25	25
Velocidad de supervivencia (m/s)	55	63	55
Potencia nominal P _n (W)	1000	1900	3000
Potencia máxima P _{max} (W)	--	2600	3200
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
Voltaje de trabajo	DC 12/24/36/48V	AC 240V	DC 24/36/48V

²¹⁶ Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido obtenidas de la siguiente página web: <http://www.energiainnovadora.com/energia-eolica/>

Tabla F.6.- Energía anual generada y costo por kWh producido por cada aerogenerador Southwest Wind Power.²¹⁷

DATOS		Whisper 200		Skystream 3.7		Whisper 500	
Velocidad [m/s]	Horas al año	Potencia [W]	Energía [kWh/año]	Potencia [W]	Energía [kWh/año]	Potencia [W]	Energía [kWh/año]
1	379.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1135.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1848.8	20.0	37.0	50.0	92.4	50.0	92.4
4	2080.9	60.0	124.9	125.0	260.1	250.0	520.2
5	1697.7	150.0	254.7	250.0	424.4	500.0	848.8
6	1007.8	335.0	337.6	490.0	493.8	750.0	755.8
7	433.2	450.0	195.0	750.0	324.9	1250.0	541.5
8	134.8	550.0	74.1	1125.0	151.6	1700.0	229.1
9	30.5	760.0	23.2	1625.0	49.5	2125.0	64.8
10	5.0	900.0	4.5	2010.0	10.1	2625.0	13.3
11	0.6	950.0	0.6	2375.0	1.5	3010.0	1.9
12	0.1	1000.0	0.1	2545.0	0.1	3200.0	0.2
TOTAL	8755		1051.53		1808.64		3068.09
Precio FOB (USD)			3425.00		5746.80		7849.00
Costo de importación (18%)			616.50		1034.42		1412.82
Precio CIF (USD)			4041.50		6781.22		9261.82
Precio \$/kWh			3.84		3.75		3.02

Observando los voltajes de trabajo de los modelos Whisper 200 y Whisper 500, se aprecia que estos han sido fabricados para su uso en sistemas aislados. En cambio el modelo Skystream 3.7 de 2.6 kW, es un modelo especialmente fabricado para su uso con conexión directa a la red eléctrica, gracias a que tiene incorporado un controlador y un inversor que permiten obtener un voltaje de salida de 120 a 240 VAC con una frecuencia comprendida entre 50 a 60 Hz. Estos modelos de aerogeneradores son comercializados en el mercado de USA.

²¹⁷ Elaboración propia. Las horas al año señaladas han sido extraídas de la Tabla 4.5 del capítulo 4.1, el precio de estos equipos ha sido solicitado al proveedor indicado vía correo electrónico ventas@energiainnovadora.com. Se ha considerado que el costo de importación promedio es de 20%, y el tipo de cambio utilizado es de 1€=1.14\$, tomado al 31/03/2019.

F.2.- Paneles Solares

A continuación desde la tabla F.9 a la F.18, se detallan las especificaciones técnicas y el costo por kWh generado, de los diferentes modelos de paneles solares, los cuales han sido clasificados en función a su marca y modelo.

Tabla F.7.- Especificaciones técnicas de los paneles solares Eco Green Energy.²¹⁸

PANELES SOLARES			
DATOS			
Modelo	EGE-110P-36	EGE-255P-60	EGE-270P-60
Tipo	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Fabricante	Eco Green Energy	Eco Green Energy	Eco Green Energy
País de procedencia	China	China	China
Distribuidor nacional	Proviento SAC-Perú	Proviento SAC-Perú	Proviento SAC-Perú
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
Potencia máxima Pmax (W)	110	255	270
Tensión óptima Vmpp (V)	18.49	30.77	31.44
Corriente óptima Impp (I)	5.95	8.29	8.59
Tensión de circuito abierto Voc (V)	22.58	37.82	38.45
Corriente de cortocircuito Isc (A)	6.46	8.76	9.03
CARACTERISTICAS FISICAS			
Número de celdas	36	60	60
Dimensiones (mm)	1120x670x30	1640x992x40	1640x992x40
Peso (kg)	8.4	18.8	18.8
Marco	Aleación de aluminio anodizado	Aleación de aluminio anodizado	Aleación de aluminio anodizado
CARACTERISTICAS GENERALES			
Tolerancia de potencia	3%	3%	3%
η_P^{219}	97%	97%	97%
Temperatura NOCT	45	45	45
η_T^{220}	96.6%	96.6%	96.6%
Resistencia a cargas mecánicas	2.4 kPa	2.4 kPa	2.4 kPa
Eficiencia de conversión aprox.	14.66%	15.67%	16.60%

²¹⁸ Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido proporcionadas por el distribuidor nacional Proviento S.A.C.

²¹⁹ Rendimiento por efecto de variación de la potencia nominal.

²²⁰ Rendimiento por efecto de variación de la temperatura.

Tabla F.8.- Energía anual generada y costo por kWh producido por los paneles solares Eco Green Energy.²²¹

DATOS	EGE-110P-36	EGE-255P-60	EGE-270P-60
Potencia pico (Wp)	110	255	270
NHE (h)	4.884	4.884	4.884
η_T	97%	97%	97%
η_P	97%	97%	97%
η_E	95%	95%	95%
Energía al día (kWh/día)	0.48	1.11	1.17
Energía al año (kWh/año)	174.61	404.78	428.59
Precio CIF	100	180	190
Costo (\$/kWh)	0.5727	0.4447	0.4433

Tabla F.9.- Especificaciones técnicas de los paneles solares comercializados por el distribuidor nacional Autosolar SAC.²²²

PANELES SOLARES			
DATOS			
Modelo	ESPMC 270	TP660P-270	AS-6P30 270
Tipo	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Fabricante	Era Solar	Talesum	AmeriSolar
País de procedencia	China	China	China
Distribuidor nacional	AutoSolar SAC	AutoSolar SAC	AutoSolar SAC
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
Potencia máxima Pmax (W)	270	270	270
Tensión óptima Vmpp (V)	31.8	31.3	38.4
Corriente óptima Impp (I)	8.5	8.63	9.06
Tensión de circuito abierto Voc (V)	37.4	38.5	31.1
Corriente de cortocircuito Isc (A)	9.14	9.09	8.69
CARACTERISTICAS FISICAS			
Número de celdas	60	60	60
Dimensiones (mm)	1640x992x40	1640x990x35	1640x992x40
Peso (kg)	17.75	18.5	18.5
Marco	Aleac. de aluminio anodizado	Aleac. de aluminio anodizado	Aleac. de aluminio anodizado
CARACTERISTICAS GENERALES			
Tolerancia de potencia	3%	3%	3%
η_P	97%	97%	97%
Temperatura NOCT	45	47	47
η_T	96.6%	96.4%	96.4%
Resistencia a cargas mecánicas	2.4 kPa	2.4 kPa	2.4 kPa
Eficiencia de conversión aprox	16.50%	16.60%	16.60%

²²¹ Elaboración propia. El precio de estos equipos han sido otorgados por el proveedor nacional Proviento S.A.C.

²²² Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido proporcionadas por el distribuidor nacional Autosolar Energía del Perú S.A.C.

Tabla F.10.- Energía anual generada y costo por kWh producido por los paneles solares comercializados por el distribuidor nacional Autosolar.²²³

DATOS	ESPMC 270	TP660P-270	AS-6P30 270
Potencia pico (Wp)	270	270	270
NHE (h)	4.884	4.884	4.884
η_T	97%	96%	96%
η_P	97%	97%	97%
η_E	95%	95%	95%
Energía al día (kWh/día)	1.17	1.17	1.17
Energía al año (kWh/año)	428.59	427.39	427.39
Precio CIF	169.36	184.63	220.71
Costo (\$/kWh)	0.3952	0.4320	0.5164

Tabla F.11.- Especificaciones técnicas de los paneles solares Canadian Solar.²²⁴

PANELES SOLARES			
DATOS			
Modelo	CS6P-235P	CS6K-275P	CS6U-330P
Tipo	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Fabricante	Canadian Solar	Canadian Solar	Canadian Solar
País de procedencia	Canadá	Canadá	Canadá
Distribuidor nacional	DeltaVolt / Perú	DeltaVolt / Perú	DeltaVolt / Perú
CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS			
Potencia máxima Pmax (W)	235	275	330
Tensión óptima Vmpp (V)	29.8	31	37.2
Corriente óptima Impp (I)	7.9	8.88	8.88
Tensión de circuito abierto Voc (V)	36.9	38	45.6
Corriente de cortocircuito Isc (A)	8.46	9.45	9.45
CARACTERÍSTICAS FISICAS			
Número de celdas	60	60	72
Dimensiones (mm)	1638x982x40	1650x992x40	1960x992x40
Peso (kg)	19	18.2	22.4
Marco	Aleac. de aluminio anodizado	Aleac. de aluminio anodizado	Aleac. de aluminio anodizado
CARACTERÍSTICAS GENERALES			
Tolerancia de potencia	5%	5%	5%
η_P	95%	95%	95%
Temperatura NOCT	45	45	45
η_T	96.6%	96.6%	96.6%
Resistencia a cargas mecánicas	2.4kPa	6kPa	5.4kPa
Eficiencia de conversión aprox	15.85%	16.80%	16.97%

²²³ Elaboración propia. El precio de estos equipos han sido otorgados por el proveedor nacional Autosolar Energía del Perú S.A.C.

²²⁴ Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido proporcionadas por el distribuidor nacional Delta Volt S.A.C.

Tabla F.12.- Energía anual generada y costo por kWh producido por los paneles solares Canadian Solar.²²⁵

DATOS	CS6P-235P	CS6K-275P	CS6U-330P
Potencia pico (Wp)	235	275	330
NHE (h)	4.882	4.882	4.882
η_T	97%	97%	97%
η_P	95%	95%	95%
η_E	95%	95%	95%
Energía al día (kWh/día)	1.00	1.17	1.40
Energía al año (kWh/año)	365.18	427.34	512.81
Precio CIF	220.8	232.2	275.2
Costo (\$/kWh)	0.6046	0.5434	0.5367

Tabla F.13.- Especificaciones técnicas de los paneles solares Exiom.²²⁶

PANELES SOLARES			
DATOS			
Modelo	EX-195P	EX-270P-60	EX-300P-72
Tipo	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Fabricante	EXIOM	EXIOM	EXIOM
País de procedencia	España	España	España
Distribuidor nacional	--- / ExiomSolutions	--- / ExiomSolutions	--- / ExiomSolutions
CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS			
Potencia máxima Pmax (W)	195	270	300
Tensión óptima Vmpp (V)	30.8	30.9	36.7
Corriente óptima Impp (I)	6.33	8.56	8.18
Tensión de circuito abierto Voc (V)	36.8	38.4	45.8
Corriente de cortocircuito Isc (A)	6.99	8.98	8.73
CARACTERÍSTICAS FISICAS			
Número de celdas	36	60	72
Dimensiones (mm)	1320x992x35	1655x992x45	1956x992x45
Peso (kg)	15.5	20	26
Marco	Aleac. de aluminio anodizado	Aleac. de aluminio anodizado	Aleac. de aluminio anodizado
CARACTERÍSTICAS GENERALES			
Tolerancia de potencia	3%	5%	5%
η_P	97%	95%	95%
Temperatura NOCT	47	47	47
η_T	96.4%	96.4%	96.4%
Resistencia a cargas mecánicas	5.4kPa	5.4kPa	5.4kPa
Eficiencia de conversión aprox	15.30%	16.50%	15.50%

²²⁵ Elaboración propia. El precio de estos equipos han sido otorgados por el proveedor nacional Delta Volt S.A.C.

²²⁶ Elaboración propia. Las especificaciones técnicas señaladas han sido obtenidas de la siguiente página web: <http://www.exiomsolution.com/descargas/>.

Tabla F.14.- Energía anual generada y costo por kWh producido por los paneles solares Exiom.²²⁷

DATOS	EX-195P	EX-270P-60	EX-300P-72
Potencia pico (Wp)	195	270	300
NHE (h)	4.882	4.882	4.882
η_T	96%	96%	96%
η_P	97%	95%	95%
η_E	95%	95%	95%
Energía al día (kWh/día)	0.85	1.15	1.27
Energía al año (kWh/año)	308.54	418.40	464.88
Precio CIF	218.7484	267.3526	307.862
Costo (\$/kWh)	0.70898	0.63899	0.66223

²²⁷ Elaboración propia. El precio de estos equipos han sido otorgados por el distribuidor indicado a través de: <http://www.exiomsolution.com/contacto/>. El valor de número de horas efectivas (NHE) ha sido extraído de la tabla 35, capítulo 3, y sección 3.3.2.1.

F.3.- Controlador de carga

En la tabla F.15 se detallan las especificaciones técnicas y precio de controladores de carga, para aerogeneradores, comercializados en el mercado nacional.

Tabla F.15.- Especificaciones técnicas y precios de los controladores de carga Ningbo Ginlong Technologies Co.²²⁸

CONTROLADORES DE CARGA		
DATOS		
Modelo	GCB-5K	GCB-20K
Tipo de fuente regulada	Eólica	Eólica
Fabricante	Ningbo Ginlong T Co.	Ningbo Ginlong T Co.
País de procedencia	China	China
Distribuidor nacional	Proviento SAC	Proviento SAC
CARACTERISTICAS ELECTRICAS		
Rango de voltaje de entrada (Vac)	20 Vac-500 Vac	30 Vac-500 Vac
Corriente máxima de entrada (Aac)	10 Aac	40 Aac
Potencia máxima de entrada (kW)	5 kW	20 kW
Rango de voltaje de salida (Vdc)	30 Vcd-750 Vcd	30 Vcd-750 Vcd
Corriente máxima de salida + desviación (Adc + Arms)	15 Adc+10 Arms	40 Adc+30 Arms
Potencia máxima de salida + desviación (kW + kW)	4 kW+ 2 kW	12 kW+ 8 kW
CARACTERISTICAS FISICAS		
Peso	5 kg	7 kg
Dimensiones (mm)	370x276x13.5 mm	370x276x13.5 mm
CARACTERISTICAS GENERALES		
Eficiencia máxima (%)	>99.3	>99.3
Rango de temperatura de funcionamiento (°C)	-2.5 ~ 60	-2.5 ~ 60
Ruido (dB)	<35	<40
Precio (USD)	708.0	883.82

²²⁸ Elaboración propia. El precio de este equipo ha sido proporcionado por el proveedor nacional Proviento S.A.C.

F.4.- Inversores

Tabla F.16.- Especificaciones técnicas y precio de los inversores Fronius.²²⁹

INVERSORES			
DATOS			
Modelo	PRIMO 3.0-1	PRIMO 5.0-1	PRIMO 6.0-1
Tipo	Solar	Solar	Solar
Fabricante	FRONIUS	FRONIUS	FRONIUS
País de procedencia	Austria	Austria	Austria
Distribuidor nacional	AutoSolar	AutoSolar	AutoSolar
INPUT (DC)			
Potencia de entrada max (PDC,max)	4500 W	7500 W	9000 W
Potencia nominal (PDC,n)	4500 W	7500 W	9000 W
Tensión de entrada max (VDC,max)	80 - 1000 V	80 - 1000 V	80 - 1000 V
Rango de tensión entrada (funcionamiento)	200 - 800 V	240 - 800 V	240 - 800 V
Corriente de entrada max (IDC,max)	12 A / 12 A	12 A / 12 A	18 A / 18 A
OUTPUT (AC)			
Potencia de salida max (PAC,max)	3000 W	5000 W	6000 W
Potencia nominal (PAC,n)	3000 W	5000 W	6000 W
Rango de tensión de salida nominal (VAC,n)	230 V	230 V	230 V
Rango de tensión de salida (funcionamiento)	180 - 270 V	180 - 270 V	180 - 270 V
Corriente de salida max (IAC,max)	13.0 A	21.7 A	26.1 A
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
Tipo	Monofásico	Monofásico	Monofásico
Consumo interno	<1W	<1W	<1W
Factor de potencia a la salida	0.85 - 1	0.85 - 1	0.85 - 1
Rango de frecuencia a la salida	50/60Hz (45-65 Hz)	50/60Hz (45-65 Hz)	50/60Hz (45-65 Hz)
CARACTERISTICAS GENERALES			
Eficiencia máxima	97.9%	98.0%	98.0%
Tiempo de vida del equipo	>15 años	>15 años	>15 años
Rango de temperatura (funcionamiento)	-40 a 50°C	-40 a 50°C	-40 a 50°C
CARACTERISTICAS FISICAS			
Peso [kg]	21.5 kg	21.5 kg	21.5 kg
Dimensiones [mm]	645x431x204 mm	645x431x204 mm	645x431x204 mm
COSTO			
Costo FOB (USD)	--	--	--
Costo CIF (USD)	1699.40	2006.23	2313.07

²²⁹ Elaboración propia. Las especificaciones y el precio del equipo ha sido proporcionado por el distribuidor nacional Auto Solar Energía del Perú S.A.C. El tipo de cambio utilizado ha sido de 1€=1.14\$, tomado al 31/03/2019.

Tabla F.17.- Especificaciones técnicas y precio de los inversores eólicos SMA.²³⁰

INVERSORES		
DATOS		
Modelo	Windy Boy 3000	Windy Boy 6000
Tipo	Eólica	Eólica
Fabricante	SMA	SMA
País de procedencia	Alemania	Alemania
Distribuidor nacional	DeltaVolt	DeltaVolt
INPUT (DC)		
Potencia de entrada max (PDC,max)	3200 W	6380 W
Potencia nominal (PDC,n)	3200 W	6380 W
Tensión de entrada max (VDC,max)	500V	600 V
Rango de tensión entrada (funcionamiento)	200 - 500 V	250 - 600 V
Corriente de entrada max (IDC,max)	17 A	25 A
OUTPUT (AC)		
Potencia de salida max (PAC,max)	3050 W	6100 W
Potencia nominal (PAC,n)	3000 W	6000 W
Rango de tensión de salida nominal (VAC,n)	230 V	240V
Rango de tensión de salida (funcionamiento)	211 - 264 V	211 - 264 V
Corriente de salida max (IAC,max)	15.0 A	28.9 A
CARACTERISTICAS ELECTRICAS		
Tipo	Monofásico	Monofásico
Consumo interno	0.1W	0.1W
Factor de potencia a la salida	1	1
Rango de frecuencia a la salida	60Hz (59.3-60.5 Hz)	60Hz (59.3-60.5 Hz)
CARACTERISTICAS GENERALES		
Eficiencia máxima	96.6%	97.0%
Tiempo de vida del equipo	<25 años	<25 años
Rango de temperatura (funcionamiento)	-25 a 60°C	-23 a 45°C
CARACTERISTICAS FISICAS		
Peso [kg]	40 kg	65 kg
Dimensiones [mm]	450x352x236 mm	613x467x241 mm
COSTO		
Costo FOB (USD)	1463.42	4972.59
Costo CIF (USD)	1726.84	5867.66

Los siguientes modelos de inversores de la marca SMA no requieren de la instalación de un controlador de carga para el aerogenerador, gracias a su curva característica polinomial programable que le permite una adaptación óptima a la curva característica de la turbina.

²³⁰ Elaboración propia. Las especificaciones y el precio del equipo ha sido proporcionado por el distribuidor nacional Delta Volt S.A.C. El tipo de cambio utilizado ha sido de 1€=1.14\$, tomado al 31/03/2019.

Tabla F.18.- Especificaciones técnicas y precio de los inversores Ningbo Ginlong Technologies Co.²³¹

INVERSORES		
DATOS		
Modelo	GCI-5K-2G-W	GCI-5K-2G-H
Tipo	Eólica	Eólica/Solar
Fabricante	Ningbo Ginlong Technologies Co	Ningbo Ginlong Technologies Co
País de procedencia	China	China
Distribuidor nacional	--	--
INPUT (DC)		
Potencia de entrada max (PDC,max)	5800 W	5800 W
Potencia nominal (PDC,n)	5800 W	5800 W
Tensión de entrada max (VDC,max)	600 V	600 V
Rango de tensión entrada (funcionamiento) (W/PV)	30 - 540 V	30-540 V / 100-500 V
Corriente de entrada max (IDC,max) - (W/PV)	25 A	15 A / 25 A
OUTPUT (AC)		
Potencia de salida max (PAC,max)	5000 W	5000 W
Potencia nominal (PAC,n)	5000 W	5000 W
Rango de tensión de salida nominal (VAC,n)	220/230 V	220/230 V
Rango de tensión de salida (funcionamiento)	180 - 270 V	180 - 270 V
Corriente de salida max (IAC,max)	23.8 A	23.8 A
CARACTERISTICAS ELECTRICAS		
Tipo	Monofásico	Monofásico
Consumo interno	<1W	<1W / <6W (sin viento)
Factor de potencia a la salida	>0.99	>0.99
Rango de frecuencia a la salida	50/60 Hz	50/60 Hz (47-62 Hz)
CARACTERISTICAS GENERALES		
Eficiencia máxima	97.80%	>97.8%
Tiempo de vida del equipo	>20 años	>20 años
Rango de temperatura (funcionamiento)	-25 a 60°C	-25 a 60°C
CARACTERISTICAS FISICAS		
Peso [kg]	15.8	16.0
Dimensiones [mm]	565x339x172.5 mm	565x339x172.5
COSTO		
Costo FOB (USD)	1360	1450
Costo CIF (USD)	1604.80	1711.00

Los modelos presentados en la tabla F.23 son de fabricación China y cumplen con los estándares necesarios para su conexión a red, pero requieren de la instalación de un regulador de voltaje para su correcto funcionamiento.

²³¹ Elaboración propia. Las especificaciones técnicas y los precios han sido obtenidos de la siguiente página web: <https://www.solaris-shop.com/ginlong-solis-5k-2g-us-5kw-string-inverter/>.

Tabla F.19.- Especificaciones técnicas y precio de los inversores Yueqing Zonhan Windpower Co.²³²

INVERSORES		
DATOS		
Modelo	GC-5K	GC-10K
Tipo	Eólica/Solar	Eólica/Solar
Fabricante	Yueqing Zonhan Windpower Co	Yueqing Zonhan Windpower Co
País de procedencia	China	China
Distribuidor nacional	--	--
INPUT (DC)		
Potencia de entrada max (PDC,max)	5700 W	11000 W
Potencia nominal (PDC,n)	4800 W	9500 W
Tensión de entrada max (VDC,max)	600 V	1000 V
Rango de tensión entrada (funcionamiento) (W/PV)	30-540 V / 100-500 V	30-750 V / 250-820 V
Corriente de entrada max (IDC,max) - (W/PV)	25 A / 15 A	33 A / 22 A
OUTPUT (AC)		
Potencia de salida max (PAC,max)	5500 W	10000 W
Potencia nominal (PAC,n)	5000 W	10000 W
Rango de tension de salida nominal (VAC,n)	220/230 V	220/230 V
Rango de tension de salida (funcionamiento)	180 - 270 V	340 – 450 V
Corriente de salida max (IAC,max)	21.7 A	14.5 A
CARACTERISTICAS ELECTRICAS		
Tipo	Monofásico	Trifásico
Consumo interno	<1W (noche) / <6W (sin viento)	<1W (noche) / <6W (sin viento)
Factor de potencia a la salida	>0.99	>0.99
Rango de frecuencia a la salida	50/60 Hz (+3 Hz)	50/60 Hz (+3 Hz)
CARACTERISTICAS GENERALES		
Eficiencia máxima	>97%	>97%
Tiempo de vida del equipo	>20 años	>20 años
Rango de temperatura (funcionamiento)	-25 a 60°C	-25 a 60°C
CARACTERISTICAS FISICAS		
Peso [kg]	24	50
Dimensiones [mm]	740x400x170	800x400x170
COSTO		
Costo FOB (USD)	1800	2505
Costo CIF (USD)	2124	2955.9

La ventaja que brindan estos inversores de conexión a red es su capacidad para trabajar con aerogeneradores y paneles solares al mismo tiempo.

²³² Elaboración propia. Las especificaciones técnicas han sido obtenidas de la siguiente página web: <https://zhwind.en.made-in-china.com/product/eoZEsQJVCdWx/China-Grid-Tie-Inverter.html>. Los precios de los equipo han sido proporcionados por el área comercial.

F.5.- Medidores de energía

Tabla F.20.- Especificaciones técnicas y precio de los medidores de energía.²³³

MEDIDORES DE ENERGÍA		
DATOS		
Modelo	AS1440	HXE34K
Tipo	Bidireccional	Unidireccional
Fabricante	ELSTER	HEXING
País de procedencia	China	China
Distribuidor	Dartel / Colombia	Ingesa Norte
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
Corriente nominal	5(120) A	10 A
Rango de tensión de funcionamiento	3x220/380 V (-20%, 15%)	3x220/380 V (80%-120%)
Corriente máxima	700 A por 2 ciclos	100 A
Frecuencia de funcionamiento	60 Hz \pm 5%	50/60 Hz
Tipo	Trifásico	Trifásico
Consumo interno	< 0.7 W por fase	\leq 2W, \leq 10VA
Capacidad de aislamiento	4 kV, 60 Hz por un minuto.	4 kV, por un minuto.
Resistencia al impulso	12 kV 1.2/50 μ s	6 kV, 1.2/50 μ s
Grado de proteccion	IP 54	IP 54
CARACTERÍSTICAS GENERALES		
Salida de impulsos	1 Wh/pulso	--
Tiempo de vida del equipo	20 años	20 años
Rango de temperatura (funcionamiento)	-40 - 65°C	-25 ~ 55°C
NORMAS		
Especificaciones (kWh / kvarh)	Clase 1 / 0.5 – IEC 62052-11 / IEC 62053-21 IEC 62056-21	Clase 1 / 0.5 – IEC 62052-11 / IEC 62053-21 IEC 62056-21
COSTO		
Costo FOB (USD)	228.98	--
Costo CIF (USD)	270.19	241.69

Los medidores de energía comercializados a nivel nacional son del tipo unidireccional, debido a que la mayoría de aplicaciones domiciliarias en el Perú les interesa cuantificar solamente su consumo energético. En la tabla F.24 se muestra un modelo unidireccional de la marca china Hexing, comercializado en el mercado nacional, el cual tiene la ventaja de poseer un costo de adquisición y tiempo de entrega notablemente mucho más corto.

²³³ Elaboración propia. El precio y las especificaciones técnicas del medidor bidireccional: <https://www.dartel.cl/index.php/medidor-bidireccional-trifasico-elster-as1440-indirecto.html>

Anexo G

Dimensionamiento eléctrico

G.1.- Conductores

Los conductores utilizados deberán cumplir con las siguientes características:

- No propagación de la llama.
- No propagación del incendio.
- Libre de halógenos.
- Reducida emisión de gases tóxicos.
- Baja emisión de humos opacos.
- Nula emisión de gases corrosivos.

Se emplearán conductores de cobre aislado con cloruro de polivinilo (PVC), estarán además debidamente protegidos contra la corrosión que pueda provocar el terreno donde se instalen, en el caso de los cables subterráneos y contra los rayos ultravioleta para los colocados a la intemperie. Los conductores tendrán la resistencia mecánica suficiente para soportar los esfuerzos a que puedan estar sometidos. La sujeción se efectuará mediante bridas de sujeción, procurando no someter a un excesivo doblar los radios de curvatura. Los empalmes se realizarán con accesorios a tal efecto, usando cajas de derivación siempre que sea posible.

Los cables podrán ser de uno o más conductores y de tensión asignada no inferior a 0.6/1 kV. La sección de los conductores de cada línea, deberá ser establecida mediante la aplicación de los siguientes criterios, adoptándose la mayor de las secciones obtenidas:

- ✓ Intensidad máxima admisible por los conductores en régimen permanente.
- ✓ Caída de tensión máxima admisible.

Además se toman en cuenta criterios para el cálculo de la sección de los conductores como la de la intensidad máxima admisible en caso de cortocircuitos, o el criterio económico, entre otros. Estos últimos son evaluados para aplicaciones de potencia más elevada o líneas de elevada utilización

respectivamente. Por tal motivo, se ha considerado suficiente emplear los dos primeros criterios de selección.

De acuerdo con el estándar IEC²³⁴ 60364-7-712, a su temperatura de trabajo, el cable de cada rama debe soportar 1.25 veces la intensidad de cortocircuito en CEM²³⁵ del módulo fotovoltaico, pero en este caso se va a emplear una seguridad reforzada por lo cual el factor de seguridad será de 1.56. Este mismo factor se empleará en el cálculo del cableado a emplear para el aerogenerador, en el caso de la línea de corriente alterna se le aplica el mismo criterio, utilizando la intensidad nominal de salida del inversor.

Se va a emplear un factor de corrección²³⁶ de la intensidad máxima admisible para cables aislados en función de la temperatura ambiente de 0.9, para cual se estaría contemplando una temperatura ambiente máxima de 50°C.

Para instalaciones de baja tensión se indica, dentro de la normativa española, que la caída de tensión máxima en la parte continua, entre el generador y el punto inversor, no será superior al 1.5%; de igual modo para la parte alterna de la interconexión con la red pública, la caída de tensión máxima, entre el inversor y la red, no será superior al 1.5% del valor nominal. En cuanto a la temperatura, se va a considerar que el cable de cobre puede alcanzar los 90°C, siendo para esta temperatura el valor de su resistividad igual a 0.0216 Ω -mm²/m.

Estas consideraciones van a tener como consecuencia un sobredimensionamiento en el cálculo del cableado y por consiguiente va suponer un incremento en el coste, aunque este será insignificante con respecto al total. Además existe una tendencia general a emplear secciones altas en los cables enterrados, en esta misma línea diversos autores y fabricantes recomiendan tender al sobredimensionamiento del cableado, ya que a lo largo de la vida de la instalación, al disminuir la caída de tensión y por tanto reducir la pérdida de potencia vertida a la red, compensará el incremento en la sección del cableado.

²³⁴ IEC: International Electrotechnical Commission.

²³⁵ CEM: Condiciones estándar de medida.

²³⁶ Dato obtenido de la referencia [23], ITC-BT-06, pág. 86.

A continuación se presenta los cálculos realizados para cada parte del sistema eléctrico (de acuerdo a los criterios tomados), por ende la adecuada selección de los conductores a utilizar.

G.1.1.- Cableado en corriente continua

a) Línea arreglo fotovoltaico – inversor

✓ Intensidad máxima admisible en régimen permanente:

Al tratarse de una agrupación en serie se tiene la misma corriente para todo el arreglo:

$$\begin{aligned} I_{SC} &= 9.14 \text{ A} \\ I_{Cond,per} &= 1.56 * I_{SC} \\ \Rightarrow I_{Cond,per} &= 14.26 \text{ A} \end{aligned}$$

Para este valor de intensidad de corriente admisible en el conductor es suficiente el uso de un cable: **SET concéntrico 0.6/1 kV 2x4mm² RE, marca Indeco.**

Por tanto, para calcular la intensidad máxima en régimen permanente es necesario conocer el amperaje en aire según catálogo, correspondiente al conductor seleccionado:

$$\begin{aligned} I_{Cond,max} &= 0.9 * I_{catálogo} = 0.9 * 37 \text{ A} \\ I_{Cond,max} &= 33.3 \text{ A} \end{aligned}$$

Dado que 33.3 A es mucho mayor a 14.26 A, se cumple que $I_{Cond,max} > I_{Cond,per}$, siendo correcta la elección del conductor antes mencionado bajo este criterio.

✓ Caída de tensión máxima admisible:

Para determinar la caída de tensión se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{2\rho * L * I}{S} \text{ [V]}$$

Donde:

$$\Delta V \leq 1.5\% * V \quad \wedge \quad V = 445.20 \text{ V}$$

$$\rightarrow V \leq 6.68 \text{ V}$$

$$\rho_{\text{cobre}, 90^{\circ}\text{C}} = 0.0216 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$L = 18.5 \text{ m}$$

$$I = 14.26 \text{ A}$$

Despejando la ecuación G.4 se tiene:

$$S = \frac{2\rho * L * I}{\Delta V} \quad [\text{mm}^2]$$

Donde reemplazando los valores en la ecuación G.3 se obtiene una sección mínima de 1.71 mm^2 . Por tanto se recomienda un cable: **SET concéntrico 0.6/1 kV 2x4mm² RE, marca Indeco**. Con este conductor se obtiene:

$$I_{\text{Cond}, \text{max}} = 33.3 \text{ A}$$

$$\Delta V = 0.64\%$$

Se elegirá el conductor de mayor calibre: **SET concéntrico 0.6/1 kV 2x4mm² RE, marca Indeco**.

b) Línea interpaneles

✓ Intensidad máxima admisible en régimen permanente:

Al tratarse de una agrupación en serie se tiene la misma corriente para todo el arreglo:

$$I_{SC} = 9.14 \text{ A}$$

$$I_{\text{Cond}, \text{per}} = 1.56 * I_{SC}$$

$$\Rightarrow I_{\text{Cond}, \text{per}} = 14.26 \text{ A}$$

Para este valor de intensidad de corriente admisible en el conductor es suficiente el uso de un cable monopolar: **CB/THW-90 4mm², marca Indeco.**

Por tanto, para calcular la intensidad máxima en régimen permanente es necesario conocer el amperaje en aire según catálogo, correspondiente al conductor seleccionado:

$$I_{Cond,max} = 0.9 * I_{catálogo}$$

$$I_{Cond,max} = 0.9 * 45 A$$

$$I_{Cond,max} = 40.5 A$$

Dado que 40.50 A es mucho mayor a 14.26 A, se cumple que $I_{Cond,max} > I_{Cond,per}$, siendo correcta la elección del conductor antes mencionado bajo este criterio.

✓ Caída de tensión máxima admisible:

Para determinar la caída de tensión se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{2\rho * L * I}{S} [V]$$

Donde:

$$\Delta V \leq 1.5\% * V \quad \wedge \quad V = 31.80 V$$

$$\rightarrow V \leq 0.48 V$$

$$\rho_{cobre,90^{\circ}C} = 0.0216 \Omega mm^2/m$$

$$L = 1.5 m$$

$$I = 14.26 A$$

Despejando la ecuación G.4 se tiene:

$$S = \frac{2\rho * L * I}{\Delta V} [mm^2]$$

Donde reemplazando los valores en la ecuación G.5 se obtiene una sección mínima de 1.94 mm^2 . Por tanto se recomienda un cable monopolar: **CB/THW-90 4mm², marca Indeco**. Con este conductor se obtiene:

$$I_{\text{Cond,max}} = 40.5 \text{ A}$$

$$\Delta V = 0.73\%$$

Se elegirá el conductor de mayor calibre: **CB/THW-90 4mm², marca Indeco**.

c) Línea aerogenerador – inversor

✓ Intensidad máxima admisible en régimen permanente:

Al tratarse de una agrupación en serie se tiene la misma corriente para todo el arreglo:

$$I_{\text{aero,max}} = \frac{P_{\text{max}}}{V_n} = 13.04 \text{ A}$$

$$I_{\text{Cond,per}} = 1.56 * I_{\text{SC}}$$

$$\Rightarrow I_{\text{Cond,per}} = 20.35 \text{ A}$$

Para este valor de intensidad de corriente admisible en el conductor es suficiente el uso de un cable: **SET concéntrico 0.6/1 kV 2x4mm² RE, marca Indeco**.

Por tanto, para calcular la intensidad máxima en régimen permanente es necesario conocer el amperaje en aire según catálogo, correspondiente al conductor seleccionado:

$$I_{\text{Cond,max}} = 0.9 * I_{\text{catálogo}} = 0.9 * 37 \text{ A}$$

$$I_{\text{Cond,max}} = 33.3 \text{ A}$$

Dado que 33.3 A es mucho mayor a 20.35 A, se cumple que $I_{\text{Cond,max}} > I_{\text{Cond,per}}$, siendo correcta la elección del conductor antes mencionado bajo este criterio.

✓ Caída de tensión máxima admisible:

Para determinar la caída de tensión se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{2\rho * L * I}{S} [V]$$

Donde:

$$\Delta V \leq 1.5\% * V \quad \wedge \quad V = 230.00 V$$

$$\rightarrow V \leq 3.45 V$$

$$\rho_{cobre, 90^{\circ}C} = 0.0216 \Omega mm^2/m$$

$$L = 28.0 m$$

$$I = 20.35 A$$

Despejando la ecuación G.4 se tiene:

$$S = \frac{2\rho * L * I}{\Delta V} [mm^2]$$

Donde reemplazando los valores en la ecuación G.3 se obtiene una sección mínima de 1.71 mm². Por tanto se recomienda un cable: **SET concéntrico 0.6/1 kV 2x10mm² RE, marca Indeco**. Con este conductor se obtiene:

$$I_{Cond,max} = 54.0 A$$

$$\Delta V = 1.07\%$$

Se elegirá el conductor de mayor calibre: **SET concéntrico 0.6/1 kV 2x10mm² RE, marca Indeco**.

G.1.2.- Cableado en corriente alterna

a) Línea inversor trifásico – Tablero de protección y medida

✓ Intensidad máxima admisible en régimen permanente.-

Tomando en cuenta la corriente máxima de salida del inversor:

$$I_{AC,max} = 14.5 \text{ A}$$

$$I_{Cond,per} = 1.56 * I_{SC}$$

$$\Rightarrow I_{Cond,per} = 22.62 \text{ A}$$

Para este valor de intensidad de corriente admisible en el conductor es suficiente el uso de un cable NYY: **NY(80°)-C 0.6/1 kV 3-1x6mm², marca Indeco.**

Por tanto, para calcular la intensidad máxima en régimen permanente es necesario conocer el amperaje en aire según catálogo, correspondiente al conductor seleccionado:

$$I_{Cond,max} = 0.9 * I_{catálogo}$$

$$I_{Cond,max} = 0.9 * 54 \text{ A}$$

$$I_{Cond,max} = 48.6 \text{ A}$$

Dado que 48.6 A es mayor a 22.62 A, se cumple que $I_{Cond,max} > I_{Cond,per}$, siendo correcta la elección del conductor antes mencionado bajo este criterio.

✓ Caída de tensión máxima admisible:

Para determinar la caída de tensión se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * I * \cos \varphi}{S} \text{ [V]}$$

Donde:

$$\Delta V \leq 1.5\% * V \quad \wedge \quad V = 400 \text{ V}$$

$$\rightarrow V \leq 6.0 \text{ V}$$

$$\rho_{cobre,90^\circ C} = 0.0216 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$P_{inv,out} = 10000 \text{ W}$$

Despejando la ecuación G.4 se tiene:

$$S = \frac{\rho * L * P}{\Delta V * V} \text{ [mm}^2\text{]}$$

Donde reemplazando los valores en la ecuación G.5 se obtiene una sección mínima de 2.54 mm². Por tanto se recomienda un cable: **NY(80°)-C 0.6/1 kV 3-1x6mm², marca Indeco**. Con este conductor se obtiene:

$$I_{Cond,max} = 48.6 \text{ A}$$

$$\Delta V = 0.34\%$$

Se elegirá el conductor de mayor calibre: **NY(80°)-C 0.6/1 kV 3-1x6mm², marca Indeco**.

G.2.- Puesta a Tierra²³⁷

La puesta a tierra de la instalación limita la tensión que se pueda presentar en un momento dado, en las masas metálicas de los componentes, es decir, aquellos elementos conductores de la instalación que en condiciones de normal funcionamiento no están en tensión pero que, en caso mal funcionamiento o avería de alguno de los equipos utilizados, pueden estarlo. Debido a esto, elementos como los marcos de aluminio y la estructura de montaje de los módulos fotovoltaicos, así como los tableros eléctricos, deberán ir unidos a una conexión equipotencial a tierra como medida de protección ante contactos indirectos. La línea de tierra discurrirá en paralelo a los conductores activos de corriente continua (en superficie) y a los de corriente alterna (bajo tubo y subterráneos).

El tipo y la profundidad de enterramiento de las tomas de tierra deben ser tales que la posible pérdida de humedad del suelo u otros efectos climáticos, no aumenten la resistencia de la toma por encima del valor previsto, la profundidad nunca será inferior a 0.50 m. Los materiales utilizados y la realización de las tomas de tierra deben ser tales que no se vea afectada la resistencia mecánica

²³⁷ Información elaborada con la referencia [20], pág. 70.

y eléctrica por efecto de la corrosión de forma que comprometa las características del diseño de la instalación.

Según la ITC-BT-18²³⁸ para cables de puesta a tierra de cobre, la sección mínima a emplear será de 16 mm². Se recomienda conectar los tableros eléctricos por medio de terminales de cobre de 90A a un conductor tipo THW-90 de 16 mm² 450/750V de 7 hilos de la marca Indeco. Se recomienda una instalación PAT propia para el tramo de continua.

Para la conexión entre las estructuras metálicas de los paneles solares, y la línea de puesta a tierra principal, se estima necesario el uso de un cable CB/THW-90 de 6 mm² cubierta amarilla de la marca Indeco.

En la parte del pozo a tierra, el conductor eléctrico de la línea principal de puesta a tierra se conectará por medio de un conector de bronce tipo AB a una varilla de cobre puro de 5/8" y 2.4 m de longitud al interno de una caja registradora de concreto. Para disminuir la resistividad del terreno se recomienda utilizar un producto como tierra de chacra o sal industrial.

Personal técnicamente competente efectuará la comprobación de la instalación de puesta a tierra, al menos anualmente, en la época en la que el terreno esté más seco. Para ello, se medirá la resistencia de tierra, y se repararán con carácter urgente los defectos que se encuentren. Los electrodos y los conductores de enlace hasta el punto de puesta a tierra, se pondrán al descubierto para su examen, al menos una vez cada cinco años.

G.3.- Protecciones²³⁹

La instalación incorporará todos los elementos y características necesarias para garantizar en todo momento la calidad del suministro eléctrico, de modo que cumplan con la normativa de Seguridad Eléctrica en Baja tensión y compatibilidad electromagnética.

²³⁸ Instrucciones Técnicas Complementarias - Puestas a Tierra. <https://www.plcmadrid.es/rebt/>

²³⁹ Información elaborada con la referencia [20], pág. 70.

Entonces se ha creído conveniente instalar protecciones tanto dentro del tramo de continua (por tratarse de un emplazamiento accesible) como en el tramo de alterna para permitir la desconexión y seccionamiento del inversor, y así facilitar las tareas de mantenimiento. En el primero se ha colocado un interruptor termomagnético y un descargador de sobretensiones bipolar para corriente continua, en cada tramo entre los equipos generadores y el inversor. En el tramo de corriente alterna se ha colocado un interruptor termomagnético y diferencial con una unidad de reconexión automática, con un descargador de sobretensiones junto a la salida del inversor. Por último junto al equipo de medida de la energía importada se ha colocado un descargador de sobretensiones, un interruptor general de interconexión de caja moldeada y una caja general de protección conformada por 4 fusibles.

A continuación se explica el cálculo para cada una de las protecciones antes mencionadas:

G.3.1.- Protecciones en la red de corriente continua

✓ Protección de las personas ante la parte de continua:

La configuración más empleada en la actualidad por ofrecer mejor seguridad es la llamada configuración de generador flotante, la cual consiste en aislar el circuito activo de tierra y conectar a la misma las carcassas y elementos metálicos. En esta configuración y en condiciones normales de funcionamiento, la red de continua se encuentra aislada de tierra, siendo la única unión con esta las carcassas y los elementos aislantes del circuito. La resistencia a tierra suele presentar valores del orden de los Mega Ohmios y su valor dependerá de factores como: calidad de los aislantes empleados, envejecimiento de estos aislantes, calidad en la ejecución de la instalación, condiciones climáticas, en especial de la humedad, tamaño del generador, etc.

Para un generador flotante con un buen aislamiento, el valor de la intensidad de defecto es prácticamente despreciable al ser la resistencia a tierra tan elevada y en teoría un contacto directo no supone una situación de riesgo para la persona,

ya que estos sólo se pueden producir en caso de negligencias o imprudencias. El propio diseño del generador constituye en sí una medida de protección frente a los contactos directos.

El riesgo por contacto indirecto va a ser función del nivel de tensión que adquieran las masas metálicas de la instalación como consecuencia de un defecto de aislamiento entre las partes activas de la instalación y estas. La situación más desfavorable se presenta en defectos francos, esto es, uniones sin resistencia de las partes activas del generador con las masas.

El inversor incorpora internamente un vigilante de aislamiento de la parte de corriente continua que actúa desconectando el inversor en caso de detectar una derivación a tierra. Si la situación se corrige, el inversor rearma automáticamente. Esto unido al conexionado del generador en conexión flotante con las masas a tierra nos protege ante contactos indirectos.

✓ Interruptor general de corriente continua:

En la parte de corriente continua se tiene un interruptor general de continua integrado en el inversor, por lo cual es suficiente instalar unos fusibles para proteger contra sobreintensidades, sin embargo se instalará un interruptor termomagnético, que protegerá a la línea además de poder realizar cortes en carga de la línea con toda seguridad y sin tener que manipular ningún conductor activo, además de evitar el consumo propio de los fusibles y de ser un equipo con menos fallos que estos últimos.

Por otro lado de acuerdo al estándar internacional IEC 60364-7-712, es obligatoria la instalación de un interruptor principal en continua entre generador e inversor. Dicho interruptor debe ser dimensionado para soportar la tensión del generador en las condiciones de operación más desfavorables.

Para el cálculo del interruptor general DC, del arreglo fotovoltaico, se tiene:

$$V_{Arreglo\ PV,G1} = V_{OC} * \#Paneles_{G1}$$
$$V_{Arreglo\ PV,G1} = 37.4\ V * 16 = 299.20\ V$$

$$I_{Arreglo\ PV,G1} = 1.56 * I_{SC}$$

$$I_{Arreglo\ PV,G1} = 1.56 * 9.14\ A * 1 = 14.26\ A$$

Con los datos obtenidos se recomienda un ***Interruptor termomagnético bipolar BK63H C2X25A DC marca LSis***, por cada string de paneles.

Para el cálculo del interruptor general DC, del aerogenerador, se tiene:

$$V_{aero} = 230.0\ V$$

$$I_{SC} = 1.56 * I_{aero,max}$$

$$I_{Arreglo\ PV,G1} = 1.56 * 13.04\ A = 20.3\ A$$

Con los datos obtenidos, se recomienda un ***Interruptor termomagnético bipolar BK63H C2X25A DC marca LSis***, para cada aerogenerador.

G.3.2.- Protecciones en la red de corriente Alterna

La protección externa de la interconexión con la red, tiene por objeto evitar el funcionamiento en isla del generador y evitar que el generador alimente defectos producidos en la red de distribución, defectos externos.

Incluye los relés de máxima y mínima tensión y frecuencia, estos atacarían al interruptor automático de la interconexión que sería el encargado de desconectar el circuito. Es conveniente que el interruptor tenga un rearme automático para evitar que el generador se mantenga parado innecesariamente.

✓ *Interruptor diferencial y termomagnético de corriente alterna:*

Para evitar sobreintensidades que puedan dañar al circuito y para proteger a las personas ante fallos de aislamiento y contactos directos o indirectos es necesario colocar elementos de protección en el cuadro de salida de alterna, los cuales consistirán en una protección termomagnética y otra diferencial.

La protección termomagnética consistirá en un interruptor automático bipolar, con una capacidad mayor a la corriente máxima de salida del inversor. En este

caso el valor de corriente máxima es de 14.5 A, por ello se recomienda un interruptor termomagnético de 25A. En el caso de la protección diferencial se recomienda la instalación de un interruptor diferencial con sensibilidad de defecto de 30mA. Para evitar paradas de la instalación, por disparos intempestivos, se recomienda que el interruptor diferencial posea su respectiva unidad de reconexión automática.

Por lo tanto, el interruptor seleccionado es un ***interruptor termodiferencial (ITD) de 4x25A/30mA, 230/400V poder de corte de 10kA***, con unidad de reconexión automática, y de la marca Bticino.

✓ *Interruptor general de interconexión:*

Este interruptor tiene que ser de accionamiento manual y ser accesible a la empresa distribuidora. Este interruptor, se encargará de proteger al sistema frente a sobrecargas y sobreintensidades, además permitirá separar con total garantía al sistema híbrido de la red para trabajos de reparación y/o mantenimiento por parte de la distribuidora, quien normalmente exige que este dispositivo en su posición de abierto pueda ser bloqueado.

El poder de corte del dispositivo debe ser superior a la intensidad de cortocircuito máxima que pueda presentarse en la instalación, dato que puede ser facilitado por la compañía distribuidora o en su defecto se recomienda un valor superior a los 10 kA. Debido a esto es que se recomienda ***un interruptor termomagnético (IT) fijo en caja moldeada de 4P-40A, poder de corte 35kA, marca Delixi***. Este tipo de interruptores poseen un poder de corte mucho más alto que los interruptores termomagnéticos comunes, gracias al gas que poseen en su interior que les permite elevar el valor de su rigidez dieléctrica.

✓ *Caja general de protección:*

El punto de conexión del sistema híbrido con la red de distribución se establecerá en una caja general de protección, la cual estará exclusivamente destinada a tal fin e irá equipada con fusibles de protección cuya intensidad nominal será la

misma que la escogida para el interruptor general. Debido a esto se recomienda la instalación de 4 fusibles de tipo cerámico cilíndrico de la marca DfElectric de calibre de 40 A, uno para cada línea.

G.3.3.- Protección frente a sobretensiones

Las sobretensiones es uno de los problemas más peligrosos que se pueden presentar en un sistema de generación de baja potencia conectado a la red. Las sobretensiones más importantes tienen su origen en descargas de rayos o en sobretensiones generadas en la propia red eléctrica como consecuencia de la conexión y desconexión de interruptores, transitorios, cortocircuitos, pérdidas de carga, etc.

Los descargadores son elementos que actúan como un interruptor controlado por tensión. Si la tensión en el dispositivo es mayor que un determinado nivel, pasa a un valor de baja impedancia y deriva a tierra. En estado de tensión nominal el dispositivo presenta una alta impedancia y se comporta como un circuito abierto. Los descargadores tienen que ser colocados tanto en la rama de corriente continua como en la de alterna y su conexión tiene que ser a la tierra de la instalación. Esto evita que, ante la caída de un rayo, se produzcan diferencias de potencial entre los distintos elementos del sistema. Como norma general esto es aplicable a todos los elementos, por lo que sólo debe haber una puesta a tierra.

✓ Protección frente a sobretensiones en corriente continua:

Dado que la distancia entre los equipos generadores y el inversor no es tan extensa, los descargadores van a ser colocados en el tablero eléctrico que está junto al inversor. Los descargadores que se van a emplear son de clase C (clase 2) diseñados para hacer frente a formas de onda de $8/20 \mu s$, limitando las tensiones residuales a valores compatibles con las tensiones soportadas por los equipos de la instalación. Se recomienda una corriente nominal de descarga mayor a 10 kA.

En base a lo mencionado es que se ha escogido tres descargadores de sobretensiones clase C bipolar para corriente continua de 10 kA de la marca Schneider, que van a ser colocados en cada una de las dos líneas de corriente continua que conectan a los equipos generadores con el inversor.

✓ Protección frente a sobretensiones en corriente alterna:

Al ser la distancia entre el inversor y la caja general de protección mucho mayor a los tramos de corriente continua es que se ha estimado conveniente colocar un descargador de sobretensión clase C junto al inversor, y un descargador clase B (clase 1) junto a la acometida para proteger frente a sobretensiones de la red eléctrica. Se ha elegido un descargador de clase 1, dado que estos están diseñados para hacer frente a formas de onda de $10/350 \mu s$, transformándola en una onda de $8/20 \mu s$, que puede ser soportada por los descargadores de sobretensiones clase 2 que serán colocados junto a la salida del inversor.

Por lo tanto se recomienda un descargador de sobretensiones clase C trifásico de 15 kA y un descargador de sobretensiones clase B trifásico de 20 kA, todos de la marca Revalco.

G.3.4.- Tableros eléctricos

✓ Tableros de entrada CC y salida AC del inversor:

El tablero de entrada de continua está situado junto al inversor, así como también el tablero salida de alterna del mismo. Dentro del primero se encontrarán instalados los interruptores de continua y descargadores de sobretensiones, del mismo modo, dentro del segundo tablero se instalarán el descargador de sobretensiones de alterna lado inversor y un interruptor general termodiferencial con rearme automático. Con estos dispositivos además de proteger la instalación y a las personas ante un posible funcionamiento anómalo, permitirán desconectar las partes de continua y alterna en caso de tener que realizar algún trabajo o labor de mantenimiento.

✓ Tablero de protección y medida:

Por tratarse de un suministro a un único usuario, se colocará en un único conjunto la caja general de protección (CGP) y el equipo de medida, llamándose cuadro de protección y medida. El fusible de seguridad situado antes del contador bidireccional coincidirá con el fusible que incluye una CGP.

El tablero de protección y medida se situará de manera que permita el acceso a personal autorizado de infraestructura, o para el caso de una vivienda, con fácil acceso a personal de la compañía distribuidora. Tendrá precintados los elementos activos y se cerrará con una puerta metálica, revestida exteriormente de acuerdo con las características del entorno. Estará protegida contra la corrosión, disponiendo de una cerradura normalizada por la empresa distribuidora.

En este tablero se instalarán el descargador de sobretensiones de alterna lado interconexión, los equipos de medición de energía exportada por el sistema e importada por las cargas, el interruptor general manual con posibilidad de bloqueo por la compañía distribuidora y los fusibles de protección de la interconexión.

Los tableros serán seleccionados según las especificaciones de cada equipo que los conforman y el interconexiónado entre ellos (figura 5.17).

Anexo H

Montaje de los Equipos

H.1.- Montaje de aerogenerador

Es aconsejable colocar el aerogenerador sobre una torre o poste independiente y a cierta distancia del emplazamiento para evitar que esta pueda provocar turbulencias.

El anclaje del poste (torre) se realizará según el tipo de poste que se vaya a instalar, siempre sujeto a una superficie en una cimentación de hormigón. En todo momento se debe de comprobar que el poste quede totalmente vertical.

H.1.1.- Tipos de torres de soporte

Existen varios tipos de torres de soporte, pero en el caso del montaje de aerogeneradores de micro y minigeneración, son los dos siguientes tipos de torres los más empleados:

- Torres basculantes

Este tipo de torre ofrece una serie de ventajas: bajo coste, gran efectividad y facilidad de montaje. Sus características permiten bajar el aerogenerador a nivel del suelo, minimizando riesgos de caídas con relativa facilidad y rapidez para realizar revisiones y mantenimiento.

Debido a su relación altura-esfuerzos del viento en su extremo superior, la torre necesita ser sujeta por tirantes.

Existen distintos tipos de torre en función de sus características constructivas (Figura H.1):

- La torre tubular es la más utilizada debido a su simplicidad, facilidad de fabricación y bajo coste. Este tipo de torres permite incrementar su altura en un momento dado añadiendo más tramos de tubo y cambiando la distribución de los tensores.
- La torre escalonada presenta la particularidad de, además de ser abatible, permitir ser trepada hasta el aerogenerador para realizar allí revisiones

periódicas sin tener que abatir la torre. Las dimensiones de los tensores y de la torre serán mayores que en el tipo de torre tubular.

- La torre de tipo celosía, ya sea triangular o rectangular, no es abatible. Es mucho más ligera que las torres auto soportadas y de menor coste, pero no son suficientemente fuertes para soportar el peso de un aerogenerador y sus esfuerzos. El tipo de refuerzos que se utiliza para las torres celosía, es con tirantes, idéntico que con las abatibles.

Se puede instalar este tipo de torres en pendientes y terrenos irregulares, pero es preferible y más sencillo hacerlo en terrenos planos.

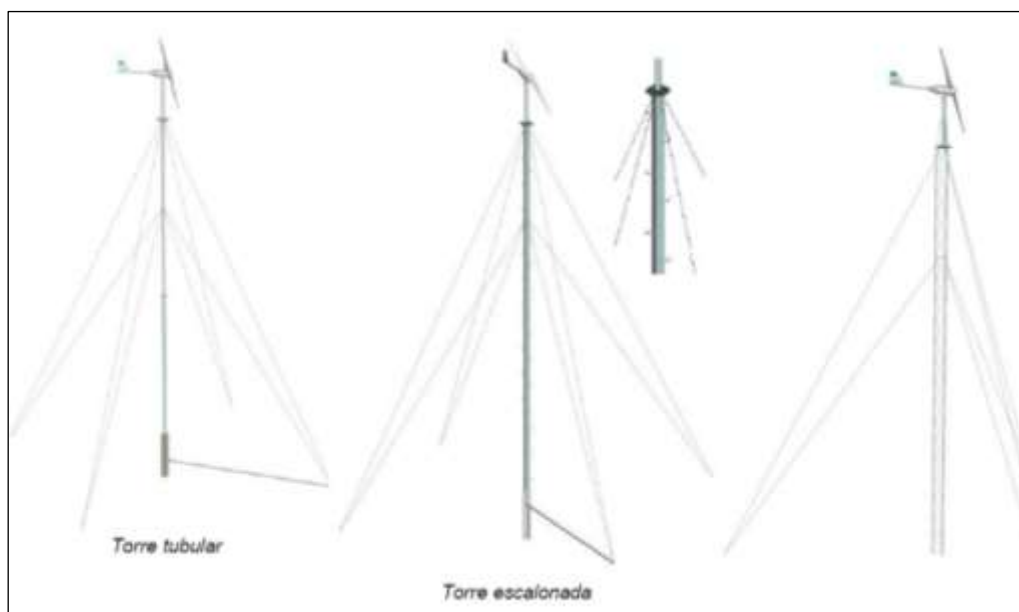


Figura H.1.- a) Torre tubular, b) Torre escalonada, c) Torre tipo celosía.

- Torres autosoportadas

Otro tipo de torres muy utilizadas son las torres auto soportadas. La característica principal de estas torres es, como su nombre indica, que se soportan ellas mismas; no necesitan tirantes para asegurar que la torre no caiga. Son torres más robustas y pesadas que las abatibles, pero tienen el inconveniente de ser más caras y necesitar una grúa para su instalación. Existen distintos fabricantes, pero todos ellos se rigen por la misma normativa para su construcción.

Las torres autoportadas, necesariamente, deberán ser fijadas con cimentaciones. Los principales modelos de torres autoportadas son aquellos de tipo de celosía o los de poste de hormigón.

- La torre tipo celosía, se encuentra conformada por una estructura metálica y su costo de adquisición es mucho más elevado en comparación a las torres basculantes.
- La torre tipo poste de hormigón, su precio es comparable a las torres basculantes y no requiere del uso de tirantes. Con este tipo de torre autoportada el montaje es más delicado debido a que el material que la conforma es mucho más frágil a los golpes y caídas, este riesgo se ve reducido con un adecuado uso de la grúa para el montaje.

H.1.2.- Puntos y tipos de anclaje

En primer lugar asegúrese que se encuentra lejos de cualquier tendido eléctrico. Localice el punto exacto donde se instalará la torre y marque el punto de anclaje de los tensores (si es que los hay).

Existen varios tipos de anclajes para la torre, puede utilizar la que más le convenga según el tipo de terreno o más fácil le sea su construcción.

En el caso de que el terreno sea demasiado débil es necesaria la utilización de cimentaciones. Pero si la instalación se realiza sobre un terreno firme, se puede prescindir de ellas y anclar directamente el clavo sobre el terreno. En el mercado existen distintos tipos de clavos con este fin.

En el caso de roca dura (como granito, basalto y roca que no rompa con facilidad) se utilizan los tornillos de Expansión. (Figura H.2)

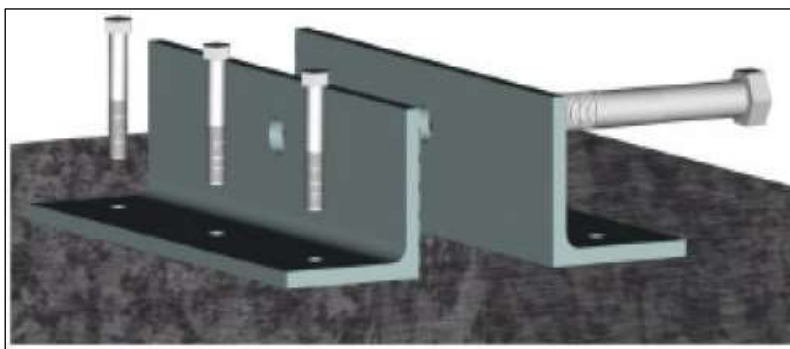


Figura H.2.- Anclaje sobre roca dura.

En el caso de que la roca del terreno sea roca blanda, no es aconsejable el uso de tornillos de expansión, dado que la roca puede romper con el uso de este tipo de fijación. Para ello se debe usar un tornillo convencional anclado con cemento. (Figura H.3)

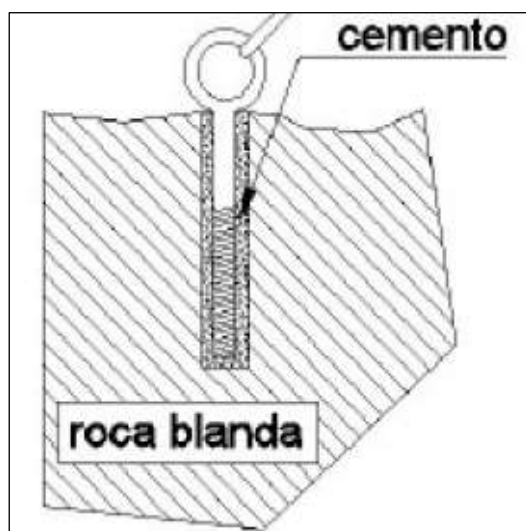


Figura H.3.- Anclaje sobre roca blanda.

H.1.3.- Emplazamiento del aerogenerador

La velocidad del viento depende en gran medida del terreno sobre el que se mueve el aire; la vegetación, tipo de terreno, construcciones cercanas, etc., frenan el viento y producen turbulencias.

El lugar idóneo para un aerogenerador, es una zona libre de obstáculos, y lo más alto posible respecto de los obstáculos más cercanos con el fin de minimizar la turbulencia.

Para una turbina eólica montada en lo alto de un edificio que se encuentra situado en una zona abierta, la velocidad del viento puede teóricamente, hasta incrementarse según pasa por encima de la parte superior del edificio. Sin embargo su colocación debe realizarse lejos del borde, dado que si la instalación se realiza muy cerca de este, el edificio mismo actúa como una obstrucción y puede provocar un flujo de aire turbulento, tal y como se aprecia en la figura H.4:

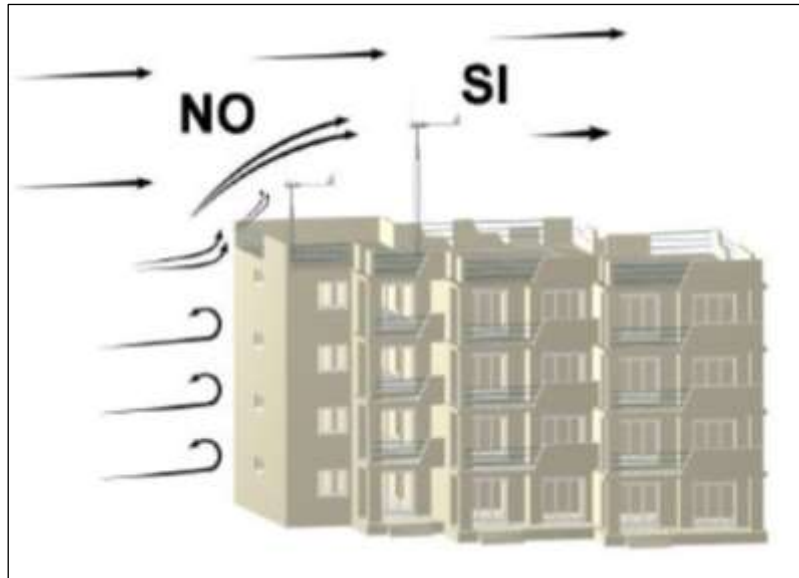


Figura H.4.- Influencia del emplazamiento en el funcionamiento del aerogenerador.

H.1.4.- Montaje y conexión del aerogenerador

Para instalar el aerogenerador sobre la torre, necesitará un adaptador que permita que las hélices giren sin peligro de golpear la torre. Instale el aerogenerador una vez el adaptador y la torre hayan sido instalados. Puede subirlo a su posición usando la grúa después de haber erigido la torre, o bien utilizando una polea.

Es conveniente utilizar el segundo sistema para poder subir y bajar en cualquier momento el molino sin depender de una grúa. En este segundo sistema el soporte que se utilice deberá estar bien sujeto a la torre, con una polea en el extremo donde se pasará una cuerda, con la que se atará el aerogenerador, tal y como se aprecia en la figura H.5. Con este sistema puede izarse el aerogenerador sin problemas.

Obviamente, para estas operaciones necesitará subir a lo alto de la torre, por lo que **se debe utilizar arneses de seguridad.**

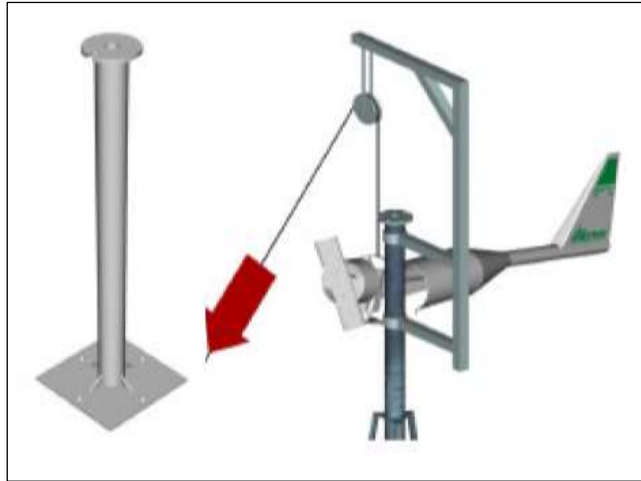


Figura H.5.- Esquema para el izaje y montaje del aerogenerador.

H.1.5.- Características y costo de la instalación del aerogenerador

Los aerogeneradores serán instalados en las azoteas de dos de los pabellones de la facultad (uno por pabellón), e irán montados en un poste sobre una cimentación. El aerogenerador se orientará en una dirección sur-sudeste de 190° , el cálculo de esta orientación se encuentra ampliamente explicado y detallado en el Anexo D, de esta tesis.

Se ha decidido colocar los aerogeneradores en las azoteas de dos edificios de la facultad, y no sobre una torre cimentada a nivel del suelo, con la finalidad de alcanzar la mayor altura posible y reducir al mínimo la generación de turbulencia. Esta alternativa significa un gran impacto a nivel visual, pero dado que se ha procurado maximizar el desempeño del sistema es que se ha seleccionado el punto más alto de los edificios como sitio de emplazamiento.

Como torre de soporte se recomienda una torre basculante de tipo poste tubular de 3 metros de altura, esto por varias razones, la principal de ellas es la reducida área que se tiene en las azoteas de los edificios, lo que impide elegir una torre basculante que necesite tirantes, los cuales exigen un área mínima de un radio a la redonda igual a la mitad del tamaño de la torre. Por otro lado un poste tubular tiene un menor costo de adquisición respecto a aquella torre autosoportada tipo celosía.

Para la instalación del poste de fierro será necesario construir un pedestal de concreto que tenga una altura mínima igual a la décima parte de la altura total del poste, y se deberá tener en cuenta que la construcción de este pedestal sea

realizada lejos del borde sur de la azotea, para evitar la generación de turbulencia debido al cambio de nivel brusco entre el suelo y la azotea. Durante el izaje del poste se requerirá el uso de una grúa telescópica.

En los planos, descritos en el Anexo A, se muestran vistas de elevación de los edificios de la facultad. En ellos se aprecian los puntos de instalación de los aerogeneradores seleccionados en base a las consideraciones explicadas líneas arriba.

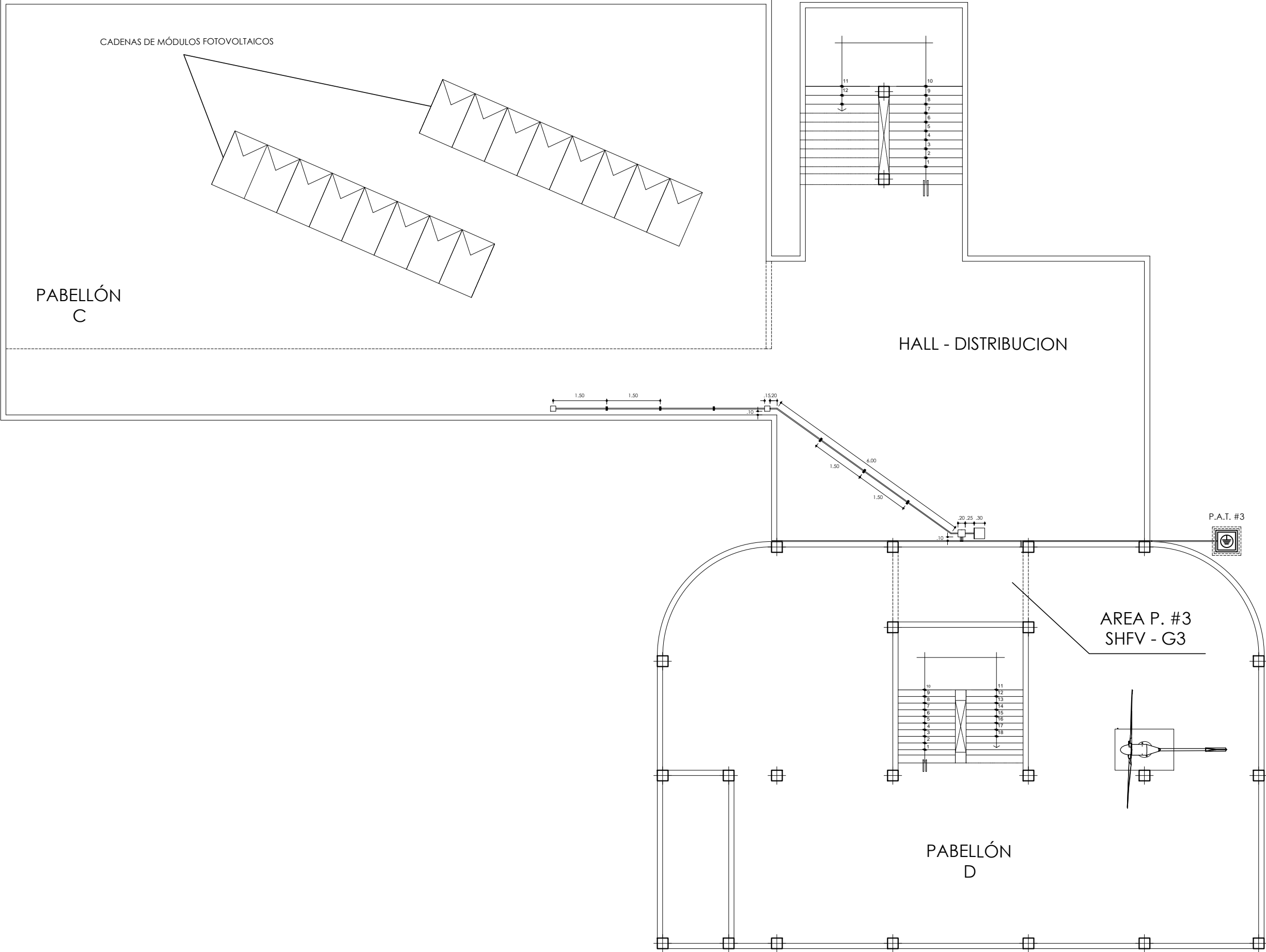
H.2.- Montaje de paneles solares

El montaje de los paneles solares que conforman el arreglo fotovoltaico, debe realizarse en un área que permita aprovechar la mayor cantidad de radiación solar posible, durante la mayor parte del tiempo posible y donde la sombra proyectada sea la menor posible. Es por esto que se ha seleccionado la azotea como sitio de emplazamiento para el montaje de los paneles solares.

Se recomienda que los paneles solares sean montados sobre estructuras metálicas tipo mesa, las cuales deben poseer la capacidad de regular el grado de inclinación de los paneles, garantizar la sujeción y soporte de estos, y ser lo suficientemente resistentes a agentes medioambientales como la lluvia y el viento; por ende, se han seleccionado estructuras de acero galvanizado. La instalación de la estructura y el sistema de fijación de módulos permitirá las necesarias dilataciones terminas sin transmitir cargas que puedan afectar la integridad de los módulos, siguiendo las indicaciones del fabricante. La estructura se montará teniendo en cuenta la facilidad de montaje, desmontaje, y la posible necesidad de sustituir algunos elementos.

La cara útil de los paneles solares estará orientada hacia el norte (azimut = 0°), debido a que el sitio de emplazamiento se encuentra en el hemisferio sur. Por otro lado, los cálculos realizados para la determinación del ángulo óptimo de inclinación, en el apartado E.5 del Anexo E, dieron como resultado que con una inclinación de 9° se obtiene la mayor cantidad promedio de energía a lo largo del año.

En los planos, descritos en el Anexo A, se aprecia la vista de planta de las azoteas de la facultad. En ellos se visualiza la distribución de los paneles solares que conforman los arreglos fotovoltaicos de los sistemas híbridos.



SIMBOLO	DESCRIPCION
	TUBERIA COUNDUIT 90 EMT 1" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT FLEXIBLE EMT 1"
	TUBERÍA CONDUIT 90 EMT 3/4" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT EMT 3/4"
	TUBERÍA ELÉCTRICA PVC 3/4"
	RIEL UNISTRUT DE ACERO INOXIDABLE 30X50X3000MM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 20X20CM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 15X15CM
	CANALETA METALICA SIN RANURAS DE VENTILACION HERMETICA
	PANEL FOTOVOLTAICO
	CONECTOR DE BRONCE TIPO AB
	CAJA REGISTRO DE PUESTA A TIERRA

PLANO:

ANEXO
A.2

DIBUJADO POR:

Br. Miguel Angel
Granados Moreno

REVISADO POR:

Ing. Jony Villalobos
Cabrera

REVISADO POR:

VISTA DE PLANTA - PABELLÓN C
UBICACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
SHFV - G1

PROYECTO:

"PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO EÓLICO FOTOVOLTAICO PARA
SUMINISTRAR CON ENERGÍA ELÉCTRICA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO."
Lambayeque, Lambayeque, Lambayeque

UBICACIÓN

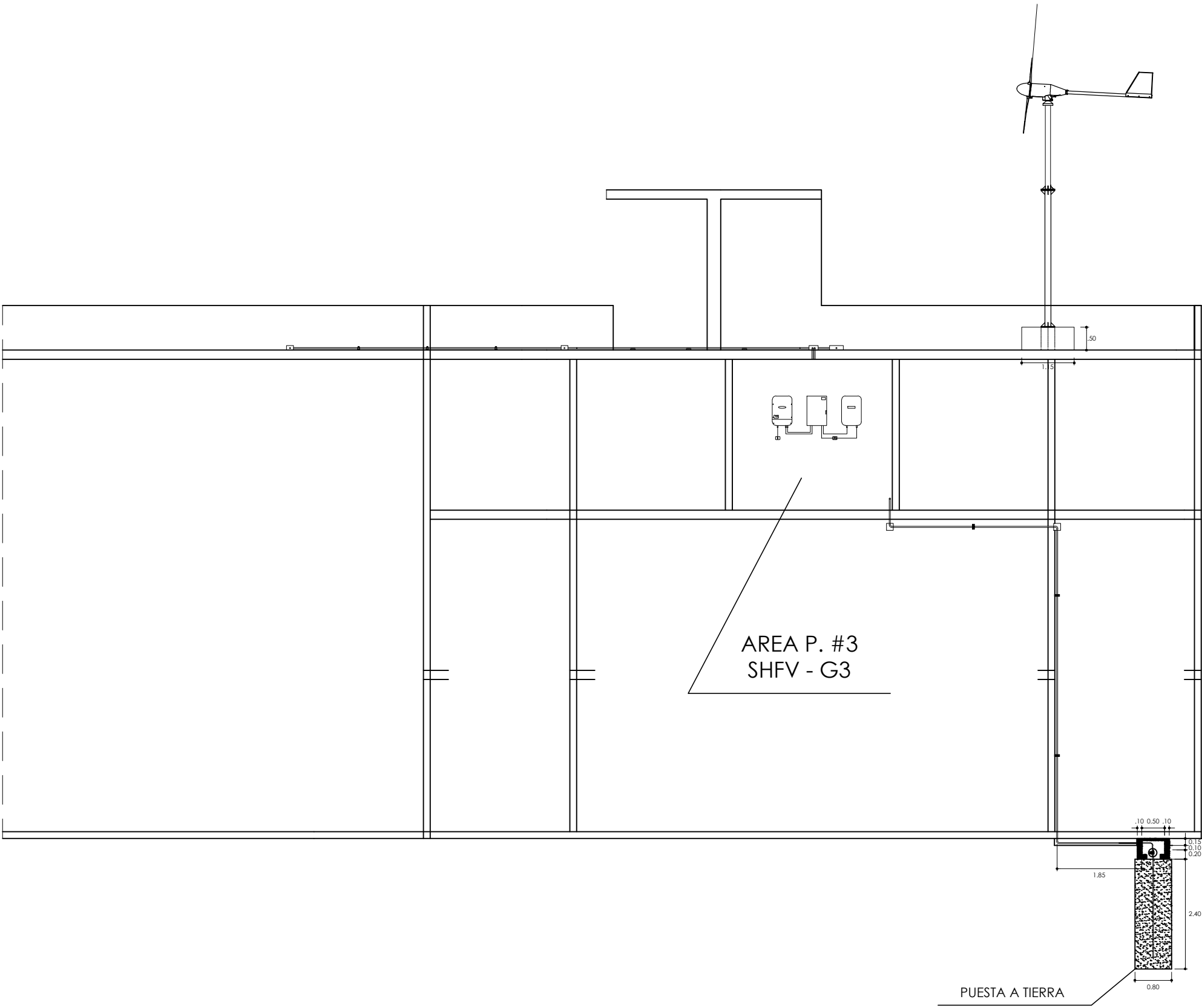


FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNPREG

PROPIETARIO



UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO
LAMBAYEQUE - PERU



SIMBOLO	DESCRIPCION
	TUBERIA CONDUIT 90 EMT 1" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT FLEXIBLE EMT 1"
	TUBERÍA CONDUIT 90 EMT 3/4" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT EMT 3/4"
	TUBERÍA ELÉCTRICA PVC 3/4"
	RIEL UNISTRUT DE ACERO INOXIDABLE 30X50X3000MM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 20X20CM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 15X15CM
	CANALETA METALICA SIN RANURAS DE VENTILACION HERMETICA
	PANEL FOTOVOLTAICO
	CONECTOR DE BRONCE TIPO AB
	CAJA REGISTRO DE PUESTA A TIERRA

PLANO:

ANEXO
A.3

DIBUJADO POR:

Br. Miguel Angel
Granados Moreno

REVISADO POR:

Ing. Jony Villalobos
Cabrera

REVISADO POR:

VISTA DE ELEVACIÓN - PABELLÓN C
SHFV - G1

PROYECTO:

"PROPUESTA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO EÓLICO FOTOVOLTAICO PARA
SUMINISTRAR CON ENERGÍA ELÉCTRICA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO."
Lambayeque, Lambayeque, Lambayeque

UBICACIÓN

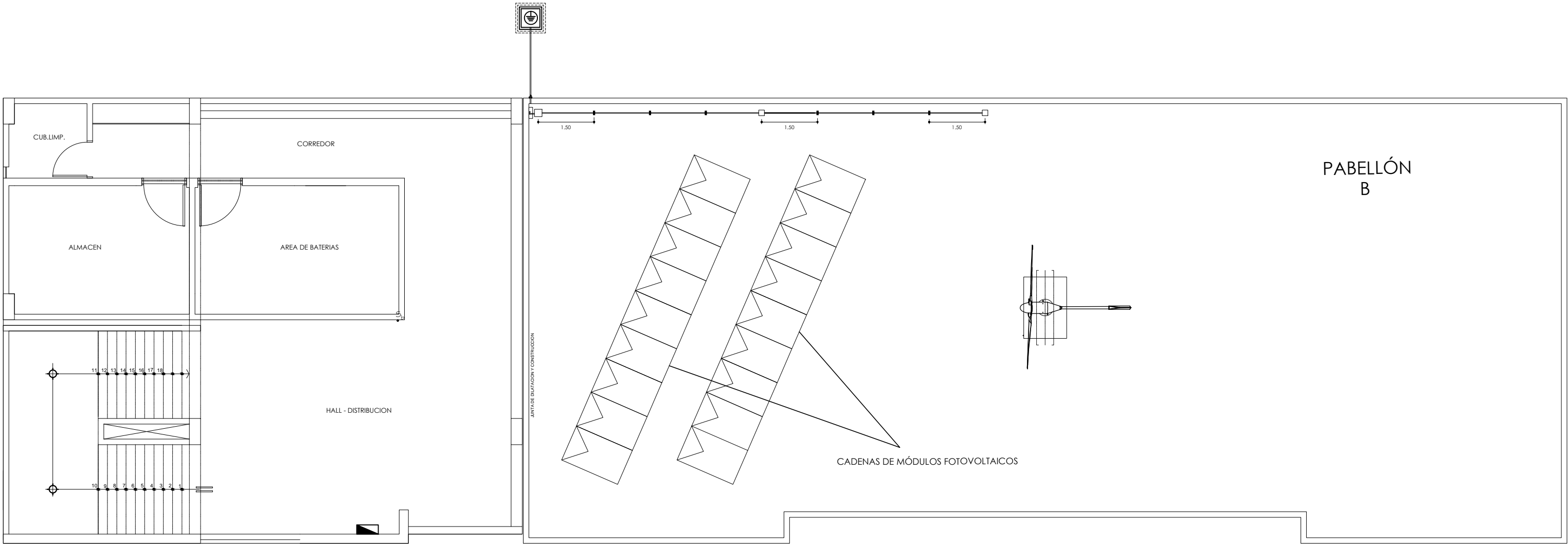


FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNPREG

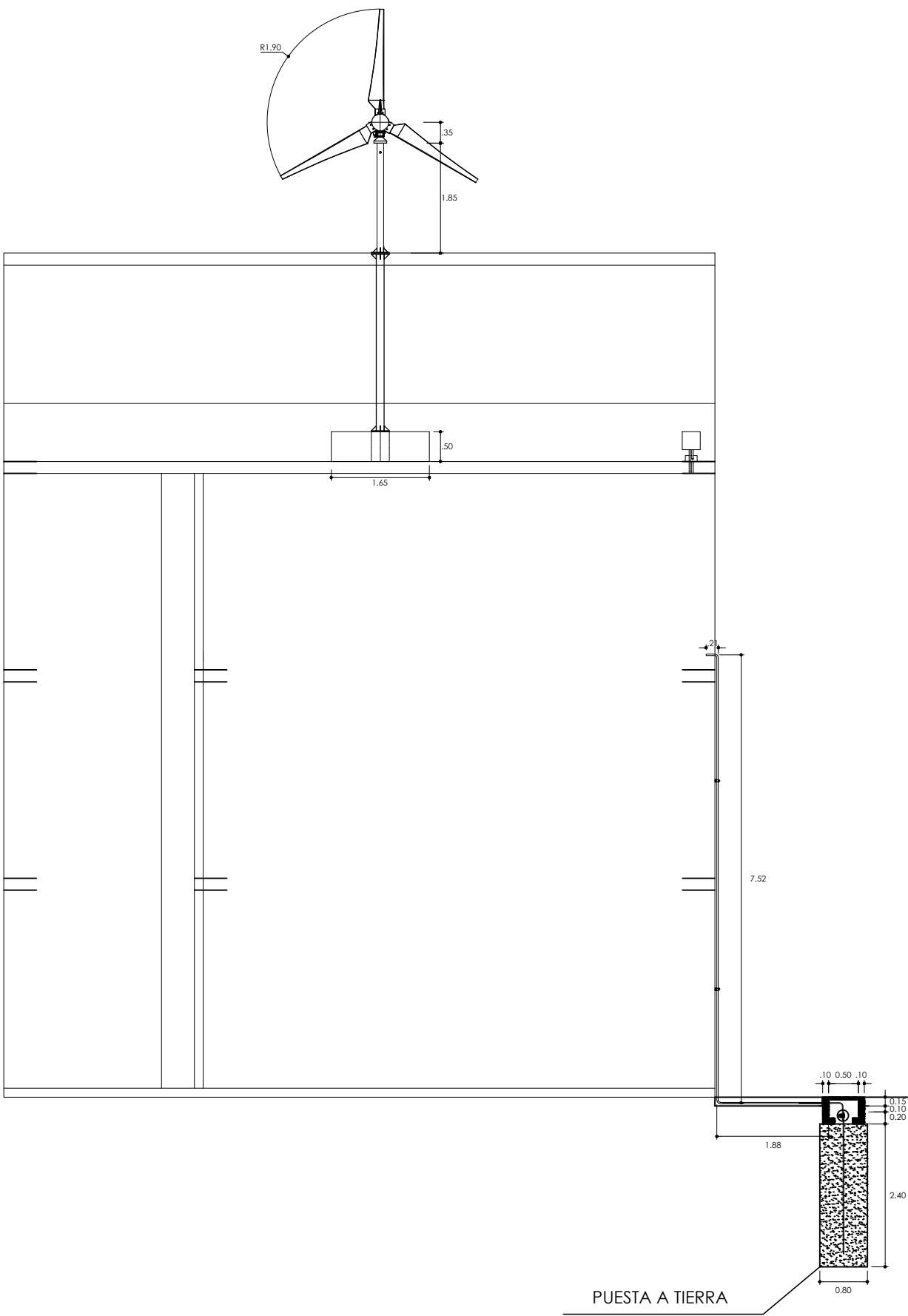
PROPIETARIO



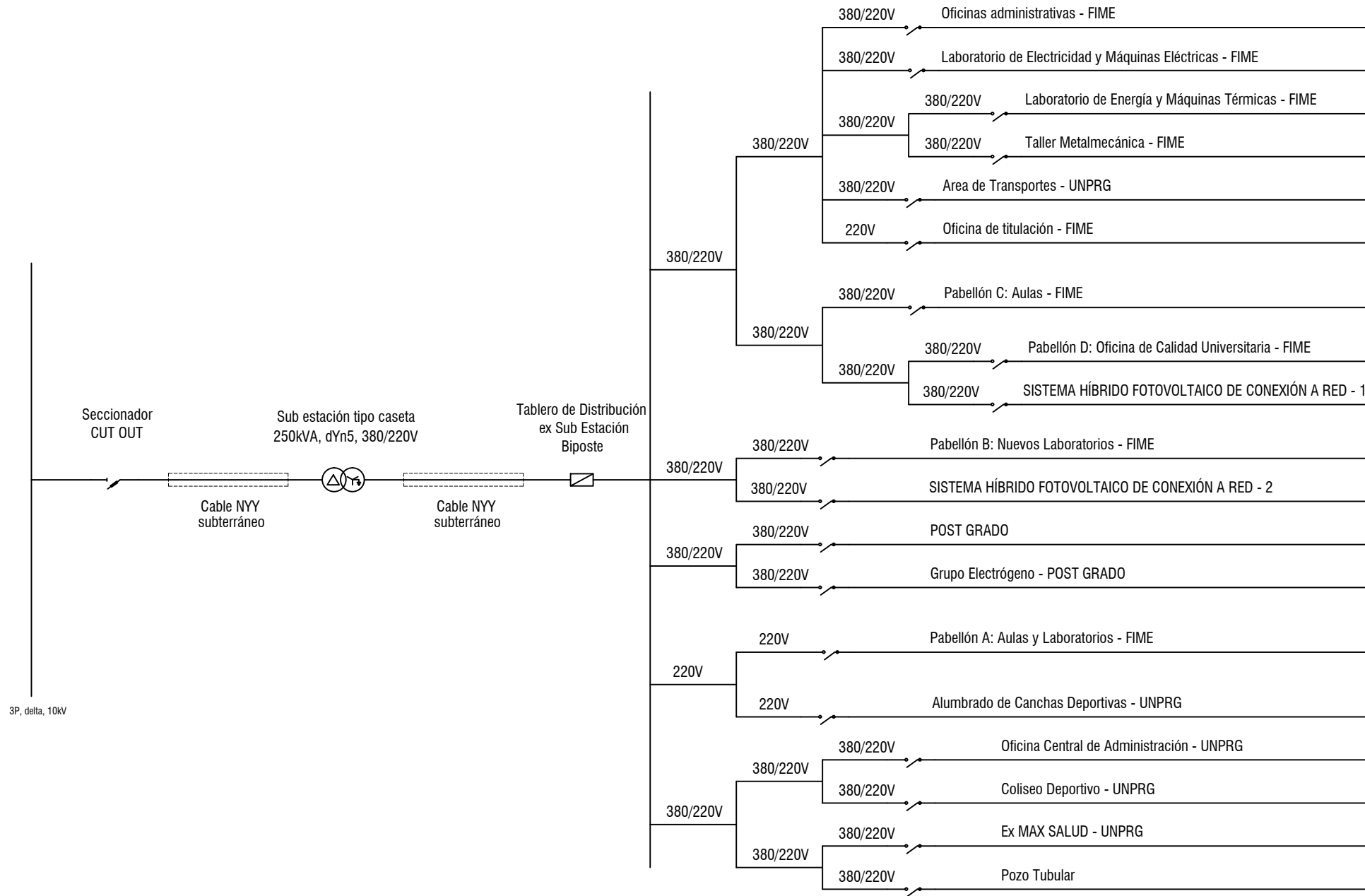
UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO
LAMBAYEQUE - PERU



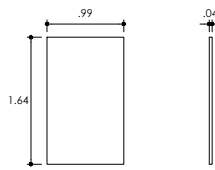
SIMBOLO	DESCRIPCION
	TUBERIA CONDUIT 90 EMT 1" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT FLEXIBLE EMT 1"
	TUBERIA CONDUIT 90 EMT 3/4" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT EMT 3/4"
	TUBERIA ELÉCTRICA PVC 3/4"
	RIEL UNISTRUT DE ACERO INOXIDABLE 30X50X3000MM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 20X20CM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 15X15CM
	CANALETA METALICA SIN RANURAS DE VENTILACION HERMETICA
	PANEL FOTOVOLTAICO
	CONECTOR DE BRONCE TIPO AB
	CAJA REGISTRO DE PUESTA A TIERRA



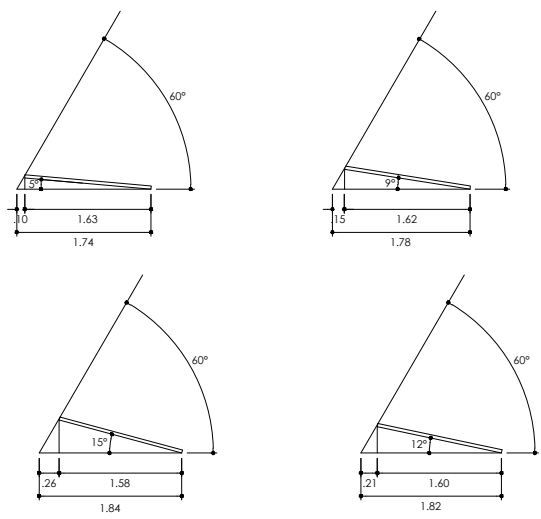
SÍMBOLO	DESCRIPCION
	TUBERIA CONDUIT 90 EMT 1" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT FLEXIBLE EMT 1"
	TUBERÍA CONDUIT 90 EMT 3/4" ADOSADA
	TUBERIA CONDUIT EMT 3/4"
	TUBERÍA ELÉCTRICA PVC 3/4"
	RIEL UNISTRUT DE ACERO INOXIDABLE 30X50X3000MM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 20X20CM
	CAJA DE PASO METÁLICA DE 15X15CM
	CANALETA METALICA SIN RANURAS DE VENTILACION HERMETICA
	PANEL FOTOVOLTAICO
	CONECTOR DE BRONCE TIPO AB
	CAJA REGISTRO DE PUESTA A TIERRA



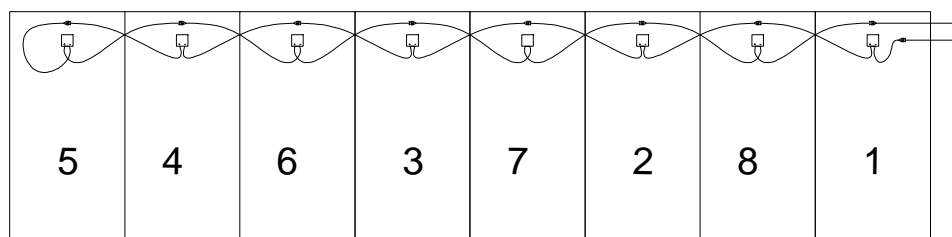
PANEL SOLAR ESPMC 270



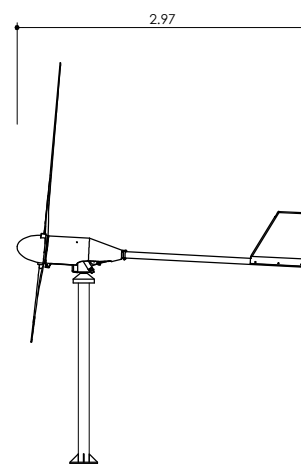
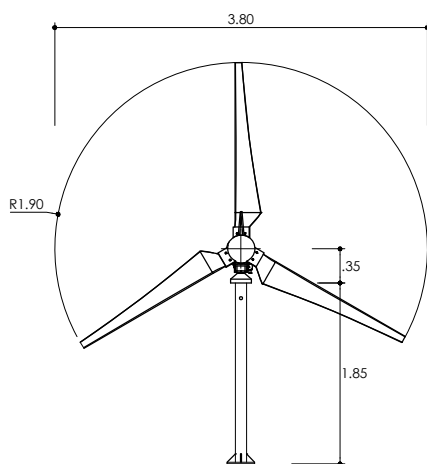
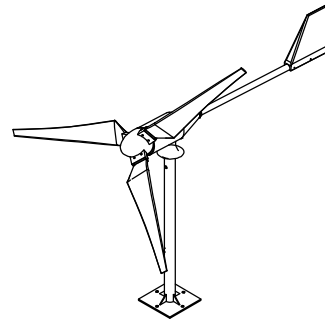
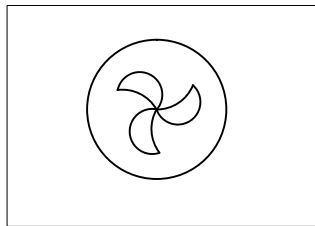
PANEL SOLAR A DIFERENTES INCLINACIONES



CONEXIÓN DE PANELES SOLARES MEDIANTE TÉCNICA SALTO DE RANA



AEROGENERADOR ZONHAN 2500



PLANO:

ANEXO
A.8

DIBUJADO POR:

Br. Miguel Angel
Granados Moreno

REVISADO POR:

Ing. Jony Villalobos
Cabrera

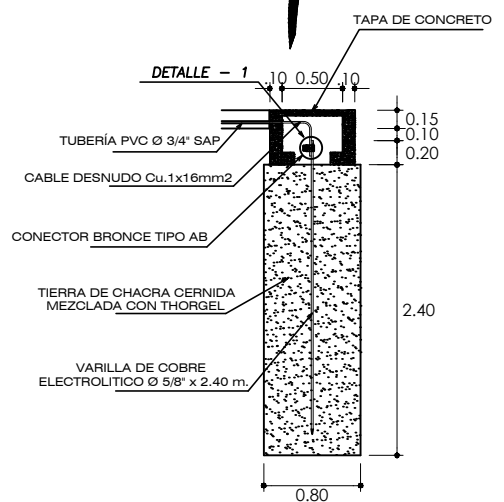
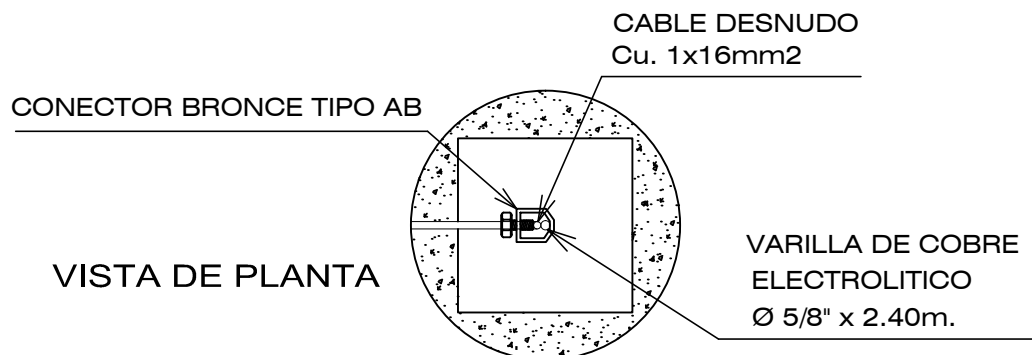
REVISADO POR:

**DETALLES DE AEROGENERADOR, VISTAS DEL
SOPORTE.**

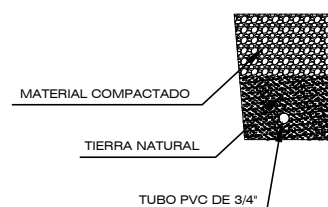
UBICACIÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNPRG



DETALLE DE EXCAVACIÓN PARA TUBERÍA



DETALLE DE PUESTA A TIERRA

PLANO:

ANEXO
A.9

DIBUJADO POR:

Br. Miguel Angel
Granados Moreno

REVISADO POR:

Ing. Jony Villalobos
Cabrera

REVISADO POR:

DETALLES DE PUESTAS A TIERRA.

UBICACIÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNPRG