



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Sarzosa Ante David de Jesús

Tutor:

Franklin Hernán Vásquez Teneda Msc

**LATACUNGA – ECUADOR
2022**



AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí”, presentado por Sarzosa Ante David de Jesús, para optar por el título Magister en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, noviembre 18, 2022

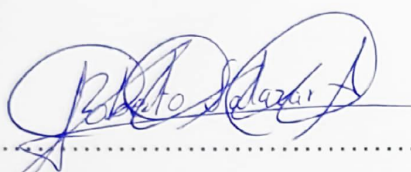
Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda Msc

CC.: 1710434497

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, noviembre 18, 2022



.....
MSc. Edgar Roberto Salazar Achig

0502847619


Presidente del tribunal



.....
Msc Jessica Nataly Castillo Fiallos

0604590216

Lector 2



.....
MSc. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa

0502365810

Lector 3

DEDICATORIA

A Dios a quien amo y admiro, que, con su bendición está en todo momento conmigo, a mis padres Manuel Sarzosa y Rosa Ante, por su dedicación y esfuerzo supieron guiarme para lograr mi meta.

A mi hermano quien siempre, brindándome su cariño y respaldo me animo en todo tiempo.

A mi hija Ammy Sarzosa, quien me acompañó en mi colegiatura, y fue el motivo de mi estudio.

David

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus docentes que supieron transmitir sabiduría y conocimiento.

A mis padres que han sido el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, que estuvieron en todo momento a mi lado siendo mis mejores guías de vida

David

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, noviembre 18, 2022



.....
Sarzosa Ante David de Jesús
CC.: 0502594849

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, noviembre 18, 2022



.....
Sarzosa Ante David de Jesús
CC.: 0502594849

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, noviembre 18, 2022

.....
MSc. Edgar Roberto Salazar Achig

0502847619

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Título: “Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí”

Autor: Sarzosa Ante David de Jesús

Tutor: Franklin Hernán Vásquez Teneda. MSc.

RESUMEN

El presente trabajo se realiza atendiendo la necesidad de millones de personas que no cuentan con el servicio de electricidad, el cual es parte de la vida moderna y un indicador de calidad de vida. Y para ello se evalúa el potencial que tienen las fuentes de energía no convencionales para la producción de energía eléctrica. Un lugar como caso de estudio ha sido previamente seleccionado por carecer del servicio público y estar alejado de las redes eléctricas de suministro a cargo de las empresas eléctricas: la comunidad de Zumbahua en la Provincia de Cotopaxi, Ecuador. En la tesis se revisa los principios físicos que permiten el aprovechamiento de la energía proveniente del Sol y contenida en la masa de aire en movimiento que conocemos como viento. Además, se ha hecho la recolección de datos de cada hora por 21 años de irradiación solar, temperatura ambiental, velocidad y dirección de viento del lugar a estudiar, con esto; se ha realizado la valorización del potencial energético por año y metro cuadrado de energía solar fotovoltaica y eólica. Como resultados tenemos que ambos son potencialmente factibles de usar, sin embargo, la energía solar fotovoltaica brinda una mayor cantidad de energía durante el año. Finalmente se propone como anexos modelos matemáticos para la implementación física de una microrred la cual deja abierta futuros trabajos de investigación.

PALABRAS CLAVE: potencial solar, potencial eólico, modelo matemático, micro generación.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Title: “Study of the wind and solar potential to establish a simulation model for micro distributed generation in the sector of Zumbahua, canton Pujilí”

Autor: Sarzosa Ante David de Jesús

Tutor: Franklin Hernán Vásquez Teneda. MSc.

ABSTRACT

This work is carried out in response to the need of millions of people who do not have electricity service, which is part of modern life and an indicator of quality of life. For this purpose, the potential of non-conventional energy sources for the production of electricity is evaluated. A place as a case study has been previously selected because it lacks public service and is far away from the electric supply networks in charge of the electric companies: the community of Zumbahua in the Province of Cotopaxi, Ecuador. The thesis reviews the physical principles that allow the use of the energy coming from the Sun and contained in the mass of air in movement that we know as wind. In addition, data collection has been done every hour for 21 years of solar irradiation, ambient temperature, wind speed and direction of the place to be studied, with this, we have made the assessment of the energy potential per year and square meter of solar photovoltaic and wind energy. As results we have that both are potentially feasible to use, however, photovoltaic solar energy provides a greater amount of energy during the year. Finally, mathematical models for the physical implementation of a micro network are proposed as annexes, which leaves open future research work.

KEYWORDS: potential solar; potential wind, model mathematical, micro generation

Yo, Marco Paul Beltrán Semblantes, con cédula de identidad número: 0502666514, Magister en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162.; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí”, de: Sarzosa Ante David de Jesús, aspirante a magister en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

Mg. Marco Paul Beltrán Semblantes
0502666514

Latacunga, septiembre 8, 2022



**CENTRO
DE IDIOMAS**

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	8
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
1.1 Antecedentes de la investigación.....	8
1.2 Fundamentación Teórica.....	12
1.2.1 Situación Energética y Recursos Renovables.....	12
1.2.2 Energías Renovables	13
1.2.3 Energía Solar	13
1.2.4 Energía Eólica	16
1.2.5 Generación Distribuida.....	18
1.2.6 Micro Generación.....	20
1.2.7 Micro Generación Distribuida	21
1.2.8 Suministros de energía eléctrica en el Ecuador.	25
1.3 Fundamentación metodológica.....	26
1.3.1 Alcance de la investigación	26
1.3.2 Técnica de recolección de información.....	26
CAPÍTULO II.....	28
PROPUESTA	28
2.1. Título del proyecto.	28
2.2. Objetivo del proyecto.....	28
2.3. Justificación de la propuesta	28
2.3.1. Situación socio-económica de Zumbahua	28
2.3.2. Características geográficas de la parroquia de Zumbahua.	33
2.4. Energía Solar Fotovoltaica.....	40
2.5. Energía Eólica.....	46
2.5.1. Definición energía eólica.....	46
2.5.2. Recursos eólicos y sus características.	47
2.5.3. Mecanismos del movimiento del viento.....	48
2.5.4. Otros patrones de circulación atmosférica.....	50
2.5.5. Variaciones en el tiempo del viento.	50
2.5.6. Estimación del recurso viento.....	54
2.5.7. Características de la capa límite atmosférica.....	54
2.5.8. Métodos directos de los análisis de datos, caracterización del recurso y productividad de turbina- Uso directo de datos.....	60

2.6. Metodología o procedimientos empleados.	61
CAPÍTULO III.	63
PROPUESTA	63
3.1. Análisis de los resultados:.....	63
3.2. Evaluación del recurso solar:	70
3.3. Evaluación del recurso eólico:	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de proyectos solares en Ecuador.	15
Tabla 2. Inventario de proyectos eólicos del Ecuador.....	18
Tabla 3. Potencia por unidad de área disponible de viento constante (densidad de aire: 1.225 kg/m ³	53
Tabla 4: Datos recolectados – eólico.....	63
Tabla 5: Datos recolectados – solar.....	65
Tabla 6. Insolación promedio de la Provincia Cotopaxi (kWh m ⁻² dia ⁻¹).....	70
Tabla 7. Características del Panel Solar.....	72
Tabla 8. Valores y medida del viento	76
Tabla 9. Cálculo de la energía eléctrica anual por m ² generada a partir del viento.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Irradiación Solar Global del Ecuador.....	14
Figura 2. Mapa de producción solar fotovoltaica de Ecuador	15
Figura 3. Densidad de potencia media anual del viento del Ecuador.....	17
Figura 4. Mapa de producción eólica del Ecuador	18
Figura 5. Esquema de generación distribuida y fotovoltaica para autoconsumo	19
Figura 6. Esquema general de micro generación distribuida en baja tensión.....	23
Figura 7. Esquema de instalación de micro generación aislada	24
Figura 8. Esquema de instalación de micro generación en red.	25
Figura 9. Capacidad Instalada de Generación del Ecuador en el 2020	26
Figura 10. Ubicación satelital del lugar de estudio	28
Figura 11. Ubicación detallada del lugar de estudio	29
Figura 12. Actividades laborales a la que se dedican hombres y mujeres del Cotopaxi	29
Figura 13. Ocupación laboral de los habitantes de Cotopaxi	30
Figura 14. Población y Vivienda en Cantones del Cotopaxi.....	30
Figura 15. Servicios básicos en Cotopaxi.....	30
Figura 16. Distribución de la población de Zumbahua 2010.	31
Figura 17. Evolución del crecimiento poblacional de Zumbahua	32
Figura 18. Distribución de la población de Zumbahua por grupos etarios.....	33
Figura 19. Mapa Provincial del Ecuador.....	33
Figura 20. Mapa Cantonal de Cotopaxi.....	34
Figura 21. Mapa parroquial de Zumbahua	34
Figura 22. Mapa de comunidades de la parroquia de Zumbahua.....	35
Figura 23. Factores a considerar para justificar la propuesta.	38
Figura 24. Premisas que garantizan el éxito de las propuestas.....	39
Figura 25. Basamentos filosóficos para la fundamentación de la propuesta.	40
Figura 26. Patrón mundial de vientos superficiales.....	48
Figura 27. Viento geostrófico: F_p es la fuerza de presión en el aire; F_c es la fuerza de Coriolis.	49
Figura 28. Gradiente de viento U_{gr} ; R , radio de curvatura	50
Figura 29. Evento de ráfaga discreta; a , amplitud; b , tiempo de subida; c , variación máxima de la ráfaga; lapso de tiempo d	52
Figura 30. Flujo de aire a través de un disco de rotor; A es el área; U es la velocidad del viento.....	52

Figura 31. Perfil de temperatura sobre la superficie terrestre, antes (sólido) y después (discontinuo) del amanecer	58
Figura 32. Estación meteorológica instalado en el punto referencial, Zumbahua.....	63
Figura 33. Registro de velocidad de viento recolectado directamente en campo por el Autor durante el período de mediciones.....	64
Figura 34. Registro de velocidad de ráfaga recolectado directamente en campo por el Autor durante el período de mediciones.....	65
Figura 35. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor durante el período de mediciones.	66
Figura 36. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 18/11/2020 16:55h hasta el 03/12/2020 20:55h.	66
Figura 37. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 15/01/2021 02:50h hasta el 23/01/2021 07:20h.	67
Figura 38. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 12/02/2021 12:40h hasta el 20/02/2021 17:40h.	67
Figura 39. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 28/02/2021 20:55h hasta el 07/03/2021 06:55h.	67
Figura 40. Ubicación de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio: San Juan La Mana, Salcedo y Cutuchi en Caspi	68
Figura 41. Distancia zona de estudio a Estación San Juan La Mana 49 km.....	68
Figura 42. Distancia zona de estudio a Estación Salcedo 40.5 km	69
Figura 43. Distancia zona de estudio a Estación Cutuchi en Caspi 36.8 km.....	69
Figura 44. Captura de pantalla durante proceso de recopilación de datos en el Power Data Access Viewer de NASA.	69
Figura 45. Radiación solar durante período de observación	70
Figura 46. Temperatura ambiental medido a 2 metros sobre suelo durante período de observación.....	71
Figura 47. Gráfica de superposición de los valores de radiación solar por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021.....	71
Figura 48. Gráfica de superposición de los valores de temperatura por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021.....	72
Figura 49. Velocidad promedio del viento en Zumbahua nov 2020 – mayo 2021.	73
Figura 50. Histograma de la velocidad del viento en Zumbahua nov 2020 – mayo 2021.	73
Figura 51. Velocidad de viento medido a 10 metros sobre suelo durante período de observación.....	74
Figura 52. Dirección del viento medido a 10 metros sobre suelo durante período de observación.....	74

Figura 53. Gráfica de superposición de los valores de velocidad de viento por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021	75
Figura 54. Gráfica de superposición de los valores de dirección de velocidad de viento por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021	75
Figura 55. Disponibilidad de recursos energéticos renovables locales: solar y eólica medidos en kW-h/(año m ²).....	77
Figura 56. Gráfica de superposición de los valores de temperatura por hora del año 2021.	78
Figura 57. Gráfica de superposición de los valores de velocidad de viento por hora del año 2021	79
Figura 58. Gráfica de superposición de los valores de dirección de velocidad de viento por hora del año 2021	79
Figura 59. Gráfica de superposición de los valores de radiación solar por hora del año 2021	80
Figura 60. Esquema de un sistema de almacenamiento de energía por batería.....	81

INTRODUCCIÓN

Las evidencias son cada día más que contundentes de que el cambio climático está ocurriendo y las consecuencias ambientales, sociales, económicas y sanitarias son notorias en diversas regiones del mundo como los impactos severos sobre la población, a pesar de que las causas y las consecuencias están claras y el discurso político gira hacia un modelo de desarrollo sustentable, es notorio que el compromiso no es igual en todas las naciones y se requiere de mayores esfuerzos, sobre todo en aquellos países industrializados que producen más gases de efecto invernadero [1].

Desde finales del siglo XX la preocupación de los países por las consecuencias del cambio climático, ocasionado por el calentamiento global, se hizo más notable y de allí en adelante se desarrollaron cumbres mundiales se firmaron protocolos y se crearon instituciones para la firma de acuerdos cuyo objetivo es la de reducir las emisiones de gases invernadero, detener el calentamiento global y frenar las consecuencias del cambio climático a pesar de los esfuerzos, los resultados aún no son satisfactorios, sin embargo existe la viabilidad tecnología para asumir nuevas tecnologías para la reducción de la emisión de GEI, quizás el problema más severo es el costo de esta tecnología y la viabilidad política para impulsar los cambios [2].

El cambio de modelo sustentable que involucra el uso de tecnologías limpias como la energía solar y eólica, requiere además de la inversión en prototipos y sistemas de distribución, así como del compromiso de las naciones y de un cambio en los modelos de producción y patrones de consumo de las personas, de tal manera que partiendo un consumo responsable se inicia el cambio hacia un manejo sustentable de los recursos naturales y con ello mitigar el impacto del cambio climático [3].

El costo del recambio energético, es diferente para cada opción de generación de energía que se considere, siendo mucho más factible para las energías hidroeléctricas y eólicas, lo cual sugiere que se podría cambiar toda la generación hacia estas dos alternativas. Sin embargo, tal opción no es factible porque la generación de ambas requiere condiciones específicas que no se encuentran en todos los lugares (cuerpos de agua con desniveles importantes, vientos sostenidos

y con importante velocidad), por lo que se hace necesario el uso de otras opciones como la solar y geotérmica, que pueden no tener una inversión tan baja, pero están disponibles en otros tantos lugares [4].

La inversión en tecnología es necesaria, para la mitigación del cambio climático, particularmente para la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero mediante el recambio tecnológico, a pesar de las ventajas ambientales la sustitución de la tecnología actual, por tecnologías limpias, resulta costoso, oscilando la inversión entre 2000 y 20.000 \$ por cada kW de energía producida bajo tecnologías limpias, no obstante al final se debe considerar que cualesquiera sean las opciones elegidas, estas tendrán que sustituir en gran medida sino en su totalidad a la generación a partir de los combustibles fósiles que predomina en la actualidad, y se tendrán que hacer las inversiones requeridas, para poder mitigar el cambio climático [5].

Antecedentes:

El trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación de Energías renovables, enfocándose en la sub línea de conversión y su uso racional de la energía eléctrica, correspondiente a la maestría de Electricidad.

Dentro de estos se integran todas aquellas investigaciones que busquen promover el aprovechamiento de energías alternativas, fomentar y promocionar el uso eficiente de la energía (Eficiencia Energética) en los diferentes sectores (residencial, industrial, transporte y agrícola), de esta manera reducir el impacto medioambiental derivado de la utilización de recursos energéticos.

En la constitución del Ecuador está garantizada la provisión de energía eléctrica a la población, he ahí la importancia de las fuentes renovables de energía, para poder reducir la utilización del petróleo en la generación de electricidad, por lo que existe la necesidad de hacer una reformar legal al marco regulatorio del País en materia energética, para garantizar un desarrollo equitativo en la participación de las fuentes renovables aplicadas en el modo de la generación distribuida, para de esta manera garantizar el desarrollo sostenible del territorio [6].

Una investigación donde analizan los cambios económicos y de impacto social que podría presentarse dentro de un marco legal en el Ecuador ante la posible inclusión de elementos de generación distribuida (energía proporcionada por el viento o el sol) en las redes de distribución eléctrica, los autores concluyen que el avance tecnológico y las investigaciones demuestran que esto es una solución viable y económicamente accesible, sobre todo cuando se presentan problemas de pérdidas de transporte y distribución de energía, ocasionadas por las grandes distancias entre los centros de consumo y las centrales de generación, adicionalmente la reducción del consumo de combustibles fósiles, la reducción en costos y la producción de la energía limpia, abastecida por el sol en paneles fotovoltaicos o la fuerza de los vientos [8].

En un trabajo realizado en la ciudad de Cuenca, para medir el impacto de la integración de sistemas fotovoltaicos de mediana y gran escala en el sistema de distribución a nivel de media tensión, los mayores inconvenientes encontrados por los autores fue la dificultad encontrar resoluciones de datos (1, 5 ó 10 minutos) para la carga y la radiación solar, la potencia en la salida del sistema solar fotovoltaico por su naturaleza intermitente, la carga de las secciones del alimentador es afectada por la ubicación de los sistemas fotovoltaicos y factores como el efecto de sombreado de la nube y la rápida fluctuación en la radiación solar resulta en la fluctuación de tensión. Los resultados muestran que la integración de un sistema fotovoltaico con un factor de potencia de 0.95 en adelanto demostró un aumento significativo en los perfiles de tensión, durante el período diurno de generación. Si en las horas de máxima generación supera los límites de tensión, es aconsejable hacer que el sistema fotovoltaico trabaje con un factor de potencia unitario o en retraso, que demostraron también un aumento en el perfil de tensión [8].

Un trabajo realizado, muestra en nuestro país es necesario realizar reajustes al marco legislativo para de esta manera incentivar la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a las redes de baja tensión de distribución para el consumo propio. Los autores plantearon un modelo de plan de negocios para la micro generación distribuida fotovoltaica, donde el costo de la energía eléctrica producida por este sistema estaría entre USD/kWh 0,1229- 0,1342.

Se analiza la necesidad de establecer energía eléctrica a toda la población ecuatoriana, a través de la generación distribuida, haciendo énfasis en los criterios de tecnológicos aplicados a la implementación de la misma, para un desarrollo social y económico de los ecuatorianos. Los autores hacen énfasis en que la calidad de vida no es solo alcanzar un bienestar económico, es necesario el bienestar personal [11].

Trabajos como: “Evaluación del potencial técnico y económico de la tecnología solar fotovoltaica para micro generación eléctrica en el sector residencial del Distrito Metropolitano de Quito”, donde se analiza el potencial técnico, económico y comercial de la tecnología solar fotovoltaica para micro generación eléctrica a nivel residencial de Quito, los resultados obtenidos permiten concluir que los factores que impiden en la actualidad la implementación Micro generación Eólica no son de características físicas (radiación solar disponible) o técnicas (sistemas FV), sino netamente por un mercado inmaduro y poco competitivo [11].

Otro trabajo titulado: “Análisis de la energía eólica como sustituto para la energía convencional en casas del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador”, donde realizó un análisis del diseño, construcción, y aplicaciones más significativas en la vida doméstica, producida por turbinas de viento, las cuales pueden generar desde 5kW hasta 10KW, para el aprovechamiento de energía limpia y la reducción de energías convencionales [12].

Planteamiento del problema

El consumo de energía eléctrica aumenta año tras año debido particularmente al crecimiento de la población, así como el crecimiento del parque industrial. El primer aspecto relevante que se debe considera es una mayor producción de energía eléctrica que está asociada al aumento de emisiones de CO₂, lo que conduce al calentamiento global y el cambio climático, en especial cuando esta fuente energética es producida por medios convencionales.

Los pueblos que se encuentran alejados de las centrales eléctricas no pueden acceder al suministro eléctrico, por lo cual se hace necesario implementar modelo de energía alternativa como la micro generación distribuida, es por ello que se

desarrollara un modelo matemático a partir del uso de energías alternativas, que puedan suplir de electricidad a las poblaciones más alejadas.

En el Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi existe un problema adicional, debido a que la energía representa un costo elevado para las familias, en especial para aquella de bajo recursos, es por esto que se deben ofrecer alternativas de fuentes energías que conlleven a la reducción de los costos y de la emisión de CO₂.

Formulación del problema

¿Es posible disponer de recursos energéticos renovables para la generación de nuevas formas de energía eléctrica que conduzcan a suplir de energía eléctrica a comunidades alejadas, reducir los costos por consumo de energía, y además disminuyan el impacto ambiental asociado a las emisiones de CO₂ que aceleran el calentamiento global y el cambio climático mediante la valorización del recurso eólico y solar con fines de implementar la micro generación distribuida de energías alternativas en el Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi?.

Objetivo General

Estudiar el potencial eólico y solar que permita establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida, en el sector de Zumbahua, cantón de Pujilí, provincia de Cotopaxi.

Objetivos Específicos

- Estimación del consumo de energía eléctrica, en el sector de Zumbahua, cantón de Pujilí, provincia de Cotopaxi.
- Desarrollo del modelo matemático que se ajuste a la realidad del sector de Zumbahua, cantón de Pujilí, provincia de Cotopaxi.
- Selección de la combinación óptima de micro generación que mejor se ajuste a las características del sector de Zumbahua, cantón de Pujilí, provincia de Cotopaxi.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Estimación del consumo de energía eléctrica en el Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi	Levantamiento de información sobre cantidad consumida, picos de demanda, distancias desde.	Diagnóstico del consumo eléctrico y del sistema de distribución eléctrica del sector	Revisión bibliográfica, recorridos de campo, encuestas y levantamiento de datos.
Desarrollo del modelo matemático que se ajuste a la realidad del Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi	Recolección de los datos generados por las fuentes híbridas. Diseño y corridas del programa.	Modelo de simulación	Corridas, simulaciones.
Selección de la combinación óptima de micro generación que mejor se ajuste a las características del Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi.	Corridas del programa	Combinación óptimas de alternativas.	Selección de alternativas.

Justificación

En nuestro país existe un porcentaje importante de sectores rurales alejados de la red de distribución de energía convencional, motivo en el cual no gozan de este servicio. En el Ecuador la cobertura del servicio de la energía eléctrica es del 96,2 % (96,1 % red convencional y 0,1 % fotovoltaica) en viviendas urbanas y del 88,2 % en el sector rural. Es así que viviendas sin ningún tipo de servicio de energía eléctrica, representan el 2,2 % del total en el área urbana y el 10,5 % de las viviendas en el área rural. Esto significa en términos absolutos que cerca de 196 000 viviendas no tienen electricidad en el país [13].

Adicionalmente, el consumo eléctrico además de ser de costo elevado para las poblaciones alejadas de la red eléctrica nacional; su producción a partir de fuentes convencionales contribuye a generar emisiones de CO₂ que es el causante del calentamiento global y conllevan al cambio climático, ante este panorama se hace necesario proponer fuentes alterativas que disminuyan el consumo eléctrico, para ello es necesario tener una línea base, para lo cual se requiere de estimaciones de disponibilidad energética local de los recursos renovables.

La generación de un modelo de simulación, a ser validado en la presente investigación no solo permitirá estimar la energía renovable disponible localmente, sino que además facilitará la toma de decisiones y la búsqueda de los mecanismos de generación eléctrica más económicos y ambientalmente amigables.

Los beneficiarios de la presente investigación serán las compañías de suministro eléctrico que tendrán una alternativa de abastecimiento y los consumidores, así como, la población en general dado que la reducción de las emisiones del CO₂, contribuirá a la lucha contra el calentamiento global y se considera que, los resultados esperados son el establecimiento de la línea base a mediano plazo para la reducción de los costos por consumo eléctrico y a largo plazo el mejoramiento de la calidad ambiental por la sustitución de fuente de energía.

Hipótesis

Analizar el uso de energías alternativas para establecer una propuesta utilizando un modelo matemático para la micro generación distribuida, en el sector de Zumbahua, cantón de Pujilí provincia de Cotopaxi.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 Antecedentes de la investigación

En la actualidad el uso de energías renovables no convencionales, amigables medioambientalmente y de carácter sostenible, es un tema relevante, más aún si se considera que las estimaciones de la Agencia Internacional de Energía indican un incremento de las necesidades energéticas globales de un 30 % para el año 2050 [14]. A raíz de lo señalado, se ha hecho hincapié a nivel mundial en el desarrollo de micro redes de generación distribuidas en base a recursos renovables, a fin de satisfacer las necesidades energéticas, siendo una alternativa viable para garantizar de manera continua y fiable el suministro eléctrico [15], siendo importante que la región de Latinoamérica y el Caribe, incluyendo Ecuador, por sus potencialidades, incorpore las nuevas tecnologías disponibles para reducir el impacto ambiental y tienda a una mayor eficiencia energética, tal como acontece en otras regiones del mundo [16].

A nivel mundial hay casos exitosos y emblemáticos de la eficiencia de micro redes constituidas por micro generadores basados en energías renovables [17], entre los cuales se destacan el de la instalación del ejército de Estados Unidos, en Fort Carson, Colorado, el cual integra la generación energética de energía renovable conjuntamente con otros que están distribuidos a fin de mantener operaciones en caso de apagones duraderos, energía eléctrica que es administrada desde la misma instalación cuya eficiencia de consumo permite disminuir la demanda de petróleo y por tanto es respetuosa del medio ambiente; y el de Sendai, Japón, reconocido por demostrar su valía en condiciones adversas, como la ocurrida en 2011 a raíz del terremoto del Gran Este de Japón que ocasionó daños de envergadura en el suministro de energía del distrito de Tohoku, a pesar de lo cual la micro red siguió proporcionando energía a los usuarios de la misma durante los 3 días que duró el apagón en la región.

A nivel sudamericano se debe resaltar el caso de Brasil, que si bien como indica [18], su matriz energética normalmente ha estado basada en las fuentes renovables tales como centrales hidroeléctricas, eólica y biomasa, a partir del año 2012, la legalización de conexión a la red eléctrica de los sistemas de mini y micro generación fotovoltaica, ha experimentado un continuado ascenso en la instalación y potencia fotovoltaica disponible a través de la micro generación distribuida, que bajo el incentivo que proporciona el marco regulatorio alcanzó en 2018 una generación de 53,5 GWh y una potencia instalada de 72,5 MW.

En materia de micro generación de energía eólica en la región, merece señalar el estudio de caso realizado por Torres-Castro et al [19], en una zona boscosa de Costa Rica, en donde se seleccionó un micro beneficio de café y se calculó la producción energética teórica, para instalar una turbina eólica a 18 metros de altura compuesta por un aerogenerador horizontal, 5 aspas y 3 kW, y una estación meteorológica que registró la velocidad del viento promedio cada mes. Los resultados, en ocho meses que duró el estudio, reflejaron que la generación distribuida fue tan sólo del 37,75 % de lo estimado según los modelos teóricos, por lo que llegaron a la conclusión de que el aerogenerador no se ajustaba a las condiciones técnicas del área de estudio, que la predicción del recurso eólico llevada a cabo sin mediciones in situ es poco representativa, por lo que en entornos boscosos se deben realizar mediciones experimentales previamente a realizar la inversión en una turbina eólica.

Otro estudio observo la posibilidad para la micro generación eólica en los ambientes urbanos de Montevideo (Uruguay), para lo cual desarrollaron un código de simulación de energía y cálculos de ahorro, identificando localización, tipos de consumidores, tarifas y tipología de los aerogeneradores y determinar los casos más factibles considerar la instalación de micro generación eólica para la autoproducción energética a nivel residencial. Los autores destacan que a mayor consumo energético más rentable resulta la instalación de un aerogenerador, y que no es rentable instalar aerogeneradores de potencias mucho mayor dado que, en el ahorro por unidad de potencia disminuye asintóticamente en la medida que la potencia se incrementa [20].

En el caso del Ecuador, el país cuenta con gran riqueza en fuentes de energías renovables, se han dado esfuerzos por revertir la matriz energética y en pro de ello se han publicado el “Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica” [21], el “Atlas eólico del Ecuador: con fines de generación eléctrica” [22], y más recientemente el “Mapa Solar del Ecuador 2019”, este último trabajo realizado por la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador en base a datos actualizados disponibles por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de Estados Unidos, los cuales han servido como punto de referencia a diversas investigaciones relacionadas con el área [23].

El caso de las Islas Galápagos, tal y como se indica en el Plan Maestro de Electricidad [24], dentro de la expansión en la generación, y en el marco del Plan para el Desarrollo Sustentable de Galápagos, refleja que proyectos bajo la iniciativa “Cero Combustibles Fósiles” han permitido que los recursos renovables (fotovoltaico y eólico) suministren para el 2018 el 16% de la energía, lo que se traduce que en el lapso de tiempo transcurrido entre 2007-2018 se haya reducido en 4,51 millones los galones de diésel para generación de electricidad, impidiendo paralelamente la emisión de 42,44 miles de toneladas de CO₂ y el ahorro de 4,69 millones de dólares aproximadamente.

A nivel nacional diversos estudios han abordado temas de energías renovables y la micro generación distribuida. En la investigación con el propósito de planificar y diseñar un sistema de micro generación fotovoltaica en Chacras, Cantón Arenillas; realizaron el diseño, análisis económico y cuantificaron la emisión de los gases invernadero evitados con la misma. De esos resultados se destaca que el costo de instalación es de \$18 103, con un tiempo de reembolso de 9 años, y que las emisiones evitadas de gases de efecto invernadero son de 3 726,76 kg, lo que se traduce en 83.767,92 kg en los 25 años de vida útil estimada en el proyecto [25].

En el estudio de factibilidad para aplicar proyectos híbridos de energías renovables, solar y eólica [26], indican a manera de conclusión que resulta factible técnica y económicamente producir energía a través de sistemas eólicos y fotovoltaicos a pequeña escala, y que, si bien su costo inicial puede resultar elevado, por su casi

nulo mantenimiento, vida útil y casi inexistencia de costos extras, resultan rentables en zonas rurales y en áreas con baja densidad poblacional.

En su investigación a fin determinar el beneficio de la energía eólica en ambientes urbanos, cuyo estudio real de una micro red generadora estuvo conformado por las cargas residenciales y comerciales de un pequeño edificio ubicado en Cuenca, señalan que el uso de este tipo de energía renovable y limpia, aparte de los beneficios ambientales, contempla adicionalmente la mitigación de problemas en la red de distribución y disminución del consumo externo, destacando que si bien el potencial eólico no es aprovechado al máximo en este entorno citadino, su importancia es tal en cuanto a su contribución de energía en la red de distribución [27].

En la “Evaluación del potencial técnico y económico de la tecnología solar fotovoltaica para micro generación eléctrica en el sector residencial del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)” llevada a cabo por Vallejo et al. [11], los investigadores determinaron que existe el potencial técnico (390,2 GWh) pero no el potencial económico, lo que se asocia a un mercado inmaduro y poco competitivo, en donde el alto costo del sistema fotovoltaico y la falta de incentivos son factores que inciden en el potencial comercial. Esto coincide con lo expresado por Guanquiza, quienes plantea que el alto costo en la inversión imposibilita la incorporación de energía fotovoltaica en una red urbana. No obstante, en ambos estudios se deja patente que los avances tecnológicos con constantes reducción en los costos hacen cada vez más viables este tipo de proyectos [28].

En un “Análisis de la matriz energética ecuatoriana y plan de desarrollo energético para la ciudad de Machala”, con el objeto de realizar un plan sostenible a nivel energético con vistas a ser referente en otras ciudades del país y Sudamérica a partir de simulaciones con el software Homer, concluyó que el 26 % de la demanda eléctrica de Machala será cubierta con energías renovables no convencionales, destacando la fotovoltaica en el 21 % de la demanda, señalando que la diversificación de la matriz energética en el país a partir de las energías renovables y limpias permitiría reducir el consumo de recursos fósiles y las pérdidas de energía existentes en la red de distribución y transmisión eléctricas [29].

1.2 Fundamentación Teórica.

1.2.1 Situación Energética y Recursos Renovables

La Agencia Internacional de la Energía (IEA), indica, en el 2017 la producción de energía primaria alcanzó los 13 611,81 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep), lo que implica un aumento porcentual del 2,3 % en relación al año 2012 y de 0,6 % con respecto al 2014, lo que ha llevado a la preocupación por los impactos medioambientales y en pro del desarrollo sostenible, ha derivado en la construcción de un nuevo tipo de sistema energético que requiere una revisión a fondo de las políticas energéticas que contemplen la asequibilidad, confiabilidad y sostenibilidad de la energía a todos los niveles de la población [14].

La clasificación básica a nivel de recursos energéticos contempla los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables. Los combustibles fósiles en la actualidad representan la principal fuente generadora de energía, y su extracción y utilización deriva en impactos negativos a nivel ambiental y afectación en la calidad de vida en la población. La energía nuclear, aparte de su elevado costo, necesita de extremas medidas de seguridad que implica la misma en cuanto a producción, manejo, lo cual no ha sido impedimento para la ocurrencia de accidentes de gran envergadura con impactos medio ambientales y humanos [30]. Las energías renovables por su parte son un recurso sostenible producto de fuentes inagotables o de rápida regeneración, limpias y con menor impacto medio ambiental [31].

La IEA indica que el papel relevante de la electricidad en el desarrollo mundial implica el uso de tecnologías renovables para lograr los objetivos del desarrollo sostenible [14]. En un escenario futuro donde la electricidad será predominante, con aumentos demográficos y por ende la demanda de energía, es imprescindible el desarrollo de las tecnologías que permitan ampliar las matrices energéticas a partir del uso de las energías renovables que permitan reducir las emisiones contaminantes [32], más aun considerando que en la actualidad el empleo y la producción de este tipo de energías no supera el 20 %, por lo que, en algunos países ya han establecido planes para suplir sus demandas energéticas a través de las energías renovables [33].

1.2.2 Energías Renovables

Las energías renovables hacen mención a aquellas energías generadas a partir de fuentes de energía primaria que se caracterizan por su carácter inagotable, renovable y cuyo uso no genera polución, por lo que son importantes ya que proporcionan beneficios a nivel medio ambiental al ser fuentes limpias de energía, son sustentable en cuanto a su utilización y ofrecen seguridad energética [34]. Son particularmente atractivas para el uso en aquellas regiones y países cuyas condiciones naturales favorecen su incorporación en el sistema eléctrico, haciéndolas idóneas en los casos, por ejemplo, donde la radiación solar o el potencial eólico pueden ser aprovechado para la generación de energía eléctrica [35].

1.2.3 Energía Solar

La energía solar, representa la energía de mayor presencia en el planeta, el cual puede ser utilizada a partir de la radiación electromagnética del sol empleando sistemas de captación de luz y/o calor, lo que deriva en la obtención de energía eléctrica o térmica según sea el caso [36]. Se considerada la opción más viable a futuro por ser precisamente el recurso más abundante, por lo que puede suministrar la demanda energética mundial de una manera limpia minimizando los impactos medio ambientales que en la actualidad genera la energía fósil [37].

A diferencia de otras fuentes de energía convencionales, la dispersión e intermitencia son factores que implican que para su aprovechamiento la energía solar debe ser captada a través de los sistemas pasivos o activos. Los sistemas pasivos no requieren de dispositivos, al contrario de los sistemas activos los cuales emplean un colector, de cuyas características depende el tipo de aprovechamiento de energía solar, pudiendo ser por conversión térmica a partir del calor de la radiación solar, o por medio de la energía luminosa, a partir de fotones para generar electricidad por el efecto fotovoltaico empleando paneles [38].

La energía fotovoltaica tiene la ventaja que los paneles pueden ser utilizados a partir de su distribución en cualquier área expuesta al sol, lo que resulta idóneo para proporcionar energía a ambientes rurales, urbanos y localidades aisladas [33]. Se debe destacar entonces que aparte de los beneficios medioambientales derivados de su uso, la energía solar y los proyectos fundamentados en ella favorecen a suplir las

necesidades energéticas de poblaciones cuyo acceso al servicio y suministro eléctrico resulta deficiente o complicado [32].

1.2.3.1 Potencial Solar del Ecuador

La ubicación geográfica del Ecuador hace que el promedio anual de radiación solar sea elevado, con valores entre los 4-6 kWh/m² lo que implica disponer de una capacidad para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos de alrededor de 9 MWp [39]. En este mismo orden de ideas, el “Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica” (figura 1), indica que la insolación directa promedio del Ecuador continental es de 2,54 Wh/m²/día, con insolación difusa de 2,03 Wh/m²/día y con un promedio de insolación global de 4,575 Wh/m²/día [40].

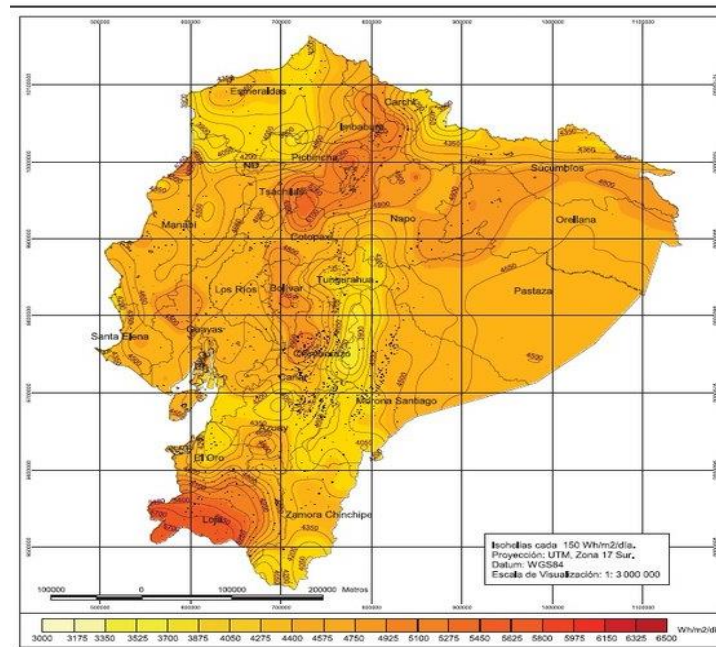


Figura 1. Irradiación Solar Global del Ecuador

[21]

A pesar de las ventajas que tiene el Ecuador por la ubicación geográfica, el hecho que el recurso solar sea relativamente estable a lo largo del año y de la potencialidad solar para la realización de proyectos fotovoltaicos (figura 2), la energía solar tiene una participación irrisoria dentro de la matriz energética del país, siendo para el 2016 de apenas 35.8 GWh [23]. Sin embargo, el inventario de proyectos solares (Tabla 1), realizado por la Corporación Eléctrica del Ecuador indica que se

vislumbra la incorporación de alrededor de 1 230 MW a partir de diversos proyectos fotovoltaicos a realizar en las Provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Chimborazo, El Oro, Loja, Santa Elena y Azuay [41].

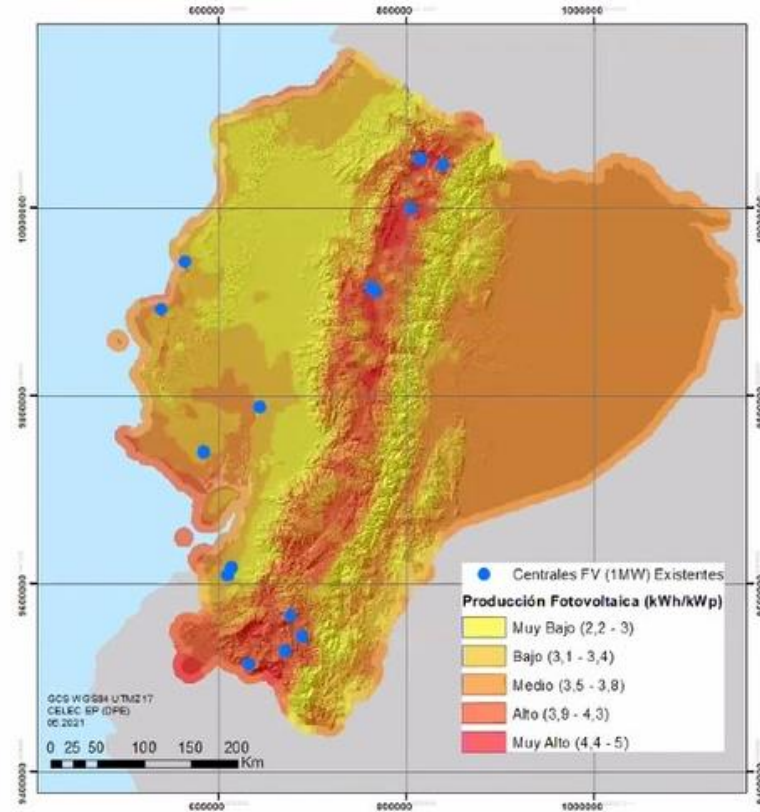


Figura 2. Mapa de producción solar fotovoltaica de Ecuador [23]

Tabla 1. Inventario de proyectos solares en Ecuador.

PROYECTO	PROVINCIA	MW	INVERSIÓN (millones USD)	NIVEL DE ESTUDIOS	CONEXIÓN AL SNT	TIEMPO APROX. CONSTRUCCIÓN
Fotovoltaico	Carchi	90	90	Inventario	Inmediata	1.5 años
Fotovoltaico	Imbabura	90	90	Inventario	Inmediata	1.5 años
Fotovoltaico	Pichincha	90	90	Inventario	Inmediata	1.5 años
Fotovoltaico	Cotopaxi	90	90	Inventario	Inmediata	1.5 años
Fotovoltaico	Chimborazo	90	90	Inventario	Inmediata	1.5 años
Fotovoltaico	El Oro	90	90	Inventario	Inmediata	1.5 años
Fotovoltaico	Loja	30	30	Inventario	Inmediata	1 año
Fotovoltaico	Loja	200	200	Inventario	No Inmediata	2 años
Fotovoltaico	Loja	200	200	Inventario	No Inmediata	2 años
Fotovoltaico	Santa Elena	60	60	Prefactibilidad	Inmediata	1 año
Fotovoltaico	Azuay	200	200	Prefactibilidad	Parcial	2 años
TOTAL		1230	1230			

1.2.4 Energía Eólica

La energía eólica refiere a la energía cinética de una masa de aire en movimiento, cuyo origen está en las masas de aire a distintas temperaturas, en donde el viento es originado por variación en las intensidades de la radiación solar, de la presión atmosférica y por la fuerza de Coriolis como consecuencia del sistema no inercial producto de la rotación o del giro de la tierra sobre su propio eje [42]. La energía cinética que contiene el viento es aprovechable para la producción de energía eléctrica, en donde la densidad de potencia equivale a la densidad del aire y es proporcional al cubo de la velocidad del mismo, que en el sistema internacional se expresa en W/m^2 , es decir potencia por unidad de superficie [43].

1.2.4.1 Componentes del viento

Los componentes del viento que establecen la potencia de la cual se dispone cuando se trata de sistemas de conversión de la energía eólica son; velocidad del viento, el cual es un indicador fundamental ya que la potencia varía en función del cubo de la velocidad, la cual se ve afectada por fricción; turbulencia, el cual que condiciona la utilización del recurso eólico; y la densidad del aire, ya que se asocia un mayor rendimiento de potencia a densidades más altas del aire, la cual se genera a temperaturas más bajas [44].

1.2.4.2 Potencial Eólico del Ecuador

Las estimaciones del potencial eólico del país contempladas en el Atlas Eólico del Ecuador, producto del trabajo realizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable [24], indican que el potencial disponible bruto total es de aproximadamente 1 670 MW con un potencial factible a corto plazo de 884 MW, considerando zonas con velocidades de viento con promedio de 7 m/s, que generarían una energía media de 2 869 GWh y de 1 518 GWh de media anual respectivamente para los casos del potencial bruto y factible (figura 3), valores que se verían incrementados en el caso de incluirse aquellas áreas o zonas cuyas velocidades de viento son inferiores a los 7 m/s [43].

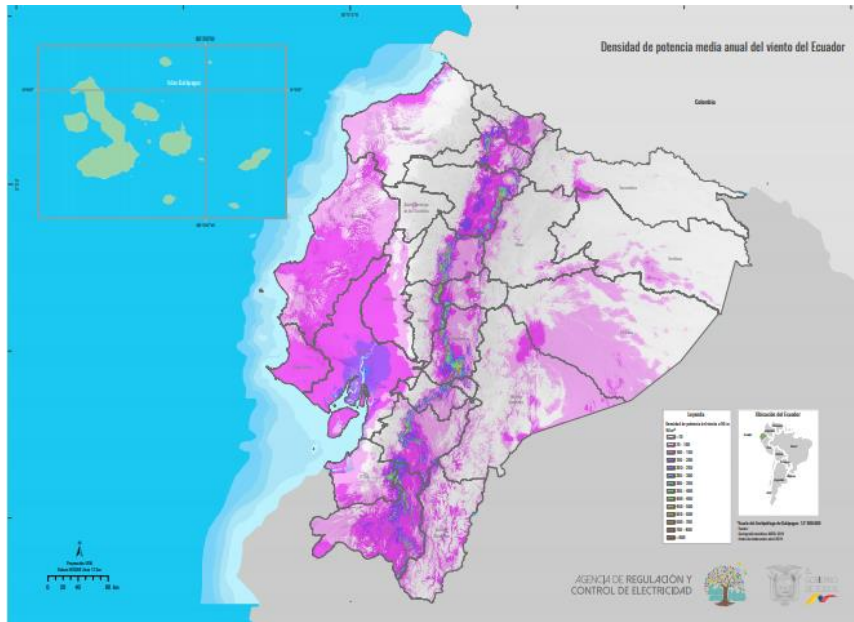


Figura 3. Densidad de potencia media anual del viento del Ecuador [24]

No obstante del potencial eólico del que se dispone (figura 4), no se han llevado a cabo proyectos al ritmo deseado que permita aprovechar todo el potencial, siendo que actualmente la potencia instalada asciende a aproximadamente 21,15 MW procedente de tres proyectos específicos como los son los Parques Eólicos San Cristóbal (2,40 MW) y Baltra (2,25 MW) ubicados en las Galápagos, y el Parque Eólico Villonaco en Loja (16,5 MW), siendo este último el único integrado al Sistema Nacional Interconectado [45].

A pesar de lo mencionado, hay diversos proyectos a implementar, estimándose que al corto plazo se incorporarán 100 MW de capacidad eólica a partir de los Proyectos Villonaco I y II, y 50 MW en el Proyecto Minas Huascachaca. También la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) ha presentado recientemente un inventario de proyectos eólicos (Tabla 2), que se encuentran en estudio y que permitirían contar con 605 MW eólicas a ser instalados en las Provincias de Manabí, Pichincha, Azuay, Cotopaxi y Santa Elena [41].

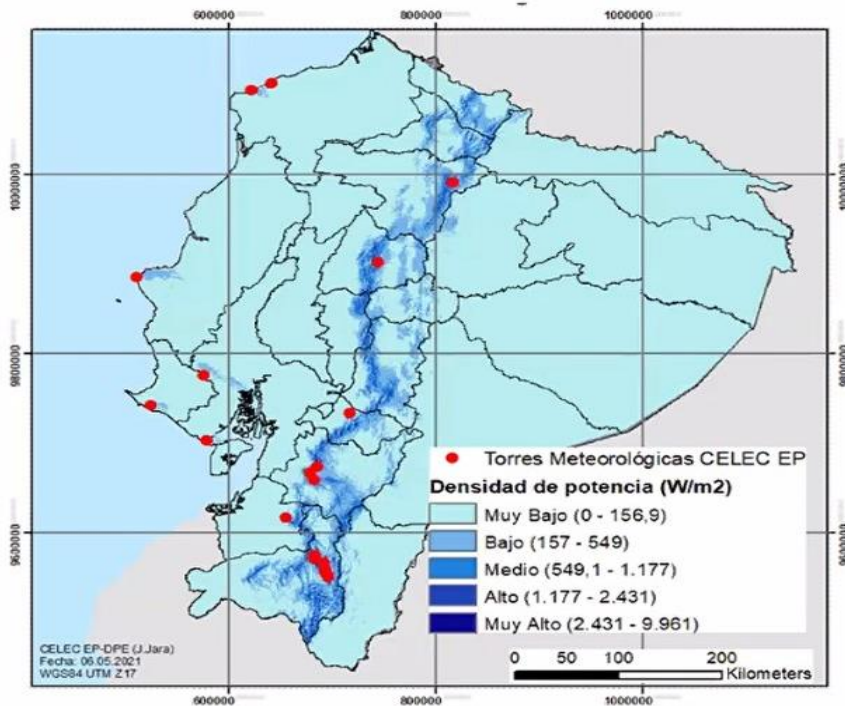


Figura 4. Mapa de producción eólica del Ecuador [24]

Tabla 2. Inventario de proyectos eólicos del Ecuador.

PROYECTO	PROVINCIA	MW	INVERSIÓN (millones USD)	NIVEL DE ESTUDIOS	CONEXIÓN AL SNT	TIEMPO APROX. CONSTRUCCIÓN
Eólico	Manabí	137	249	Perfil Proyecto - torre medición	Inmediata	2 años
Eólico	Pichincha	120	218	Perfil Proyecto - torre medición	Inmediata	2 años
Eólico	Azuay	129	235	Perfil Proyecto - torre medición	Parcial	2 años
Eólico	Cotopaxi	94	171	Perfil Proyecto - torre medición	Parcial	2 años
Eólico	Santa Elena	125	228	Perfil Proyecto - torre medición	Parcial	2 años
TOTAL		605	1101			

1.2.5 Generación Distribuida

Los efectos ambientales derivados del empleo desproporcionado de fuentes de energía fósil son notables a nivel mundial, relacionados principalmente con la emisión de CO₂, es la principal causa del calentamiento global y del efecto invernadero, y por ende con impacto directo en el cambio climático, emisiones que se han visto incrementadas de manera exponencial desde principios de la

industrialización, determinándose a través de estudios realizados que el 80 % de las mismas corresponden a las últimas cinco décadas [46], esto ha llevado al adelanto de diversas aplicaciones de energías renovables no convencionales para la generación de energía eléctrica.

Dentro de estas aplicaciones se tiene la generación distribuida (GD) (figura 5) en el caso de los sistemas eléctricos, la cual es definida por la Agencia Internacional de la Energía como la producción energética que es conectada a la red de distribución en baja tensión la cual, entre otros, se haya asociada a ciclos combinados de calor y potencia y a las fuentes de energías renovables [47].

La generación distribuida es conceptualizada también como la generación eléctrica a partir de plantas, normalmente menores a 10 MV, lo que las hace comparativamente pequeñas en relación a las centralizadas, y cuya capacidad permite la interconexión con el sistema eléctrico [9]. Los beneficios de la GD se asocian principalmente a la reducción de pérdidas por distribución y transmisión, así como de los costos de mantenimiento, y un incremento de la confiabilidad de los consumidores finales. Contrariamente, la GD presenta como inconvenientes la posible descoordinación de equipos protectores, problemas para la reconexión y los relacionados con variaciones de tensión [48].

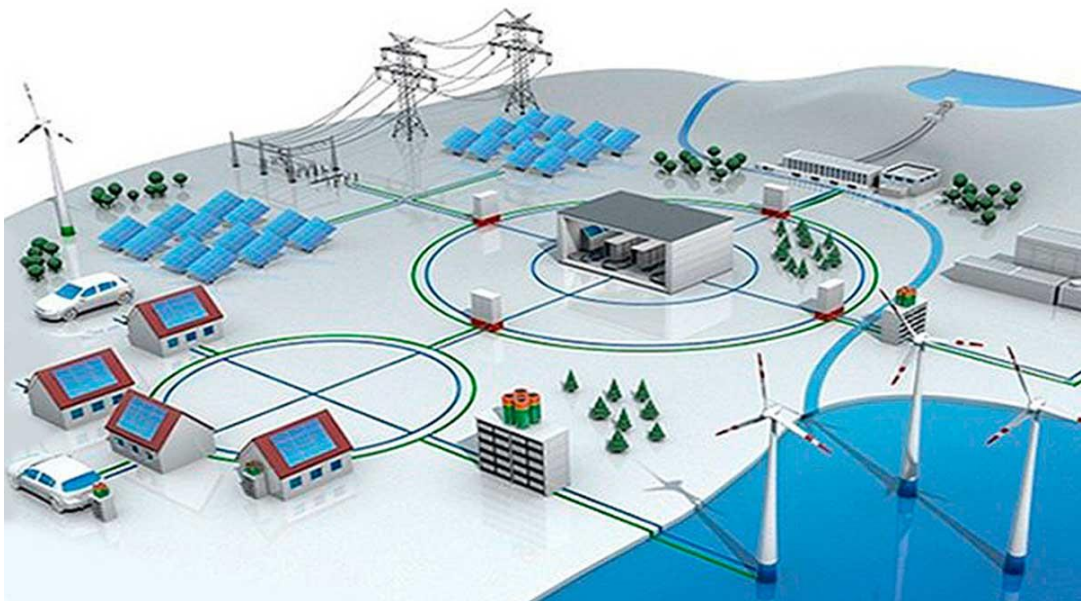


Figura 5. Esquema de generación distribuida y fotovoltaica para autoconsumo

1.2.6 Micro Generación

La micro generación es entendida como un sistema de generación a baja escala de energía eléctrica (o térmica) por parte de prosumidores, pequeñas empresas y comunidades, la cual implica un suministro de energía descentralizado o distribuido en donde ésta se genera cerca del área en donde es utilizada, teniendo como propósito satisfacer los requerimientos energéticos, parcial o totalmente de estos prosumidores, estando pensada para la instalación de energías renovables amigables medio ambientalmente, entre las que sobresalen la micro generación solar y eólica, a partir de placas fotovoltaicas y aerogeneradores [50].

1.2.6.1 Tipos de Micro Generación

La micro generación se enmarca dentro de la generación distribuida y al ser sistemas de potencias pequeñas pueden conectarse a nivel de distribución o transmisión a los sistemas eléctricos de potencia, por lo que pueden funcionar bien sea de manera aislada siendo parte de un sistema eléctrico mayor [51]. En la micro generación aislada la energía generada es para el autoconsumo, y no existe conexión a la red eléctrica, por lo general el recurso proveedor de energía es renovable requiriéndose de equipos acumuladores que permitan disponer de energía aún en ausencia de dicho recurso. En el caso de la micro generación con conexión a red el sistema no sólo genera energía, sino que el excedente que pueda existir puede ser devuelto a la red [52].

La micro generación, cuando se trate de sistemas conectados a red, y por tanto la operación posibilite el intercambio de energía, recibiendo o entregando energía eléctrica y por tanto siendo los sistemas eléctricos de potencia bidireccionales, requiere de normas y políticas claras que regulen dicho intercambio de energía [51], a fin de que este hecho no se convierta en una limitante para la instalación de este tipo de sistemas de energía.

1.2.6.2 Ventajas y Desventajas de la Micro Generación

La micro generación ofrece ventajas relacionadas directamente con el medio ambiente, debido al uso de energías renovables, este contribuye al ahorro del

consumo de combustibles fósiles, reducción de la pobreza energética, evita la dependencia a nivel de combustible, mitiga la emisión del carbono hacia la atmósfera y contribuye a minimizar las pérdidas del sistema eléctrico sobre todo en sistemas de pequeña escala. Adicionalmente constituye un soporte de generación renovable intermitente, propicia la participación activa y empoderamiento de la ciudadanía, representando un sistema de generación energética de alto valor, más eficiente y respetuosa con el ambiente [53].

La micro generación, sin embargo, puede verse afectada por factores que pueden limitar su desarrollo convirtiéndose en desventajas, entre las cuales se destacan lo limitado de sus instalaciones, lo que impide generar grandes cantidades de energía eléctrica dado el espacio que ocupan; rechazo por parte de los usuarios por las posibles molestias a nivel del impacto visual que ofrece la instalación de las mismas (placas solares, micro turbinas eólicas); los elevados costos de instalación inicial, la falta de incentivos fiscales en muchos casos y de una normativa exclusiva que regula a estos sistemas de generación de energía [54].

1.2.7 Micro Generación Distribuida

El término de micro generación distribuida está estrechamente relacionado con el de generación distribuida que se fundamenta en una tecnología de generación a una pequeña escala las cuales se localizan cercanos al consumidor final. En el caso de la micro generación distribuida, y tomando en cuenta los rangos de potencia, esta se asocia a las instalaciones de potencia inferior a 5 kW [55]. En este tipo de sistemas el cliente consumidor o carga representa el eslabón final, que goza de autonomía energética, y que en función del tipo y tamaño del sistema y energía generada puede aportar a la red el excedente, convirtiendo al usuario final prosumidor aportando productos y servicio [56].

1.2.7.1 Características de la Micro Generación Distribuida

Las características más relevantes de la micro generación distribuida tienen relación en la mejora de la fiabilidad y sustentabilidad del sistema energético por contar éste con diversas fuentes de micro generación, permitiendo reducir las fallas en la red eléctrica por verse reducida la distancia desde el punto de generación hasta el

consumidor. Adicionalmente, se caracteriza por el uso de energías renovables por estar estas presentes cerca de los puntos de consumo, en los cuales suele trabajarse con potencias inferiores a 5 kW, siendo la norma general que la potencia instalada no supera los 10 kW, para lo cual suelen utilizarse placas solares fotovoltaicas y aerogeneradores [57].

1.2.7.2 Micro Generación Distribuida en la Actualidad

La micro generación distribuida ha experimentado los mayores avances en aquellos países que aparte de adaptar el sistema a sus redes eléctricas de media y baja tensión, han realizado ajustes normativos y políticas regulatorias de energías renovables principalmente orientadas a la promoción del autoconsumo, destacando el caso de Alemania, quien desde la aprobación de la Ley de Energías Renovables hace dos décadas, se han convertido en el líder a nivel mundial de las energías renovables y particularmente del autoconsumo de energía fotovoltaica, con más de un millón y medio de instalaciones, amparada por la Ley que garantiza una retribución fija por la energía volcada en la red reconociendo de esta manera el derecho a cobro durante los próximos 20 años [58].

Otros países que integran la Unión Europea que destacan en materia de micro generación y autoconsumo son Italia y el Reino Unido, los cuales a través de medidas regulatorias que benefician el autoconsumo, el empleo de la energía limpias y la implementación de diversos programas han logrado alcanzar las 700 000 y 800 000 instalaciones registradas respectivamente [58]. En nuestro continente, el caso de California en Estados Unidos se debe destacar, pues de la totalidad de la capacidad de energía solar el 65,5 % corresponde a usuarios residenciales. A nivel regional destaca Brasil cuyas políticas y cambios normativos han llevado a que el país presente un incremento continuado en la potencia instalada vinculada a la micro generación, estimando que para el año 2030 existan 2,7 millones de unidades consumidoras dispongan de energía generadas por ellas mismas, lo que implicaría 23 500 MW [59].

La estimación de la Agencia Internacional de Energía para el 2024 indica un incremento exponencial en materia de micro generación distribuida, destacando que la energía fotovoltaica distribuida experimentará un aumento de más del 240 %,

destacando que alrededor de la mitad del mismo se lo realizar en China, en donde resulta más barato producir energía solar para autoconsumo que obtenerla de su red eléctrica. La Agencia también señala que las instalaciones de índole comercial e industrial son los espacios con mayor potencial de crecimiento, el cual se verá favorecido sobre todo en Europa por la disminución en los costos de los paneles solares y políticas acertadas que han ido adoptando los países, en especial de la Unión Europea [60].

1.2.7.3 Esquema General de la Micro Generación Distribuida

En función del recurso energético empleado y de las fuentes generadoras, bien sean solares, eólicas o hidráulicas, es factible realizar la cuantificación de la energía que se genera, tomando en consideración factores externos como el clima, y dependiendo de la demanda energética es posible disponer de respaldos que permitan contar con energía eléctrica más eficazmente [52]. Se debe considerar que, en este tipo de redes, de baja tensión (figura 6), por lo general, las conexiones de micro unidades generadoras de energía pueden tener un impacto en la seguridad y calidad del suministro [61].

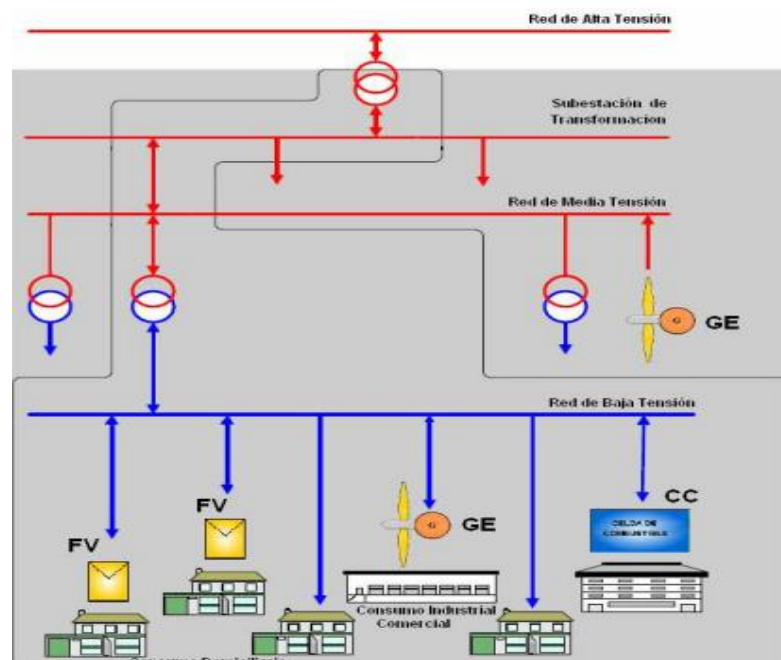


Figura 6. Esquema general de micro generación distribuida en baja tensión.

Leyenda. Fv: Instalación fotovoltaica, CC: celda de combustible, GE: generador eólico [62]

1.2.7.4 Micro generación distribuida de un sistema aislado

La micro generación distribuida en un sistema aislado está orientada al autoconsumo, no existiendo posibilidad de transmitirla a la red por no estar interconectada a la misma, y este tipo de sistemas cuenta con baterías de capacidad variable que sirven para acumular los excesos del recurso energético a fin de que esté disponible y pueda ser empleado cuando haya requerimiento del mismo, bien sea por ausencia del mismo o porque las necesidades son mayores a la que el sistema es capaz de generar. El sistema básico de este tipo consta, tal y como se muestra en la figura 7 de: (1) Controlador de carga. (2) Banco de baterías. (3) Inversor de corriente. (4) Puntos posibles consumo tales como electrodomésticos, iluminación [52].

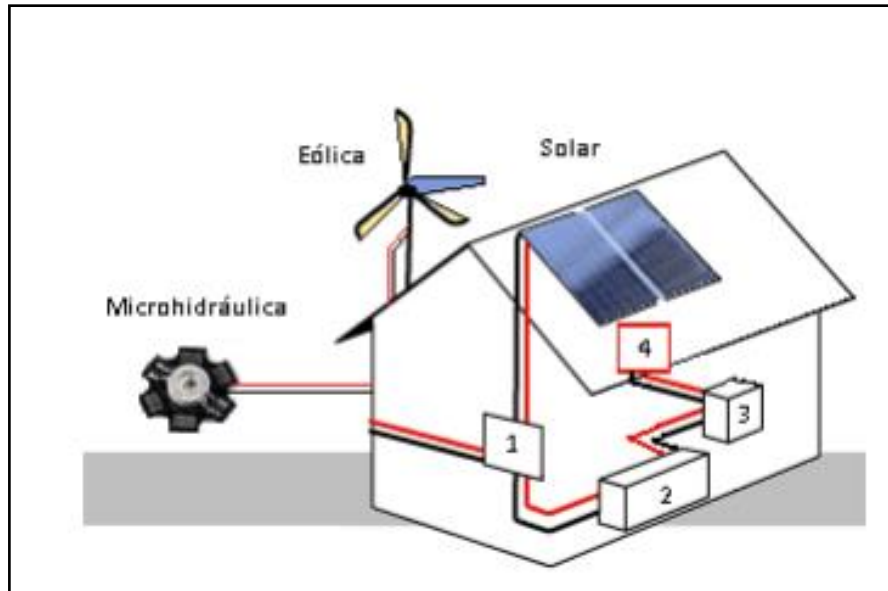


Figura 7. Esquema de instalación de micro generación aislada [52]

1.2.7.5 Micro generación distribuida de un sistema conectado a red

La micro generación distribuida en un sistema conectado a red difiere del sistema aislado por cuanto disponen de un micro generador para el autoconsumo, están conectados a la red eléctrica lo cual ayudara al intercambio de energía, no siendo requisito el contar con baterías puesto que se puede hacer uso de la energía de la red eléctrica cuando la misma no está siendo generada por el sistema, pero sí de un

inversor de corriente, ver figura 8 [52]. Sistemas híbridos o combinados conformados por más de una fuente renovable generadora de energía, por ejemplo, solar-eólica, en donde el uso de acumuladores si bien es opcional, en determinados casos resulta recomendable en función de las características de los mismos y de la demanda del usuario producto-consumidor [63].

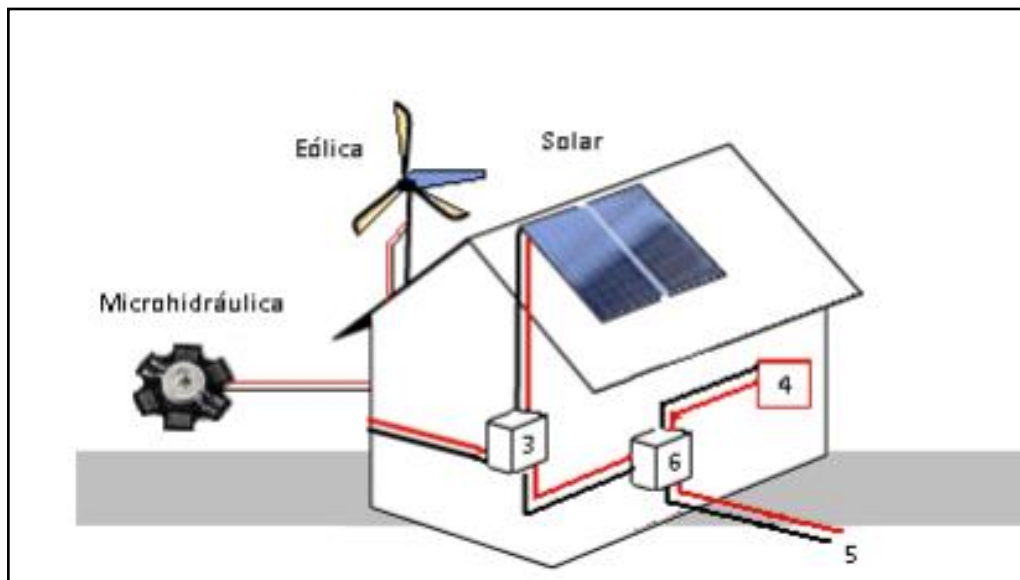


Figura 8. Esquema de instalación de micro generación en red.

Leyenda: 3. Inversor de Corriente 4. Punto de Consumo 5. Red Eléctrica. 6. Medidor [52]

1.2.8 Suministros de energía eléctrica en el Ecuador.

La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) empresa pública enmarcada por su ámbito de acción dentro de los servicios públicos estratégicos es la responsable de generar y abastecer el servicio eléctrico en el país, lo que comprende generación, transmisión, distribución, comercialización, importación y exportación de energía, para lo cual cuenta con una capacidad instalada para el año 2020 de 6 366,20 MV, conformada por 4 482,20 MV de generación hidráulica, 1 867,50 MV de generación térmica y 16,50 MV generados eólicamente, lo cual deja ver a las claras que mayoritariamente esta capacidad instalada y de generación se corresponde con la energía hidráulica, como se aprecia en la figura 9 [41].

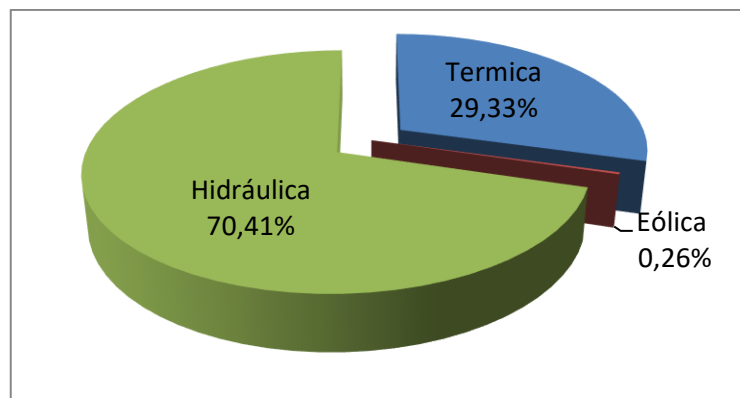


Figura 9. Capacidad Instalada de Generación del Ecuador en el 2020
[41]

1.3 Fundamentación metodológica

1.3.1 Alcance de la investigación

La investigación es de tipo proyectiva y descriptiva. Es proyectiva ya que consiste en la elaboración de un modelo, como una solución al problema o necesidad de tipo práctico de una región geográfica específica, a partir del diagnóstico exacto de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y de las tendencias futuras, es decir, con base a resultados de un proceso investigativo. Es descriptiva porque responde al que y como de los fenómenos, de acuerdo a criterios sistemáticos y característicos que ponen en evidencia su comportamiento.

1.3.2 Técnica de recolección de información

Para el desarrollo de esta investigación se realizó una búsqueda bibliográfica, utilizando la base de datos de la biblioteca de la institución, también en páginas oficiales del estado y de las temáticas vistas durante el desarrollo de la carrera, donde se analizó el estado actual de los aspectos relevantes de tecnologías de micro generación y las normativas vigentes.

Conclusiones

- Es evidente del cambio climático cada día, trayendo consecuencias a nivel ambiental, social, económico. Lo cual nos obliga a buscar alternativas de producción de energía eléctrica y térmica, desde fuente de energía más

amigables con el medio ambiente como por ejemplo lo son la energía solar y la energía eólica.

- La Constitución Política del Ecuador garantiza el abastecimiento de energía eléctrica a la población, he ahí la importancia de las fuentes renovables de energía, que sirven para reducir la dependencia del petróleo en la generación de electricidad, sin embargo; hace falta realizar ajustes a la normativa legal para incentivar la instalación sistemas solares fotovoltaicos conectados a las redes de distribución de baja tensión para consumo propio.
- Existen trabajos académicos en el Ecuador que demuestran que es posible generar energía eléctrica por medio de turbinas de viento con capacidad nominal desde 5 kW hasta 10 kW, para reducir la dependencia energética de las energías convencionales, que, en muchas ocasiones, no pueden llegar a sitios lejanos de las centrales eléctricas convencionales.

CAPÍTULO II.

PROPUESTA

2.1. Título del proyecto.

Estudio del potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí

2.2. Objetivo del proyecto.

Estudiar el potencial eólico y solar para establecer un modelo de simulación para micro generación distribuida en el sector de Zumbahua, cantón Pujilí

Objetivos Específicos

- Recolección de información básica para alimentar el modelo.
- Diseñar el modelo matemático que mejor se adecue al sector de Zumbahua, cantón Pujilí, Provincia de Cotopaxi
- Desarrollo del modelo matemático que se ajuste a la realidad del Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi.

2.3. Justificación de la propuesta

2.3.1. Situación socio-económica de Zumbahua

La latitud y longitud referencial de Zumbahua que ha sido utilizado para el presente estudio es: $(-0.8716191240573181, -78.91734238525608)$, (figura 10), como referencia tanto para los estudios de la población como para la evaluación de estos recursos energéticos renovables.

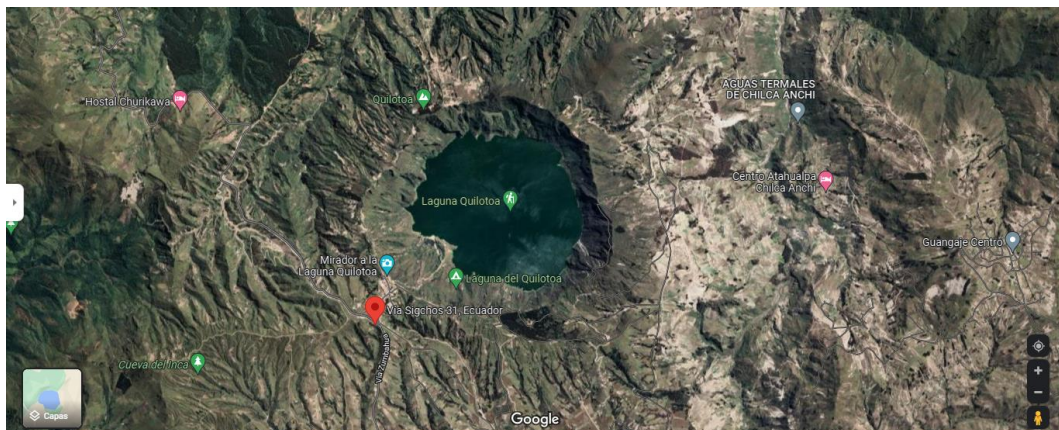


Figura 10. Ubicación satelital del lugar de estudio

En la siguiente figura se evidencia con detalle la ubicación exacta de la zona de estudio.



Figura 11. Ubicación detallada del lugar de estudio

En la provincia de Cotopaxi, la agricultura es la actividad donde hombres y mujeres más trabajan, siendo que ocupa el mayor porcentaje el género femenino. Ver figura 12

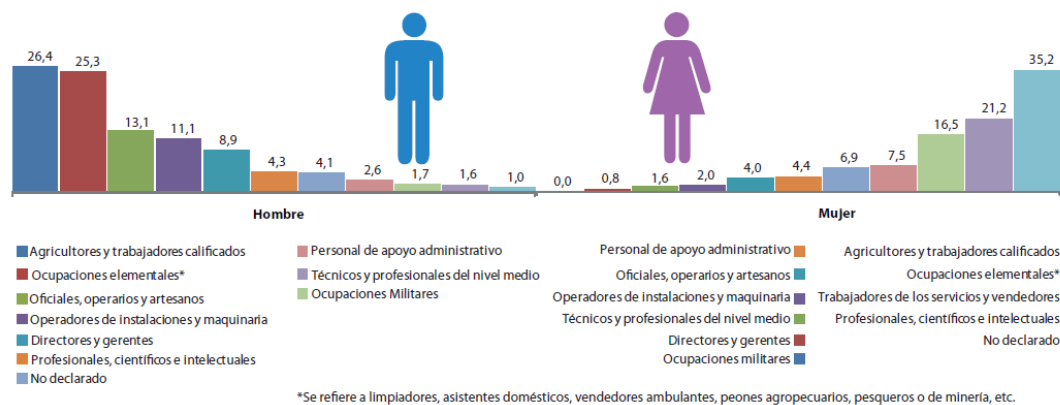
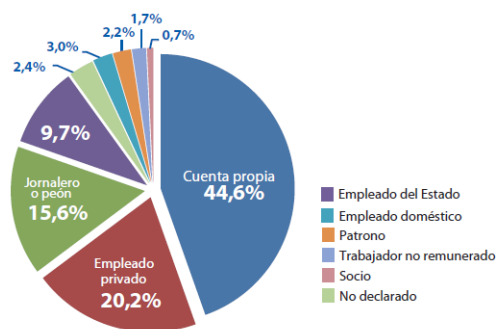


Figura 12. Actividades laborales a la que se dedican hombres y mujeres del Cotopaxi

[64]

En la figura 13, se puede evidenciar en porcentaje, las diferentes ocupaciones que tienen los habitantes de la provincia.



Ocupación*	Hombre	Mujer
Empleado privado	22.400	11.610
Cuenta propia	39.579	35.423
Jornalero o peón	20.261	5.918
Empleado u obrero del Estado, Municipio o Consejo Provincial	9.657	6.663
No declarado	2.249	2.792
Empleada doméstica	263	3.699
Patrono	2.205	1.480
Trabajador no remunerado	1.412	1.411
Socio	832	418
Total	98.858	69.414

Figura 13. Ocupación laboral de los habitantes de Cotopaxi [64]

La figura 14, representa las características de vivienda por cantones de los habitantes de la provincia de Cotopaxi

Cantones	Hombres	%	Mujeres	%	Total	Viviendas*	Viviendas**	Viviendas***	Razón niños mujeres ****	Analfabetismo	Edad promedio
Pangua	11.340	5,7%	10.625	5,0%	21.965	7.900	7.888	5.503	509,4	15,0	28
La Maná	21.420	10,8%	20.796	9,9%	42.216	13.730	13.713	11.013	432,1	10,0	26
Latacunga	82.301	41,4%	88.188	41,9%	170.489	57.942	57.897	42.387	363,0	9,2	29
Pujilí	32.736	16,5%	36.319	17,2%	69.055	25.228	25.214	16.619	471,0	24,3	27
Salcedo	27.880	14,0%	30.336	14,4%	58.216	21.530	21.519	15.253	346,3	11,6	30
Saquisilí	11.957	6,0%	13.363	6,3%	25.320	8.367	8.365	5.836	447,8	18,5	27
Sigchos	10.991	5,5%	10.953	5,2%	21.944	8.069	8.063	5.189	597,8	24,6	27
Total	198.625	100,0%	210.580	100,0%	409.205	142.766	142.659	101.800			

* Particulares y colectivas ** Particulares *** Particulares ocupadas con personas presentes **** Niños menores de cinco años por 1000 mujeres en edad reproductiva (15 a 49 años)

Figura 14. Población y Vivienda en Cantones del Cotopaxi [64]

En la figura 15, se observa en gráfico araña, el aumento de los diferentes servicios básicos de la provincia, entre los años comprendidos del 2001 al 2010

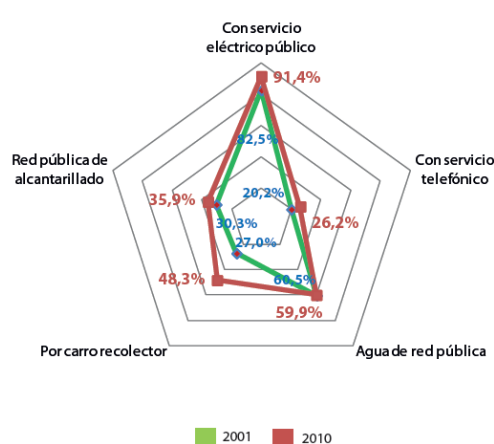


Figura 15. Servicios básicos en Cotopaxi [64]

La Parroquia de Zumbahua se encuentra en el cantón Pujilí que pertenece a la provincia de Cotopaxi. Según los últimos datos del Censo de Población y Vivienda realizado por el INEC en el 2010, la parroquia de Zumbahua tiene 12 643 habitantes de los cuales 5 924 son hombres y 6 719 son mujeres (figura 16). Zumbahua es considerada como una zona rural. Según datos del INEC las áreas rurales tienen menor crecimiento poblacional que las zonas urbanas, razón por la cual la provincia de Cotopaxi no se encuentra en las 10 principales provincias con mayor crecimiento, mientras que provincias insulares y orientales cuentan con una mayor dinámica poblacional [65].

Zumbahua se caracteriza por ser una parroquia donde el 98,90 % de su población se autoidentifica como indígena, el restante 1,1 % se identifica como mestiza. La población indígena es caracterizada y se diferencia de los demás pueblos y nacionalidades del Ecuador, por mantener sus tradiciones y costumbres ancestrales y su modo de vida cultural, lo que contribuye a conservar y fomentar los conocimientos y saberes ancestrales.

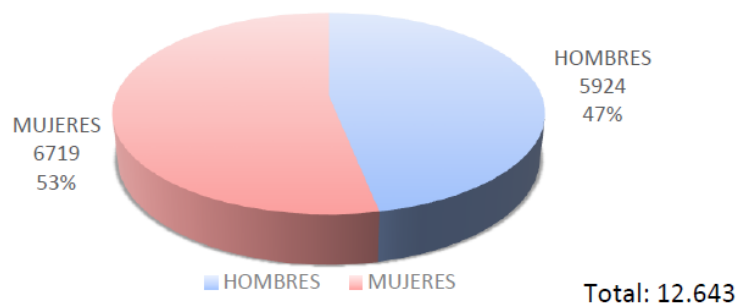


Figura 16. Distribución de la población de Zumbahua 2010.

Así también, podemos notar que la reducción de la velocidad del crecimiento de la población es afectada por muchos factores tales como: la disminución del tamaño del hogar, por la decisión de las familias de tener un menor número de hijos; aumento de las familias unipersonales, y reducción de parejas que contraen matrimonio y el aumento de divorcios; los factores anteriormente descritos deben considerarse como una ventaja para las familias, porque crea un efecto de freno en los gastos familiares, por la disminución de las implicaciones económicas y sociales que es tener un menor número de integrantes de cada hogar, y a largo plazo producen beneficios económicos al momento de responder por los gastos

mensuales. En la actualidad, las mujeres tienen un papel más participativo en el trabajo y la economía, y en general en la vida social, dejando a un lado el pensamiento clásico de ama de casa con bajos niveles educativos y siendo la principal responsable en el cuidado de los niños [65]. (figura 17)

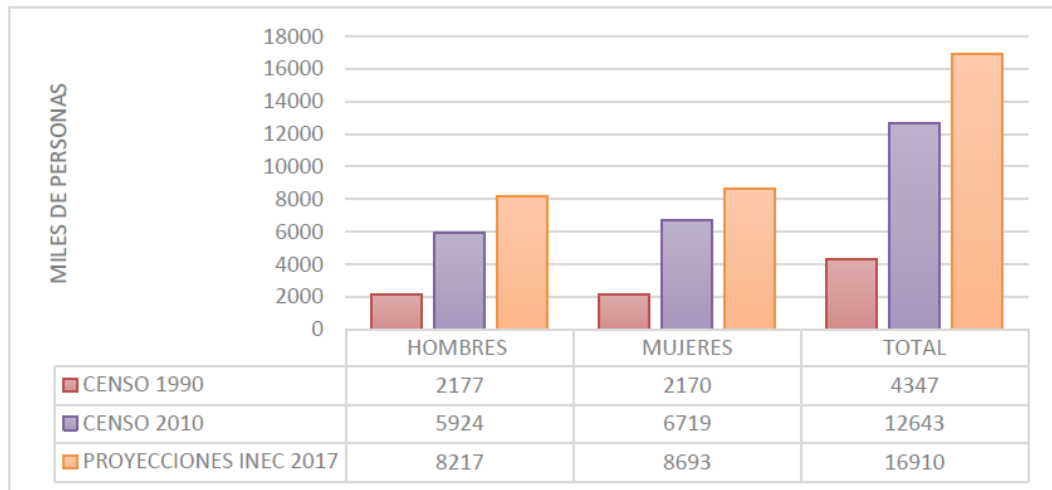


Figura 17. Evolución del crecimiento poblacional de Zumbahua

[65]

La distribución de la población por grupos etarios predomina la población de un rango de edad de entre los 20 a 64 años de edad, que representa el 40 % de la población total, a la que el Estado debe asegurar la obtención de oportunidades laborales de calidad, además de un sistema de salud que asegure mejorar la productividad laboral que permita su desarrollo económico y por ende social; el segundo grupo poblacional está formado por el 26 % de individuos que se encuentran en un rango de entre los 10 a 19 años, en el cual la intervención del Estado es de vital debido a que debe proveer mayor acceso a los servicios básicos como educación y salud (figura 18), con el objetivo de mejorar el desarrollo humano, social y económico de este grupo a lo largo de la vida de cada individuo [65].

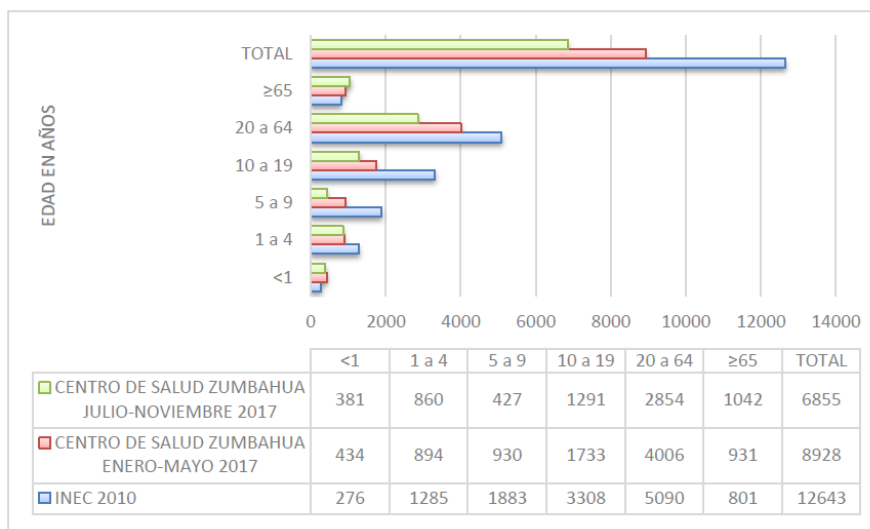


Figura 18. Distribución de la población de Zumbahua por grupos etarios [65]

2.3.2. Características geográficas de la parroquia de Zumbahua.

La parroquia de Zumbahua está ubicada en la provincia de Cotopaxi (figura 19), al sur oeste del cantón Pujilí; esta es una de las parroquias con mayor altitud, se encuentra entre los 3 300 y 4 000 metros sobre el nivel del mar [66]. Además, es una de las zonas con mayor cantidad de páramos de la provincia, cuenta con temperaturas medias de entre 8 °C a 16 °C [65].

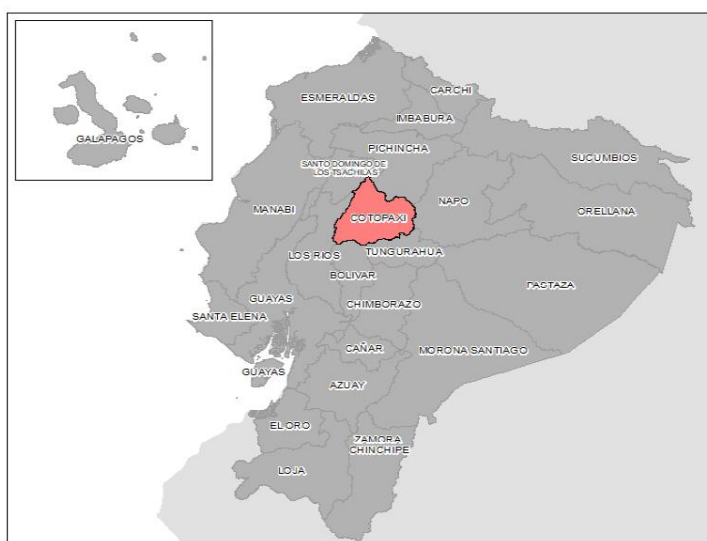


Figura 19. Mapa Provincial del Ecuador [65]

La provincia de Cotopaxi está compuesta por 7 cantones (figura 20).

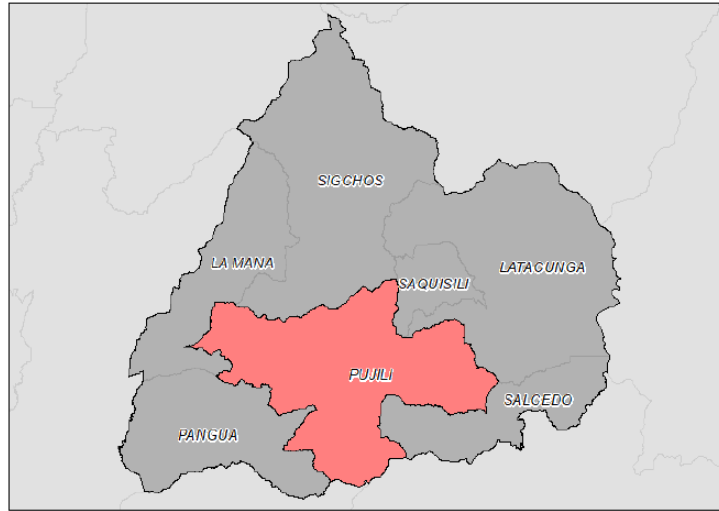


Figura 20. Mapa Cantonal de Cotopaxi [65]

La parroquia se encuentra limitada al norte con el cantón Sigchos y con la parroquia de Guangaje del cantón Pujilí; al sur con la parroquia de Angamarca y Cusubamba del cantón Salcedo; al este con la parroquia de Guangaje del cantón Pujilí; y al oeste con la parroquia de Pilaló y Tingo del cantón Pujilí [65] (figura 21).

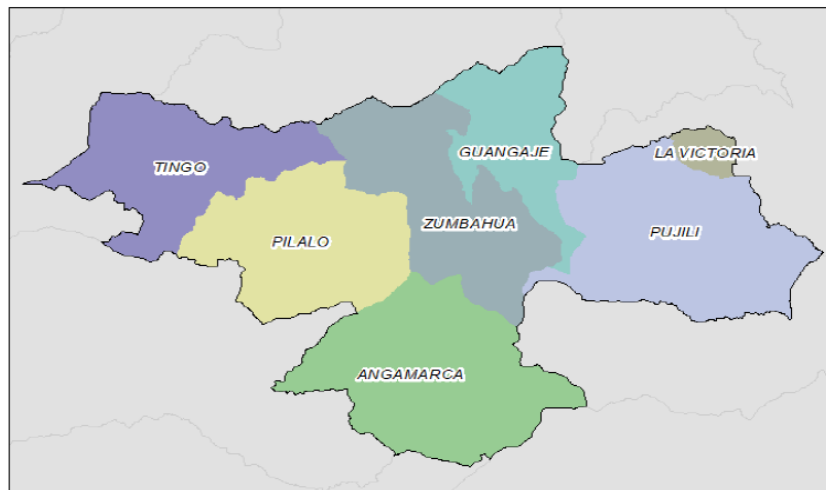


Figura 21. Mapa parroquial de Zumbahua [65]

Según el GAD Parroquial de Zumbahua (2016) la división política administrativa de la parroquia de Zumbahua se encuentra conformada por 13 comunidades (figura 22) que son: [65]

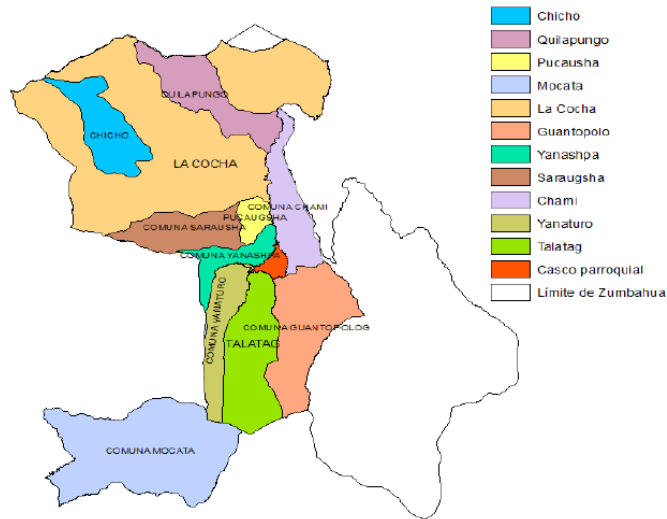


Figura 22. Mapa de comunidades de la parroquia de Zumbahua [65]

Con respecto a las características geográficas, la altitud oscila entre los 3 300 y 4 000 metros sobre el nivel del mar, el nivel más bajo se encuentra ubicado al noroeste de la parroquia, en donde se sitúa la principal salida de la vertiente hidrográfica, de la que se alimenta al Río Pilaló, con una altura de 2 080 msnm. Por el lado del borde se encuentra el cráter del volcán de la laguna del Quilotoa que tiene una altitud de 3 840 msnm y por otro lado, la cabecera parroquial se encuentra a 3 520 msnm [65].

La lengua nativa de los habitantes de la parroquia es el Kichwa y en poca proporción el castellano, las que son puestas en práctica por la interacción de las dos culturas en el espacio económico y social.

Por sus niveles de altitud la parroquia de Zumbahua tiene climas fríos y la temperatura media que caracteriza a la zona es de 8 a 16 °C, aunque existen dos temporadas climáticas, en los meses de agosto, noviembre, diciembre y febrero existen temperaturas extremas que pueden llegar inclusive a una temperatura menor a 7 °C. Por un lado, la primera estación de verano, comienza en septiembre hasta mediados de noviembre, por otro lado, la segunda estación invierno comienza a

finales de noviembre hasta agosto, sin embargo, por los cambios climáticos, han existido variaciones y prolongaciones en estas estaciones climáticas. El clima varía por la presencia del callejón interandino o cordillera de los Andes, por ende, los vientos soplan por los valles y llanuras. Esta parroquia se caracteriza por localizarse en el piso o escalón climático “frío o páramo” que conjuga a todas las zonas que van desde los 3 200 hasta el 4 700 msnm, por lo que la temperatura puede variar entre 1 y 10 °C. Por tales motivos, se ocasionan tempestuosos aguaceros, neblinas espesas y lloviznas casi constantes [65].

Por otro lado, la orografía de la parroquia de Zumbahua es irregular con quebradas y pendientes, que al unirse forman valles fluctuantes con pocas zonas planas, que generalmente se sitúan en zonas húmedas, que son llamadas pantanos, de aquí nacen vertientes que cuando se unen y conforman afluentes como el de Río Michacalá y Rumichaca, además de que en pequeñas cantidades bajan por las quebradas de Paccha y Tigua, que al unirse constituyen el Río Zumbahua, el mismo que da lugar al Río Toachi.

Según el GAD Parroquial de Zumbahua (2015) en las zonas del páramo se encuentran vertientes o áreas húmedas, que son los principales sistemas de abastecimiento de agua, pero entubada, que son utilizadas por las comunidades que se ubican en la parte baja de la parroquia, además de alimentar a los ríos. La parroquia de Zumbahua acoge a las siguientes vertientes: [65].

- En la comunidad de Saraugsha se encuentran las vertientes de Patac, CuichiYau, Anga Huachana, Sig-Sig Cuchu.
- En la comunidad de Yamaha se ubican las vertientes de Chimborazo, Uctu Rumi, Chanhunga y Palitingo.
- En la comunidad de Talatac se encuentran las vertientes de Tumbuzuc, Milinpamba, Lucin Cuchu, Yarac Rumi, Chalua Tingo.
- En la comunidad de Michacalá se ubican las vertientes de Corral Cuchu, Pusu Rumi, Sacha Urcu, Toro Rumi, Ira urco, Cantana, SigSigCuchu, Acabana, Quincha Rumi, Toro Pucru, Atog Huachana, UrcuPuncu, QuiruSirina, Quizu Pata, Misisitama [65].

En zonas rurales, las mujeres indígenas que trabajan como empleadas domésticas no perciben un salario digno para poder cubrir todas sus necesidades básicas; y sufren problemas como violencia y discriminación, lo que conlleva a que exista una mayor probabilidad de enfrentar pobreza, en hogares más numerosos, además de mostrar una relación directa entre la pobreza y los hogares que cuentan con una jefatura materna. Existen algunas investigaciones en donde se explica que el sexo del cabeza de hogar interviene directamente en los niveles de bienestar. En Ecuador, entre 2006 y 2014, consta un incremento de la jefatura femenina, sin embargo, esto no depende de la condición de pobreza en la que se encuentre, aunque esta situación se evidencia en mayor proporción con un 5,8 % para hogares no pobres y de 3,3 % que para los hogares pobres.

Según el reporte de pobreza realizado por el INEC 2006-2014, Ecuador es considerado como un país multiétnico y pluricultural, en donde la población indígena es el grupo étnico con una mayor incidencia de pobreza. Para el 2014, del 25,8 % de población en condiciones de pobreza, cerca del 64,8 % provienen de la etnia indígena [65].

Por un lado, la pobreza por consumo se da cuando la población no logra cubrir el costo mensual de la canasta básica alimenticia y por ende no logra satisfacer las necesidades básicas, en el caso de la parroquia de Zumbahua el 54,9 % no tienen pobreza por consumo, mientras que el 45,1 % de la población posee pobreza por consumo. Por otro lado, la pobreza extrema por consumo, se da cuando la población carece tanto de activos y sufren de enfermedades crónicas o catastróficas, además de incluir a la malnutrición, mala educación, acceso a la salud limitado y marginación y exclusión, en la parroquia aproximadamente el 13,3 % de la población total vive en condiciones de extrema pobreza. Finalmente, la pobreza por Necesidades Básicas Insatisfechas conjuga a factores tales como el saneamiento, acceso a agua potable, hacinamiento, infraestructura, dependencia económica y asistencia a instituciones educativas, por lo que el hogar se va a considerar pobre si tiene una o más privaciones para acceder a los factores anteriormente descritos, en esta parroquia el 41 % de la población es pobre NBI [65].

Por lo tanto, la presente tesis se justifica en primer lugar porque en el Sector de Zumbahua, Cantón de Pujilí Provincia de Cotopaxi la mayoría de la población pertenece a sectores vulnerables de la población, donde el costo por gasto de energía eléctrica representa una parte importante del presupuesto familiar, el cual es difícil de cubrir para la mayoría de las familias que habitan el sector, por lo tanto se deben plantear alternativas de menores costos, que además ofrecen la ventaja de ser ambientalmente factibles.

Por otro lado, las condiciones ambientales del Ecuador en primer lugar por ser un país tropical, donde la radiación solar es constante durante el año, además de presentarse en la zona velocidades del viento que pudiese servir para activar generadores eólicos, ofrecen la factibilidad de desarrollar prototipos de energía eólica y solar para desarrollar sistemas de micro generación sustentables en la zona.

La necesidad de cubrir la gran demanda de consumo de energía eléctrica lleva a crear nuevos modelos alternativos de energía, es por eso que el desarrollo de la presente investigación permitirá conocer el potencial eólico y solar para poder generar un modelo matemático que facilitará la implementación de una energía alternativa y así cubrir la demanda de energía fuera de la red nacional, mejorando su calidad la vida y también disminuyendo el impacto ambiental.

En resumen, la propuesta se fundamenta en 3 aspectos básicos, los cuales se destacan en la figura 23.

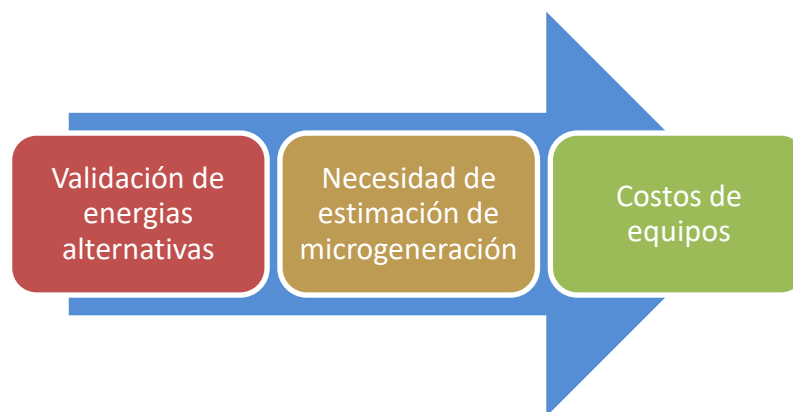


Figura 23. Factores a considerar para justificar la propuesta.

La fundamentación de la propuesta se base en 4 premisas, los cuales se destacan en la figura 24 y son descritas posteriormente.

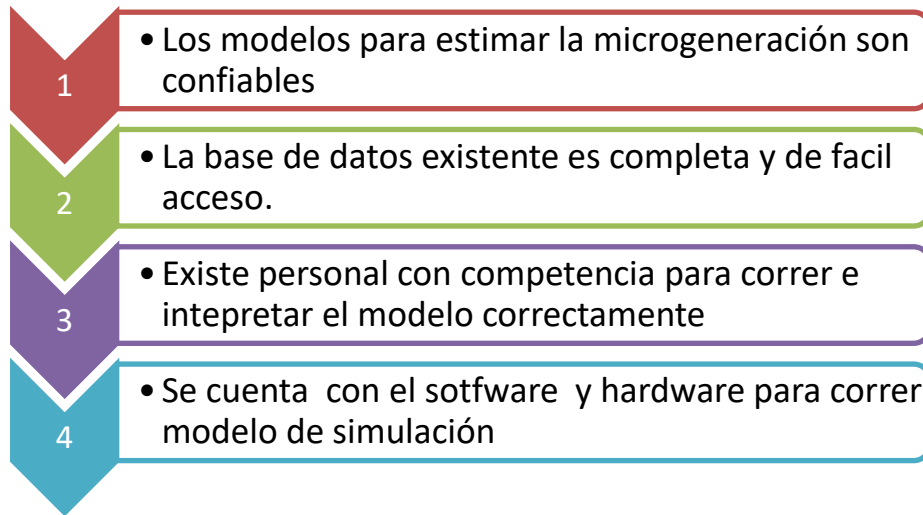


Figura 24. Premisas que garantizan el éxito de las propuestas.

La propuesta del modelo de simulación se fundamenta en que los métodos de micro generación basados en energía alternativa pueden ser simulados a partir de la obtención de datos de campo que permitan la cuantificación de los parámetros asociados a la micro generación, esta propuesta parte del hecho de los valores estimados serán similares y el modelo se ajusta a los valores esperados a obtener en la realidad.

La propuesta se fundamenta además de que el uso de modelos de simulación caso del Matlab-Simulink, los cuales han sido validados previamente en otras zonas con condiciones similares a la del Ecuador, obteniendo resultados satisfactorios, lo que permitirá hacer estimaciones precisas de los valores de micro generación en la zona.

Para correr el modelo se parte de que existe una base de datos completa, durante un periodo de tiempo, que requerirá evaluar la calidad de los datos para reducir el margen de error cuando se aplique el modelo matemático.

Por último, se cuenta con los software y equipos de computación con la suficiente potencia que permita correr los modelos de manera rápida y manejar una suficiente cantidad de datos para la generación que facilite la toma de decisiones, para

seleccionar los sistemas energéticos de micro generación, que son de menor costos y ambiente altamente factibles para la población.

Previo a la propuesta del modelo de simulaciones es necesario justificar desde el punto de vista social, ambiental y económica por qué en el Sector de Zumbahua, Cantón de Cotopaxi se deben implementar sistemas alternativos de micro generación eléctricas, en este sentido la propuesta abarca 3 componentes como se observa en la figura 25.

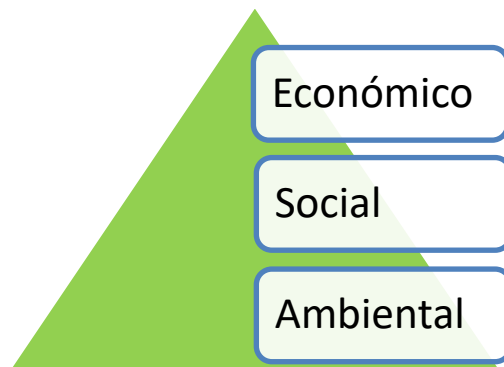


Figura 25. Basamentos filosóficos para la fundamentación de la propuesta.

En el ámbito social y económico, se debe destacar que, la mayoría de la población en el Sector de Zumbahua, Cantón se encuentra en situación de pobreza y los gastos de generación eléctrica, constituyen un componente importante del presupuesto familiar, en segundo lugar, en el ámbito ambiental, porque la zona se encuentra en un área ambiental sensible donde las fuentes de energía tradicional, constituyen un riesgo del impacto ambiental severos para los ecosistemas de la zona. Una vez evaluado el contexto de la propuesta se debe establecer el porqué de los factores ambientales hacen factible en la zona el desarrollo de los sistemas de la micro generación de energía usando las fuentes de energía no convencionales.

2.4. Energía Solar Fotovoltaica.

Varias importantes magnitudes: irradiancia espectral, irradiancia y radiación son definidas a continuación [66]:

- a. **Irradiancia espectral I_λ** .- Potencia recibida por unidad de área superficial en un diferencial de longitud de onda $d\lambda$, las unidades son $W/m^2\mu m$.
- b. **Irradiancia.** - La integral de la irradiancia espectral extendida a lo largo de la todas las longitudes de onda de interés. Las unidades son W/m^2 .
- c. **Radiación.** - Es la integral de la irradiación extendida sobre un período dado de tiempo, por consiguiente, las unidades de radiación son unidades de energía. Es común encontrar datos de radiación en J/m^2 -day, si un día es usado como período de integración, o más frecuentemente la energía está dada en kWh/m^2 -day, kWh/m^2 -mes ó kWh/m^2 -año dependiendo del tiempo usado para la integración de la irradiancia.

La radiación del Sol puede también aproximarse a la radiación de un cuerpo negro a 5,900 K. La Ley de Planck da el valor de la emisividad espectral E_λ , definido como la potencia radiada por unidad de área y por unidad de longitud de onda, como la Ecuación (1): [67]

$$E_\lambda = \frac{2\pi h C_o^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc_o}{\lambda k T}} - 1 \right)} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$), y:

$$2\pi h C_o^2 = 3,74 \times 10^{-16} \quad W \ m^2 \quad (2)$$

$$\frac{hc_o}{k} = 0,0143 \quad m \ K \quad (3)$$

Son la primera (2) y segunda (3) constante de radiación de Planck.

El total de la energía radiada por unidad de área de un cuerpo negro para todos los valores de longitudes de onda está dado por la Ecuación (4):

$$\int_0^\infty E_\lambda \ d\lambda = \sigma T^4 = 5,66 \times 10^{-8} \ T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

con la temperatura T en grados Kelvin.

Asumiendo que el cuerpo negro irradia isotrópicamente, la irradiancia espectral que se recibe desde el sol a una unidad astronómica de distancia (1 AU) puede ser descrito por la Ecuación (5):

$$I_{\lambda} = E_{\lambda} \frac{S}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda} \quad (5)$$

donde S es la constante solar.

Finalmente, I_{λ} puede escrito mediante la Ecuación (6) [67];

$$I_{\lambda} = \frac{8,925 \times 10^{-12}}{\lambda^5 \left[e^{\frac{0.0143}{\lambda T}} - 1 \right] T^4} \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right] \quad (6)$$

El nombre dado a estos espectros del Sol estándar viene de Air Mass (AM) y de un número el cual es 0 para el espectro fuera de la atmósfera terrestre y 1.5 para el espectro a nivel de piso. En general, se puede definir un espectro AM x con x dado por la Ecuación (7):

$$x = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (7)$$

donde θ_z es el ángulo zenith del Sol.

Cuando el Sol está localizado en el zenith del área receptora ($x = 1$), lo que genera que un espectro AM1 sea el espectro recibido a nivel de piso en un día claro con el Sol en el zenith. Pero es generalmente aceptado un espectro terrestre más realista para uso general y de referencia, el cual proviene de un ángulo zenith de 48.19 (el cual es equivalente a $x = 1,5$). El espectro recibido por una superficie inclinada 37° y de cara al Sol es llamado un espectro (global-tilt) y el valor de sus datos, son comúnmente usados en ingeniería PV [66].

La total irradiancia recibida por metro cuadrado de una superficie normal a los rayos del Sol fuera de la atmósfera a una distancia igual a una unidad astronómica es

llamada la Constante Solar S y su valor es la integral de la irradiancia espectral del AM0.

Las células solares son hechas de un material semiconductor donde los siguientes principales fenómenos ocurren, cuando es expuesta a la luz: reflexión de fotones, absorción de fotones, generación de portadores libres de carga en el semiconductor, migración de la carga y finalmente separación de cargas por medio de un campo eléctrico. Las principales propiedades del semiconductor condicionan como efectivamente este proceso es realizado en una célula solar fotovoltaica. Entre las propiedades más importantes tenemos:

- El coeficiente de absorción α , el cual depende del valor de la banda prohibida del semiconductor y la naturaleza (directa o indirecta) de la banda prohibida.
- Reflectancia de la superficie del semiconductor, el cual depende del acabado de la superficie.

El coeficiente de absorción α depende del material del semiconductor usado y su valor es ampliamente disponible y tiene una enorme importancia en el diseño de células solares debido a que los fotones son absorbidos de acuerdo a la Ley de Lambert's (ver la Ecuación (8)): [67].

$$\phi(x) = \phi(0)e^{-\alpha x} \quad (8)$$

Si el valor de α es alto, los fotones son absorbidos en una corta distancia desde la superficie, mientras si el valor de α es pequeño, los fotones pueden viajar mayores distancias dentro del material. En el caso extremo donde el valor de α es cero, los fotones pueden atravesar el material, en este caso se dice que el material es transparente en una particular longitud de onda [67].

Para mejorar este confinamiento de fotones y la mayor eficiencia posible de las células solares, se ha recurrido a nuevos materiales y/o métodos de confinamiento que permiten lograr longitudes de trayectoria cada vez más optimizadas en costo, tiempo de producción y eficiencia.

Una célula solar tiene una curva característica de densidad de corriente vs voltaje, y está determinada por la Ecuación (9), en la que se escribe a la célula solar por la superposición de la respuesta del dispositivo a dos excitaciones: voltaje y luz.

$$J = J_{SC} - J_o \left(e^{\frac{v}{v_T}} - 1 \right) \quad (9)$$

en donde: J_{SC} es la densidad de corriente espectral de cortocircuito en A/cm^2 , J_o es conocido como densidad de corriente de saturación en A/cm^2 , v es el voltaje en los electrodos de la célula solar y v_T es el voltaje térmico de la célula solar, definido según la Ecuación (10):

$$v_T = \frac{kT}{q} \quad (10)$$

donde k es la constante de Boltzmann, q es la carga eléctrica del electrón y T es la temperatura absoluta de la célula solar; en donde, luego de reemplazar los valores de las constantes y de expresar la temperatura en grados Celsius queda expresada en la Ecuación (11):

$$v_T = 0,081615(t + 273,18) \text{ [mV]} \quad (11)$$

donde:

t : Es la temperatura en grados Celsius.

v_T : Está dado en milivoltios.

Según [80] para una célula solar con línea de base de silicio se tiene que $J_o = 1 \times 10^{-12} A/cm^2$ y $J_{SC} = 31,188 \times 10^{-3} A/cm^2$, de lo cual resulta la curva característica de V-J.

En la Ecuación (12), el valor de la corriente generada por la célula solar está dada por:

$$I = I_{SC} - I_o \left(e^{\frac{v}{v_T}} - 1 \right) \quad (12)$$

donde I_{SC} y I_o se relacionan con sus respectivas densidades de corriente J_{SC} y J_o como sigue, ver Ecuación (13) y (14):

$$I_{SC} = A J_{SC} \quad (13)$$

$$I_o = A J_o \quad (14)$$

La potencia de salida de una célula solar es el producto de la corriente de salida que fluye hacia la carga eléctrica y el voltaje generado entre los extremos de la célula. Es generalmente considerado que un signo positivo indica que potencia va hacia la carga y un signo negativo indica que la potencia viene del usuario y pasa a través de la célula solar.

En la Ecuación (15) teniendo en cuenta estas definiciones de signo, la potencia para cualquier punto de la curva característica está dada por: [67]

$$P = V \times I = V \left[I_L - I_o \left(e^{\frac{v}{v_r}} - 1 \right) \right] \quad (15)$$

El modelo lineal basado en la irradiación solar y la temperatura de la célula es también adoptado en este estudio. La temperatura del medio ambiente es usada como una referencia para la temperatura del panel. La generación de potencia de la célula fotovoltaica puede ser usando la Ecuación (16).

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 - k (T_c - T_r)] \quad (16)$$

donde:

P_{PV} : Es la potencia generada por el panel solar fotovoltaico.

P_{STC} : Es la potencia nominal del panel solar fotovoltaico en condiciones de prueba estándar.

G_{ING} : Es la irradiancia solar instantánea.

G_{STC} : Es la irradiancia solar en condiciones de prueba estándar.

k : Es el coeficiente de temperatura del Si con que se fabrica la célula fotovoltaica.

T_r : Es la temperatura referencial de la célula.

T_c : Es la temperatura de la célula en condiciones de prueba estándar [68].

2.5. Energía Eólica.

2.5.1. Definición energía eólica.

La energía eólica, es una fuente de energía renovable y limpia. En los últimos años, muchos sistemas de generación de turbinas eólicas (WTGS) se han instalado en muchos países desde el punto de vista del calentamiento global y del agotamiento de los combustibles fósiles. Además, WTGS es de bajo costo en comparación con otros sistemas de generación que utilizan energías renovables.

Sin embargo, la energía eléctrica obtenida de los aerogeneradores (WG) no es constante debido a las variaciones que existe en la velocidad del viento. La energía eléctrica generada y la pérdida en WTGS cambian correspondiente a las variaciones de la velocidad del viento y, en consecuencia, la eficiencia y el factor de capacidad del sistema también cambian. Además, la característica de viento de cada área es diferente y, por lo tanto, el aerogenerador óptimo para cada área es diferente.

La actual potencia mecánica de salida puede ser escrito como [76], ver la Ecuación (17):

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (17)$$

donde:

R : Es el radio del aspa de la turbina de viento (m)

V : Es la velocidad del viento (m/s)

ρ : Es la densidad del aire (kg/m^3)

C_p : Coeficiente de limite aprovechable (% expresado en decimal)

La potencia contenida en el viento es proporcional a la densidad del aire ρ , el área interceptada A y la velocidad del aire a la tercera potencia [69].

La densidad del aire es una función de la presión del aire y la temperatura del aire, los cuales ambos son funciones de la altura sobre el nivel del mar definido mediante la Ecuación (18):

$$\rho(z) = \frac{p_0}{RT} \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad (18)$$

donde:

$\rho(z)$: Es la densidad de aire como una función de la altitud (kg/m^3).

p_0 : Es la presión atmosférica estándar a nivel del mar (101,325 kPa).

R : Es la constante específica del gas para el aire ($287,05 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$).

g : Es la gravedad constante ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$).

T : Es la temperatura (K).

z : Es la altitud sobre el nivel del mar (m) [70].

2.5.2. Recursos eólicos y sus características.

El conocimiento de las características del viento en un sitio en particular es relevante por los siguientes temas:

- **Diseño de sistemas:** El diseño de sistemas requiere conocimiento del viento promedio representativo condiciones, así como información sobre la naturaleza turbulenta del viento y el viento extremo eventos. Esta información se utiliza en el diseño y selección de una turbina eólica destinada a un sitio en particular.
- **Evaluación del desempeño:** La evaluación del desempeño requiere determinar la productividad energética y rentabilidad de un sistema de energía eólica en particular basado en el recurso eólico.
- **Ubicación:** Los requisitos de ubicación pueden incluir la evaluación o predicción de la conveniencia de emplazamientos candidatos para una o más turbinas eólicas.
- **Operaciones:** Los requisitos de operación incluyen la necesidad de información sobre el recurso eólico que se puede utilizar para la gestión de carga, procedimientos operativos (como arranque y apagado), y la predicción del mantenimiento o la vida útil del sistema.

2.5.3. Mecanismos del movimiento del viento.

En uno de los más simples modelos para los mecanismos de movimiento del viento en la atmósfera, cuatro fuerzas atmosféricas son consideradas:

- Fuerzas de presión.
- La fuerza de Coriolis causada por la rotación de la tierra.
- Fuerzas inerciales debido al movimiento circular a gran escala, y;
- Fuerzas de fricción con la superficie de la tierra.

En la figura 26 se observa el patrón mundial de vientos superficiales.

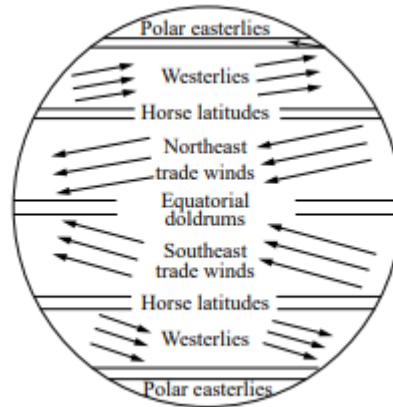


Figura 26. Patrón mundial de vientos superficiales

[71]

La fuerza de la presión sobre el aire F_p está dada por la Ecuación (19) :

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (19)$$

donde:

ρ : Es la densidad del aire.

n : Es la dirección normal a las líneas de presión constante.

La fuerza de Coriolis (por unidad de masa) F_c , es una fuerza de fricción causada por mediciones con respecto a un marco de referencia en rotación (la Tierra). Ver la Ecuación (20) y hallando f en Ecuación (21):

$$F_c = fU \quad (20)$$

$$f = 2\omega \text{sen}(\phi) \quad (21)$$

donde:

U : Velocidad del viento.

f : Parámetro de Coriolis.

ϕ : Es la latitud.

ω : Es la rotación angular de la Tierra.

- La magnitud de la F_c , depende de la velocidad del viento y de la latitud.
- La dirección de la fuerza de Coriolis es perpendicular a la dirección del movimiento del aire.

La resultante de estas dos fuerzas es llamada: viento geostrófico U_g (figura 27), tiene a ser paralelo a las isóbaras.

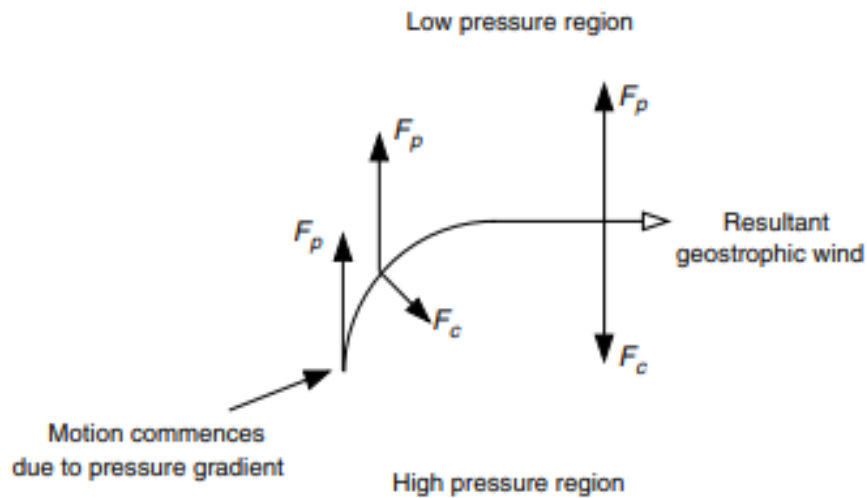


Figura 27. Viento geostrófico: F_p es la fuerza de presión en el aire; F_c es la fuerza de Coriolis.

[71]

La magnitud del viento geostrófico U_g es una función del balance de fuerzas, ver Ecuación (22):

$$U_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (22)$$

Y que imponen una nueva fuerza sobre el viento: una fuerza centrífuga y el viento resultante se llama: viento gradiente U_{gr} (figura 28), el cual es paralelo a las isóbaras y es el resultado del balance de fuerzas.

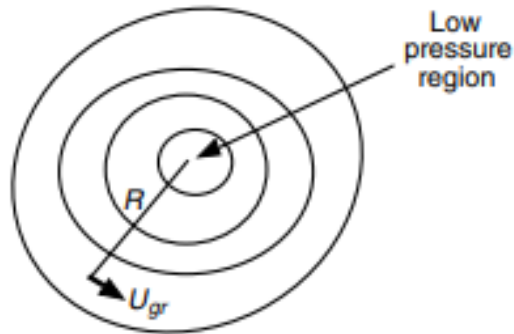


Figura 28. Gradiente de viento U_{gr} ; R, radio de curvatura

[71].

2.5.4. Otros patrones de circulación atmosférica.

a) Circulación secundarias ocurre si los centros de alta o baja presión.

Son causados por calentamiento o enfriamiento de la atmósfera baja e incluyen:

1. Huracanes.
2. Circulación de monzones.
3. Ciclos extra tropicales.

b) Circulación terciaria son de pequeña escala: Son circulaciones locales caracterizadas por vientos locales:

1. Brisas terrestres y marinas.
2. Vientos de valles y montañas.
3. Tormentas eléctricas.
4. Tornados.
5. Vientos Foehn (vientos de alta temperatura y secos luego de pasar un macizo montañoso).

2.5.5. Variaciones en el tiempo del viento.

- a) Interanual.
- b) Anual.
- c) Diario.

d) Corto tiempo (ráfagas y turbulencias).

Las variaciones interanuales pueden tener un gran efecto sobre la producción de aerogeneradores a largo plazo. La habilidad para estimar la variabilidad interanual en un sitio dado es tan importante como estimar el viento medio a largo plazo en el sitio.

Los meteorólogos generalmente concluyen que es necesario 30 años de datos para determinar valores a largo plazo del clima. Y datos de 5 años para llegar a una velocidad de viento anual promedio fiable en una ubicación dada. Tanto en latitudes templadas o tropicales, grandes variaciones de viento pueden ocurrir durante el día o en escala de tiempo diario esto se debe al diferencial calentamiento de la superficie de la Tierra durante el ciclo de radiación diaria y los más grandes cambios diurnos ocurren en primavera y en verano.

Las variaciones de corto plazo generalmente significan variaciones en intervalos de tiempo de 10 minutos o menos. Los promedios de 10 minutos se determinan típicamente usando una frecuencia de muestreo de aproximadamente 1 segundo.

La turbulencia se puede considerar como fluctuaciones aleatorias de la velocidad del viento, impuestas sobre la velocidad media del viento y ocurren en las tres direcciones: longitudinal (en dirección del viento), lateral (perpendicular al viento promedio) y vertical.

Una ráfaga es un evento discreto dentro de un cambio de viento turbulento (figura 29). Una forma de caracterizar es determinar:

- a) La amplitud.
- b) El tiempo de subida.
- c) Variación máxima de la ráfaga, y;
- d) El tiempo de lapso (lapse time).

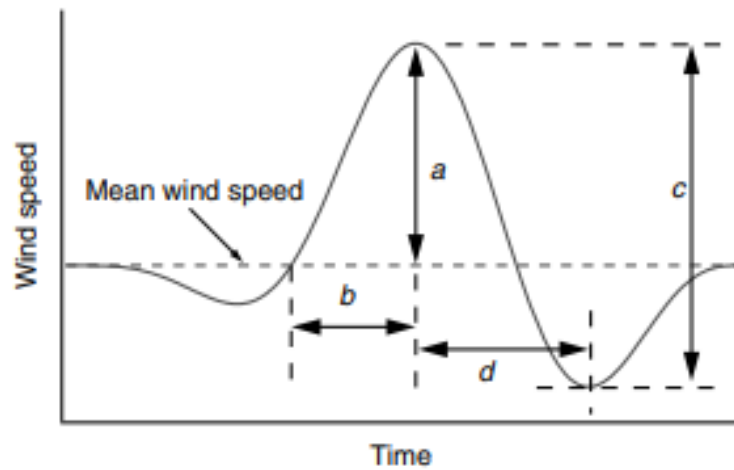


Figura 29. Evento de ráfaga discreta; a, amplitud; b, tiempo de subida; c, variación máxima de la ráfaga; lapso de tiempo d

[71].

El flujo de masa de aire dm/dt a través de un disco rotor de área A es figura 30 y ver Ecuación (23):

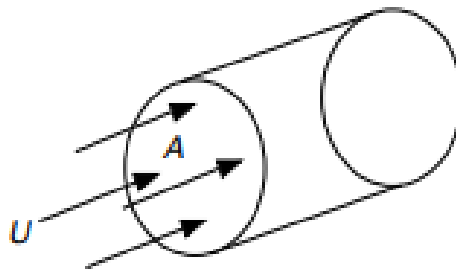


Figura 30. Flujo de aire a través de un disco de rotor; A es el área; U es la velocidad del viento

[71].

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (23)$$

La energía cinética por unidad de tiempo o potencia del flujo se define según la Ecuación (24) [71]:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (24)$$

La potencia del viento por unidad de área o densidad de potencia del viento está representada en Ecuación (25):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (25)$$

La densidad de la energía eólica ρ es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándar (nivel del mar y 15 °C) la densidad del aire es 1,225 kg/m³.

A continuación, se da una tabla de la potencia por unidad de área con viento estable (Ver Tabla 3). Hay que considerar que, de esta potencia disponible, la turbina capta sólo un porcentaje.

Tabla 3. Potencia por unidad de área disponible de viento constante (densidad de aire: 1,225 kg/m³)

m/s	W/m ²
0	0
5	80
10	610
15	2,070
20	4,900
25	9,560
30	16,550

La densidad de potencia puede cuidadosamente estimarse, sus promedios horarios U_i están disponibles para un año, entonces la densidad de potencia de viento promedio \bar{P} es la Ecuación (26) [78]:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 k_e \quad (26)$$

donde:

\bar{U} : Es la velocidad del viento promedio anual.

k_e : Es el factor de patrón de energía.

$$k_e = \frac{1}{N\bar{U}^3} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (27)$$

donde N es el número de horas en un año (son 8760 horas en un año). Ver Ecuación (27).

Una valoración cualitativa del viento es:

$$\begin{aligned} \bar{P}/A < 100 \text{ W/m}^2 &\rightarrow \text{Baja} \\ \bar{P}/A \approx 400 \text{ W/m}^2 &\rightarrow \text{Buena} \\ \bar{P}/A > 700 \text{ W/m}^2 &\rightarrow \text{Grande} \end{aligned}$$

2.5.6. Estimación del recurso viento.

Entre los diferentes tipos de potencial de energía eólica que se puede estimar a nivel local, regional o mundial. Lo clasificamos en cinco categorías [71]:

- a. **Potencial meteorológico:** Es equivalente al recurso eólico disponible.
- b. **Potencial del sitio:** Esto se basa sobre el potencial meteorológico, pero está restringido a aquellos sitios que son geográficamente disponibles para la producción (generación) de potencia.
- c. **Potencial técnico:** Es calculado desde el potencial del sitio tomando en cuenta la tecnología disponible.
- d. **Potencial económico:** Es el potencial técnico que se puede realizar económicamente.
- e. **Potencial de implementación:** Tiene en cuenta las restricciones e incentivos para evaluar la capacidad en turbinas eólicas que se puede implementar dentro de un cierto tiempo.

2.5.7. Características de la capa límite atmosférica.

- a. Conocida también como capa límite planetaria. Es la parte más baja de la atmósfera y sus características son directamente influenciadas por el contacto con la superficie de la tierra [71].
- b. Cantidades físicas tales como la velocidad, temperatura y humedad relativa pueden cambiar rápidamente en espacio y tiempo.

Perfil vertical de la velocidad del viento: Es la variación de la velocidad del viento con la altura (desde cero a nivel del suelo). Éste es un importante parámetro de diseño porque:

1. Determina directamente la productividad de una turbina de viento sobre una torre de cierta altura.
2. Puede influir fuertemente en la vida útil de un álabe (pala) de rotor de turbina.
- c. Densidad y presión atmosférica.

En la fuerza del viento es función de la densidad del aire ρ , esta en función de la temperatura, T , y la presión p , las cuales varían con la altura. La densidad del aire seco se puede determinar aplicando la ley de los gases ideales, que se puede expresar como Ecuación (28) [71].

$$\rho = \frac{p}{RT} = 3,4837 \frac{p}{T} \quad (28)$$

donde:

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

p : Presión en kPa (kN/m^2).

T : Temperatura (K).

La atmósfera estándar internacional asume que la temperatura y la presión al nivel del mar son 288,15 K y 101,325 kPa, lo que da como resultado una densidad estándar al nivel del mar de $1,225 \text{ kg/m}^3$. La presión del aire disminuye con la elevación sobre el nivel del mar. La presión en la atmósfera estándar internacional hasta una elevación de 5 000 m es aproximada por la Ecuación (29).

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

donde:

p : Es la presión atmosférica en kPa (kN/m^2).

z : Es elevación en m.

La tasa de caída (d), de la atmósfera se define generalmente como la tasa de cambio de temperatura con altura. Como se mostrará en el siguiente análisis, es más fácil

determinar la tasa de lapso calculando el cambio de presión con la altura y usando relaciones de termodinámica convencional. Si la atmósfera se aproxima a seca (no hay vapor de agua en la mezcla) gas ideal, la relación entre un cambio en la presión y un cambio en la elevación de un fluido en un campo gravitacional viene dado por la Ecuación (30):

$$dp = -\rho g dz \quad (30)$$

donde:

p : Es la presión atmosférica en kPa (kN/m²).

z : Es elevación sobre el suelo en m.

ρ : Es densidad del aire.

g : Es la aceleración gravitacional local (aquí se asume constante).

El signo negativo resulta de la convención de que la altura, z , se mide positivamente hacia arriba, y que la presión, p , disminuye en la dirección z positiva. La primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado de gas ideal de masa unitaria que experimenta el cambio de estado cuasi-estático viene dado por la Ecuación (31):

$$dq = du + pdv = dh - vdp = c_p dT - \frac{1}{\rho} d\rho \quad (31)$$

donde

T : Es temperatura.

q : Es calor transferido.

u : Es energía interna.

h : Es entalpía.

v : Es volumen específico.

c_p : Es calor específico de presión constante.

Para un proceso adiabático (sin transferencia de calor) $dq = 0$, y la Ecuación (32) se convierte en:

$$c_p dT = \frac{1}{\rho} d\rho \quad (32)$$

La sustitución de $d\rho$ en la Ecuación (30) y el reordenamiento da la Ecuación (33):

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Adiabático}} = g \frac{1}{c_p} \quad (33)$$

Si se supone que los cambios en g y c_p con la elevación son insignificantes, entonces el cambio en la temperatura, en condiciones adiabáticas, es una constante.

Utilizando $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ y $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ rinde Ecuación (34):

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Adiabático}} = - \frac{0,0098^\circ\text{C}}{\text{m}} \quad (34)$$

Por lo tanto, la tasa a la que la temperatura disminuye con un aumento en la altura para un sistema sin calor la transferencia es de aproximadamente 1°C por 100 m y se conoce como la tasa de caída adiabática seca. Usando convencional nomenclatura, la tasa de caída, Γ , se define como el negativo del gradiente de temperatura en la atmósfera. Por lo tanto, la tasa de lapso adiabático seco está dada por la Ecuación (35):

$$\Gamma = - \left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Adiabático}} \approx \frac{1^\circ\text{C}}{100 \text{ m}} \quad (35)$$

La tasa de lapso adiabático seco es extremadamente importante en los estudios meteorológicos ya que la comparación de su valor con la tasa de caída real en la atmósfera inferior es una medida de la estabilidad de la atmósfera. Para fines comparativos, la tasa de caída atmosférica estándar internacional, basada en datos meteorológicos, ha sido definida y adoptada. Específicamente, en promedio, en el medio latitudes, la temperatura disminuye linealmente con la elevación hasta unos $10\,000 \text{ m}$ (para la definición propósitos $10,8 \text{ km}$). La temperatura promedio 288 K al nivel del mar y disminuye a $216,7 \text{ K}$ a $10,8 \text{ km}$, dando el gradiente de temperatura estándar en la Ecuación (36).

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Estándar}} = \frac{(216,7 - 288)^\circ\text{C}}{10\,800 \text{ m}} = - \frac{0,0066^\circ\text{C}}{\text{m}} \quad (36)$$

Por lo tanto, la tasa de caída estándar, basada en la convención internacional, es de $0,66\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$. Los diferentes gradientes de temperatura crean diferentes estados de estabilidad en la atmósfera. La figura 31 ilustra que los perfiles de temperatura cambian de día a noche debido al calentamiento de la superficie de la tierra. El perfil de temperatura antes del amanecer (la línea continua) disminuye con aumento de la altura cerca del suelo y se invierte después del amanecer (línea discontinua). El aire se calienta cerca el suelo, y el gradiente de temperatura cerca de la superficie de la tierra aumenta con la altura, hasta altura Z_i (llamada altura de inversión). La capa superficial de aire que se extiende hasta Z_i se llama capa convectiva o de mezcla. Por encima de Z_i , el perfil de temperatura se invierte. El concepto de estabilidad atmosférica se ilustra considerando el desplazamiento hacia arriba de un pequeño elemento de aire a una altitud con una presión ambiental más baja. Suponga la tasa estándar de $0,66\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$. El pequeño elemento de aire que se eleva en este ejemplo se enfriará al secarse.

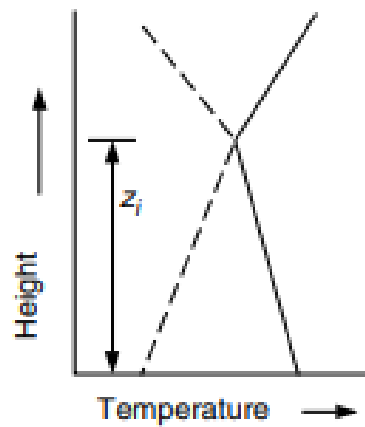


Figura 31. Perfil de temperatura sobre la superficie terrestre, antes (sólido) y después (discontinuo) del amanecer

[71]

Tasa de lapso adiabático ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 100 m). Si el elemento de prueba de aire tuviera la misma temperatura que el aire circundante al principio, luego, después de haber sido elevado 100 m , se habría enfriado más rápido que el aire circundante y sería $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ más frío que su entorno. La muestra sería más densa y tendería a volver a su nivel original. Este estado atmosférico se llama estable. Para generalizar, cualquier atmósfera cuyo dT/dz sea mayor que $(dT/dz)_{\text{Adiabático}}$ es estable. Cabe

señalar que la tasa de caída internacional estándar rara vez ocurre en la naturaleza. Esto explica la necesidad de realizar sondeos diarios de globos en los principales aeropuertos del mundo para determinar la tasa de lapso real. Además, para tener estabilidad, no es necesario realizar una inversión (aumentar de temperatura con altura) para existir. Cuando uno existe, sin embargo, la atmósfera es más estable.

d. Perfil vertical.

1. Perfil logarítmico:

La Ecuación (37) se conoce como perfil de viento logarítmico.

$$V_{(z)} = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (37)$$

La Ecuación (38) se conoce como la velocidad de fricción.

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (38)$$

donde:

V_z : Velocidad del viento en m/s a estimar en la altura z , y en condiciones de estabilidad neutral

z_o : Longitud de rugosidad (m) de superficie.

τ_o : Valor superficial del esfuerzo de corte.

ρ : Es la densidad.

U^* : Velocidad de fricción, altos valores indican alta turbulencia

k : Es la constante de Von Karman (con valor 0,4).

2. Perfil con ley de potencias:

La ley de potencia representa un modelo simple para el perfil de velocidad del viento vertical. Su forma básica es la Ecuación (39):

$$\frac{U_{(z)}}{U_{(z_r)}} = \left[\frac{z}{z_r} \right]^\alpha \quad (39)$$

donde:

$U_{(z)}$: Velocidad del viento a la altura z .

$U_{(z_r)}$: Velocidad del viento referencial a la altura z_r .

α : Exponente de la ley de potencia.

Algunos de los métodos empíricos más populares para determinar el exponente de la ley de potencias son:

a) **Correlación para el exponente de la ley de potencia como función de la velocidad y la altura.**

Justus (1978) propuso una forma de manejar este tipo de variación. Su expresión tiene la forma en la Ecuación (40).

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln(U_{ref})}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{Z_{ref}}{10}\right)} \quad (40)$$

donde:

U_{ref} [m/s]: Es velocidad de viento referencial.

Z_{ref} [m] : Es rugosidad de superficie referencial.

b) **Correlación dependiente de la rugosidad de la superficie.**

Counihan (1975) propuso la siguiente forma, ver Ecuación (41) para este tipo de correlación [78]:

$$\alpha = 0,096 \log_{10} Z_0 + 0,016(\log_{10} Z_0)^2 + 0,24 \quad (41)$$

Para $0,001 \text{ m} < Z_0 < 10 \text{ m}$, donde Z_0 representa la rugosidad superficial.

2.5.8. Métodos directos de los análisis de datos, caracterización del recurso y productividad de turbina- Uso directo de datos.

Si se tiene una serie de N observaciones de velocidad de viento U_i que es el promedio sobre un intervalo de tiempo Δt . Se puede calcular los siguientes parámetros:

La velocidad media del viento a largo plazo \bar{U} sobre el periodo total de datos recolectados, en Ecuación (42).

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (42)$$

La desviación estándar de la velocidad de viento promedio individual en Ecuación (43)

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} \quad (43)$$

La densidad de potencia de viento promedio \bar{P}/A dado por unidad de área en Ecuación (44).

$$\frac{\bar{P}}{A} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (44)$$

Similarmente, la densidad de energía de viento por unidad de área para un periodo de tiempo de extensión $N\Delta t$ es la Ecuación (45) :

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3$$

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{\bar{P}}{A} (N\Delta t) \quad (45)$$

2.6. Metodología o procedimientos empleados.

Para la obtención y análisis de la información se ha realizado el siguiente procedimiento:

- a) Recolección de los datos de radiación solar y viento a partir de las fuentes disponibles en Internet.
- b) Recolección de datos de radiación solar in situ (medición de campo) durante un período de tiempo de dos meses, para lo cual se alquiló e instaló instrumentos de medición calibrados y certificados.
- c) Los datos recolectados se procesan mediante modelo matemático para energía solar y eólica, con lo cual se realizará simulaciones numéricas a fin de visualizar los resultados según disponibilidad de los energéticos primarios (recursos renovables) en el lugar de estudio.
- d) Con los resultados se propone una propuesta tecnológica.
- e) Aportes adicionales durante el desarrollo de la tesis se dan como Anexos, como lo es compartir los códigos desarrollados, el modelo matemático de distribución de la energía eléctrica.

Conclusiones

- Se desarrollaron las ecuaciones que conllevan a cuantificar la potencia provista por las diversas fuentes no convencionales de energía eléctrica (fotovoltaica, eólica y almacenamiento por baterías) y los costos asociados a cada tecnología.
- Se ha detallado el procedimiento de evaluación de los recursos energéticos solar y eólico usando datos recolectados en campo y/o datos dispuestos por parte de instituciones técnico-científicos.
- Se determinó un modelo de optimización lineal entero el cual consiste en minimizar la función objetivo de los costos de la energía para un futuro estudio de implementación de la micro generación distribuida, potencialmente bajo el concepto de microrred, siendo las variables de decisión el número de elementos tecnológicos a usar según las fuentes de energías disponible y teniendo en cuenta las restricciones dadas por el diseño. Este modelo permite, de manera óptima, diseñar y dimensionar una micro red híbrida la cual pueda satisfacer la carga demandada, el límite del costo de la energía y establecer restricciones para cada una de las fuentes de generación.

CAPÍTULO III.

PROPUESTA

3.1. Análisis de los resultados:

3.1.1. Recolección de datos

La estación meteorológica se instaló a 10m de altura [72], el punto referencial de Zumbahua considerado para el presente estudio está ubicado en la latitud - longitud: (-0.8716191240573181, -78.91734238525608), es estación cuenta con sensores de la temperatura, velocidad del viento, la humedad relativa, la pluviosidad y también de un sensor de radiación solar.

Los datos recolectados por la estación meteorológica, se lo realizo de noviembre 2020 a mayo 2021, tanto eólica como solar.



Figura 32. Estación meteorológica instalado en el punto referencial, Zumbahua.

3.1.2. Análisis de la energía eólica

En la siguiente tabla 4 se indica los datos recolectados por la estación meteorológica.

Tabla 4: Datos recolectados – eólico

Año	Mes	Día	Hora	Temp	V. Viento
2020	11	15	1	15,10	6,7
2020	11	15	2	15,30	7,4
2020	11	15	3	14,70	6,4

A continuación

2020	11	15	4	9,80	4,8
2020	11	15	5	9,80	5,8
....		
2021	3	15	20	13,80	4,7
2021	3	15	21	13,80	4,6
2021	3	15	22	13,80	4,7
2021	3	15	23	13,30	4,7
2021	3	15	24	13,20	4,5

Ingresando los datos en el modelo matemático (Anexo 5), de la energía eólica, tenemos las siguientes curvas.

En las siguientes figuras se tomará en cuenta que el eje x representa el valor de las horas al año, y en el eje y el valor de la velocidad del viento en m/s y la irradiación solar en kW/m^2 , respectivamente.

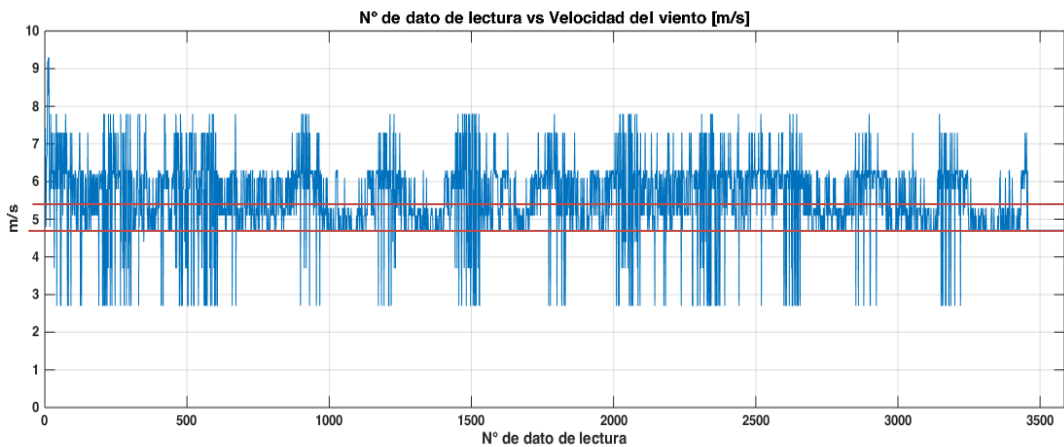


Figura 33. Registro de velocidad de viento recolectado directamente en campo por el Autor durante el período de mediciones.

En la figura 33, se tiene una velocidad casi constante entre 4,8 y 5,2 m/s , durante el periodo de medición.

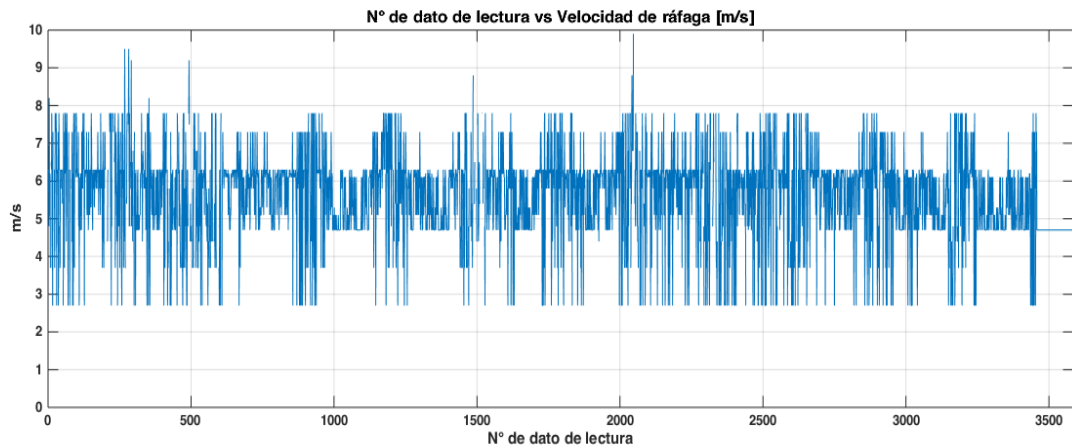


Figura 34. Registro de velocidad de ráfaga recolectado directamente en campo por el Autor durante el período de mediciones.

3.1.3. Análisis de la energía solar

En la siguiente tabla 5 se indica los datos recolectados por la estación meteorológica.

Tabla 5: Datos recolectados – solar

Año	Mes	Día	Hora	Temp	Solar
2020	11	15	1	13,70	183,00
2020	11	15	2	13,40	236,00
2020	11	15	3	13,30	294,00
2020	11	15	4	13,40	313,00
2020	11	15	5	13,50	329,00
....		
2021	3	15	20	11,40	117,00
2021	3	15	21	11,40	116,00
2021	3	15	22	11,50	115,00
2021	3	15	23	11,50	113,00
2021	3	15	24	11,60	109,00

Ingresando los datos en el modelo matemático (Anexo 5), de la energía solar, tenemos las siguientes curvas.

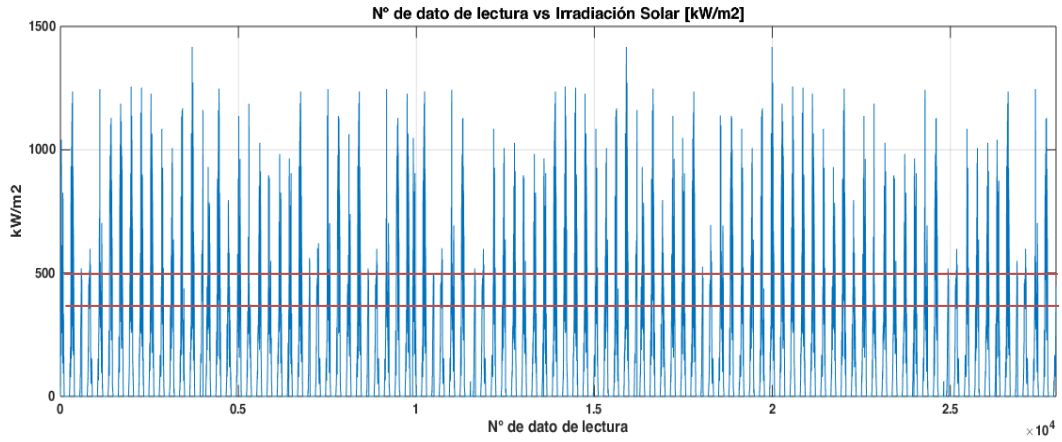


Figura 35. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor durante el período de mediciones.

En la figura 35, la irradiación solar constante se tiene entre los valores 400 y 500 kW/m².

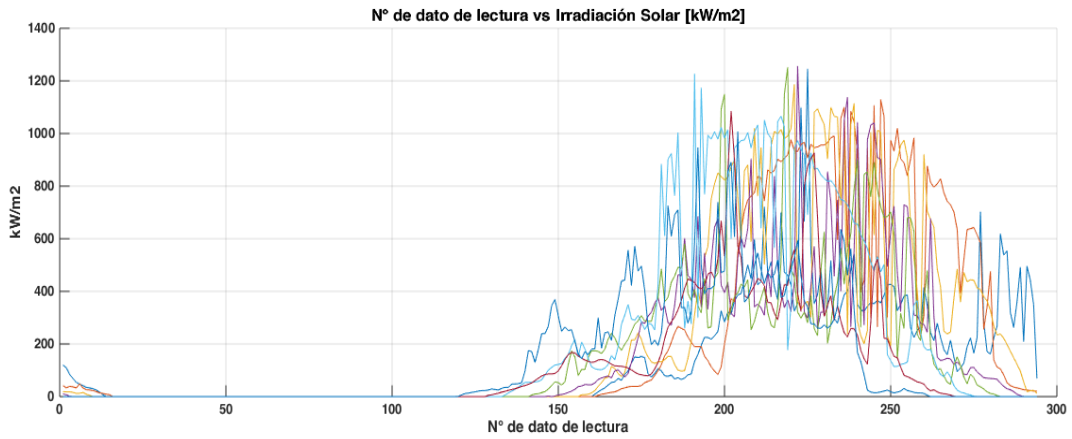


Figura 36. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 18/11/2020 16:55h hasta el 03/12/2020 20:55h.

En las figuras del 36 al 39 se muestra la irradiación solar en horas específicas durante el periodo de medición in situ, las fechas y horas se indica en el nombre de cada figura.

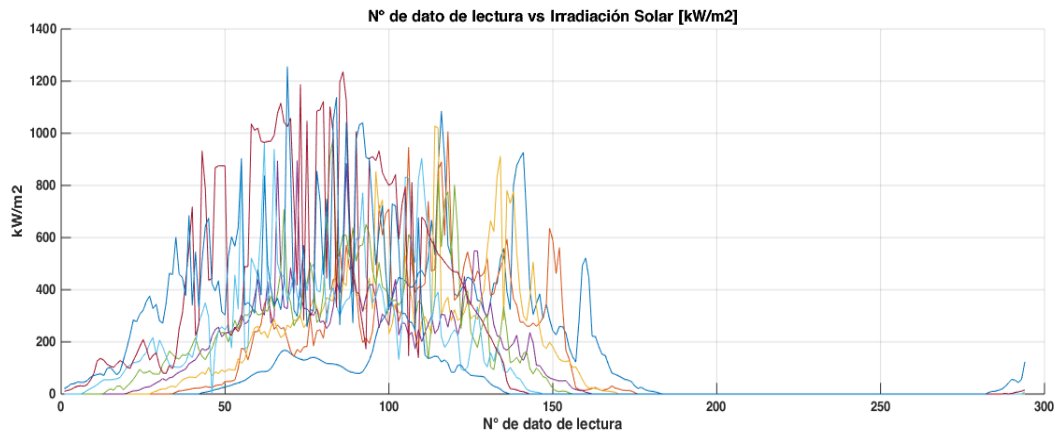


Figura 37. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 15/01/2021 02:50h hasta el 23/01/2021 07:20h.

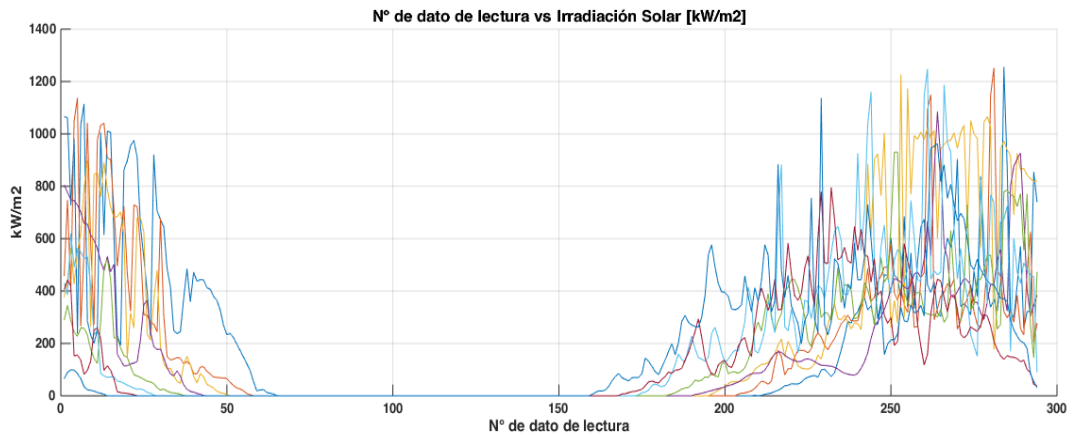


Figura 38. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 12/02/2021 12:40h hasta el 20/02/2021 17:40h.

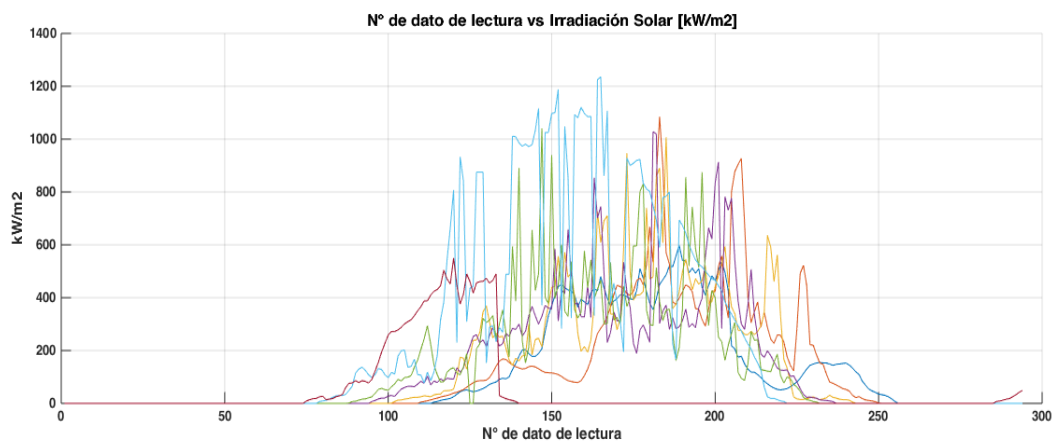


Figura 39. Registro de Irradiación solar recolectados directamente en campo por el Autor que corresponde desde el 28/02/2021 20:55h hasta el 07/03/2021 06:55h.

3.1.4. Recopilación de datos NASA

Consultado el Portal Web del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología sobre ubicación de estaciones meteorológicas cercanos al punto referencial de la zona de estudio se determina que existen tres (03) estaciones aledañas (ver Figura 40), pero la distancia entre éstas y el punto de referencia es mayor a 36 kilómetros (ver Figuras 41, 42 y 43), por lo tanto, la información no es válida para considerarla en la presente tesis.

Por lo antedicho, se han tomado en consideración dos fuentes de información: La primera es el POWER | Data Access Viewer - Prediction of Worldwide Energy Resource de NASA como fuente de información de las variables velocidad de viento a 10 m, dirección de viento de 10 m, temperatura a 2 metros, radiación solar (ver Figura 44), y; la segunda es mediciones de campo realizadas por el autor y un informe del mismo se muestra en el Anexo 4.

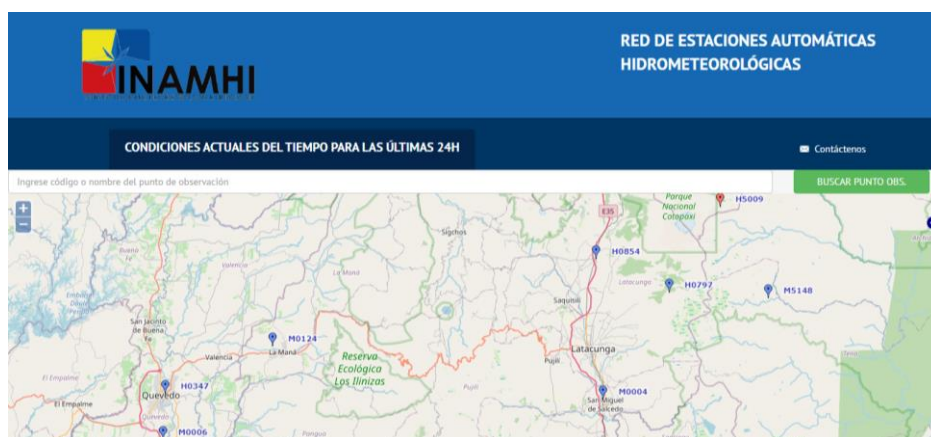


Figura 40. Ubicación de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio: San Juan La Mana, Salcedo y Cutuchi en Caspi. [73]

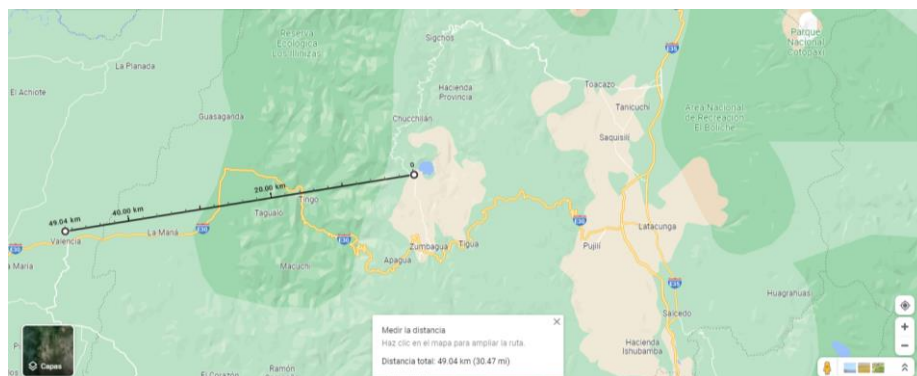


Figura 41. Distancia zona de estudio a Estación San Juan La Mana 49 km

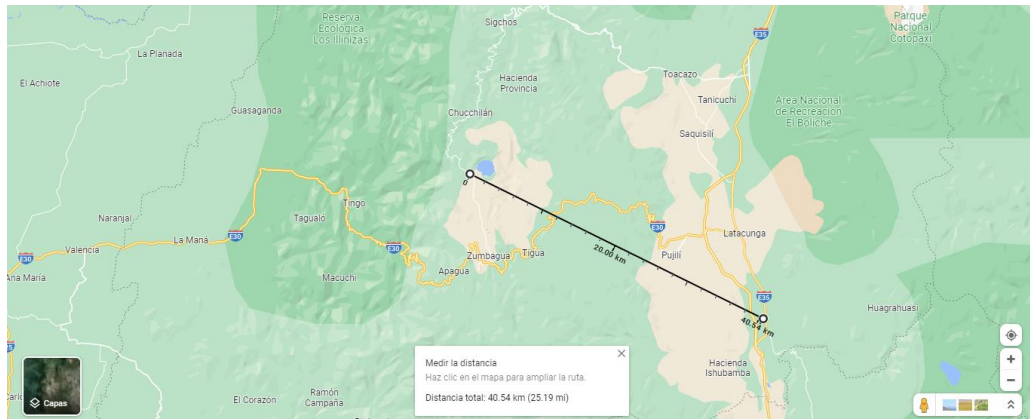


Figura 42. Distancia zona de estudio a Estación Salcedo 40.5 km

Fuente: Google Maps

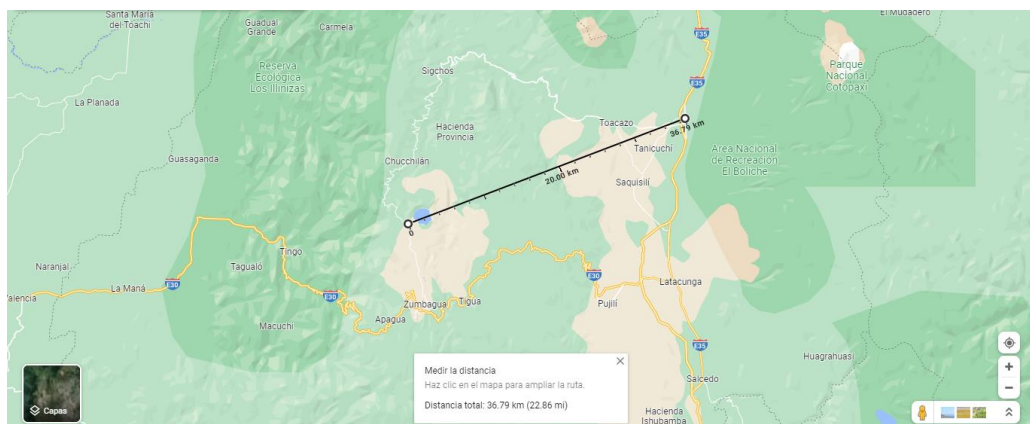


Figura 43. Distancia zona de estudio a Estación Cutuchi en Caspi 36.8 km

Fuente: Google Maps

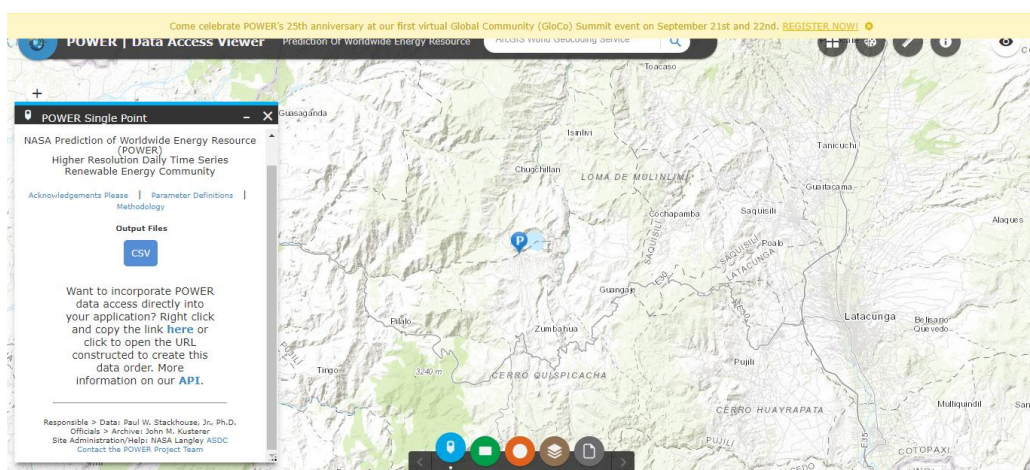


Figura 44. Captura de pantalla durante proceso de recopilación de datos en el Power Data Access Viewer de NASA.

3.2. Evaluación del recurso solar:

Se tiene varias fuentes de información sobre el recurso solar en la zona de estudio, por ejemplo, los valores de radiación que se producen la zona, como se presentan en el Tabla 6.

Tabla 6. Insolación promedio de la Provincia Cotopaxi ($\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3,73	3,98	4,05	3,88	3,74	3,47	3,71	3,97	3,98	3,77	3,88	3,79

Según la NASA se tiene que el período desde el 01 de enero del 2001 al 31 de diciembre del 2021, los valores de irradiación solar y de temperatura durante cada hora del período dado se muestran en las Figuras 45 y 46. Son 184 040 datos por cada variable.

En las siguientes figuras se tomará en cuenta que, el eje x representa los datos generados por hora durante los años 2001 - 2021, y en el eje y el valor de la irradiación solar en W/m^2 y la temperatura en $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

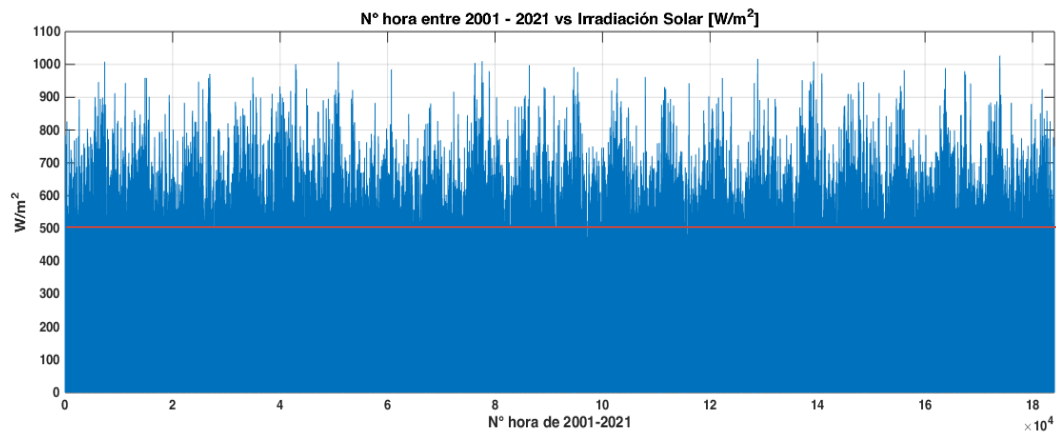


Figura 45. Radiación solar durante período de observación.

En la figura 45, se muestra todos los datos por hora generados durante los años 2001 y 2021 de la irradiación solar, que tiene como constante el valor de 500 W/m^2 .

A continuación, en la figura 46, se tiene una constante de temperatura entre 10°C y 15°C , generado durante el mismo periodo de medición entre los años 2001 y 2021

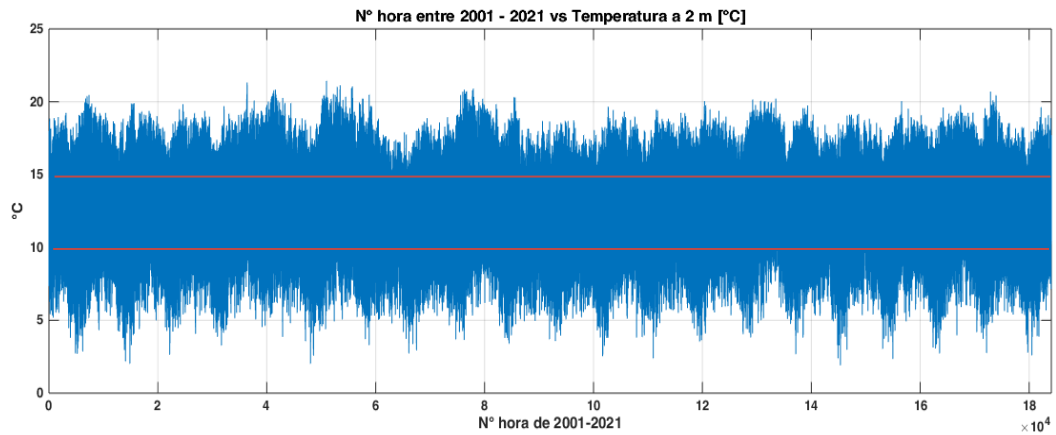


Figura 46. Temperatura ambiental medido a 2 metros sobre suelo durante período de observación.

Sin embargo, es útil observar el comportamiento anual para ver la repetitividad estacional que se puede observar en las variables de estudio.

En la figura 47 se muestra los valores superpuestos de todos los años, teniendo en el eje x, el valor de las horas cronológicas durante el año y en el eje y valor de la irradiación solar en kW/m², y temperatura en °C, respectivamente.

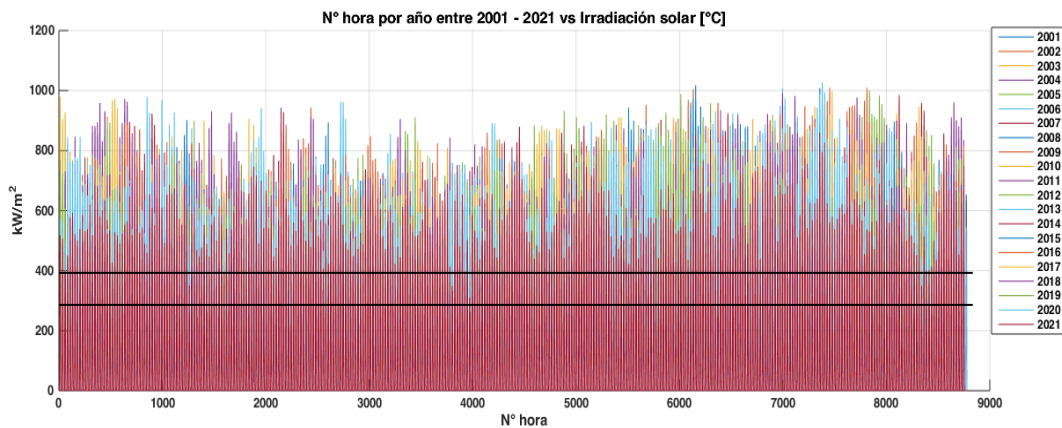


Figura 47. Gráfica de superposición de los valores de radiación solar por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021.

En la figura 47, se muestra los datos de superposición por hora generados durante el año, donde la irradiación solar tiene como valor casi constante entre 300 y 400 kW/m².

A continuación, en la figura 48, se tiene una superposición de valores de temperatura entre 10 °C y 14 °C, generado en todo el año de medición, durante los años 2001 al 2021.

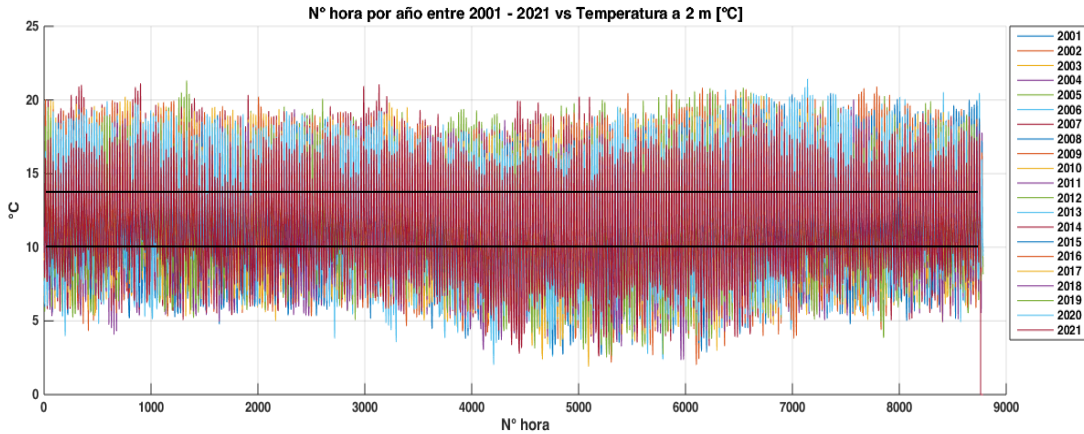


Figura 48. Gráfica de superposición de los valores de temperatura por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021.

Considerando las características del lugar de implementación se tiene la siguiente valoración energética del recurso solar (tabla 7):

Tabla 7. Características del Panel Solar

Parámetro	Especificación	Valor
P_{STC}	Potencia nominal	168 W/m ²
G_{STC}	Irradiación solar	1 000 W/m ²
T_r	Temperatura de la celda	25 °C
k	Coefficiente de temperatura del silicio	0,00441 /C

Se obtiene que la cantidad energía generada por metro cuadrado del panel solar fotovoltaico considerado es igual a:

$$256,13 \frac{kW - h}{año \times m^2}$$

3.3. Evaluación del recurso eólico:

Los promedios de la velocidad del viento de esta zona hacen de la energía eólica una gran alternativa potencial, alcanzando vientos de más 7,5 m/s. Según las

recomendaciones “Atlas Eólico Del Ecuador con fines de generación eléctrica”, aquellas localidades con vientos de velocidades iguales o superiores a 5 m/s, ofrecen una buena alternativa para la implementación de este tipo de energía, por tanto, en la localidad de Zumbahua, al alcanzar este límite, pueden implementarse sistemas eólicos. Esto debido a las lecturas hechas por el Autor entre noviembre 2020 y mayo 2021 (6 meses de duración) como se muestra en Fig. 49 y 50.

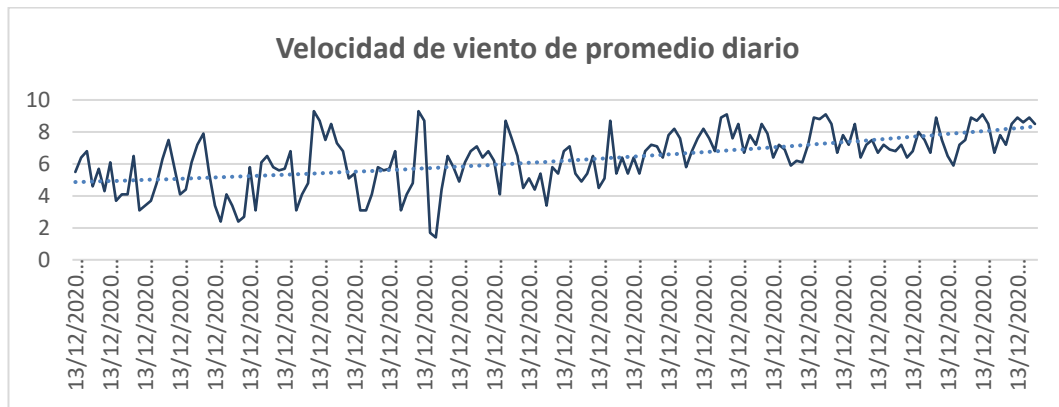


Figura 49. Velocidad promedio del viento en Zumbahua nov 2020 – mayo 2021.

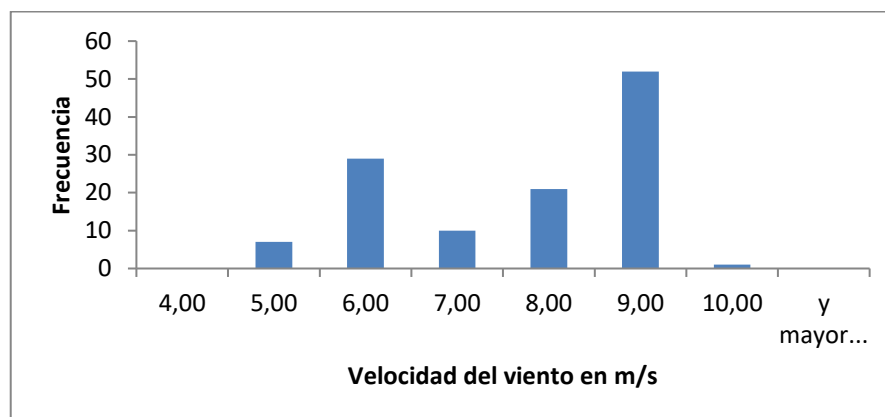


Figura 50. Histograma de la velocidad del viento en Zumbahua nov 2020 – mayo 2021.

Según la NASA se tiene que, desde el 01 de enero del 2001 al 31 de diciembre del 2021, el registro de velocidad de viento y dirección de viento durante cada hora durante el período de observación se muestran en las Figuras 51 y 52.

En las siguientes figuras se tomará en cuenta que el eje x representa el valor de los datos generados durante los años 2001 - 2021, y en el eje y el valor de la velocidad del viento en (m/s), la dirección del bien en ($^{\circ}$), respectivamente.

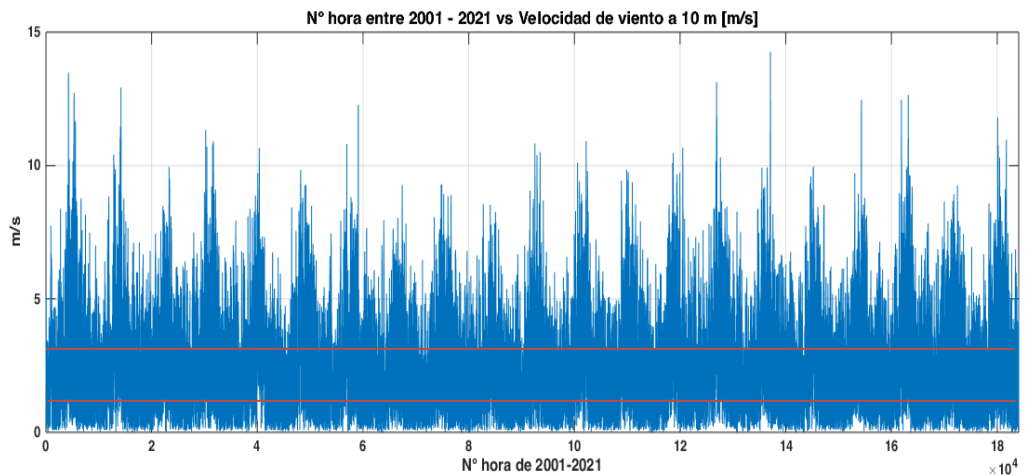


Figura 51. Velocidad de viento medido a 10 metros sobre suelo durante período de observación

En la figura 51, se muestra todos los datos por hora generados durante los años 2001 y 2021 de la velocidad del viento a 10m, que tiene como valores casi constantes entre 2 y 3,5 m/s

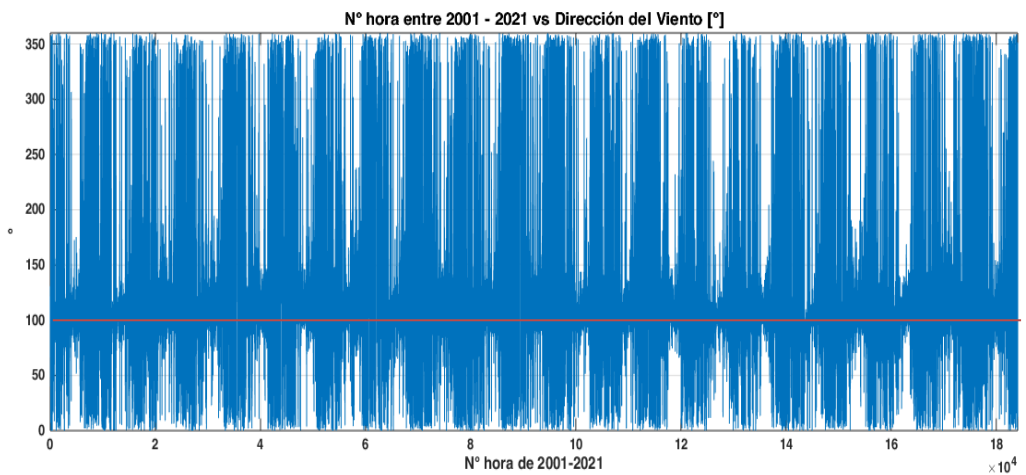


Figura 52. Dirección del viento medido a 10 metros sobre suelo durante período de observación

A continuación, en la figura 52, se muestra todos los datos por hora generados durante los años 2001 y 2021 de la dirección del viento, que tiene como valor constante de 100°.

De manera similar a lo mencionado en el apartado de radiación solar, es útil observar el comportamiento anual para ver la repetitividad estacional anual que se

puede observar en las variables de estudio. Las Figuras 53 y 54 nos muestran los valores superpuestos de todos los años teniendo como dominio de la gráfica el número de hora cronológica de un año.

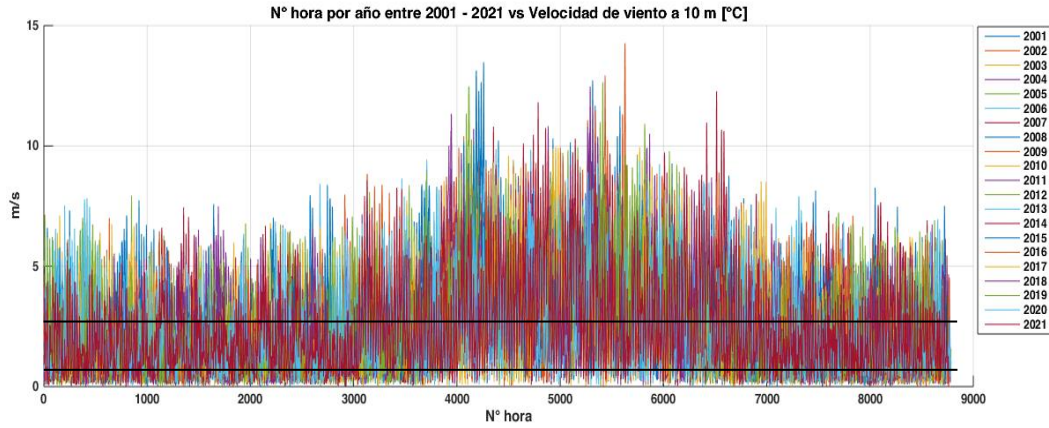


Figura 53. Gráfica de superposición de los valores de velocidad de viento por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021

En la figura 57, se muestra los datos de superposición por hora generados durante el año, donde la velocidad del viento tiene como valor casi constante entre 1 y 3 m/s.

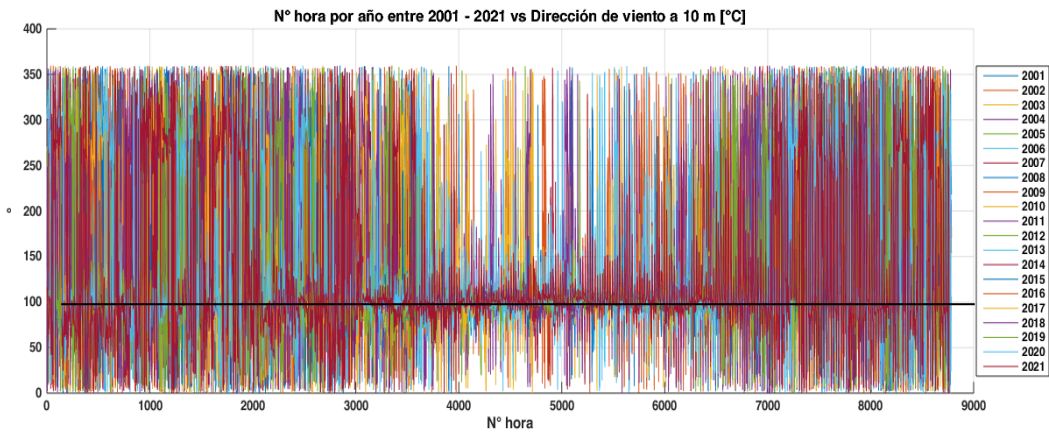


Figura 54. Gráfica de superposición de los valores de dirección de velocidad de viento por hora de cada año del período de observación 2001 - 2021

A continuación, en la figura 54, se tiene una superposición de valores de la dirección del viento a 10m, una constante de 100 (°) generado en todo el año de medición, durante los años 2001 al 2021.

Con los datos medidos cada hora durante veinte y un (21) años se tiene los siguientes resultados:

Tabla 8. Valores y medida del viento

Variable	Valor y Medida
Velocidad media del viento	2,4288 m/s
Desviación estándar del viento	1,7468 m/s
Densidad de potencia del viento dP	3,4938 W/m ²
Densidad de energía del viento dE	0,2943 W-h/m ²

Considerando diferentes coeficientes de potencia C_P de la turbina eólica y además una eficiencia en la transmisión mecánica η_m igual a 0,9, una eficiencia del generador eléctrico η_g igual a 0,9 y que las horas al año Ha son 8.760; se tiene que la energía eléctrica anual estimada a partir de la densidad de potencia EEA_{dP} y la energía eléctrica anual estimada a partir de la densidad de energía EEA_{dE} , se muestra en la Tabla 9, siendo:

$$EEA_{dP} = C_P dP \eta_m \eta_g Ha \frac{W - h}{\text{año} \times m^2}$$

$$EEA_{dE} = C_P dE \eta_m \eta_g Ha \frac{W - h}{\text{año} \times m^2}$$

Tabla 9. Cálculo de la energía eléctrica anual por m² generada a partir del viento

C_P	EEA_{dP}	EEA_{dE}
0,05	6.018 kW-h/(año m ²)	0.1044118 kW-h/(año m ²)
0,10	12.035 kW-h/(año m ²)	0.2088235 kW-h/(año m ²)
0,15	18.053 kW-h/(año m ²)	0.3132353 kW-h/(año m ²)
0,20	24.070 kW-h/(año m ²)	0.4176470 kW-h/(año m ²)
0,25	3.0088 kW-h/(año m ²)	0.5220588 kW-h/(año m ²)
0,30	36.105 kW-h/(año m ²)	0.6264705 kW-h/(año m ²)
0,35	42.123 kW-h/(año m ²)	0.7308823 kW-h/(año m ²)

Lo cual indica una clara ventaja de la solar fotovoltaica sobre la eólica.

3.4. Análisis de los resultados:

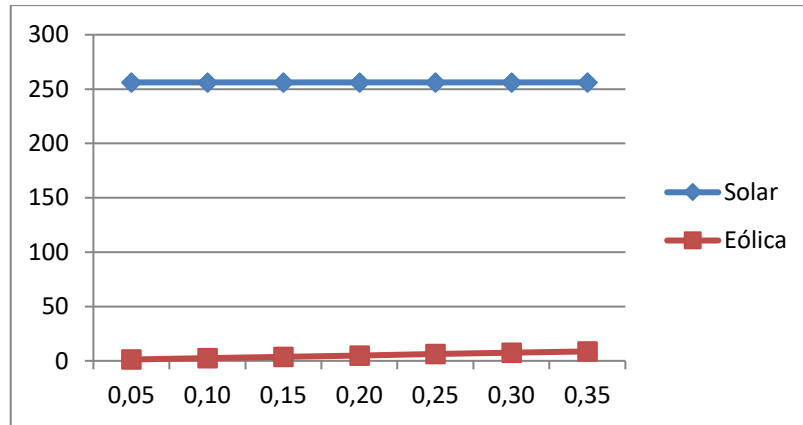


Figura 55. Disponibilidad de recursos energéticos renovables locales: solar y eólica medidos en kW-h/(año m²)

El recurso solar es el recurso renovable disponible localmente con mayor disponibilidad energética, unos 256,1308 kW-h/(año m²), y que asumiendo eficiencias de plantas solares fotovoltaicas de entre 0,18 y 0,24 se puede disponer a la salida de las mismas entre 33,1344 kW-h/(año m²) y 44,1792 kW-h/(año m²) de energía eléctrica. En cambio, en cuanto a la energía eólica, la velocidad media del viento es de 2,4288 m/s, por lo tanto, si se desea aprovechar éste recurso sería mediante turbinas eólicas de baja velocidad, las que como se observa en la Figura 55, por más que su coeficiente de potencia sea alto no logra alcanzar a lo mínimo estimado que produce una planta solar fotovoltaica (por ejemplo con coeficiente de potencia igual a 0,35, se tiene 42,123 kW-h/(año m²) en el eje de la turbina eólica), por lo tanto, una potencial aplicación sería la de ser utilizada en sistemas de ventilación de casas, escuelas, colegios, talleres y similares usando equipos que usan la arreglo turbina eólica – ventilado

La parroquia de Zumbahua cuenta con 12 738 hectáreas para la infraestructura básica la mayoría de viviendas en el sector rural son casas o villas. Según el Censo de Población y Vivienda del 2010 existen 2 430 casas o villas, 1 167 mediaguas, 472 chozas, 49 departamentos, 42 covachas, 33 cuartos, 24 ranchos, 15 viviendas particulares y 3 pensiones. La dispersión de la población en la parroquia es uno de los factores que influye en la dotación de servicios básicos, por lo que mientras más lejana se encuentre una vivienda menor cobertura de servicios tiene. En la parroquia

la cobertura del agua de consumo por red pública es del 28%, alcantarillado es el 6% y la energía eléctrica es del 76%.

En las siguientes figuras se tomará en cuenta que el eje x representa el valor de las horas en el día y en el eje y el valor de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), velocidad del viento en m/s , dirección del viento en (m/s) y la irradiación solar en kW/m^2 , respectivamente

La figura 56, representa los datos obtenidos en el año 2021, donde existe una constante de la temperatura de 15°C , entre las 12h00 y 14h00.

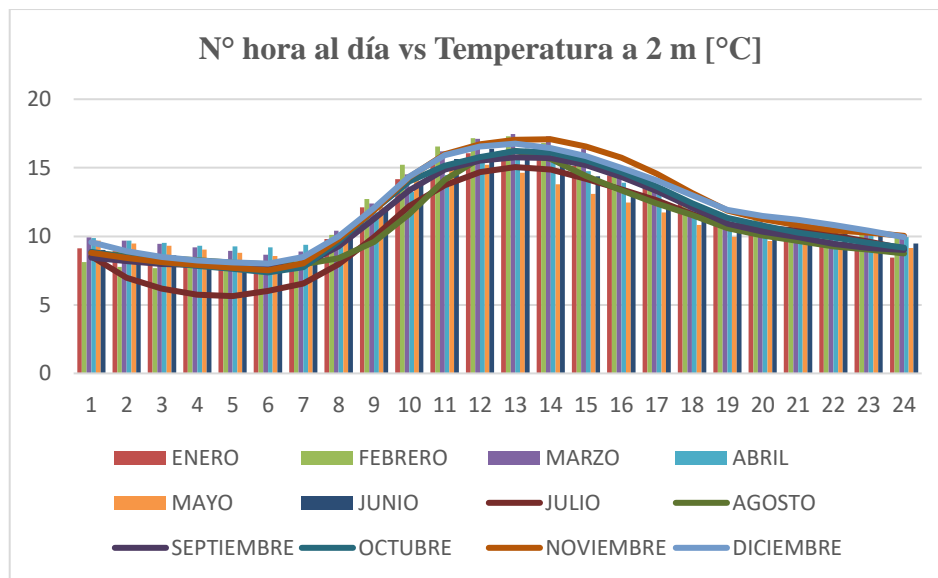


Figura 56. Gráfica de superposición de los valores de temperatura por hora del año 2021.

La figura 57, representa los datos obtenidos en el año 2021, donde existe una constante de la velocidad del viento de $5,2 \text{ m/s}$, entre las 09h00 y 10h00.

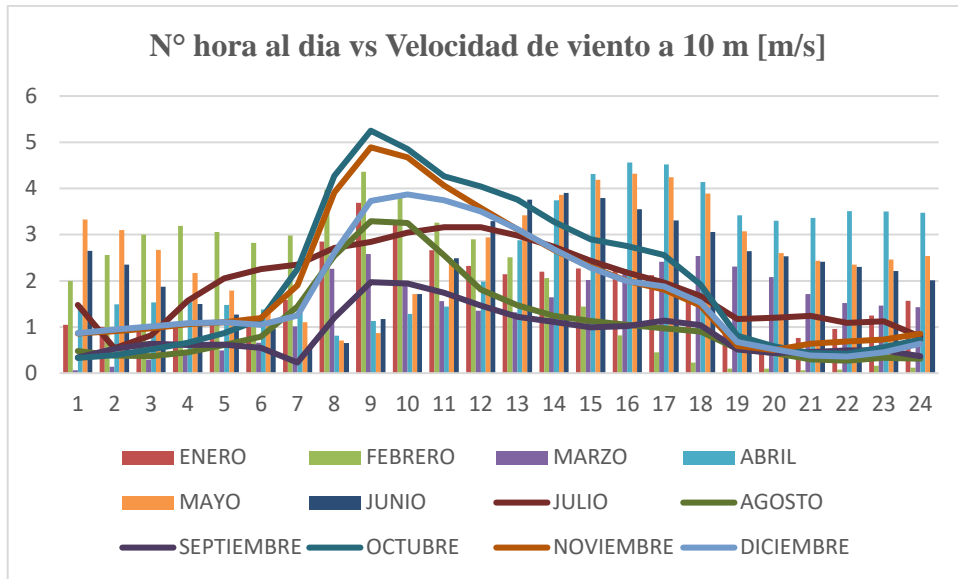


Figura 57. Gráfica de superposición de los valores de velocidad de viento por hora del año 2021

En la figura 58, se observa los datos generados en el año 2021, donde existe una constante de la dirección del viento a los 100 °, entre las 08h00 y 21h00.

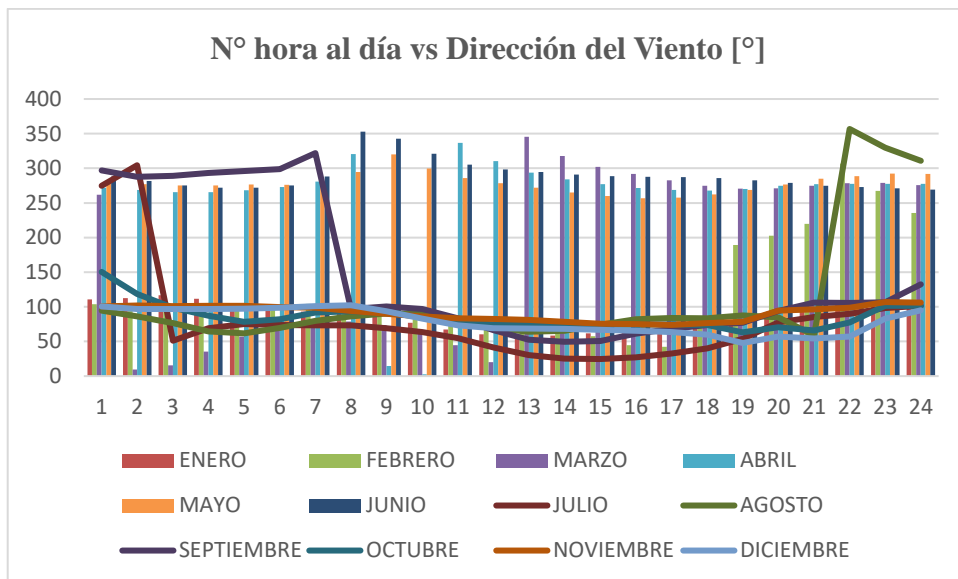


Figura 58. Gráfica de superposición de los valores de dirección de velocidad de viento por hora del año 2021

En la figura 59, se observa los datos generados en el año 2021, donde existe una constante de la irradiación solar de 600 (W/m²), a las 12h00.

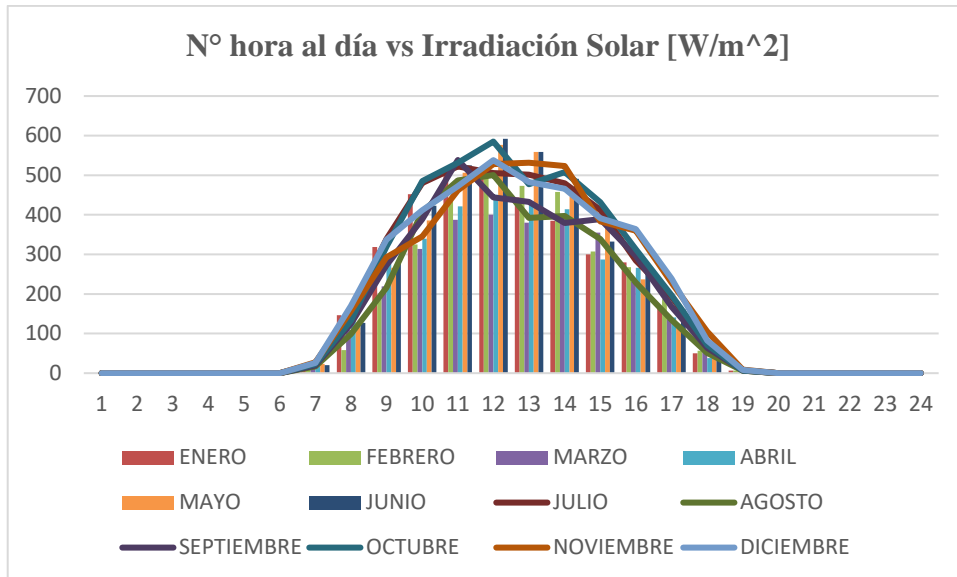


Figura 59. Gráfica de superposición de los valores de radiación solar por hora del año 2021

Luego de analizar las gráficas, se toma como referencia 20 viviendas cercanas al punto de estudio, la carga estimada de 1080 kW/h por año por cada una, da como resultado un total de 21.600 kW/h por año, es entonces donde se puede evidenciar que el estudio realizado produce una energía solar de 256.13 kW-h/(año x m²) y de la energía eólica entre 6.018 a 42.123 kW-h/(año x m²), lo cual se puede evidenciar que satisface la demanda situada.

Con el excedente de energía producida en el día se puede utilizar un sistema de almacenamiento de baterías y de volantes de inercia, los sistemas de conversión de potencia (SCP) es un dispositivo bidireccional que permite a la CD fluir a la carga después de ser convertida en corriente alterna (AC) y permite a la AC fluir en una dirección inversa después de su conversión a CD a cargar la batería o hacia la volante de inercia. Los subsistemas de monitoreo y control puede no ser cajas discretas, como se muestra en la figura 60, pero también puede ser integrados dentro de su propio SCP.

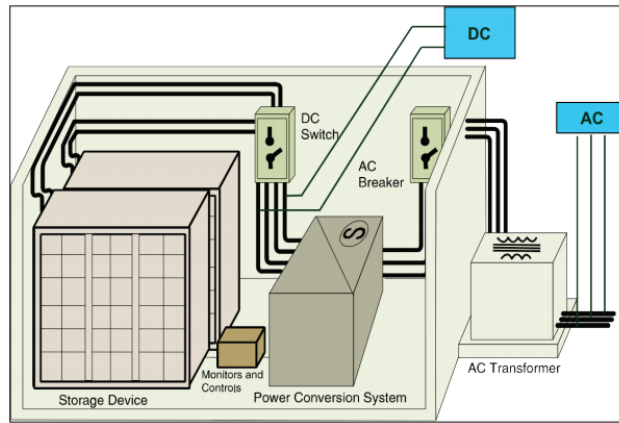


Figura 60. Esquema de un sistema de almacenamiento de energía por batería.

3.4.1. Interpretación de los resultados

A partir de la valoración de los recursos renovables disponible se tiene que la solución de optimización determina que, bajo el escenario de estudio considerado, se tendrá un valor de 0,4027651 \$/kWh como costo de generación de electricidad bajo el concepto de micro generación distribuida con una participación mayoritaria de energía eléctrica producida a partir de paneles solares fotovoltaicos que pueden ser ubicados sobre los techos o en campo abierto según coordinaciones que se hagan con la comunidad.

3.4.2. Validación técnica - económica de los resultados:

El costo hallado para la producción de energía eléctrica mediante recursos renovables disponibles localmente (Anexo 1) es mayor que el costo que pagan en la comunidad (0,105 \$/kWh), y que, teniendo en cuenta que dicha comunidad está formada mayoritariamente por etnias indígenas de bajos recursos, éste costo no es sostenible por dicha comunidad; sin embargo, el análisis muestra que estos costos se acercan bastante a los propuestos por los “*Precios Preferentes Energías Renovables*” de la Regulación No. CONELEC – 004/11, por lo que el proyecto puede ser asumido por el gobierno local como uso alternativo a la energía proporcionada por Sistema Nacional Interconectado (SNI).

Conclusiones generales

- El resultado arrojado de la valoración energética de los recursos energéticos no convencionales, permite concluir que en la comunidad de Zumbahua, el aprovechamiento principalmente de la energía solar, como la energía eólica es una opción viable para el desarrollo micro generación distribuida como una solución factible para satisfacer las necesidades energéticas de la comunidad, y complementar la energía proporcionada por Sistema Nacional Interconectado (SNI), ya que permite la minimización de pérdidas y de costos de generación.
- Los datos que han sido procesados son de cada hora desde el año 2001 al 2021, obteniéndose una mayor cantidad de energía por metro cuadrado por año de la energía solar (256,13 kW-h/(año x m²)) que de la energía eólica (entre 6.018 a 42,123 kW-h/(año x m²)). La fuente de información ha sido la Agencia Espacial Americana (NASA).
- En el caso de la energía eólica la velocidad medio de viento es de 2,4288 m/s, lo que determina que, por la altura del lugar, los tipos de turbina a usar serán las de diseño para baja velocidad que usualmente son de eje vertical.

Recomendaciones

- Realizar un estudio para la eventual implementación de un proyecto piloto de micro generación distribuida, con la participación de la comunidad, el gobierno local y la compañía de eléctrica ELEPCO.
- Realizar un análisis detallado de la región para verificar las zonas donde se tenga los máximos niveles de irradiación solar y de velocidad del viento para la óptima ubicación de las fuentes de generación no convencionales.
- Realizar un estudio del impacto de las microrredes en el mantenimiento y operación en el Sistema Nacional Interconectado, y la participación de las comunidades en el proyecto de microrredes, así como la cuantificación de los beneficios económicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Hathaway y E. W. Maibach, «Health implications of climate change: a review of the literature about the perception of the public and health professionals,» *Current environmental health reports*, vol. 5, nº 1, pp. 197-204., 2018. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0190-3>.
- [2] S. M. Jordaan, E. Romo-Rabago, R. McLeary, L. Reidy, J. Nazari y I. M. Herremans, «The role of energy technology innovation in reducing greenhouse gas emissions: A case study of Canada.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 78, pp. 1397-1409., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.162>.
- [3] G. C. López, «Medio ambiente y generación de energía en México. Portes,» *Revista mexicana de estudios sobre la cuenca del Pacífico*, vol. 12, nº 24, pp. 145-161, 2018. <http://www.portesasiapacifico.com.mx/revistas/epocaiii/numero24/7.pdf>.
- [4] A. Bielecki, S. Ernst, W. Skrodzka y I. Wojnicki, «The externalities of energy production in the context of development of clean energy generation,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, nº 11, pp. 11506-11530, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07625-7>.
- [5] S. E. Hosseini y M. A. Wahid, «Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy,» *International Journal of Energy Research*, vol. 44, nº 6, pp. 4110-4131, 2020. <https://doi.org/10.1002/er.4930>.
- [6] D. F. García, G. J. Benitez, A. Vázquez y M. Rodríguez, «La generación distribuida y su regulación en el Ecuador.,» *Brazilian Journal of Business*, vol. 3, nº 3, 2021. <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJB/article/view/32711>.
- [7] J. S. Quishpe Gaibor y J. A. Galárraga Ortiz, «Análisis, ético y social para integrar la generación distribuida en las redes eléctricas,» *Observatorio De La Economía Latinoamericana*, vol. 254, nº 2019, 2019. <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/04/generacion-redes-electricas.html>.
- [8] L. Álvarez, L. Neves, J. López y S. Zambrano, «Impacto de la generación distribuida en la red de distribución,» *Maskana*, vol. 8, pp. 259-271, 2017. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/1985>.
- [9] J. P. Muñoz-Vizhñay, M. V. Rojas-Moncayo y C. R. Barreto-Calle, « La reducción de los costos de la infraestructura solar es una de las principales razones de su crecimiento mundial. En Ecuador se incentivo a la generación distribuida en el Ecuador,» *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 19, pp. 60-68., 2018.
- [10] J. S. Quishpe Gaibor y B. X. Prado Gaibor, «¡Aplicación de la deontología enfocada a la generacion distribuida en el Ecuador,» *Observatorio de la Economía*

Latinoamericana, vol. 261, nº 219, 2019 .
<https://www.eumed.net/rev/oel/2019/11/deontologia-enfocada-ecuador.html>.

- [11] D. Vallejo, R. Dávila, R. Soria y F. Ordóñez, «Evaluación del potencial técnico y económico de la tecnología solar fotovoltaica para la microgeneración eléctrica en el sector residencial del Distrito Metropolitano de Quito,» *Revista Técnica" energía"*, vol. 17, nº 1, pp. 80-91, 2020.
<http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/399>.
- [12] R. Ayala, J. Freire, J. López y J. Salazar, «Análisis de la energía eólica como sustituto para la energía convencional en casas del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.,» *Athenea*, vol. 2, nº 3, pp. 40-46, 2021. DOI:
doi.org/10.47460/athenea.v2i3.14.
- [13] R. Gomelsky, «Evaluación rápida y análisis de brechas en el sector energético Ecuador,» MEER, BID y PNUD., 2013.
https://www.seforall.org/sites/default/files/Ecuador_RAGA_ES_Released.pdf.
- [14] IEA, «Net Zero by 2050,» May 2021. [En línea]. Available:
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. [Último acceso: 1 agosto 2021].
- [15] J. S. Ramírez, S. Martínez, S. GIL, S. D. Saldarriaga-Zuluaga y J. M. López-Lezama, «Diseño de una Microrred como Estrategia de Formación Práctica en Ingeniería Eléctrica.,» *Espacios*, vol. 40, nº 44, pp. 20-32, 2019.
<http://es.revistaespacios.com/a19v40n44/a19v40n44p20.pdf>.
- [16] C. G. Aldana Alturo y O. L. Fuentes Ramos, « Análisis, diseño y simulación de un prototipo generador de energía continua accionado por energías renovables (energía eólica y solar),» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17965>, 2018.
- [17] D. F. Ariza Melo, «Microrredes: Una alternativa sostenible para la universalización de la energía eléctrica,» Universidad Santiago de Cali, Valle del Cauca.
<https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/5007>, 2020.
- [18] A. Moehlecke y I. Zanesco, «Situación actual de sistemas fotovoltaicos para generación distribuída en Brasil.,» *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 41, pp. 79-85, 2018.
<http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/erma/article/view/1018>.
- [19] K. T.-Q. C. Torres-Castro y G. Richmond-Navarro, «Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso,» *Revista Tecnología en Marcha*, pág. vol. 34, nº 3, pp. 61-69, 2021.
<https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5063>.
- [20] F. & C. J. González, «Estudios de viabilidad para la microgeneración eólica en ambientes urbanos,» de *II Congreso de Agua Ambiente y Energía. AUGM*,

Montevideo, Uruguay, 2019. <https://www.researchgate.net/profile/Federico-Gonzalez-Madina/>.

- [21] CONELEC. Consejo Nacional de Electricidad, «Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.,» 2008. [En línea]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>.
- [22] MEER, « Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Atlas eólico del Ecuador: con fines de generación eléctrica.,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.ariae.org/servicio-documental/atlas-eolico-del-ecuador-con-fines-de-generacion-electrica>. [Último acceso: 30 agosto 2021].
- [23] F. Ordoñez y D. Vaca, Mapa solar de Ecuador, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020. <https://www.epn.edu.ec/mapa-solar-del-ecuador/>.
- [24] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables Ecuador, «Plan Maestro de Electricidad,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>.
- [25] O. Cabeza G y V. Jaramillo G, «Planificación y diseño de un sistema fotovoltaico en Chacras,» *Conference Proceeding UTMACH 2020*, vol. 4, nº 1, pp. 196-208, 2020. <http://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/issue/archiv>.
- [26] F. O. Ocampo Jiménez y W. A. Suárez Farinango, «Diseño y simulación de la operación y control de los convertidores estáticos de energía en una micro-red eléctrica inteligente (Micro-Smart Grid) aplicado un sistema de alumbrado público a partir de,» Quito, 2017. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17520/1/CD-8025.pdf>.
- [27] D. Peña, J. López y P. Marques, «Aprovechamiento de la energía eólica en ambientes urbanos,» *Maskana*, vol. 8, pp. 247-257, 2017. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/1984>.
- [28] M. Guanquiza, J. López y N. Gil, «Integración de generación distribuida en ambientes urbanos-dimensionamiento y localización,» *Maskana*, vol. 8, pp. 301-312, 2017. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/1989>.
- [29] J. Z. Aguirre Parra, «Análisis de la matriz energética ecuatoriana y plan de desarrollo energético sostenible para la ciudad de Machala.,» Universitat Politècnica de València., Valencia, 2018. <http://hdl.handle.net/10251/106306>.
- [30] M. F. Casado, «El futuro energético de Japón: entre el regreso a la senda nuclear y el giro hacia las renovables,» *Revista unisci*, vol. 41, pp. 71-103, 2016. <https://www.redalyc.org/pdf/767/76746670004.pdf>.

- [31] L. Casola y A. Freier, «El nexo entre cambio climático y energía renovable en el Mercosur. Un análisis comparativo de las legislaciones de Argentina y Brasil,» *Revista Derecho del Estado*, nº 40, pp. 153-179, 2018. <https://doi.org/10.18601/01229893.n40.07>.
- [32] J. Parreño, O. Lara, R. Jumbo, H. Caicedo y D. Sarzosa, «Diseño de un módulo de energía solar como estrategia de ahorro energético y disminución de la emisión de CO₂,» *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, vol. 2, nº 15, pp. 4-18., 2020. <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/2849>.
- [33] A. Gasparatos, C. N. Doll, M. Esteban, A. Ahmed y T. A. Olang, «Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 161-184, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>.
- [34] M. H. Badii, A. Guillen y J. L. Abreu, «Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation),» *Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 11, nº 1, pp. 141-155, 2016. [http://www.spentamexico.org/v11-n1/A12.11\(1\)141-155.pdf](http://www.spentamexico.org/v11-n1/A12.11(1)141-155.pdf).
- [35] S. Cortés y A. A. Londoño, «Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía,» *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 25, nº 38, pp. 375-390, 2017. <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151354939007.pdf>.
- [36] E. D. Doussoulin y Y. C. Chalco, «El potencial de la energía solar: Promesa de futuro para la región de Arica y Parinacota, Chil,» *Interciencia*, vol. 43, nº 8, pp. 541-543, 2018. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33957744001>.
- [37] S. Salamanca-Ávila, «Proposta de design para um sistema de energia solar fotovoltaica. Caso de aplicação na cidade de Bogotá,» *Revista científica*, vol. 30, pp. 263-277, 2017. <https://doi.org/10.14483/23448350.12288>.
- [38] A. Salazar-Peralta, A. Pichardo-S y U. Pichardo-S, «La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable,» *Revista de Investigación y Desarrollo*, vol. 2, nº 5, pp. 11-20, 2016. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Desarrollo/vol2_num5/.
- [39] M. A. Cabrera, V. G. Jaramillo y A. Fries, «Caracterización de variables meteorológicas a ser usadas como fuentes de energía en la región sur del Ecuador,» *Revista Geoespacial*, vol. 15, nº 2, pp. 13-23., 2019. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1348>.
- [40] MERNNR. Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, «Plan Maestro de Electricidad. Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/index.php/biblioteca/plan-maestro-de-electricidad>. [Último acceso: 4 Agosto 2021].

- [41] CELEC, «Corporación Eléctrica del Ecuador. Portal web oficial.,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/>. [Último acceso: 30 Agosto 2021].
- [42] S. Cuco Pardillos, Manual de energía eólica. Desarrollo de proyectos e instalaciones., València: Editorial Universitat Politècnica de València, 2017.
- [43] Ministerio de electricidad y energía renovable, «Atlas eólico Ecuador 2013,» 02 enero 2014. [En línea]. Available: <http://historico.energia.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=338&force=1>. [Último acceso: 30 Julio 2021].
- [44] B. U. N. (BUN-CA), Manuales sobre energía renovable solar fotovoltaica, San José, Costa Rica, 2002.
- [45] Á. G. P. Palacios, S. A. I. Rodríguez, E. D. V. Fuentes, V. M. C. Quinto, N. L. M. Párraga y F. E. Z. Gavilanes, «Producción de energía eólica en Ecuador.,» *Ciencia Digital*, vol. 3, nº 3, pp. 22-32., 2019. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.610>.
- [46] J. A. Aguilera Folgueiras, «Fuentes de energía y Protocolo de Kioto en la Evolución del Sistema Eléctrico Español.,» Universidad de Oviedo, Oviedo, 2012. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/13052/TDJoseAntonioAguileraFolgueiras.pdf?sequence=1>.
- [47] L. A. R. E. & L. L. M. Arias, «Propuesta de modelo de Gestión para redes eléctricas con Generación Distribuida a través de Unidades de Medición Fasorial.,» *Información tecnológica,,* vol. 28, nº 2, pp. 15-28., 2017. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000200003> .
- [48] R. R. D. A. Galvão, T. J. L. D. França, B. C. Pinheiro y L. T. Lucio, «Proposal for a Monitoring and Dispatch System for Distributed Micro-Generation of Renewable Energy in Virtual Energy Centers,» *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 61, nº esp., 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000025>.
- [49] La nueva Cronica, «La ULE dedica un curso a la generación distribuida y fotovoltaica para el autoconsumo,» 10 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.lanuevacronica.com/la-ule-dedica-un-curso-a-la-generacion-distribuida-y-fotovoltaica-para-el-autoconsumo>. [Último acceso: 15 julio 2021].
- [50] J. K. Juntunen y S. Hyysalo, «Renewable micro-generation of heat and electricity— Review on common and missing socio-technical configurations. Renewable and Sustainable,» *Energy Reviews*, , vol. 49, pp. 57-870., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.040>.
- [51] A. Riofrio, D. Carrión y D. Vaca, «. (). Propuesta de Modelo de Operación Aplicado a Micro Redes Fotovoltaicas en Generación Distribuida,» *Revista Técnica" energía"*, vol. 2, nº 1, pp. 216-229., 2016. <http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/47>.

- [52] MIEMDNE, «Guía para Microgeneración en Uruguay. Montevideo,» enero 2013. [En línea]. Available: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/tematica/microgeneracion>. [Último acceso: 30 agosto 2021].
- [53] G. S. Leonardo, J. César, R. Monsalve, C. G. Julie Alejandra y G. Juan Pablo, Energías renovables no convencionales y cambio climático: un análisis para Colombia, Bogota: Editorial Universidad del Rosario, 2019. .
- [54] G. Aquila, E. de Oliveira Pamplona, A. R. de Queiroz, P. R. Junior y M. N. Fonseca, «An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1090-1098, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.013>.
- [55] F. Aguayo-González, A. Martínez Navarro y J. R. Lama-Ruiz, «Nuevo paradigma en sistemas eléctricos: generación distribuida y redes inteligentes,» *Sevilla Técnica*, Vols. %1 de %234, , pp. 26-38, 2010. <https://idus.us.es/handle/11441/48905>.
- [56] Comunicarse, «¿Qué son los prosumidores de energía?,» 10 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.comunicarseweb.com/noticia/que-son-los-prosumidores-de-energia>. [Último acceso: 15 agosto 2021].
- [57] Fundación Endesa, «La generación distribuida: Características y microgeneración,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-generacion-distribuida>. [Último acceso: 15 julio 2021].
- [58] L. M. Santana y J. Z. Pérez, «Fiscalidad del autoconsumo eléctrico de fuentes renovables,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2017. <https://core.ac.uk/download/pdf/288498024.pdf>.
- [59] B. Ochoa Di Masi, «Alcance de un modelo de generación distribuida de energías renovables integrada a la red eléctrica pública en la República Argentina.,» Instituto tecnologico de Buenos Aires – ITBA , Buenos Aires, 2018. <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1251>.
- [60] I. E. Agency-IEA, «Renewables 2019. Market Analysis and Forecast from 2019 to 2024,» October 2019. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>. [Último acceso: 25 Agosto 2021].
- [61] M. R. G. Saquicela, J. A. G. Bizueta y J. M. Oviedo, «Efectos por la interconexión de generación distribuida en el sistema de protección de sobrecorriente,» *Centro Sur*, vol. 4, nº 2, pp. 46-58, 2020. <http://www.centroseditorial.com/index.php/revista/article/view/64>.
- [62] R. A. M. Z. S. & O. U. P. Acuña, «Generación Distribuida: Concepto y Aplicaciones,» Univ. Nac. Exp. Politécnica Antonio José Sucre, Barquisimeto, Venezuela, 2009.

- [63] R. C. A. Ramos y F. Jurado, «Análisis de fallas en sistemas híbridos conectados a la red eléctrica.,» *Revista Ingeniantes*, ., vol. 1, nº 2, pp. 71-76, 2020. <http://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes7no2vol1/>.
- [64] INEC, «Fascículo provincial cotopaxi,» Cotopaxi, 2010.
- [65] B. E. Enríquez Prado, Análisis de los principales determinantes socio-económicos que influyen en el estado de salud de las mujeres en la parroquia de Zumbahua en el 2017, Pujilí, 2019.
- [66] J. Mirez, Lima, 2010.
- [67] Castaner L. y Silvestre S., *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*, Barcelona: Wiley, 2002.
- [68] Niinisto A., «Simulation of the management of a micro grid with wind, solar and gas generators,» Espoo, 2009.
- [69] M. Muyeen S., *Stability augmentation of grid connected wind farm*, Japan, 2013.
- [70] Ackerman T., *Wind power in power systems*, England: John Wiley & Sons, 2005.
- [71] F. Manwell J. y G. McGowan J., *Wind Energy explained*, Wiley, 2009.
- [72] O. m. mundial, *Guia de instrumentos y métodos de obsercación meteorológicos*, Ginebra, 1996, p. 8.
- [73] INAMHI, «Red de estaciones automáticas hidrometeorológicas,» 2022. [En línea]. Available: <http://186.42.174.236/InamhiEmas>.
- [74] NASA, «Power data access viewer,» [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> . [Último acceso: 2022].
- [75] G. J. Gaviria F, *Metodologia de optimizacion para microrredes electricas en zonas no interconectadas*, Santiago de Cali, 2018.
- [76] S. Sánchez, «Texto de consulta de energía solar fotovoltaica,» Abril 2019. [En línea]. Available: <https://enerpro.com.ec/wp-content/uploads/2019/04/Texto-de-Consulta-de-Energ%C3%ADa-Solar-Fotovoltaica.pdf>. [Último acceso: 30 Agosto 2021].
- [77] P. G. J. Moseley, *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing*, Newnes, 2014.
- [78] A. Abbas y Georgianne H., *DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*, California: Sandia National Laboratories, 2015.

ANEXOS

Anexo 1: Propuesta de evaluación de costos.

En esta sección se establece el planteamiento del diseño óptimo de una microrred de menor costo de generación, para la comunidad de Zumbahua; teniendo en cuenta los datos de demanda (la cual se propone sea determinada en un estudio futuro) y del recurso energético renovable, el proceso de optimización, parte de la formulación de la ecuación general de generación de energía eléctrica propuesta para la comunidad, así mismo se determina la función objetivo, restricciones de operación y variables de decisión; luego se procede la minimización de la función objetivo que para el caso planteado aquí se minimiza el costo de generación de la energía eléctrica. Finalmente se determina la configuración adecuada para satisfacer la demanda de la localidad, presentando el diseño óptimo para la misma .

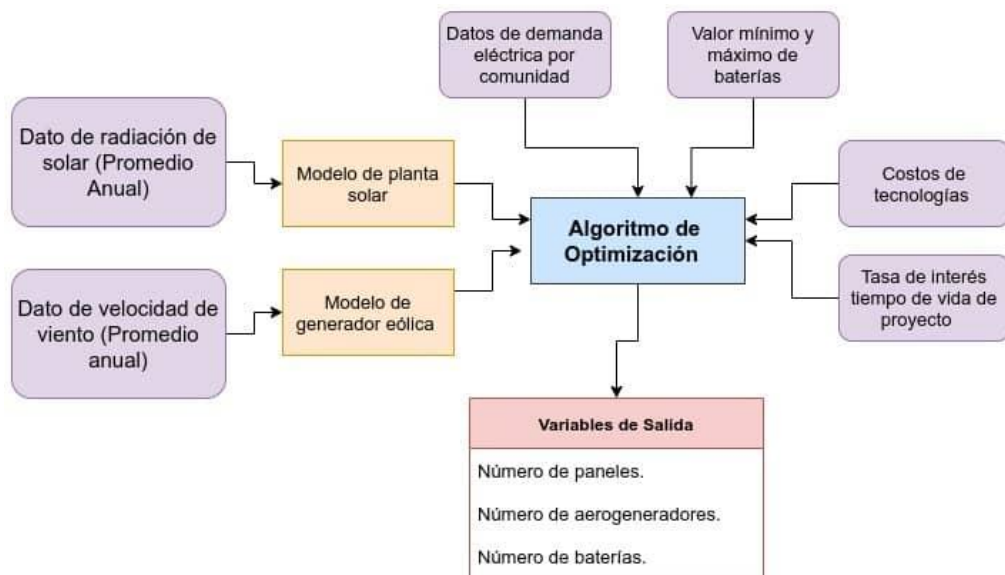


Diagrama del algoritmo solución.

Formulación matemática

Energía generada por la micro red, en términos de $Energía = Potencia * tiempo$

$$E_{MR} = \sum E_{GEN} = E_{FV} + E_{AG} + E_{BAT}$$

donde:

E_{FV} : energía procedente de los paneles fotovoltaicos en kWh

E_{AE} : energía procedente de los Aerogeneradores en kWh

E_{BAT} : energía procedente de baterías en kWh

La generación de energía por los paneles fotovoltaicos está dada por

$$E_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 - k (T_c - T_r)] \Delta t_1$$

donde:

E_{PV} : Es la energía generada por el panel solar fotovoltaico.

P_{STC} : Es la potencia nominal del panel solar fotovoltaico en condiciones de prueba estándar.

G_{ING} : Es la irradiancia solar instantánea.

G_{STC} : Es la irradiancia solar en condiciones de prueba estándar.

k : Es el coeficiente de temperatura del Si con que se fabrica la célula fotovoltaica.

T_r : Es la temperatura referencial de la célula.

T_c : Es la temperatura de la célula en condiciones de prueba estándar.

Δt_1 : Tiempo de medición en h

La generación de energía por los aerogeneradores está dada por

$$E_{AE} = \frac{1}{2} C_p \rho_{AIR} S V^3 \Delta t_2$$

donde:

C_p : Coeficiente de potencia determina la cantidad de energía cinética que se puede extraer del viento. Tiene un límite teórico (límite de Betz) dado por $C_p \leq 0,59$.

ρ_{AIR} : es la densidad el aire a temperatura ambiente, la cual a nivel del mar es $\rho_{AIR} = 1,225 \text{ kg/m}^3$

S : Superficie de captación del viento (área de barrido) en m^2 . La superficie de captación del viento está dada por el área de una circunferencia $S = \pi * r^2$, que es el área de captación de las aspas de las hélices de los aerogeneradores.

r : Radio de las aspas de las hélices del aerogenerador

V : Velocidad del viento [m/s]

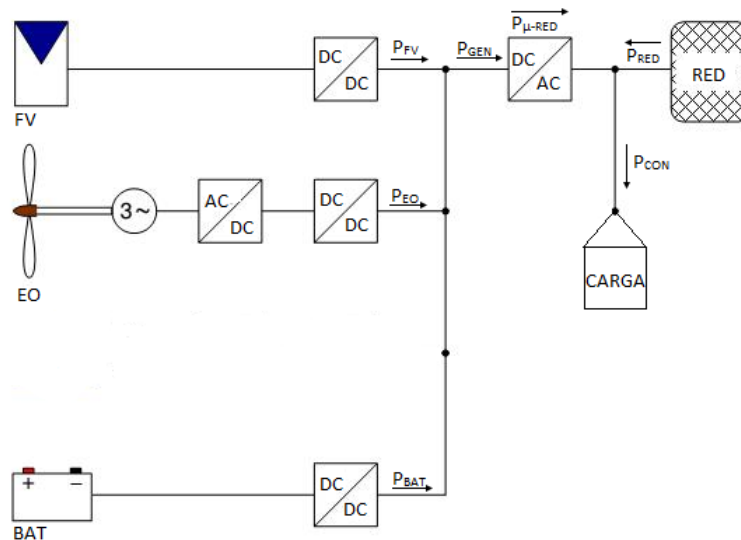
Δt_2 : Tiempo de medición en h

Generación de energía proveniente del almacenamiento en las baterías.

Es importante contar con un sistema de almacenamiento en el diseño de una microrred, ya que es un componente importante debido a la volatilidad e intermitencia de las variables de los recursos energéticos renovables, lo que permitirá extender la disponibilidad de energía para las cargas.

Para este caso específico, la capacidad energética de las baterías, en la fase de diseño, teniendo en cuenta que estas funcionarán en su debido momento como respaldo a la ausencia de recurso energético renovable. Las unidades de baterías tendrán una potencia nominal de 10 kWh y capacidad de corriente de 100 Ah.

$$E_{BAT} = 10 kWh$$



Configuración de la micro red.

Formulación del problema de optimización

Para formular el problema de optimización, una vez definidas las ecuaciones de energía de cada una de las fuentes de generación, se procede a determinar la función objetivo para relacionar los costos por tecnología, la generación de energía estableciendo así un costo total por la energía generada y el número de elementos a usar por fuente de generación para la micro red.

Considerando que se desea trabajar con una función de costo objetivo y conocer a su vez el número mínimo de elementos o componentes de las diferentes tecnologías. Utilizaremos una optimización lineal debido a la forma en la que se pretende formular la función objetivo, esta se comporta de forma lineal, ya que las variables de decisión que se predeterminaran a continuación serán de grado uno, haciendo factible la aplicación de la programación lineal a un menor costo computacional en la minimización de la función de costo de generación de energía eléctrica de la micro red para la comunidad en estudio, cumpliendo a su vez con la demanda requerida por la misma.

Variables de decisión

Las variables que se tendrán en cuenta para el diseño son: número de módulos fotovoltaicos x_1 , número de aerogeneradores x_2 , número de baterías x_3 , dichas variables de decisión se encuentran agrupadas en el siguiente vector [75].

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$$

Función objetivo

Se realizará una optimización de un solo objetivo, el cual consiste en la minimización del costo de generación de la electricidad dado por la ecuación:

$$f = \min_x C_E(\mathbf{x})$$

donde $C_E(\mathbf{x})$ es el costo de generación de electricidad y viene dado por:

$$C_E(\mathbf{x}) = C_{FV} * x_1 + C_{AE} * x_2 + C_{BAT} * x_3$$

cuyos valores se muestran en la siguiente tabla, basado en la Regulación No. CONELEC – 004/11 de 2011 por la cual se establece (art 6) los Precios Preferentes Energías Renovables

Precios preferentes Energía Renovables en (cUS\$/kWh)

Centrales	Territorio Continental	Territorio Insular de Galápagos
Eólicas C_{AE}	9,13	10,04
Fotovoltaicas C_{FV}	40,03	44,03
Biomasa y biogás < 5 W	11,05	12,16

Biomasa y biogás > 5 W	9,60	10,56
Geotérmicas	13,21	14,53

El costo de la batería por kWh C_{BAT} es de 0,27 \$/kWh al precio actual de mercado.

Programación Lineal para minimización de la función objetivo sujetas a restricciones lineales

La optimización del ejercicio aplicativo, consiste en obtener la configuración optima de micro red tomando como variable de decisión el costo de generación de la energía ($C_E(\mathbf{x})$), este factor es afectado por el costo de la tecnología anualizada en el ciclo de vida útil del elemento, costos de operación, mantenimiento y la volatilidad del recuso.

La programación lineal (PL) implica la minimización o maximización de una función objetivo sujeta a restricciones de límites, igualdad lineal y desigualdad.

La programación lineal es el problema matemático consistente en hallar un vector \mathbf{x} que minimice la función [75],

$$\min_{\mathbf{x}} C^T \mathbf{x}$$

Sujeta a las restricciones lineales:

Restricciones lineales

Formulación	Tipo de restricción
$A\mathbf{x} \leq b$	Restricción de desigualdad
$A_{eq}\mathbf{x} = b_{eq}$	Restricción de igualdad
$lb \leq \mathbf{x} \leq ub$	Restricción obligatoria

donde:

\mathbf{x} : Vector de variables de decisión.

C y b Vectores de coeficientes conocidos.

A : Matriz de coeficientes del sistema.

$[]^T$: es la operación de transponer un vector o matriz.

La función objetivo se expresa en términos de la ecuación canónica de la programación lineal y se detalla su forma matricial [75]:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3) &= C_{FV} * x_1 + C_{AE} * x_2 + C_{BAT} * x_3 \\ &= [C_{FV} \ C_{AE} \ C_{BAT}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \\ &= C^T x \end{aligned}$$

donde

x : Vector de variables de decisión.

La función objetivo a minimizar para la comunidad de Zumbahua queda expresada

$$f(x_1, x_2, x_3) = 0,4003x_1 + 0,0913x_2 + 0,27x_3$$

Restricciones

Restricciones Operacionales

Las restricciones que se consideraron para cada una de las fuentes de generación que conforman la micro red se presentan a continuación, para las cuales se consideran solo valores y límites operacionales positivos, además se deben cumplir con los límites operacionales establecidos [75].

Límites operacionales de tecnología solar

Tecnología fotovoltaica

Tecnología fotovoltaica	
Restricción	Valor
Capacidad de los módulos	$\geq 300 \text{ W}$
Eficiencia de los módulos	$0,15 \leq \eta \leq 0,25$
Horas de recurso	$0 \leq hr \leq 5h$

Los límites establecidos para la generación de energía por medio de la tecnología solar son; la potencia del módulo fotovoltaico ya que debe ser un módulo existente en el mercado, el número de módulos a usar. Además, la eficiencia de los módulos que mejora constantemente con la tecnología y las propiedades de los materiales debe cumplir con el límite determinado que comercialmente oscila entre 15 y 25 %, finalmente las horas de recurso solar para Ecuador oscilan entre 4 y 5 horas diarias.

La restricción obligatoria está basada en el número de módulos fotovoltaicos que pueden implementarse en la comunidad [75].

$$0 \leq x_1 \leq 100$$

Limites operacionales de tecnología eólica

Tecnología eólica

Tecnología eólica	
Restricción	Valor
Capacidad	10 kW
Horas de recurso	$hr \geq 3$
Coefficiente de potencia	0,05 – 0,35
Velocidad del viento	$V > 2 \text{ m/s}$
Distancia de transmisión	$D < 2 \text{ km}$

Los límites establecidos para la generación de energía por medio de la tecnología eólica son; las horas del recurso que no deben ser inferiores a 3 horas debido al alto costo de los aerogeneradores, el coeficiente de potencia o límite de Betz definido con el máximo de 59 %. Además, se debe asegurar una velocidad del viento mayor a 3 m/s para que el aerogenerador pueda producir energía, además se debe tener en cuenta la distancia de los generadores al punto de inyección para evitar pérdidas debido a las largas distancias. La restricción obligatoria está basada en el número de Aerogeneradores de 1 kW que pueden implementarse en la comunidad [75].

$$0 \leq x_2 \leq 1$$

Limites operacionales de tecnología baterías

Tecnología baterías

Tecnología baterías	
Restricción	Valor
Capacidad nominal	$\leq 10 \text{ kW}$
Eficiencia de las baterías	$\eta > 0,70$
Autonomía	$2 \leq hr \leq 8 \text{ h}$

Los límites establecidos para la generación de energía por medio de la tecnología de baterías son; la eficiencia de las baterías debe ser superior al 70 % y tener una autonomía para entrar en servicio que oscile entre 2 y 8 horas.

La restricción obligatoria está basada en el número de banco de baterías de 10 kWh que pueden implementarse en la comunidad [75].

$$0 \leq x_3 \leq 10$$

Finalmente se plantean dos restricciones de desigualdad, la primera que permitirá satisfacer la demanda energética de la localidad definida de la siguiente manera:

$$E_{FV} * x_1 + E_{AE} * x_2 + E_{BAT} * x_3 \geq DE$$

donde:

DE: Demanda energética en kWh

Para la demanda en la comunidad estudiada se asume un 10 % de variación en la carga. Se tiene en cuenta además la energía necesaria para realizar la carga de baterías con el objetivo de garantizar entre 3 y 4 horas de autonomía a la comunidad.

Respecto a los coeficientes que acompañan las variables de decisión en las restricciones, corresponde a la generación de energía en kWh/día de cada una de las fuentes generadoras afectadas por un factor de eficiencia.

$$3x_1 + 2.5x_2 + 0,8x_3 \geq 135 \text{ kWh/día}$$

La segunda permitirá limitar el costo de la energía en dicha localidad.

$$LIM_{CE} \leq 0,4003x_1 + 0,0913x_2 + 0,27x_3$$

LIM_{CE}: Límite del costo de la energía en la comunidad = 0,105 \$/kWh (Fuente ELEPCO)

Variables de decisión	Valor (resultado de la optimización)
x_1 (n° de paneles fotovoltaicos)	36
x_2 (n° de aerogeneradores)	1
x_3 (n° de banco de baterías)	1

Anexo 2. Modelo para ubicación y dimensionamiento de las fuentes eólicas.

Se modela el problema de optimización mediante programación no lineal entera mixta, donde se incluye el recurso del viento en la micro red. Las restricciones se plantean siguiendo lo pautado en Macedo (2015) para flujos de carga óptimos.

Se representa la carga como potencia activa y reactiva constante.

Las pérdidas de potencia activa y reactiva de la rama ij se concentran en el nodo i y nodo j está más próximo a la red de distribución.

Se considera un modelo monofásico ya que el sistema es balanceado.

En la siguiente Figura, se muestra el sistema radial

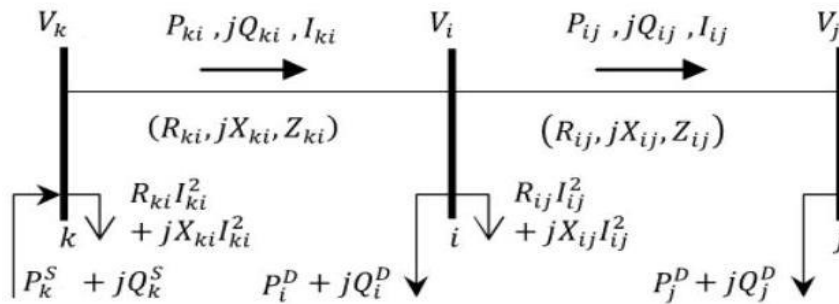


Figura:

V_i : Magnitud de tensión en el nodo inicial i

V_j : Magnitud de tensión en el nodo final j

I_{ij} : Magnitud de corriente en el tramo $i - j$

P_{ij}, Q_{ij} : Flujo de Potencia Activa y Reactiva que sale al nudo i hacia el nodo j (kW)

P_{ki}, Q_{ki} : Flujo de Potencia Activa y Reactiva que llega al nudo i y proviene del nodo k (kW)

R_{ij} : Resistencia asociada a la línea $i - j$

X_{ij} : Reactancia asociada a la línea $i - j$

Z_{ij} : Impedancia asociada a la línea $i - j$

Parámetros del modelo matemático

Los datos que necesita el software de modelamiento están estructurados como sigue.

Conjuntos:

Ω_b : Conjunto de Barras

Ω_l : Conjunto de Líneas

Ω_{wps} : Conjunto de unidades de GD (microturbinas)

Ω_{ss} : Conjunto de unidades de generación SE (Subestación)

Ω_{sd} : Conjunto de unidades de ESD (sistema de almacenamiento de energía)

Parámetros:

i, j, k = Índices de barras

Bus: Número de Barras en el sistema

T : Número de muestras en el periodo de 24 horas D: Número de Días

Δ_t : Tiempo de duración de la demanda [h]

$S_{i,max}^{SE}$: Límite de potencia máxima aparente de la subestación en la barra i [kVA]

$P_i^{d-}; P_i^{d+}$: Potencia mínima y máxima de descarga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i [kW]

$P_i^{c-}; P_i^{ct}$: Potencia mínima y máxima de carga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i [kW]

$E_i^{b-}; E_i^{b+}$: Energía de almacenamiento mínima y máxima del dispositivo de almacenamiento en el nodo i [kWh]

$n_i^c; n_i^d$: Rendimiento de carga y descarga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i [kWh] kVA_{base} : Potencia Base del sistema

P_i^D : Potencia Activa de la carga en la barra i

Q_i^D : Potencia Reactiva de la carga en la barra i

$P_{i,max}^W$: Potencia Activa máxima suministrada por el aerogenerador en la barra i [kW]

$v_{i,\min}$: Magnitud de Tensión mínima en la barra i [V]

$v_{i,\max}$: Magnitud de Tensión máxima en la barra i [V]

$I_{i,\max}$: Magnitud de Corriente máxima en la barra i [A]

$S_{i,\max}$: Potencia Aparente máxima de la subestación [kVA]

c_{SE} : Costo de la energía que proviene de la subestación [\$/kWh]

c_w : Costo de la energía eólica [\$/kWh]

Variables:

P_i^{SE} : Potencia Activa generada por la subestación, inyectada en la barra i [kW]

Q_i^{SE} : Potencia Reactiva generada por la subestación, inyectada en la barra i [kW]

P_i^w : Potencia Activa generada por el aerogenerador [kW]

P_i^b : Potencia Activa generada por el dispositivo del almacenamiento [kW]

E_i^b : Energía generada por el dispositivo del almacenamiento [kWh]

P_i^{sd} : Potencia Activa inyectada por el sistema de almacenamiento [kW]

v_i : Magnitud de tensión en barra i [kV]

I_{ij} : Magnitud de corriente en la línea $i - j$ [A]

Variables Binarias

\bar{e}_i^b : Estado de operación del dispositivo de almacenamiento

Anexo 3: El Modelo de Programación No Lineal Entero Mixto (PNLEM)

Usando el método DistFlow se formula las ecuaciones que se aplicarán en los casos de estudio teniendo en cuenta la incorporación del sistema de almacenamiento [27].

- Función objetivo:

$$\text{minimize } z: \sum_i^{SS} \sum_j^D \sum_t^T P_{ijt}^{SE} * c_{SE} * \Delta t$$

- Restricciones:

$$\sum_{ki \in \Omega} P_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega_1} (P_{ij,d,t} + R_{ij} * I_{ij,d,t}^2) + P_{i,d,t}^{SE} + \sum_{i \in \Omega_{wps}} P_{i,d,t}^W = P_{i,d,t}^D$$

$$\forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$\sum_{ki \in \Omega_1} Q_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega_1} (Q_{i,d,t} + X_{ij} * I_{i,d,t}^2) + Q_{i,d,t}^{SE} = Q_{i,d,t}^D$$

$$\forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$V_{i,d,t}^2 - 2(R_{ij} * P_{ij,d,t} + X_{ij} Q_{ij,d,t}) - Z_{ij}^2 * I_{ij,d,t}^2 - V_{j,d,t}^2 = 0$$

$$\forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$V_{j,d,t}^2 I_{ij,d,t}^2 = P_{ij,d,t}^2 + Q_{ij,d,t}^2 \quad \forall ij \in \Omega_1, \forall_d = 1 \dots D, \forall_t = 1..T$$

- Límite para variables:

$$V_{i,m}^2 \leq v_{i,d,t} \leq V_{i,max}^2 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$0 \leq I_{ij,d,t} \leq I_{i,max}^2 \quad \forall ij \in \Omega_1, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$0 \leq P_{i,d,t}^W \leq P_{i,d,t,m}^W \quad \forall i \in \Omega_{wps}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$P_{i,d,t}^{SE2} + Q_{i,d,t}^{SE2} \leq S_{i,m}^{SE2} \quad \forall i \in \Omega_{wps}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

Se representada a impedancia de la línea de la siguiente manera:

$$Z_{ij}^2 = R_{ij}^2 + jX_{ij}^2$$

$$Z_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Las restricciones representan la formulación del flujo de carga, considerando la inclusión de la producción de la microturbina eólica y la potencia de la batería. Las restricciones representan el balance de potencia activa y reactiva en cada nodo del sistema para cada periodo del tiempo, la restricción es la magnitud de la caída de tensión en términos de potencia activa y reactiva. Las ecuaciones anteriores

garantizan que las variables de decisión siempre estén en sus límites operativos de la red, y, la restricción, considera las limitaciones de la producción de energía eólica por parte de la microturbina [27]

Anexo 4: Modelo para ubicación y dimensionamiento de fotovoltaico.

El modelo planteado busca determinar el lugar y tamaño apropiado para la instalación de plantas solares en una red existente, este problema es de tipo no lineal entero y mixto. Para la modelización del problema de optimización se toman en cuenta los siguientes pasos [28]:

a) Definir datos de entrada: Número de barras del sistema, número de periodos (mínimo 24 horas), potencia base del sistema, costo de inversión de la FV en (dólares/hora), costo de operación y mantenimiento, perfil de carga, perfil de producción FV, parámetros de la red y de la subestación.

b) Especificar variables: Potencia activa y reactiva de la subestación, tamaño y sitio óptimo de la FV, voltaje en barras del sistema y flujos de potencia en la red.

c) Delimitar las restricciones: Límites de voltaje, de potencia de subestación y generación FV, restricción de corriente máxima en conductores, voltaje de referencia y equilibrio de potencia.

d) Las funciones objetivas: En este estudio se trabajaron con dos funciones; primero con minimización de pérdidas en el sistema, y luego con reducción de costos de inversión y operación.

En la ecuación (1), f1 minimiza pérdidas, esto se consigue sumando las pérdidas de las líneas (multiplicando la resistencia R_{ij} por la corriente $I_{ij,d,t}$ elevada al cuadrado) de la red a lo largo del día [28].

$$f1 = \min \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij,d,t}^{sqr} \quad (1)$$

En la segunda función, f2 minimiza costos totales en el día.

$$f2 = \min 24 \left(\sum_{i \in \Omega_{gen}} c_{inc_i} P_i^{FV} \right) + \left(\sum_{i \in \Omega_{SE}} s_{SE_i} p_{SE_{i,d,r}}^{SE} \right) \\ + (c_{0\&M} \sum_{i \in \Omega_{gen}} P_i^{FV} C_{g_{i,d,f}}^{FV}) \quad (2) \\ \forall d = 1, 2, \dots, D \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

Nomenclatura:

SE: Subestación

MVA: Potencia base del sistema [VA]

T: Número de periodos

D: Días que pueden ser analizados

cO&M: Costo de operación y mantenimiento [S/Wh]

cinv: Costo de inversión para fotovoltaica [\$/Wh]

cSE_i^{SE} : Costo de energía en la SE [\$/Wh]

nGd: Número unidades de FV

Rij: Resistencia de línea entre las barras i hasta j [Ω]

Xij: Inductancia de línea entre las barras i hasta j [Ω]

Pmin [i]: Potencia activa mínimo de FV [W]

Pmax [i]: Potencia activa máxima de FV [W]

Vmin [i]: Voltaje mínimo en la barra i [V]

Vmax [i]: Voltaje máximo en la barra [V]

Iij,d,t : Corriente desde la barra i hasta la barra j [A]

S_i : Variable binaria de instalación de fotovoltaica

Ω_{gen} : Conjunto de barras donde se puede colocar FV

Ω_{SE} : Conjunto de barras donde se tiene SE

Ω_{nom} : Conjunto de todas las barras de la red

Ω_l : Conjunto de líneas

$S_{max_{i,d,t}^{SE}}$: Potencia máxima de la subestación [VA]

P_{ijct} : Potencia activa, ij índice de línea, d índice de día, t índice de periodo

$Q_{ij,d,t}$: Curva de potencia reactiva, ij índice de línea, d índice de día, t índice de periodo

$C_c q_{i,d,f}^{FV}$: Curva de producción p.u., i índice de barra, d índice de día, t índice de periodo

P_i^{FV} : Tamaño óptimo de FV [W]

$pSE_{i,i,C}^{SE}$: Potencia activa de SE [W]

$P_{i_C,t}^D$: Potencia activa de demanda [W]

$Q_{i_C,t}^D$: Potencia reactiva de demanda [VAr]

$Q_{i_{ct},t}^{SE}$: Potencia reactiva de SE [VAr]

$V_{i,j,t}$: Voltaje en barras [V] [28].

Las ecuaciones (3), (4), (5), (6) son las ecuaciones de balance de potencia de la red, tanto para potencia activa y reactiva.

$$\sum_{ki \in \Omega} P_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega} (P_{ij,d,t} + R_{ij} I_{ij,d,t}^2) + P_{i,d,t}^{SE} + P_i^{FV} C_t q_{i,d,t}^{FV} = P_{i,d,t}^D \quad (3)$$

$$\forall d = 1, 2, \dots, D \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$\sum_{ki \in \Omega} -Q_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega} (Q_{ij,d,t} + X_{ij} I_{ij,d,t}^2) + Q_{i,d,t}^{SE} = Q_{i,d,t}^D \quad (4)$$

$$\forall d = 1, 2, \dots, D \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$V_{i,d,t}^2 - V_{j,d,t}^2 = 2(R_{ij} P_{ij,d,t} + X_{ij} Q_{ij,d,t}) + Z_{ij}^2 I_{ij,d,t}^{sqr} \quad (5)$$

$$\forall ij = \Omega \quad \forall d = 1, 2, \dots, D \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$V_{j,d,t}^{sqr} I_{ij,d,t}^{sqr} = P_{i_{j,C},d,t}^2 + Q_{ij,d,t}^2 \quad (6)$$

$$\forall ij = \Omega \quad \forall d = 1, 2, \dots, D \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

El límite de voltaje de las barras se restringe con a un mínimo equivalente a 0.95 y un máximo de 1.10 en por unidad.

$$V_{i \min}^2 \leq V_{i,d,t}^2 \leq V_{i \max}^2 \quad (7)$$

$$\forall i = \Omega_{nom} \forall d = 1,2, \dots, D \forall r = 1,2, \dots, T$$

El límite de potencia suministrada a través de la subestación se ilustra en las ecuaciones (8).

$$(P_{i,d,t}^{SE})^2 + (Q_{i,d,t}^{SE})^2 \leq (S_{max_{i,d,f}}^{SE})^2 \quad (8)$$

$$\forall i = SE \forall d = 1,2, \dots, D \forall r = 1,2, \dots, T$$

La producción de las unidades FVs se restringen a cero en potencia reactiva. La potencia activa mínima fue de 5 kW y la máxima es dada por el área disponible [28].

$$P_{min_i S_i} \leq P_i^{FV} \leq P_{max_i S_i} \quad (9)$$

$$\forall i = \Omega_{gen}$$

El límite de corriente es fijado por la máxima corriente que soporta el conductor.

$$0 \leq I_{ij;d,f}^2 \leq I_{i,j}^2_{max}$$

$$(10) \forall ij = \Omega_l \forall d = 1,2, \dots, D \forall r = 1,2, \dots, T$$

El modelo contempla una restricción del número de unidades pudiendo ser una planta FV o múltiples, según el valor que se fije al parámetro nGd.

$$\sum_i S_i = nGd \quad (11)$$

$$\forall i = \Omega_{gen}$$

La barra de la subestación es fijada como la barra de referencia y su valor de voltaje es de uno por unidad. El parámetro bSE contiene el valor de la barra donde se sitúa la subestación.

$$V_{i,d,f} = 1$$

$$(12) \forall i = bSE \forall d = 1,2, \dots, D \forall r = 1,2, \dots, T$$

La variable S es binaria y toma el valor de 1 en caso de instalarse la unidad FV en la barra i, y en caso de no ser así su valor es igual a 0.

$$S_i \in \{0,1\} \forall i \in \Omega_{gen} \quad (13)$$

Anexo 5: Códigos desarrollados en el Lenguaje de Programación de Alto Nivel Matlab/Simulink de MathWorks Inc. Datos autor

Programa 1:

```
% programa que carga los datos tomados por Deyvid
data_sol = xlsread('Datos_Deyvid_Sol.xlsx','Hojal','A2:AV27970');
data_viento =
xlsread('Datos_Deyvid_Viento.xlsx','DatosdepotencialdelViento','A2
:S3586');
```

Programa 2:

```
% programa que separa datos SOL y VIENTO
% Datos SOL SOL
% columna 1 = Fecha
fecha_sol = data_sol(:,1);
% columna 2 = Hora
hora_sol = data_sol(:,2);
% columna 3 = Temperatura
temperatura_sol = data_sol(:,3);
% columna 4 = Radiación Solar
radiacion_sol = data_sol(:,13);

% Datos VIENTO VIENTO
% columna 1 = Fecha_Hora
fecha_hora_viento = data_viento(:,2);
% columna 2 = Velocidad del Viento [m/s]
veloc_viento = data_viento(:,10);
% columna 3 = Velocidad_ráfaga
veloc_rafaga = data_viento(:,11);
% columna 4 = Dirección del Viento
%direc_viento = data_viento(:,12);
```

Programa 3:

```
% acá se grafican todas las variables durante todo el período de
datos
% SOL SOL
% temperatura_sol
% figure;
% plot(temperatura_sol);
% xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('°C');
% title('N! de dato de lectura vs Temperatura [°C]');
% axis([0 27969 0 1500]);
% grid;

% radiación solar
figure;
plot(radiacion_sol);
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('kW/m2');
title('N° de dato de lectura vs Irradiación Solar [kW/m2]');
axis([0 27969 0 1500]);
grid;
figure;
hold on;
```

```

for i = 4:11
    plot(radiacion_sol(294*(i-1) + 1:294*i,1));
end
hold off;
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('kW/m2');
title('N° de dato de lectura vs Irrradiación Solar [kW/m2]');
% axis([0 294 0 1500]);
grid;

figure;
hold on;
for i = 42:49
    plot(radiacion_sol(294*(i-1) + 1:294*i,1));
end
hold off;
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('kW/m2');
title('N° de dato de lectura vs Irrradiación Solar [kW/m2]');
% axis([0 294 0 1500]);
grid;

figure;
hold on;
for i = 70:77
    plot(radiacion_sol(294*(i-1) + 1:294*i,1));
end
hold off;
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('kW/m2');
title('N° de dato de lectura vs Irrradiación Solar [kW/m2]');
% axis([0 294 0 1500]);
grid;

figure;
hold on;
for i = 86:92
    plot(radiacion_sol(294*(i-1) + 1:294*i,1));
end
hold off;
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('kW/m2');
title('N° de dato de lectura vs Irrradiación Solar [kW/m2]');
% axis([0 294 0 1500]);
grid;

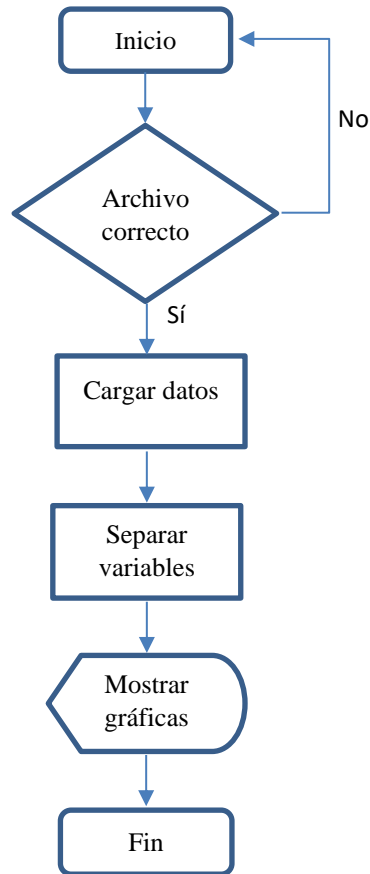
% VIENTO VIENTO
% Velocidad del viento
figure;
plot(veloc_viento);
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('m/s');
title('N° de dato de lectura vs Velocidad del viento [m/s]');
axis([0 3585 0 10]);
grid;

% Ráfaga del viento
figure;
plot(veloc_rafaga);
xlabel('N° de dato de lectura'); ylabel('m/s');
title('N° de dato de lectura vs Velocidad de ráfaga [m/s]');
axis([0 3585 0 10]);
grid;

```

Anexo 6: Códigos desarrollados en el Lenguaje de Programación de Alto Nivel Matlab/Simulink de MathWorks Inc. Datos NASA

Diagrama de flujo



Programa 1:

```
% programa que carga los datos  
data =  
xlsread('Data_Completa.xlsx', 'Data_2001_2010', 'A14:H184093');
```

Programa 2:

```
% programa que separa datos  
% columna 1 = Año  
anio = data(:,1);  
% columna 2 = Mes  
mes = data(:,2);  
% columna 3 = Día  
dia = data(:,3);  
% columna 4 = Hora  
hora = data(:,4);
```

```

% columna 5 = Temperatura a 2 metros
Temp= data(:,5);
% columna 6 = Velocidad del viento a 10 metros
vell10m= data(:,6);
% columna 7 = Dirección del viento a 10 metros
direvien10m= data(:,7);
% columna 8 = Radiación solar
radiasol= data(:,8);

```

Programa 3:

```

% acá se grafican todas las variables durante todo el periodo de
datos

```

```

% temperatura
figure;
plot(Temp);
xlabel('N° hora de 2001-2021'); ylabel('°C');
title('N° hora entre 2001 - 2021 vs Temperatura a 2 m [°C]');
axis([0 184080 0 25]);
grid;

% velocidad de viento
figure;
plot(vell10m);
xlabel('N° hora de 2001-2021'); ylabel('m/s');
title('N° hora entre 2001 - 2021 vs Velocidad de viento a 10 m
[m/s]');
axis([0 184080 0 15]);
grid;

% radiación solar
figure;
plot(radiasol);
xlabel('N° hora de 2001-2021'); ylabel('W/m^2');
title('N° hora entre 2001 - 2021 vs Irrradiación Solar [W/m^2]');
axis([0 184080 0 1100]);
grid;

% dirección del viento
figure;
plot(direvien10m);
xlabel('N° hora de 2001-2021'); ylabel('°');
title('N° hora entre 2001 - 2021 vs Dirección del Viento [°]');
axis([0 184080 0 360]);
grid;

```

Programa 4:

```

% datos por año
[f,c] = size(data);
year_year = zeros();
mes_year = zeros();
day_year = zeros();
hours_year = zeros();
temp_year = zeros();

```

```

vell10m_year = zeros();
direvien10m_year = zeros();
radiasol_year = zeros();
j1 = 1; j2 = 1; j3 = 1; j4 = 1; j5 = 1; j6 = 1; j7 = 1; j8 = 1;
j9 = 1; j10 = 1; j11 = 1; j12 = 1; j13 = 1; j14 = 1; j15 = 1;
j16 = 1; j17 = 1; j18 = 1; j19 = 1; j20 = 1; j21 = 1;
for i = 1:f
    if data(i,1) == 2001
        year_year(j1,1) = data(i,1);
        mes_year(j1,1) = data(i,2);
        day_year(j1,1) = data(i,3);
        hours_year(j1,1) = data(i,4);
        temp_year(j1,1) = data(i,5);
        vell10m_year(j1,1) = data(i,6);
        direvien10m_year(j1,1) = data(i,7);
        radiasol_year(j1,1) = data(i,8);
        j1 = j1 + 1;
    elseif data(i,1) == 2002
        year_year(j2,2) = data(i,1);
        mes_year(j2,2) = data(i,2);
        day_year(j2,2) = data(i,3);
        hours_year(j2,2) = data(i,4);
        temp_year(j2,2) = data(i,5);
        vell10m_year(j2,2) = data(i,6);
        direvien10m_year(j2,2) = data(i,7);
        radiasol_year(j2,2) = data(i,8);
        j2 = j2 + 1;
    elseif data(i,1) == 2003
        year_year(j3,3) = data(i,1);
        mes_year(j3,3) = data(i,2);
        day_year(j3,3) = data(i,3);
        hours_year(j3,3) = data(i,4);
        temp_year(j3,3) = data(i,5);
        vell10m_year(j3,3) = data(i,6);
        direvien10m_year(j3,3) = data(i,7);
        radiasol_year(j3,3) = data(i,8);
        j3 = j3 + 1;
    elseif data(i,1) == 2004
        year_year(j4,4) = data(i,1);
        mes_year(j4,4) = data(i,2);
        day_year(j4,4) = data(i,3);
        hours_year(j4,4) = data(i,4);
        temp_year(j4,4) = data(i,5);
        vell10m_year(j4,4) = data(i,6);
        direvien10m_year(j4,4) = data(i,7);
        radiasol_year(j4,4) = data(i,8);
        j4 = j4 + 1;
    elseif data(i,1) == 2005
        year_year(j5,5) = data(i,1);
        mes_year(j5,5) = data(i,2);
        day_year(j5,5) = data(i,3);
        hours_year(j5,5) = data(i,4);
        temp_year(j5,5) = data(i,5);
        vell10m_year(j5,5) = data(i,6);
        direvien10m_year(j5,5) = data(i,7);
        radiasol_year(j5,5) = data(i,8);
        j5 = j5 + 1;
    elseif data(i,1) == 2006
        year_year(j6,6) = data(i,1);

```

```

mes_year(j6,6) = data(i,2);
day_year(j6,6) = data(i,3);
hours_year(j6,6) = data(i,4);
temp_year(j6,6) = data(i,5);
vell10m_year(j6,6) = data(i,6);
direvien10m_year(j6,6) = data(i,7);
radiasol_year(j6,6) = data(i,8);
j6 = j6 + 1;
elseif data(i,1) == 2007
year_year(j7,7) = data(i,1);
mes_year(j7,7) = data(i,2);
day_year(j7,7) = data(i,3);
hours_year(j7,7) = data(i,4);
temp_year(j7,7) = data(i,5);
vell10m_year(j7,7) = data(i,6);
direvien10m_year(j7,7) = data(i,7);
radiasol_year(j7,7) = data(i,8);
j7 = j7 + 1;
elseif data(i,1) == 2008
year_year(j8,8) = data(i,1);
mes_year(j8,8) = data(i,2);
day_year(j8,8) = data(i,3);
hours_year(j8,8) = data(i,4);
temp_year(j8,8) = data(i,5);
vell10m_year(j8,8) = data(i,6);
direvien10m_year(j8,8) = data(i,7);
radiasol_year(j8,8) = data(i,8);
j8 = j8 + 1;
elseif data(i,1) == 2009
year_year(j9,9) = data(i,1);
mes_year(j9,9) = data(i,2);
day_year(j9,9) = data(i,3);
hours_year(j9,9) = data(i,4);
temp_year(j9,9) = data(i,5);
vell10m_year(j9,9) = data(i,6);
direvien10m_year(j9,9) = data(i,7);
radiasol_year(j9,9) = data(i,8);
j9 = j9 + 1;
elseif data(i,1) == 2010
year_year(j10,10) = data(i,1);
mes_year(j10,10) = data(i,2);
day_year(j10,10) = data(i,3);
hours_year(j10,10) = data(i,4);
temp_year(j10,10) = data(i,5);
vell10m_year(j10,10) = data(i,6);
direvien10m_year(j10,10) = data(i,7);
radiasol_year(j10,10) = data(i,8);
j10 = j10 + 1;
elseif data(i,1) == 2011
year_year(j11,11) = data(i,1);
mes_year(j11,11) = data(i,2);
day_year(j11,11) = data(i,3);
hours_year(j11,11) = data(i,4);
temp_year(j11,11) = data(i,5);
vell10m_year(j11,11) = data(i,6);
direvien10m_year(j11,11) = data(i,7);
radiasol_year(j11,11) = data(i,8);
j11 = j11 + 1;
elseif data(i,1) == 2012

```



```

year_year(j12,12) = data(i,1);
mes_year(j12,12) = data(i,2);
day_year(j12,12) = data(i,3);
hours_year(j12,12) = data(i,4);
temp_year(j12,12) = data(i,5);
vell10m_year(j12,12) = data(i,6);
direvien10m_year(j12,12) = data(i,7);
radiasol_year(j12,12) = data(i,8);
j12 = j12 + 1;
elseif data(i,1) == 2013
year_year(j13,13) = data(i,1);
mes_year(j13,13) = data(i,2);
day_year(j13,13) = data(i,3);
hours_year(j13,13) = data(i,4);
temp_year(j13,13) = data(i,5);
vell10m_year(j13,13) = data(i,6);
direvien10m_year(j13,13) = data(i,7);
radiasol_year(j13,13) = data(i,8);
j13 = j13 + 1;
elseif data(i,1) == 2014
year_year(j14,14) = data(i,1);
mes_year(j14,14) = data(i,2);
day_year(j14,14) = data(i,3);
hours_year(j14,14) = data(i,4);
temp_year(j14,14) = data(i,5);
vell10m_year(j14,14) = data(i,6);
direvien10m_year(j14,14) = data(i,7);
radiasol_year(j14,14) = data(i,8);
j14 = j14 + 1;
elseif data(i,1) == 2015
year_year(j15,15) = data(i,1);
mes_year(j15,15) = data(i,2);
day_year(j15,15) = data(i,3);
hours_year(j15,15) = data(i,4);
temp_year(j15,15) = data(i,5);
vell10m_year(j15,15) = data(i,6);
direvien10m_year(j15,15) = data(i,7);
radiasol_year(j15,15) = data(i,8);
j15 = j15 + 1;
elseif data(i,1) == 2016
year_year(j16,16) = data(i,1);
mes_year(j16,16) = data(i,2);
day_year(j16,16) = data(i,3);
hours_year(j16,16) = data(i,4);
temp_year(j16,16) = data(i,5);
vell10m_year(j16,16) = data(i,6);
direvien10m_year(j16,16) = data(i,7);
radiasol_year(j16,16) = data(i,8);
j16 = j16 + 1;
elseif data(i,1) == 2017
year_year(j17,17) = data(i,1);
mes_year(j17,17) = data(i,2);
day_year(j17,17) = data(i,3);
hours_year(j17,17) = data(i,4);
temp_year(j17,17) = data(i,5);
vell10m_year(j17,17) = data(i,6);
direvien10m_year(j17,17) = data(i,7);
radiasol_year(j17,17) = data(i,8);
j17 = j17 + 1;

```

```

elseif data(i,1) == 2018
    year_year(j18,18) = data(i,1);
    mes_year(j18,18) = data(i,2);
    day_year(j18,18) = data(i,3);
    hours_year(j18,18) = data(i,4);
    temp_year(j18,18) = data(i,5);
    vell10m_year(j18,18) = data(i,6);
    direvien10m_year(j18,18) = data(i,7);
    radiasol_year(j18,18) = data(i,8);
    j18 = j18 + 1;
elseif data(i,1) == 2019
    year_year(j19,19) = data(i,1);
    mes_year(j19,19) = data(i,2);
    day_year(j19,19) = data(i,3);
    hours_year(j19,19) = data(i,4);
    temp_year(j19,19) = data(i,5);
    vell10m_year(j19,19) = data(i,6);
    direvien10m_year(j19,19) = data(i,7);
    radiasol_year(j19,19) = data(i,8);
    j19 = j19 + 1;
elseif data(i,1) == 2020
    year_year(j20,20) = data(i,1);
    mes_year(j20,20) = data(i,2);
    day_year(j20,20) = data(i,3);
    hours_year(j20,20) = data(i,4);
    temp_year(j20,20) = data(i,5);
    vell10m_year(j20,20) = data(i,6);
    direvien10m_year(j20,20) = data(i,7);
    radiasol_year(j20,20) = data(i,8);
    j20 = j20 + 1;
elseif data(i,1) == 2021
    year_year(j21,21) = data(i,1);
    mes_year(j21,21) = data(i,2);
    day_year(j21,21) = data(i,3);
    hours_year(j21,21) = data(i,4);
    temp_year(j21,21) = data(i,5);
    vell10m_year(j21,21) = data(i,6);
    direvien10m_year(j21,21) = data(i,7);
    radiasol_year(j21,21) = data(i,8);
    j21 = j21 + 1;
else
    MMMM = 0;
end
end
end

```

Programa 5:

```

% creación de gráficas por años

% gráfica por año la temperatura
figure;
hold on;
for ii = 1:21
    plot(temp_year(:,ii));
end
hold off;

```

```

legend('2001','2002','2003','2004','2005','2006','2007','2008','20
09',...

'2010','2011','2012','2013','2014','2015','2016','2017','2018',...
'2019','2020','2021');
xlabel('N° hora'); ylabel('°C');
title('N° hora por año entre 2001 - 2021 vs Temperatura a 2 m
[°C]');
grid;

% gráfica por año de la velocidad del viento
figure;
hold on;
for ii = 1:21
    plot(vell10m_year(:,ii));
end
hold off;
legend('2001','2002','2003','2004','2005','2006','2007','2008','20
09',...

'2010','2011','2012','2013','2014','2015','2016','2017','2018',...
'2019','2020','2021');
xlabel('N° hora'); ylabel('m/s');
title('N° hora por año entre 2001 - 2021 vs Velocidad de viento a
10 m [°C]');
grid;

% gráfica por año de la dirección del viento
figure;
hold on;
for ii = 1:21
    plot(direvien10m_year(:,ii));
end
hold off;
legend('2001','2002','2003','2004','2005','2006','2007','2008','20
09',...

'2010','2011','2012','2013','2014','2015','2016','2017','2018',...
'2019','2020','2021');
xlabel('N° hora'); ylabel('°');
title('N° hora por año entre 2001 - 2021 vs Dirección de viento a
10 m [°C]');
grid;

% gráfica por año de radiación solar
figure;
hold on;
for ii = 1:21
    plot(radiasol_year(:,ii));
end
hold off;
legend('2001','2002','2003','2004','2005','2006','2007','2008','20
09',...

'2010','2011','2012','2013','2014','2015','2016','2017','2018',...
'2019','2020','2021');
xlabel('N° hora'); ylabel('kW/m^2');

```

```

title('N° hora por año entre 2001 - 2021 vs Irradiación solar
[°C]');
grid;

```

Programa 6:

```

% Evaluación del recurso viento

% cálculo de la velocidad promedio
N = length(vell10m)
U = sum(vell10m(:,1))/N

% cálculo de la desviación estándar
suma = 0;
for i1 = 1:N
    suma = suma + (vell10m(i1,1) - U).^2;
end
des_stand_U = sqrt(suma/(N-1))

% cálculo de la densidad de potencia
R = 287.05;
g = 9.81;
ro_0 = 101325;
z = 3850;
suma1 = 0;
for i2 = 1:N
    suma1 = suma1 + ((ro_0/(R*(Temp(i2,1) + 273.15))))*exp((-
g*z)/(R*(Temp(i2,1) + 273.15))))*...
    vell10m(i2,1).^2;
end
den_pot = 0.5*suma1/N

% cálculo de la densidad de energía
suma2 = 0;
for i3 = 1:N
    suma2 = suma2 + ((ro_0/(R*(Temp(i3,1) + 273.15))))*exp((-
g*z)/(R*(Temp(i3,1) + 273.15))))*...
    vell10m(i2,1).^3;
end
den_ene = 0.5*suma2/N

```

Programa 7:

```

% Evaluación del Recurso Solar

% Cálculo con celda tipo 1
P_STC = 168; % eficiencia del 16.8 %
G_STC = 1000;
k = 0.00441;
Tr = 25;

N=length(vell10m)
suma3 = 0;
for i4 = 1:N

```

```
        suma3 = suma3 + P_STC*(radiasol(i4,1)/G_STC)*(1 -  
k*(Temp(i4,1)- Tr));  
end  
En_sol_por_year = suma3/21;
```

Programa 8:

```
% Cálculo de energía eléctrica anual a partir de viento
```

```
Cp = 0.05:0.05:0.35;  
ef_m = 0.9;  
ef_g = 0.9;  
Ha = 8760;  
dP = 3.4938;  
dE = 0.2943;  
EEA_dP = 0;  
EEA_dE = 0;  
  
EEA_dP = Cp*dP*ef_m*ef_g*Ha  
EEA_dE = Cp*dE*ef_m*ef_g*Ha
```