



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**SIMULACIÓN EN HOMER DE UN SISTEMA ELÉCTRICO HÍBRIDO SOLAR -
EÓLICO EN LA PARROQUIA LASSO DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingenieros Eléctricos en
Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

López Bautista Edison Xavier

Núñez Aldaz Diego Fabricio

Tutor:

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc.

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo 2022



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **López Bautista Edison Xavier y Núñez Aldaz Diego Fabricio**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación “**Simulación en Homer de un Sistema Eléctrico Híbrido Solar – Eólico en la parroquia Lasso de la Provincia de Cotopaxi**”, siendo el Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc. tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....
López Bautista Edison Xavier

C.C. 050396205-2

.....
Núñez Aldaz Diego Fabricio

C.C. 180540700-2



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“Simulación en Homer de un Sistema Eléctrico Híbrido Solar – Eólico en la parroquia Lasso de la Provincia de Cotopaxi”**, de **López Bautista Edison Xavier** y **Núñez Aldaz Diego Fabricio**, de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo, 2022

El Tutor



.....

Firma

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc.

C.C. 050265642-4



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**; por cuanto, los postulantes **López Bautista Edison Xavier** y **Núñez Aldaz Diego Fabricio** con el título de Proyecto de titulación: **“Simulación en Homer de un Sistema Eléctrico Híbrido Solar – Eólico en la parroquia Lasso de la Provincia de Cotopaxi”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúnen los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Marzo 2022

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Ing. Salazar Achig Edgar Roberto

C.C. 050284761-9

Lector 2

Ing. Suárez Vinuesa Rommel Eusebio

C.C. 180416535-3

Lector 3

Ing. Pacheco Mena Carlos Francisco

C.C. 050307290-2



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme acompañado a lo largo de mi carrera, a mis padres y mis hermanos que con su apoyo incondicional pude culminar este propósito tan grande en mi vida.

A personas extraordinarias que han sido mi apoyo fundamental de manera especial:

A mi tutor el MSc. Xavier Alfonso Proaño Maldonado, por su tiempo y dedicación, por brindarme su apoyo para realizar mi proyecto de investigación de la mejor manera.

Al MSc. Roberto Salazar por haberme encaminado a la realización de la presente investigación, a mi compañero de tesis Diego Núñez quedo profundamente agradecido; sin tu ayuda esto no hubiese sido posible, te auguro el mejor de los éxitos en tu etapa profesional. A mis compañeros de estudio con quienes tuve la oportunidad de compartir vivencias durante mi vida universitaria.

A mis docentes quienes me brindaron sus conocimientos y experiencias a lo largo de toda mi carrera

Eternamente agradecido

Edison Xavier



AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por haberme acompañado a lo largo de mi carrera, también, agradezco sinceramente a mi tutor de Tesis, Ing. Xavier Proaño MSc, su esfuerzo y dedicación. Sus conocimientos, su orientación, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación como Ingeniero. Él ha inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación completa como profesional. A su manera, ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo que ha durado esta Tesis.

Mis agradecimientos, también, por los consejos recibidos a lo largo de los últimos años por otros docentes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, que de una manera u otra han aportado su granito de arena a mi formación. Destacar al Ing. Edgar Salazar, al Ing. Rommel Suárez, al Ing. Carlos Pacheco, al Ing. William Guamán y al Ing. Carlos Quinatoa.

No puedo dejar de mencionar que estaré eternamente agradecido a mi compañero de trabajo, Sr. Edison López. Para mí es el mejor compañero que pude tener. El ambiente de trabajo creado es simplemente perfecto, su visión, motivación y optimismo me han ayudado en momentos muy críticos de la Tesis. Lo considero parte de mis mejores amigos y estoy orgulloso que él, también, me considere a mi digno de conservar su amistad. No todo el mundo puede decir lo mismo de su compañero de trabajo. Soy un hombre afortunado.

Para todos ustedes, gracias infinitas.
Diego Fabricio



DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación va dedicado primeramente a Dios por la vida, por bendecirme para llegar a cumplir un logro más en mis estudios.

A mis padres **Isabel Bautista Y Patricio López** por inculcarme valores éticos y morales, por ser ejemplo de lucha y perseverancia diaria que con su apoyo incondicional me dieron la confianza de poder superar todos los obstáculos y cumplir una meta más en mi vida
A mis hermanos **Paul y Brayan** que con su apoyo moral pude superar distintas adversidades en el transcurso de mi carrera.

Edison Xavier



DEDICATORIA

Dedico esta Tesis a toda mi familia y docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Primero a **Dios** quien fue el que me otorgo la vida y me ayudo a seguir adelante con su bendición, en mis momentos más difícil.

A mis padres **Ibo Núñez y Lourdes Aldaz**, por su comprensión y ayuda en toda mi vida y en mi etapa estudiantil. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor.

Para mis hermanos **Alejandra, Pablo y Emilio**, por su apoyo, a mi **mami Tuti** y mis **ñañas Doris y Jaqueline** quien con ayuda de mis padres criaron y formaron la persona que soy hoy en día me enseñaron la humildad y el respeto, que se tendría con todas las personas.

Para mi hija, **Leonela**, quien es la mayor bendición de mi vida y es la princesa quien con su magia de amor vino a darme el último empujón para culminar mi carrera estudiantil. Es sin duda mi motivación para el presente y el futuro.

Para varios familiares más, quienes me ayudaron con un consejo para seguir adelante en mis estudios y formación como persona, en especial a mi **Ñaño Carlos** y su familia quien en la parte final de la realización de esta tesis me brindó su mano y a **Selena** la madre de mi hija quien estuvo conmigo apoyándome.

A mis docentes quienes fueron los que me enseñaron todos los conocimientos mientras seguía aprobando cada uno de los ciclos académicos, en especial a los Ingenieros que colaboraron en la revisión y creación de la presente tesis.

A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

Diego Fabricio



ÍNDICE GENERAL

PORTADA	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
ÍNDICE GENERAL.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE ANEXOS	xviii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xxi
1 INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2 INTRODUCCIÓN.....	2
2.1 EL PROBLEMA.....	3
2.2 SITUACIÓN PROBLÉMICA	3
2.2.1 Formulación del problema.....	4
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
2.3.1 Objeto	4
2.3.2 Campo de Acción	4
2.4 BENEFICIARIOS	4
2.4.1 Directos	4
2.4.2 Indirectos	4
2.5 JUSTIFICACIÓN	4
2.6 HIPÓTESIS	5
2.7 OBJETIVOS	6
2.7.1 General	6
2.7.2 Específicos.....	6
2.8 SISTEMAS DE TAREAS	6



3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
3.1	ANTECEDENTES	8
3.2	PARROQUIA LASSO	9
3.3	SISTEMAS HÍBRIDOS	10
3.3.1	Tipos de sistemas híbridos	11
3.4	SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO – EÓLICO (PV - WT).....	12
3.5	PARÁMETROS DEL SISTEMA SOLAR - EÓLICO.....	13
3.5.1	Parámetros del sistema solar	13
3.5.2	Cálculo de irradiancia.....	15
3.5.3	Coordenadas horarias	16
3.6	PANELES FOTOVOLTAICOS.....	19
3.6.1	Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	19
3.6.2	Parámetros característicos del panel fotovoltaico	20
3.6.3	Estructura del módulo fotovoltaico	21
3.6.4	Efecto de irradiancia y temperatura sobre el módulo.....	23
3.6.5	Inversores Fotovoltaicos de Conexión a la Red	24
3.6.6	Principio de funcionamiento del inversor	24
3.6.7	Filtro de entrada / Enlace DC	24
3.6.8	Convertidor DC / DC	25
3.6.9	Puente inversor DC / AC.....	25
3.6.10	Filtro de salida	25
3.6.11	Medidor bidireccional	25
3.6.12	Transformador	25
3.6.13	Controles electrónicos	25
3.6.14	Funciones principales del inversor.....	25
3.7	PARÁMETROS DEL SISTEMA EÓLICO.....	26
3.7.1	El viento	26
3.7.2	Energía obtenible del viento.....	26
3.8	AEROGENERADORES	31
3.8.1	Componentes de un aerogenerador	31
3.8.2	Funcionamiento de un aerogenerador	34
3.8.3	Orientación del rotor	36
3.8.4	Perfiles aerodinámicos	38



3.8.5	Tipos de perfiles aerodinámicos.....	38
3.8.6	Sistemas eólicos conectados a la red eléctrica	39
3.9	ESTABILIDAD DE INTERCONEXIÓN ENTRE SISTEMAS HÍBRIDOS Y LA RED ELÉCTRICA	40
3.9.1	Aspectos técnicos – operativos.....	40
3.10	MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS	41
3.10.1	Modelo matemático de matriz fotovoltaica.....	42
3.10.2	Modelo matemático de generación de viento.....	44
3.11	ESTABILIDAD DE SISTEMAS HÍBRIDOS EN MICRORREDES.....	45
3.12	PROBLEMÁTICAS DE LA ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS EN UNA MICRORRED	46
3.13	SOFTWARE HOMER	48
3.14	SOFTWARE MATLAB	50
3.15	DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	51
3.15.1	Función de confiabilidad de Weibull	52
3.15.2	Función tasa de falla Weibull.....	53
3.16	HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA	55
3.16.1	Pasos para construcción de los histogramas.....	56
4	MATERIALES Y MÉTODOS	57
4.1	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	57
4.1.1	Método Deductivo - Inductivo	57
4.1.2	Método Histórico.....	57
4.1.3	Método Descriptivo.....	57
4.1.4	Método Analítico - Sintético	57
4.2	TIPOS DE INVESTIGACIÓN	57
4.2.1	Investigación Bibliográfica	57
4.2.2	Investigación Descriptiva.....	58
4.3	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	58
4.3.1	Investigación Cualitativa.....	58
4.4	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	58
4.5	INSTRUMENTOS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO.....	58
4.6	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS	59
4.6.1	Etapa 1.- Determinación de los parámetros.....	62



4.6.2	Etapa 2.- Recolección base de datos	62
4.6.3	Etapa 3.- Simulación en WRPLOT 8.0.2	63
4.6.4	Etapa 4.- Análisis de la dirección del viento	63
4.6.5	Etapa 5.- Análisis de la distribución de Weibull	63
4.6.6	Etapa 6.- Simulación en MATLAB Ra 2020	64
4.6.7	Etapa 7.- Simulación en PVsyst 7.2	64
4.6.8	Etapa 8.- Simulación en HOMER Pro 3.14.2.....	64
4.6.9	Etapa 9.- Análisis Económico	64
4.6.10	Etapa 10.- Comparación de los Datos Simulados	64
4.6.11	Etapa 11.- Porcentajes de Aportación por Recurso.....	64
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	65
5.1	SISTEMA EÓLICO.....	65
5.1.1	Rosa de los vientos	65
5.1.2	Emplazamiento	67
5.1.3	Técnica de Mínimos Cuadrado (TMC)	67
5.1.4	Tratamiento de los parámetros de Weibull.....	68
5.1.5	Análisis del potencial eólico.....	73
5.1.6	Selección del Aerogenerador.....	76
5.1.7	Factor de planta sistema eólico	78
5.1.8	Comportamiento del aerogenerador	78
5.1.9	Gráfica de dispersión del sistema eólico	80
5.1.10	Distancia para Ubicar los Aerogeneradores	80
5.2	SISTEMA SOLAR	81
5.2.1	Recurso solar en el sector	82
5.2.2	Orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos	84
5.2.3	Ángulo de azimut	84
5.2.4	Coeficiente de rendimiento (PR).....	86
5.2.5	Selección y dimensionamiento de los equipos	89
5.2.6	Sombras del panel fotovoltaico	91
5.2.7	Factor de planta sistema fotovoltaico.....	94
5.2.8	Comportamiento del panel fotovoltaico	95
5.2.9	Grafica de dispersión del sistema fotovoltaico.....	97
5.3	SISTEMA HÍBRIDO.....	97



5.4	REQUISITOS PARA LA CONEXIÓN A LA RED	102
5.5	DIAGRAMA UNIFILAR BÁSICO DE LA CONEXIÓN A LA RED DE UN SISTEMA HÍBRIDO	103
5.6	ANÁLISIS ECONÓMICO	104
5.7	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	109
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
6.1	CONCLUSIONES	110
6.2	RECOMENDACIONES.....	111
7	BIBLIOGRAFÍA.....	112
8	ANEXOS.....	115
8.1	ANEXO A: BASE DE DATOS.....	115
8.2	ANEXO B: SISTEMA EÓLICO	116
8.3	ANEXO C: SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	121
8.4	ANEXO D: SISTEMA HÍBRIDO.....	126
8.5	ANEXO E: TASA DE INTERÉS.....	130



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 1.....	6
Tabla 2.2. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 2.....	7
Tabla 2.3. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 3.....	7
Tabla 2.4. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 4.....	8
Tabla 5.1. Parámetro de amplitud.....	70
Tabla 5.2. Frecuencia absoluta.	70
Tabla 5.3. Frecuencia relativa y acumulada	71
Tabla 5.4. Promedios de la velocidad del viento	74
Tabla 5.5. Potencia y energía del sistema eólico	75
Tabla 5.6. Clases de turbinas eólicas	76
Tabla 5.7. Características aerogenerador Enair 70 Pro.	76
Tabla 5.8. Velocidades promedio del viento	77
Tabla 5.9. Velocidades del viento	79
Tabla 5.10. Energía del sistema eólico	81
Tabla 5.11. Datos de irradiación mensual	83
Tabla 5.12. Orientación de los módulos fotovoltaicos	85
Tabla 5.13. Pérdidas en los elementos del sistema fotovoltaico	88
Tabla 5.14. Características de los paneles fotovoltaicos.	90
Tabla 5.15. Resultados generales del sistema fotovoltaico	93
Tabla 5.16. Parámetros de radiación solar.....	95
Tabla 5.17. Costos de la planta solar	104
Tabla 5.18. Costos de la planta eólica	104
Tabla 5.19. Modelo económico	106
Tabla 5.20. Comparación de energía de los sistemas	109



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio.....	10
Figura 3.2. Tipos de fuentes energéticas renovables y no renovables.....	11
Figura 3.3. Tipo de sistemas híbridos.....	11
Figura 3.4. Sistemas híbridos renovables	12
Figura 3.5. Sistema híbrido renovable PV-WT típico.....	12
Figura 3.6. Características físicas del sol.	13
Figura 3.7. Radiación solar.....	14
Figura 3.8. Movimiento de la tierra al rededor del sol.	15
Figura 3.9. Coordenadas horarias.	16
Figura 3.10. Coordenadas horizontales.	18
Figura 3.11. Paneles fotovoltaicos.....	19
Figura 3.12. Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red.	19
Figura 3.13. Curva característica I – V.....	21
Figura 3.14. Estructura del módulo fotovoltaico.	22
Figura 3.15 Conexionado de las células fotovoltaicas	23
Figura 3.16. Curva característica I - V en función de la irradiancia.....	23
Figura 3.17. Curva característica I - V en función de la temperatura.....	24
Figura 3.18. Anemómetro de recorrido	31
Figura 3.19. Elementos de la torre.....	33
Figura 3.20. Elementos del aerogenerador.	33
Figura 3.21. Funcionamiento del aerogenerador.	34
Figura 3.22. Coeficiente de potencia de un aerogenerador.	35
Figura 3.23. Potencia de un aerogenerador.	35
Figura 3.24. Rendimiento aerodinámico de varios aerogeneradores.....	36
Figura 3.25. Orientación en sotavento.	37
Figura 3.26. Orientación en barlovento.	37
Figura 3.27. Flujos alrededor de perfiles, alta y baja presión.....	38
Figura 3.28. Perfiles aerodinámicos.	38
Figura 3.29. Familias de perfiles aerodinámicos.	39
Figura 3.30. Sistema eólico conectado a la red.	40
Figura 3.31. Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia.	41



Figura 3.32. Cumplimiento para la operación de una microrred.	47
Figura 3.33. Funciones del sistema de control de una microrred.	47
Figura 3.34. Uso y configuraciones del Matlab.	51
Figura 3.35. Distribución de Weibull.	52
Figura 3.36. Función de confiabilidad de Weibull.	53
Figura 3.37. Función de tasa de falla de Weibull para varios valores de β	54
Figura 3.38. Variación de la densidad de probabilidad $f(t)$, tasa de fallos $\lambda(t)$ y la función acumulativa de fallos $F(t)$ en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma.	55
Figura 3.39. Tipos de histogramas.	56
Figura 4.1. Diagrama de flujo sistema eólico.	59
Figura 4.2. Diagrama de flujo sistema fotovoltaico.	60
Figura 4.3. Diagrama de flujo sistema híbrido.	61
Figura 4.4. Base de datos descargada de la central meteorológica.	62
Figura 4.5. Datos utilizados para el dimensionamiento del sistema híbrido.	62
Figura 4.6. Rosa de los vientos enero 2020.	63
Figura 5.1. Lugar de emplazamiento.	65
Figura 5.2. Rosa de los vientos dirección de donde proviene el viento.	66
Figura 5.3. Rosa de los vientos dirección hacia donde se dirige el viento.	66
Figura 5.4. Frecuencia absoluta.	71
Figura 5.5. Frecuencia acumulada.	72
Figura 5.6. Frecuencia relativa.	73
Figura 5.7. Distribución de Weibull.	73
Figura 5.8. Potencial eólico con respecto a la velocidad del viento.	74
Figura 5.9. Potencia del sistema eólico por mes.	75
Figura 5.10. Curva característica del aerogenerador Enair 70 PRO.	77
Figura 5.11. Curvas características del comportamiento del aerogenerador.	79
Figura 5.12. Velocidad del viento vs potencia.	79
Figura 5.13. Gráfica de dispersión del sistema eólico.	80
Figura 5.14. Generación del parque eólico por mes.	81
Figura 5.15. Zona seleccionada para el sistema fotovoltaico.	82
Figura 5.16. Descarga de los datos para comparación con la base de datos obtenida de la central meteorológica.	82



Figura 5.17. Niveles de irradiancia en la zona.	83
Figura 5.18. Niveles de temperatura en la ubicación.	84
Figura 5.19. Ángulo de inclinación PVsyst.	86
Figura 5.20. Eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas a lo largo del tiempo.	89
Figura 5.21. Esquema para el número de paneles.	91
Figura 5.22. Separación de los paneles solares respecto al suelo.	93
Figura 5.23. Energía producida vs energía inyectada del sistema fotovoltaico.	94
Figura 5.24. Voltaje vs corriente del panel fotovoltaico.	95
Figura 5.25. Voltaje vs potencia del panel fotovoltaico.	95
Figura 5.26. Voltaje y corriente del panel fotovoltaico.	96
Figura 5.27. Voltaje y potencia del panel fotovoltaico.	96
Figura 5.28. Gráfica de dispersión del sistema fotovoltaico.	97
Figura 5.29. Sistema híbrido solar - eólico en HOMER PRO.	97
Figura 5.30. Perfil de la demanda.	98
Figura 5.31. Generación de energía del sistema híbrido.	99
Figura 5.32. Generación fotovoltaica.	99
Figura 5.33. Potencia de salida del sistema fotovoltaica.	99
Figura 5.34. Generación eólica.	100
Figura 5.35. Potencia de salida del sistema eólico.	100
Figura 5.36. Producción máxima de energía renovable mensual.	101
Figura 5.37. Producción mínima de energía renovable mensual.	101
Figura 5.38. Estudios para la conexión de sistemas híbridos a la red.	102
Figura 5.39. Pruebas y certificación para la conexión de sistemas híbridos a la red.	102
Figura 5.40. Requisitos para el control de la potencia activa y reactiva.	103
Figura 5.41. Diagrama unifilar de un sistema híbrido solar - eólico.	103
Figura 5.42. Eficiencia energética en diferentes porcentajes.	107
Figura 5.43. Periodo de retorno del proyecto.	108
Figura 5.44. Perfil de VAN y TIR.	108



ÍNDICE DE ANEXOS

Figura A 1. Base de datos 1 de enero del 2020	115
Figura A 2. Base de datos 31 de diciembre del 2020	116
Figura B 1. Frecuencia de distribución obtenida en WRPLOT.....	116
Figura B 2. Código matemático para depurar los datos en Matlab	117
Figura B 3. Código matemático para el análisis del viento	117
Figura B 4. Código matemático para encontrar los parámetros c y k	118
Figura B 5. Código matemático para la obtención de la gráfica de Weibull.....	118
Figura B 6. Código matemático para la obtención de la gráfica de la energía mensual	119
Figura B 7. Ficha técnica del aerogenerador Enair 70 Pro	120
Figura C 1. Comportamiento del sol en la zona y las curvas de perdida por el efecto sombra	121
Figura C 2. Producción normalizada por kWp instalado.....	121
Figura C 3. Diagrama de pérdidas del sistema	122
Figura C 4. Diagrama de salida y entrada del sistema fotovoltaico	123
Figura C 5. Gráfica de la distribución de potencia de salida del sistema fotovoltaico.....	123
Figura C 6. Descripción del panel solar	124
Figura C 7. Ficha técnica del panel solar.....	125
Figura D 1. Potencia de salida fotovoltaica.....	126
Figura D 2. Perfil solar mensual del sistema híbrido	126
Figura D 3. Perfil eólico mensual del sistema híbrido	127
Figura D 4. Perfil diario de producción de energía renovable total del sistema.....	127
Figura D 5. Histograma solar del sistema híbrido	128
Figura D 6. Histograma eólico del sistema híbrido	128
Figura D 7. Curva de la duración solar del sistema híbrido	129
Figura D 8. Curva de duración eólica del sistema híbrido	129
Figura E 1. Tabla de la tasa de interés	130



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TEMA: “SIMULACIÓN EN HOMER DE UN SISTEMA ELÉCTRICO HÍBRIDO SOLAR – EÓLICO EN LA PARROQUIA LASSO DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI”

Autores:

López Bautista Edison Xavier

Núñez Aldaz Diego Fabricio

Tutor:

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó un análisis de 8 784 datos brindados por el Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi mediante el cual se simuló un sistema híbrido solar - eólico el cual fue dimensionado mediante Matlab Ra 2020 y PVsyst 7.2 para luego ser comparado con el simulador Homer Pro 3.14.2. Para el análisis del sistema eólico, se utilizó dos simuladores (WROPlot 8.0.2 y Matlab Ra 2020), el primero indica la rosa de los vientos la cual muestra la dirección en la que se dirige el viento, con Matlab Ra 2020, se analizó la distribución de Weibull para conocer con qué frecuencia se repite una velocidad del viento en una hora determinada, además, de conocer la cantidad de energía eléctrica existente en la zona con un valor de 884 [kWh/año] y distancias en las que se ubica un aerogenerador del otro. Mediante el simulador PVsyst 7.2, se dimensionó el sistema fotovoltaico para esta simulación fue necesario conocer el ángulo de azimut el cual hace referencia a la inclinación de los paneles fotovoltaicos. Con la ayuda del simulador se obtuvo 26 paneles en serie y 345 paneles en paralelo que tendrá el parque fotovoltaico, así como también las diferentes distancias a las cuales se ubica cada uno y una cantidad de energía eléctrica de 6 [GWh/año] que llega a generarse en el sector. El simulador Homer Pro 3.14.2, se determinó la energía eléctrica que suministra el sistema híbrido solar – eólico con una cantidad de 6 126 060 [kWh/año], se compara los datos obtenidos de los distintos sistemas simulados y se aprecia que tienen similitud con respecto a los resultados obtenidos en el simulador. Finalmente, se realizó la evaluación técnica económica con el fin de determinar el valor de la inversión inicial que es de \$ 3 655 570,61 que se necesitara para construir la planta híbrida solar – eólica, así como también identificar los parámetros VAN con una cantidad de \$1 974 045,15, TIR con un valor de 17,39% y un periodo de retorno de la inversión inicial en el año 7, además, de realizar un cuadro resumen en el cual consta los resultados emitidos por cada una de las simulaciones.

Palabras Claves: Frecuencia, Radiación Solar, Velocidad del Viento, Sistema Híbrido, Panel Solar, Aerogenerador, Distribución de Weibull, Ángulo de Azimut, Potencia, Energía.



TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TOPIC: “A HYBRID SOLAR-WIND ELECTRICAL SYSTEM HOMER SIMULATION IN LASSO PARISH FROM COTOPAXI PROVINCE”.

Authors:

López Bautista Edison Xavier

Núñez Aldaz Diego Fabricio

Tutor:

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc.

ABSTRACT

Within present research work was made a 8,784 analysis provided data by the Cotopaxi Higher Technological Institute, through which were simulated a hybrid solar-wind system, whose was dimensioned by using Matlab Ra 2020 and PVsyst 7.2, for later, it is compared with the Homer Pro 3.14.2 simulator. For wind system analysis was used two simulators (WROPLOTT 8.0.2 and Matlab Ra 2020), the first one indicates the wind rose, what shows the direction, which is directed the wind, with Matlab Ra 2020, it was analyzed the Weibull distribution to find out how often a wind speed is repeated into a given hour, further, knowing the existing electricity amount into area with an 884 [kWh/year] value and distances, what it is located one wind turbine from the other. Through the PVsyst 7.2 simulator was dimensioned the photovoltaic system for this simulation, it was necessary to know the azimuth angle, which refers to the photovoltaic panels inclination. With the simulator help was got 26 panels in series and 345 panels into parallel, what will have were got the photovoltaic park, as well as, the different distances, which is located each one and an 6 [GWh/year] electrical energy amount, what arrives to be generated into sector. The Homer Pro 3.14.2 simulator determined the electrical energy supplied by the solar-wind hybrid system with an 6,126,060 [kWh/year] amount, the got data from different simulated systems are compared and it is appreciated, which they have similarity with respect to the got results in the simulator. Finally, it was made the economic technical assessment, in order to determine the initial investment value, what is \$3,655,570.61 that was needed to build the hybrid solar-wind plant, as well as, to identify the NPV parameters with an \$1,974,045.15, IRR amount with a 17.39% value and a initial investment return period in the 7 year, further to make a summary table, which issued the results by each of simulations.

Keywords: Frequency, Solar Radiation, Wind Speed, Hybrid System, Solar Panel, Wind Turbine, Weibull Distribution, Azimuth Angle, Power, Energy.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de titulación cuyo título versa: **“SIMULACIÓN EN HOMER DE UN SISTEMA ELÉCTRICO HÍBRIDO SOLAR - EÓLICO EN LA PARROQUIA LASSO DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI”** presentado por: **LÓPEZ BAUTISTA EDISON XAVIER** y **NÚÑEZ ALDAZ DIEGO FABRICIO**, estudiantes de la Carrera de **Ingeniería Eléctrica** perteneciente a la facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, marzo 2022

Atentamente,


 **CENTRO DE IDIOMAS**

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502666514

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título: SIMULACIÓN EN HOMER DE UN SISTEMA ELÉCTRICO HÍBRIDO SOLAR - EÓLICO EN LA PARROQUIA LASSO DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI.

Fecha de inicio: octubre 2021

Fecha de finalización: marzo 2022

Lugar de ejecución: Parroquia Lasso

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Ingeniería en Electricidad.

Proyecto Macro Asociado: Desarrollo de sistemas para el abastecimiento y uso del servicio de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de Trabajo:

Tutor de Titulación:

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc.

Estudiantes:

López Bautista Edison Xavier

Núñez Aldaz Diego Fabricio

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublínea de investigación:

Inteligencia artificial y modelación de sistemas.

2 INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como finalidad determinar el sistema híbrido solar - eólico a través de un programa de simulación, para evaluar los recursos energéticos disponibles en el lugar de estudio y así analizar la energía que brinda el sistema híbrido, que se presenta en esta tesis, esto con el fin de generar energía eléctrica limpia y eficiente.

En los últimos tiempos, se ha observado el cambio de la matriz energética en lo que respecta el uso de centrales convencionales a la utilización de energías renovables no convencionales, para esto, se tiene los sistemas híbridos que han contribuido a la producción de energía eléctrica, se reduce el uso de fuentes de generación, por lo que el tema propuesto toma importancia a través de recursos inagotables que poseen ciertas zonas del país.

Las fuentes de energía renovables, como la solar y la eólica, tienen un impacto positivo en el medio ambiente durante el proceso de generación de energía. La integración de fuentes requiere inversión y serían analizadas para obtener resultados económicos aceptables respecto a la inversión de la tecnología implantada, razón por la cual, se utiliza Homer Pro 3.14.2.

El caso de estudio de las energías no convencionales a analizar para esta simulación y conocer su viabilidad son la solar y eólica, las cuales, se encuentran en la zona donde se ejecutará el estudio, se usarán programas de simulación basados en investigaciones previas para la comparación con los resultados.

Los programas computacionales utilizados para este estudio son Homer Pro 3.14.2, Matlab Ra 2020 y PVsyst 7.2, estos permiten el dimensionamiento de este sistema, también, serían considerados los ocho mil setecientos ochenta y cuatro datos recolectados en todo el año dos mil veinte, de los recursos energéticos que fueron otorgados por el Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi ubicada en el sector. Por otra parte, los sistemas híbridos para la producción de energía eléctrica son utilizados debido a su funcionamiento, tienen la ventaja de aprovechar dos fuentes de alimentación energética (sol y viento), dichos sistemas combinan estas energías y generar electricidad.

El presente modelo, se utilizó para el tamaño y la evaluación de un sistema híbrido solar - eólico, basado en las condiciones climáticas del sector de Lasso provincia de Cotopaxi.

2.1 EL PROBLEMA

2.2 SITUACIÓN PROBLÉMICA

La mayoría de países han desarrollado proyectos de generación de energías renovables por los beneficios que brindan debido a que es una generación de energía limpia y se integra en los sectores residenciales que no tengan acceso a la red. América Latina y el Caribe es una región con un gran potencial de energías renovables. Sin embargo, existen limitaciones en el acceso a la electricidad, por lo que un sistema híbrido es una alternativa para incrementar el suministro de energía a nuevas poblaciones de manera sostenible. En el Ecuador existen entidades energéticas que son encargadas de controlar y regular el servicio eléctrico nacional, dichas entidades son: Arconel y Ministerio de Electricidad y Energía Renovable las cuales son entidades que garantizan la eficiencia energética.

La generación de energía eléctrica mediante energías renovables no convencionales hoy en día avanza de manera rápida, se requiere tener conocimiento de los sistemas híbridos solar - eólico que aprovechan este tipo de energías. Por otro lado, la contaminación ambiental en el mundo cada día incrementa debido a factores como, la emisión de gases tóxicos provocados por la generación térmica y la explotación de recursos no renovables, esto sucede porque existe un déficit de generación de energía eléctrica limpia.

Cada año, se presenta varios cambios climáticos bruscos en todas las regiones del país (fuertes lluvias, cambio de clima), esto, se debería al calentamiento global que afecta de manera directa a la economía y a la matriz energética del País.

El desconocimiento del aprovechamiento para utilizar la energía solar y eólica en la zona hace posible el interés por el uso de energías alternativas que son catalogadas como inagotables, las cuales, se las utilizaría para generar energía eléctrica no contaminante. Para este sistema híbrido los parámetros, que se van a utilizar son la radiación solar y la velocidad del viento, estos son registrados en una base de datos otorgada por el Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi ubicado en la zona.

En la provincia de Cotopaxi aún, se requiere desarrollar una implementación con tecnológicas y capacidades técnicas, que se ajusten a un esfuerzo mancomunado para reemplazar la generación de energías basadas en combustibles fósiles que son causantes de emisiones de CO₂, por tecnologías limpias que puedan minimizar la dependencia del petróleo.

En el presente tema de investigación, se realiza una simulación mediante Homer Pro 3.14.2, para conocer la energía generada por el sistema híbrido solar - eólico en el sector de Lasso de la provincia de Cotopaxi. Las condiciones climáticas previamente investigadas hacen posible la utilización de la radiación solar y la velocidad del viento para desarrollar el sistema híbrido mediante la simulación computarizada en el simulador antes mencionado, indica si el sistema híbrido implementado es el adecuado, muestra así una alternativa de generación de electricidad en este sector.

2.2.1 Formulación del problema

Determinación del modelo adecuado en función de los parámetros de radiación solar y velocidad del viento con respecto a la cantidad de energía eléctrica que estos parámetros generan mediante un sistema eléctrico híbrido solar - eólico en el sector de Lasso.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto

Sistema Híbrido Solar - Eólico.

2.3.2 Campo de Acción

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctrica / 330699 Aprovechamiento de Energía Renovables.

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directos

Los 2 estudiantes que realizan el siguiente tema de tesis para obtener su título y los 271 habitantes del sector de Lasso dato obtenido GAD Tanicuchi.

2.4.2 Indirectos

409 205 Habitantes de la Provincia de Cotopaxi, dato obtenido del censo realizado por el INEC en el 2010.

2.5 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la presente investigación toma importancia debido a que existe un impacto ambiental por la generación de energía eléctrica con recursos no renovables. La producción de

energía eléctrica por medio de energías renovables no convencionales, se presenta como una opción ecológica, por lo que se reduciría el consumo de energías convencionales que son dependientes de recursos fósiles con esto, se pretende mitigar la contaminación ambiental.

Ante la confiabilidad de los datos medidos por estaciones meteorológicas y debido a la orientación geográfica del Ecuador, hacen, que se convierta en un país privilegiado en recurso solar, debido al ángulo de incidencia de la luz perpendicular durante todo el año, muestra un alto grado de eficiencia en el estudio de los sistemas fotovoltaicos, por otro lado, el recurso eólico en el Ecuador posee baja incidencia, las velocidades de los vientos no son constantes es decir tiene poca generación.

La implementación de generación a través de recursos inagotables toma importancia desde el ámbito de interés social debido a que ayuda a reducir el calentamiento global. En la actualidad existen varias investigaciones que presentan estudios sobre los sistemas híbridos solar - eólico los cuales hacen, que se entienda de manera eficiente el funcionamiento de estos, se usa parámetros de radiación solar, velocidad del viento y en función de una área determinada, se realizará el análisis de los datos otorgados por el Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi, mediante Homer Pro 3.14.2, lo que identificará la energía que llegaría a generar el sistema híbrido expuesto en la presente investigación.

Es por ello que resulta de interés científico y técnico aprovechar el recurso energético que posee ciertas zonas del país lo que permitirá determinar la cantidad de energía eléctrica anual que produzca la planta híbrida solar - eólica la cual, se destinaría a la generación de energía eléctrica en el Ecuador.

Se realizará diferentes simulaciones con el fin de dimensionar el sistema híbrido, los datos obtenidos en las simulaciones serán validados con la comparación de los resultados en Homer Pro 3.14.2, además, de un análisis económico que permitirá determinar la inversión económica de la planta híbrida solar - eólica.

2.6 HIPÓTESIS

Los parámetros de radiación solar, velocidad del viento y en función del área determinada existente en el sector permitirá el diseño de una planta híbrida solar - eólica en Lasso.

2.7 OBJETIVOS

2.7.1 General

Determinar el recurso energético mediante un sistema eléctrico híbrido solar - eólico con relación a los parámetros de radiación solar y velocidades del viento en el sector de Lasso de la Provincia de Cotopaxi.

2.7.2 Específicos

- Revisar el estado del arte de sistemas híbridos solar- eólico para la determinación del recurso energético disponible en el sector.
- Dimensionar los parámetros y características de la planta híbrida solar - eólica mediante, Matlab Ra 2020, PVSyst 7.2. y Homer Pro 3.14.2.
- Analizar los parámetros y características obtenidos en las diferentes simulaciones para la planta híbrida solar – eólica.
- Realizar la evaluación técnica - económica de la inversión inicial para la planta híbrida solar - eólica.

2.8 SISTEMAS DE TAREAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 1.

Objetivo específico 1	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Revisar el estado del arte de sistemas híbridos solar - eólico para la determinación del recurso energético disponible en el sector.	-Búsqueda de información con respecto a los sistemas híbridos. -Investigación con respecto a los parámetros de funcionamiento de los sistemas solares y eólicos -Exploración sobre el dimensionamiento del sistema híbrido solar - eólico.	-Conocimiento sobre los parámetros, funcionamiento y dimensionamiento de los sistema solar, eólico e híbrido.	-Navegadores, Tesis, Libros, Artículos, Revistas, Monografías.

Tabla 2.2. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 2.

Objetivo específico 2	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Dimensionar los parámetros y características de la planta híbrida solar - eólica mediante, Matlab Ra 2020 y PVSyst 7.2 y Homer 3.14.2.	<ul style="list-style-type: none"> - Representación de la rosa de los vientos. - Elaboración de la distribución de Weibull. - Determinación del ángulo de Azimut. - Identificación de las distintas radiaciones solares. - Diagrama de flujo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Comportamiento de la dirección del viento. -Distintas velocidades del viento en un intervalo de tiempo. -Obtención del ángulo de inclinación del panel fotovoltaico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Base de datos otorgada por el Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi. -WORPLOT 8.0.2. -Matlab Ra 2020 - Ecuaciones - PVSyst 7.2 -HOMER Pro 3.14.2.

Tabla 2.3. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 3.

Objetivo específico 3	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Analizar los parámetros y características obtenidos en las diferentes simulaciones para la planta híbrida solar - eólica	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo del factor de planta. - Simulación del sistema fotovoltaico, eólico e híbrido. - Comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones de los distintos sistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Energía generada por el sistema eólico, fotovoltaico e híbrido. - Factor de planta de cada uno de los sistemas. - Cuadro resumen de los datos obtenidos. 	<ul style="list-style-type: none"> -HOMER Pro 3.14.2. -Matlab Ra 2020 - PVSyst 7.2 -Ecuaciones

Tabla 2.4. Sistema de tareas en relación con el objetivo específico 4.

Objetivo específico 4	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar la evaluación técnica - económica de la inversión inicial para la planta híbrida solar - eólica	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de los costos de instalación de cada uno de los sistemas. - Determinación del precio de la energía y los costos de mantenimiento y operación. - Cálculo de la inversión inicial, VAN, TIR y PRI. 	-Informe del sistema híbrido solar - eólico acorde a la evaluación económica.	-Herramientas de cálculo.

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ANTECEDENTES

En la investigación realizada en el año 2013 - 2014 titulado “Diseño de un sistema autónomo de generación eléctrica híbrido solar - eólico para electrificación domiciliaria” El proyecto posee un estudio en él, que se determina los parámetros de densidad de probabilidad de Weibull, y la interpretación de datos para predecir el comportamiento de la velocidad del viento durante un período de tiempo específico y así determinar el área de fuerza del viento disponible en el lugar de estudio, así como también, se analizan los datos de la radiación solar que fueron tomados, del Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica del Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) [1].

Otro antecedente de investigación es el realizado por los autores Esmail M. A. Mokheimer, M. A. Habib, Abdullah Al-Sharafi y Iyad Alzaharnah con el tema “A New Study for Hybrid PV/Wind off-Grid Power Generation Systems with the Comparison of Results from Homer” Este artículo presenta el desarrollo de un modelo informático para optimizar el tamaño del sistema de generación de energía solar - eólica híbrida fuera de la red. También, presenta un modelo matemático, que incluye el desarrollo de un modelo para generadores diésel como alternativa al almacenamiento en baterías. Además, se desarrolla un código de simulación que utiliza MATLAB para resolver modelos matemáticos y simular el rendimiento de sistemas

híbridos con diferentes configuraciones para el análisis de rendimiento y con fines de dimensionamiento óptimo [2].

Un proyecto de tesis doctoral realizado por el autor William Paul Arévalo Cordero en el año 2021 titulado “Optimización en dimensionamiento y control energético de sistemas híbridos de energías renovables en Ecuador” el cual analiza el impacto de sistemas híbridos renovables (HRES) compuesto por energía fotovoltaica (PV), turbinas hidro cinéticas (HKT), turbinas eólicas (WT), baterías y gasificadores de biomasa (GB) con la finalidad de determinar la factibilidad de sistemas híbridos compuestos por energías renovables, su optimización y control energético en el Ecuador [3].

En este proyecto los autores O.C.N. Souto, S.B. Silva, D.M. de Souza, J.S. Amara y G.P. Viajante publicado en el año 2018 titulado “Economic Analysis for Brazil Residential Consumers Considering the Time-of-use Tariffs and Demand Side Management of Electricity Using HOMER PRO Energy” utilizó el programa informático HOMER Pro Energy para evaluar el desempeño técnico y económico de las instalaciones eléctricas con sistemas de generación distribuida conectados a la red, se considera los diferentes tipos de tarifas, diferentes tipos de generación, así como la curva de carga de la unidad de consumidor [4].

3.2 PARROQUIA LASSO

La parroquia de Lasso, se encuentra en la Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, la ubicación geográfica es 0° 45' 11" Sur y 78° 36' 27" Oeste, se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 3 038 m. Está ubicada en el sector oriental de la parroquia, con los siguientes límites; al norte, Río Blanco Alto; sur, Sector La Playa; oriente, Río Cutuchi, al occidente, Río Blanco Alto y Bajo. Cuenta con un número aproximado de 271 habitantes, el número de familias es 150, dedicadas principalmente al comercio y la industria, es uno de los barrios más progresistas de la Parroquia de Tanicuchi.

En la parroquia Lasso los servicios, que se encontraría son: un retén policial y un moderno edificio para el cuerpo de bomberos de la zona esto con la finalidad de dar protección y mayor seguridad a los habitantes e industrias de la zona, se encuentra, un Sub Centro de Salud equipado. Lasso se considera un sector agrícola, ganadero, industrial y comercial cuenta con una serie de industrias entre las más importantes de la zona, se encontraría Maderas Cotopaxi, Parmalat, Familia del Ecuador, Navacero S.A, entre otros.

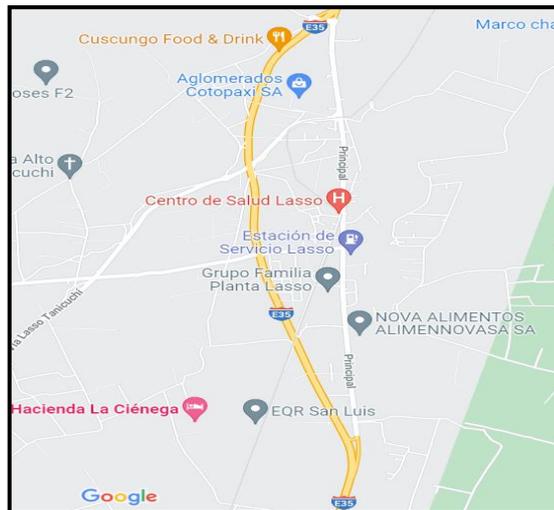


Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio [5].

En la Figura 3.1 muestra la ubicación en Google Maps donde, se encuentra la parroquia de Lasso, se identifica que en la zona existe variedad de industrias, como herramienta fundamental del funcionamiento de las mismas tienen a la energía eléctrica, es por ello, que se desarrolla la presente investigación, se ve en la necesidad de realizar un estudio de energías renovables no convencionales de los recursos energéticos que existiría en la zona de estudio y de esta forma generar electricidad.

A través de una base de datos obtenida por parte de una central meteorológica, se pudo identificar en gran proporción que con los recursos existentes en la zona se obtendría energía a través de la radiación solar y la velocidad del viento el cual dio la parte fundamental para poderlo analizar como un sistema híbrido solar - eólico para así lograr generar electricidad de una forma no convencional y con otro tipo de energías que no sea la hidráulica.

3.3 SISTEMAS HÍBRIDOS

Un sistema híbrido para la generación de energía, se definiría como una combinación de dos o más fuentes de energía con la generación de energía como objetivo básico, utilizada para cargas específicas que están aisladas de la red o integradas en el sistema. La Figura 3.2 muestra una combinación de dos o más fuentes de energía. Los sistemas híbridos tienen la capacidad de suministrar energía a sistemas aislados o conectados a la red, estos últimos, se tendría o no la capacidad de inyectar energía a la red [1].

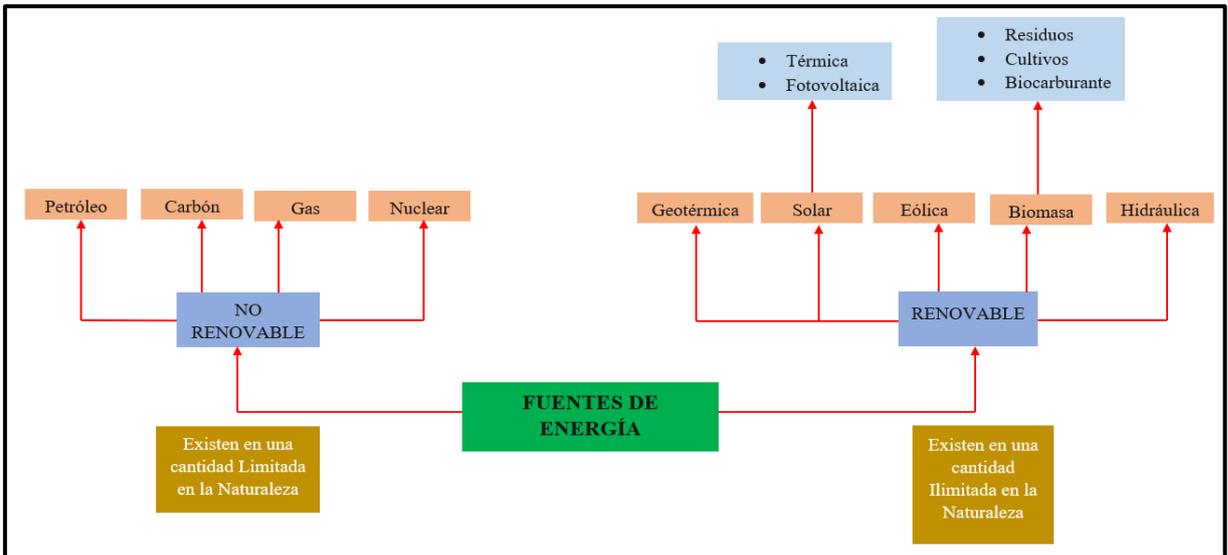


Figura 3.2. Tipos de fuentes energéticas renovables y no renovables [1].

3.3.1 Tipos de sistemas híbridos

La Figura 3.3 muestra los principales sistemas híbridos:

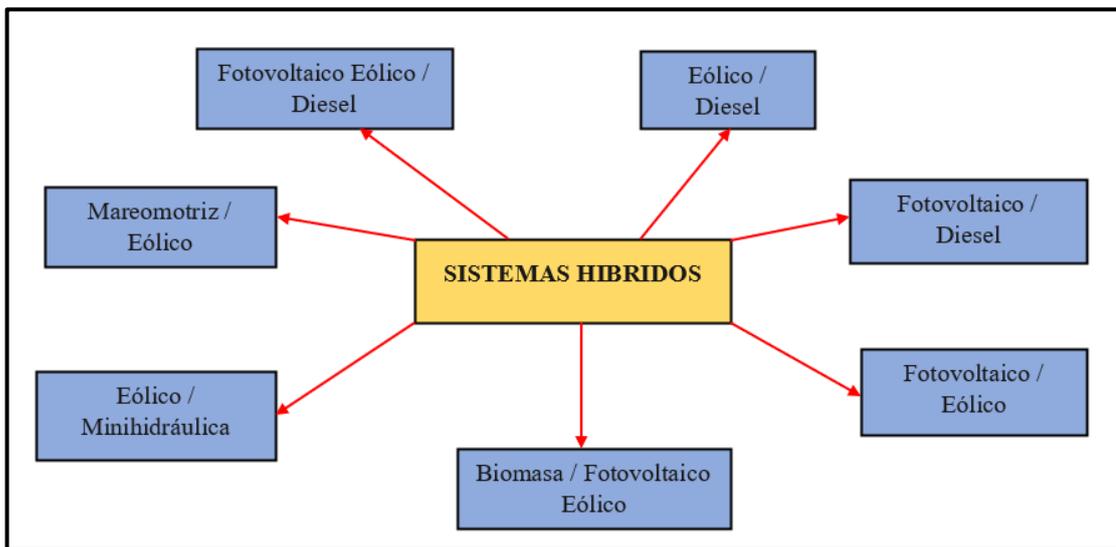


Figura 3.3. Tipo de sistemas híbridos [5].

A continuación, en la Figura 3.4 se apreciará las diferentes combinaciones más comunes de los sistemas híbridos que utilizan fuentes renovables.

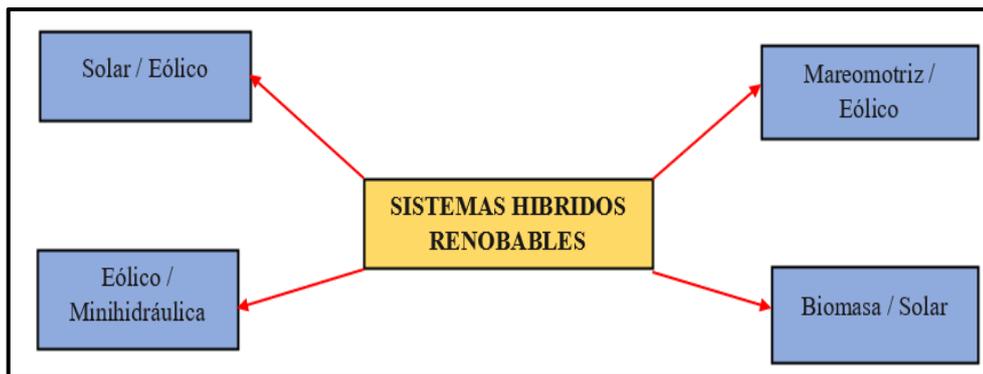
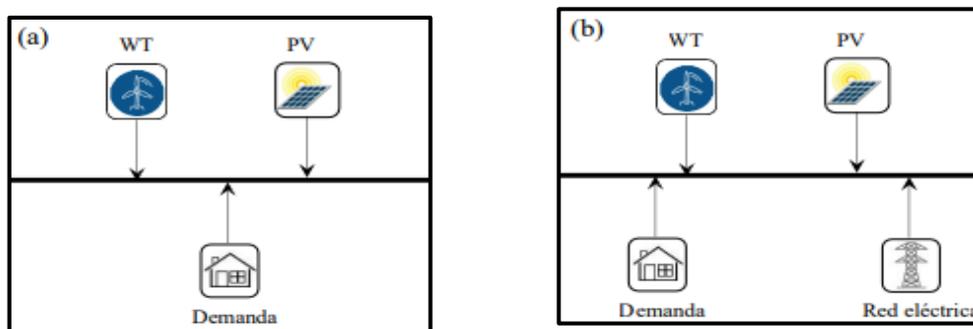


Figura 3.4. Sistemas híbridos renovables

La combinación de fuentes de energía dependerá de los recursos que brinde el área en estudio, y su conexión dependerá de la ubicación de la red, el nivel de voltaje y la distancia que la separa del sistema que proporciona la energía eléctrica. La base para decidir si la configuración se ajusta a la red eléctrica dependerá de factores económicos, sociales, ambientales y geográficos [6].

3.4 SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO – EÓLICO (PV - WT)

Al combinar un sistema fotovoltaico y eólico, la integración en un sistema renovable, se incrementa considerablemente, la radiación solar y velocidad del viento, se complementan, durante el día, el sistema fotovoltaico producirá electricidad depende del recurso existente, mientras que el viento durante la noche adquiere mayores velocidades. A pesar de que son dos tecnologías suficientemente maduras, al combinarlas, se produce inestabilidad entre oferta y demanda debido a la intermitencia, sobre todo en sistemas aislados en la Figura 3.5 en el apartado (a) se muestra un esquema sin conexión a la red mientras que en el apartado (b) se visualiza un esquema híbrido renovable conectado a la red [3].



(a) Fuera de la red

(b) Conectado a la red

Figura 3.5. Sistema híbrido renovable PV - WT típico [4].

3.5 PARÁMETROS DEL SISTEMA SOLAR - EÓLICO

3.5.1 Parámetros del sistema solar

3.5.1.1 El sol

Debido a la fusión de átomos de deuterio que producen átomos de helio, el sol es una fuente inagotable de energía. Sorprendentemente, la cantidad de radiación solar en solo un segundo es mayor que la energía consumida por los humanos en toda su historia. Parte de toda esta energía llega a la tierra en forma de radiación electromagnética, compuesta por rayos de diferentes longitudes de onda, que se propagan a una velocidad de 3×10^8 Km / s; la otra parte, se irradia fuera de la atmósfera con una potencia de $1,73 \times 10^8$ kW como se observa en la Figura 3.6 [7].

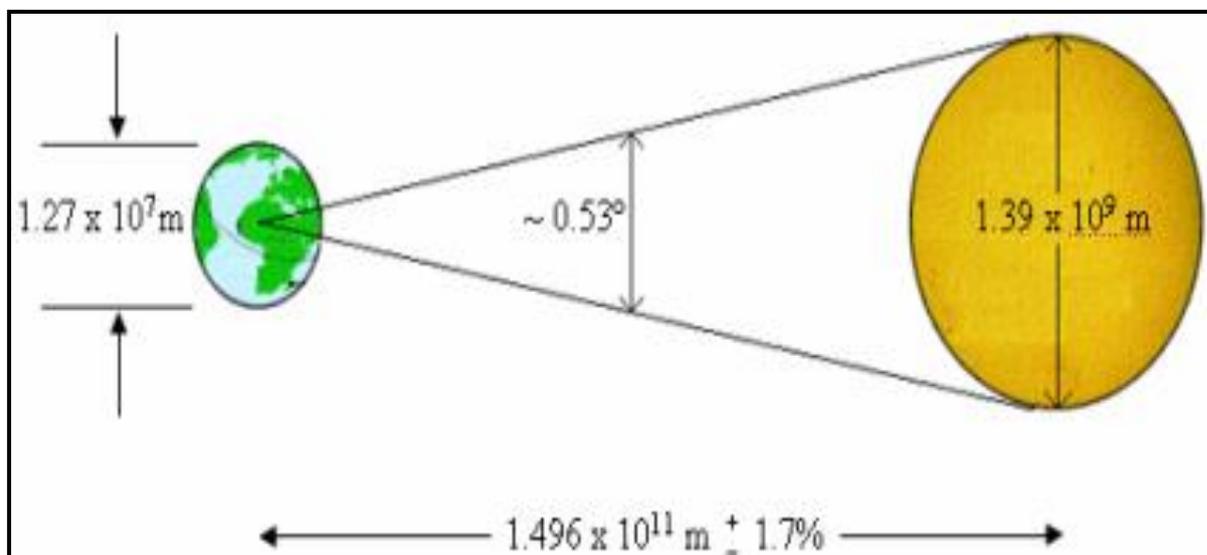


Figura 3.6. Características físicas del sol [7].

3.5.1.2 Radiación solar

La radiación solar es el flujo de energía que recogemos del sol en forma de ondas electromagnéticas de distintas frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). La fusión nuclear ocurre en el Sol. En la superficie del Sol, el hidrógeno, se convierte en helio a una temperatura de 5 000 a 5 800 grados C. en cuanto llegue a la tierra, este calor, se utilizará con una energía de aproximadamente $1\,365$ W / m².

La energía solar cruza por distintas capas de la atmósfera y está expuesta a diferentes fenómenos (absorción, reflexión y refracción), llega a la superficie de la tierra de manera efectiva entre 100 y 400 W / m² como se aprecia en la Figura 3.7.

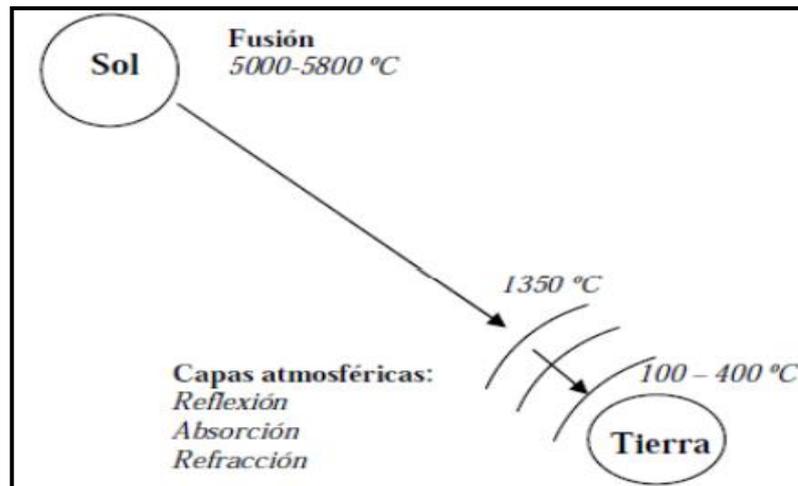


Figura 3.7. Radiación solar [7].

La energía solar que alcanza a la superficie de la tierra es bastante irregular. No solo cambia la cantidad máxima de luz solar cada día, sino, también, la radiación solar, que se atenúa según la composición instantánea de la atmósfera que la atraviesa. Por lo tanto, el 47 % de la incidencia de la luz llega a la superficie de la tierra, el 31 % llega directamente a la superficie, el 16 % llega después de ser dispersada por el polvo, el vapor de agua y las moléculas de aire. El 53 % restante de la energía se refleja en el espacio o es absorbida por la atmósfera [7].

3.5.1.3 Componentes de la radiación

Las diferentes composiciones de la atmósfera, como gases, nubes y sólidos en suspensión, degradan la radiación solar debido a los diferentes procesos de absorción, reflexión y refracción que sufre a su paso por la masa de aire.

3.5.1.4 Instrumentos de medición

La radiación, se produce de diferentes formas, por lo que es importante conocer el dispositivo que mide la radiación, ya sea global, directa o solar.

3.5.1.5 Piranómetro

Este es un dispositivo que mide la cantidad de radiación solar total. Es decir, consta de una serie de termocuplas que se difunden directa y difusamente en un plano horizontal de 180 grados, y al sentir un cambio de temperatura la placa metálica produce un cambio de voltaje proporcional a la radiación [8].

3.5.1.6 Heliógrafo

El propósito de esta herramienta es medir el tiempo de sol diario. Registra periodos de tiempo en los que la radiación solar directa supera el valor mínimo.

Funciona, se enfoca la radiación solar a través de una esfera de vidrio a modo de lente convergente, en una banda de escala horaria que, debido a la exposición a la radiación solar directa, se quema para formar líneas cuya longitud determina el número de horas de brillo del sol de la mañana.

3.5.1.7 Técnicas de medición y presentación de datos solarimétricos

La forma más común de presentar datos solarimétricos es medirlos como energía por unidad de área o radiación. Los datos, también, se obtendrían como potencia por unidad de área. Depende de la aplicación, las mediciones se toman mensualmente, diariamente y cada hora. A partir de análisis durante largos períodos de tiempo, se calcula un promedio o se construye un perfil, se combina mediciones durante un período de 10 minutos, una hora o un día, se verían varias formas de representar los datos en un gráfico de promedio mensual o diario, día promedio o típico [8].

3.5.2 Cálculo de irradiancia

Existe otro factor, además, de las condiciones atmosféricas que establece la radiación solar sobre un colector, y por tanto su radiación; es el movimiento aparente del sol a lo largo del día y durante todo el año. La Tierra describe el movimiento de traslación alrededor del sol en una trayectoria elíptica, se dice que la línea imaginaria que representa la trayectoria descrita es una elipse. En este movimiento, el eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de $23,5^\circ$, llamado inclinación, con la dirección perpendicular al plano de la elipse y varía entre $23,5^\circ$ en invierno a $23,5^\circ$ en verano como se muestra a continuación en la Figura 3.8 [7].

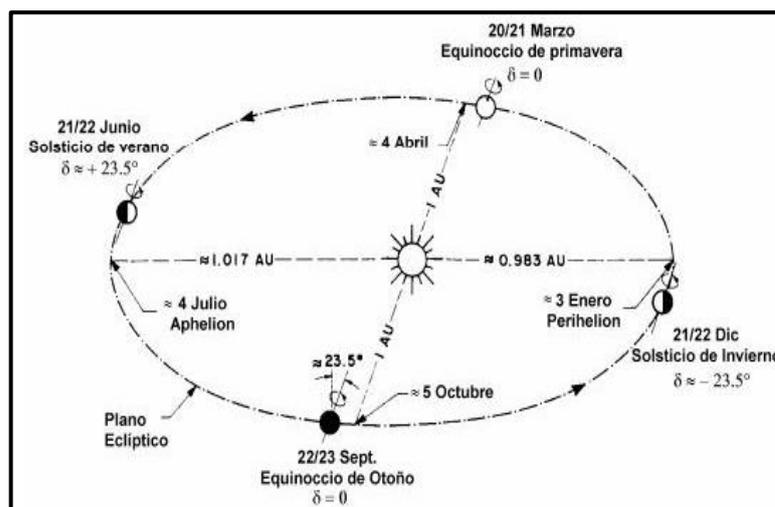


Figura 3.8. Movimiento de la tierra al rededor del sol [7].

La posición del sol es fundamental, determina la radiación solar en la superficie terrestre, este factor tiene importantes implicaciones para los cálculos posteriores de la irradiancia global. Para establecer la posición del sol, se utilizan dos técnicas de coordenadas centrados en el observador: coordenadas horarias y coordenadas horizontales.

3.5.3 Coordenadas horarias

Las coordenadas horarias son:

La declinación solar (δ_s). - La posición angular del sol al medio día solar en relación con el plano del Ecuador terrestre.

El ángulo horario solar (ω_s). - El desplazamiento angular del sol en el plano de la trayectoria del sol. El origen del ángulo horario es el mediodía solar y cada hora es igual a 15° .

El zenit, observado a continuación, se llama a la intersección entre la vertical del espectador y la esfera celeste. En otras palabras, si imagina una línea que atraviesa el centro de la Tierra y nuestra posición en su superficie, el zenit está en esa línea, por encima de nuestras cabezas. Es el lugar más alto del cielo. En cambio, el punto opuesto en diámetro a la esfera celeste en el zenit, se llama nadir como se observa en la Figura 3.9.

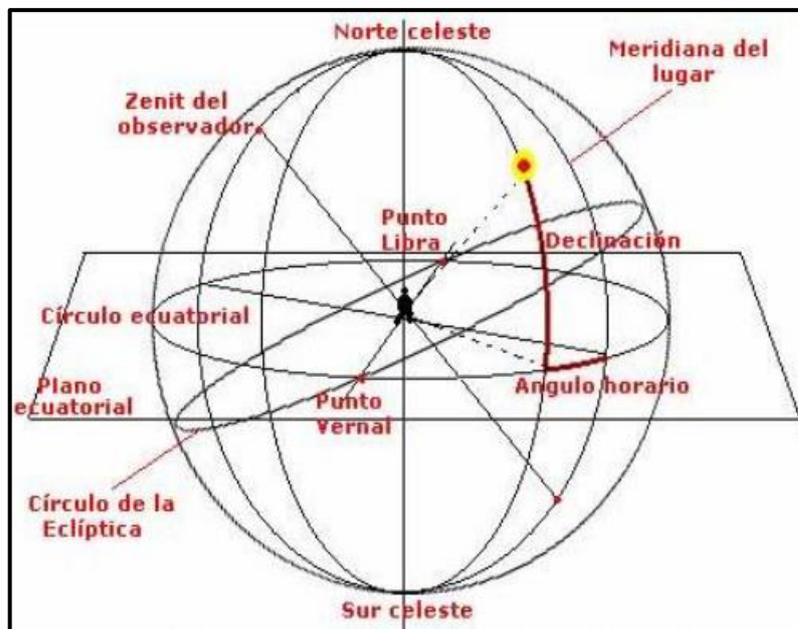


Figura 3.9. Coordenadas horarias [7].

Es fácil determinar las coordenadas horarias porque la inclinación depende solo del día del año y del ángulo horario. Para obtener estos dos valores, primero es necesario calcular la hora solar a partir de la Ecuación (3.1):

$$\text{Hora solar} = \text{Hora solar local} + 4 \left(\frac{\text{min}}{\circ} \right) (L_{\text{ref}} - L_{\text{loc}}) + \Delta t \quad (3.1)$$

Dónde:

L_{ref} = Longitud geográfica del meridiano de referencia ($^{\circ}$)

L_{loc} = Longitud del meridiano local ($^{\circ}$)

Debido a que el sol está delante y después del tiempo solar medio, se hace una corrección, se usa la ecuación (3.2) del tiempo:

$$\Delta t (\text{min}) = 9,87 \text{sen}^2 B - 7,53 \text{cos} B - 1,5 \text{sen} B \quad (3.2)$$

Donde:

Δt = Ecuación del tiempo [seg]

$$B(^{\circ}) = \frac{360(J - 81)}{364} \quad (3.3)$$

Donde

J = Corresponde al día juliano del año (1-365)

B= Ángulo, que se encuentra el sol [$^{\circ}$]

Después de conocer la hora solar, el ángulo horario, se calcula a través la Ecuación (3.4):

$$W_s = (\text{Hora solar} - 12 \text{ h} \times 15^{\circ}) \quad (3.4)$$

Donde:

W_s = Es el ángulo horario [$^{\circ}$]

El ángulo horario es negativo por la mañana y por la tarde es positivo. Para calcular la inclinación del sol, se utiliza la Ecuación (3.5):

$$\delta_s = 23,45 \times \text{sen} \left(360 \times \frac{284 + J}{365} \right) \quad (3.5)$$

Donde:

δ_s = Es el ángulo de inclinación del sol [$^{\circ}$]

J = Es el día juliano del año

3.5.3.1 Coordenadas horizontales

En la Figura 3.10 se muestra las coordenadas horizontales las cuales son:

La altura solar (hs). - El ángulo, se formó por la radiación solar directa y el plano del horizonte. El ángulo suplementario es el llamado cenital solar.

El azimut solar (δs). - El ángulo, se formó por radiación solar directa y el meridiano del observador. El origen del azimut es el sol del mediodía.

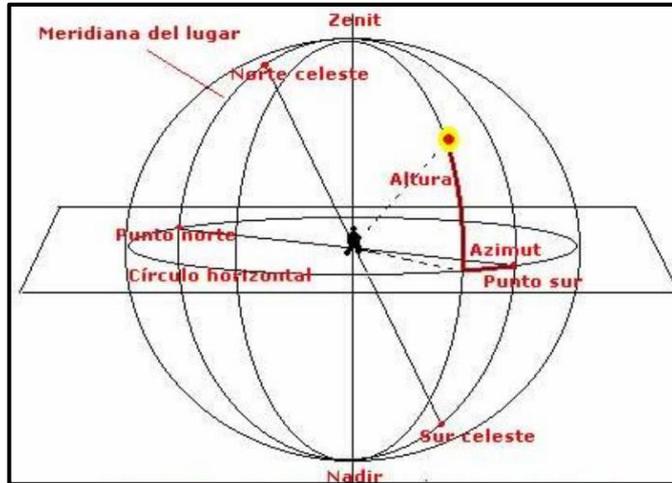


Figura 3.10. Coordenadas horizontales [7].

Para calcular las coordenadas horizontales, es necesario partir de las coordenadas de la hora, por lo que la altura del sol será (hs) mediante la Ecuación (3.6) [7].

$$\text{sen}(h_s) = \text{sen}\phi \times \text{sen}\delta_s + \text{cos}\phi \times \text{cos}\delta_s \times \text{cos}\omega_s \quad (3.6)$$

Donde:

h_s = Es la altura solar [Km]

δ_s = Es la declinación solar [°]

ϕ = Es la latitud del lugar [°]

ω_s = Es el azimut solar [°]

Para calcular la altura máxima del sol ($h_{s,max}$), al mediodía solar los ángulos de hora y azimut del sol son cero, $\omega_s = 0^\circ$ y $\delta_s = 0^\circ$, por lo tanto, se utiliza la Ecuación (3.7) y (3.8).

$$\text{sen}(h_s) = \text{sen}\phi \times \text{sen}\delta_s + \text{cos}\phi \times \text{cos}\delta_s \times \text{cos}\omega_s \quad (3.7)$$

$$h_{s,max} = 90^\circ - \phi + \delta_s \quad (3.8)$$

3.6 PANELES FOTOVOLTAICOS

En la Figura 3.11 muestra los paneles o también, llamados módulos fotovoltaicos son paneles que convierten la captación de la radiación solar en energía eléctrica. Cada uno de estos elementos llamados paneles consta de varias celdas fotovoltaicas. Los paneles fotovoltaicos están conectados entre sí en una (matriz) para generar grandes cantidades de energía eléctrica. Para posteriormente conectarse a la red o de manera independiente [9].



Figura 3.11. Paneles fotovoltaicos [8].

3.6.1 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Un sistema fotovoltaico conectado a la red tiene como finalidad generar electricidad en condiciones óptimas y adecuadas, esta generación sería inyectado a la red de suministro eléctrico para el beneficio de la población. La energía generada por el sistema, se consumirá parcialmente en el área circundante, y el exceso de energía, se inyectará a la red para su distribución a otros consumidores. Como, se muestra en la Figura 3.12 el sistema en cascada conectado a la red está compuesto básicamente por generadores fotovoltaicos [10].

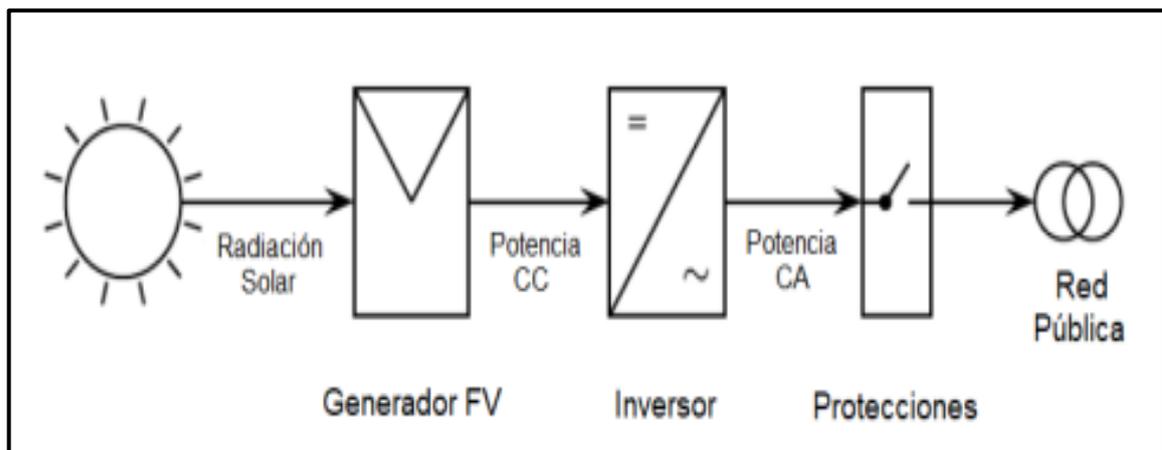


Figura 3.12. Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red [9].

Esencialmente, los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, se distribuyen o centralizan. La mayoría de los sistemas fotovoltaicos distribuidos que se utilizan en viviendas o edificios residenciales suelen instalarse en los mismo y proporcionaría energía a los clientes conectados a la red, estarán conectados a la red de distribución de bajo voltaje. Los sistemas fotovoltaicos centralizados tienden a tener mayor potencia que los sistemas distribuidos y suelen estar conectados a redes de distribución de media tensión o baja tensión en función de su capacidad. La mayoría de estos sistemas se instalan en el suelo, en lugares específicos adaptados para tal finalidad [11].

3.6.2 Parámetros característicos del panel fotovoltaico

El funcionamiento eléctrico de un módulo solar, se representaría mediante sus curvas características I - V y P - V con valores constantes de irradiancia y temperatura. El punto de operación de la batería está en la curva I - V, y la corriente suministrada por la batería y la resistencia del receptor imponen un valor de voltaje a través de la ley de Ohm según la Ecuación (3.9) [12].

$$V_L = I_L * R \quad (3.9)$$

En donde:

R: Resistencia en Ohmios [Ω]

I_L : Intensidad que suministra la célula fotovoltaica en Amperios [A]

V_L : Tensión en el receptor en Voltios [V]

La potencia de salida de la celda está representada por la curva P - V, se calcula con el uso de la Ecuación (3.10):

$$P_L = V_L * I_L \quad (3.10)$$

En donde:

P: Potencia que entrega la célula [W]

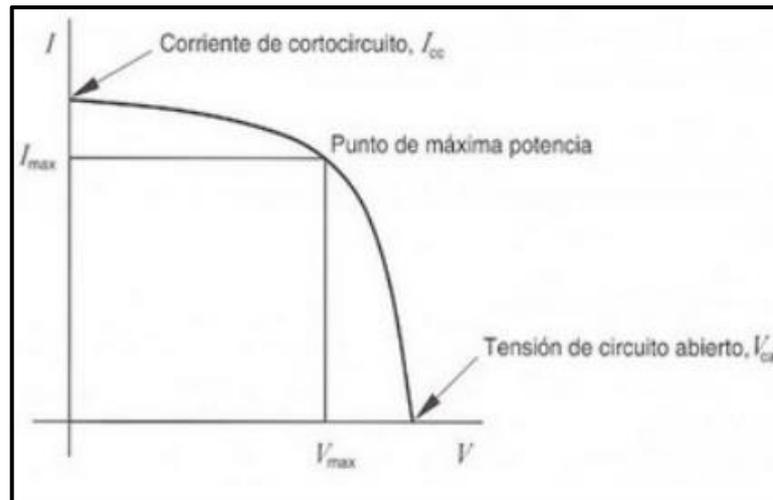


Figura 3.13. Curva característica I – V [11].

La Figura 3.13 muestra los parámetros característicos que definen los módulos fotovoltaicos que son los siguientes:

Corriente de cortocircuito (I_{cc}): Es la intensidad máxima producida en el módulo sin consumo de conexión, cortocircuito terminal.

Tensión de circuito abierto (V_{ca}): El voltaje máximo proporcionado por el panel si no hay consumo de energía y el terminal se deja a flote.

Punto de máxima potencia (I_{mp} , V_{mp}): Aquí es donde el panel ofrece la mayor potencia para un rendimiento máximo.

Factor de forma (FF): Esta es la relación entre la potencia máxima que proporcionarían el módulo y el producto $I_{cc} * V_{ca}$. Suele oscilar entre 0,7 y 0,8.

Eficiencia o rendimiento: Es el cociente entre la potencia eléctrica máxima que proporcionaría el panel y la potencia de la radiación solar incidente. Usualmente 10 % a 18 %.

3.6.3 Estructura del módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico, se llama a un grupo combinado de células solares. La mayoría de los módulos fotovoltaicos en el mercado consisten en múltiples celdas de 36 a 96 en serie. La protección eléctrica y mecánica del módulo fotovoltaico estaría asegurada contra influencias externas, la Figura 3.14 muestra las partes del panel fotovoltaico [12].

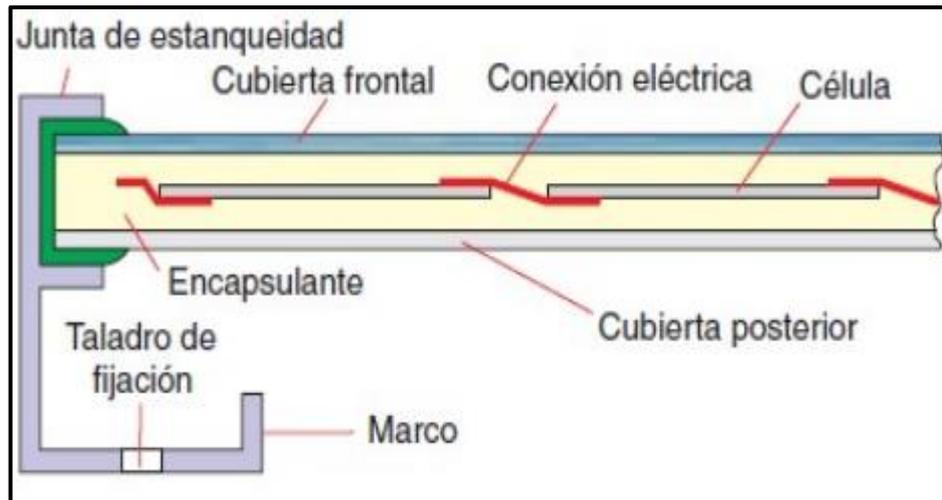


Figura 3.14. Estructura del módulo fotovoltaico [11].

- **Cubierta frontal:** Por regla general, el material utilizado es vidrio templado de unos 4 mm de espesor con una capa antirreflejos que capta la luz solar y evita la acumulación de suciedad. Proporciona protección al módulo contra factores externos como golpes o condiciones climáticas.
- **Encapsulado:** Además, de la resistencia a las vibraciones y los impactos, también, protege la conexión entre las baterías. Tiene propiedades que permiten la transmisión de la energía solar sin ser degradada por la radiación recibida. El material más utilizado para embalaje es EVA.
- **Cubierta posterior:** Al igual que la tapa frontal, además de aislar y también proteger el módulo de las inclemencias del tiempo. Sería de materiales como TEDLAR.
- **Conexiones:** Están ubicados en la parte posterior del módulo. Es una caja de plástico resistente a altas temperaturas con clip y luz LED en su interior.

En la Figura 3.15 muestra los enlaces conectados por tiras de metal soldadas a mallas conectadas eléctricamente. Adjuntado con cintas desde el frente de uno hasta la parte posterior del otro.

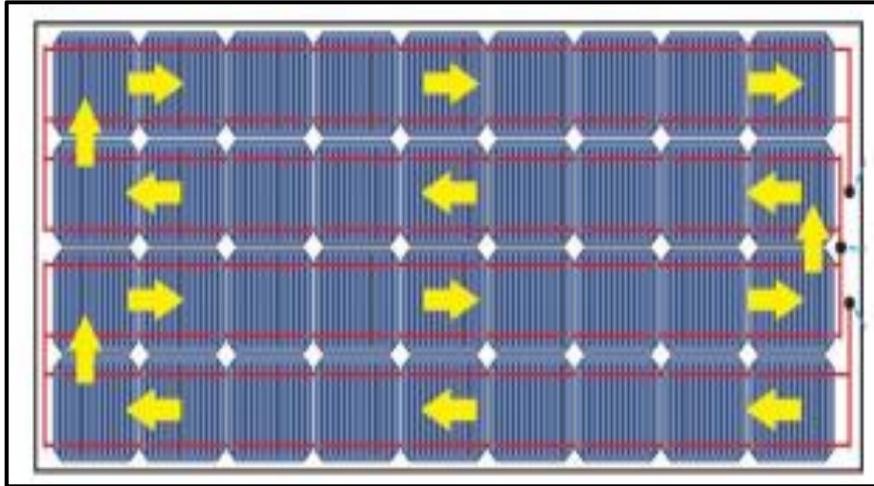


Figura 3.15. Conexión de las células fotovoltaicas [11].

3.6.4 Efecto de irradiancia y temperatura sobre el módulo

3.6.4.1 Efecto de la irradiancia

Las condiciones de trabajo de la celda fotovoltaica son muy amplias, opera a diferentes valores de intensidad de radiación y temperatura. Sería alto en algunos casos. Es importante que también funciona correctamente una célula para que estas condiciones afecten su comportamiento [12].

La Figura 3.16 muestra las diferentes curvas I - V de una celda solar al observar los efectos de la radiación y cómo cambia la fuerza del cortocircuito con ella además de indicar el punto de máxima potencia para cada valor de radiación.

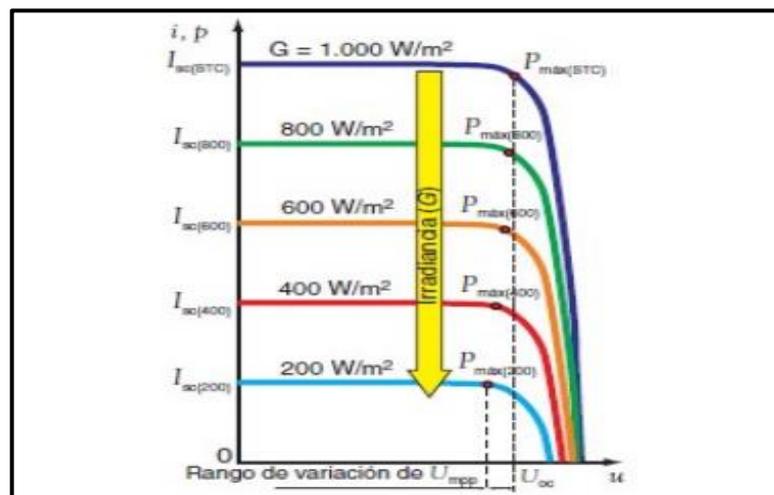


Figura 3.16. Curva característica I - V en función de la irradiancia [11].

3.6.4.2 Efecto de la temperatura

En la Figura 3.17 se aprecia que a medida que aumenta la temperatura, su efecto sobre la resistencia al cortocircuito es prácticamente insignificante porque el cambio es pequeño. Sin embargo, el voltaje de circuito abierto varía mucho y disminuye al aumentar la temperatura. Debido a estos cambios, la capacidad disminuirá a medida que aumente la temperatura [12].

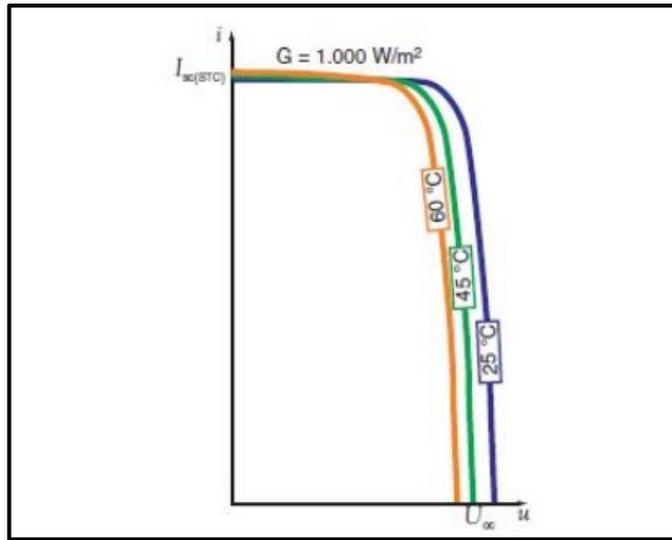


Figura 3.17. Curva característica I - V en función de la temperatura [11].

3.6.5 Inversores Fotovoltaicos de Conexión a la Red

La potencia suministrada por los generadores fotovoltaicos que están expuestos a la radiación solar es de corriente continua y se ajustaría para permitir un acoplamiento adecuado a la red. El equipo de acondicionamiento de energía, se denomina inversor de corriente continua a corriente alterna (DC / CA), que convierte la corriente continua o llamada corriente directa en corriente alterna cumpliría con el límite de voltaje efectivo, frecuencia, distorsión armónica de frecuencia de corriente y voltaje. Serían consistentes con la red pública a ser conectada, el inversor se suele utilizar como fuente de corriente autorreguladora sincronizada con la red [13].

3.6.6 Principio de funcionamiento del inversor

Los inversores suelen estar compuestos de los siguientes elementos, que se detallan a continuación [13].

3.6.7 Filtro de entrada / Enlace DC

Atenúa el efecto rizado que produce la conmutación en la corriente de entrada es decir elimina los picos.

3.6.8 Convertidor DC / DC

Adecua para aumentar o disminuir el voltaje de salida del generador al voltaje requerido para el punto de conmutación, se realizaría la función de búsqueda del punto de máxima potencia, tiene la capacidad de realizar la función de búsqueda de punto de máxima potencia.

3.6.9 Puente inversor DC / AC

Realiza el troceado de la corriente continua para convertirla en alterna.

3.6.10 Filtro de salida

Mitiga o atenúan los problemas no deseados de armónicos.

3.6.11 Medidor bidireccional

Es un elemento indispensable en cualquier proyecto de energía renovable a nivel residencial. Este tipo de medidor tiene la capacidad de diferenciar entre la energía que la empresa eléctrica suministra y la energía que entregan los paneles solares si no es consumida en su totalidad por el mismo usuario.

3.6.12 Transformador

Adapta el valor de la tensión de salida del puente inversor al valor de la tensión de salida de la red y proporciona aislamiento galvánico entre las partes de CA (es poco común en inversores de baja potencia)

3.6.13 Controles electrónicos

La función que cumple estos controladores electrónicos es de supervisar la entrada y salida del convertidor DC / DC y el puente inversor, además, transmite las señales de comando correspondientes para localizar y rastrear el punto de máxima potencia (MPP) del generador y obtener un bajo contenido de armónicos en la salida del generador.

3.6.14 Funciones principales del inversor

Al tener claro la función del inversor fotovoltaico, se ignoraría todas las demás limitaciones, como la seguridad, el rendimiento, entre otras. De esta manera, el inversor fotovoltaico se evaluaría mediante las siguientes funciones básicas [13].

3.7 PARÁMETROS DEL SISTEMA EÓLICO

3.7.1 El viento

El viento es el resultado del aire que fluye entre áreas de diferente presión atmosférica, calentado por la radiación solar, por lo que la energía eólica es energía ligera, que se convierte en energía eólica.

Cómo aparecen los parámetros del viento, incluida la velocidad, la dirección, la turbulencia. Es muy difícil de predecir porque depende de varios factores locales y globales como: la rotación de la Tierra, la posición de la Luna, la diferencia de temperaturas globales y locales, la geología de las formas del terreno, la rugosidad de la superficie y los obstáculos, entre otras cosas. Amplios estudios e investigaciones, permiten el creciente poder de las computadoras y los métodos estadísticos, los cuales ayudan al acercamiento a los verdaderos valores [14].

Cabe recalcar que la velocidad del viento varía con la altitud y depende principalmente de la naturaleza del terreno en él que se mueven las masas de aire. El cambio de velocidad, se representaría con la Ecuación (3.11):

$$\frac{V_2}{V_1} = \left[\frac{h_1}{h_2} \right]^\alpha \quad (3.11)$$

Donde:

$V_1 < V_2$ = Representa respectivamente la velocidad del viento a una altitud $h_1 < h_2$.

α = Caracteriza al terreno y variaría entre 0,08 (en superficies lisas como hielo, lago) y 0,40 (en terrenos accidentados) [15].

3.7.2 Energía obtenible del viento

La energía máxima teórica que se extraería del gas de aire en movimiento se obtiene mediante la Ecuación (3.12):

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (3.12)$$

Donde

E_c = Energía cinética [Joule/s]

m = Flujo de aire [kg/s]

V = Velocidad del viento [m/s]

Si asumimos que el área del receptor A (o el área barrida por las palas) es perpendicular a la dirección del viento, entonces el flujo de aire a través de él se expresara mediante la Ecuación (3.13):

$$m = \delta AV \quad (3.13)$$

m = Flujo de aire [kg/s]

δ = Densidad del aire [kg/m³]

A = Área de captación [m²]

V = Velocidad del viento [m/s]

Entonces, la energía teórica máxima por unidad de tiempo y área (A = 1), que se extraería de una masa de gas en movimiento que viene expresada por la Ecuación (3.14):

$$E_m = \frac{1}{2} \delta V^3 \quad (3.14)$$

Donde

E_m = La energía teórica máxima por unidad de tiempo [Joule/s]

δ = Densidad del aire [kg/m³]

V = Velocidad del viento [m/s]

Esta energía, se llama fuerza meteorológica y se expresa en la unidad W / m². Dado que la velocidad del viento, después de pasar la superficie de captación, no es cero, la energía proporcionada por la expresión anterior no se aprovechará al máximo. Betz demostró que la energía máxima recuperable, para una turbina eólica ideal, es 16 / 27 (≈60 %) de la energía total, se sabe que no existe un rotor perfecto, para caracterizarlo es necesario conocer su rendimiento o su eficiencia η . La potencia que se recibiría por unidad de área del rotor medida en W / m², se expresaría con la Ecuación (3.15):

$$P_a = \frac{1}{2} \eta \delta V^3 \quad (3.15)$$

Donde:

η = Rendimiento o eficiencia [%]

P_a = La potencia total para el área descrita por las palas al girar, $A = \pi R^2 = \pi D^2 / 4$ en [W/m²], queda mediante la Ecuación (3.16):

$$P_t = \frac{1}{2} \eta \delta (\pi D^2 / 4) V^3 \quad (3.16)$$

Donde:

D = Diámetro del rotor [m]

R = Radio del rotor [m]

La densidad media del aire es de 1,25 [kg / m²], un valor multiplicado por $\pi / 4$ da aproximadamente uno. Así podemos expresar la potencia que se obtendría de un aerogenerador, se considera el diámetro en metros y la velocidad en metros por segundo a través de la Ecuación (3.17) [15].

$$P \approx \frac{1}{2} \eta V^3 \quad (3.17)$$

Donde:

P = Potencia del aerogenerador [W]

η = Rendimiento [%]

V = Velocidad [m/s]

3.7.2.1 Evaluación de los recursos eólicos

El primer paso a la hora de instalar una turbina eólica o un conjunto de ellos es evaluar los recursos eólicos de la zona. Los vientos que son constantes en velocidad y dirección favorecen determinadas regiones del planeta, lo que los hace especialmente útiles desde la perspectiva del viento. Para evaluar los recursos eólicos en un área geográfica, son necesarias mediciones periódicas de la velocidad y dirección del viento para determinar si son adecuados para instalar una turbina eólica. Para las mediciones, se usan anemómetros que a veces recopilan datos de velocidad promedio, generalmente cada 10 minutos o una hora durante al menos varios años, para controlar los cambios en los vientos de un año a otro, durante todo el año, tiene una duración de un año, un mes, un día.

3.7.2.2 Velocidad de viento promedio anual

La velocidad media del viento durante un período prolongado, se utilizaría como primer indicador de la viabilidad de utilizar energía eólica.

3.7.2.3 Variaciones estacionales

Los datos de cambio de la velocidad del viento (generalmente presentados como una velocidad del viento promedio mensual) son importantes para estimar los cambios estacionales en el suministro de energía y, por lo tanto, determinar el mes de diseño crítico (al menos un mes de disponibilidad de energía eólica) para la instalación requerida.

3.7.2.4 Variaciones diurnas

Los cambios en el día afectarían la viabilidad del uso de energía eólica. Se necesitan datos sobre vientos fuertes para determinar la velocidad máxima del viento que cualquier convertidor de energía eólica soportaría sin sufrir daños.

3.7.2.5 Períodos de calma del viento

Se necesita información sobre períodos prolongados de baja intensidad del viento para dimensionar elementos como baterías o tanques de agua para proporcionar energía si el equipo de energía eólica no está en funcionamiento.

3.7.2.6 Distribución de frecuencia de velocidades de viento

Para estimar correctamente la producción de energía potencial de un parque eólico, la distribución de frecuencia de las velocidades del viento (el porcentaje de tiempo que ocurre una velocidad determinada del viento durante el año) es muy útil.

Estos resultados, se convierten en un gráfico que permite conocer la frecuencia y velocidad promedio del viento en diferentes direcciones: este es un gráfico de frecuencia o rosa de vientos. Los dos, se complementan, porque el primero indica la cantidad de veces que sopla el viento en una trayectoria particular y el segundo indica la velocidad promedio en esa dirección [14].

Evaluar el potencial eólico de un área es una tarea que requiere tiempo y recursos económicos para completarse. Los datos meteorológicos, se recopilarían durante al menos un año si la encuesta, se va a realizar con algún grado de certeza. A diferencia de la evaluación de recursos solares, donde, se cubriría áreas más grandes con la evaluación de parámetros meteorológicos; El recurso eólico, por su naturaleza, tiene un comportamiento específico del sitio y exhibe grandes diferencias espaciales. Quiere decir que, al realizar mediciones puntuales en un sitio, las magnitudes de la velocidad de viento y su dirección en una distancia de 100 metros, llegarían a ser diferentes, por lo tanto, se presentaría una variación numérica entre sus magnitudes [16].

3.7.2.7 Métodos utilizados para medir la velocidad del viento

La estimación de los recursos eólicos, se basa en una serie de estrategias útiles, tales como: recopilar información empírica, anemómetros agregados, factores interrelacionados, instalar pequeños equipos eólicos o recopilar datos meteorológicos oportunos.

3.7.2.8 Información empírica

Esta información, se recolecta en base a visitas de campo, donde las condiciones topográficas, la vegetación y la información sobre la población de la zona brindan información valiosa para identificar lugares con alta velocidad de viento.

3.7.2.9 Anemómetros totalizadores

Una forma eficaz de determinar los valores medios generales del comportamiento del viento es instalar un anemómetro total. Estos elementos son anemómetros con un anemómetro que, si es impulsado por el viento, mide la trayectoria equivalente recorrida a través del instrumento. Dado que está conectado a un odómetro, se configuraría el número de metros o kilómetros recorridos durante un cierto período de tiempo. Esta relación entre la trayectoria y el tiempo de medición permite conocer la velocidad media del viento. Así, por ejemplo, si el intervalo de medición de la trayectoria del viento es de 1 hora y se registra el paso de 16,2 Km de viento; la velocidad horaria será de 16,2 Km / h (la hora media es de 4,5 m / s).

La dificultad de este sistema es que el anemómetro estaría ubicado en un lugar con condiciones limpias, con muy pocas obstrucciones a su alrededor; Están a 10 metros del suelo. Por lo tanto, al realizar la lectura la pantalla del odómetro se colocaría cerca del suelo, las torres de montaje del anemómetro, en general, no son lo suficientemente fuertes para soportar el peso del ocupante para realizar los resultados de la medición. La Figura 3.18 muestra un anemómetro que determina las velocidades y el comportamiento del viento.

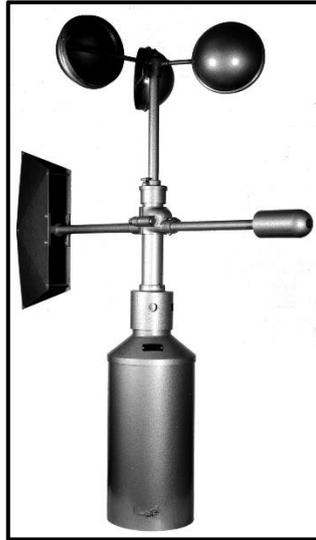


Figura 3.18. Anemómetro de recorrido [15].

Al compilar esta información agregada y con velocidades promedio del viento, se determina formalmente el régimen actual del viento y se determinan con certeza los cambios de día, mes o estación [16].

3.7.2.10 Método de correlación

El siguiente método de estimación permite combinar las mediciones, que se realizó en una zona, con las mediciones registradas con respecto a la velocidad del viento de cualquier tipo y con la base de datos publicada y suministrada por parte del servicio meteorológico de las estaciones, que se encuentran cerca de la zona en la cual se tomó los datos.

Para este método de correlación, se tomaría en consideración las variaciones de la dirección del viento, se crearía varios factores de correlación para las diferentes direcciones del viento [16].

3.8 AEROGENERADORES

Este tipo de máquinas son las encargadas de acoger la energía del viento y generar energía eléctrica. A continuación, se presenta los distintos componentes que conforman un aerogenerador el funcionamiento y su respectiva clasificación [17].

3.8.1 Componentes de un aerogenerador

Este apartado indica los principales componentes con los que está conformado el aerogenerador:

3.8.1.1 Palas

Este elemento es uno de las más importantes, acoge la energía cinética que tiene el viento, las palas del aerogenerador se unen de forma sólida a un soporte, que se denomina buje o cubo.

3.8.1.2 Buje

Une todas las palas de aerogenerador, además, que se ubica sobre el eje de baja velocidad el cual se encarga de transmitir el par motriz a la transmisión de la potencia del aerogenerador o, también, conocido como multiplicador, este equipo permite adaptar el eje de baja velocidad al eje de alta velocidad donde se une el aerogenerador.

3.8.1.3 Ejes

Este elemento, se encarga de acoplar el multiplicador con las palas y el generador, está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia, dicho freno, se utiliza en caso de existir fallo del freno aerodinámico o mientras se realiza el respectivo mantenimiento.

3.8.1.4 Generador

Su composición esta rígidamente creado por una máquina eléctrica la cual es la encargada de transformar energía mecánica de rotación en energía eléctrica, se encuentra compuesto de un rotor que sirve como parte móvil la cual genera un campo magnético al momento que giran las palas y un estator que es la parte fija la cual es la encargada de generar la corriente eléctrica inducida.

3.8.1.5 Torre

Este componente es el que sostiene a todo el aerogenerador y lo conecta con el suelo es decir es base primordial del aerogenerador para, que se mantenga estable y pueda generar electricidad sin problema alguno [17].

En la Figura 3.19 se muestra un listado de elementos primordiales con los que debe contar una torre para que pueda entrar en mantenimiento además de poder generar electricidad de manera limpia y eficiente.



Figura 3.19. Elementos de la torre [17].

3.8.1.6 Bastidor o Góndola

La Figura 3.20 muestra la estructura donde, se montan los diferentes elementos que componen el aerogenerador es la parte más fundamental del mismo, sin este elemento todo el aerogenerador no llega a funcionar.

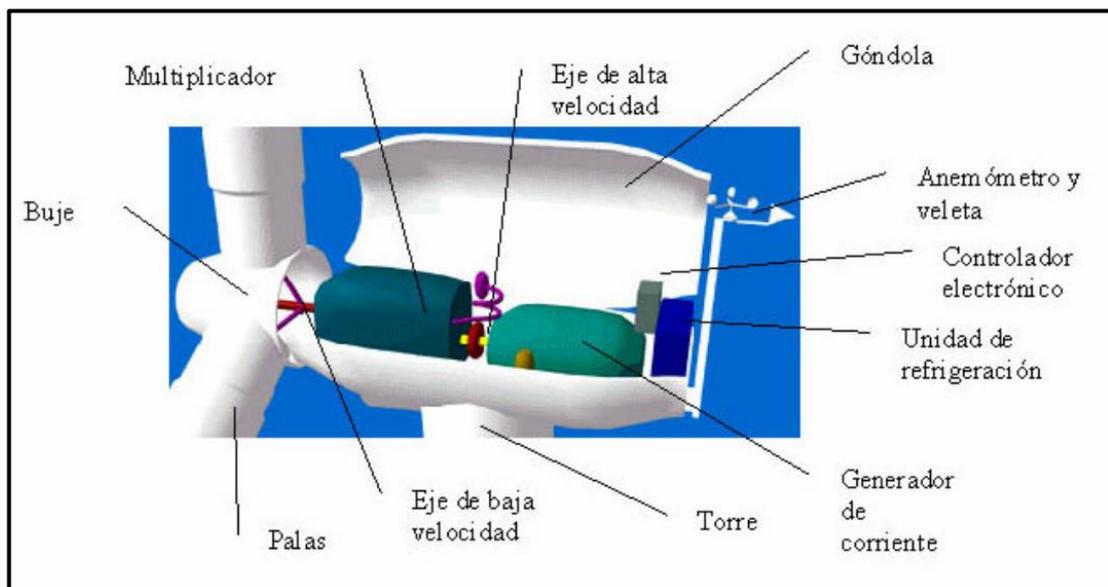


Figura 3.20. Elementos del aerogenerador [16].

3.8.2 Funcionamiento de un aerogenerador

Este tipo de máquinas adquieren su potencia a la entrada y convierten la fuerza del viento en un par que actúa en las palas del rotor, esta cantidad de energía es transferida al rotor para la cual, se necesita del viento del cual depende la densidad del aire, el área de barrido de las palas y la tan anhelada velocidad del viento.

Para el funcionamiento del aerogenerador, se necesita la energía cinética la cual genera un cuerpo en movimiento y es proporcional a su masa, por lo que esta energía del viento, se sujeta a la densidad de aire. A presión atmosférica normal y con una temperatura de 15 grados centígrados la densidad de aire, que se utiliza es de $1,255 \text{ [kg / m}^3\text{]}$, aunque este valor cambia ligeramente con la humedad.

Uno de los parámetros importantes para obtener la cantidad de energía que llegaría a obtener un aerogenerador es la velocidad del viento con lo cual, se indicaría que a mayor velocidad del viento la energía producida por la máquina es mayor. El principal funcionamiento del aerogenerador, se basa en la energía cinética la cual, se genera al momento de que las palas capturan el viento que corre por la zona, estas giran en torno al eje del rotor lo que hace que gire el eje de baja velocidad el cual, se encuentra acoplado al buje, este elemento gracias al multiplicador realiza la acción que ayuda a girar el eje de alta velocidad al que esta acoplado el generador, es el encargado de la producción de energía eléctrica del sistema conectado internamente del aerogenerador como se muestra en la Figura 3.21 [17].

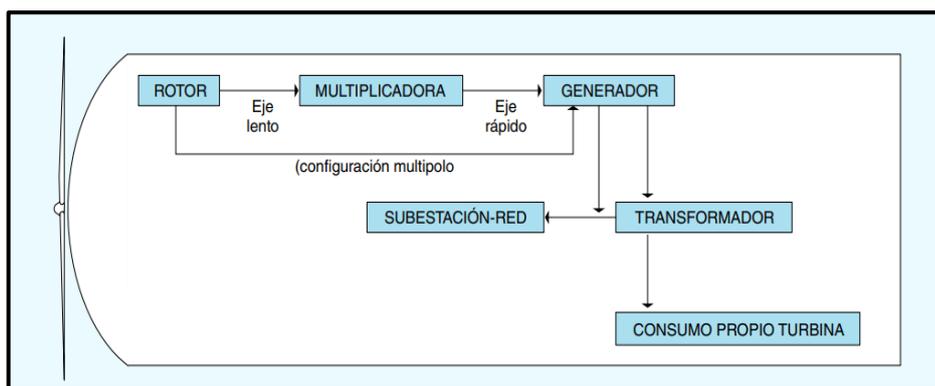


Figura 3.21. Funcionamiento del aerogenerador [17].

Otra parte fundamental y, que se tomaría en consideración es que todas las máquinas que transforman energía como los aerogeneradores no son capaces de transformar toda la energía que en ellos inciden es por ello, que se tendría en consideración un rendimiento denominado coeficiente de potencia C_p . Este coeficiente es la relación, que se encontraría entre la potencia

eólica del emplazamiento y la potencia mecánica que se obtendría, además, este coeficiente depende de la velocidad del viento como se aprecia en la Figura 3.22 con lo cual, se indicaría que a bajas velocidades el rendimiento del aerogenerador es mayor que a altas [17].

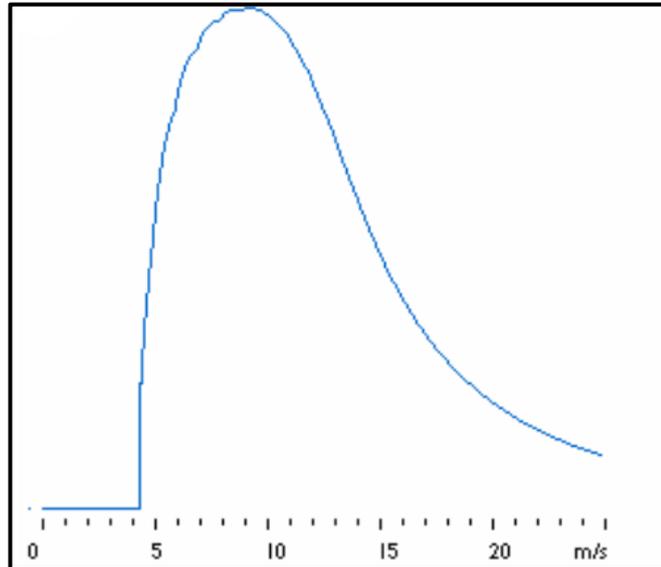


Figura 3.22. Coeficiente de potencia de un aerogenerador [16].

Por otro lado, la potencia de un aerogenerador, también, es variable según la velocidad del viento como se indica en la Figura 3.23 refleja las curvas de potencia de los aerogeneradores que muestran la potencia eléctrica disponible en un aerogenerador a diferentes velocidades del viento.

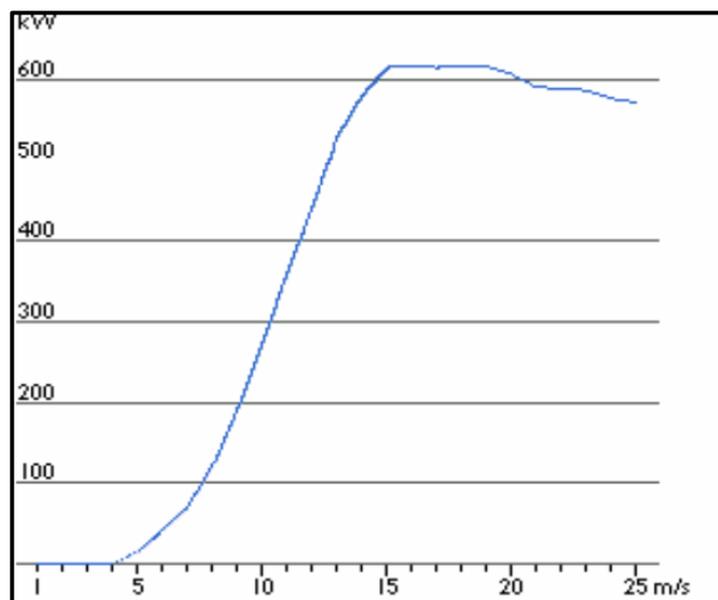


Figura 3.23. Potencia de un aerogenerador [16].

En la Figura 3.24 se observa la comparación de los distintos tipos de rendimiento que tienen los aerogeneradores tanto de eje vertical como de eje horizontal, además, se notaría que los de eje horizontal tienen mayor rendimiento que todos los demás, por lo que, también se notaría que los aerogeneradores de eje vertical poseen un rendimiento bajo que los de eje horizontal [17].

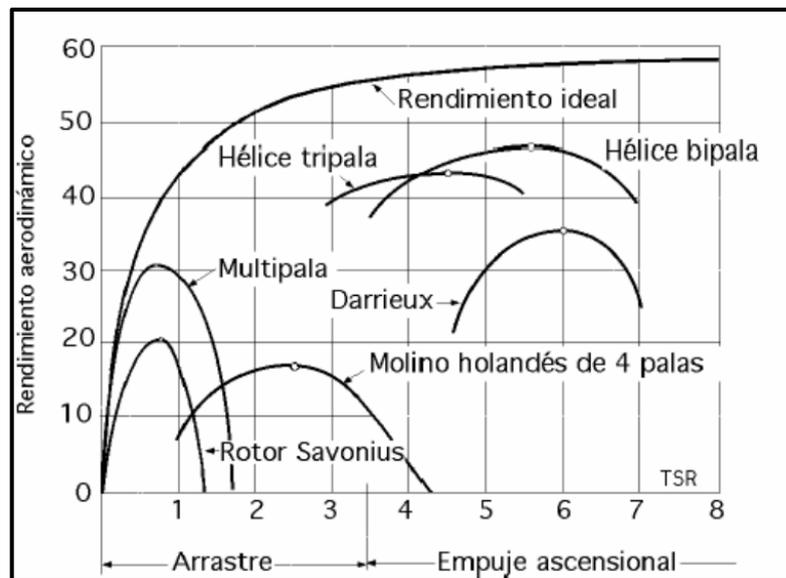


Figura 3.24. Rendimiento aerodinámico de varios aerogeneradores [16].

3.8.3 Orientación del rotor

Hay dos tipos de orientaciones del rotor las cuales, se hablarán en este apartado:

3.8.3.1 Orientación a sotavento (down - wind)

En esta orientación el rotor del aerogenerador, se encuentra ubicado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, es decir en este tipo de orientación el viento pasa primero por la torre es por ello que las aspas presentarían una cierta conicidad.

Esta orientación, también es conocida como pasiva y presenta inconvenientes es decir llegaría a generar turbulencias que al momento de pasar por las aspas generarían sobreesfuerzos de torsión en el eje de rotación horizontal del aerogenerador como se observa en la Figura 3.25 [18].

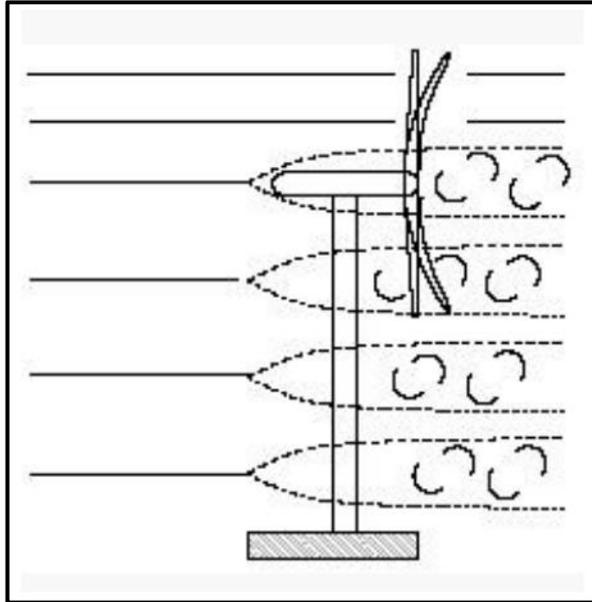


Figura 3.25. Orientación en sotavento [18].

3.8.3.2 Orientación a barlovento (up - wind)

En esta orientación el rotor, se encuentra dirigido de frente a la dirección del viento dominante, es decir el viento pasa primero por las aspas antes de, que se tope con la torre, además, como punto de inflexión la captura de energía llegaría a ser menor en estos casos y las cargas de fatiga son mayores como se indica en la Figura 3.26 [18].

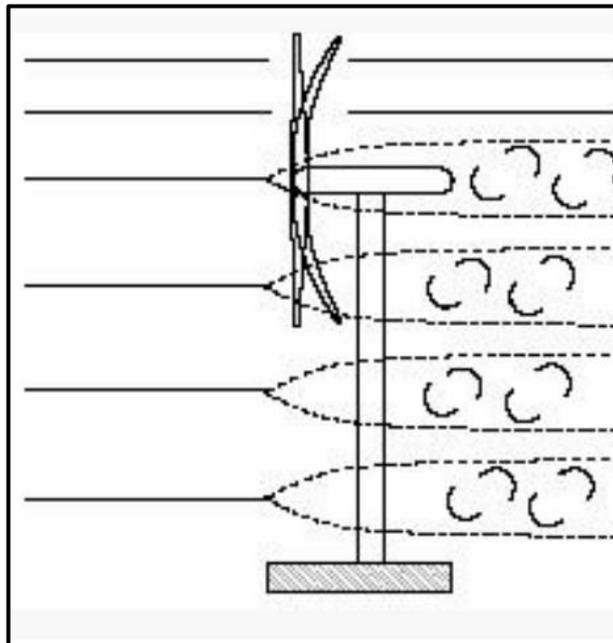


Figura 3.26. Orientación en barlovento [18].

3.8.4 Perfiles aerodinámicos

Este perfil es un cuerpo con un diseño determinado, el cual aprovecha todas las fuerzas, que se llegaría a originar gracias a la variación de velocidad y presión si están situados en una corriente de aire, además, se definiría como la sección transversal de un ala en una turbina.

Las fuerzas importantes buscan un equilibrio con el perfil aerodinámico son la sustentación y la resistencia, las cuales, se generan por la fuerza de presión y los esfuerzos constantes sobre la superficie por ende, se determina que las fuerzas aerodinámicas son constante y la presión como se indica en la Figura 3.27 [18].

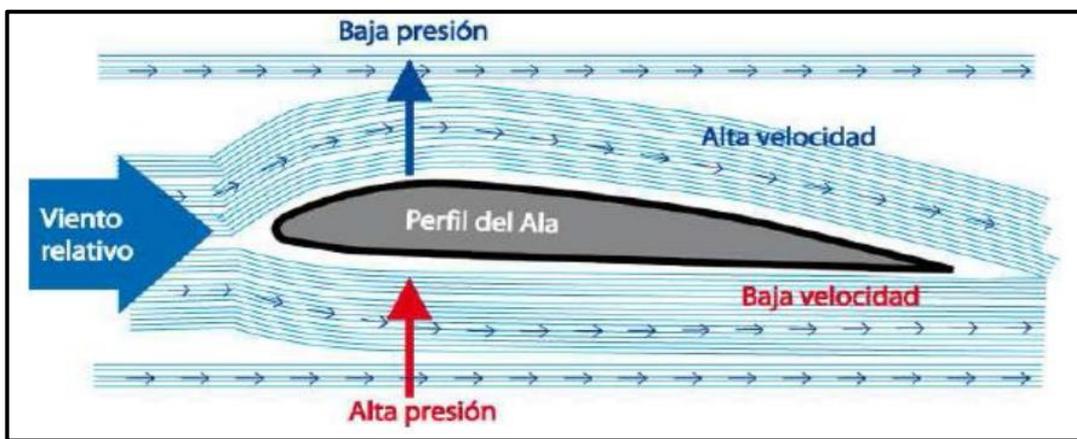


Figura 3.27. Flujos alrededor de perfiles, alta y baja presión [18].

3.8.5 Tipos de perfiles aerodinámicos

En las Figuras 3.28 y 3.29 se aprecia los tipos de perfiles aerodinámicos que puede tomar el aerogenerador.

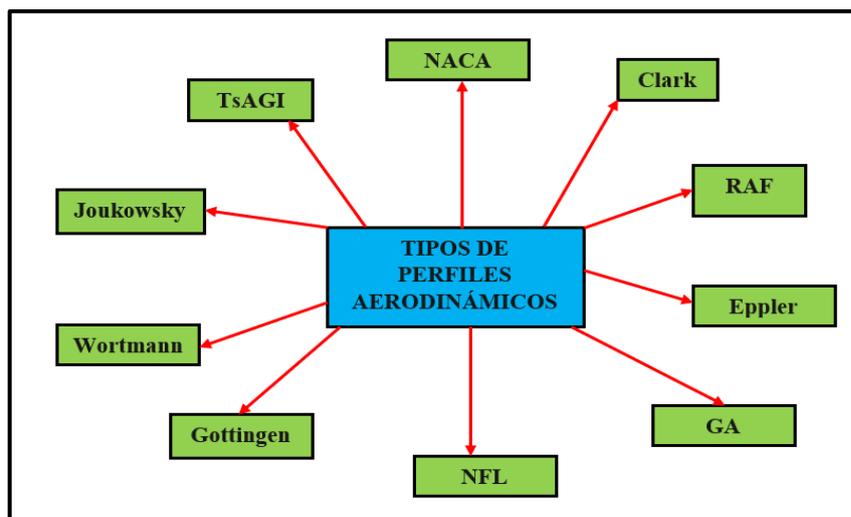


Figura 3.28. Perfiles aerodinámicos [18].

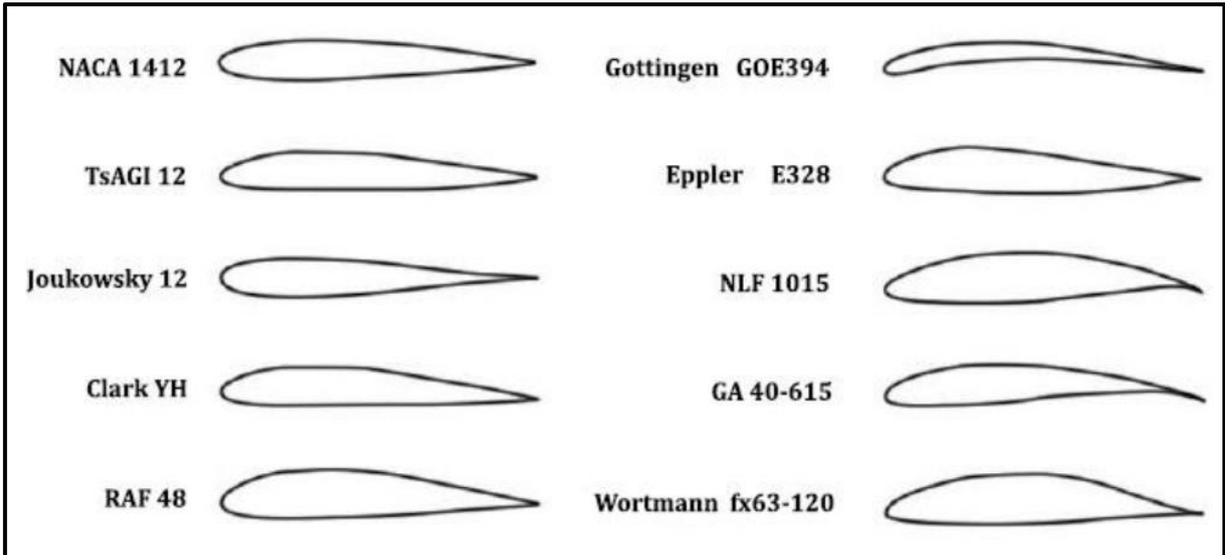


Figura 3.29. Familias de perfiles aerodinámicos [18].

3.8.6 Sistemas eólicos conectados a la red eléctrica

Estos sistemas eólicos, se dividen en dos grupos unos que son aislados a la red eléctrica y sistemas conectados a la red eléctrica publica es por ellos que, para este tema de investigación, se tomó el sistema eólico conectado directamente a la red eléctrica el cual tiene la siguiente división:

3.8.6.1 Pequeños sistemas

Se aplica en los casos en el cual exista una red eléctrica en las proximidades del centro de consumo. Es decir, la energía eléctrica requerida por los diferentes usuarios sería suministrada por el sistema eólico y la red eléctrica, si el aerogenerador llega a producir algún excedente el mismo será entregado a la red eléctrica, en otro caso si el aerogenerador llegara a producir menos energía se tomaría energía de la red eléctrica esta función se denomina red compartida.

3.8.6.2 Sistemas de la gran generación eólica sin consumo propio

Como, se denota en su propio nombre son grandes sistemas o parques eólicos que suministran directamente la energía generada al sistema eléctrico, como un gran ejemplo para el Ecuador sería Villonaco.

El funcionamiento para la conexión a la red eléctrica cuenta de tres partes fundamentales las cuales son el aerogenerador, un controlador y por último el inversor. Las distintas funciones que cumplen cada uno de ellos, se detalla a continuación:

El aerogenerador es el encargado de convertir la energía del viento en energía eléctrica de corriente continua, luego de eso mediante el inversor, se llega a obtener energía eléctrica de

corriente alterna para finalmente poder conectarse directamente a la red eléctrica del país como se muestra en la Figura 3.30 [19].

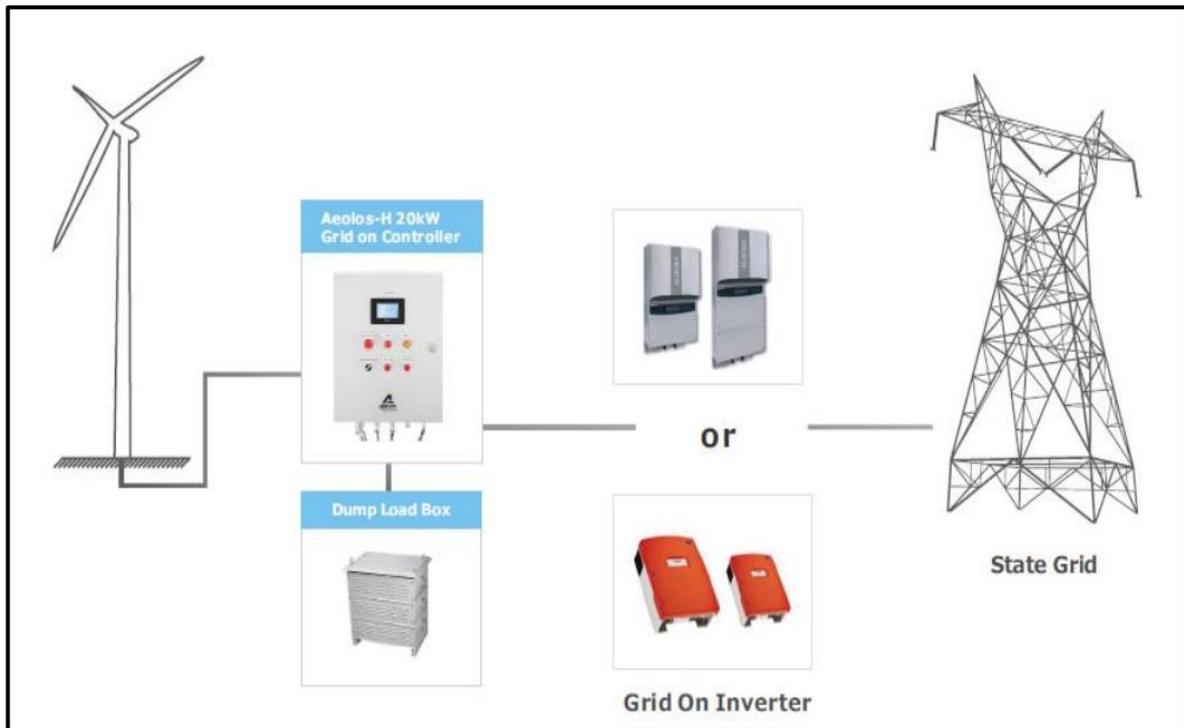


Figura 3.30. Sistema eólico conectado a la red [19].

3.9 ESTABILIDAD DE INTERCONEXIÓN ENTRE SISTEMAS HÍBRIDOS Y LA RED ELÉCTRICA

3.9.1 Aspectos técnicos – operativos

En consideración de la clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia expuestos en el siguiente mapa conceptual, se logra analizar el impacto que ocurre en la estabilidad de los sistemas de potencia la cual es ocasionada por la entrega de generación híbrida solar - eólica o, también, por separado cada una de ellas [20].

En la Figura 3.31 se puede apreciar las distintas formas de estabilidad para poderse conectar a la red eléctrica además de una pequeña conceptualización de cada una de ellas.

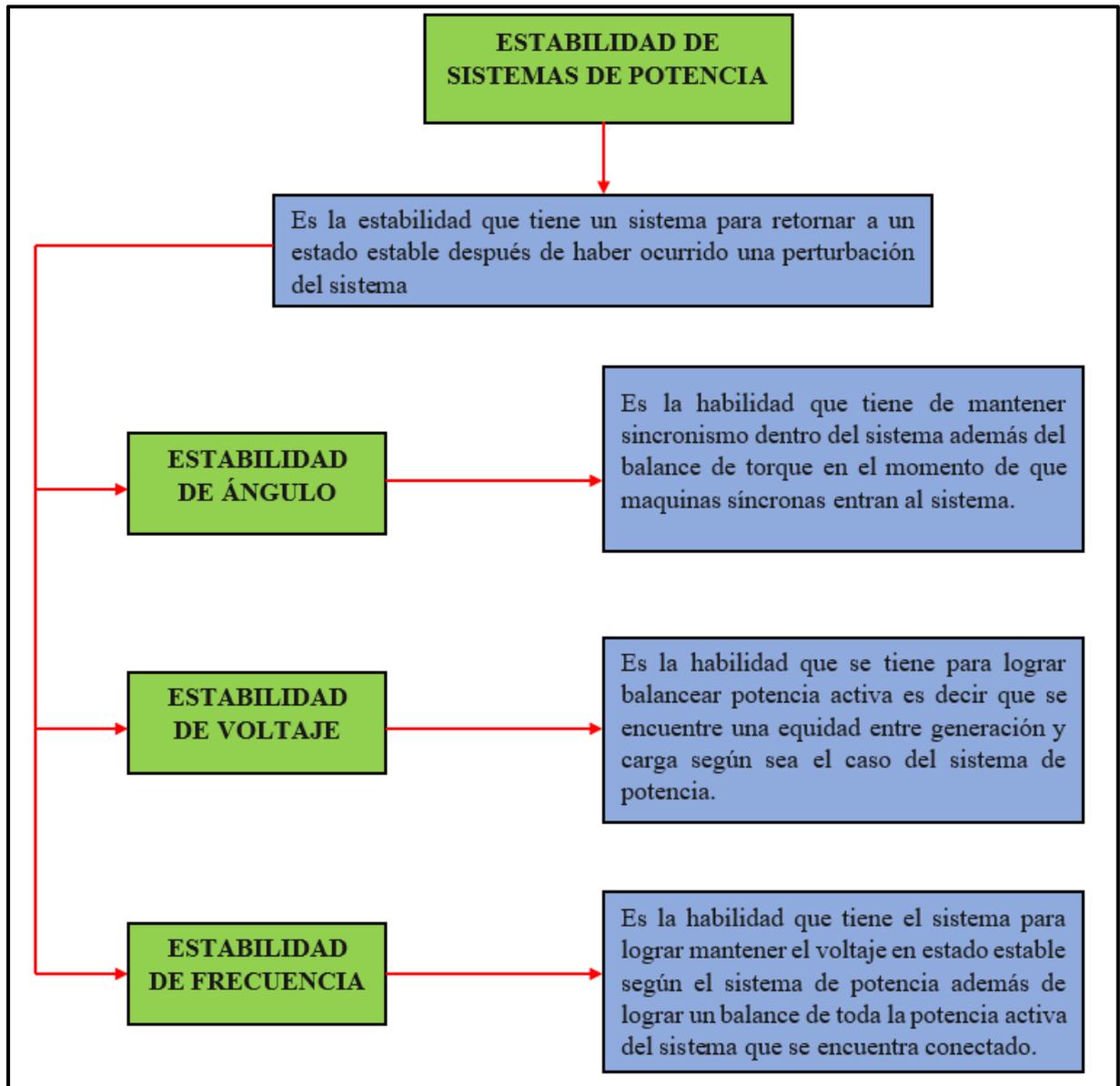


Figura 3.31. Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia.

3.10 MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

A continuación el modelo matemático, que se va a utilizar es un modelo investigado con anterioridad el cual ayudará a desarrollar los casos bases de las distintas simulaciones, que se realizarán, para la simulación del sistema híbrido de generación de energía solar - eólica y así electrificar una carga fuera de la red, se concederá un modelo matemático que esté separado para cada uno de los sistemas que componen el sistema híbrido en general, que se analizará por separado el sistema solar y eólico [2].

Los modelos antes mencionados, se integraron para así lograr satisfacer una carga amplia y determinada, en este sentido el modelo matemático utilizado para la matriz fotovoltaica está integrado de ecuaciones sumamente principales del módulo fotovoltaico junto con la base de datos de la zona requerida, el modelo matemático del aerogenerador es desarrollado básicamente a partir de la base de datos de los distintos fabricantes.

3.10.1 Modelo matemático de matriz fotovoltaica

Una de las principales funciones de la celda fotovoltaica es poder convertir directamente la luz del sol en energía de corriente continua, se realiza a través de los fenómenos fotoeléctricos. Los fabricantes fotovoltaicos por lo general llegan a suministrar sus productos con una hoja de datos que contiene valores de voltaje y corriente para tres condiciones, permite saber los datos del cortocircuito, el circuito abierto y la potencia máxima para un conjunto determinado de condiciones de referencia o también llamadas pruebas estándar, dichas pruebas se realizan para la irradiación solar y la temperatura con la Ecuación (3.18):

$$(I_{st}) = 1\,000 \left(\frac{W}{m^2} \right) \text{ y } (T_{st}) = 25(^{\circ}C) \quad (3.18)$$

Donde:

I_{st} = Es la radiación solar estándar $1\,000 [W/m^2]$

T_{st} = Temperatura del panel [$^{\circ}C$]

Si, se encuentra el sistema en condiciones de cortocircuito, la corriente del diodo es demasiado pequeña y la corriente que se genera por la luz es igual a la corriente de cortocircuito. El voltaje y la corriente de funcionamiento, se llegan a determinar la potencia de salida del campo fotovoltaico en función de la intensidad que se encuentra la luz, que se presenta y utiliza el módulo fotovoltaico, otras características que brinda el fabricante es la temperatura ambiente.

Las propiedades características del módulo fotovoltaico son la potencia de salida total por hora del campo fotovoltaico y se la encontraría con la Ecuación (3.19):

$$P_{PV} = \eta_{PV} * V_{PV} * i_{PV} \quad (3.19)$$

Donde:

P_{PV} = Potencia de salida del módulo fotovoltaico [W]

η_{PV} = Número de módulos fotovoltaico

V_{PV} = Voltaje del punto de funcionamiento óptimo del módulo en condiciones arbitrarias [V]

i_{PV} = Corriente del punto de funcionamiento óptimo del módulo en condiciones arbitrarias [A]

Desde la Ecuación (3.20) hasta la Ecuación (3.27) son utilizadas para calcular la corriente y el voltaje óptimo en el punto de funcionamiento en condiciones abiertas.

$$i_{PV} = i_{SC} \left(1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V_{PV} - \Delta V}{C_2 V_{OC}} \right) - 1 \right] \right) + \Delta i \quad (3.20)$$

Donde:

i_{PV} = Corriente del punto de Funcionamiento Óptimo del módulo en condiciones arbitrarias [A]

i_{SC} = Es la corriente de cortocircuito del módulo [A]

V_{PV} = Voltaje del punto de funcionamiento óptimo del módulo en condiciones arbitrarias [V]

ΔV = Variación de tensión [V]

V_{OC} = Es la tensión de circuito abierto del módulo [V]

Δi = Variación de la corriente [A]

$$C_1 = \left(1 - \frac{i_{mp}}{i_{SC}} \right) \exp \left(- \frac{V_{mp}}{C_2 V_{OC}} \right) \quad (3.21)$$

$$C_2 = \frac{V_{mp} / (V_{OC} - 1)}{\ln \left(1 - \frac{i_{mp}}{i_{SC}} \right)} \quad (3.22)$$

$$V_{PV} = V_{mp} \left[1 + 0.0593 \log \left(\frac{I_T}{I_{st}} \right) \right] + \beta_o * \Delta T \quad (3.23)$$

$$\Delta V = V_{PV} - V_{mp} \quad (3.24)$$

$$\Delta i = \alpha_o \left(\frac{I_T}{I_{st}} \right) \Delta T + \left(\frac{I_T}{I_{st}} - 1 \right) i_{SC} \quad (3.25)$$

$$\Delta T = T_{cell} - T_{st} \quad (3.26)$$

$$T_{cell} = T_A + 0.02 I_T \quad (3.27)$$

Donde:

i_{SC} = Es la corriente de cortocircuito del módulo [A]

V_{mp} = Es la tensión de potencia máxima del módulo [V]

V_{OC} = Es la tensión de circuito abierto del módulo [V]

i_{mp} = Es la corriente de máxima potencia del módulo [A]

I_T = Radiación solar total en panel inclinado [W/m^2]

I_{st} = Es la radiación solar estándar 1 000 [W/m^2]

α_0 = Es el coeficiente de temperatura actual del módulo [$^{\circ}C$]

β_0 = Es el coeficiente de temperatura de voltaje del módulo [$^{\circ}C$]

T_A = Es la temperatura ambiente [$^{\circ}C$] [2].

3.10.2 Modelo matemático de generación de viento

Una forma muy eficiente de generar energía eléctrica es la utilización del viento, es una forma de energía eólica que se utilizaría, aunque la superficie terrestre tiene varias irregularidades y la rotación de la tierra son factores que inciden en la misma, además, los patrones que tiene el flujo del viento, se modificarían por cómo se encuentra la zona a estudiar, se incluye a los cuerpos de agua y la vegetación, que se encuentra en la superficie terrestre.

Los seres humanos utilizan este flujo de viento o también, conocido como energía de movimiento para varios propósitos, entre ellos, se vería la navegación, volar una cometa e incluso generar electricidad. Además, la cantidad de energía, que se llegaría a transferir a un aerogenerador es directamente proporcional al área que brindaría el rotor, dicha proporción interviene en la densidad del aire y la potencia cúbica de la velocidad del viento que se ocuparía de ciertas zonas.

Al momento que se entra a calcular la salida del generador eólico, la base de datos, que se mide con respecto a la velocidad media del viento por hora serían convertidos a los valores correspondientes a la altura donde se encuentra el buje del generador eólico. Las ecuaciones más utilizadas para este aspecto es la ley de potencias que se expresa a través de la Ecuación (3.28).

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\alpha} \quad (3.28)$$

Donde

V = Es la velocidad del viento a la altura deseada (z) [m/s]

V_0 = Es la velocidad del viento a la altura de referencia (z_0) [m/s]

α = Es el coeficiente de fricción de la superficie del suelo

Muchos autores utilizan el valor típico de $(1 / 7)$, este valor corresponde a superficies de baja rugosidad y zonas bien expuestas, además, de utilizar la producción horaria de un aerogenerador la cual solo, se calcularía con suma precisión mediante el uso de su propia curva característica. Dicha ecuación característica del aerogenerador, se ajusta la curva característica, que se obtiene a la salida práctica con el método de mínimos cuadrados. Para, que se garantice la precisión del ajuste, se han utilizado tres o más expresiones matemáticas binomiales como se indica en la Ecuación 3.29 [2].

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & \text{por } \rightarrow v < v_c \\ a_1 v^n \dots b_1 v^2 + c_1 v + d_1 & \text{por } \rightarrow v_c \leq v < v_1 \\ a_2 v^n \dots b_2 v^2 + c_2 v + d_2 & \text{por } \rightarrow v_1 \leq v < v_2 \\ a_3 v^n \dots b_3 v^2 + c_3 v + d_3 & \text{por } \rightarrow v_2 \leq v < v_f \\ 0 & \text{por } \rightarrow v > v_f \end{cases} \quad (3.29)$$

Donde:

$P_w(v)$ = Es la potencia de salida del aerogenerador a la velocidad del viento [W]

v = Es la velocidad del viento a la altura del buje [m/s]

v_c = Velocidad del viento de corte [m/s]

v_f = Velocidad del viento de corte del aerogenerador [m/s]

El aerogenerador y su producción por hora, se obtendría a partir de la ecuación característica del mismo y la velocidad del viento por hora a la altura que se encontraría el buje del aerogenerador estudiado [2].

3.11 ESTABILIDAD DE SISTEMAS HÍBRIDOS EN MICRORREDES

La estabilidad de sistemas híbridos en microrredes, se habla de la capacidad que tienen los mismos frente a la presencia de una perturbación y lograr mantener así el equilibrio entre generación y consumo, una definición concreta es la capacidad de regresar al estado inicial, que se encontraba el sistema o a otro estado muy cercano después de presentarse una perturbación, incluso si está aún no ha desaparecido del sistema.

En todas las microrredes existentes, se utiliza la misma conceptualización la cual habla sobre una estabilidad transitoria o también, llamada N-1 que en estos casos de estabilidad sería (N-x), donde la variable x llega a representar un conjunto de varios elementos de la microrred que podría no actuar si surge una contingencia ya sea por, que se hallan desconectados, no despachados o porque estos elementos se encuentran en falla en el sistema. En el funcionamiento de una microrred desconectada la seguridad es de mucha importancia o también, si se encuentra en modo aislado, encontrar el equilibrio entre generación y demanda es más complicado, no se dispone de un nodo de compensación el cual pueda cumplir los objetivos de funcionamiento de una Microrred, esta requiere disponer de una reserva disponible para suplir los desbalances instantáneos y una reserva de energía para así lograr mantener el equilibrio del sistema a largo plazo.

Si, se habla de la estabilidad de una Microrred aislada sometida a un estrés esta depende en gran medida al tipo de control y la coordinación, que se encuentran cada uno de los agentes conectados a la misma es por ello que dichos agentes tienen sus restricciones y solo una parte de la red es de suma importancia, que se maneja mediante un esquema de cooperación el cual dependerá mucho del tipo de inversor y del control que tengan que realizar cada uno de los agentes de la Microrred [21].

3.12 PROBLEMÁTICAS DE LA ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS EN UNA MICRORRED

Si, se habla de la problemática de la estabilidad de una Microrred con sistemas híbridos el objetivo principal del control de la misma es proporcionar la energía demandada por las cargas conectadas al sistema, se hace uso esencial de la generación, además, de los sistemas de almacenamiento que ellos lo realizan de forma eficiente y fiable tanto en condiciones normales de funcionamiento como durante una contingencia que tenga el sistema, independiente de la conexión, que se encuentre a la red externa. Las microrredes y los beneficios económicos, medioambientales son consecuencia de su gran aceptación y grado de penetración al sistema eléctrico, se llegan a marcar por una gran medida gracias a las capacidades tanto del sistema de control y las distintas características de operación como se muestra en la Figura 3.32.

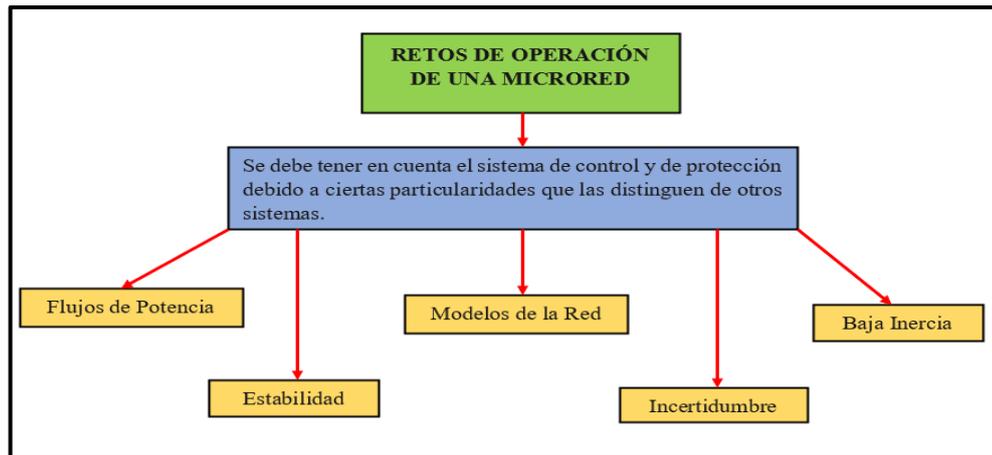


Figura 3.32. Cumplimiento para la operación de una microrred.

En la Figura 3.33 se muestra las principales funciones de control de una microrred.

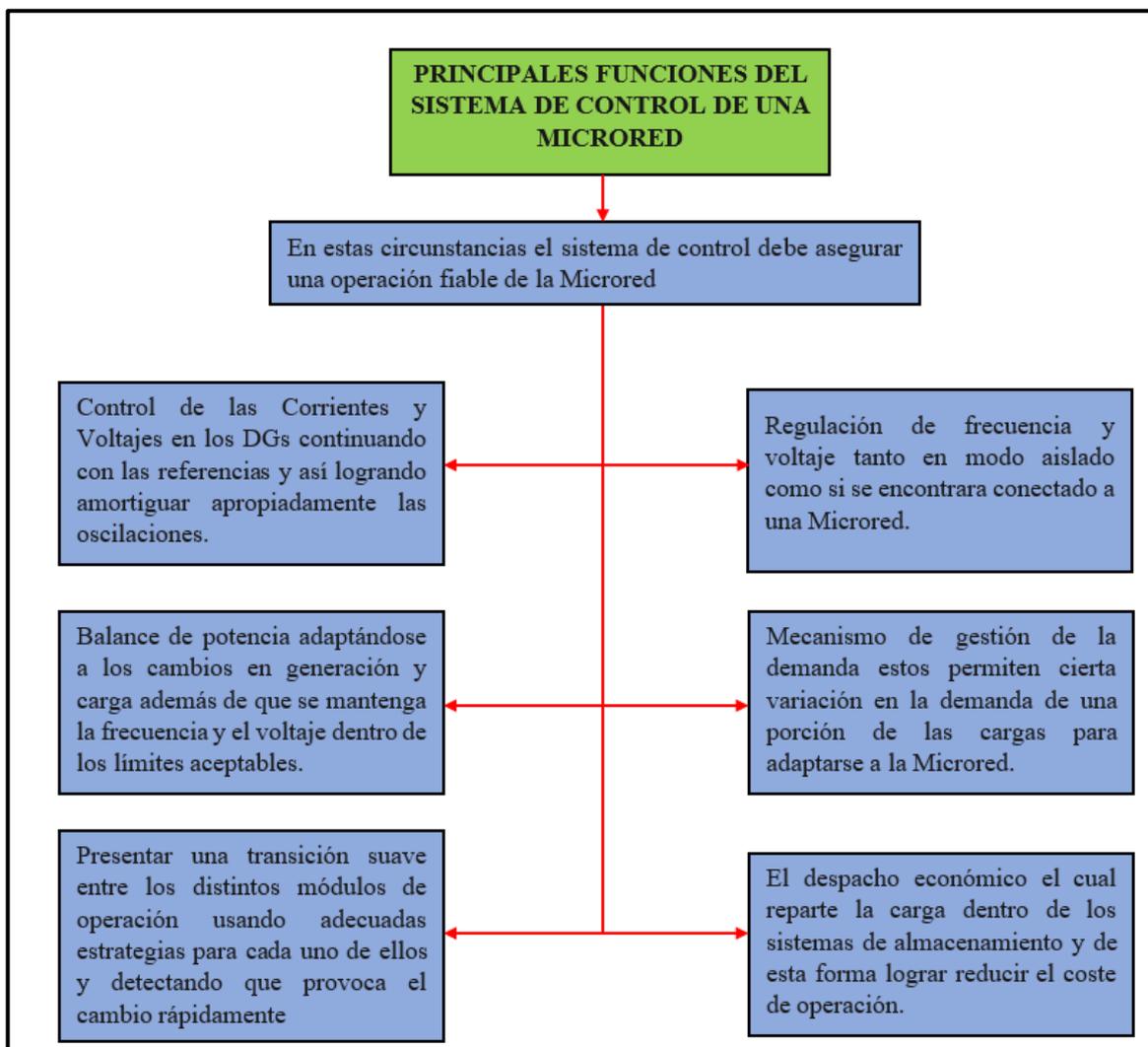


Figura 3.33. Funciones del sistema de control de una microrred.

Las funciones expresadas anteriormente en el cuadro sinóptico son muy variadas e implican dinámicas con distintas constantes de tiempo esto, se da gracias a la respuesta rápida y necesaria en el control de las variables eléctricas como son frecuencia y voltaje, además, de las necesidades menos estrictas del despacho económico. Aquí, se dirigiría por medio de un control centralizado con todas las funciones y la gestión de la información, que se llega a localizar en un único punto.

Otro punto importante es el control centralizado, este envía comandos basados en información obtenida de todo el sistema y necesita una compleja red de comunicación y esta llega a afectar la flexibilidad y fiabilidad del sistema al cual, se encuentra conectado [22].

3.13 SOFTWARE HOMER

Uno de los grandes beneficios de este software es que logra encontrar la combinación perfecta de todos los componentes de menor costo con los cuales, se pueda satisfacer las cargas eléctricas y térmicas, además, de que simula miles de configuraciones del sistema las cuales son óptimas para los costos de ciclos de vida gracias a esto genera varios resultados para el análisis sensible para la mayoría de los datos de entrada que acoge el sistema, este software logra simular la operación de un sistema mediante los cálculos que realiza según los balances de energía para cada una de las 8 760 horas de un año [23].

Además, este software para cada hora realiza una comparación según la carga eléctrica y térmica que el sistema entregaría en una hora y así comprobar si el sistema satisface a las cargas para todo el año, este software, también, tiene la capacidad de estimar los costos del ciclo de vida del sistema simulado, se contabiliza los siguientes costos: inversión, remplazo, operación y mantenimiento, combustibles e intereses, con lo que se visualizarían los flujos de energía horaria para cada uno de los componentes y así lograr un resumen del comportamiento de los costos anuales del sistema.

Luego de realizadas todas las posibles simulaciones, el software despliega una lista de sistemas que son factibles, estos sistemas, se encuentran ordenados por costo del ciclo de vida de cada uno de ellos, con lo cual, se encontrara el sistema con menor costo al principio de la lista o se recorrería la lista para ver todos los sistemas factibles, además, de llevar a cabo un análisis sensible para casi todos los datos que en el software se introduzcan y así evaluar más de un valor para cada dato de interés.

Este software llegaría a repetir el proceso de optimización para cada uno de los valores y datos de entrada de manera que examinaría los efectos del cambio de los distintos valores en los resultados para así lograr especificar tantas variables sensibles como, se requiera del mismo para así lograr interpretar los resultados gracias a la calidad gráfica que tiene Homer como principal funcionamiento del mismo, es por ellos que este software es funcional y didáctico con respecto a la puesta en marcha de las distintas simulaciones que se realizaría para llegar así a encontrar el sistema más óptimo y la viabilidad que ellos conlleva ubicarlo en la zona de estudio [24].

Se usa la herramienta Homer, para analizar la ubicación y parámetros del sistema que satisface la demanda pico de 3,06 MW en Mysuru, Karnataka, India, se usan paneles fotovoltaicos. Descubrieron que, con un análisis detallado y una buena selección del lugar de estudio, las características de estabilidad, se mejoraría al evitar grandes pérdidas de energía, así como, también, problemas de regulación de voltaje, sobrecargas o interrupciones del servicio [25].

De manera similar, Sen y Bhattacharyya utilizaron la herramienta para evaluar la conveniencia y relevancia de los sistemas híbridos para la generación de electricidad en poblaciones remotas en Palari, Chhattisgarh, India. Las tecnologías analizadas incluyeron pequeños sistemas de agua, sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas y generadores de biodiesel. Los resultados de la simulación muestran, que se optaría por un sistema híbrido de generación de electricidad con un precio de la energía de \$0.420/kWh [26].

Hafez y Bhattacharya analizaron el sistema híbrido para definir el diseño óptimo para minimizar los costos del ciclo de vida, se considera los impactos ambientales. Cuatro casos consideran diferentes tecnologías disponibles. El primer caso, se basa en el uso de un sistema generador diésel que pueda atender la demanda; el segundo incluye sistemas solares eólicos y fotovoltaicos, pequeñas centrales hidroeléctricas, packs de baterías y convertidores; el tercer caso combina el sistema diésel con el anterior en el tercero, los sistemas mencionados en los casos son mixtos, el último cuarto caso, se basa en las necesidades de una red de interconexión externa, se tiene en cuenta los costos de combustible, el impacto ambiental y los resultados obtenidos con las simulaciones de HOMER, concluyeron que el tercer escenario era el mejor en términos de rentabilidad [27].

El análisis realizado por Shezam es idéntico al anterior por lo, que se emplea esta herramienta y analiza un sistema híbrido fotovoltaico - diésel con unos valores entre 4,8 y 6,1 kWh / m² estos valores llegarían a generar 5,51 kWh / m² / día, además, de obtener un costo del diésel

alrededor de 0,49 centavos de dólar por litro, para lo cual las principales conclusiones, que se determinaron para este estudio realizado constan con el uso de la parte fotovoltaica que permite manejar la Ingeniería Mecánica y gracias a la revisión de los diferentes modelamientos, que se aplicarían los diferentes configuraciones híbridas con lo, que se disminuirá la dependencia de combustibles fósiles para, también, utilizar un banco de baterías con esto el costo no se reduce según la energía [28].

Otra simulación realizada con Homer es brindada por Himri indica un sistema híbrido conformado por la parte eólica y un motor generador a combustible ubicado en un pueblo aislado al sur oeste de Algeria, para ellos, se tomó un demanda de 250 kW con una variación del viento entre los 2 y 12 m / s y un valor del combustible de 0,162 centavos de dólar por litro, gracias a esto, se pudo evaluar que factibilidad tiene la planta para una velocidad del viento superior a 5,48 m / s con lo cual, se obtiene costos igualitarios o mayores, además, de una reducción en 500 toneladas el CO₂ del ambiente por año [29].

El principal proyecto de energía eléctrica en una zona rural de Chile específicamente en las Islas Chilote ubicadas en las costas del pacifico sur de dicho país, en un grupo de 40 islas 32 se encuentran sin poder conectarse a la red eléctrica de Chile por su lejanía a la misma, además, de que no cuentan con generación a base de combustibles es por ellos que a través de acuerdos entre los gobiernos de Chile y Estados Unidos, se trabajó para lograr implementar un sistema híbrido piloto en la isla Tac, una de las islas de Chilote. Este equipo realizó estudios de carga, recursos renovables, análisis económicos y todos estos resultados, se utilizaron para la simulación realizada en Homer, con lo cual, se evidencio que un sistema híbrido eólico – diésel que contiene un almacenamiento de baterías, este sistema es rentable ubicarlo en esta isla, suministrara de energía eléctrica a la misma. La amplitud de análisis que tiene el programa de simulación Homer fue de ayuda para lograr estudiar los impactos que tiene el costo del diésel en el diseño del sistema en lo que se trata a costos mínimos [24].

3.14 SOFTWARE MATLAB

Este software es de gran aceptación en ingenierías destinado a realizar cálculos técnicos científicos y de propósito general, en el mismo, se llegan a integrar operaciones de cálculo, visualización y programación donde, se visualizarían que la integración con el usuario emplea una notación de matemática clásica. La Figura 3.34 muestra el uso y las aplicaciones de Matlab Ra 2020.

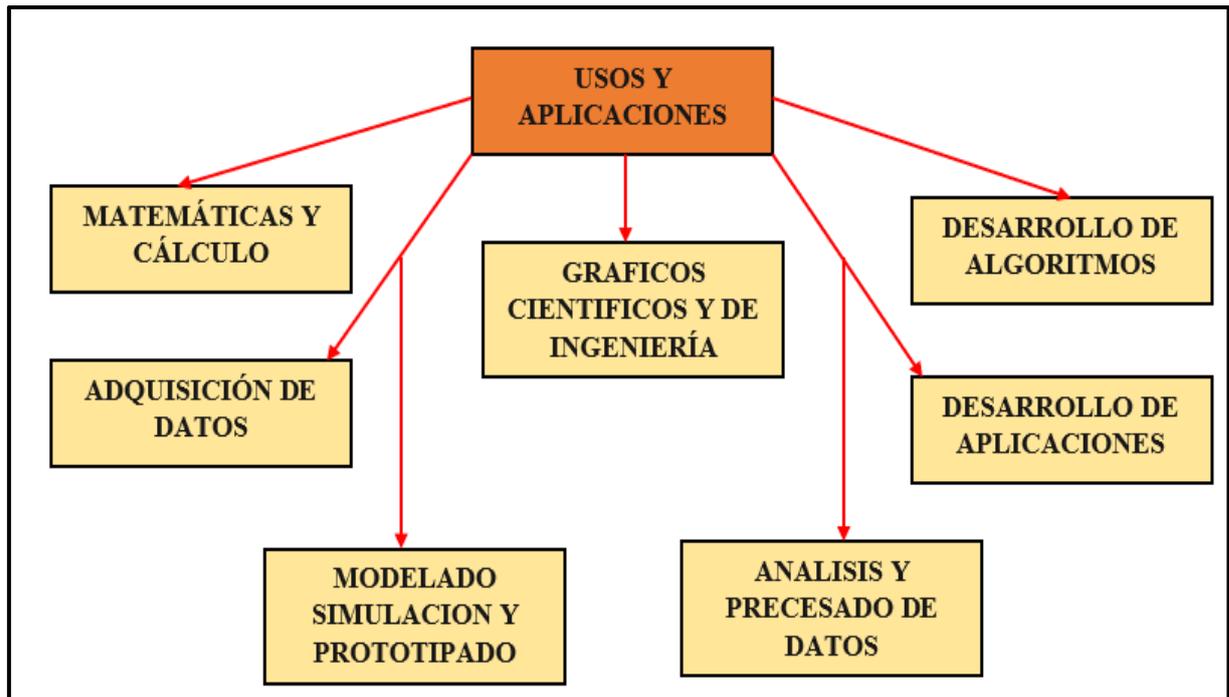


Figura 3.34. Uso y configuraciones del Matlab.

Matlab para trabajar requiere de una variable básica, es una matriz que no requiere ser dimensionado previamente en la declaración, la característica más interesante que tiene Matlab consiste en que el álgebra vectorial y matricial, se expresa con la misma sintaxis que las operaciones aritméticas escalares.

Entre las diversas funcionalidades que tiene este software las más importantes son:

- Entorno de Desarrollo
- La librería de Funciones de Matlab
- Gráficos
- El interfaz de Aplicación de Matlab

3.15 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Esta distribución ayuda y permite estudiar cómo se encuentra distribuida las fallas de un componente clave el cual deseamos controlar y que a través del mismo, se visualizarían que las fallas varían a través del tiempo y de lo que se considera tiempo normal de uso, este método no determina las variables que llegan a influir en la tasa de fallo y esta tarea quedara en manos del analista que utilice este método para las distintas funciones que cumpliría pero esta distribución facilitara la identificación de aquello, además, esta metodología es muy útil para

las empresas que desarrolla varios programas de mantenimiento preventivo de las instalaciones [30].

La función más fundamental para ello, se expresa a través de la Ecuación (3.30):

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (3.30)$$

Donde:

$F(T)$ = Distribución de Weibull [adimensional]

β = Es el parámetro de Forma [adimensional]

η = Es el parámetro de Escala [m/s]

γ = Es el parámetro de Localización [adimensional]

A continuación, mediante la Figura 3.35 se visualiza el comportamiento que tiene esta distribución para valores escogidos al azar, se mantiene el parámetro de localización constantes en 0 [31].

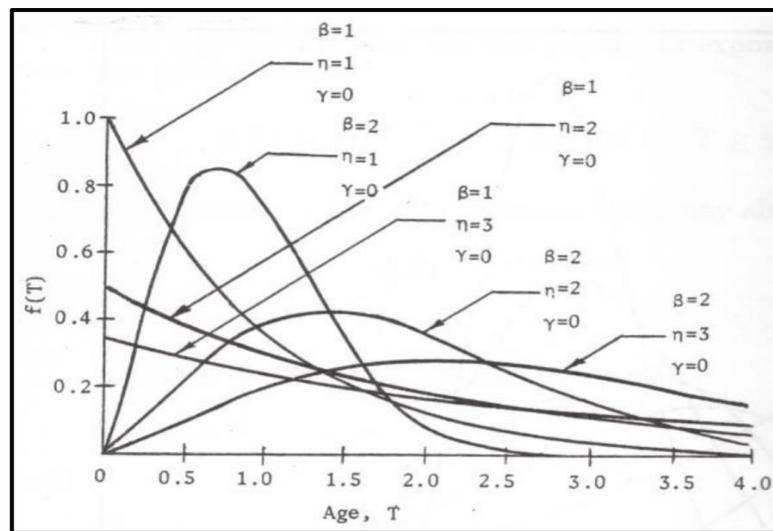


Figura 3.35. Distribución de Weibull [30].

3.15.1 Función de confiabilidad de Weibull

Dicha función es la razón entre la función de η con respecto a la distribución y la función, que se muestra a continuación es la confiabilidad dada por la Ecuación (3.31): [31].

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (3.31)$$

Donde:

$R(T)$ = Confiabilidad de Weibull

β = Es el parámetro de Forma [adimensional]

η = Es el parámetro de Escala [m/s]

γ = Es el parámetro de Localización [adimensional]

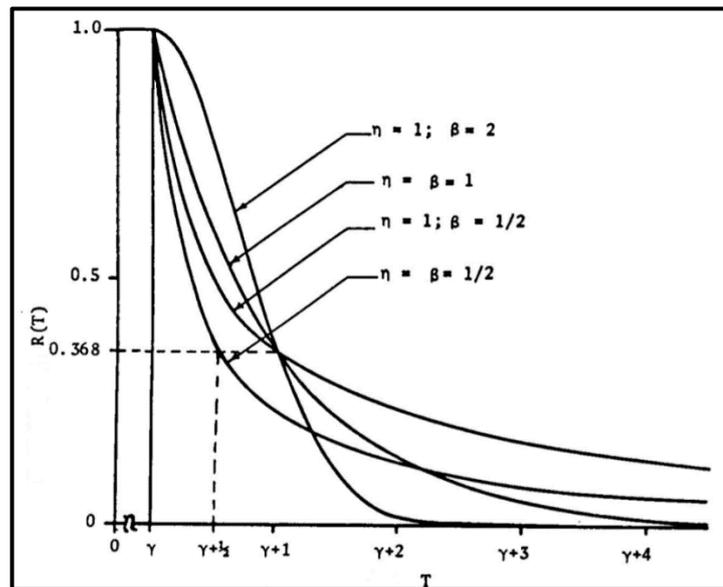


Figura 3.36. Función de confiabilidad de Weibull [30].

3.15.2 Función tasa de falla Weibull

Esta función, se llega a determinar con la Ecuación (3.32)

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{f(T)}{R(T)} \quad (3.32)$$

Donde:

$\lambda(t)$ = Tasa de falla de Weibull [%]

$R(T)$ = Confiabilidad de Weibull [adimensional]

$f(T)$ = Distribución de Weibull [adimensional]

β = Es el parámetro de forma [adimensional]

η = Es el parámetro de escala [m/s]

γ = Es el parámetro de localización [adimensional]

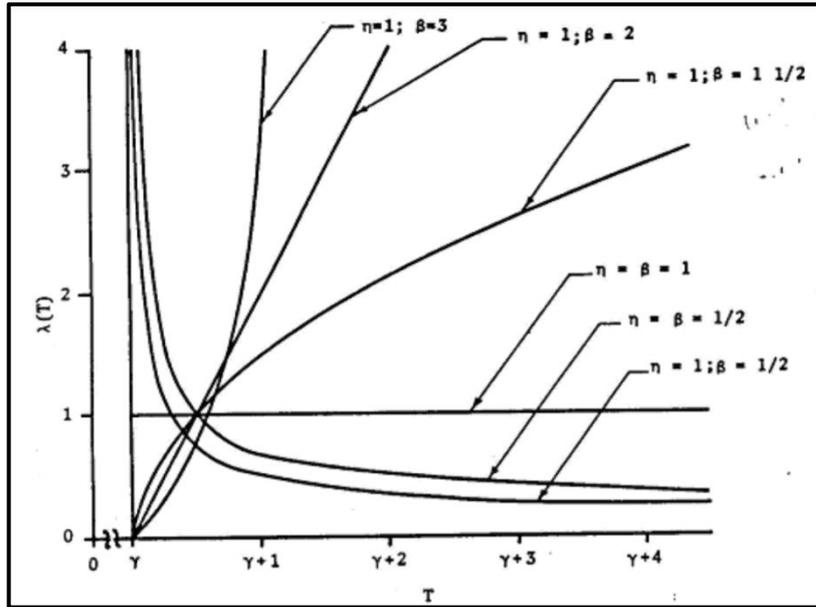


Figura 3.37. Función de tasa de falla de Weibull para varios valores de β [30].

También podemos indicar que, además, de la Ecuación (3.32), también, se llegaría a analizar mediante la función de fiabilidad la cual, se expresa en las Ecuaciones (3.33) y (3.34) además que en la Figura 3.37 se indica la tasa de falla para varios valores: [30].

$$\lambda(t) = -\frac{d[R(t)]}{dt} \quad (3.33)$$

Donde:

$$R(t) = \exp\left[-\int \lambda(t) dt\right] \quad (3.34)$$

Se sabe que:

$\lambda(t)$ = Es la tasa de fallos [%]

$R(t)$ =Es la fiabilidad [%]

t = Es el tiempo [seg]

En la Figura 3.38 se puede apreciar tres diferentes escenarios cada uno compuesto por varias curvas características de la densidad de probabilidad, tasa de fallos y la función acumulativa para distintos valores de los parámetros de forma que se pueden llegar a obtener mediante las distintas ecuaciones de la función de Weibull.

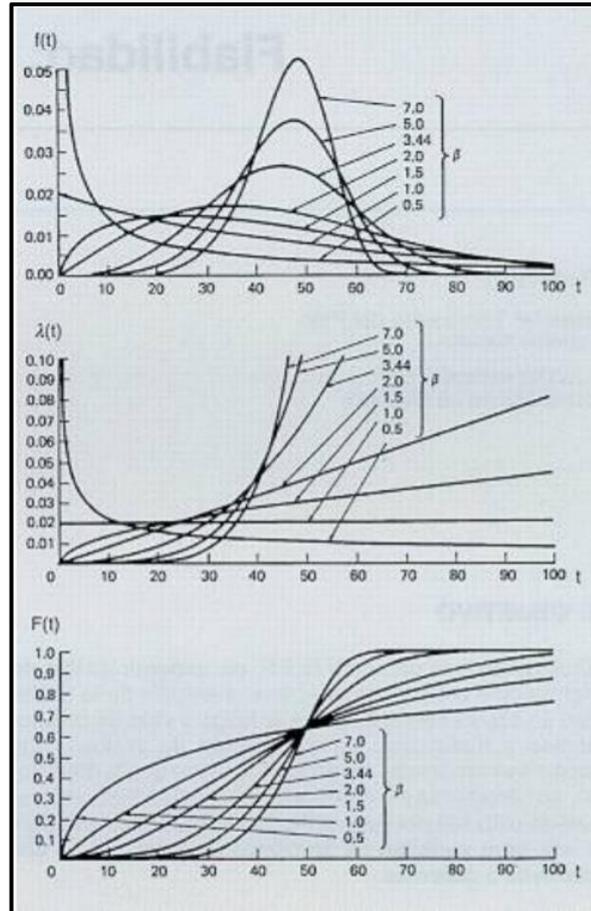


Figura 3.38. Variación de la densidad de probabilidad $f(t)$, tasa de fallos $\lambda(t)$ y la función acumulativa de fallos $F(t)$ en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma β [30].

3.16 HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA

Los histogramas son gráficas que muestran la distribución de una base de datos, además, se decide que es un tipo demasiado especial con la gráfica de barras que van pegada una a otra eso quiere indicar que no hay espacio alguno entre una barra y otra, los histogramas, también llegan a mostrar la acumulación o tendencia por lo que se mostraría, también la variabilidad o dispersión y la forma de la distribución que se llegaría a tener.

La Figura 3.39 muestra los tipos de histogramas, que se llegaría a utilizar si, se estudia una variable continua, los valores que se llegaría a agrupar en diferentes clases esto quiere indicar que los valores son continuos, además, se encuentran casos en los que los datos son cualitativos esto quiere decir que son datos no numéricos, ahí es preferible un diagrama de sectores [32].

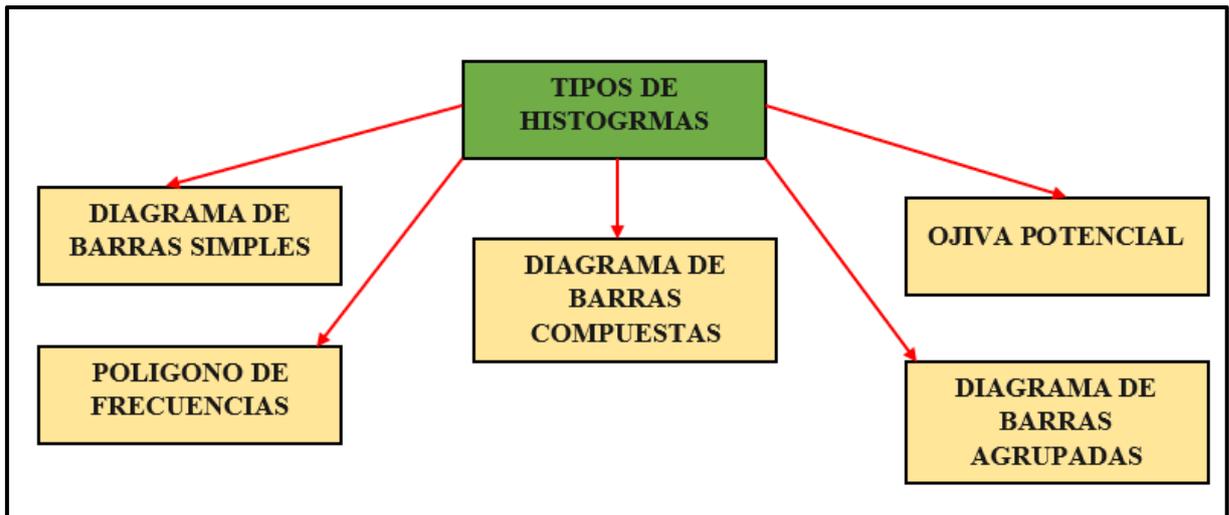


Figura 3.39. Tipos de histogramas.

3.16.1 Pasos para construcción de los histogramas

Paso 1: Se determina el rango de datos y esto sería creado según una fórmula matemática la cual es el dato mayor menos el dato menor.

Paso 2: Obtención de los distintos números de clases para varias formas, pero no son muy fiables entonces algunos autores indican que la mejor forma de realizar este paso se usa un criterio que sería aproximadamente a la raíz cuadrada del número de datos.

Paso 3: En este paso, se establece la longitud de clase esto quiere decir que es igual al rango dividido por el número de clases.

Paso 4: Aquí, se van a crear los intervalos de clase estos resultan de dividir el rango de los datos en relación a los resultados del paso 2, que se encontrarían en intervalos iguales.

Paso 5: Como último paso es realizar la gráfica del histograma, se basa en un gráfico de barras que son los intervalos de clases y la altura es la frecuencia de clases, además, los puntos medios de la base superior de los rectángulos, se obtiene el polígono de frecuencias.

Los histogramas representan la frecuencia relativa de los niveles de gris de las imágenes, que se llegan a generar, además, de las técnicas de modificación de los mismos los cuales son útiles para aumentar el contraste de los histogramas, que se encuentran concentrados [32].

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

En el presente tema propuesto los métodos de investigación, que se utilizaron para el desarrollo de la presente tesis son:

4.1.1 Método Deductivo - Inductivo

Este método fue utilizado para lograr un análisis individual de cada uno de los datos obtenidos de la central meteorológica de los meses que comprenden un año, se conoce así la radiación y velocidad del viento en la zona donde, se ubicaría la central híbrida solar - eólica.

4.1.2 Método Histórico

Este método fue utilizado, ya que la base de datos obtenida de la central meteorológica es del año 2020 el cual fue un año anterior al cual, se realiza el tema de investigación mediante el simulador Homer Pro 3.14.2, se analizó cada uno de los recursos energéticos.

4.1.3 Método Descriptivo

Este método ayudo a determinar los porcentajes de cada uno de los recursos energéticos existentes en la zona para que aporten a la central híbrida solar - eólica con el fin de lograr un sistema adecuado y un correcto aprovechamiento de los recursos renovables, que se encuentran en la zona como son velocidad del viento y radiación solar.

4.1.4 Método Analítico - Sintético

La información sobre los distintos sistemas híbridos y cada uno de los recursos energéticos no convencionales que forman parte de la fundamentación teórica fueron recopilados mediante la utilización de este método, se indago en fuentes bibliográficas y artículos científicos, que permite determinar métodos de análisis, procedimientos y técnicas para la simulación.

4.2 TIPOS DE INVESTIGACIÓN

4.2.1 Investigación Bibliográfica

La presente investigación, se la realizó mediante la búsqueda de varias fuentes bibliográficas, así como artículos científicos, revistas, libros, repositorios de instituciones educativas de tercer nivel nacionales e internacionales, así como, también, páginas webs, se adquiere información

necesaria para la sustentación teórica, metodológica y análisis de los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas.

4.2.2 Investigación Descriptiva

Este tipo de investigación, se utilizó para detallar los histogramas de frecuencia, así como, también, la distribución de Weibull por medio de la rosa de los vientos, con el fin de interpretar de manera entendible la base de datos recolectada por la central meteorológica de los recursos renovables no convencionales existentes en la zona.

4.3 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

4.3.1 Investigación Cualitativa

Mediante esta técnica de investigación, se logró comprender e interpretar la base de datos recogida por la estación meteorológica la cual describe varios escenarios depende del mes y del recurso energético disponible en el lugar de estudio.

En la investigación cualitativa, se utilizó la observación indirecta en la que se llegó a conocer los parámetros de radiación solar y velocidad del viento recogidos y almacenados por la central meteorológica.

4.4 INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Los instrumentos de investigación que se utilizó en el presente tema de investigación son:

Base de Datos: Se recogieron y almacenaron los datos gracias a la estación meteorológica ubicada en la zona para así extraer datos de la velocidad del viento la dirección del mismo y la radiación solar.

4.5 INSTRUMENTOS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO

Los instrumentos de simulación que se utilizó en el presente tema de investigación son:

Simulador WRPLOT: El simulador permitió obtener la distribución de Weibull a través de la rosa de los vientos y la frecuencia de distribución del viento.

Simulador Homer: Determinó los porcentajes de aportación de cada una de las energías renovables no convencionales del sistema híbrido, que se desea formar.

Simulador Matlab: Permitió determinar la distribución de Weibull, además, del potencial eólico existente en la zona.

Simulador PVsyst: El simulador determinó el dimensionamiento y análisis de los datos de los sistemas fotovoltaicos.

4.6 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Para determinar los porcentajes y parámetros de cada uno de los recursos energéticos renovables no convencionales y su posterior simulación en los simuladores antes estipulados, se utilizó el siguiente método como se describe en el diagrama de flujo presentado en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3:

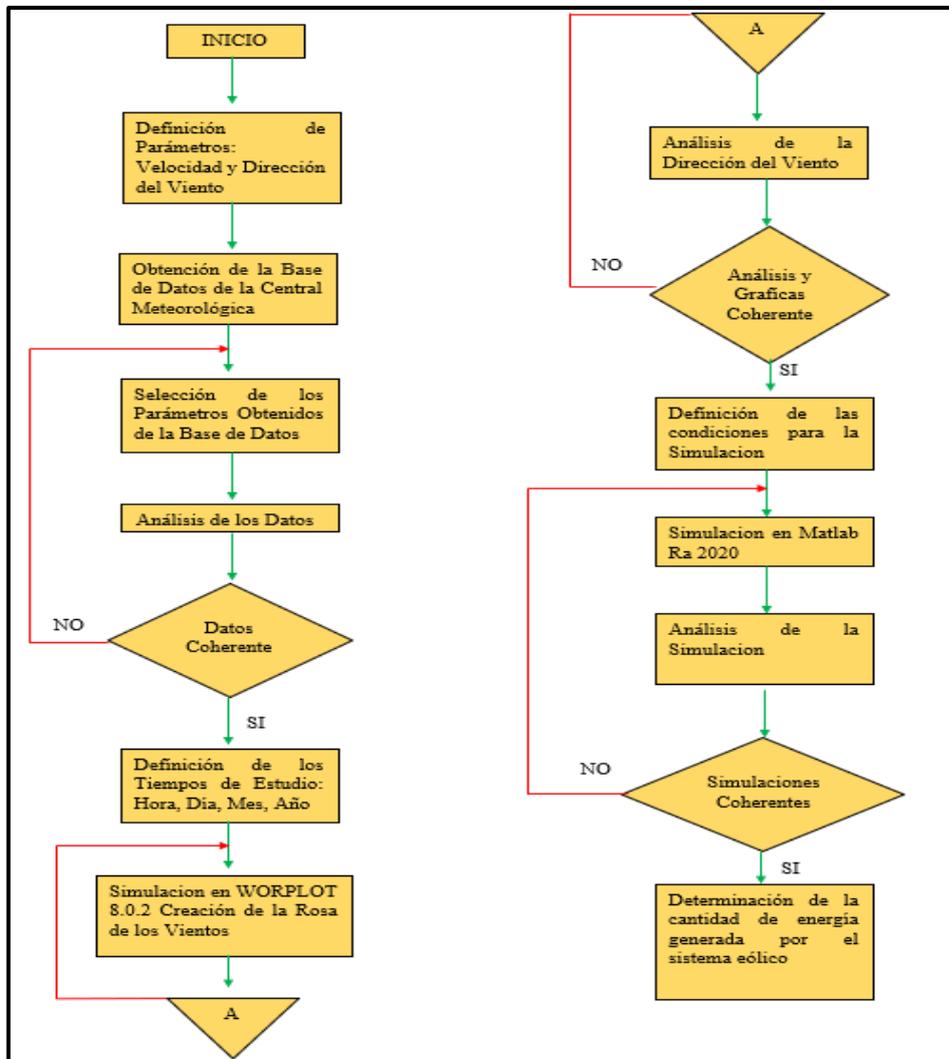


Figura 4.1. Diagrama de flujo sistema eólico.

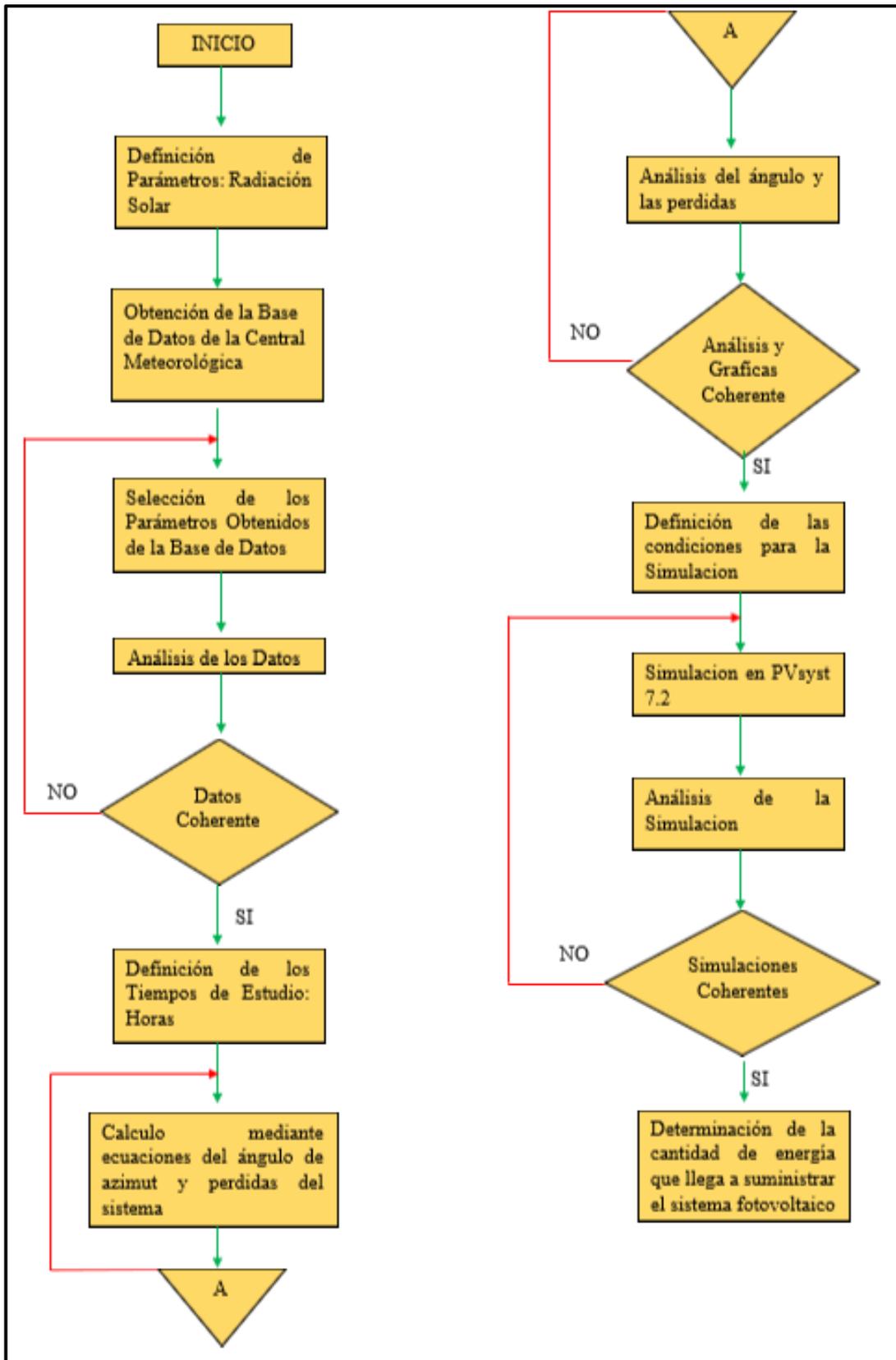


Figura 4.2. Diagrama de flujo sistema fotovoltaico.

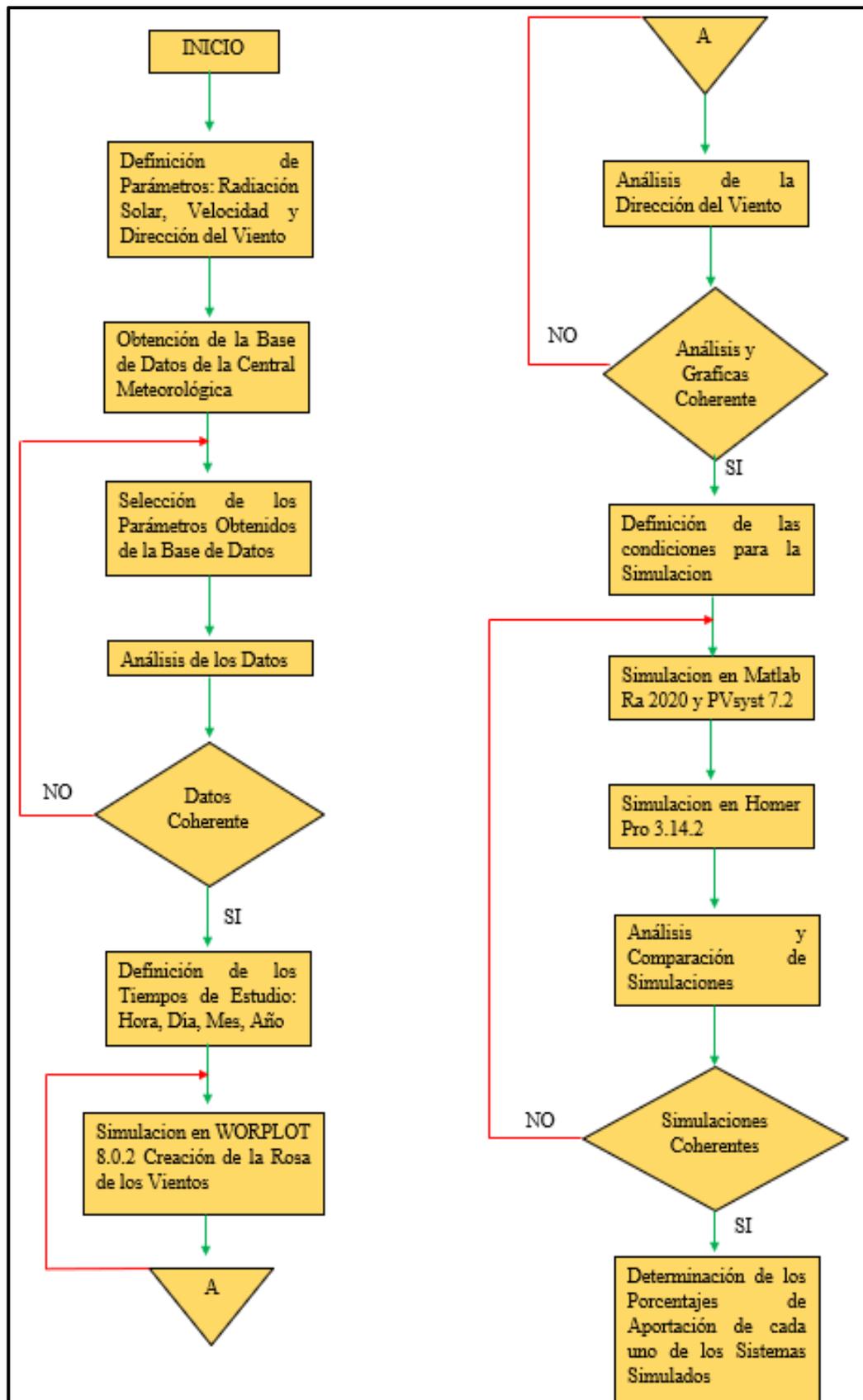


Figura 4.3. Diagrama de flujo sistema híbrido.

4.6.1 Etapa 1.- Determinación de los parámetros

Los autores J. M. Ramos Herrera Sergio; Magaña Villegas Elizabeth y Carrera Velueta con el tema “MANUAL PARA EL MANEJO DE SOFTWARE ESPECIALIZADO WRPLOT” para lograr determinar la distribución de Weibull, se obtendrían los parámetros de velocidad del viento y dirección del mismo los cuales permitieron determinar el potencial eólico existente, además, del parámetro de radiación solar los cuales ayudan a encontrar la cantidad de energía solar disponible en el sector. La Figura 4.4 muestra la base de datos para este análisis [33].

Time	Hum High	Dew Point	Hum (Day)	Lo Hum (Day)	Hq Baro Avg	Baro Low	Baro High	Baro (Day)	Lo Baro (Day)	Hq Windspeed	Wind Direct	Gust	Gust (Day)	Dir Lev	Wetness	Solar Radiat	Station Volta	UV
1/1/2020 0:00	86.1833333	9.6933333	85.2666667	88.15	720.426667	720.49	720.428333	720.351667	720.908333	3.28833333	164.966667	4.59666667	171.816667			0	6.6	
1/1/2020 1:00	81.9	8.86	81.0333333	88	719.981667	720.031667	719.97	719.933333	720.9	5.65333333	117.35	7.76666667	112			0	6.52833333	
1/1/2020 2:00	85.05	9.1333333	81	88	719.441667	719.488333	719.423333	719.406667	720.9	3.04333333	192.566667	3.99666667	112			0	6.5	
1/1/2020 3:00	87.7333333	9.4233333	81	88.1666667	719.246667	719.23	719.203333	719.2	720.9	0.265	204.916667	0.56666667	112			0	6.5	
1/1/2020 4:00	88.2	9.31666667	81	89	719.328333	719.345	719.295	719.2	720.9	2.02166667	202	2.68666667	112			0	6.5	
1/1/2020 5:00	89.5	9.47	81	89.7	719.776667	719.798333	719.773333	719.2	720.9	1.61166667	161.016667	2.13	112			0	6.49333333	
1/1/2020 6:00	90.1833333	9.64	81	90.2166667	720.22	720.276667	720.215	719.2	720.9	2.55666667	193.6	3.31833333	112			3.35	6.41333333	
1/1/2020 7:00	91.6333333	9.83	81	91.7666667	720.936667	720.97	720.921667	719.2	721.045	2.88166667	240.35	4.28666667	112			54.35	6.465	
1/1/2020 8:00	85.3	9.8833333	80.9166667	92	721.39	721.458333	721.403333	719.2	721.5	2.295	227.2	3.715	112			167.9	6.84333333	
1/1/2020 9:00	77.1833333	9.6483333	77.0333333	92	721.515	721.563333	721.515	719.2	721.691667	5.96333333	186.2	8.97166667	112			234.366667	7.145	
1/1/2020 10:00	70.3666667	9.48166667	70.8833333	92	721.281667	721.348333	721.285	719.2	721.7	6.19666667	166.966667	9.69	112			326.6	7.2	
1/1/2020 11:00	67.2	9.4183333	65.7333333	92	720.928333	720.961667	720.911667	719.2	721.7	8.57333333	130.833333	12.1983333	112			344.95	7.15666667	
1/1/2020 12:00	74.6	10.11	65	92	720.418333	720.476667	720.408333	719.2	721.7	7.20333333	156.35	10.3583333	112			281.333333	7.13333333	
1/1/2020 13:00	67.5666667	10.3733333	64.5833333	92	719.605	719.628333	719.588333	719.2	721.7	3.13	185.55	5.445	112			287.316667	7.13166667	
1/1/2020 14:00	77.0166667	10.8633333	64	92	718.868333	718.908333	718.846667	718.8	721.7	10.1866667	270.466667	14.8383333	280.75			200.85	7.1	
1/1/2020 15:00	80.6	10.865	64	92	718.428333	718.458333	718.41	718.391667	721.7	6.59333333	182.333333	9.03	337			193.55	7.08666667	
1/1/2020 16:00	73.6333333	10.41	64	92	718.103333	718.185	718.088333	718	721.7	9.38166667	128.933333	13.2383333	337			154.383333	7.04666667	
1/1/2020 17:00	69.6333333	9.09	64	92	718.366667	718.4	718.34	718	721.7	14.6416667	104.433333	20.6266667	183.25			61.7166667	6.95666667	
1/1/2020 18:00	70.55	8.6383333	64	92	718.78	718.833333	718.78	718	721.7	14.215	93.85	20.2416667	112			3.15	6.835	
1/1/2020 19:00	72.4666667	8.525	64	92	719.385	719.435	719.373333	718	721.7	12.1616667	113.65	16.92	112			0	6.75333333	
1/1/2020 20:00	72.4666667	8.525	64	92	720.225	720.273333	720.203333	718	721.7	4.46166667	126.25	5.76	112			0	6.7	
1/1/2020 21:00	79.8	8.995	64	92	720.831667	720.858333	720.808333	718	721.7	6.245	129.5	7.99833333	112			0	6.7	
1/1/2020 22:00	82.1333333	9.2383333	64	92	720.963333	721.008333	720.938333	718	721.7	4.54	148.366667	5.70166667	112			0	6.645	
1/1/2020 23:00	83.1666667	8.9983333	64	92	720.898333	720.935	720.868333	718	721.7	5.23666667	198	6.89166667	112			0	6.6	
1/2/2020 0:00	80.6	9.03166667	86.6166667	89.6833333	720.375	720.425	720.371667	720.293333	720.716667	4.08333333	191.3	5.03833333	157.75			0	6.90666667	
1/2/2020 1:00	92.5833333	8.47166667	87	92.5833333	719.566667	719.611667	719.546667	719.531667	720.7	3.82666667	174.933333	4.79166667	202			0	6.51666667	
1/2/2020 2:00	93.35	7.98	87	94.8833333	719.013333	719.056667	719.023333	718.956667	720.7	7.085	194.6	8.40333333	202			0	6.5	
1/2/2020 3:00	91.6166667	7.9033333	87	95	718.96	718.996667	718.963333	718.853333	720.7	5.43666667	152.666667	6.63666667	202			0	6.5	

Figura 4.4. Base de datos descargada de la central meteorológica.

4.6.2 Etapa 2.- Recolección base de datos

Los autores mencionados en la etapa uno con el tema “MANUAL PARA EL MANEJO DE SOFTWARE ESPECIALIZADO WRPLOT” los tiempos de registro serían por hora del día por lo cual, de la base de datos otorgada por el Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi, se procedió a descargar los mismos de un año los cuales están comprendidos en horas del día, además se aprecia la velocidad y dirección del viento, así como también la radiación solar como se aprecia en la Figura 4.5. [33].

Time	Windspeed	Wind Direction	Solar Radiation Avg
1/1/2020 0:00	3.28833333	164.966667	0
1/1/2020 1:00	5.65333333	117.35	0
1/1/2020 2:00	3.04333333	192.566667	0
1/1/2020 3:00	0.265	204.916667	0
1/1/2020 4:00	2.02166667	202	0
1/1/2020 5:00	1.61166667	161.016667	0
1/1/2020 6:00	2.55666667	193.6	3.35
1/1/2020 7:00	2.88166667	240.35	54.35
1/1/2020 8:00	2.295	227.2	167.9
1/1/2020 9:00	5.96333333	186.2	234.366667
1/1/2020 10:00	6.19666667	166.966667	326.6
1/1/2020 11:00	8.57333333	130.833333	344.95
1/1/2020 12:00	7.20333333	156.35	281.333333
1/1/2020 13:00	3.13	185.55	287.316667
1/1/2020 14:00	10.1866667	270.466667	200.85
1/1/2020 15:00	6.59333333	182.333333	193.55
1/1/2020 16:00	9.38166667	128.933333	154.383333
1/1/2020 17:00	14.6416667	104.433333	61.7166667
1/1/2020 18:00	14.215	93.85	3.15
1/1/2020 19:00	12.1616667	113.65	0
1/1/2020 20:00	4.46166667	126.25	0
1/1/2020 21:00	6.245	129.5	0
1/1/2020 22:00	4.54	148.366667	0
1/1/2020 23:00	5.23666667	198	0
1/2/2020 0:00	4.08333333	191.3	0
1/2/2020 1:00	3.82666667	174.933333	0
1/2/2020 2:00	7.085	194.6	0

Figura 4.5. Datos utilizados para el dimensionamiento del sistema híbrido.

4.6.3 Etapa 3.- Simulación en WRPLOT 8.0.2

Para encontrar las constantes mencionadas en la etapa dos, se crearía un Excel el cual, se guía con la base de datos depurada, en este Excel, se separaría el año, mes y el día, además, de las horas en las cuales se ha tomado como dato la dirección y velocidad del viento posteriormente, se importa los datos del Excel al software WRPLOT 8.0.2 estos datos son transformados en un blog de notas, los datos de velocidad y dirección del viento fueron tomados por horas del día en meses que conforman un año.

4.6.4 Etapa 4.- Análisis de la dirección del viento

Mediante los parámetros registrados en la etapa dos, se procedió a graficar la rosa de los vientos en software WRPLOT 8.0.2, el mismo que permitió determinar frecuencia constante, distribución de frecuencia, rosa de los vientos y finalmente la clase de la distribución de la frecuencia del viento en la que indica los porcentajes con respecto a la velocidad del viento en m / s como se muestra en la Figura 4.6.

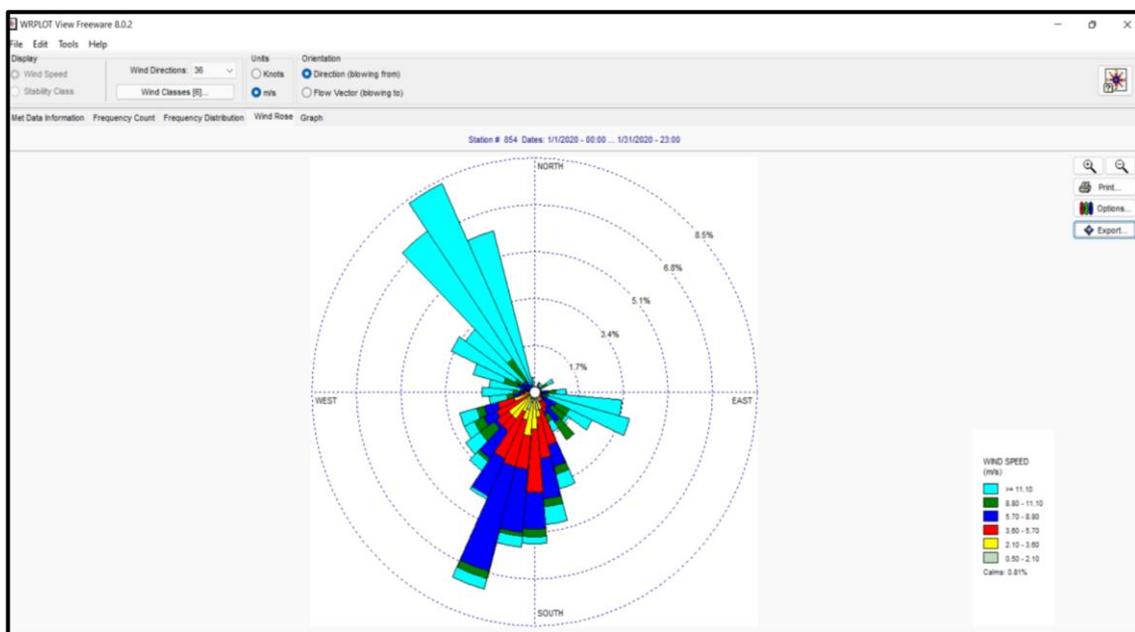


Figura 4.6. Rosa de los vientos enero 2020.

4.6.5 Etapa 5.- Análisis de la distribución de Weibull

Mediante Matlab Ra 2020, se determinó la distribución de Weibull la que describió con qué frecuencia, se llega a repetir una cierta velocidad del viento en un intervalo de tiempo.

4.6.6 Etapa 6.- Simulación en MATLAB Ra 2020

El presente programa de simulación permite determinar el potencial eólico y la cantidad de energía existente en la zona a la cual, se basa la presente investigación.

4.6.7 Etapa 7.- Simulación en PVsyst 7.2

En esta etapa el programa utilizado ayudo para determinar los datos de horas solares pico y temperatura existente en la zona, además, del análisis para conocer qué cantidad de energía eléctrica llegaría a generar nuestro sistema fotovoltaico para entregar a la red eléctrica.

4.6.8 Etapa 8.- Simulación en HOMER Pro 3.14.2

El presente programa ayudo a determinar los porcentajes de cada uno de los recursos energéticos y su aportación al sistema híbrido, que se plantea como objeto base de esta investigación, además, sirvió para encontrar el sistema ideal para ubicarlo en la zona de estudio.

4.6.9 Etapa 9.- Análisis Económico

Esta etapa es de suma importancia por lo que indica valores referenciales en la inversión inicial y otros costos como, se muestra en la Tabla 5.19. Además, ayudo para determinar el VAN, TIR y PRI.

4.6.10 Etapa 10.- Comparación de los Datos Simulados

En este apartado, se analizó y se comparó los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas en los simuladores antes mencionados con el fin de determinar los porcentajes de aportación de cada uno de los sistemas de energías renovables no convencionales a la planta de generación híbrida, que se ubicó en la zona de estudio a la cual, se refiere este tema de investigación.

4.6.11 Etapa 11.- Porcentajes de Aportación por Recurso

Finalmente, se llegó a obtener los porcentajes de aportación del sistema fotovoltaico y del sistema eólico hacia la planta híbrida, para así identificar la energía eléctrica que suministra la planta híbrida mediante los recursos disponibles en la zona.

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 SISTEMA EÓLICO

En la generación a base de energía eólica es fundamental considerar la dirección y velocidad del viento, estos parámetros se utilizaron al momento de definir la orientación de la máquina y así poder elegir el aerogenerador correcto, se tomaron un registro de los parámetros antes mencionados para el año 2020.

La evaluación de la generación de energía eléctrica, se ubica en las coordenadas $0^{\circ} 47' 38''$ S – $78^{\circ} 37' 37''$ O, con un espacio de tres hectáreas es decir $30\ 000\ [m^2]$ como, se ve en la Figura 5.1.

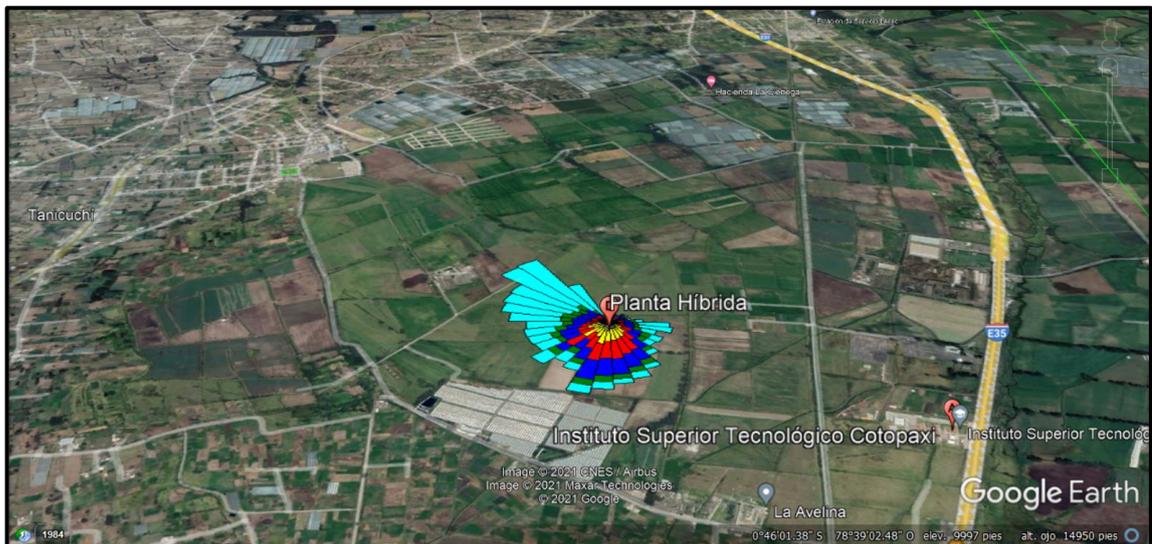


Figura 5.1. Lugar de emplazamiento.

5.1.1 Rosa de los vientos

Es un gráfico que permite observar la rapidez y dirección del viento en el área determinada, los anillos forman la longitud de radio de la rosa de los vientos estos indicaron la frecuencia acumulada en la zona, considera el cero como centro de la misma y así lograr incrementar a medida que se acerca a los exteriores, además, de que cada uno de ellos se dividen en secciones.

Con esto, se pudo indicar que cada color mostrado en la rosa de los vientos esta conllevado al rango que tiene la velocidad del viento, es común utilizar dieciséis direcciones. Las cuales, se describieron de la siguiente forma, la dirección norte representa 0 o 360 grados, el este

representa 90 grados, el sur representa 180 grados y el oeste representa 270 grados, siempre se lee en forma horaria.

En la Figura 5.1, se muestra la rosa de los vientos sobre la zona de estudio, donde, se ha considerado las direcciones que representan los angulares provenientes de diferentes posiciones.

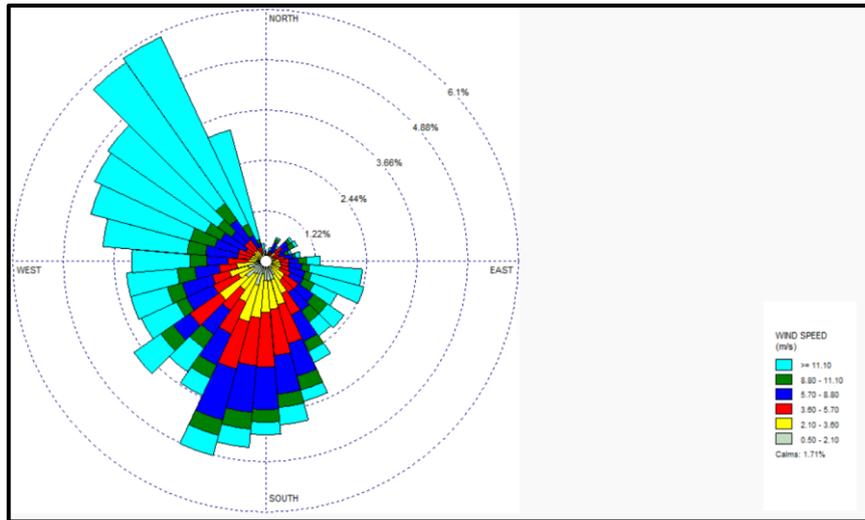


Figura 5.2. Rosa de los vientos dirección de donde proviene el viento.

En la Figura 5.2 se observa que la mayoría del tiempo sopla el viento al Noroeste y Suroeste, los vientos que soplan al Noroeste contienen mayor energía, además, de mayor incidencia de frecuencia que los que soplan al Suroeste.

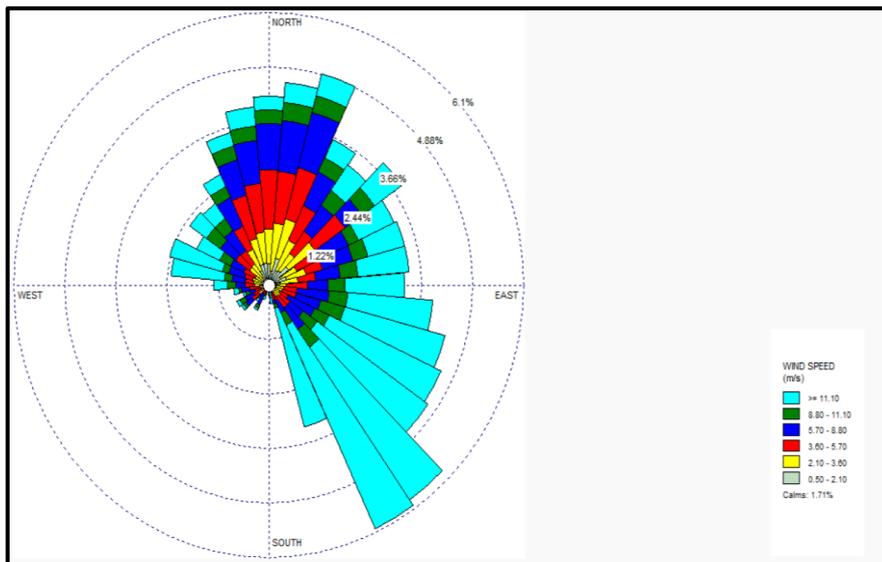


Figura 5.3. Rosa de los vientos dirección hacia donde se dirige el viento.

En la Figura 5.3, se evidencia que la mayoría del tiempo sopla el viento al Sureste y Noreste, los vientos que soplan al Sureste contienen mayor energía, además, de mayor incidencia de frecuencia que los que soplan al Noreste.

5.1.2 Emplazamiento

La presente investigación tiene como objetivo determinar la energía eléctrica que genera nuestra planta eólica, se toma en consideración los parámetros de velocidad del viento y dirección del mismo.

Esto, se logró por el registro obtenido que indico la rapidez del viento en [m / s] de las horas anuales para el año 2020, es decir 8 784 [h], este año fue bisiesto, para ello, también, se utiliza el método de Weibull $p(v)$ la cual se encuentra expresado por la Ecuación (5.1) y (5.2).

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5.1)$$

Y= La función de Weibull

$$F(v_i) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5.2)$$

Donde:

$p(v)$ = Función del método de Weibull

k = Factor de forma [adimensional]

c = Factor de escala [m/s]

v = Velocidad del viento [m/s]

$F(v_i)$ = Función de la distribución acumulada

5.1.3 Técnica de Mínimos Cuadrado (TMC)

Para la obtención de la energía, se tomó en consideración el cálculo de los coeficientes de Weibull y para ello uno de los métodos que se utiliza con frecuencia es el método de mínimos cuadrados con él que se obtiene mejores resultados para muestras de gran tamaño este método, también, es conocido por sus siglas en inglés (LSM) Least Squares Technique, que ayuda a calcular los parámetros (k) factor de forma y (c) factor de escala, en las Ecuaciones (5.3) y (5.4), se analizan los factores mencionados anteriormente.

$$k = \frac{n * \sum_{i=1}^n \ln v_i \ln[-\ln(1 - F(v_i))] - \sum_{i=1}^n \ln v_i \sum_{i=1}^n \ln[-\ln(1 - F(v_i))]}{n * \sum_{i=1}^n \ln v_i^2 - (\sum_{i=1}^n \ln v_i)^2} \quad (5.3)$$

$$e^{\left(\frac{k * \sum_{i=1}^n \ln v_i - \sum_{i=1}^n \ln[-\ln(1 - F(v_i))]}{n * k}\right)} \quad (5.4)$$

Donde:

$F(v_i)$ = Función de la distribución acumulada

v_i = Velocidad de viento para cada hora [m/s]

n = Número total de intervalos

5.1.4 Tratamiento de los parámetros de Weibull

El cálculo de los coeficientes de Weibull es decir los parámetros de c y k llegarían a determinarse por un ajuste de mínimos cuadrados, que se realiza a través de la distribución acumulada las cuales se encuentra descritas en la Ecuación (5.3) y (5.4), al aplicarlo dos veces el logaritmo neperiano a la Ecuación (5.2), se obtiene la Ecuación (5.5).

$$\ln(1 - F(v_i)) = -\left(\frac{v}{c}\right)^k \rightarrow y_i = \ln[-\ln(1 - F_i)] \quad (5.5)$$

Donde:

y_i = Coeficiente de Weibull

v_i = Velocidad de viento para cada hora [m/s]

F_i = Frecuencia relativa

Además, para lograr determinar los coeficientes restantes para la distribución de Weibull, se aplicaría las Ecuaciones (5.6), (5.7) y (5.8).

$$x_i = \ln(v_i) \quad (5.6)$$

$$B = \sum f_i * y_1 - k \sum f_i * x_i \quad (5.7)$$

$$c = e^{-\frac{B}{k}} \quad (5.8)$$

Donde:

x_i = Coeficiente de Weibull [adimensional]

f_i = Frecuencia relativa [adimensional]

γ_i = Coeficiente de Weibull [adimensional]

v_i = Velocidad de viento para cada hora [m/s]

Los pasos a seguir para un buen tratamiento de un conjunto de 8 784 datos anuales, es el siguiente proceso estadístico.

- La agrupación de los datos, se establece mediante la frecuencia de cada grupo de datos mismos que se encuentran dados por un límite máximo y mínimo los cuales exigen un grado de precisión el cual no excedería de 3 [m / s] de cada intervalo de clase.
- Para lograr determinar el total de intervalos o clases, se realiza en función del número de datos como se muestra en la Ecuación (5.9).

$$N_c = 1 + 3,322 * \log_{10} N \quad (5.9)$$

Donde:

N_c = Número de clases

N = Es el número de datos

Se reemplaza en la Ecuación (5.9), se encuentra que el número de intervalos para nuestra base de datos es 15.

$$N_c = 1 + 3,322 * \log_{10} 8\,784$$

$$N_c = 14,1009 \approx 15$$

Finalmente, para la obtención de la amplitud de cada clase, se toma en cuenta la siguiente Ecuación (5.10).

$$\text{Amplitud} = \left[\frac{(\text{Limite Max.} - \text{Limite Min.})}{8\,784} \right] \quad (5.10)$$

Donde:

Lim. Max = Límite superior, a partir de los 8 784 datos.

Lim. Min =Límite inferior, a partir de los 8 784 datos.

En la Tabla 5.1, se muestra los valores obtenidos al reemplazar la Ecuación (5.10)

Tabla 5.1. Parámetro de amplitud

Número de Clase (Nc)	Números de Datos	Limite Max.	Limite Min	Amplitud
15	8 784	43,25	0	2,88 \approx 3

En la Tabla 5.2 y la Figura 5.4, se incluyó el número de intervalos, además, de la amplitud de cada clase y finalmente la frecuencia absoluta, estos valores son tomados según la altura a la que se tomaron los datos.

Tabla 5.2. Frecuencia absoluta.

Intervalo	Frecuencia Absoluta
3	1 460
6	1 939
9	1 448
12	1 031
15	842
18	732
21	565
24	421
27	216
30	95
33	26
36	5
39	2
42	1
45	1

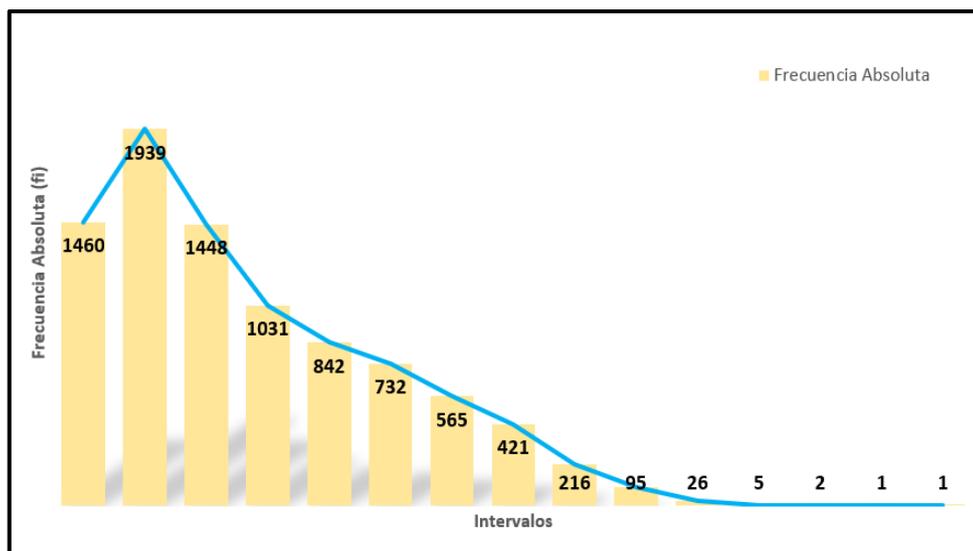


Figura 5.4. Frecuencia absoluta.

En la Tabla 5.3, se calculó el número de datos, que indico cuantos datos se tienen entre los intervalos creados, la frecuencia relativa, es la que se realiza con la frecuencia de cada intervalo dividido por el número de datos, la frecuencia acumulada, para calcular esta frecuencia se toma el primer valor de la frecuencia relativa para el primer intervalo y se suma la frecuencia relativa de la interacción anterior para el segundo valor y así sucesivamente.

Tabla 5.3. Frecuencia relativa y acumulada

Intervalo	Número de Datos	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada
3	1 460	0,166211293	0,166211293
6	1 939	0,220742259	0,386953552
9	1 448	0,164845173	0,551798725
12	1 031	0,117372495	0,669171221
15	842	0,095856102	0,765027322
18	732	0,083333333	0,848360656
21	565	0,064321494	0,912682149
24	421	0,047928051	0,960610244
27	216	0,024590164	0,985200364
30	95	0,010815118	0,996015483
33	26	0,002959927	0,998975471
36	5	0,000569217	0,999544627
39	2	0,000227687	0,999772313

42	1	0,000113843	0,999886157
45	1	0,000113843	1
Total	8 784	1	

En la Figura 5.5 indica la fracción de horas para los que la velocidad media diaria es menor o igual a un valor, lo que indica que tenemos un 91,26 %. Quiere decir que se obtiene un total de 8 016,28 horas de las 8 784 horas consideradas, en la que la velocidad del viento es menor o igual a 21 [m/s].

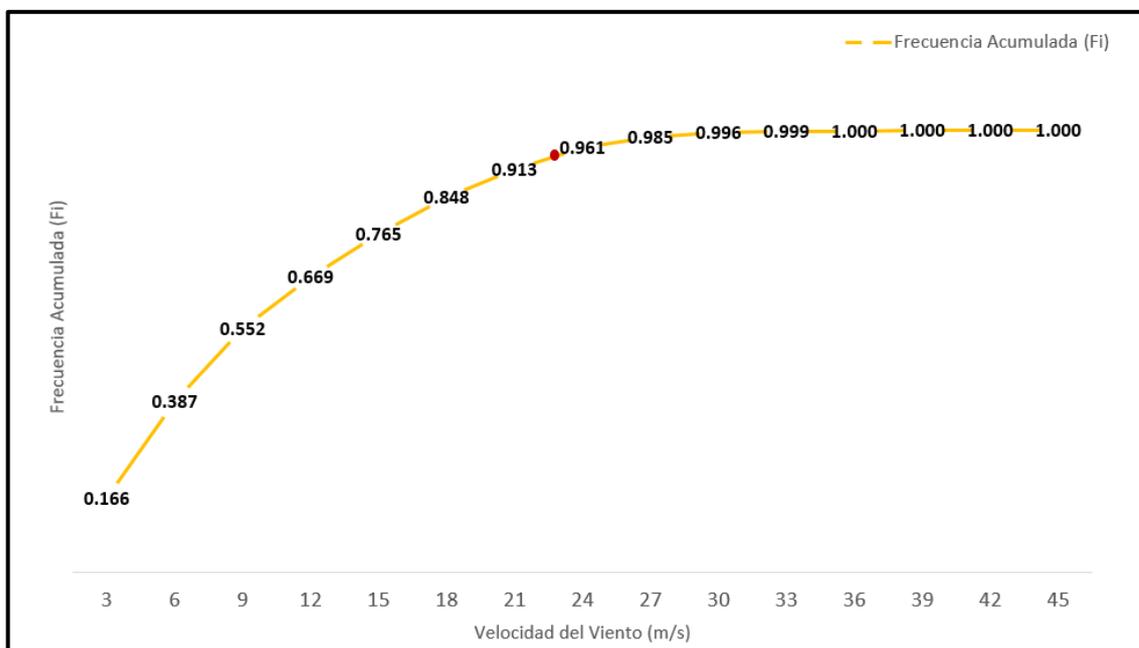


Figura 5.5. Frecuencia acumulada.

En la Figura 5.6 muestra los valores de la frecuencia relativa que corresponde al centro de la clase, mientras que las frecuencias acumuladas representan los límites superiores de las mismas. A continuación, un pequeño ejemplo. La cuarta clase le corresponde una frecuencia relativa $f_i=0,1173$, para una velocidad de 12 [m/s], mientras que al cuarto valor de la frecuencia acumulada (F_i)= 0,6692, se le hace corresponder el límite superior de la clase es decir 15 [m/s].

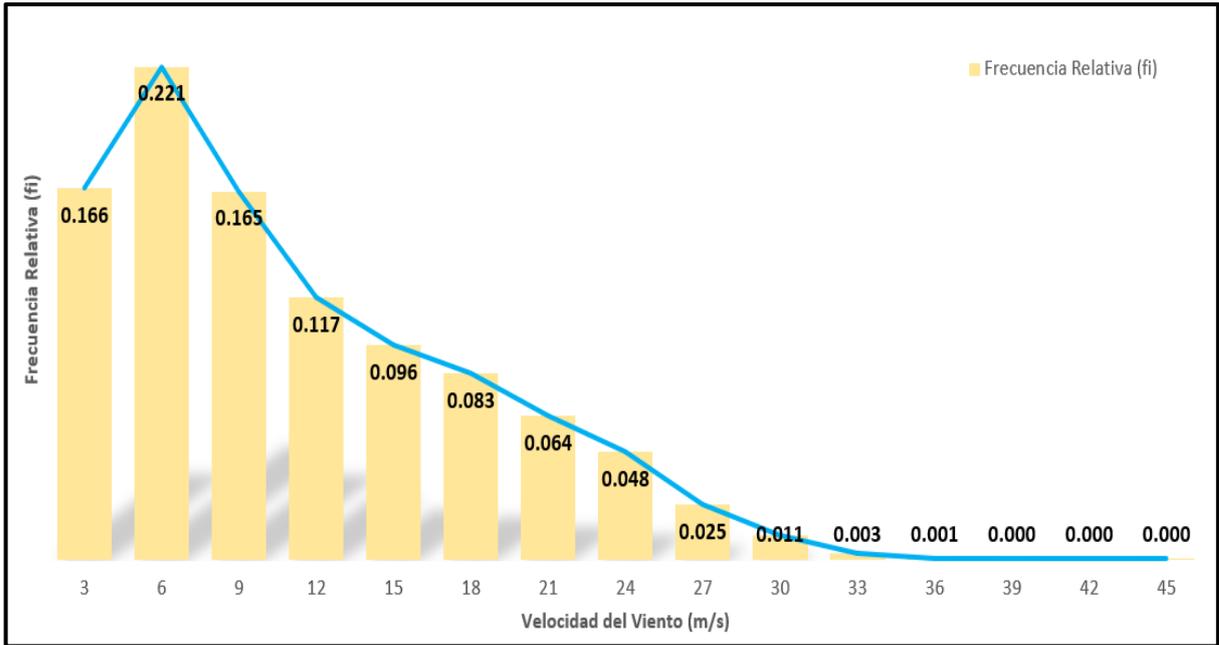


Figura 5.6. Frecuencia relativa.

En la Figura 5.7, se aprecia la función de Weibull que describe de manera confiable la distribución de la velocidad del viento. En la que se evidencia la velocidad máxima del viento corresponde a 3,73 m/s, esta velocidad a lo largo del año se repite con una frecuencia de 38 %.

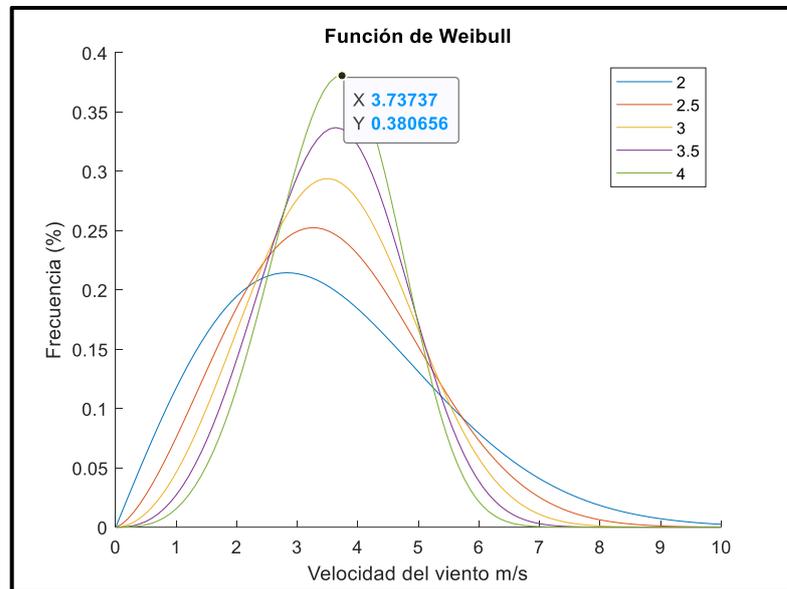


Figura 5.7. Distribución de Weibull.

5.1.5 Análisis del potencial eólico

En la Tabla 5.4, se muestra los datos promedios mensuales de la velocidad del viento.

Tabla 5.4. Promedios de la velocidad del viento

Mes	Media
Enero	11,6
Febrero	9,3
Marzo	8,5
Abril	8,5
Mayo	12,0
Junio	9,7
Julio	9,4
Agosto	11,2
Septiembre	10,3
Octubre	10,2
Noviembre	8,6
Diciembre	7,3
Total	9,7

De esta manera en la Figura 5.8, se pudo llegar apreciar el potencial eólico del sistema lo que indica la máxima potencia que se extraería del sistema ubicado en el sector que es de 739 [W] si existe una velocidad del viento entre 3 y 4 [m/s].

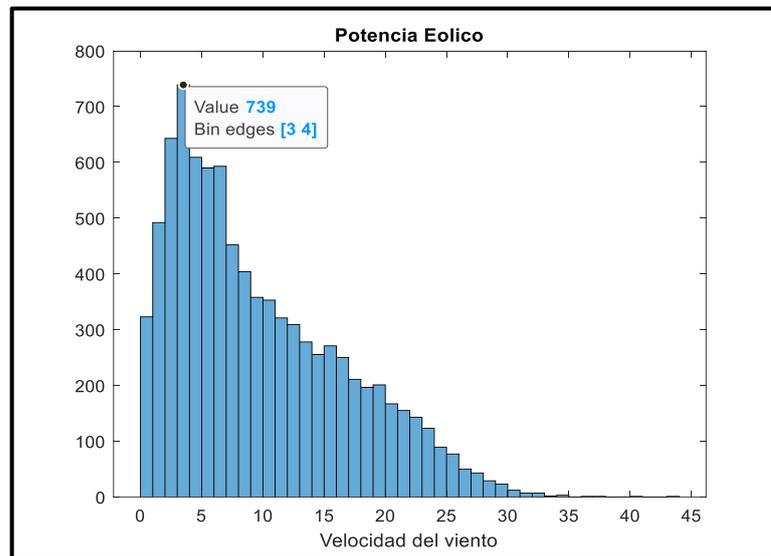


Figura 5.8. Potencial eólico con respecto a la velocidad del viento.

La Figura 5.9, se aprecia la potencia eólica que otorgaría el sistema, la misma que indica que es buena al analizar las distintas velocidades del viento promedio mensuales, se llega a determinar que estas superan el mínimo aceptable que son los 3 m/s, es por ello que en este contexto en el mes de mayo presenta mayor potencia que podría suministrar el sistema a la red con un valor total de 4 209,21 [W] que esto se transformaría en 4 kW.

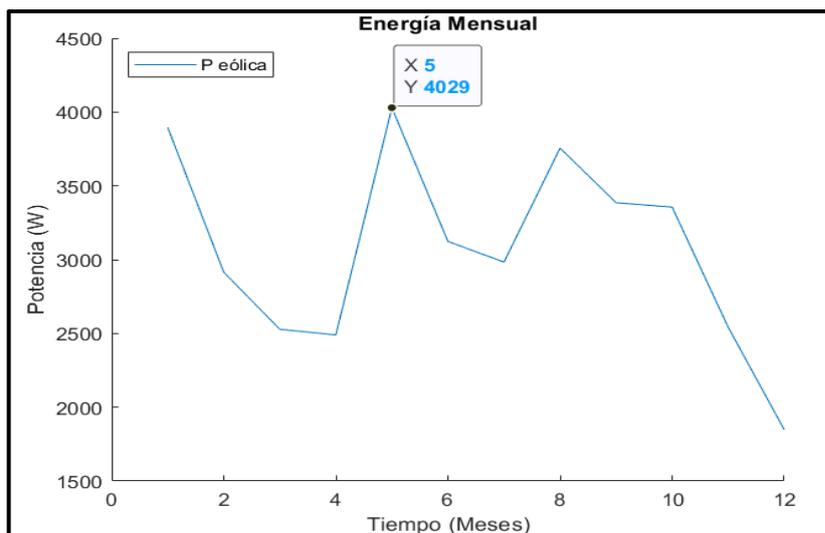


Figura 5.9. Potencia del sistema eólico por mes.

La Tabla 5.5 muestra la potencia en [W] que se evidencia en cada uno de los meses, que se presentan en la Figura 5.9 además, de la energía en [Wh] que llega a generar en cada mes el parque eólico para ello se multiplico la potencia por 24 horas, según la base de datos las 24 horas del día se obtuvo viento favorable.

Tabla 5.5. Potencia y energía del sistema eólico

Mes	Potencia [W]	Energía [Wh]
Enero	3 895,8962	93 501,509
Febrero	2 914,9819	69 959,565
Marzo	2 528,2217	60 677,321
Abril	2 490,561	59 773,464
Mayo	4 029,2113	96 701,07
Junio	3 123,2631	74 958,315
Julio	2 983,7272	71 609,453
Agosto	3 755,8062	90 139,348
Septiembre	3 385,9777	81 263,465
Octubre	3 355,8479	80 540,351
Noviembre	2 542,8132	61 027,517
Diciembre	1 848,03	44 352,719
Total	36 854,337	884 504,1

5.1.6 Selección del Aerogenerador

Para este punto, se toma en cuenta la norma IEC 61400-2 sobre turbinas a pequeña escala, en la Tabla 5.6, se presenta pequeñas turbinas que podrán ser utilizadas en la investigación.

Tabla 5.6. Clases de turbinas eólicas

Tipo de Turbina	Potencia Nominal del Generador [W]	Clase de Viento IEC	Altura del Buje[m]	Viento [m/s]	
				Arranque	Parada
Enair 30 Pro	3 000	61 400-2	25	2	11
Enair 70 Pro	4 450	61 400-2	25	2	11
Enair 200 L	10 140	61 400-2	25	1,85	20
Enair 200 L	18 000	61 400-2	25	1,85	20

De la Tabla 5.6 para este tema de investigación, se toma en consideración el aerogenerador Enair 70 Pro, debido a que el área de barrido y la producción de energía eléctrica son las óptimas para cumplir el estudio realizado anteriormente.

La máquina ENAIR 70 Pro, tiene una potencia nominal de 4 kW. El fabricante proporciona la potencia nominal, se alcanza velocidades de viento de 11 m/s. El área de barrido corresponde a la superficie del aerogenerador que se muestra perpendicularmente al viento, para este modelo es de 14,5 m². La densidad de aire para alcanzar la potencia nominal proporcionada por el fabricante es de 1,225[kg/m³].

En la Tabla 5.7, se muestra las características adicionales del aerogenerador.

Tabla 5.7. Características aerogenerador Enair 70 Pro [34].

AEROGENERADOR ENAIR 70 Pro	
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Altura del Buje	25 m
Área Barrida	14,5 m ²
Diámetro del Rotor	4,3 m
Potencia Nominal	4 kW
Velocidad de Corte Inferior	1,8 m/s
Velocidad de Incisión Superior	20 m/s
Conexión a Red y Microrred	
Generador Síncrono de Imanes Permanentes	
Vida Útil de 25 Años	

Con la potencia que se obtuvo del estudio realizado, se plantó trabajar con el aerogenerador mencionado anteriormente. En la Figura 5.10 se aprecia la curva de potencia respectiva brindada por el fabricante [34].

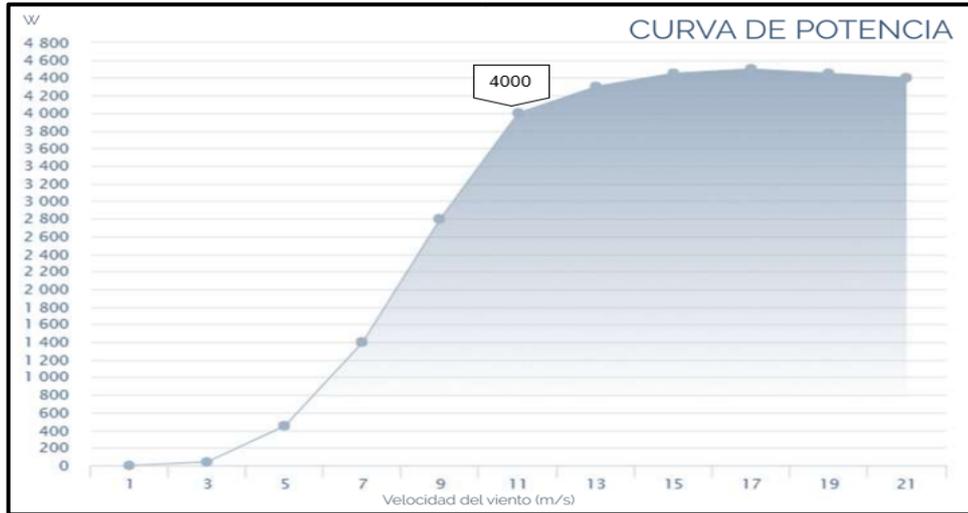


Figura 5.10. Curva característica del aerogenerador Enair 70 PRO.

Posteriormente, se realizó el cálculo para conocer cuántos aerogeneradores de 4 kW se necesita para cubrir la potencia de nuestro parque eólico, se toma en consideración la velocidad del viento promedio mensual y la potencia del aerogenerador.

Se tomaron como referencia los valores de la Tabla 5.8 esta indica que vamos a tener una velocidad promedio mensual de $9,73 \approx 10$ m/s, además, de evidenciar en la Figura 5.10 que se obtendría una potencia de generación de 4 000 [W] con esa velocidad del viento.

Tabla 5.8. Velocidades promedio del viento

Mes	Media
Enero	11,624829
Febrero	9,295695
Marzo	8,544989
Abril	8,474277
Mayo	12,045982
Junio	9,724990
Julio	9,435033
Agosto	11,224787
Septiembre	10,303351
Octubre	10,234461
Noviembre	8,572480
Diciembre	7,304036
Total	9,732076

Por lo tanto, para saber la cantidad de aerogeneradores a utilizar, se utiliza la Ecuación (5.11).

$$N_{\text{aerogeneradores}} = \frac{\text{Potencia del parque eólico}}{\text{Potencia curva aerogenerador}} \quad (5.11)$$

$$N_{\text{aerogeneradores}} = \frac{4\,029,21}{4\,000} = 1,007$$

De esta manera, se determina, que se implementaría $1,007 \approx 1$ aerogenerador para cumplir con la potencia máxima que otorgaría el sistema en todo el año en la zona de estudio.

5.1.7 Factor de planta sistema eólico

Es la correspondencia entre la potencia media y la potencia nominal. El factor de capacidad anual, se calcula con la Ecuación (5.12).

Depende del tipo de central eléctrica, el factor de ajuste variará considerablemente, para una planta eólica los valores típicos suelen ser aproximadamente del 10 % al 40 %.

$$F_p = \frac{\text{Energía total generada por la máquina eólica}}{\text{Potencia nominal de la turbina eólica} * \text{horas del año}} \quad (5.12)$$

Donde

F_p = Factor de Planta [%]

Energía total generada por la máquina eólica = Es la energía suministrada del parque eólico.

Potencia nominal de la turbina eólica = Curva de potencia proporcionada por el fabricante.

Horas en el año = Son las horas totales del año es decir 8 760 horas.

$$F_p = \frac{884,504 \text{ [kWh]}}{4 \text{ [kW]} * 8\,760 \text{ [h]}} = 0,025$$

Resulta un factor de planta de $0,025 = 2,5 \%$. El resultado es inferior a los valores típicos debido al poco recurso eólico disponible en el emplazamiento.

5.1.8 Comportamiento del aerogenerador

En el presente apartado, se indica cómo, se comporta el aerogenerador con respecto a una velocidad del viento mínima, máxima y promedio como se presenta en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Velocidades del viento

Velocidad del Viento [m/s]		
Mínimo	Máximo	Promedio
6.002	12.997	9.740

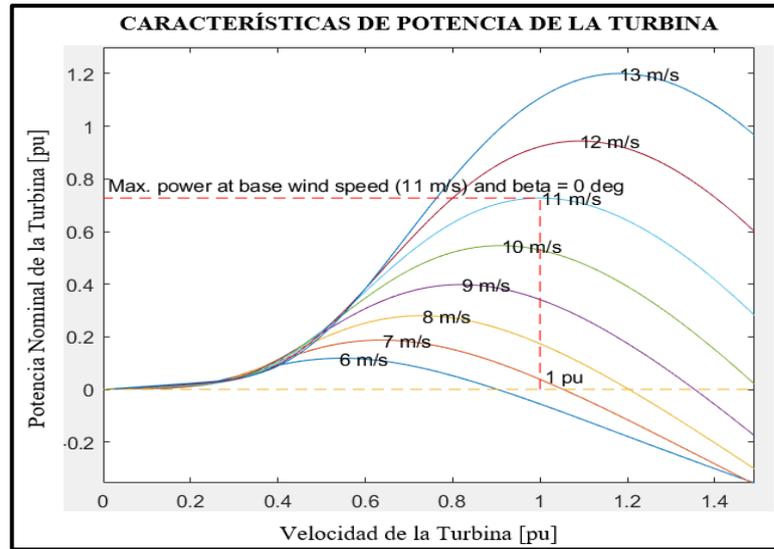


Figura 5.11. Curvas características del comportamiento del aerogenerador.

En la Figura 5.11 se observa las distintas curvas características del comportamiento del aerogenerador con relación a la velocidad y potencia de la turbina en [p.u], el color azul muestra la velocidad mínima con que la turbina empieza a funcionar, y de color azul oscuro, se aprecia la velocidad máxima de la turbina.

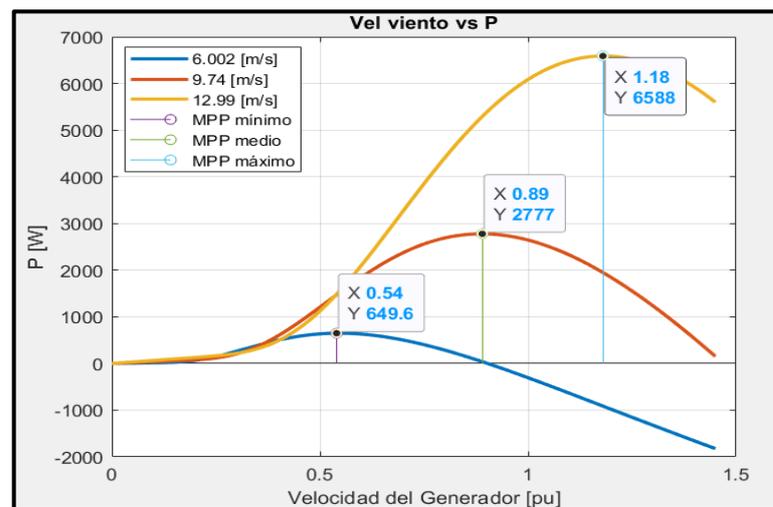


Figura 5.12. Velocidad del viento vs potencia.

En la Figura 5.12 se muestra cuanta potencia generaría el aerogenerador con respecto a la velocidad del viento. Donde la línea de color azul indica que a una velocidad mínima de 6 [m/s], se tiene una potencia de 649,6 [W], la línea de color tomate refleja que, a la velocidad prometido, se obtiene una potencia de 2 777 [W] y la línea de color amarillo refleja que a la velocidad máxima entrega una potencia de 6 588 [W].

5.1.9 Gráfica de dispersión del sistema eólico

En la Figura 5.13 se puede visualizar la gráfica de dispersión esta indica una línea con el valor promedio de las distintas velocidades del viento en todo el año, además se identifica que los meses de enero, mayo, agosto, septiembre y octubre van a tener mayor generación mientras que los meses de febrero, marzo, abril, julio, noviembre y diciembre poseen menor generación.

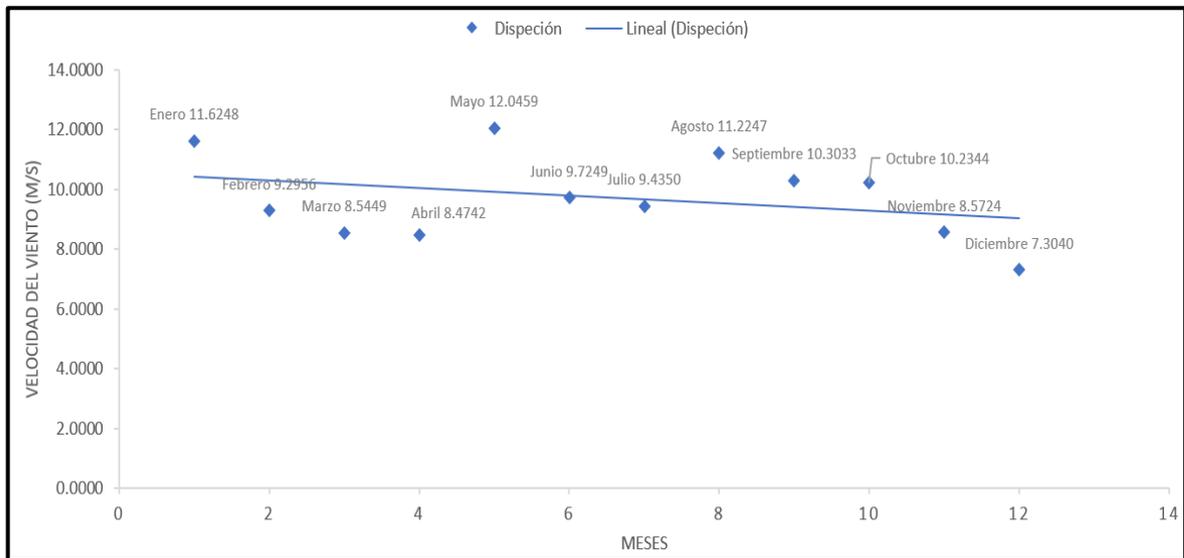


Figura 5.13. Gráfica de dispersión del sistema eólico

5.1.10 Distancia para Ubicar los Aerogeneradores

Para la distancia a la que se encontraría los aerogeneradores, se tomaría en consideración el direccionamiento de acuerdo al diámetro del rotor, por lo que para ubicar aerogeneradores horizontales la distancia mínima es de 7 veces el diámetro del rotor, para ubicarlos perpendicularmente la distancia mínima sería de 4 veces el diámetro del rotor.

De esta manera, se sabe que el diámetro del aerogenerador de Enair 70 Pro de 4 kW es de 4,3 m, se determina que la distancia entre aerogeneradores sería de por lo menos 30,1 m horizontalmente y 17,2 m perpendicularmente. Después de haber realizado el análisis, se llegó a definir, que se va a utilizar una torre eólica Enair 70 Pro que va a producir un total de 96,70 [kWh/año] como se observaría en la Tabla 5.10.

En la Figura 5.14 se observa una gráfica de cómo, se comportará el sistema eólico mediante la generación de energía eléctrica por cada mes del año.

Tabla 5.10. Energía del sistema eólico

Mes	Potencia [W]	Energía [kWh/año]
Enero	3 895,8962	93,501509
Febrero	2 914,9819	69,959565
Marzo	2 528,2217	60,677321
Abril	2 490,561	59,773464
Mayo	4 029,2113	96,70107
Junio	3 123,2631	74,958315
Julio	2 983,7272	71,609453
Agosto	3 755,8062	90,139348
Septiembre	3 385,9777	81,263465
Octubre	3 355,8479	80,540351
Noviembre	2 542,8132	61,027517
Diciembre	1 848,03	44,352719
Total	3 6854,337	884,5041

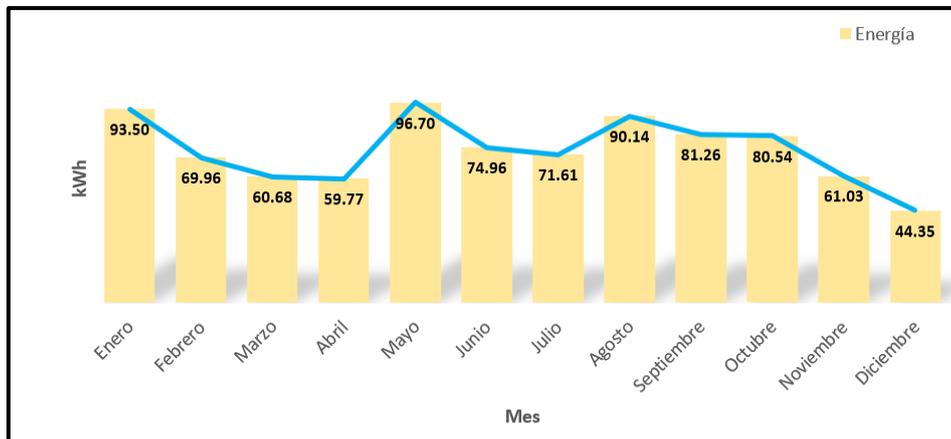


Figura 5.14. Generación del parque eólico por mes.

5.2 SISTEMA SOLAR

Para la producción de electricidad a base de energía solar, es importante tener en cuenta la radiación del sol, así como, también, la temperatura, dichos parámetros son importantes para determinar la generación a la que se destinará el panel, por lo que es posible elegir el panel solar adecuado para poder determinar, se toma un registro de los parámetros antes mencionados de un año, para este caso de estudio se toma el año 2020.

La estimación de la producción de energía eléctrica está ubicada en las siguientes coordenadas $0^{\circ} 47' 38''$ S – $78^{\circ} 37' 37''$ O, con un área disponible de tres hectáreas como se muestra en la Figura 5.15.

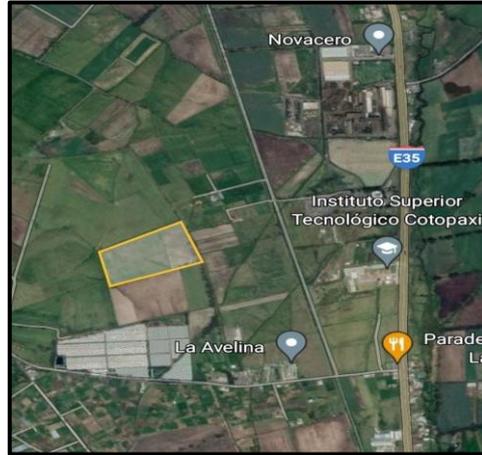


Figura 5.15. Zona seleccionada para el sistema fotovoltaico.

5.2.1 Recurso solar en el sector

Para comprender los datos disponibles sobre recursos solares y temperatura en el sitio del proyecto, se realizó un análisis meteorológico, se usa el software PVsyst 7.2 que proporciona datos confiables para la evaluación del recurso solar y temperatura en el sitio a través de su base de datos Metenorm que se utilizó para comparar previamente bases de datos obtenidas.

Figura 5.16. Descarga de los datos para comparación con la base de datos obtenida de la central meteorológica.

A continuación, la Tabla 5.11 indica los datos de horas solares pico y temperatura, respectivamente, en la Figura 5.16 se muestra un gráfico de barras para entender el comportamiento de los datos en la zona donde se ubica el proyecto.

Tabla 5.11. Datos de irradiación mensual

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año	
Horizontal Global	5,77	4,94	5,35	5,36	5,45	5,45	5,48	6,15	5,54	4,46	4,67	5,20	5,34	kWh/m ² /day
Horizontal difuse	2,32	2,63	2,80	2,17	2,10	1,91	2,17	1,90	2,23	2,25	2,23	2,29	2,25	kWh/m ² /day
Extraterrestrial	10,16	10,47	10,53	10,16	9,59	9,21	9,32	9,82	10,3	10,43	10,2	10,0	1002	kWh/m ² /day
Clearnes index	0,568	0,472	0,508	0,527	0,587	0,592	0,587	0,62	0,538	0,42	0,45	0,52	0,533	Ratio
Temperatura Ambiente	14,0	13,9	13,8	13,5	13,7	12,9	12,8	13,0	13,1	13,9	13,7	13,9	13,5	°C
Velocidad del Viento	3,6	3,4	3,2	3,0	3,5	4,4	4,9	4,8	4,3	3,4	3,0	3,3	3,7	m/s

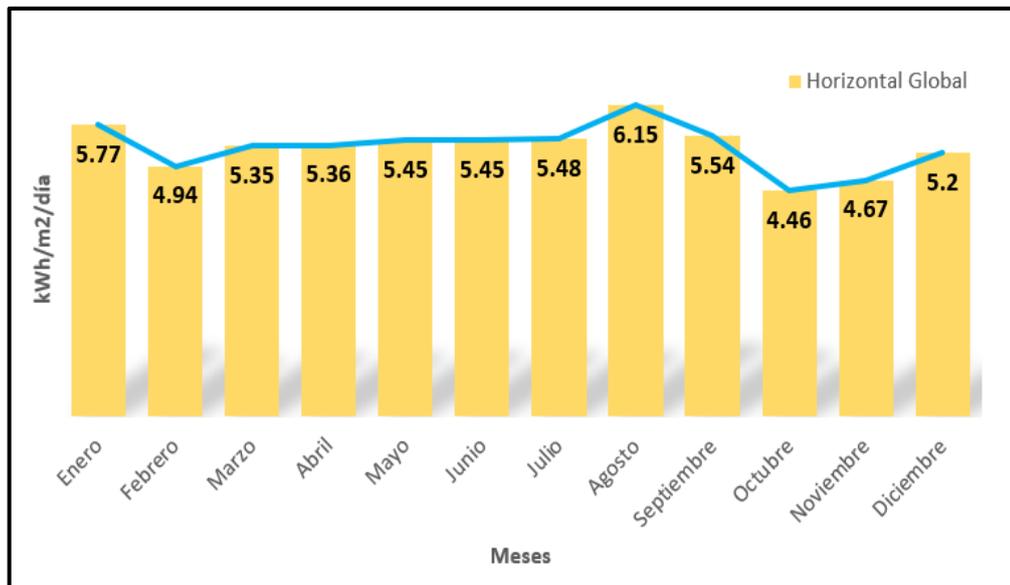


Figura 5.17. Niveles de irradiancia en la zona.

Como, se observa en la Figura 5.17 todos los meses presentan un escenario equilibrado en cuanto a la radiación solar en el sector, cabe señalar que el mes de mayor radiación es agosto con un total de 6,15 kWh/m²/día

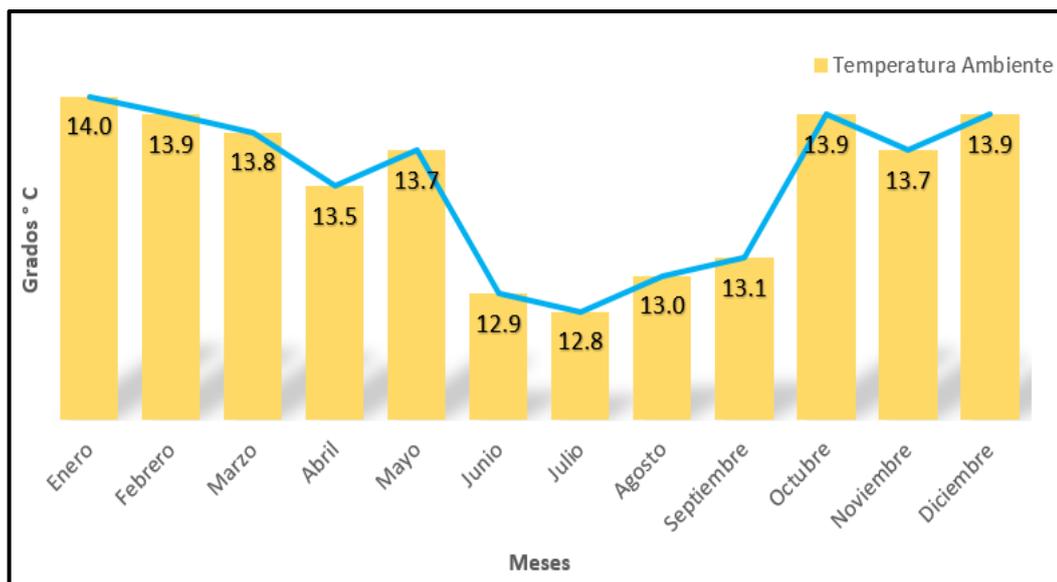


Figura 5.18. Niveles de temperatura en la ubicación.

La Figura 5.18 muestra diferentes contrastes relativos a la radiación solar, los valores entre ellos son muy distantes, lo que sugiere que durante ciertos meses la temperatura será más baja en la zona lo que afecta a la producción de energía.

5.2.2 Orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos

El panel solar produciría incluso con poca luz en tiempo nublado, pero la orientación e inclinación correctas ayudarán al panel fotovoltaico a funcionar correctamente, lo que le permitirá aprovechar al máximo la luz solar, se genera mayores cantidades de energía. La orientación e inclinación de la placa se especifican en términos de acimut (α) y elevación (β), respectivamente.

5.2.3 Ángulo de azimut

El azimut, se forma entre la dirección del sur y la proyección del panel solar sobre el plano horizontal de la superficie toma el valor 0° si coincide con la dirección del sur. El norte tiene un valor positivo por lo que coincide con el oeste, su valor es de 90 grados y el este -90 grados, por lo que los paneles solares obtienen la máxima eficacia si están apuntados directamente al sol. Al estar en un lugar fijo no seguiría el camino del sol de este a oeste.

Por eso, para orientarla hay que tener en cuenta que en el Ecuador en el hemisferio norte el panel solar miraría al sur mientras que en el hemisferio sur el panel solar miraría al norte. La eficacia del panel solar por lo general depende de su inclinación y se calcula con la Ecuación (5.13):

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 * |\varnothing| \quad (5.13)$$

Donde:

β_{opt} = Ángulo de inclinación del panel [°]

\varnothing = Latitud [°]

Se usa la Ecuación 5.13 para encontrar los valores de la Tabla 5.12 que proporciona información sobre los cálculos para la posición e inclinación de los paneles fotovoltaicos, se considera que β no sería inferior a 10 ° y la pérdida por reflexión es significativa a 70 ° porque el módulo fotovoltaico es plano.

La Figura 5.19 muestra la inclinación que tendrá los paneles según el ángulo de azimut estos datos se deben ingresar en el simulador PVsyst 7.2 con el fin de encontrar las distancias mínimas entre paneles solares.

Tabla 5.12. Orientación de los módulos fotovoltaicos

Sector	Lasso
Ubicación	Sur de la línea Ecuatorial
Ángulo Azimut α [°]	0°
Latitud \varnothing [°]	0,79
Dirección de los paneles	De acuerdo con la línea ecuatorial, los paneles, se ubicarían en dirección norte
β_{opt} [°]	En base a la Ecuación el valor del β_{opt} es de 3,62 °
Inclinación de los paneles	Se realiza la instalación de los paneles a 10 °, se toma la inclinación mínima

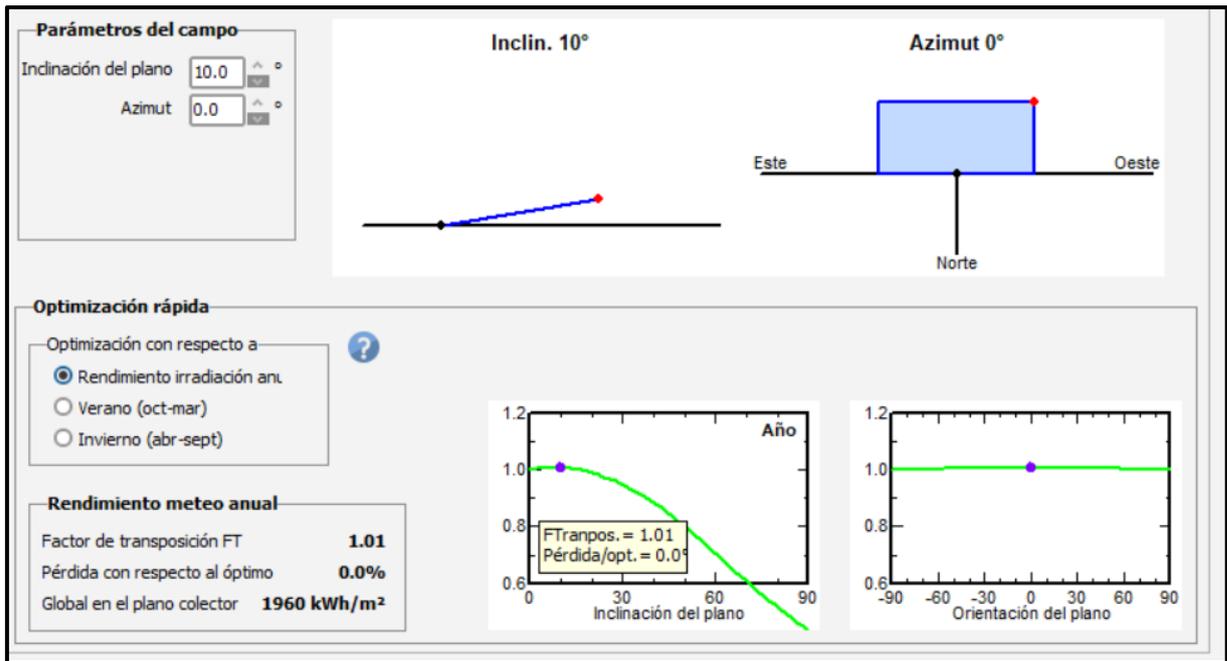


Figura 5.19. Ángulo de inclinación PVsystem.

5.2.4 Coeficiente de rendimiento (PR)

El índice de rendimiento (Performance Ratio) es un dato importante, indica el porcentaje entre el rendimiento real y nominal del sistema fotovoltaico, de esta forma, se pudo tener en cuenta cuanta energía está disponible para la fuente de alimentación después de considerar las pérdidas potenciales en el sistema. Las pérdidas máximas, que se consideran en el PR, se muestran a continuación:

- Cableado en DC: 1 %
- Cableado en AC: 1 %
- Pérdidas de los inversores: 2 %
- Pérdidas de mismatch: 2 %
- Pérdidas por suciedad y polvo: 4 %
- Pérdidas de temperatura: 4,60 %
- Pérdidas de orientación e inclinación: 0,49 %

Cuanto más, se acerque el porcentaje al 100 % más eficiente será el sistema fotovoltaico, sin embargo, este valor no se alcanzaría porque el sistema generará pérdidas. De esta forma el PR, se calcula con la Ecuación (5.14).

$$PR = (\eta_{temp} \times \eta_{OI} \times \eta_{Inv} \times \eta_{AC} \times \eta_{DC} \times \eta_{SS} \times \eta_{MM}) \quad (5.14)$$

Donde:

- P_{temp} = Pérdidas por temperatura [%]
- P_{OI} = Pérdidas por orientación e inclinación [%]
- P_{inv} = Pérdidas por el inversor [%]
- P_{AC} = Pérdidas por cableado en sección de corriente AC [%]
- P_{DC} = Pérdidas por cableado en sección de corriente DC [%]
- P_{SS} = Pérdidas por sombras y suciedad [%]
- P_{MM} = Pérdidas por mismatch [%]

Para realizar el cálculo de las pérdidas por orientación e inclinación (P_{OI}), se utiliza la Ecuación (5.15).

$$P_{OI} = 1,2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 - 3,5 \times 10^{-5}(\alpha^2) \quad (5.15)$$

Se tiene en cuenta los valores de los ángulos de inclinación β y β_{opt} , se obtienen los valores de pérdida por orientación e inclinación.

$$P_{OI} = 1,2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2$$

$$P_{OI} = 1,2 \times 10^{-4}(10 - 3.62)^2$$

$$P_{OI} = 0,49 \%$$

Las pérdidas de temperatura, se calculan mediante la Ecuación (5.16):

$$P_{temp} = (T_c - T_{STC}) \times Coef_{Temp} \quad (5.16)$$

Donde:

T_c = Temperatura corregida [°C]

T_{STC} = Temperatura en condiciones estándar (valor de 25 °C tomado de la especificación los paneles solares).

$Coef_{Temp}$ = El coeficiente de temperatura viene especificado en las características de los paneles solares [°C]

La temperatura corregida, se expresa en la Ecuación (5.17).

$$T_c = T_a + \left(\frac{T_{ONC} - 20}{800 \left(\frac{W}{m^2} \right)} \right) \times G_{STC} \quad (5.17)$$

Donde:

T_a = Temperatura ambiente [°C]

T_{ONC} = La temperatura nominal de funcionamiento de la célula es igual a 20 ° C, dato indicado en las especificaciones del panel solar.

G_{STC} = Las tolerancias para el indicador de potencia, se especifican en las características del panel.

Entonces T_{ONC} es 20 ° C y la temperatura de corrección es igual a la temperatura ambiente $T_c = T_a$. Una vez, que se calcula la temperatura en el sector, la ecuación, que se usa para calcular las pérdidas viene dada de la siguiente manera:

$$P_{temp} = (13,5 - 25) \times (-0,4 \%)$$

$$P_{temp} = 4,6\%$$

Luego de haber calculado las pérdidas iniciales, se calculan las pérdidas de los elementos del sistema fotovoltaico según sus respectivas especificaciones antes de ser seleccionados en el mercado.

La tabla 5.13 indica los datos de pérdida total para el cálculo de PR donde, se calcula la pérdida máxima para los cables de CA y CC.

Tabla 5.13. Pérdidas en los elementos del sistema fotovoltaico

Tipos de Pérdidas	% de pérdidas	Eficiencia de los equipos fotovoltaicos (%)
Orientación e inclinación	0,49 %	99,51 %
Temperatura	4,60 %	95,40 %
Inversor	2,70 %	97,30 %
Controlador de carga	2,00 %	98,00 %
AC	1,00 %	99,00 %
DC	1,00 %	99,00 %
Suciedad y sombra	2,00 %	98,00 %
Mismatch	1,00 %	99,00 %

Una vez obtenidas las pérdidas para el sistema, se utiliza la ecuación para determinar PR.

$$PR = (99.51 \% \times 95.40 \% \times 97.30 \% \times 98 \% \times 99 \% \times 99 \% \times 98 \% \times 99 \%)$$

$$PR = 86,07 \%$$

5.2.5 Selección y dimensionamiento de los equipos

Para el dimensionamiento del sistema solar, se parte del coeficiente de rendimiento para conocer el valor de la potencia del equipo. Además, se da una breve descripción de las marcas de equipos y las razones de su elección del proyecto.

5.2.5.1 Selección del módulo fotovoltaico

Los siguientes criterios, se tienen en cuenta a la hora de elegir un módulo solar:

- Espacio físico disponible: El área disponible para este estudio es de 3 hectáreas, o 30 000 metros cuadrados.
- Clima: Este es un factor importante a considerar, los paneles monocristalinos, se eligen para una mejor eficiencia al recolectar energía solar.
- Tecnologías de los paneles: Depende de los materiales de los que están hechos, su eficacia varía.

La Figura 5.20 muestra las tecnologías de paneles solares actualmente en el mercado y cómo han evolucionado en términos de eficiencia a lo largo del tiempo. En cuanto al caso de aplicación de este proyecto, se observa que la tecnología de placas de Si policristalino ofrece una eficiencia del 20,4 %, además, de ser asequible lo que la hace más práctica.

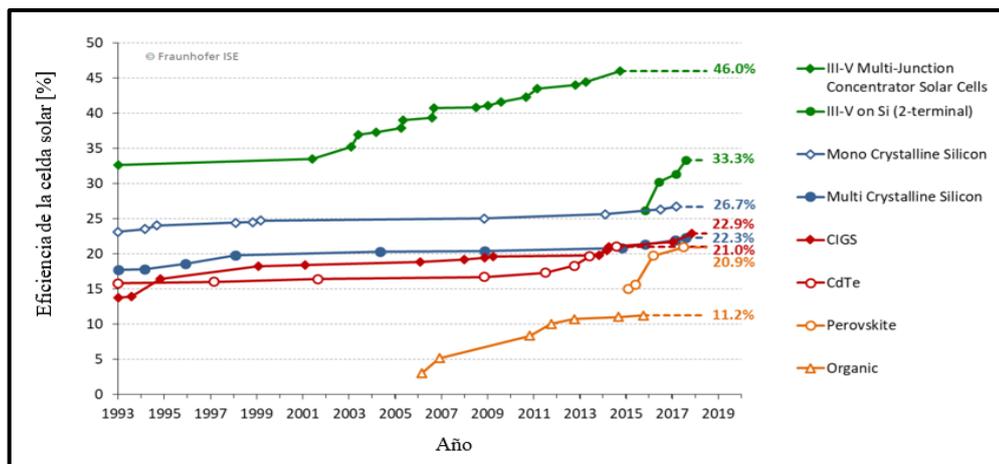


Figura 5.20. Eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas a lo largo del tiempo [35].

Luego de evaluar estos criterios y es una de las mejores opciones del mercado debido a la variedad de capacidad, se eligió el panel fotovoltaico JKM545M-72HL4-BDVP producido por

Jinko Solar por que se adecua a las necesidades de diseño. La potencia de este modelo es de 545Wp, con un tamaño adecuado al espacio previsto en el proyecto.

La Tabla 5.14 muestra algunas características del panel solar [35].

Tabla 5.14. Características del panel fotovoltaico [35].

Parámetro	Valor
	STC
Potencia nominal (Pmáx) [Wp]	545
Corriente en el punto Pmáx_IMPP [A]	13,19
Voltaje en el punto Pmáx_VMPP [V]	41,32
Voltaje de circuito abierto_Voc [V]	49,92
Corriente de cortocircuito_Isc [A]	13,95
Eficiencia del panel [%]	21,13
Temperatura de funcionamiento [°C]	-40°C ~ +85°C
Tolerancia de potencia nominal [%]	0~+3%
Radiación [W/m ²]	1 000
Temperatura de operación nominal de célula [°C]	45 ± 2
Dimensiones [mm]	2 274*1 134*30

5.2.5.2 Selección del Inversor

Para la elección del inversor es necesario tener en cuenta la potencia pico que proporcionaría la instalación solar, la cual, se obtuvo mediante la Ecuación (5.18).

$$\text{Potencia Planta} = \text{N}^{\circ} \text{ de paneles paralelo} * \text{N}^{\circ} \text{ String} * \text{Potencia Pico Panel} \quad (5.18)$$

Se sabe que un string es el conjunto de paneles fotovoltaicos conectados en serie, además, se consideraría que el número de paneles solares, se los elige del diseño, que se realiza con anterioridad como se muestra en la Figura 5.21 remplazado los datos del esquema realizado en la Ecuación 5.18 antes mencionada, se llegan a tener una potencia de la planta de 4 512,6 kWp.

$$\text{Potencia Planta} = \text{N}^{\circ} \text{ de paneles en paralelo} * \text{N}^{\circ} \text{ String} * \text{Potencia pico panel}$$

$$\text{Potencia Planta} = 345 * 24 * 545 \text{ [Wp]}$$

$$\text{Potencia Planta} = 4 512,6 \text{ [kWp]}$$

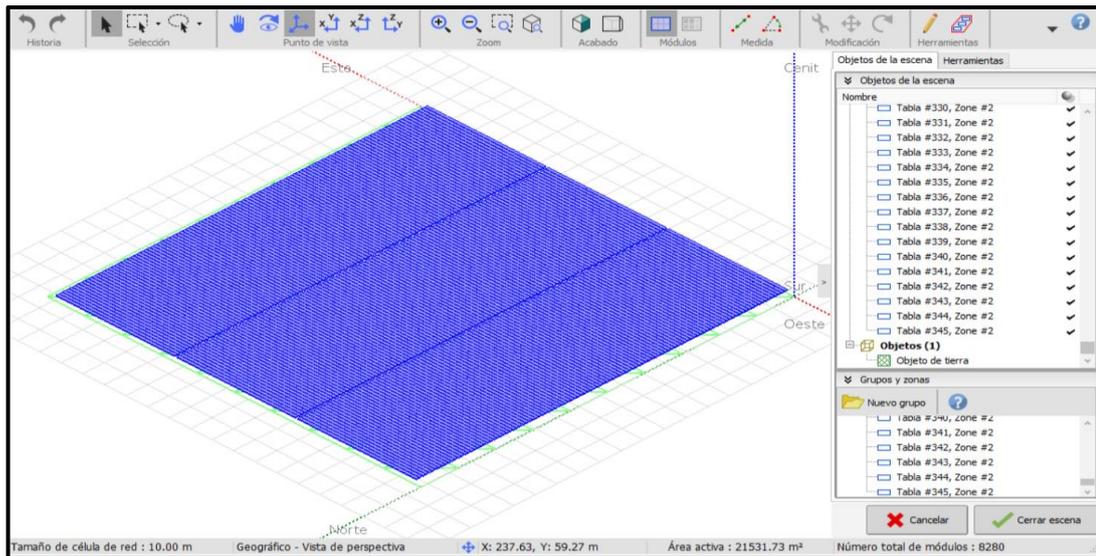


Figura 5.21. Esquema para el número de paneles.

5.2.6 Sombras del panel fotovoltaico

Las sombras en los conjuntos fotovoltaicos reducen drásticamente los rendimientos según el área sombreada, la época del año, la distribución del panel, las características del panel y más. Para reducir estas pérdidas los paneles y otros componentes del sistema fotovoltaico se colocarían a una distancia adecuada, se reduce la sombra. Para los sistemas estacionarios, se analizaron las sombras alternas, se toma un factor de sombreado del 4 %, se considera la superficie disponible para este caso de estudio.

En los sistemas estacionarios, la disposición de los paneles solares genera sombras en determinados momentos del día, por lo que tiene una separación adecuada y depende de la superficie del terreno en la que se encuentren, esta distancia se calcularía mediante la Ecuación (5.19).

$$d = \frac{h}{\tan \gamma_s} \quad (5.19)$$

Donde:

h = Altura de la fila próxima [m]

d = Distancia de separación entre módulos [m]

γ_s = Altura del sol [°]

Para calcular la altura del sol, se utiliza la Ecuación 5.20, se toma un período estimado de 4 horas sin sombra al mediodía.

$$\gamma_s = 90^\circ - 23,45^\circ - |\varphi| \approx 67^\circ - |\varphi| \quad (5.20)$$

Donde:

γ_s = Altura del sol [°]

Φ = Latitud [°]

Para calcular la altura del siguiente panel (h) se utiliza la siguiente Ecuación 5.21.

$$h = L \times \sin(\beta) \quad (5.21)$$

Donde:

h = Altura de la fila próxima [m]

β = Ángulo de inclinación del panel [°]

L = Longitud del panel fotovoltaico [m]

A continuación, se muestra la altura (h) para el caso de estudio actual.

$$h = 2,274 \times \sin(10)$$

$$h = 0,395[m]$$

Se reemplaza la Ecuación 5.20 con la Ecuación 5.21, se calcularía la distancia que existe entre los paneles para garantizar un período sin sombras.

$$d = \frac{h}{\tan(67^\circ - |\varphi|)}$$

$$d = \frac{0,395}{\tan(67 - 0,79)}$$

$$d = 0,174[m] \approx 18[cm]$$

Dado que el área donde, se instalarán los paneles tiene una superficie de 30 000 metros cuadrados, no existe dificultades en la distancia y ubicación de los equipos del sistema fotovoltaico. El diseño inicial, se realizó con dimensiones internas de 1 metro para permitir el paso de personal y equipos de mantenimiento, así como 1,5 metros de altura para la losa sobre el suelo donde se instalará.

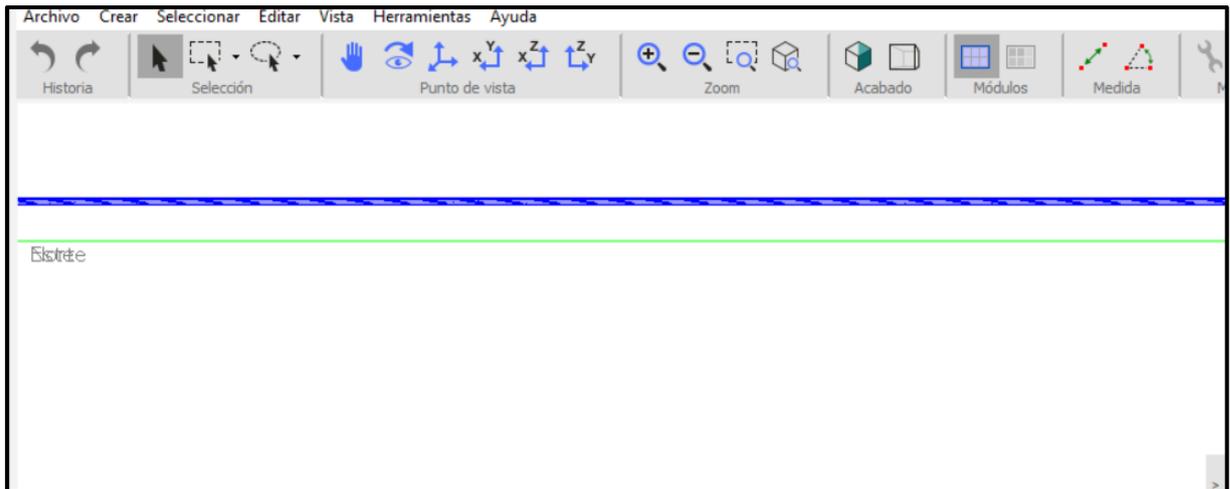


Figura 5.22. Separación de los paneles solares respecto al suelo.

En la Figura 5.22, se aprecia a que altura, se ubicarían los paneles solares del suelo al que se los va a instalar para nuestro estudio, se tomó una distancia de 1,5 m.

Después de haber realizado todos los cálculos anteriormente expuestos, se los ingresa en el PVsyst 7.2 el cual realizó un análisis a profundidad de las horas solares pico y las horas del día que se van a poder generar energía a base de este recurso solar como se aprecia en la Tabla 5.15 además, de indicarnos que 24 paneles se encuentran ubicados en serie y 345 paneles en paralelo con un voltaje de salida del sistema de 991,68 [V] y una corriente de 4 550,55 [A] da un total de 8 280 paneles que cubren un área de 21 321m² con lo que tenemos que la energía suministrada por nuestro parque fotovoltaico llegaría a generar 6,122 [GWh].

Tabla 5.15. Resultados generales del sistema fotovoltaico

Meses	Irradiación Global [kWh/m ²]	Temperatura [° C]	Energía Producida [GWh]	Energía Inyectada [GWh]	Rendimiento
Enero	179	13,98	0,527	0,521	0,696
Febrero	138,5	13,93	0,426	0,421	0,703
Marzo	165,8	13,83	0,521	0,515	0,696
Abril	160,6	13,54	0,522	0,516	0,696
Mayo	174,5	13,73	0,589	0,581	0,699
Junio	163,6	12,91	0,571	0,565	0,711
Julio	169,7	12,84	0,584	0,577	0,705
Agosto	190,5	12,99	0,619	0,612	0,685
Septiembre	166,3	13,1	0,523	0,516	0,689
Octubre	138,3	13,88	0,425	0,42	0,694
Noviembre	140,2	13,66	0,419	0,414	0,969
Diciembre	161,2	13,95	0,47	0,464	0,691
Año	1 948,2	13,53	6,196	6,122	0,69700

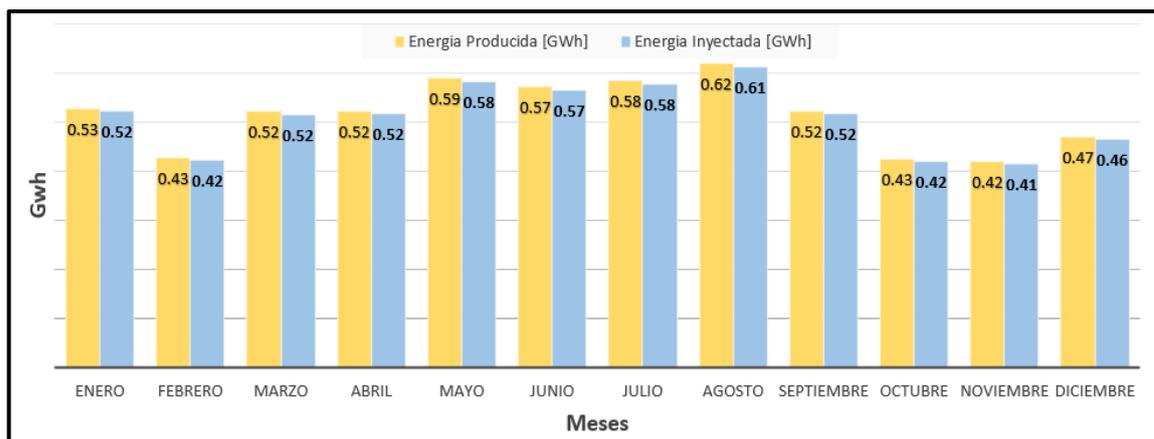


Figura 5.23. Energía producida vs energía inyectada del sistema fotovoltaico.

En la Figura 5.23 se observa el histograma realizado con respecto a la energía producida, la energía inyectada por parte del sistema fotovoltaico y su comportamiento a lo largo de todo el año.

5.2.7 Factor de planta sistema fotovoltaico

El factor de planta de energía, también, conocido como factor de utilización de la planta, es el producto de la relación entre la energía real producida por la planta durante un período determinado y la energía teórica que opera simultáneamente al 100%.

Depende del tipo de central eléctrica, el factor de ajuste variará considerablemente, para una planta fotovoltaica los valores típicos suelen ser aproximadamente del 10 % al 30 %.

$$F_p = \frac{E_p}{E_{m\acute{a}x\ te\acute{o}rica}} \quad (5.22)$$

Donde

F_p = Factor de Planta [%]

E_p = Es la energía total producida por la central solar a lo largo de un año

$E_{m\acute{a}x\ te\acute{o}rica}$ = Es la energía máxima teórica que produce la central en un año

$$F_p = \frac{6196000 \text{ [kWh]}}{4\ 512,6 \text{ [kW]} * 8\ 760 \text{ [h]}} = 0,15$$

Resulta un factor de planta de 0,15 = 15%. El resultado está entre los valores típicos considerados en un factor de planta de un sistema.

5.2.8 Comportamiento del panel fotovoltaico

En este apartado, se analiza el comportamiento del panel fotovoltaico según una radiación mínima, máxima y promedio como, se presenta en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Parámetros de radiación solar

Radiación Solar [W/m ²]		
Mínimo	Máximo	Promedio
100.050	799.879	152.160

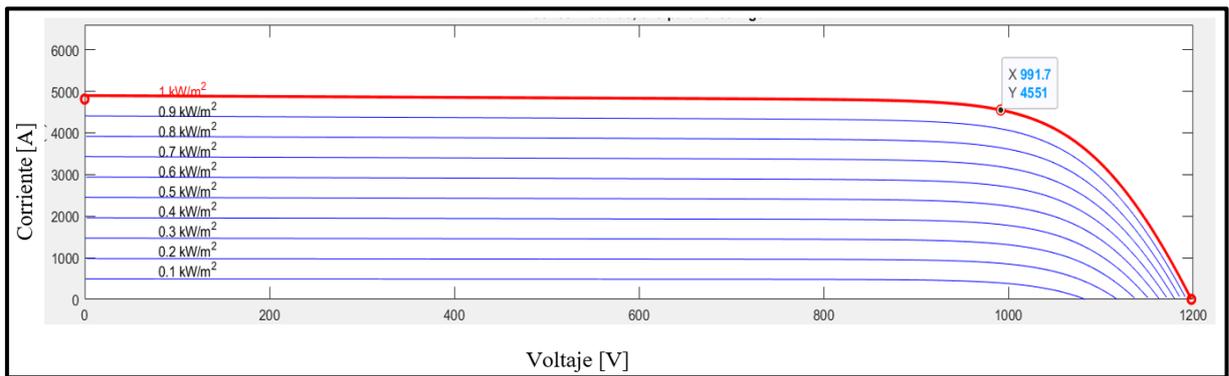


Figura 5.24. Voltaje vs corriente del panel fotovoltaico.

En la Figura 5.24 se observa las curvas características del panel fotovoltaico, voltaje versus corriente una vez incluido los valores que entrega el fabricante el cual tiene como punto máximo 1 [kW/m²], además, que dichas curvas describen que a un voltaje de 991,7 [V] se tiene una corriente de 4 551 [A].

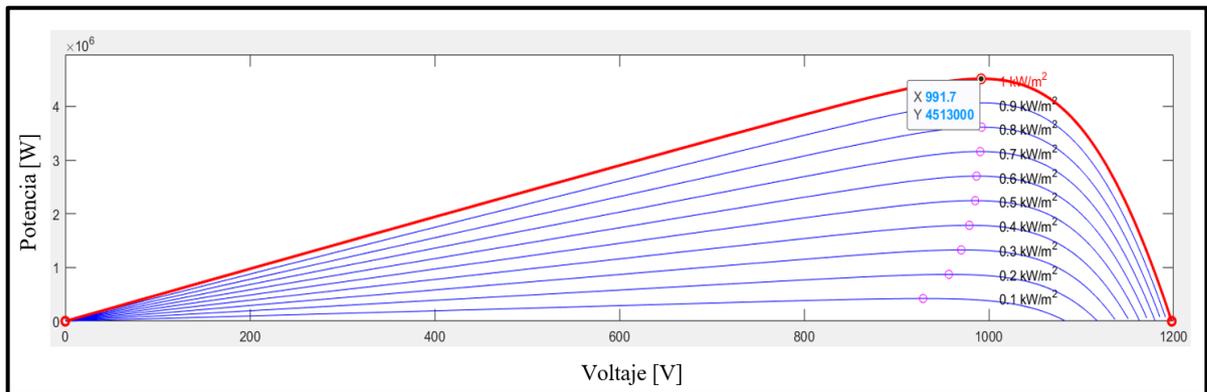


Figura 5.25. Voltaje vs potencia del panel fotovoltaico.

En la Figura 5.25, se aprecia las curvas características del panel fotovoltaico, voltaje versus potencia una vez incluido los valores que entrega el fabricante el cual tiene como punto máximo

1 [kW/m²], además, que dichas curvas relacionan que a un voltaje de 991.7 [V] se tiene una potencia de 4 513 [kW].

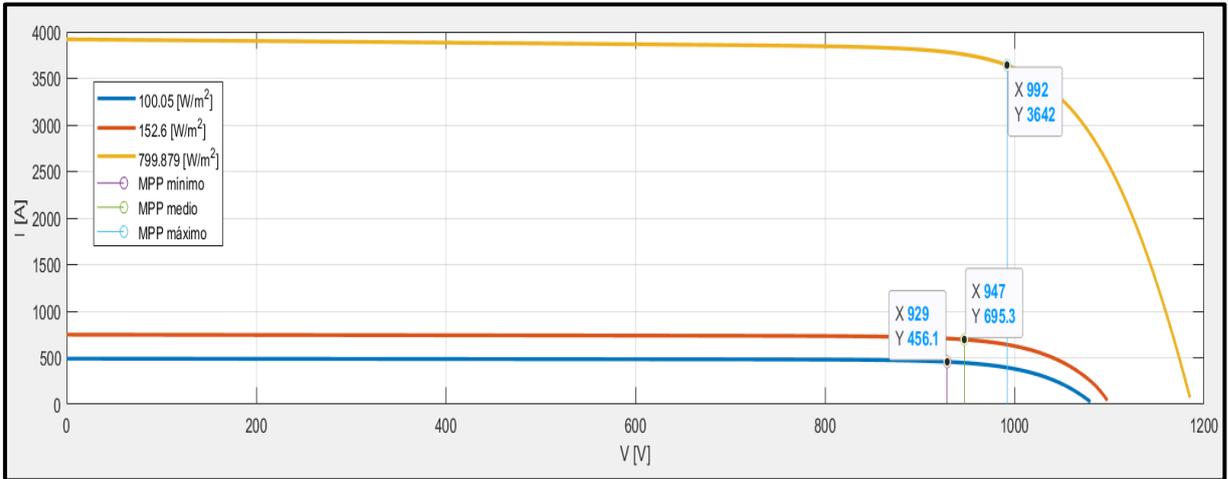


Figura 5.26. Voltaje y corriente del panel fotovoltaico.

En la Figura 5.26 muestra las diferentes curvas del comportamiento del panel en voltaje y corriente, la línea en azul indica que con una radiación 100,05[W/m²], se tiene un voltaje de 929 [V] y una corriente de 456.1 [A], la línea en tomate presenta una radiación de 152,6 [W/m²] con lo que se obtiene un voltaje de 947 [V] y una corriente de 695,3 [A] y por último la línea tomate refleja que con una radiación de 799,879 [W/m²], se visualiza un voltaje de 992 [V] y una corriente de 3,642 [kA].

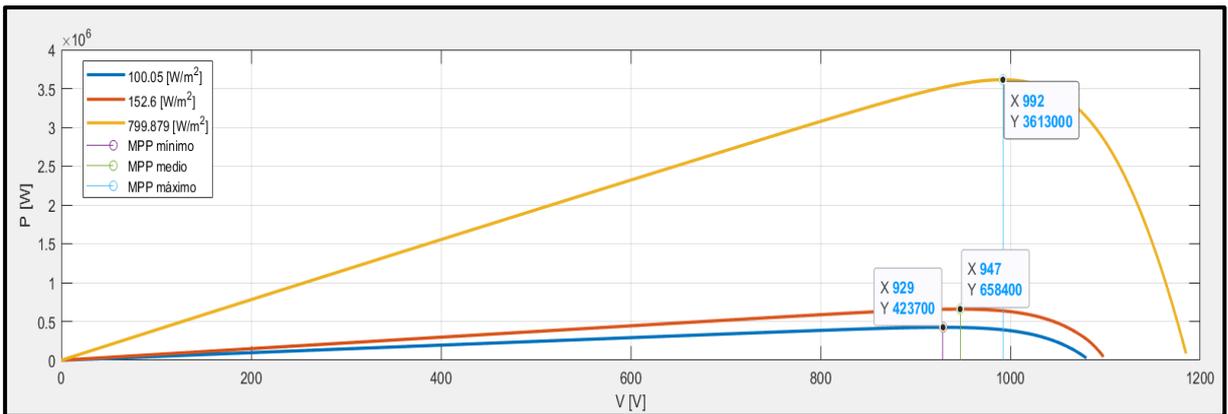


Figura 5.27. Voltaje y potencia del panel fotovoltaico.

En la Figura 5.27 muestra las diferentes curvas del comportamiento del panel en voltaje y potencia, la línea en azul indica que con una radiación 100,05[W/m²], se tiene un voltaje de 929 [V] y una potencia de 423 700 [W], la línea en tomate presenta una radiación de 152,6 [W/m²] con lo que se obtiene un voltaje de 947 [V] y una potencia de 658 400 [W] y por último la línea

tomate refleja que con una radiación de 799,879 [W/m²], se visualiza un volteje de 992 [V] y una potencia de 3 613 [kW].

5.2.9 Gráfica de dispersión del sistema fotovoltaico

En la Figura 5.28 se puede visualizar la gráfica de dispersión esta indica una línea con el valor promedio de las distintas radiaciones solares en todo el año, además se identifica que los meses de enero, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre van a tener mayor generación mientras que los meses de febrero, marzo, abril, octubre y noviembre poseen menor generación.

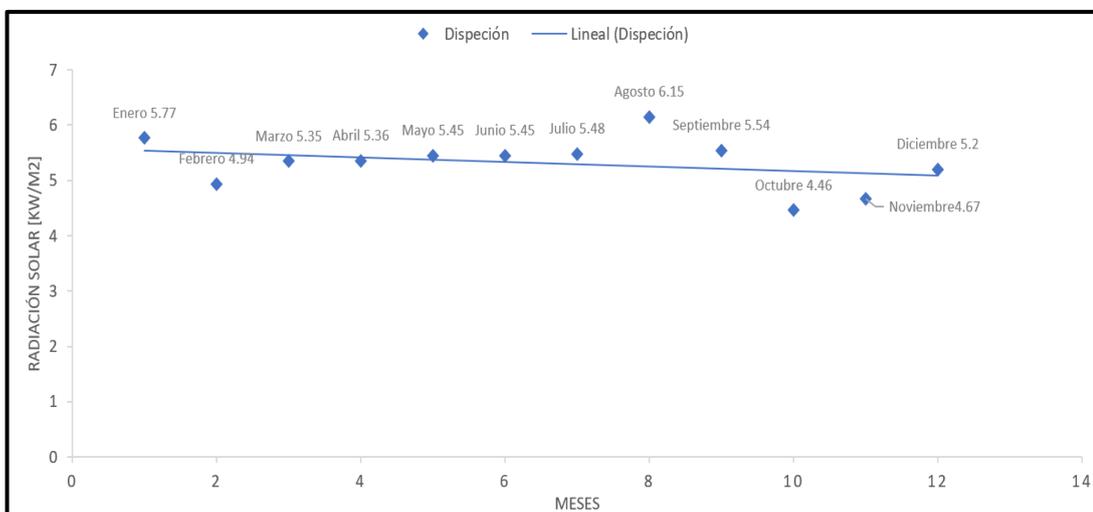


Figura 5.28. Gráfica de dispersión del sistema fotovoltaico.

5.3 SISTEMA HÍBRIDO

Se realizó la simulación del sistema híbrido solar - eólico mediante el software HOMER PRO.

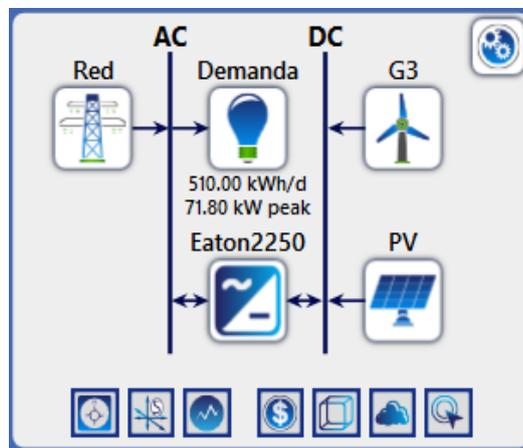


Figura 5.29. Sistema híbrido solar - eólico en HOMER PRO.

La Figura 5.29 muestra la configuración del sistema híbrido de generación eólica por medio del aerogenerador y generación fotovoltaica por medio de los paneles solares dicho sistema como, se observa, se encuentra conectado a la red eléctrica la cual, se la realizaría mediante un inversor, además, de ubicar una demanda aproximada según los cálculos anteriormente realizados.

Para el funcionamiento de la simulación en este simulador, se tendrían una demanda base, en la simulación fue tomada del análisis realizado en el sistema fotovoltaico, se acogió a una demanda de 510 [kWh/día] como se indica en la Figura 5.30.

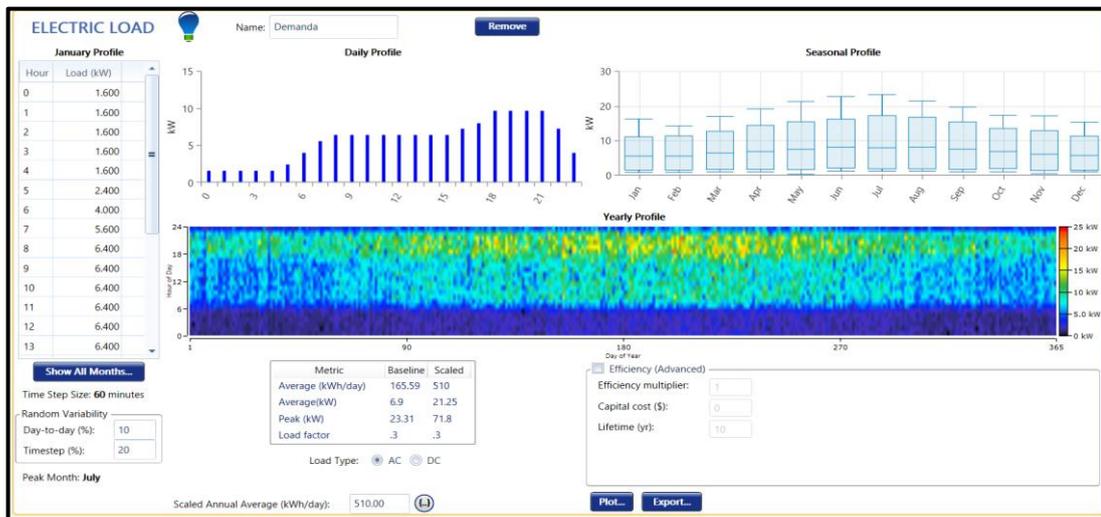


Figura 5.30. Perfil de la demanda.

Como, se observa en la Figura 5.31 el recurso con mayor aportación al sistema híbrido es el solar mediante la ubicación de los paneles, va a llegar a generar 6 125 214 [kWh/año] que representara a un 98,7 % del sistema en total, por otra parte, se da a notar que por medio de la energía eólica se llega a producir poca generación a comparación del sistema solar con 846 [kWh/año] que representa un aporte al sistema del 1 %.

Además, se toma en cuenta la red eléctrica en el análisis de Homer, esta hace referencia a un valor de 82 412 [kWh/año] que esto representa a un 1,33 %, por lo tanto, se va evidenciar que sí se consideran los valores antes mencionados el sistema híbrido solar - eólico va a poder brindar a la red eléctrica un total de 6 208 044 [kWh/año].

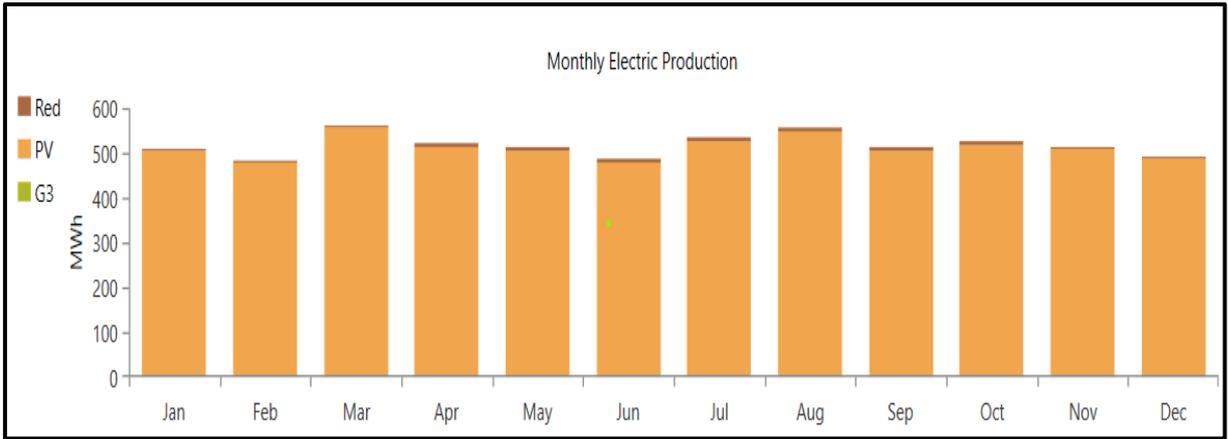


Figura 5.31. Generación de energía del sistema híbrido.

La Figura 5.32 muestra un resumen de la generación fotovoltaica del sistema híbrido que por medio de los paneles solares va a tener una capacidad nominal de 4 940 [kW], una salida media de 699 [kW] y una salida media por día de 16,781 [kWh/día], además, de un factor de capacidad del 14,2 % lo cual llega a brindar un total de 6 125 214 [kWh/año].

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	4,940	kW
Mean Output	699	kW
Mean Output	16,781	kWh/d
Capacity Factor	14.2	%
Total Production	6,125,214	kWh/yr

Figura 5.32. Generación fotovoltaica.

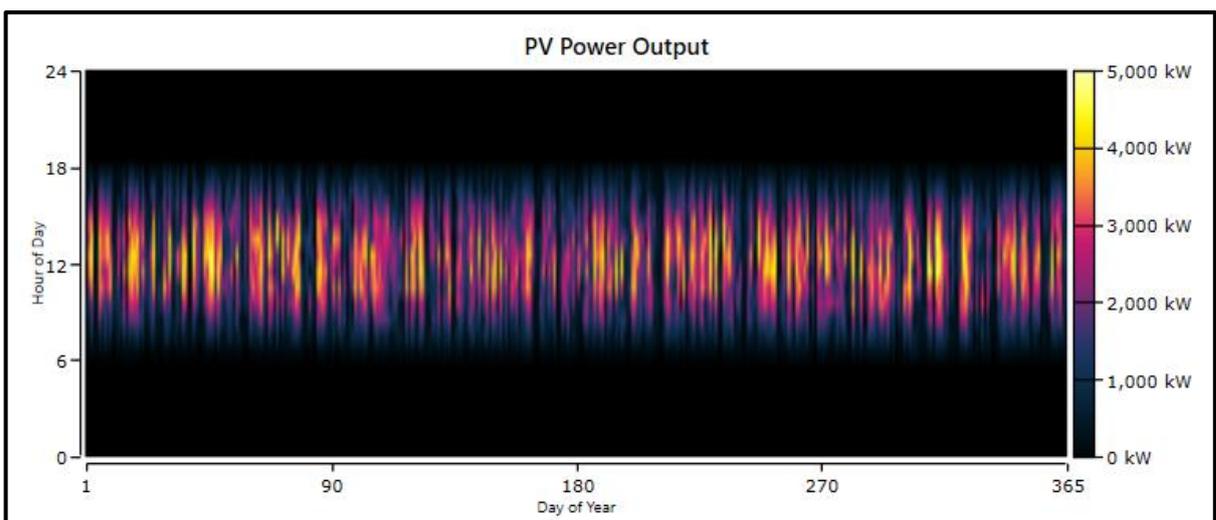


Figura 5.33. Potencia de salida del sistema fotovoltaica.

En la Figura 5.33 se observa las horas en las cuales el panel fotovoltaico entra en funcionamiento las cuales son de 6 am a 18 pm, de color amarillo, se aprecia la máxima potencia que entrega el panel que se encuentra entre las 11 am y 14 pm, y de color azul la menor potencia que entregaría el panel en todo el año.

Mientras que la Figura 5.34 muestra un resumen de la generación eólica del sistema híbrido que por medio de la turbina eólica va a tener una capacidad nominal total de 4 [kW], una salida media de 0,0966 [kW], además, de un factor de capacidad del 2,41 % lo que llega a brindar un total de 846 [kWh/año].

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	4.00	kW
Mean Output	0.0966	kW
Capacity Factor	2.41	%
Total Production	846	kWh/yr

Figura 5.34. Generación eólica.

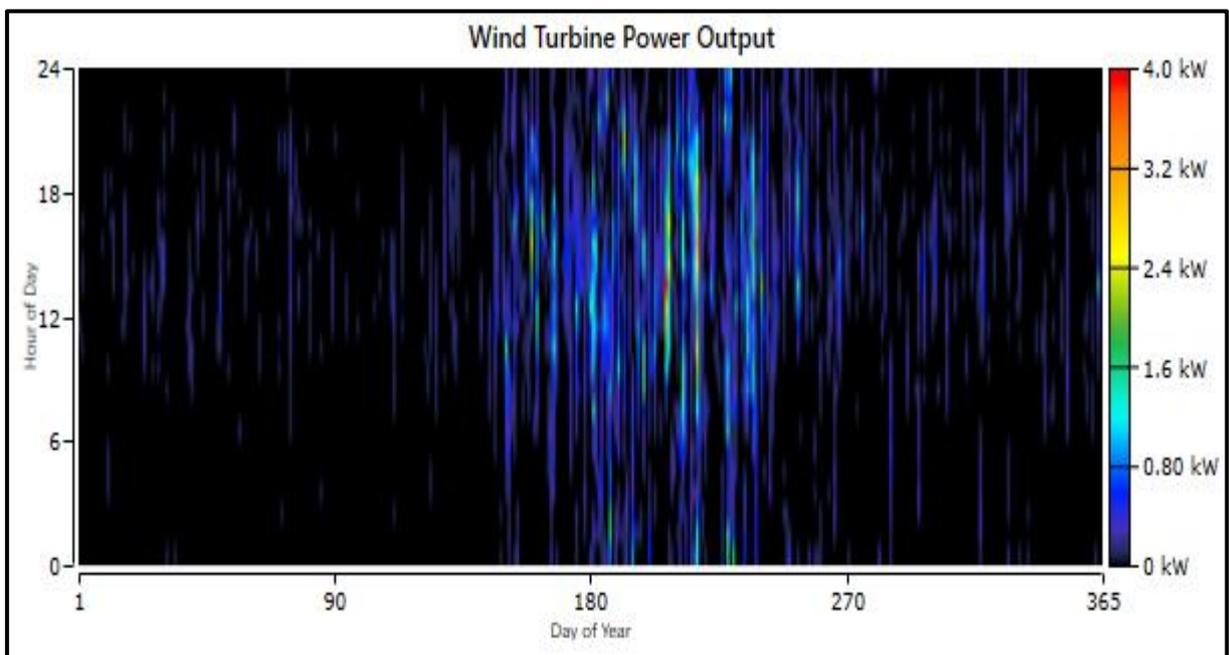


Figura 5.35. Potencia de salida del sistema eólico.

En la Figura 5.35 se visualiza que existe generación las 24 horas, en los 150 primeros días del año, se muestra una generación baja entre 0 y 0,80 [kW], entre los 151 y 270 días del año es

donde mas generación eolica, se va a generara, esto, se encuentra en un rango de 0,80 y 3,2 [kW].

En la Figura 5.36 se toma en consideracion la producción de energía renovable por cada uno de los meses del año que aporta el sistema híbrido, se sabe que el mes mas alto es Noviembre con un máximo de energía anual de 4 711,39 kW, además, de observar en la Figura 5.37 que el mes mas bajo, que se va a tener es Abril con un máximo de energía anual de 3 889,45 kW.

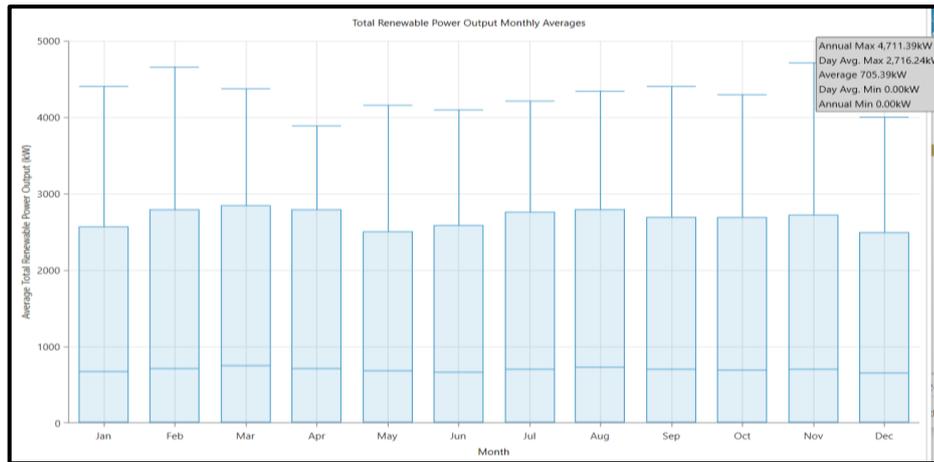


Figura 5.36. Producción máxima de energía renovable mensual.

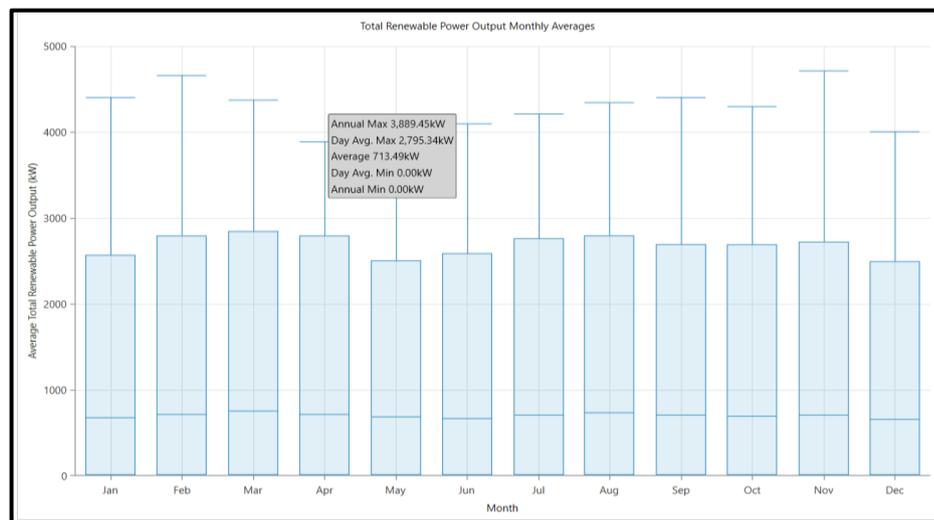


Figura 5.37. Producción mínima de energía renovable mensual.

Con la simulación realizada en Homer Pro 3.14.2, se tiene que la planta híbrida genera 6 208 044 [kWh/año], además esto, se hace referencia a una potencia de planta fotovoltaica de 4 940 [kW] el cual va a producir 6 125 214 [kWh/año], para la parte eólica se va a necesitar un aerogenerador que produce una energía total de 846 [kWh/año].

5.4 REQUISITOS PARA LA CONEXIÓN A LA RED

La regulación del ARCONEL 004/15 indica los requisitos técnicos a tener en cuenta para la conexión a la red eléctrica de generadores de energía renovable no convencionales.

Independientemente de la red a la cual se conecte y de la potencia del generador, se realizarían los siguientes estudios y pruebas de certificación de los equipos referidos en las Figuras 5.38, 5.39 y 5.40 [36]:

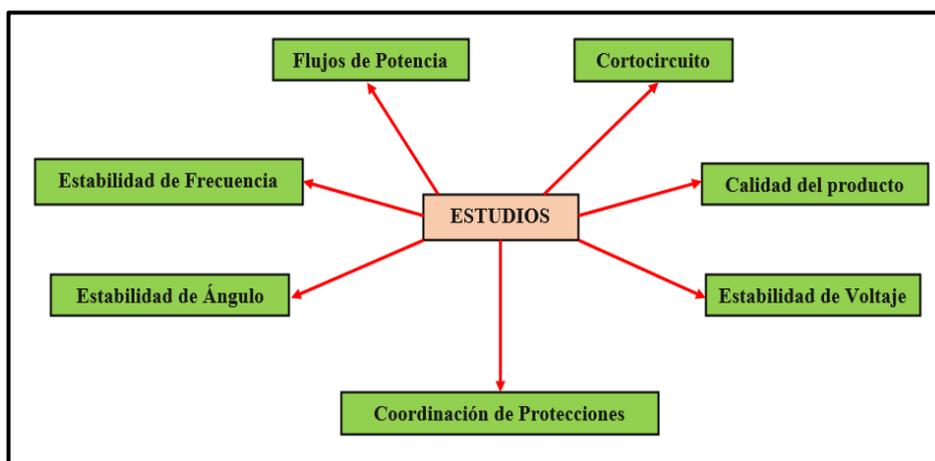


Figura 5.38. Estudios para la conexión de sistemas híbridos a la red.

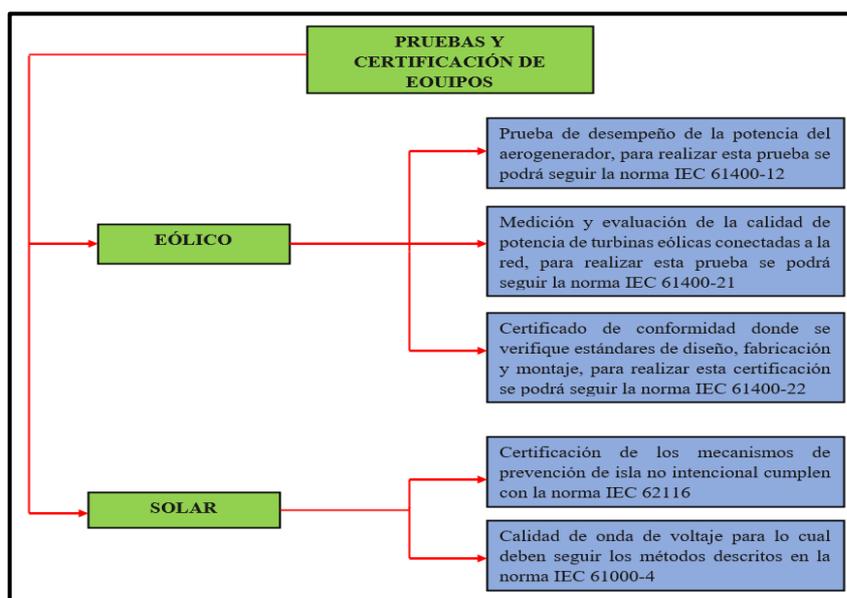


Figura 5.39. Pruebas y certificación para la conexión de sistemas híbridos a la red.

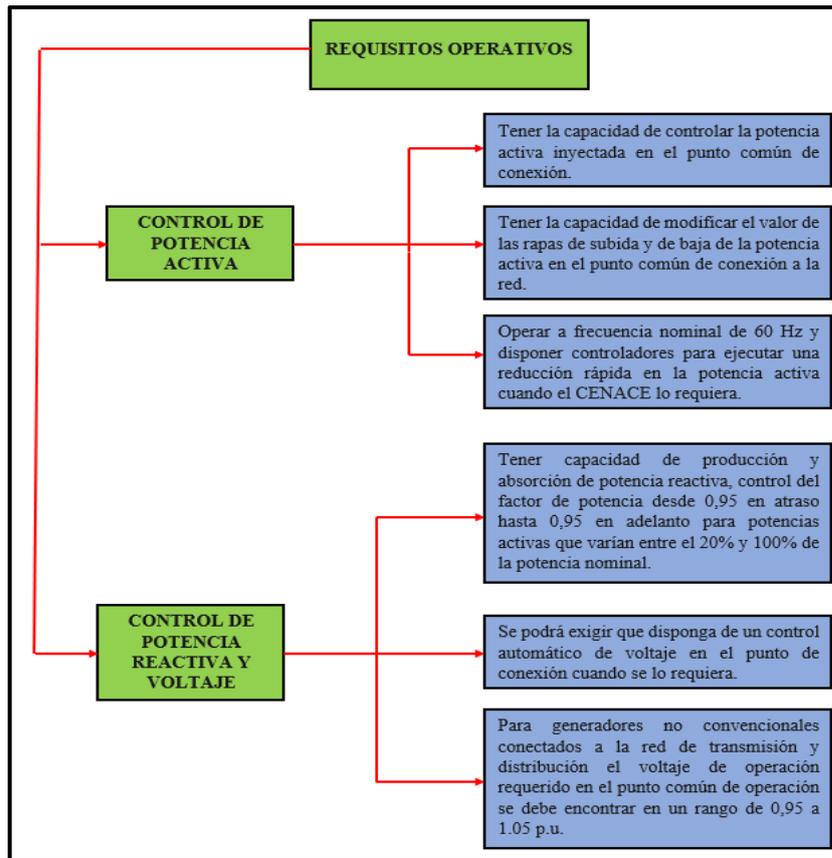


Figura 5.40. Requisitos para el control de la potencia activa y reactiva.

Para el desbalance de voltaje según la norma IEC 61000-4-30 el desbalance máximo en estado estable no sería mayor al 5 % en cada una de las fases.

5.5 DIAGRAMA UNIFILAR BÁSICO DE LA CONEXIÓN A LA RED DE UN SISTEMA HÍBRIDO

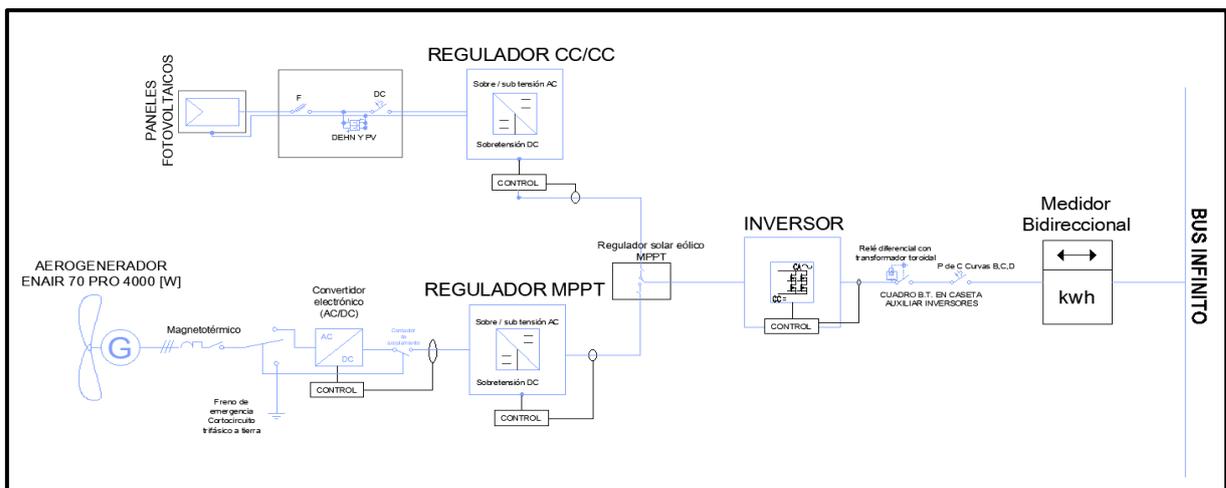


Figura 5.41. Diagrama unifilar de un sistema híbrido solar - eólico.

En la Figura 5.41 se aprecia el diagrama unifilar de la conexión de un sistema híbrido solar - eólico a la red, en una breve descripción los paneles solares generar energía eléctrica en corriente directa y el aerogenerador producen energía eléctrica en corriente alterna, las mismas que ingresa a un regulador que convierte esta energía en corriente directa para poder unirse mediante el regulador solar - eólico, posteriormente ingresan al inversor el cual realiza una labor importante, se encarga de transformar la energía eléctrica directa en alterna para así incorporarse al medidor bidireccional y al sincronoscopio el cual, se encarga del sincronismo de la frecuencia y voltaje para, que se encuentre en fase con respecto a la red eléctrica y así poder distribuir la energía generada por parte de la planta híbrida.

5.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico del proyecto, se realizó una investigación con respecto a los costos tanto de instalación como de mantenimiento, estos costos fueron brindados por el fabricante de cada uno de los sistemas para lograr obtener la inversión inicial con un valor de \$ 3 655 570,51 la que sirvió para realizar el modelo económico de la plata híbrida, estos valores referenciales, se presentan en la Tabla 5.17 y 5.18.

Tabla 5.17. Costos de la planta solar

INFORMACIÓN PLANTA SOLAR	
Potencia de la Planta en [kWp]	4 506
Costo Unitario [\$/kWp]	\$ 801,43
Costo de Mantenimiento Anual	\$ 16 240,50
Precio de la Planta	\$ 3 611 243,58
Número de Paneles	8 268

Tabla 5.18. Costos de la planta eólica

INFORMACIÓN PLANTA EÓLICA	
Potencia del Aerogenerador [kW]	4
Aerogenerador	\$ 11 303,97

Conexión a la Red	\$ 3 179,95
Torre de 12 m	\$ 2 512,00
Extensión de 3m	\$ 3 425,45
Sub Total	\$ 20 421,37
Impuestos de Importación	\$ 11 905,66
Costo del Aerogenerador	\$ 32 327,03
Instalación por [kW] instalado	\$ 4 000,00
Total, Instalación	\$ 12 000,00
Precio de la Planta	\$ 44 327,03

Para desarrollar el modelo económico, se tomó en cuenta los años de vida útil tanto de los paneles solares, así como, también, del aerogenerador, adicional a ello se considera la degradación anual de los sistemas, esta degradación es obtenida mediante el simulador PVsyst, el sistema solar aporta con un 99 % al sistema híbrido. En la Tabla 5.19 se presentan los valores mencionados anteriormente, además, del costo de la energía, costos de mantenimiento y beneficio tributario, los dos últimos valores mencionados fueron tomados como referencia de una empresa la cual, se dedica al diseño y ejecución de proyectos de energías renovables.

Tabla 5.19. Modelo económico

MODELO ECONÓMICO DE LA PLANTA HÍBRIDA									
Año	Índice Degradación	Energía [kWh]	Costo \$/kWh	Ahorro de Energía	Beneficio Tributario	Costo de Mantenimiento	Flujo de Caja	Ahorro Total Acumulado	Periodo de Retorno (PRI)
							\$(3 655 570,61)		
1	0,980	5 415 442,00	\$ 0,10	\$ 541 544,20	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 706 616,83	\$ 706 616,83	-3 655 570,61
2	0,975	5 277 348,23	\$ 0,10	\$ 527 734,82	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 692 807,45	\$ 1 399 424,28	-2 944 898,61
3	0,969	5 247 563,30	\$ 0,10	\$ 524 756,33	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 689 828,96	\$ 2 089 253,24	-2 237 205,10
4	0,964	5 217 778,37	\$ 0,10	\$ 521 777,84	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 686 850,47	\$ 2 776 103,71	-1 532 490,08
5	0,958	5 187 993,44	\$ 0,10	\$ 518 799,34	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 683 871,97	\$ 3 459 975,68	-830 753,56
6	0,953	5 158 208,51	\$ 0,10	\$ 515 820,85	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 680 893,48	\$ 4 140 869,16	-131 995,53
7	0,947	5 128 423,57	\$ 0,10	\$ 512 842,36	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 677 914,99	\$ 4 818 784,15	563 784,01
8	0,942	5 098 638,64	\$ 0,10	\$ 509 863,86	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 674 936,49	\$ 5 493 720,65	1 256 585,06
9	0,936	5 068 853,71	\$ 0,10	\$ 506 885,37	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 671 958,00	\$ 6 165 678,65	1 946 407,61
10	0,931	5 039 068,78	\$ 0,10	\$ 503 906,88	\$ 182 937,18	\$ 17 864,55	\$ 668 979,51	\$ 6 834 658,15	2 633 251,67
11	0,925	5 009 283,85	\$ 0,10	\$ 500 928,39		\$ 17 864,55	\$ 483 063,84	\$ 7 317 721,99	3 134 180,05
12	0,920	4 979 498,92	\$ 0,10	\$ 497 949,89		\$ 17 864,55	\$ 480 085,34	\$ 7 797 807,33	3 632 129,94
13	0,914	4 949 713,99	\$ 0,10	\$ 494 971,40		\$ 17 864,55	\$ 477 106,85	\$ 8 274 914,18	4 127 101,34
14	0,909	4 919 929,06	\$ 0,10	\$ 491 992,91		\$ 17 864,55	\$ 474 128,36	\$ 8 749 042,54	4 619 094,25
15	0,903	4 890 144,13	\$ 0,10	\$ 489 014,41		\$ 17 864,55	\$ 471 149,86	\$ 9 220 192,40	5 108 108,66
16	0,898	4 860 359,20	\$ 0,10	\$ 486 035,92		\$ 17 864,55	\$ 468 171,37	\$ 9 688 363,77	5 594 144,58
17	0,892	4 830 574,26	\$ 0,10	\$ 483 057,43		\$ 17 864,55	\$ 465 192,88	\$ 10 153 556,64	6 077 202,01
18	0,887	4 800 789,33	\$ 0,10	\$ 480 078,93		\$ 17 864,55	\$ 462 214,38	\$ 10 615 771,03	6 557 280,94
19	0,881	4 771 004,40	\$ 0,10	\$ 477 100,44		\$ 17 864,55	\$ 459 235,89	\$ 11 075 006,92	7 034 381,38
20	0,876	4 741 219,47	\$ 0,10	\$ 474 121,95		\$ 17 864,55	\$ 456 257,40	\$ 11 531 264,32	7 508 503,33
21	0,870	4 711 434,54	\$ 0,10	\$ 471 143,45		\$ 17 864,55	\$ 453 278,90	\$ 11 984 543,22	7 979 646,78
22	0,865	4 681 649,61	\$ 0,10	\$ 468 164,96		\$ 17 864,55	\$ 450 300,41	\$ 12 434 843,63	8 447 811,74
23	0,859	4 651 864,68	\$ 0,10	\$ 465 186,47		\$ 17 864,55	\$ 447 321,92	\$ 12 882 165,55	8 912 998,21
24	0,854	4 622 079,75	\$ 0,10	\$ 462 207,97		\$ 17 864,55	\$ 444 343,42	\$ 13 326 508,97	9 375 206,18
25	0,848	4 592 294,82	\$ 0,10	\$ 459 229,48		\$ 17 864,55	\$ 441 364,93	\$ 13 767 873,90	9 834 435,67
Energía Vida Útil		123 851 158,54						\$ 13 767 873,90	
Inversión		\$ 3 655 570,61					TIR	17,39%	
Precio kWh		\$ 0,0295					VAN	\$ 1 974 045,15	
Tasa de descuento		9,89%					VPN	\$-0,00	

Para encontrar todos los valores expuestos en la Tabla 5.19 se tomó en consideración la energía suministrada a un 95 % de su capacidad con un valor de 5 415 000 [kWh] a este valor, se lo aprecia en la Figura 5.42 la misma que corresponde al sistema solar.

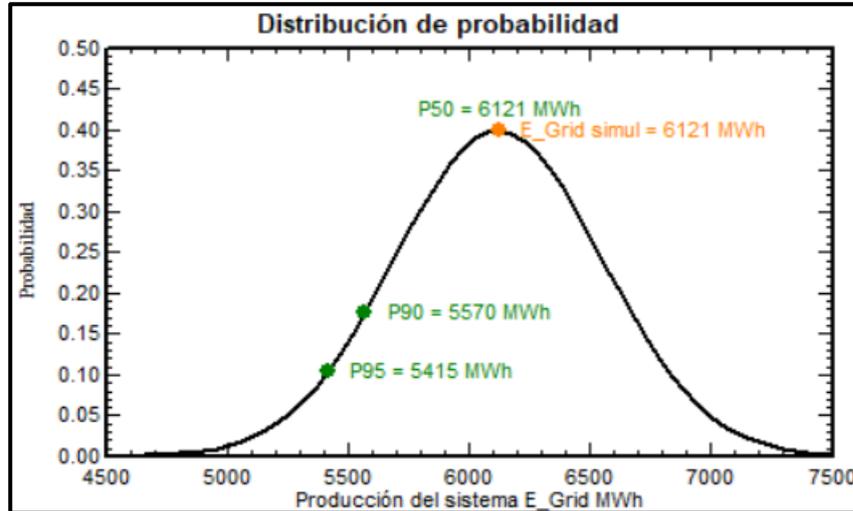


Figura 5.42. Eficiencia energética en diferentes porcentajes.

Para determinar la energía total del sistema híbrido, se sumaría los 846 [kWh] que entrega el sistema eólico, se visualiza que la energía total del sistema híbrido con la, que se va a trabajar es de 5 415 442,00 [kWh], este valor de energía anual, se degrada con cada año que pasa con lo que, en los 25 años de vida útil del sistema, se llega a obtener un total de energía de 123 851 158 [kWh].

Por consiguiente, el precio del [kWh] es de 0,03 centavos de dólar, este dato, se obtuvo de la diferencia entre la inversión y la energía de vida útil del sistema. Para determinar la viabilidad del proyecto, se tomó una tasa de descuento de 9,89 % este valor, se basó en la Tabla de la Tasa de Interés, que se encuentra en el Anexo E expuesta por la Junta de Política y Regulación Monetaria y Financiera.

Para encontrar el VAN (Valor Actual Neto), el TIR (Tasa Interna de Retorno) y PRI (Periodo de Retorno de la Inversión Simple), se obtuvieron los Flujos de Caja, estos flujos se utilizan en la evaluación financiera de proyectos de energía.

En la Tabla 5.19 se aprecia, que se tiene un VAN positivo de \$ 1 974 095,15, este valor al ser positivo y mayor a cero indica que el proyecto tiene rentabilidad y es viable, también, se aprecia el valor del TIR es de 17,39 % este valor indica la tasa de descuento a la cual el VPN (Valor Presente Neto del Proyecto) es igual a cero.

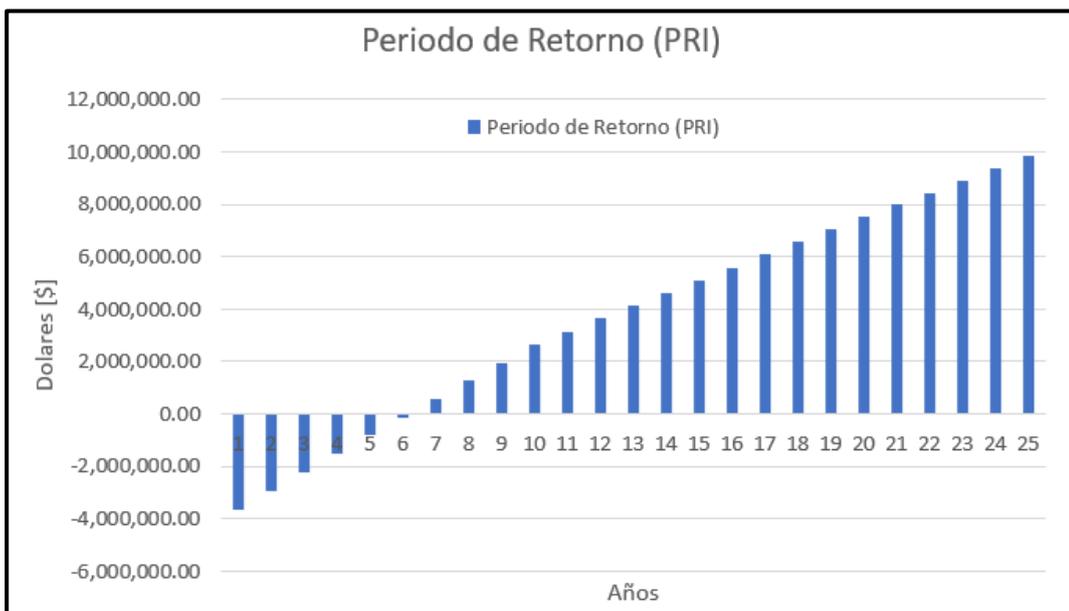


Figura 5.43. Periodo de retorno del proyecto.

El PRI es el periodo en el que se va a recuperar la inversión realizada para el proyecto generalmente se la expresa en años, este proyecto posee un periodo de retorno de la inversión en el año 7 con un valor de ganancia de \$ 563 784,01 como se muestra en la Figura 5.43.

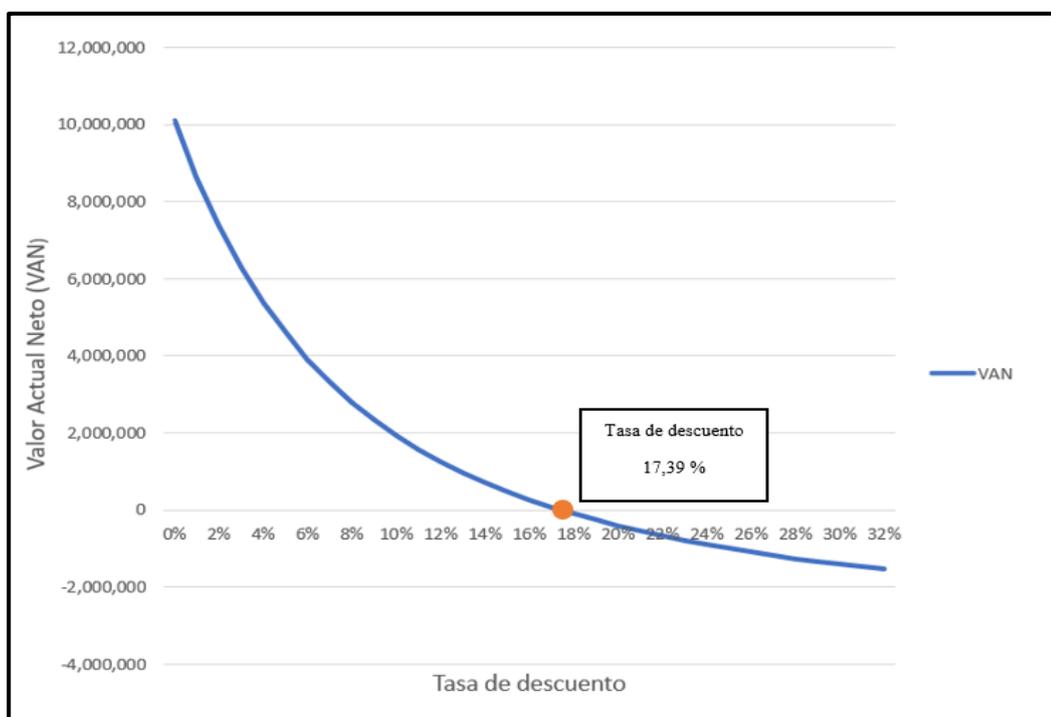


Figura 5.44. Perfil de VAN y TIR.

En la Figura 5.44 se aprecia una curva caracteriza que refleja la relación entre el VAN y varias tasas de descuento para ello, se evidencia que con una tasa de descuento del 17,39 %, se obtiene un VAN de \$ 0,00 es decir que si la tasa de descuento es menor al 17,39 % el proyecto es rentable, mientras que si el porcentaje es mayor al 17,39 % el proyecto deja de tener rentabilidad.

5.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la Tabla 5.20 indica los valores totales obtenidos en las simulaciones, que sirvieron para la comparación del comportamiento de los sistemas y ver cuánto llegaría a entregar cada sistema a la red eléctrica.

Tabla 5.20. Comparación de energía de los sistemas

Sistema	Matlab y PVsyst	Homer Pro	Porcentaje de Aportación
Fotovoltaico	6 122 000 [kWh/año]	6 125 214 [kWh/año]	99%
Eólico	884 [kWh/año]	846 [kWh/año]	1%
Híbrido	6 122 884[kWh/año]	6 126 060 [kWh/año]	100%

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Mediante las investigaciones en distintas fuentes bibliográficas, tesis, monografías, artículos científicos, entre otros, se logró reforzar el conocimiento con respecto a la generación de energía eléctrica a través de recursos renovables no convencionales (viento y sol), para así poder cumplir con lo expuesto en el primer objetivo.
- Los 8 784 datos recolectados de la velocidad del viento, ajustados de acuerdo a las condiciones reales del área de estudio, determinaron la probabilidad de Weibull la cual indica la velocidad máxima del viento que corresponde a 3.73 [m/s] con una frecuencia del 38%, que son los mismos parámetros, que se expresa matemáticamente con la ayuda de Matlab Ra 2020, esto con el fin de predecir el comportamiento de la velocidad del viento para un período de tiempo y determinar el potencial eólico disponible en el área de estudio que es de 739 [W].
- A través del parámetro de radiación solar y un área de 30 000 m², se logró identificar que panel fotovoltaico se puede ubicar en la zona (JKM545M-72HL4-BDVP de JINKO SOLAR), además, de establecer el número de paneles fotovoltaicos 24 ubicados en serie y 345 en paralelo, con el fin de evidenciar la potencia generada por la planta solar con un total de 4 512 [kWp] mediante el simulador PVsyst 7.2.
- Mediante la simulación del sistema híbrido en Homer Pro 3.14.2, se obtuvo la cantidad de energía eléctrica que va a generar el sistema que es de 6 126 060 [kWh/año], el modelo adecuado en función del recurso energético disponible en la zona, además, con Matlab Ra 2020 se determinó el comportamiento de cada uno de los sistemas (aerogenerador y paneles fotovoltaicos) con el fin de obtener las curvas de los parámetros eléctricos (Voltaje, Corriente y Potencia) en función de la velocidad del viento y la radiación solar.
- Se logró comparar los datos obtenidos en las distintas simulaciones a través de un cuadro resumen con el fin de determinar el porcentaje de aportación de cada uno de los sistemas, además, del análisis económico según la inversión inicial con un valor de

\$ 3 655 570 y conseguir así en valor actual neto con una cantidad de \$ 1 974 045, además de una tasa interna de retorno con un porcentaje del 17,39 % y un periodo de retorno de la inversión inicial en el año 7 con un total de \$ 563 784.

6.2 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios con respecto a la generación de energía eléctrica con energías alternativas no convencionales con el fin de no ser dependientes de recursos fósiles y así fortalecer los sistemas que se encuentran conectados a la red eléctrica.
- Fomentar el uso de energías renovables con el fin de mitigar la contaminación ambiental que generan las centrales térmicas que son dependientes de recursos derivados del petróleo y así mejorar la eficiencia energética.
- Implementar este tipo de centrales de generación en el sector de Lasso ya que en el presente estudio realizado se determinó que la potencia fotovoltaica en la zona tiene incidencia dentro de la generación de electricidad a base de paneles solares.
- Las instituciones públicas y privadas del Ecuador a través de inversiones extranjeras y sus distintos incentivos pueden implementar este tipo de generación con fuentes de energía limpia para así poder cumplir con los objetivos que tiene el desarrollo sostenible, en especial el de brindar energía asequible y no contaminante.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. J. B. Jiménez, “Diseño de un sistema autónomo de generación híbrido solar - eólico para electrificación domiciliaria.,” 2014.
- [2] E. M. A. Mokheimer, A. Al-Sharafi, M. A. Habib, and I. Alzaharnah, “A new Study for Hybrid PV/Wind off-Grid Power Generation Systems with the Comparison of Results from Homer,” *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 5, pp. 526–542, 2015, doi: 10.1080/15435075.2013.833929.
- [3] W. P. Arévalo Cordero, “Optimización en dimensionamiento y control energético de sistemas híbridos de energías renovables en Ecuador,” 2021.
- [4] O. C. N. Souto, S. B. Silva, D. M. de Souza, J. S. Amaral, and G. P. Viajante, “Economic analysis for Brazil residential consumers considering the time-of-use tariffs and demand side management of electricity using HOMER PRO energy,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 16, pp. 617–622, 2018, doi: 10.24084/repqj16.410.
- [5] “Google Maps.”
- [6] J. Serván, “Análisis Técnico - Económico de un Sistema Híbrido de baja Potencia Eólico solar conectado a la Red,” 2014.
- [7] V. C. Herrera Barros, “Sistema Híbrido Eólico - Fotovoltaico para la Generación de Energía Eléctrica en el departamento de turismo del ilustre Municipio de Baños de Agua Santa,” *Repos. Digit. la Univ. Técnica Ambato*, p. 138, 2011, [Online]. Available: http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/438/1/Tesis_t646ec.pdf.
- [8] R. B. Ravelo, “Factibilidad Técnica y Económica de un Sistema Híbrido Aislado de Red para la Estación Cotopaxi del Instituto Espacial Ecuatoriano,” 2015.
- [9] D. Fernando and M. Osorio, “Impacto de la Masificación de la Generación Solar Fotovoltaica en Sistemas de Distribución,” 2015.
- [10] A. Salinas, “Aspectos Tecnicos en una Red de Distribucion, Inyectar Energía Eléctrica de Microgeneracion,” vol. 6, p. 104, 2019.
- [11] R. Hernández Gallegos, “Análisis de Factibilidad para la Instalación de un Sistema de Energía Limpia Mediante Celdas Fotovoltaicas para la Alimentación Eléctrica del Edificio 4 en el ITSLV.,” *Ciateq*, p. 85, 2017, [Online]. Available: <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/97/1/HernandezGallegosRodolfoMMANAV2017.pdf>.
- [12] R. R. Peláez, “Análisis de viabilidad de una planta solar fotovoltaica en Chile,” pp. 27–33, 2015.

- [13] I. Horikoshi, “Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos,” pp. 1–136, 2009.
- [14] E. N. Torres, “Sistema de Información para el Análisis de Datos del Viento,” 2014.
- [15] J. Moragues and A. Rapallini, Instituto Argentino de la Energía. 2003.
- [16] Á. Pinilla, Manual de aplicación de la energía eólica. 1997, p. 61.
- [17] N. Aranda, “Diseño de un aerogenerador de baja potencia,” pp. 12–24, 2020.
- [18] C. A. A. Castro, “Diseño de un Aerogenerador de baja Potencia en la comunidad de Río Blanco, Provincia de Tungurahua,” 2017.
- [19] N. González, R. Hernán, V. Zhindón, and M. Vinicio, “Estudio de Factibilidad de Generación Eléctrica mediante Energía Eólica y Energía Solar Fotovoltaica para el sector de Garauzhí de la Parroquia Quingeo perteneciente a la Ciudad de Cuenca,” 2014.
- [20] A. Arenas, P. Mediavilla, F. Gracia, and P. Garcés, Estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia con generación renovable. 2013.
- [21] R. D. Medina, “Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad,” *Ingenius*, no. 12, pp. 15–23, 2014, doi: 10.17163/ings.n12.2014.02.
- [22] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, “Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 12, no. 2, pp. 117–132, 2015, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001.
- [23] O. C. N. Souto, S. B. Silva, D. M. De Souza, and G. P. Viajante, “HOMER PRO Energy,” vol. 1, no. 16, pp. 617–622, 2018.
- [24] N. R. E. Laboratory, “Innovation for our energy future,” *Www.Nrel.Gov/International*, p. 2, 2004.
- [25] A. Marneni, A. D. Kulkarni, and T. Ananthapadmanabha, “Loss Reduction and Voltage Profile Improvement in a Rural Distribution Feeder Using Solar Photovoltaic Generation and Rural Distribution Feeder Optimization Using HOMER,” *Procedia Technol.*, vol. 21, pp. 507–513, 2015, doi: 10.1016/j.protcy.2015.10.036.
- [26] S. C. Bhattacharyya, “Off - grid Electricity Generation with Renewable Energy Technologies in India : An Application of HOMER Rohit Sen The Energy and Resources Institute , New Delhi India and Subhes C Bhattacharyya Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort U,” no. February, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2013.07.028.

- [27] O. Hafez and K. Bhattacharya, “Corrigendum to Optimal Planning and design of a Renewable Energy based supply system for micro-grids [Int. J. Renew. Energy, Vol. 45, 2012, pp.7–15] (International Journal of Renewable Energy (2012) 45 (7–15), (S0960148112000985), (10.1016/j.renene.2012.0,” Renew. Energy, vol. 165, p. 127.
- [28] S. Shezan, “Performance Analysis of Solar-Wind-Diesel- Battery Hybrid Energy System for KLIA Sepang Station of Malaysia Performance Analysis of Solar-Wind-Diesel- Battery Hybrid Energy System for KLIA Sepang Station of Malaysia,” 2015, doi: 10.1088/1757-899X/88/1/012074.
- [29] Y. Himri, A. Boudghene Stambouli, B. Draoui, and S. Himri, “Techno-Economical Study of Hybrid Power System for a Remote Village in Algeria,” Energy, vol. 33, no. 7, pp. 1128–1136, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.01.016.
- [30] J. M. Del Pino Tamborero, “NTP 331: Fiabilidad: la distribución de Weibull,” p. 10, 1994, [Online]. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_331.pdf.
- [31] J. L. Oviedo-Salazar, M. H. Badii, A. Guillen, and O. Lugo Serrato, “History and Use of Renewable Energies,” Daena Int. J. Good Conscienc., vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2015, [Online]. Available: [http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10\(1\)1-18.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10(1)1-18.pdf).
- [32] Universidad Autónoma de México, “Histograma de Frecuencia,” Fac. Estud. Super. Cuautitlán, p. 18, 2018, [Online]. Available: <http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/Laboratoriovirtualdeestadistica/DOCUMENTOS/TEMA 1/7. HISTOGRAMAS.pdf>.
- [33] J. M. Ramos Herrera, Sergio; Magaña Villegas, Elizabeth; Carrera Velueta, “Manual para el manejo de software especializado WRPLOT View,” 2000.
- [34] Enair, Ficha Técnica Enair 70 PRO Características Técnicas, Eléctricas y de Funcionamiento. 2020.
- [35] JinkoSolar, “Tiger Pro 72HC-BDVP BIFACIAL MODULE WITH,” pp. 3–4, 2020.
- [36] ARCONEL, “REGULACION No. ARCONEL - 004/15,” Regulación Eléctrica, vol. 0, no. 0. pp. 1–25, 2015, [Online]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/ARCONEL-004-17-GRANDES-CONSUMIDORES.pdf>.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO A: BASE DE DATOS

Time	Windspeed	Wind Directio	Solar Radiation Avg
1/1/2020 0:00	3.28833333	164.966667	0
1/1/2020 1:00	5.65333333	117.35	0
1/1/2020 2:00	3.04333333	192.566667	0
1/1/2020 3:00	0.265	204.916667	0
1/1/2020 4:00	2.02166667	202	0
1/1/2020 5:00	1.61166667	161.016667	0
1/1/2020 6:00	2.55666667	193.6	3.35
1/1/2020 7:00	2.88166667	240.35	54.35
1/1/2020 8:00	2.295	227.2	167.9
1/1/2020 9:00	5.96333333	186.2	234.366667
1/1/2020 10:00	6.19666667	166.966667	326.6
1/1/2020 11:00	8.57333333	130.833333	344.95
1/1/2020 12:00	7.20333333	156.35	281.333333
1/1/2020 13:00	3.13	185.55	287.316667
1/1/2020 14:00	10.1866667	270.466667	200.85
1/1/2020 15:00	6.59333333	182.333333	193.55
1/1/2020 16:00	9.38166667	128.933333	154.383333
1/1/2020 17:00	14.6416667	104.433333	61.7166667
1/1/2020 18:00	14.215	93.85	3.15
1/1/2020 19:00	12.1616667	113.65	0
1/1/2020 20:00	4.46166667	126.25	0
1/1/2020 21:00	6.245	129.5	0
1/1/2020 22:00	4.54	148.366667	0
1/1/2020 23:00	5.23666667	198	0
1/2/2020 0:00	4.08333333	191.3	0
1/2/2020 1:00	3.82666667	174.933333	0
1/2/2020 2:00	7.085	194.6	0

Figura A 1. Base de datos 1 de enero del 2020

12/30/2020 20:00	2.29333333	90.8333333	0
12/30/2020 21:00	0.09833333	335.583333	0
12/30/2020 22:00	1.13166667	315	0
12/30/2020 23:00	0	315	0
12/31/2020 0:00	0.035	315	0
12/31/2020 1:00	4.40833333	179.35	0
12/31/2020 2:00	0.77333333	160.683333	0
12/31/2020 3:00	5.28166667	157.983333	0
12/31/2020 4:00	1.19833333	201.866667	0
12/31/2020 5:00	1.57833333	234.516667	0
12/31/2020 6:00	4.17	168.766667	23.8
12/31/2020 7:00	3.40333333	221.9	112.3166667
12/31/2020 8:00	2.02	165.65	213.0166667
12/31/2020 9:00	4.575	233.8	346.5
12/31/2020 10:00	5.68166667	196.983333	581.4166667
12/31/2020 11:00	7.31666667	120.916667	324.3
12/31/2020 12:00	9.12666667	193.116667	625.6666667
12/31/2020 13:00	13.7833333	318.7	263.4
12/31/2020 14:00	11.865	208.4	141.8666667
12/31/2020 15:00	8.695	146	135.0666667
12/31/2020 16:00	5.59	159.3	84.81666667
12/31/2020 17:00	5.43333333	60.05	54.6
12/31/2020 18:00	6.95166667	121.333333	2.216666667
12/31/2020 19:00	6.59166667	203.183333	0
12/31/2020 20:00	2.57833333	153.733333	0
12/31/2020 21:00	2.41166667	173.45	0
12/31/2020 22:00	0.28166667	225	0
12/31/2020 23:00	1.51166667	192.35	0

Figura A 2. Base de datos 31 de diciembre del 2020

8.2 ANEXO B: SISTEMA EÓLICO

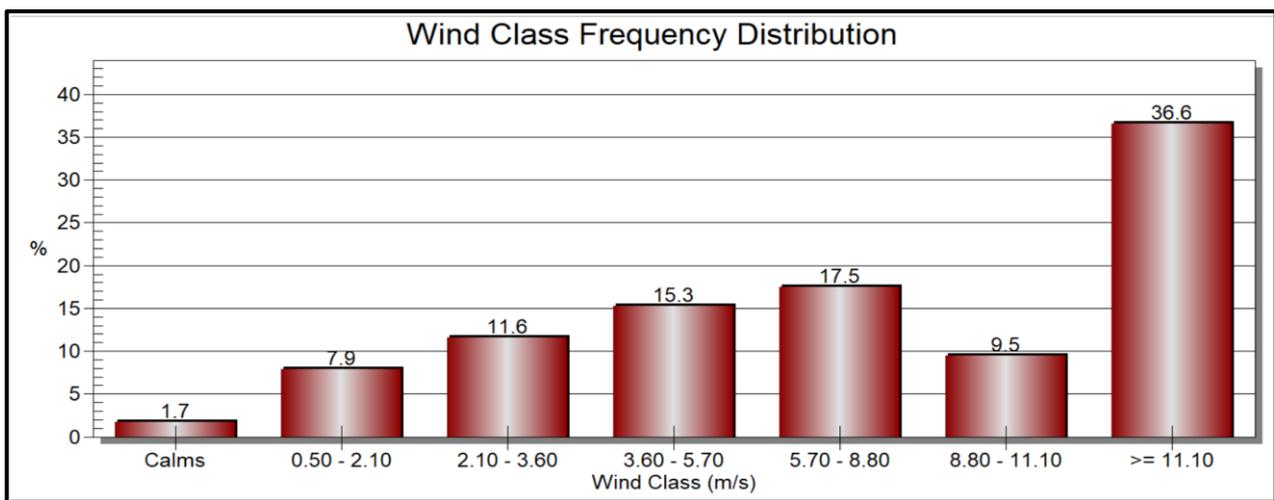


Figura B 1. Frecuencia de distribución obtenida en WRPLOT

```

clear all;
close all;
clc;
%%=====
filename='Demanda.xlsx';

```

Depuración de datos

```

filename='Demanda.xlsx';% archivo de excel
d1=xlsread(filename,2,'C2:D8785');
i=find(~isnan(d1(:,2)));
y=interp1(d1(i,1),d1(i,2),d1(:,1));
d1(:,2)=y % reconstruimos la matriz datos1

```

Figura B 2. Código matemático para depurar los datos en Matlab

```

V_viento=xlsread(filename,2,'D2:D13')
data=xlsread(filename,2,'D2:D8785'); %lectura del excel
Deman=xlsread(filename,1,'C11:C35');% Demanda
Daire=0.82

%head(data);
maxDur=max(data);
avgDur=mean(data);
figure
h=histogram(data);
xlabel("Velocidad del viento");
title("Potencia Eolico");
disp(h);
%ordenar los valores de manera decendiente
intervalo = 0:0.5:25;
% damageByevent=groupsummary(data,data);
locmin=islocalmin(data);

locmax=islocalmin(data);

% clear,clc
velocidad=xlsread(filename,2,'D2:D8785');%('WhiteDeer2013','Mar','F2:F745');
%interpolar si es necesario
if any(isnan(velocidad)) %si hay algún NaN
    x=1:length(velocidad);
    i=find(~isnan(velocidad));
    velocidad=interp1(x(i),velocidad(i),x);
end

```

Figura B 3. Código matemático para el análisis del viento

```

%parámetros c y k de la función de Weibull
x=0.5:1:max(velocidad);
horas=hist(velocidad,x)
%convierte a frecuencias y ajusta a la función de weibull
frec=horas/sum(horas)
f=@(a,x) (a(1)/a(2))*((x/a(2)).^(a(1)-1)).*exp(-(x/a(2)).^a(1))
a0=[2 8]; %valor inicial de los parámetros
af=nlinfit(x,frec,f,a0);
k1=af(1), c1=af(2)
fprintf('Parámetros Weibull: k=%1.4f, c=%1.4f\n',k1,c1)
k=real(k1);
c=real(c1);
%directamente de los datos de las velocidades del viento
potencia=0.5*1.225*sum(velocidad.^3)/length(velocidad);
fprintf('Potencia, directamente de las medidas: %3.1f\n',potencia);
media=mean(velocidad);
%función de distribución de weibull
potencia=0.5*1.225*media^3*gamma(1+3/k)/(gamma(1+1/k)^3);
fprintf('Potencia, función Weibull: %3.1f\n',potencia);
%función de distribución de Rayleigh
potencia=0.5*1.225*6*media^3/pi;
fprintf('Potencia, función Rayleigh: %3.1f\n',potencia);

c=4;% Se modifica
K=[2 2.5 3 3.5 4]; %Se modifica

```

Figura B 4. Código matemático para encontrar los parámetros c y k

```

c=4;% Se modifica
K=[2 2.5 3 3.5 4]; %Se modifica

%K=frec*10
f=@(k,x) (k/c)*((x/c).^(k-1)).*exp(-(x/c).^k);
figure
x=linspace(0,10,100);
hold on
for i=1:length(K)
    plot(x,f(K(i),x),'displayName',num2str(K(i)))
end
ylim([0 1.2])
xlabel('Velocidad del viento m/s')
ylabel('Frecuencia (%)')
title('Función de Weibull')
legend('-DynamicLegend','location','NorthEast')
hold off

```

Figura B 5. Código matemático para la obtención de la gráfica de Weibull

```

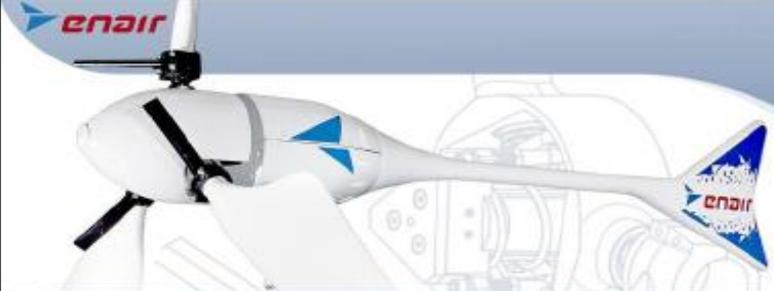
xlim([0.00 10]) % Se modifica
ylim([0.00 0.4]) % Se modifica

for a=1:length(V_viento)
    Peoli(a)=0.2319*V_viento(a)^4-11.768*V_viento(a)^3+181.39*V_viento(a)^2-569.63*V_viento(a)+257.2;
end

figure
hold on
%plot(Deman)
plot(Peoli)
title('Energia Mensual')
xlabel('Tiempo (meses)')
ylabel('Potencia (W)')
legend('P eólica', 'location', 'northwest')
hold off
hold off

```

Figura B 6. Código matemático para la obtención de la gráfica de la energía mensual



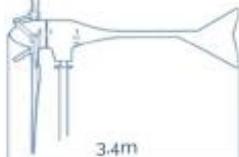
E70PRO

FICHA TÉCNICA

Con una velocidad de viento medio situado en la nominal de 11m/s el modelo Enair 70PRO es capaz de generar más de 70kWh/día

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, ELÉCTRICAS Y DE FUNCIONAMIENTO

Numero de palas	3
Material de palas	Fibra de vidrio con resinas y núcleo de poliuretano
Generador	250rpm nominales imanes de neodimio
Potencia	5500W
Potencia Nominal	4000W (según IEC 61400-2)
Tensión	24/48/220V
Clase de viento	CLASS I-IEC 61400-2/NVNI-A
Diámetro	4.30m
Sentido de Giro	Horario
Área de barrido	14.5m²
Peso	165kg
Aplicaciones	Carga de baterías 24 o 48V y conexión a red
Viento de arranque	2m/s
Velocidad nominal	11m/s
Vel. regulación paso variable	12m/s
Velocidad de supervivencia	60m/s
Rango de generación eficiente	De 2 a 60m/s
Tipo	Rotor de eje horizontal a barlovento
Orientación	Sistema pasivo con timón de orientación
Control de potencia	Sistema de paso variable pasivo centrífugo con dos vel.
Transmisión	Directa
Freno	- Electromagnético por cortocircuito - Mecánico (opcional) - Aerodinámico mediante paso variable - Manual o automático por viento o por tensión de baterías
Controlador	Carga de baterías y conexión a red
Inversor eólico	Eficiencia 97%. algoritmo MPPT
Ruido	48dB Reducción al mínimo gracias al diseño de las palas y a las bajas revoluciones. 1% más que el ruido ambiente del viento
Protección anti-corrosión	Hermético, pintura epoxi de secado al horno de alta temperatura, generando un recubrimiento plástico
Torre	Celosia, presilla y tubular, abatibles o fijas, altura variable





Avenida de Ibi, 44 - P.O. 182 C.P. 03420 | Castalla (Alicante), España
+34 96 556 00 18 info@enair.es

www.enair.es

Figura B 7. Ficha técnica del aerogenerador Enair 70 Pro

8.3 ANEXO C: SISTEMA FOTOVOLTAICO

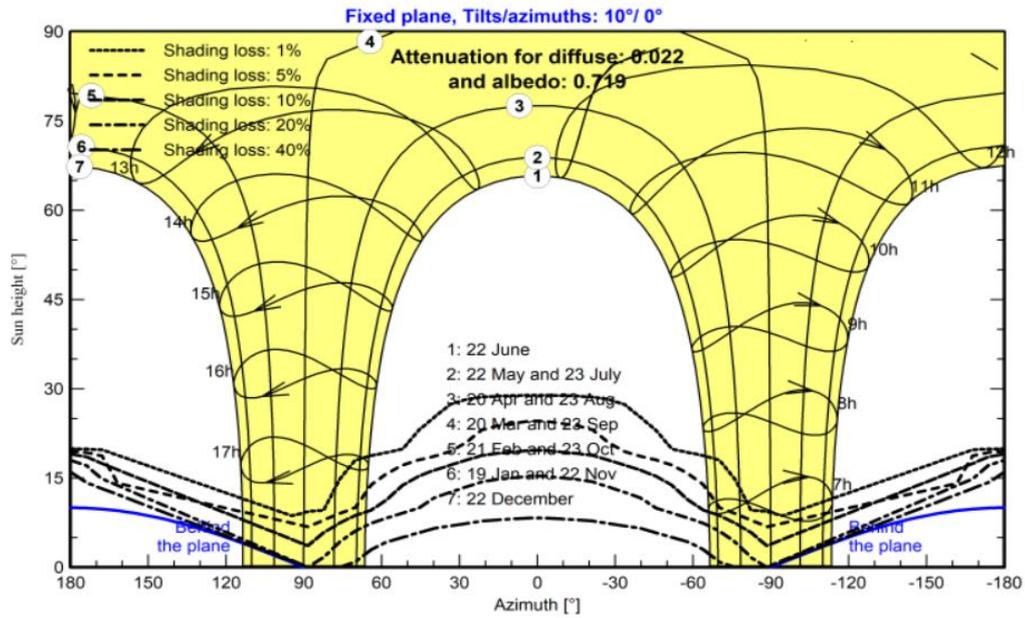


Figura C 1. Comportamiento del sol en la zona y las curvas de pérdida por el efecto sombra

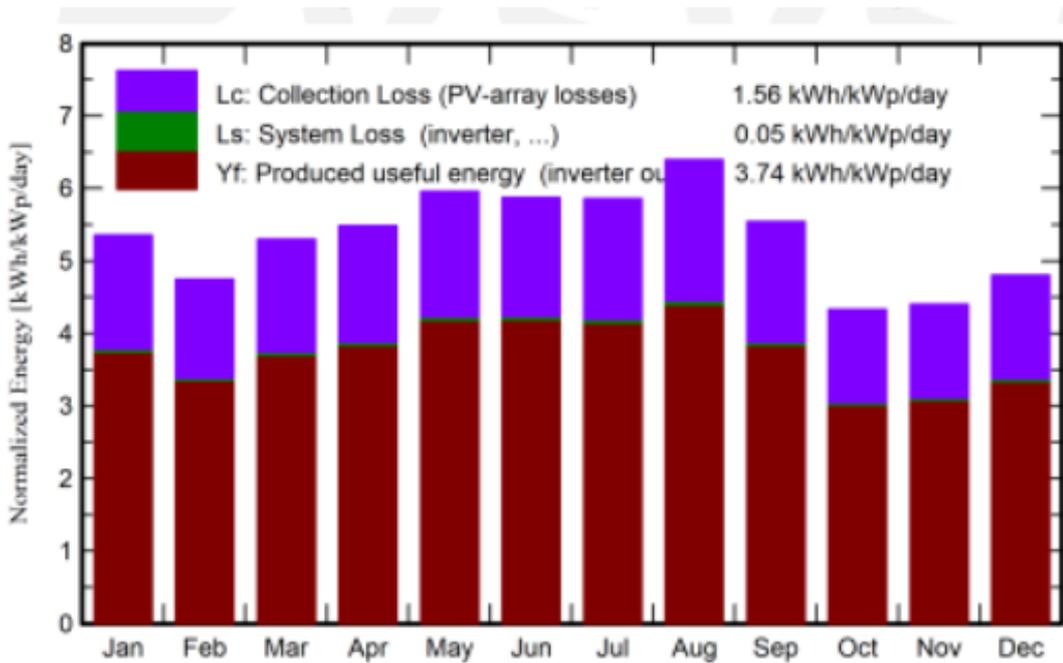


Figura C 2. Producción normalizada por kWp instalado

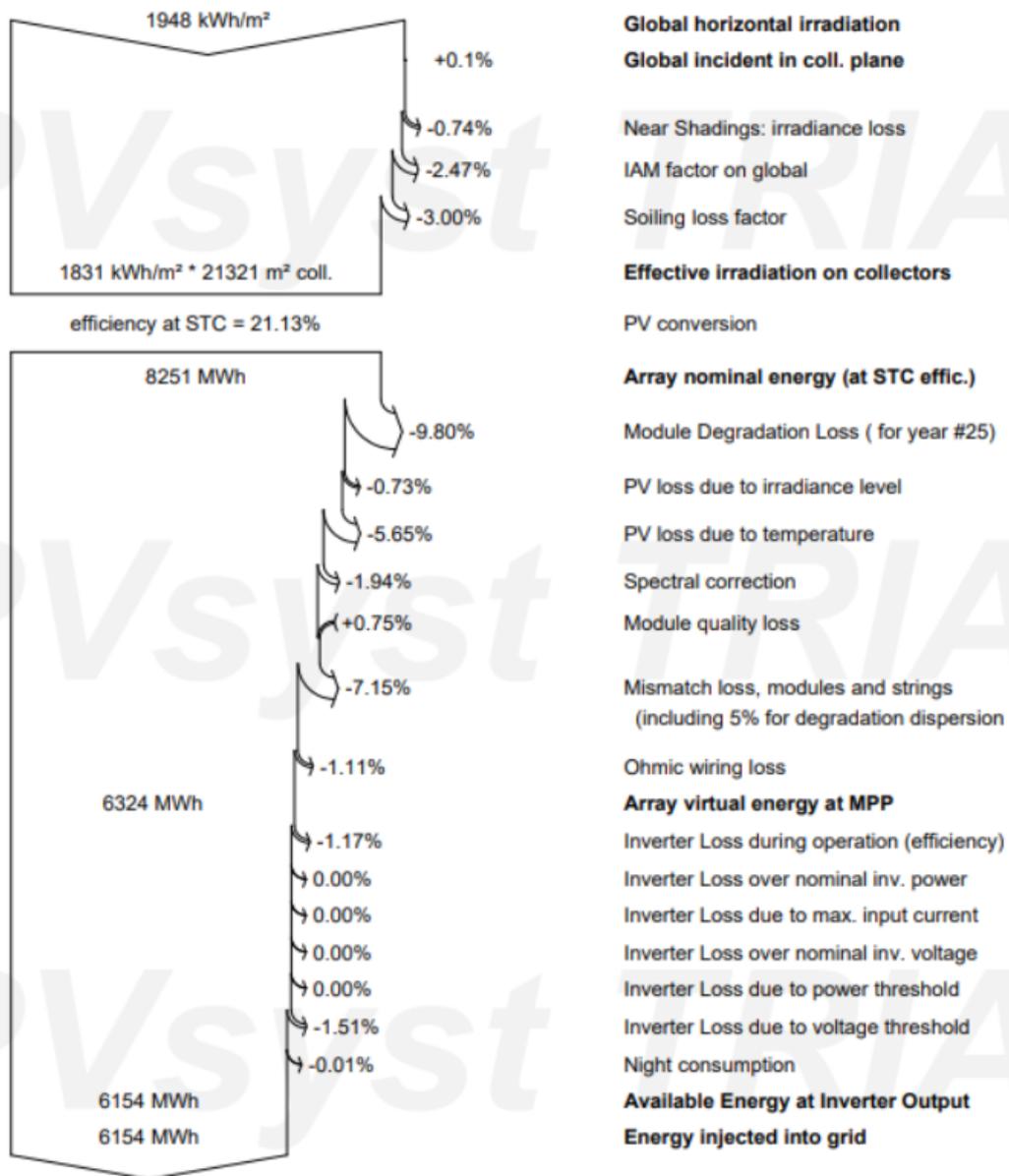


Figura C 3. Diagrama de pérdidas del sistema

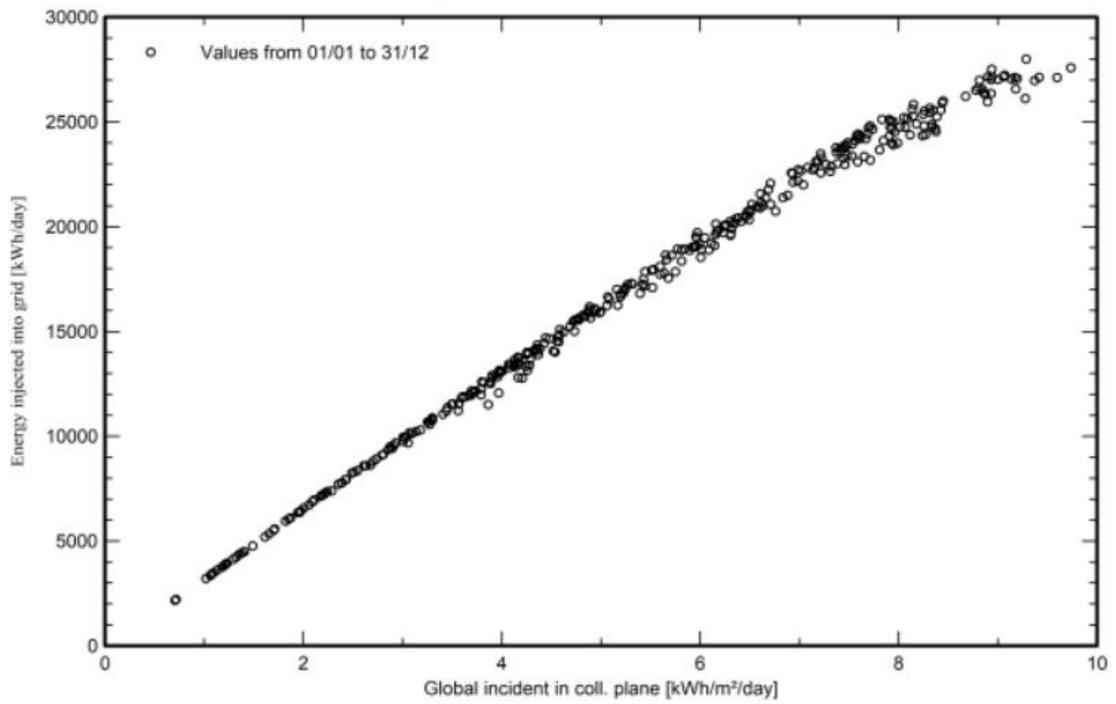


Figura C 4. Diagrama de salida y entrada del sistema fotovoltaico

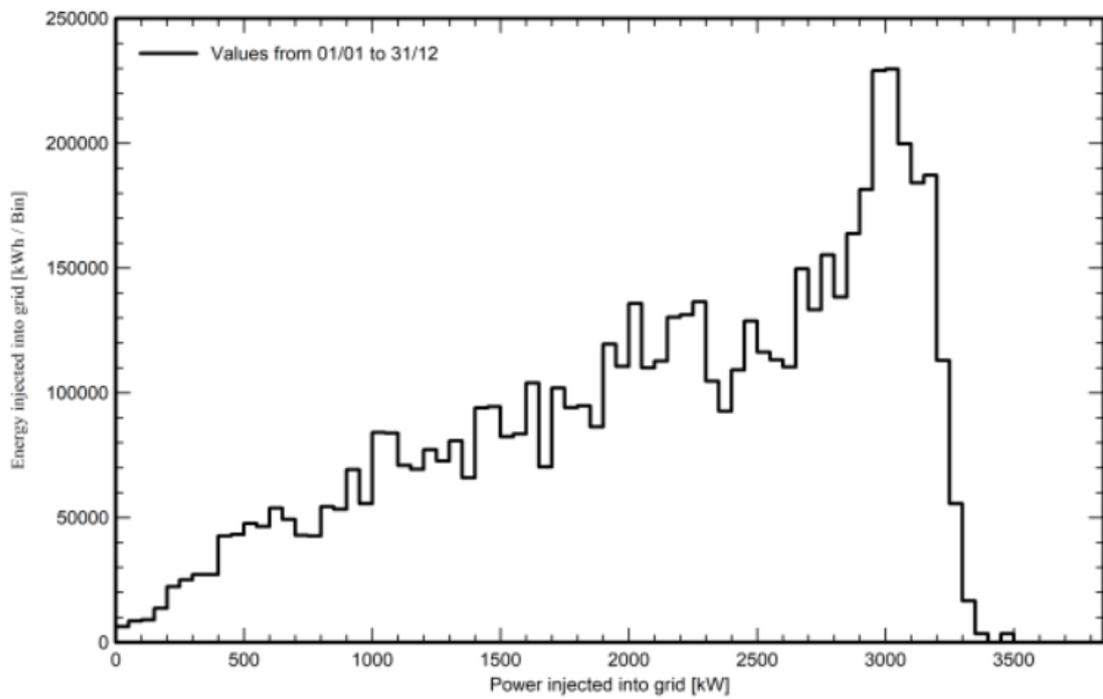


Figura C 5. Gráfica de la distribución de potencia de salida del sistema fotovoltaico

Tiger Pro 72HC-BDVP

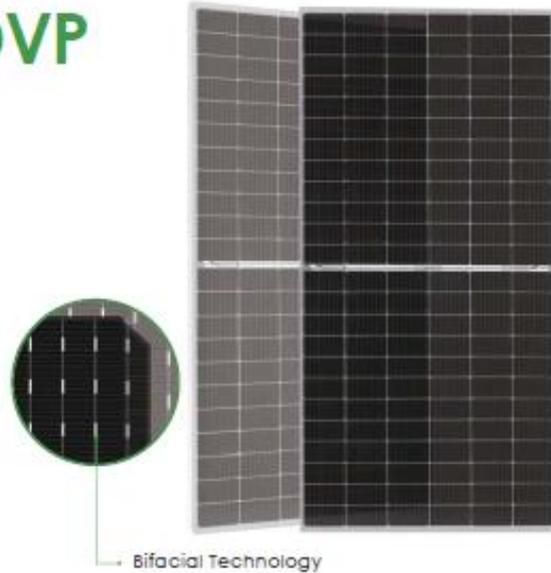
525-545 Watt

BIFACIAL MODULE WITH DUAL GLASS

P-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

- IEC61215(2016), IEC61730(2016)
- ISO9001:2015: Quality Management System
- ISO14001:2015: Environment Management System
- ISO45001:2018 Occupational health and safety management systems



Key Features

 Multi Busbar Technology <p>Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.</p>	 Longer Life-time Power Yield <p>0.45% annual power degradation and 30 year linear power warranty.</p>
 PID Resistance <p>Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.</p>	 Enhanced Mechanical Load <p>Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).</p>
 Higher Power Output <p>Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.</p>	

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

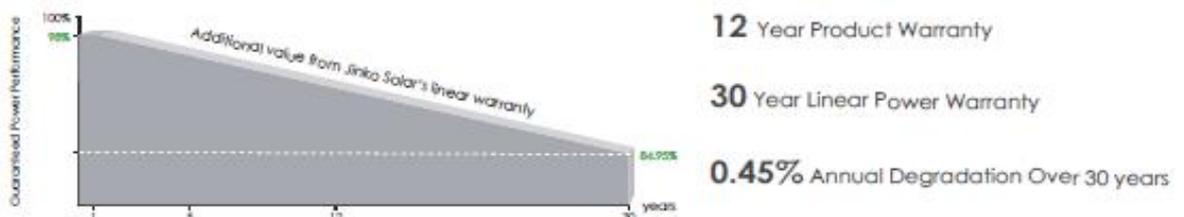
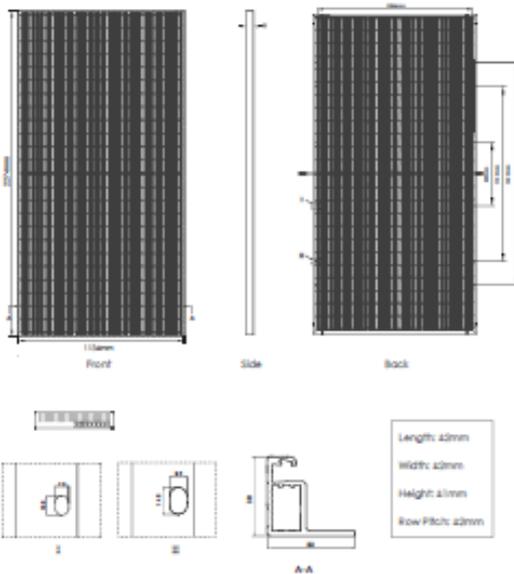


Figura C 6. Descripción del panel solar

Engineering Drawings

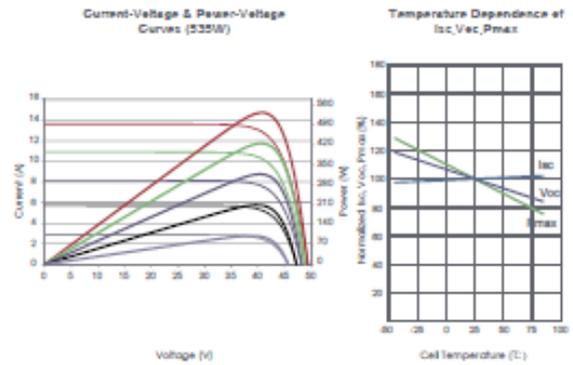


Packaging Configuration

[Two pallets = One stack]

35pcs/pallets, 70pcs/stack, 630pcs/ 40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2274×1134×30mm (89.53×44.65×1.18 Inch)
Weight	34.3 kg (75.6 lbs)
Front Glass	2.0mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.0mm, Anti-Reflection Coating
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM525M-72HL4-BDVP		JKM530M-72HL4-BDVP		JKM535M-72HL4-BDVP		JKM540M-72HL4-BDVP		JKM545M-72HL4-BDVP	
	STC	NOCT								
Maximum Power (Pmax)	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.80V	37.81V	40.87V	37.88V	40.94V	37.94V	41.13V	38.08V	41.32V	38.25V
Maximum Power Current (Imp)	12.87A	10.33A	12.97A	10.41A	13.07A	10.49A	13.13A	10.55A	13.19A	10.60A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.42V	46.65V	49.48V	46.70V	49.54V	46.76V	49.73V	46.94V	49.92V	47.12V
Short-circuit Current (Isc)	13.63A	11.01A	13.73A	11.09A	13.83A	11.17A	13.89A	11.22A	13.95A	11.27A
Module Efficiency STC (%)	20.36%		20.55%		20.75%		20.94%		21.13%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		JKM525M-72HL4-BDVP	JKM530M-72HL4-BDVP	JKM535M-72HL4-BDVP	JKM540M-72HL4-BDVP	JKM545M-72HL4-BDVP
5%	Maximum Power (Pmax)	551Wp	557Wp	562Wp	567Wp	572Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.38%	21.58%	21.78%	21.99%	22.19%
15%	Maximum Power (Pmax)	604Wp	610Wp	615Wp	621Wp	623Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.41%	23.64%	23.86%	24.08%	24.30%
25%	Maximum Power (Pmax)	656Wp	663Wp	669Wp	675Wp	681Wp
	Module Efficiency STC (%)	25.45%	25.69%	25.93%	26.18%	26.42%

*STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C AM=1.5
 NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C AM=1.5 Wind Speed 1m/s

Figura C 7. Ficha técnica del panel solar

8.4 ANEXO D: SISTEMA HÍBRIDO

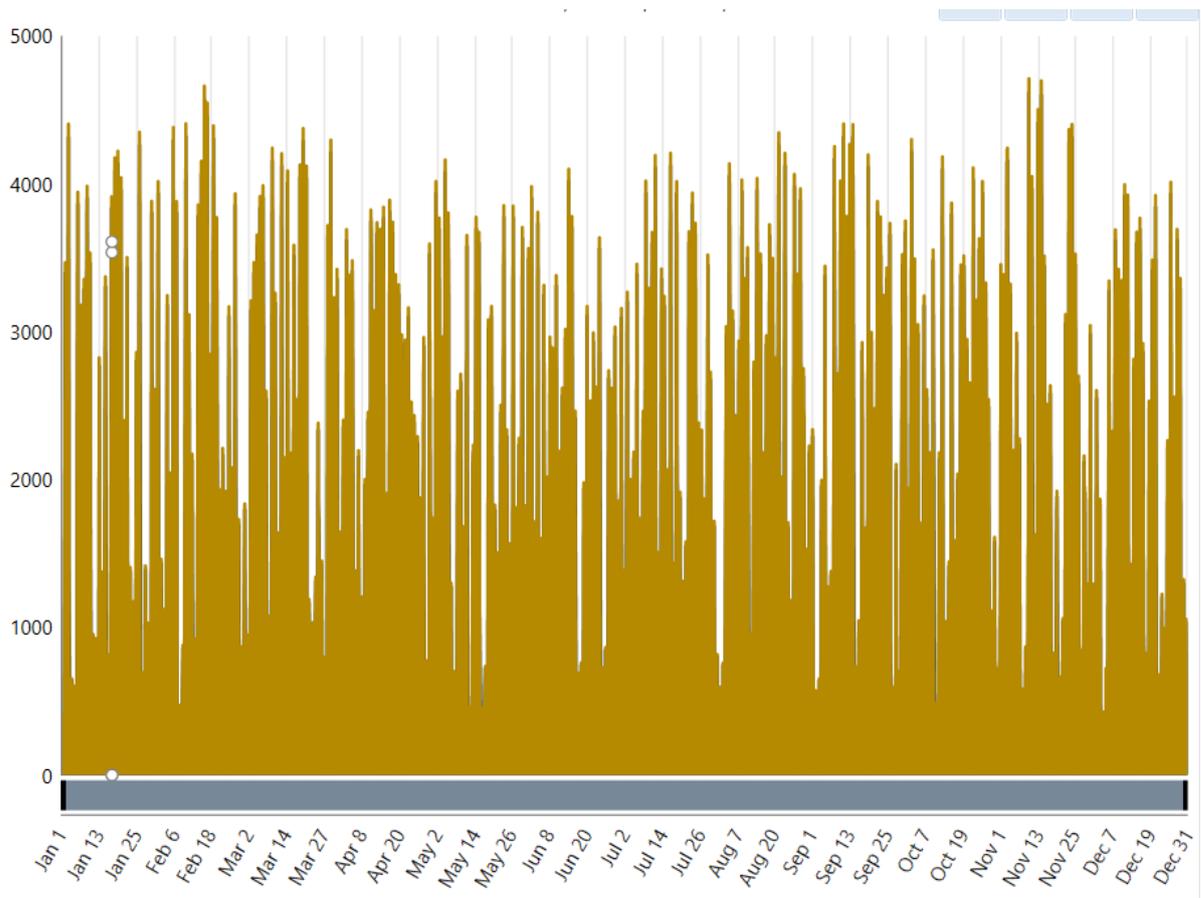


Figura D 1. Potencia de salida fotovoltaica



Figura D 2. Perfil solar mensual del sistema híbrido

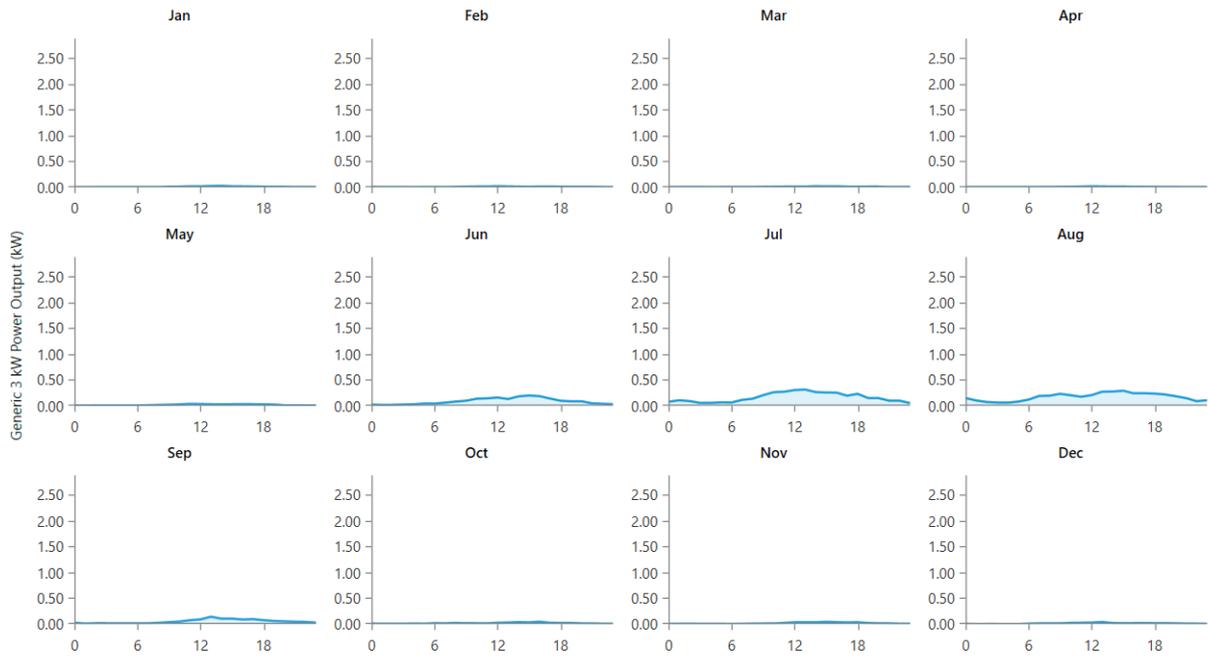


Figura D 3. Perfil eólico mensual del sistema híbrido



Figura D 4. Perfil diario de producción de energía renovable total del sistema

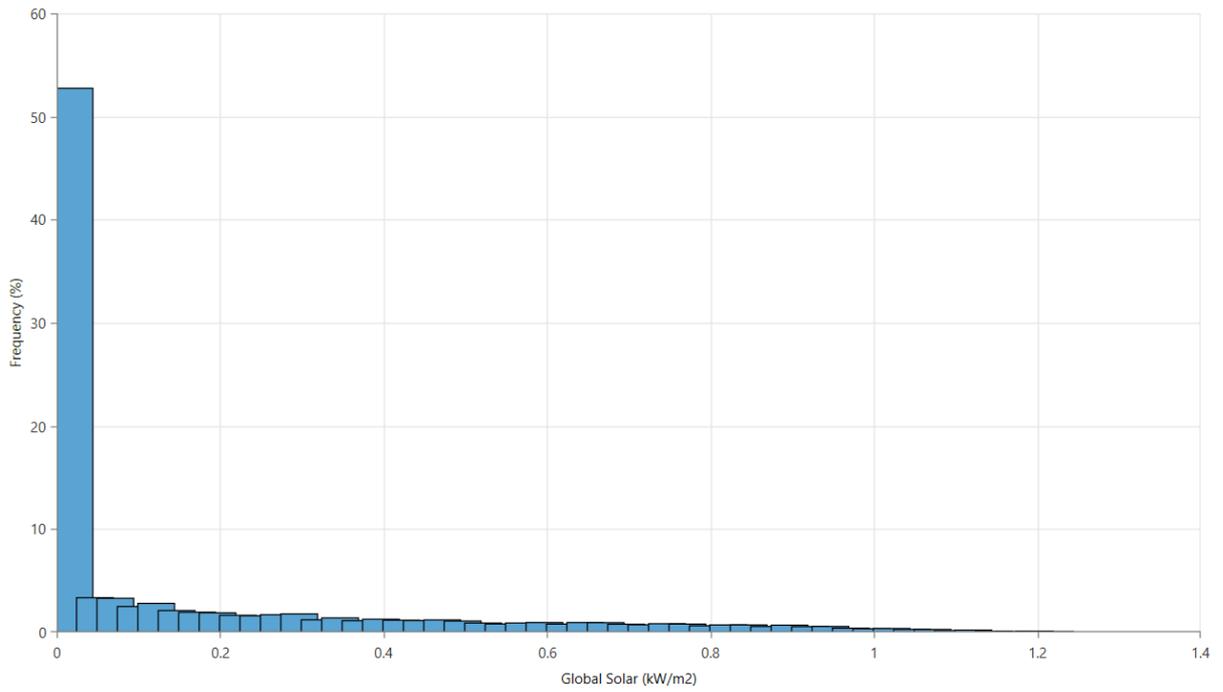


Figura D 5. Histograma solar del sistema híbrido

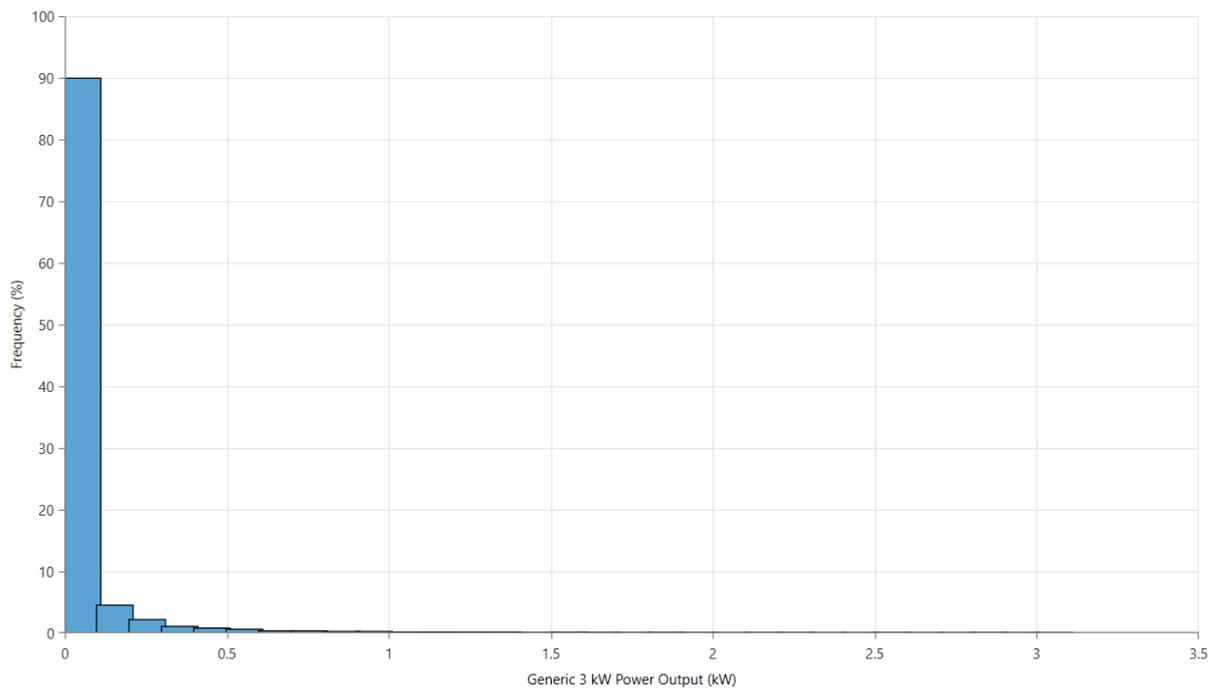


Figura D 6. Histograma eólico del sistema híbrido

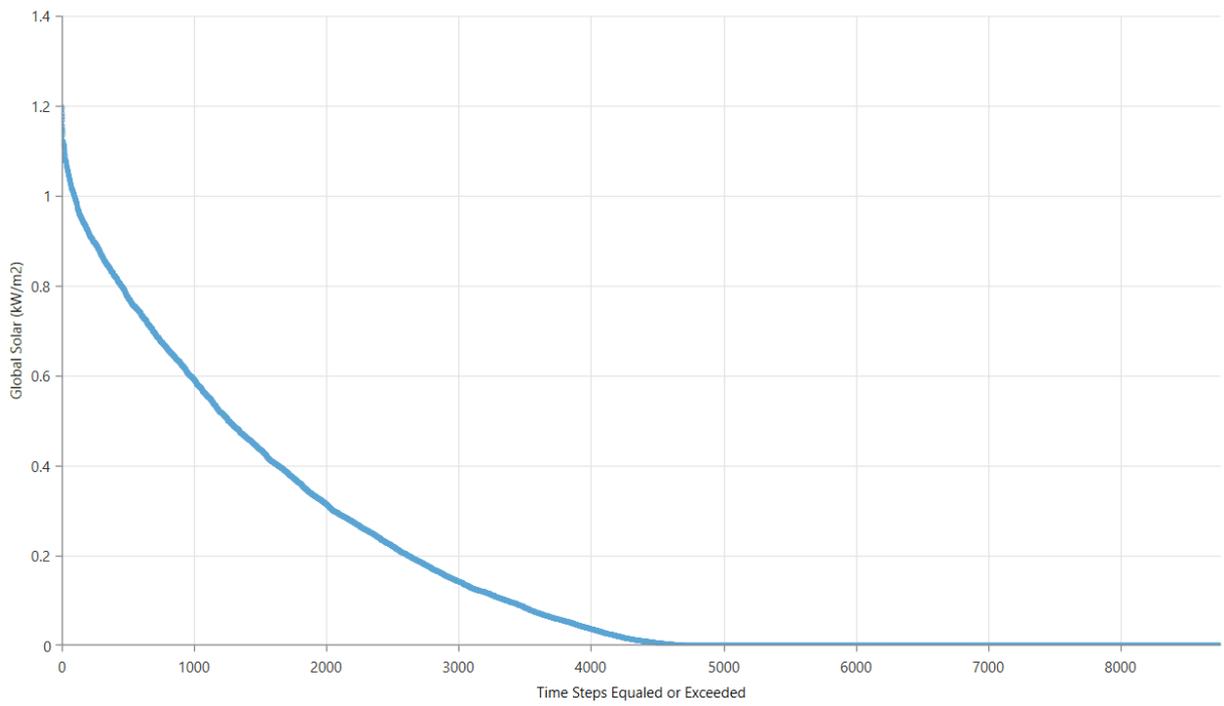


Figura D 7. Curva de la duración solar del sistema híbrido

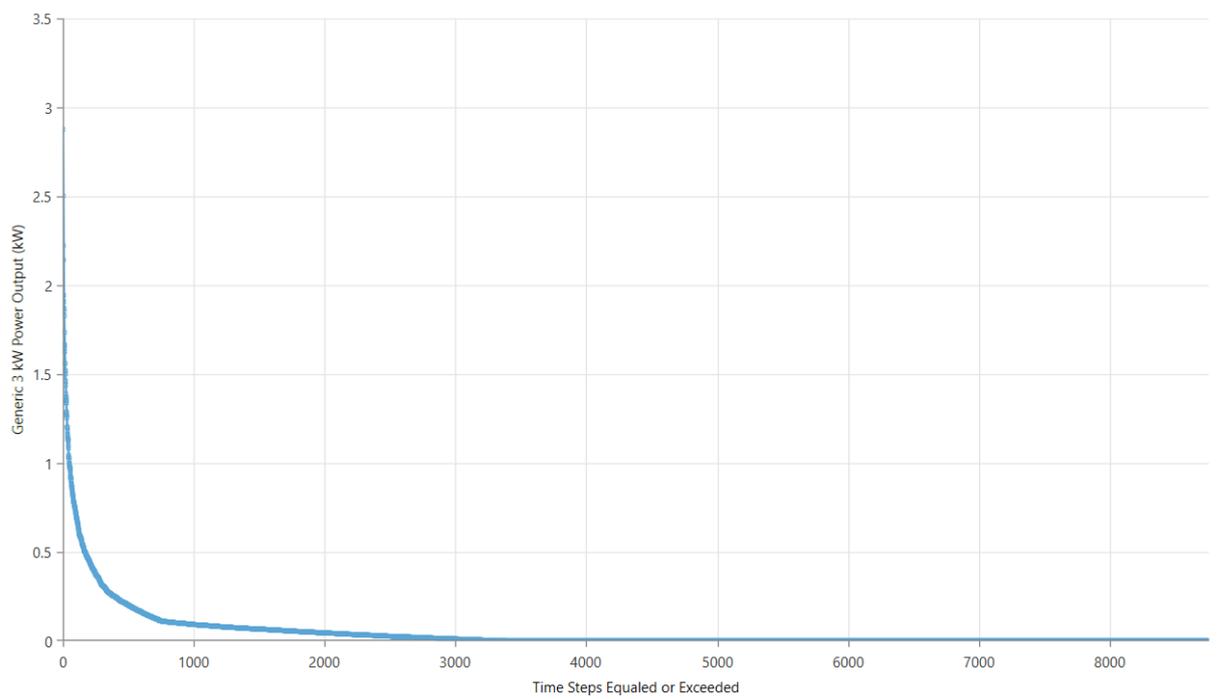


Figura D 8. Curva de duración eólica del sistema híbrido

8.5 ANEXO E: TASA DE INTERÉS

Tasas de Interés			
Febrero 2022			
1. TASAS DE INTERÉS ACTIVAS EFECTIVAS VIGENTES PARA EL SECTOR FINANCIERO PRIVADO, PÚBLICO Y, POPULAR Y SOLIDARIO			
Tasas Referenciales		Tasas Máximas*	
Tasa Activa Efectiva Referencial para el segmento:	% anual	Tasa Activa Efectiva Máxima para el segmento:	% anual
Productivo Corporativo	7.38	Productivo Corporativo	8.86
Productivo Empresarial	8.78	Productivo Empresarial	9.89
Productivo PYMES	9.99	Productivo PYMES	11.26
Consumo	16.03	Consumo	16.77
Educativo	8.47	Educativo	9.50
Educativo Social	5.49	Educativo Social	7.50
Vivienda de Interés Público	4.98	Vivienda de Interés Público	4.99
Vivienda de Interés Social	4.98	Vivienda de Interés Social	4.99
Inmobiliario	9.56	Inmobiliario	10.40
Microcrédito Minorista	17.99	Microcrédito Minorista	28.23
Microcrédito de Acumulación Simple	20.47	Microcrédito de Acumulación Simple	24.89
Microcrédito de Acumulación Ampliada	19.74	Microcrédito de Acumulación Ampliada	22.05
Inversión Pública	9.16	Inversión Pública	9.33

*De acuerdo a la Resolución 603-2020-F, de la Junta de Política y Regulación Monetaria y Financiera.
De acuerdo a la Resolución JPRF-F-2021-004, de la Junta de Política y Regulación Financiera*

Figura E 1. Tabla de la tasa de interés