



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

### MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

**Título:**

---

**Análisis del uso y la producción de la energía eléctrica de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico en la azotea de un edificio de educación.**

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad  
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

**Autor:**

Ing. Vaca Ortega Gabriel Alejandro

**Tutor:**

Ing. Salazar Achig Edgar Roberto, Mg.

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2024**

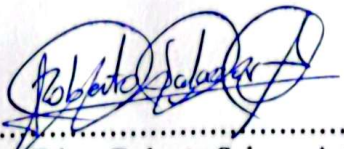
## **AVAL DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación **“ANÁLISIS DEL USO Y LA PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO EN LA AZOTEA DE UN EDIFICIO DE EDUCACIÓN”** presentado por Vaca Ortega Gabriel Alejandro, para optar por el título magíster 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, julio, 22, 2024

  
.....  
Ing. Edgar Roberto Salazar Achig, Mg.  
C.C.: 0502847619

## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: "ANÁLISIS DEL USO Y LA PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO EN LA AZOTEA DE UN EDIFICIO DE EDUCACIÓN", ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en 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, agosto, 07, 2024



.....  
Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, Mg.  
C.C.: 0503287864  
Presidente del tribunal



.....  
Ing. Edison Xavier Panchi Escobar, Mg.  
C.C.: 0504027277  
Lector 2



.....  
Ing. Fernando Rafael Arias Atiaja, Mg.  
C.C.: 0502556251  
Lector 3

## DEDICATORIA

A Dios, a quien debo mi existencia y fortaleza, mi eterna gratitud por guiarme en cada paso de esta travesía.

A mi querida familia, pilar incansable en mis días de lucha y logro, cuyo amor y apoyo han sido el motor de mi vida personal, académica y profesional.

A mi madre Anita, que desde el cielo ilumina mi camino y cuya memoria vive en cada uno de mis triunfos.

A mi hija Analía, mi faro y mi inspiración constante, por ser la fuente inagotable de mi perseverancia y el motivo por el cual me esfuerzo cada día por ser mejor.

Gabriel Vaca

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por sus bendiciones y por proteger a mi familia. Extiendo mi gratitud a todas las autoridades, docentes y personal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, que han facilitado mi formación académica y permitido la realización de esta investigación, bajo la valiosa guía de mi tutor, el Mg. Roberto Salazar.

También quiero expresar mi agradecimiento a las autoridades, docentes y personal del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua, quienes brindaron su apoyo y abrieron sus puertas para la ejecución de este proyecto.

Gabriel Vaca

## RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

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

Latacunga, julio, 22, 2024

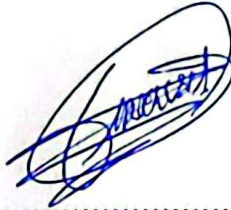


.....  
Gabriel Alejandro Vaca Ortega  
C.C.: 1804456372

## 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, julio, 22, 2024

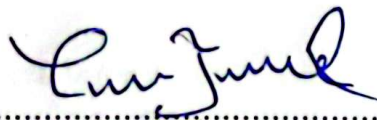


.....  
Gabriel Alejandro Vaca Ortega  
C.C.: 1804456372

## **AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “ANÁLISIS DEL USO Y LA PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO EN LA AZOTEA DE UN EDIFICIO DE EDUCACIÓN”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, agosto, 07, 2024



.....  
Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, Mg.  
C.C.: 0503287864

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

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

**Título: Análisis del uso y la producción de la energía eléctrica de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico en la azotea de un edificio de educación**

**Autor:** Vaca Ortega Gabriel Alejandro, Mg.

**Tutor:** Salazar Achig Edgar Roberto, Mg.

**RESUMEN**

El presente proyecto aborda la viabilidad de implementar un sistema híbrido de generación eléctrica que combine fuentes eólicas y fotovoltaicas en la azotea de un edificio del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua, en respuesta a los altos costos de consumo energético y a los cortes de energía en Ecuador. El objetivo principal es realizar un análisis del uso y producción de energía eléctrica mediante simulaciones, con el fin de reducir la facturación del consumo en las instalaciones educativas. La metodología empleada incluye un enfoque cuantitativo, con fases que abarcan la recopilación de datos sobre la demanda eléctrica y el consumo histórico del edificio, así como la medición de variables climáticas mediante una estación meteorológica. Se llevará a cabo un análisis de coincidencia entre el uso y la generación de energía, seguido de la modelación y simulación del sistema híbrido utilizando software especializado. Los resultados permitirán evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto, identificando la capacidad del sistema para reducir el consumo eléctrico y generar ahorros monetarios significativos para la institución. Este estudio no solo contribuirá a la sostenibilidad energética del campus, sino que también servirá como un modelo replicable para otras instituciones educativas en el país, promoviendo el uso de energías renovables y la eficiencia energética en el contexto ecuatoriano.

**PALABRAS CLAVE:** Energía híbrida; fotovoltaica; eólica; sostenibilidad; eficiencia energética; simulación.

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI  
DIRECCION DE POSGRADO**

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

**Title: Analysis of the use and production of electrical energy from a hybrid photovoltaic-wind system on the rooftop of an educational building**

**Author:** Vaca Ortega Gabriel Alejandro, Mg.

**Tutor:** Salazar Achig Edgar Roberto, Mg.

**ABSTRACT**

The project presents the feasibility of implementing a hybrid electricity generation system that combines wind and photovoltaic sources on the rooftop of a building at the Instituto Superior Tecnológico Tungurahua, in response to high energy consumption costs and power outages in Ecuador. The main objective is to carry out an analysis of the use and production of electrical energy through simulations, in order to reduce the billing of consumption in educational facilities. The methodology employed includes a quantitative approach, with phases that cover the collection of data on the electrical demand and historical consumption of the building, as well as the measurement of climatic variables using a weather station. A coincidence analysis between energy use and generation will be carried out, followed by the modeling and simulation of the hybrid system using specialized software. The results will allow evaluating the technical, economic and environmental viability of the project, identifying the system's capacity to reduce electricity consumption and generate significant monetary savings for the institution. This study will not only contribute to the energy sustainability of the campus but will also serve as a replicable model for other educational institutions in the country, promoting the use of renewable energies and energy efficiency in the Ecuadorian context.

**KEYWORDS:** Hybrid energy; photovoltaic; wind; sustainability; energy efficiency; simulation.

## **AVAL DE TRADUCCIÓN**

**Tatiana Elizabeth Pérez Freire con cédula de identidad número: 1803878469 Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1010-10-978533; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “ANÁLISIS DEL USO Y LA PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-EÓLICO EN LA AZOTEA DE UN EDIFICIO DE EDUCACIÓN”. De: GABRIEL ALEJANDRO VACA ORTEGA, aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.**

Latacunga, agosto, 7, 2024.



.....  
**Lic. Tatiana Elizabeth Pérez Freire**  
**C.C.: 1803878469**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	17
Antecedentes .....	17
Planteamiento del problema.....	19
Formulación del problema.....	20
Objetivo General .....	20
Objetivos Específicos .....	20
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos .....	20
Justificación .....	21
Hipótesis .....	22
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA .....	23
1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.- ...	23
1.2 Fundamentación Teórica.....	25
1.3 Fundamentación metodológica.....	45
1.4 Conclusiones Capítulo I. ....	49
CAPÍTULO II. PROPUESTA.....	51
2.1 Título del proyecto.....	51
2.2 Objetivo del proyecto.....	51
2.3 Descripción de la propuesta. ....	51
2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados .....	51
2.5 Conclusiones Capítulo II.- .....	70
CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA .....	71
3.1 Análisis de los resultados: .....	71
3.2 Evaluación de impactos o resultados: .....	79
3.3 Validación económica de los resultados: .....	84
3.4 Conclusiones Capitulo III. - .....	85
Conclusiones generales .....	86
Recomendaciones .....	87
Referencias bibliográficas: .....	88

ANEXOS.....	92
-------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rosa de los vientos.....	28
Figura 2. Ejemplo de Distribución de Weibull.....	29
Figura 3. Ejemplo de una curva de potencia de un aerogenerador [11] .....	34
Figura 4. Componentes de la estación meteorológica WS-2902A [46].....	45
Figura 5. Metodología para el desarrollo de la investigación .....	46
Figura 6. Estación meteorológica instalada en la azotea del edificio educativo. ....	53
Figura 7. Rosa de Vientos del año 2023 en el software WRPLOT View.....	54
Figura 8. Rosa de Vientos 2023 con Google Earth. ....	54
Figura 9. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de enero.....	56
Figura 10. Aproximación lineal Weibull para el primer mes del año.....	60
Figura 11. Función distribución de Weibull para el mes de enero .....	62
Figura 12. Variación de la velocidad media del 2023 .....	66
Figura 13. Niveles de irradiación solar. ....	67
Figura 14. Curva de potencia .....	72
Figura 15. Curvas características de paneles fotovoltaicos.....	74
Figura 16. Curva de Voltaje vs Potencia.....	74
Figura 17. Curva de Voltaje vs Intensidad de Corriente.....	75
Figura 18. Curva de Voltaje vs Potencia.....	76
Figura 19. Curva de Voltaje vs Corriente .....	76
Figura 20. Pasos para la simulación.....	80
Figura 21. Gráfico estadístico de irradiación solar en el software Homer Pro.. ....	80
Figura 22. Gráfico estadístico de velocidad de viento en el software Homer Pro. ....	81
Figura 23. Diagrama esquemático del sistema híbrido.....	81
Figura 24. Costos de implementación del sistema.....	82
Figura 25. Producción mensual de energía eléctrica por cada fuente.....	82
Figura 26. Potencia eléctrica de salida de la generación fotovoltaica .....	82

Figura 27. Potencia eléctrica de salida de la generación eólica .....	83
Figura 28. Estado de carga del banco de baterías.....	83
Figura 29. Costo de elementos del sistema híbrido. ....	84
Figura 30. Flujo de caja en el tiempo del sistema .....	84
Figura 31. Rosa de Vientos del mes de enero 2023 en el software WRPLOT View. 92	
Figura 32. Rosa de Vientos del mes de enero 2023 con Google Earth.....	92
Figura 33. Rosa de Vientos de febrero 2023 en el software WRPLOT View. ....	93
Figura 34. Rosa de Vientos del mes de febrero 2023 con Google Earth. ....	93
Figura 35. Rosa de Vientos del mes de marzo 2023 en el software WRPLOT View 93	
Figura 36. Rosa de Vientos del mes de marzo 2023 con Google Earth.....	94
Figura 37. Rosa de Vientos del mes de abril 2023 en el software WRPLOT View... 94	
Figura 38. Rosa de Vientos del mes de abril 2023 con Google Earth .....	94
Figura 39. Rosa de Vientos del mes de mayo 2023 en el software WRPLOT View . 95	
Figura 40. Rosa de Vientos del mes de mayo 2023 con Google Earth.....	95
Figura 41. Rosa de Vientos del mes de junio 2023 en el software WRPLOT View.. 95	
Figura 42. Rosa de Vientos del mes de junio 2023 con Google Earth .....	96
Figura 43. Rosa de Vientos del mes de julio 2023 en el software WRPLOT View... 96	
Figura 44. Rosa de Vientos del mes de julio 2023 con Google Earth .....	96
Figura 45. Rosa de Vientos del mes de agosto 2023 en el software WRPLOT View 97	
Figura 46. Rosa de Vientos del mes de agosto 2023 con Google Earth .....	97
Figura 47. Rosa de Vientos de septiembre 2023 en el software WRPLOT View..... 97	
Figura 48. Rosa de Vientos del mes de septiembre 2023 con Google Earth .....	98
Figura 49. Rosa de Vientosde octubre 2023 en el software WRPLOT View.....	98
Figura 50. Rosa de Vientos del mes de octubre 2023 con Google Earth.....	98
Figura 51. Rosa de Vientos de noviembre 2023 en el software WRPLOT View. ....	99
Figura 52. Rosa de Vientos del mes de noviembre 2023 con Google Earth.....	99
Figura 53. Rosa de Vientos de diciembre 2023 en el software WRPLOT View .....	99
Figura 54. Rosa de Vientos del mes de diciembre 2023 con Google Earth.....	100
Figura 55. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de febrero. ....	101
Figura 56. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de marzo.....	101

Figura 57. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de abril. ....	102
Figura 58. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de mayo. ....	102
Figura 59. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de junio. ....	103
Figura 60. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de julio. ....	103
Figura 61. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de agosto. ....	104
Figura 62. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de septiembre. ....	104
Figura 63. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de octubre. ....	105
Figura 64. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de noviembre. ....	105
Figura 65. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de diciembre. ....	106
Figura 66. Aproximación lineal de Weibull para el mes de febrero. ....	107
Figura 67. Aproximación lineal de Weibull para el mes de marzo. ....	107
Figura 68. Aproximación lineal de Weibull para el mes de abril. ....	108
Figura 69. Aproximación lineal de Weibull para el mes de mayo. ....	108
Figura 70. Aproximación lineal de Weibull para el mes de junio. ....	109
Figura 71. Aproximación lineal de Weibull para el mes de julio. ....	109
Figura 72. Aproximación lineal de Weibull para el mes de agosto. ....	110
Figura 73. Aproximación lineal de Weibull para el mes de septiembre. ....	110
Figura 74. Aproximación lineal de Weibull para el mes de octubre. ....	111
Figura 75. Aproximación lineal de Weibull para el mes de noviembre. ....	111
Figura 76. Aproximación lineal de Weibull para el mes de diciembre. ....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tareas en relación a los objetivos específicos. ....	20
Tabla 2. Comparativa de tipos de paneles solares. ....	36
Tabla 3. Comparativa de tipos de inversores. ....	37
Tabla 4. Comparativa de los tipos de batería. ....	39
Tabla 5. Velocidad media mensual y anual con el software. ....	55
Tabla 6. Frecuencia absoluta mensual. ....	56
Tabla 7. Frecuencia relativa mensual del 2023. ....	57

Tabla 8. Frecuencia acumulada mensual. ....	58
Tabla 9. Parámetros de forma y escala mensual y anual .....	60
Tabla 10. Probabilidades de Weibull mensuales .....	61
Tabla 11. Velocidad media mensual y anual con el método de Weibull .....	63
Tabla 12. Información para la velocidad media del primer mes .....	64
Tabla 13. Velocidad media mensual y anual con el método de Rayleigh .....	65
Tabla 14. Velocidad media promediada mensual y anual.....	65
Tabla 15. Promedio de la radiación solar.....	67
Tabla 16. Histórico de consumo eléctrico 2015-2022 del IST Tungurahua .....	68
Tabla 17. Histórico de tarifa eléctrica 2015-2022 del IST Tungurahua .....	68
Tabla 18. Histórico de demanda eléctrica 2015-2022 del IST Tungurahua .....	69
Tabla 19. Características técnicas del micro aerogenerador .....	71
Tabla 20. Intervalo de operación del aerogenerador.....	71
Tabla 21. Características técnicas del panel fotovoltaico .....	72
Tabla 22. Potencia eléctrica e intensidad corriente a temperatura constante.....	75
Tabla 23. Voltaje, potencia e intensidad de corriente a irradiancia constante.....	76
Tabla 24. Características técnicas del acumulador adquirido. ....	78
Tabla 25. Características técnicas del inversor a utilizar .....	78
Tabla 26. Datos para la velocidad media del mes de febrero.....	113
Tabla 27. Datos para la velocidad media del mes de marzo .....	113
Tabla 28. Datos para la velocidad media del mes de abril.....	114
Tabla 29. Datos para la velocidad media del mes de mayo. ....	114
Tabla 30. Datos para la velocidad media del mes de junio.....	115
Tabla 31. Datos para la velocidad media del mes de julio.....	115
Tabla 32. Datos para la velocidad media del mes de agosto.....	116
Tabla 33. Datos para la velocidad media del mes de septiembre.....	116
Tabla 34. Datos para la velocidad media del mes de octubre. ....	117
Tabla 35. Datos para la velocidad media del mes de noviembre. ....	117
Tabla 36. Datos para la velocidad media del mes de diciembre. ....	118

# INTRODUCCIÓN

## **Antecedentes:**

El tema propuesto se encuadra dentro de la línea de investigación de la maestría de la Universidad Técnica de Cotopaxi: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, específicamente, se alinea con la sublínea de investigación denominada Conversión y uso racional de la energía eléctrica, centrada en la generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales.

Para brindar soporte legal al estudio de este tipo de investigación, se presenta la normativa que facilita la gestión y aplicación de las energías renovables, proporcionando un apoyo para el diseño y uso de fuentes de energía no convencionales.

- El Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER) fue creado por el gobierno del Ecuador mediante decreto ejecutivo n.475 el 19 de julio de 2007. El ministerio es responsable de la planificación del sector eléctrico y se esfuerza por promover la eficiencia energética en el país, así como la creación y utilización de tecnologías ambientales limpias, confiables y probadas. Entre sus objetivos se encuentra la diversificación de las fuentes de energía renovables.
- El Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE) del MEER fue creado para incentivar el uso eficiente de los recursos energéticos en el país. Nuestros esfuerzos se centran en mejorar la eficiencia energética de los electrodomésticos y reducir el consumo de combustibles fósiles a través de una variedad de programas y proyectos, todos los cuales tienen como objetivo contribuir a la protección del medio ambiente.
- El PLANEE tiene como objetivo fomentar el uso de energías renovables y equipos eficientes entre 2016 y 2035. Para lograrlo, se promueve la exoneración de impuestos para la adopción de estas tecnologías. Se prevé que Ecuador consumirá 543 Mbep, lo que resultará en un ahorro de USD 84,131 millones para el país. Además, se estableció el Instituto Nacional de Eficiencia

Energética (INER) para impulsar el uso responsable y el desarrollo de energías limpias.

- En Ecuador, se implementan políticas de estímulo para fomentar el uso de energías renovables, según lo establecido en el artículo 67 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico. Esta normativa exime del pago de aranceles, impuestos adicionales y gravámenes a la importación de materiales y equipos no fabricados en el país, destinados a la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas de energía solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras. Además, las empresas que invierten en la instalación y operación de centrales de producción de electricidad mediante recursos energéticos no convencionales están exentas del impuesto sobre la renta durante cinco años.
- La disposición inicial de la Regulación Nro. ARCERNNR 002/21 establece el procedimiento para liquidar las transacciones comerciales de las empresas generadoras y los excedentes de las empresas autogeneradoras que utilizan energías renovables no convencionales. Según esta normativa, el CENACE debe calcular el valor de la energía entregada al sistema eléctrico mediante los Títulos Habitantes, y la ARCERNNR proporcionará esta información al CENACE. Los valores económicos de inversión serán cubiertos tanto para la demanda regulada como no regulada, en función de su demanda comercial.
- Las leyes ambientales del Gobierno de Ecuador, como se establece en el artículo 6 de la Ley Ambiental, promueven el uso racional de los recursos naturales no renovables dentro de áreas protegidas, considerando los intereses nacionales. Además, el artículo 19 especifica que las obras públicas, privadas o mixtas, así como los proyectos de inversión con impacto ambiental, deben evaluarse antes de su implementación.
- La investigación tiene relevancia internacional al alinearse con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, específicamente el ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante, al promover fuentes de energía renovable y mejorar la eficiencia energética, y el ODS 11:

Ciudades y Comunidades Sostenibles, al integrar sistemas de energía renovable en edificios educativos, creando infraestructuras más sostenibles y resilientes. Además, se ajusta a las normas internacionales de la IEC (International Electrotechnical Commission), que proporcionan directrices técnicas y de seguridad para los sistemas renovables de energía fotovoltaica y eólica, y a la norma ISO 50001, que mejora la eficiencia energética en organizaciones. La investigación no solo aplicará estas normas sino que también podría contribuir a su mejora en el contexto específico de los edificios educativos

Estos argumentos respaldan el análisis y desarrollo de proyectos que utilizan energías renovables, justificando así la gestión del presente proyecto, cuyo objetivo es evaluar los aspectos mencionados anteriormente.

**Planteamiento del problema:** Uno de los retos más importantes que afronta el planeta es el calentamiento global, resultado del uso ineficiente o incorrecto de la energía, lo cual ha perjudicado gravemente al medio ambiente. La principal causa de este deterioro es el efecto invernadero, generado por el consumo de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, que emiten gases tóxicos que alteran las capas atmosféricas y afectan el entorno.

El crecimiento de la población en Ecuador ha llevado a un incremento en el consumo de energía, lo que a su vez causa picos de carga en los transformadores. Esto exige inversiones en la expansión o mejora del sistema de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Aunque esta medida cubre la demanda mediante la potencia suministrada por las centrales hidroeléctricas del país, durante las épocas de sequía se necesita recurrir a la generación térmica para satisfacer la demanda máxima en las horas pico. Esta generación térmica es más costosa y tiene altos índices de contaminación, lo que contribuye a la destrucción de ecosistemas únicos en el territorio ecuatoriano.

En los últimos años, el campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua ha experimentado un aumento en las cargas instaladas, el consumo de energía, la

facturación del servicio eléctrico y la carga del transformador. los cortes de energía en Ecuador durante los últimos meses han obligado a suspender e interrumpir las actividades académicas y administrativas. Estos cortes se deben principalmente a la escasez de recursos hídricos para la generación hidroeléctrica, problemas de mantenimiento en las infraestructuras eléctricas y un incremento en la demanda de electricidad que ha superado la capacidad de suministro del país. Ante estos desafíos, las fuentes de energía renovable se plantean como una solución viable.

**Formulación del problema:** ¿Cuáles serían los resultados de un análisis sobre el uso y la producción de la energía eléctrica de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico en la azotea de un edificio del campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua?

**Objetivo General:** Realizar un análisis del uso y la producción de la energía eléctrica mediante la simulación de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico para reducir la facturación de consumo de las instalaciones del campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua.

**Objetivos Específicos:**

1. Realizar el estado del arte de generación de electricidad mediante el uso de energías alternativas aplicados a instalaciones educativas.
2. Evaluar la factibilidad de implementación de un sistema de generación con fuentes alternativas desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.
3. Simular el sistema híbrido de generación eléctrica propuesto mediante software especializado para una futura implementación del mismo.

**Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:**

**Tabla 1. Tareas en relación a los objetivos específicos.**

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividad (tareas)</b>	<b>Resultado de la actividad</b>	<b>Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)</b>
Realizar el estado del arte de generación de electricidad	-Búsqueda de información en medios	-Fundamentación técnica teórica para el progreso de la investigación.	-Fuentes bibliográficas. -Procedimientos sistemáticos. -Ecuaciones.

mediante el uso de energías alternativas aplicados a instalaciones educativas.	físicos y digitales. -Indagación en textos argumentativos y obras impresas dedicadas al estudio de sistemas híbridos con fuentes renovables.	-Metodología para el estudio de factibilidad de sistemas autosustentables.	
Evaluar la factibilidad de implementación de un sistema de generación con fuentes alternativas desde el punto de vista técnico, económico y ambiental	-Recoger datos de la demanda eléctrica. -Medir variables utilizando una estación meteorológica. -Determinar la relación costo-beneficio.	-Reporte de análisis de factibilidad técnico, económico y ambiental.	- Tablas de resultados de demanda eléctrica. - Tablas de resultados de estación meteorológica. - Facturas de consumo eléctrico.
Simular el sistema híbrido de generación eléctrica propuesto mediante software especializado para una futura implementación del mismo	-Modelar el sistema de generación híbrido en un software. -Analizar resultados -Emitir conclusiones, recomendaciones y sugerir trabajos futuros.	-Estimación del estado del sistema.	- Modelado en software.

*Elaborado por: Autor*

### **Justificación:**

La importancia del proyecto de investigación planteado radica en que los costos económicos asociados a las tarifas eléctricas son actualmente altos, ya que las instalaciones del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua son compartidas con el Servicio Ecuatoriano de Capacitación Profesional (SECAP). Además, el incremento de

estudiantes y la demanda de las clases prácticas presenciales ha incrementado el uso de máquinas eléctricas, lo que ha aumentado el consumo de energía.

El estudio propuesto es altamente viable, dado que el Instituto Superior Tecnológico Tungurahua ofrece la carrera de Tecnología Superior en Electricidad, en la que labora el autor del estudio, lo cual facilita el acceso a todas las instalaciones y el uso de equipos como estaciones meteorológicas, analizadores de redes eléctricas y módulos didácticos disponibles en los laboratorios y talleres.

Los beneficiarios de esta investigación serán la comunidad académica del IST Tungurahua y del SECAP, incluyendo aproximadamente 600 estudiantes, 60 docentes y 10 administrativos que utilizan las instalaciones del campus matriz.

Además, basándose en los resultados del estudio, se propondrán mejoras para futuros proyectos relacionados con las demás carreras ofrecidas por la institución, como Electrónica, Mecánica Industrial y Mecánica Automotriz.

**Hipótesis:** Si se genera electricidad con fuentes renovables se satisfará la demanda energética del campus matriz del IST Tungurahua y será posible reducir la facturación de consumo.

# CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA

## 1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.-

Según Guerra [1], los sistemas de generación eléctrica híbridos se caracterizan por utilizar dos o más fuentes de energía, combinando fuentes renovables (como fotovoltaica, eólica, geotérmica, etc.) y convencionales.

Ramírez [2] menciona que un Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico (HPWS, por sus siglas en inglés) con baterías consta principalmente de un conjunto fotovoltaico (paneles solares), turbinas eólicas (aerogeneradores), banco de baterías (acumuladores), inversores, controladores, reguladores y demás elementos como cables y estructuras para la instalación. Con el objetivo de dimensionar correctamente este sistema, es necesario realizar una evaluación técnica seguida de una evaluación económica.

De acuerdo con Ortega [3], el diseño de sistemas híbridos basados en fuentes de energía no convencional depende de múltiples variables, convirtiéndolo en un problema multifactorial. Entre estas variables se encuentran la demanda eléctrica del lugar y factores meteorológicos como la irradiación solar, la velocidad del viento y dirección del mismo, los cuales tienen un alto grado de aleatoriedad y afectan sensiblemente el diseño.

Das [4], en su investigación, empleó el software de simulación HOMER para estudiar la viabilidad técnica y económica de un sistema híbrido para generar energía eléctrica, adecuado para aplicaciones en áreas remotas. Se analizó el potencial uso de un proyecto híbrido de energía (PV/diésel) en ubicaciones remotas y se utilizó HOMER para realizar este análisis.

Ge et al. [5] argumentan que un sistema eólico basado en baterías (WT) es más ventajoso en términos de costo y confiabilidad en comparación con un sistema

fotovoltaico basado en baterías (PV). La producción de energía y el rendimiento en la adaptación a la demanda de un edificio son cruciales para la utilización efectiva de sistemas de energía renovable. Aunque el almacenamiento adicional de electricidad puede reducir desajustes, a menudo requiere una inversión significativa. Por lo tanto, la eficacia del sistema para igualar la oferta y demanda energética es esencial para maximizar la confiabilidad y minimizar la dependencia de redes y baterías externas.

Serván [6] llega a la conclusión de que un incremento en los precios de la energía doméstica, junto con un plan de incentivos o cofinanciamiento adecuado por parte del gobierno, puede hacer económicamente viable y técnicamente factible un sistema de generación híbrido. Entre los beneficios de estos sistemas se encuentran una generación de energía menos centralizada, disminución de caídas de tensión y una mayor autonomía. Además, pueden mitigar el impacto del rápido aumento de la demanda energética en los sectores industrial y comercial.

Martínez [7] investigó la integración de sistemas híbridos en comunidades rurales de América Latina, encontrando que la unión de energía fotovoltaica y eólica puede proporcionar un suministro eléctrico estable y sostenible, disminuyendo la dependencia de generación con combustibles fósiles y a la vez mejorando la calidad de vida de las personas en lugares aislados.

Hernández [8] llevó a cabo un estudio sobre la implementación de sistemas híbridos en entornos urbanos y concluyó que estos sistemas no solamente reducen las emisiones de gases producidos por el efecto invernadero, sino que además disminuyen los costos operativos a largo plazo, haciendo que las poblaciones urbanas tengan mayor resiliencia y sostenibilidad frente a desafíos energéticos futuros.

Gómez [9] afirma que la integración de tecnologías de almacenamiento de energía en sistemas híbridos puede mejorar significativamente su eficiencia y confiabilidad. El estudio muestra que la utilización de baterías de última generación puede equilibrar las fluctuaciones de generación y demanda, asegurando un suministro continuo de energía.

Finalmente, a nivel local, Ortiz [10] en su trabajo de titulación proporciona un marco técnico aplicable para la introducción de estas tecnologías en una entidad educativa ubicada en la provincia de Tungurahua, donde se planea implementar el proyecto. Además, ofrece una base para desarrollar programas de seguimiento de la producción y eficiencia energética de la zona.

## **1.2 Fundamentación Teórica.**

### **1.2.1. Energía eólica**

La energía eólica es un tipo de energía renovable que se genera mediante la conversión del movimiento del aire en electricidad, utilizando aerogeneradores. Esta tecnología aprovecha el flujo natural del viento, que es resultado de la variación en la temperatura y la presión atmosférica, para mover las aspas de los aerogeneradores y producir energía. A lo largo de la historia, la energía eólica ha sido utilizada en diversas formas, desde la navegación y el transporte de agua hasta la generación de electricidad en gran escala en la actualidad. Su implementación contribuye significativamente a la disminución de emisiones de gases por efecto invernadero y a la dependencia de generación mediante combustibles fósiles [11] [12].

#### **1.2.1.1 Parámetros del viento**

Los parámetros del viento son fundamentales para evaluar el potencial eólico de una región y diseñar sistemas de generación de energía eólica. Entre los principales parámetros se incluyen la velocidad del viento, dirección del viento, densidad de aire y turbulencia.

##### **1.2.1.1.1 Velocidad del viento**

La determinación de la velocidad del viento es fundamental para evaluar el potencial energético de un sitio, ya que la potencia generada por un aerogenerador aumenta significativamente con el incremento de la velocidad del viento de una zona. Variaciones insignificantes en la velocidad pueden tener un gran impacto en la cantidad

de energía producida [11]. El instrumento de medida del viento es el anemómetro y su unidad de medida es el m/s.

#### **1.2.1.1.2 Dirección del viento**

Además de la velocidad, la dirección del viento es esencial para la instalación y orientación adecuada de las turbinas eólicas o aerogeneradores. Conocer la dirección predominante del viento en un lugar específico permite optimizar la ubicación y el diseño de los aerogeneradores para maximizar la eficiencia en la captación de energía [12]. El instrumento utilizado para la medición es la veleta cuya unidad de medición son los grados sexagesimales.

#### **1.2.1.1.3 Densidad de aire**

La densidad del aire existente se modifica según la temperatura y la altitud, influye directamente en la capacidad de generación de energía eólica. Una mayor densidad del aire permite extraer más energía del viento, mejorando la eficiencia de los aerogeneradores [13].

#### **1.2.1.1.4 Turbulencia**

La turbulencia se refiere a las rápidas y desordenadas variaciones en la velocidad y dirección del viento. Este factor es crucial porque puede afectar la estabilidad y la durabilidad de los aerogeneradores, impactando negativamente su rendimiento a largo plazo [14].

#### **1.2.1.2 Perfil del viento**

El perfil vertical del viento, también conocido como perfil de viento, representa la variación de velocidad del viento en función de la altura a la que se encuentra de la superficie terrestre [15]. Esta variación no es uniforme y se ve influenciada por varios factores, como la rugosidad del terreno, estabilidad térmica de la atmósfera y la presencia de fenómenos meteorológicos [16].

La velocidad del viento se incrementa con respecto a la altura debido a la disminución de la fricción con la superficie terrestre [17]. Sin embargo, esta tendencia puede verse modificada por otros factores, como la inversión térmica, que produce una disminución de la rapidez del viento en determinadas capas de la atmósfera [15].

#### **1.2.1.2.1 Ley exponencial de Hellmann**

La Ley de Hellman, también conocida como la ley exponencial del viento, indica que la velocidad del viento crece exponencialmente conforme se incrementa la altura sobre la superficie de la Tierra [11, 12]. Esta ley se fundamenta en la observación de que la fricción con la superficie terrestre disminuye la velocidad del viento en zonas cercanas al suelo, pero esta fricción se reduce con la altitud, permitiendo que la velocidad del viento aumente de manera más acelerada.

La ley de Hellman se expresa matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

$V_{ref}$  = Velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$  a una altura  $(h)$

$h$  = Altura de la torre  $(m)$

$h_{ref}$  = Altura  $(m)$

$v_{ref}$  = Velocidad de viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$  en la altura de la medición

$\alpha$  = Exponente de Hellman que varía con la rugosidad del terreno

#### **1.2.1.3 La rosa de los vientos**

La rosa de los vientos es un diagrama que representa las frecuencias de la dirección del viento en un lugar específico durante un período determinado. Este diagrama gráfico permite visualizar las direcciones preponderantes del viento y la intensidad, facilitando así la interpretación y el análisis de datos meteorológicos [15]. Como se observa la

Figura 1, se muestra un ejemplo de este diagrama donde los colores de las barras representan diferentes intensidades del viento, y la longitud de las barras muestra la frecuencia con que el viento sopla desde cada dirección específica.

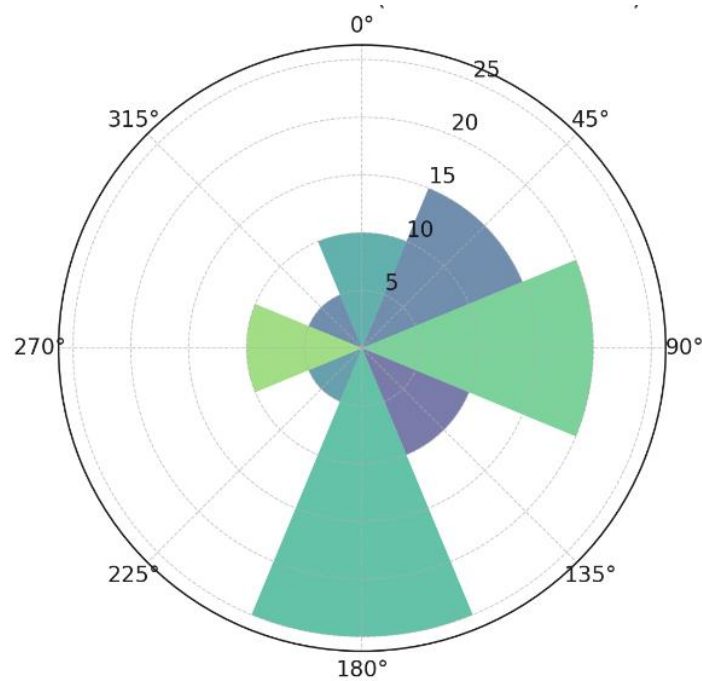


Figura 1. Rosa de los vientos

#### 1.2.1.4 Distribución de Weibull para análisis de velocidad de viento

La distribución de Weibull se emplea frecuentemente para modelar la variación de velocidad del viento en estudios meteorológicos y energéticos. Su flexibilidad para ajustarse a diferentes formas según sus parámetros la convierte en una herramienta útil para describir la trayectoria del viento y evaluar el potencial de generación de energía eólica [12]. La ecuación matemática es la siguiente:

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

Donde:

$f_v$  = Función de densidad de la probabilidad de Weibull

$v$  = Velocidad del viento  $\frac{m}{s}$

$c = \text{Factor de escala } \frac{m}{s}$

$k = \text{Factor de forma de grado de dispersión de los registros}$

La gráfica de función de distribución acumulada de Weibull se emplea para describir la probabilidad de ocurrencia de que una variable aleatoria no exceda un cierto valor. Matemáticamente se expresa como:

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

Se puede observar en la Figura 2 la función graficada de probabilidad para una distribución de Weibull con el parámetro de forma “ $k$ ” de 2 y el parámetro de escala “ $c$ ” de 8.

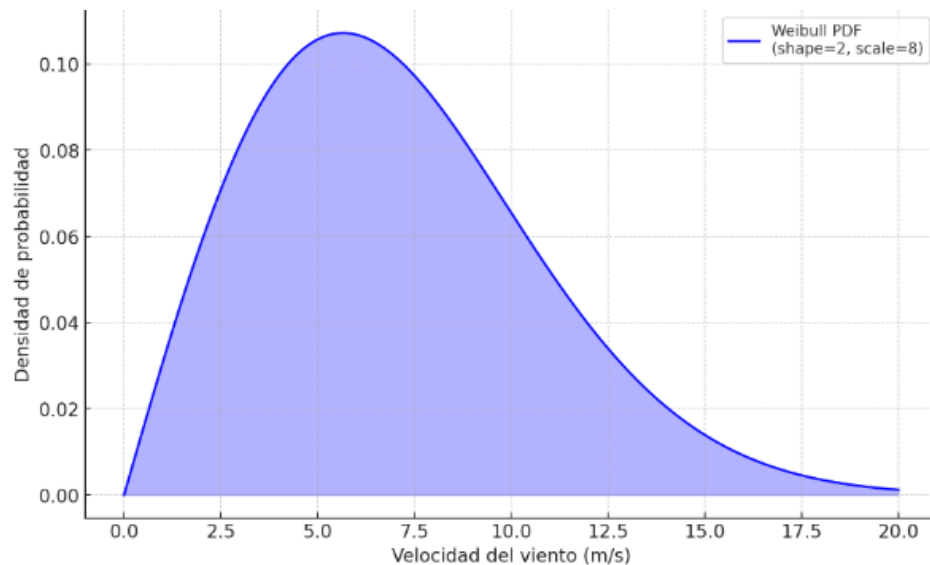


Figura 2. Ejemplo de Distribución de Weibull

### 1.2.1.5 Energía extraída del viento

La energía eólica se captura mediante aerogeneradores o turbinas eólicas, los cuales transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica que se puede usar [18]. La fórmula para calcular la energía eólica es la siguiente:

$$Ec = \frac{1}{2} \rho A v^3 t$$

Donde:

$E_c$  = Energía cinética generada por el aerogenerador (J).

$\rho$  = Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  = Área barrida por las palas del aerogenerador (m<sup>2</sup>).

$v$  = Velocidad del viento (m/s).

$t$  = Tiempo de desplazamiento (s).

El área barrido de las palas de un aerogenerador es de forma circular y se puede calcular de la siguiente manera:

$$A = \pi r^2$$

Donde:

$r$  = radio del rotor (m)

#### **1.2.1.5.1 Potencia disponible**

La potencia disponible en la energía eólica hace referencia a la magnitud de energía cinética a ser extraída del viento y convertida en electricidad por un aerogenerador. Esta potencia es dependiente de varios parámetros como: velocidad de viento, densidad del aire y área de barrido de las palas del aerogenerador [11]. La ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$P_{Dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

#### **1.2.1.5.2 Densidad de potencia eólica**

La densidad de potencia en energía eólica hace referencia a la magnitud de energía que el viento transporta por medio de un área definida por unidad de tiempo. Esta métrica es fundamental para evaluar el potencial eólico de una ubicación específica y se representa en vatios por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>) [19]. La fórmula matemática es la siguiente:

$$D_{Pot} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

### 1.2.1.5.3 Coeficiente de potencia eólica

El coeficiente de potencia en energía eólica es una medida del rendimiento con el que un aerogenerador o turbina transforma la energía cinética del viento en energía mecánica utilizable. Este coeficiente, que varía entre 0 y el límite de Betz de 0.593, indica la fracción de energía cinética del viento que es capturada por el aerogenerador o turbina [11]. Matemáticamente se expresa como:

$$C_p = \frac{P_{Extraída}}{P_{Dis}}$$

### 1.2.1.5.4 Potencia Nominal Eléctrica

La potencia nominal eléctrica en un sistema de energía eólica hace referencia a la cantidad máxima de electricidad que un aerogenerador puede generar de manera continua bajo condiciones óptimas de operación. Este valor es especificado por el fabricante y constituye la capacidad máxima de generación del aerogenerador en condiciones estándar de viento. Prácticamente el rendimiento viene dado por  $C_p * P_{Elect}$ , está entre un 40% y 50% [18].

$$P_{Nom} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p P_{Elect}$$

### 1.2.1.6 Sistema Eólico

Un sistema eólico en energía eólica se refiere a la combinación de componentes y tecnologías desarrolladas para tomar la energía cinética del viento y convertirla en electricidad. Dicho sistema incluye elementos clave como aerogeneradores, torres, sistemas de control y automatización, y equipos necesarios de conexión a instalación eléctrica, que trabajan en conjunto para maximizar la generación eléctrica originada por el viento [20].

#### 1.2.1.6.1 Aerogeneradores o turbinas eólicas

Es un dispositivo diseñado para transformar la energía del viento en otro tipo de energía que en este caso es energía eléctrica. Este equipo consta de una torre, un rotor con palas que capturan el viento, y un elemento generador que transforma el movimiento

rotacional en energía eléctrica. Los aerogeneradores son componentes clave en los sistemas eólicos, destinados a generar energía renovable a partir del viento.

- **Tipos de Aerogeneradores**

- **Aerogeneradores con eje horizontal:** Los aerogeneradores con su eje horizontal (HAWTs) son los mayormente utilizados en la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica. Estos dispositivos tienen un eje de rotación que está orientado horizontalmente al flujo del viento. Generalmente, están equipados con un rotor de tres palas que gira en el plano horizontal [12].

- **Características:**

- **Eje de Rotación:** Horizontal
- **Número de Palas:** Usualmente entre 2 y 3
- **Ventajas:** Alta eficiencia en conversión de energía, ideal para ubicaciones con vientos constantes y fuertes.
- **Desventajas:** Requieren mecanismos de orientación para ajustar la dirección hacia el viento. [18]

- **Aerogeneradores con eje Vertical:** Los aerogeneradores con eje vertical (VAWTs) tienen un eje de rotación que está orientado verticalmente. Este tipo de aerogenerador puede captar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de orientarse hacia el viento.

- **Características:**

- **Eje de Rotación:** Vertical
- **Tipos Comunes:** Darrieus (con forma de paracaídas) y Savonius (con forma de cubo)
- **Ventajas:** Menos requerimientos de orientación, adecuados para áreas urbanas y menos afectadas por turbulencias.

- **Desventajas:** Menor eficiencia comparativa y mayor complejidad en el diseño estructural [12].
- **Aerogeneradores de Eje Vertical de Eje Cerrado:** Un tipo especializado de aerogenerador de eje vertical con un diseño cerrado, como el rotor tipo Darrieus con una estructura en forma de anillo o hélice.
- **Características:**
  - **Eje de Rotación:** Vertical, con diseño cerrado.
  - **Diseño:** Rotor cerrado o con hélice.
  - **Ventajas:** Buena captura del viento en condiciones variables, menos mantenimiento.
  - **Desventajas:** Fabricación compleja y posible dificultad en la optimización de la captura de viento [19].
- **Aerogeneradores de Palas de Perfil Variable:** Estos aerogeneradores tienen palas con un perfil que puede ajustarse para optimizar el rendimiento en diferentes velocidades del viento.
- **Características:**
  - **Eje de Rotación:** Puede ser horizontal o vertical.
  - **Diseño de Palas:** Palas con perfil variable que se ajustan automáticamente para maximizar la eficiencia.
  - **Ventajas:** Adaptabilidad a diferentes condiciones de viento, mayor eficiencia.
  - **Desventajas:** Complejidad adicional en el diseño y control [18].
- **Aerogeneradores de Palas en Contrarrevolución:** Estos aerogeneradores están diseñados con palas que giran en dirección contraria a la de rotación del rotor, lo que permite una mejor captación del viento en ciertas condiciones.
- **Características:**
  - **Eje de Rotación:** Puede ser horizontal o vertical.
  - **Diseño de Palas:** Palas en contrarrevolución.

- **Ventajas:** Mejora en la captura de viento en condiciones específicas.
- **Desventajas:** Requiere diseño especializado y optimización [12].

### 1.2.1.6.2 Curva de potencia típica del aerogenerador

La gráfica de la curva de potencia de un aerogenerador ilustra la relación entre la velocidad del viento y la cantidad de energía eléctrica por unidad de tiempo producida por el aerogenerador. Esta curva ilustra cómo la potencia cambia según la variación de la velocidad del viento, destacando puntos clave como: velocidad de arranque, velocidad de corte, y potencia eléctrica nominal, que indican los rangos de operación en los que el aerogenerador es más eficiente y efectivo [21]. Un ejemplo de este tipo de curva se observa en la Figura 3.

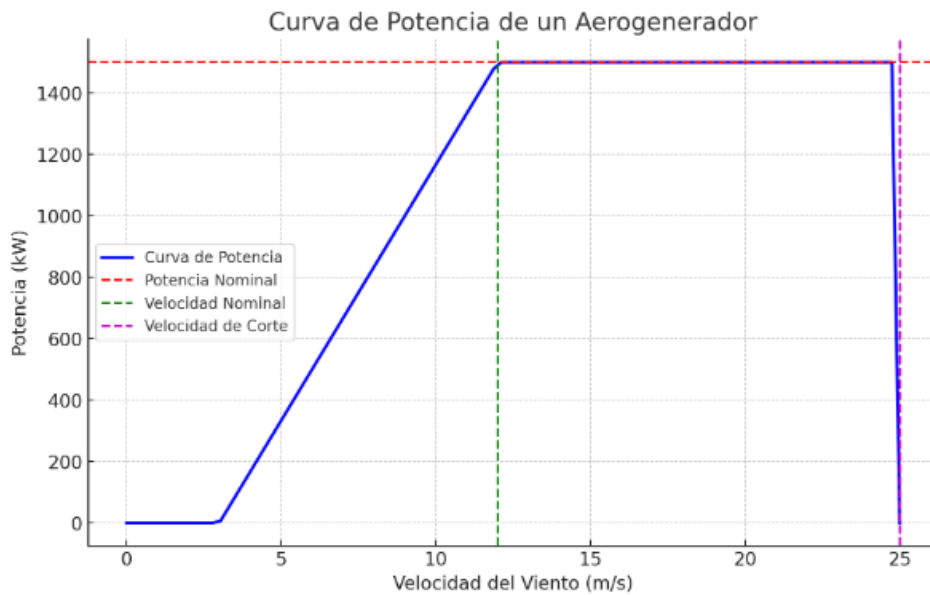


Figura 3. Ejemplo de una curva de potencia de un aerogenerador [11]

## 1.2.2 Energía Solar

Es la energía que proviene del sol, que puede ser captada y transformada en diferentes tipos de energía utilizables, como electricidad o calor. Dicho proceso de conversión se realiza mediante tecnologías como: paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos [22].

### **1.2.2.1 La Radiación Solar**

La radiación solar es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas producidas por el sol. Esta energía es primordial para la vida terrestre y puede ser captada y convertida en otras formas de energía utilizable mediante diversos métodos tecnológicos. El dispositivo para la medición de la radiación solar es el piranómetro [22].

### **1.2.2.2 Los Sistemas Fotovoltaicos**

Es un conjunto de elementos diseñados para convertir la luz solar directamente en electricidad por medio del uso de celdas fotovoltaicas. Este sistema incluye paneles solares, inversores, controladores de carga y, en algunos casos, componentes de almacenamiento de energía eléctrica como baterías. Los sistemas fotovoltaicos pueden ser instalados tanto en aplicaciones residenciales como comerciales y pueden operar conectados a la red eléctrica pública ON-GRID o de manera autónoma OFF-GRID [23].

#### **1.2.2.2.1 Tipos de Sistemas fotovoltaicos**

- **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (Grid-Tied Systems):** Estos sistemas son elaborados para funcionar en paralelo con la red eléctrica pública del SNI. La energía eléctrica proporcionada por los paneles solares se usa para satisfacer las necesidades de energía de los usuarios, y el excedente se envía a la red eléctrica pública [23].
- **Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (Off-Grid Systems):** Estos sistemas se conectan a la red eléctrica y son autosuficientes. Son ideales para ubicaciones lejanas en donde no existe la red eléctrica pública [24].
- **Sistemas Híbridos (Hybrid Systems):** Combinan características de los sistemas on-grid y los off-grid. Pueden funcionar con la red eléctrica pública y también tienen capacidad de almacenamiento de energía [25].

- **Sistemas Fotovoltaicos Integrados en Edificios (Building-Integrated Photovoltaics, BIPV):** Estos sistemas integran los paneles solares directamente en la estructura de los edificios, como techos, fachadas o ventanas [26].
- **Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (Concentrated Photovoltaics, CPV):** Usan lentes o espejos con el objetivo de recoger la luz solar en células fotovoltaicas de considerable eficiencia. Estos sistemas suelen ser más eficientes, pero requieren una orientación precisa hacia el sol [26].

#### 1.2.2.2.2 Componentes básicos del sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico se compone de diversos elementos fundamentales que operan simultáneamente para transformar la energía solar en electricidad utilizable. A continuación, se describen los principales componentes de un sistema fotovoltaico y sus respectivas funciones:

- Paneles Solares.-** Los paneles solares, conocidos también como módulos fotovoltaicos, están formados por numerosas células fotovoltaicas, las cuales transforman la luz solar directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico [23].
  - **Tipos de paneles solares:** Se puede apreciar los tipos de paneles solares en la Tabla 2.

**Tabla 2. Comparativa de tipos de paneles solares**

<b>Tipo de Panel Fotovoltaico</b>	<b>Descripción</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Ventajas</b>
<b>Monocrystalinos</b>	Hechos de un solo cristal de silicio puro.	Alta	Alta eficiencia, buen rendimiento en baja luz [11]

<b>Tipo de Panel Fotovoltaico</b>	<b>Descripción</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Ventajas</b>
<b>Policristalinos</b>	Fabricados a partir de múltiples cristales de silicio.	Media	Menor costo de producción [27]
<b>Silicio Amorfo (Thin-Film)</b>	Capas delgadas de material fotovoltaico depositadas sobre un sustrato.	Baja	Flexibles, ligeros, bajo costo de producción [28]
<b>Células Heterounión (HJT)</b>	Combinan silicio amorfo y cristalino.	Alta	Alta eficiencia, buen rendimiento a altas temperaturas [29]
<b>Capa Fina de CIGS</b>	Capas finas de cobre, indio, galio y selenio.	Alta	Alta eficiencia, flexibles, potencial de reducción de costos [30].

**b. Inversor:** Es el dispositivo encargado de transformar la corriente continua (CC) producida por los paneles solares en corriente alterna (CA), que es el tipo de electricidad que utilizan la mayoría de electrodomésticos y elementos eléctricos en hogares y empresas.

- **Tipos de inversores:** Los tipos de inversores se puede analizar en la Tabla 3.

**Tabla 3. Comparativa de tipos de inversores**

<b>Tipo de Inversor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>
<b>Inversor Central</b>	Inversor grande que se encarga de convertir la	Sistemas fotovoltaicos grandes	Eficiencia alta, menor costo por

<b>Tipo de Inversor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>
	electricidad de un grupo de paneles solares.		unidad de potencia [23]
<b>Inversor de String</b>	Inversor que convierte la electricidad de varios paneles conectados en serie (string).	Sistemas residenciales y comerciales	Menor costo inicial, fácil instalación [26]
<b>Microinversor</b>	Inversor que se instala en cada panel solar individualmente.	Sistemas residenciales y comerciales	Mejora la eficiencia del sistema, monitoreo individual [29]
<b>Inversor Híbrido</b>	Inversor que combina funciones de un inversor de red y un inversor de almacenamiento.	Sistemas con almacenamiento de energía	Flexibilidad, gestión eficiente de energía [24]
<b>Inversor de Carga Directa</b>	Inversor que convierte la electricidad CC directamente para alimentar dispositivos específicos.	Aplicaciones industriales y de alta demanda	Eficiencia en aplicaciones especializadas [27]

- c. Controlador de Carga:** Es el elemento que determina la cantidad de energía que se transporta hacia las baterías para evitar sobrecargas y sobredescargas, protegiendo así a las baterías y alargando su vida útil [24].
- d. Baterías:** Las baterías acumulan la energía producida por los paneles fotovoltaicos para su utilización a futuro, especialmente útil en sistemas off-grid o en situaciones donde se necesita energía durante la noche o en días nublados [25].

- **Tipos de batería:** Los tipos de batería se puede apreciar en la Tabla 4.

**Tabla 4. Comparativa de los tipos de batería**

<b>Batería</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Tiempo de Recarga</b>	<b>Número de Ciclos</b>	<b>Capacidad (Ah)</b>
<b>Baterías de Plomo-Ácido</b>	Utilizan una combinación de plomo y ácido sulfúrico. Se presentan en versiones abiertas y selladas (AGM, Gel).	Bajo costo inicial, ampliamente disponible	Vida útil limitada, mantenimiento frecuente	6-8 horas	500-800 ciclos	50-300 Ah [30]
<b>Baterías de Ion de Litio</b>	Utilizan compuestos de litio para almacenar energía, destacándose por su alta densidad energética y eficiencia.	Larga vida útil, alta eficiencia, bajo mantenimiento	Mayor costo inicial	1-3 horas	2,000-5,000 ciclos	50-200 Ah [31]
<b>Baterías de Níquel-Níquel-cadmio,</b>	Combinan níquel y cadmio,	Durabilidad, tolerancia a	Efecto memoria, impacto	2-4 horas	1,000-2,000 ciclos	10-50 Ah [32]

<b>Batería</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Tiempo de Recarga</b>	<b>Número de Ciclos</b>	<b>Capacidad (Ah)</b>
<b>Cadmio (NiCd)</b>	conocidas por su durabilidad y capacidad para funcionar en condiciones extremas.	temperaturas extremas	ambiental del cadmio			
<b>Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)</b>	Utilizan una aleación de hidruro metálico y níquel, siendo más amigables con el medio ambiente que las NiCd.	Mayor capacidad, menor efecto memoria	Más costosas que las de plomo-ácido	2-4 horas	1,000-2,000 ciclos	10-50 Ah [33]
<b>Baterías de Flujo Redox</b>	Utilizan soluciones líquidas para almacenar energía, ideales para aplicaciones de almacenamiento a gran escala.	Escalabilidad, larga vida útil	Costosas, requieren espacio significativo	4-8 horas	5,000-10,000 ciclos	100-500 Ah [34]

e. **Reguladores:** Los reguladores de carga en sistemas fotovoltaicos son dispositivos diseñados para gestionar la transferencia de energía eléctrica desde los paneles fotovoltaicos hasta las baterías, garantizando que estas últimas reciban la carga adecuada y evitando su sobrecarga. Estos reguladores ajustan la cantidad de corriente y voltaje enviada a las baterías basándose en el estado de carga y las condiciones de funcionamiento del sistema. Existen principalmente dos tipos de reguladores: de Modulación de Ancho de Pulso (PWM), que ofrecen un control básico y económico sobre la carga, y los de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT), que optimizan la eficiencia del sistema al ajustar dinámicamente el voltaje para maximizar la potencia extraída de los paneles solares [23][26].

▪ **Tipos de reguladores de carga.-**

- **Regulador PWM (Modulación de Ancho de Pulso):** Utiliza pulsos de ancho variable para regular la corriente de carga enviada a las baterías, ajustando la salida de acuerdo con la carga requerida. Tiene una eficiencia de carga de aproximadamente 70-80%. Es ideal para instalaciones fotovoltaicas residenciales de pequeña escala [23].
- **Regulador MPPT (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia):** Maximiza la potencia extraída de los paneles solares ajustando el voltaje de entrada, adaptando continuamente el punto de operación para obtener el máximo rendimiento. Tiene una eficiencia de carga de aproximadamente 90-98%. Es adecuado para sistemas fotovoltaicos de gran escala e industriales [26].
- **Regulador Híbrido:** Ofrece la flexibilidad de operar tanto en modo PWM como MPPT, adaptando su funcionamiento según las condiciones del sistema. La aplicación más común es la acumulación de energía eléctrica y aceptar múltiples fuentes de energía en su entrada[24].
- **Regulador de Carga de Corriente Alterna (AC):** Optimiza la carga en sistemas que incluyen generadores de energía alterna, adaptando la energía solar y alterna para el almacenamiento en baterías. Es muy utilizado en sistemas

grandes y complejos que requieren integración de múltiples fuentes de energía [25].

### 1.2.2.3 Análisis de Sistemas Fotovoltaicos

Se puede realizar el análisis de Sistemas fotovoltaicos determinando diversos parámetros de rendimiento y eficiencia.

#### 1.2.2.3.1 Parámetros de rendimiento y eficiencia

- **Potencia de Salida ( $P_{max}$ ):** Es la potencia eléctrica máxima que un panel solar es capaz de generar bajo condiciones de prueba estándar (STC), que comprenden una irradiancia de 1.000 W/m<sup>2</sup> y temperatura de la celda de 25°C [36].

$$P_{max} = V_{oc}I_{sc}$$

Donde:

$V_{oc}$  = Voltaje o tensión en circuito abierto.

$I_{sc}$  = Corriente eléctrica en cortocircuito.

- **Eficiencia de Conversión ( $\eta$ ):** Se define como la proporción del total de la energía solar convertida en electricidad por el panel fotovoltaico. Se calcula como la división entre la potencia eléctrica de salida del sistema y la potencia de entrada solar o fotovoltaica [37].

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \cdot G}$$

Donde:

$P_{max}$  = Potencia máxima del panel

$A$  = Área del panel fotovoltaico

$G$  = Irradiancia del sol  $\frac{W}{m^2}$

- **Factor de Rendimiento (Performance Ratio, PR):** Es una medición de la eficiencia del conjunto fotovoltaico en convertir la energía solar incidente en

energía eléctrica utilizable, teniendo en cuenta pérdidas por diversos factores como la temperatura, sombra y eficiencia del inversor [38].

$$PT = \frac{E_{real}}{E_{teórico}}$$

Donde:

*E<sub>real</sub>*=Energía real generada por el sistema

*E<sub>teórico</sub>*=Energía que debería haberse generado en condiciones ideales.

- **Coefficiente de Temperatura ( $\beta$ ):** Representa la disminución en el rendimiento de los paneles solares en función del incremento de temperatura. Se mide en porcentaje por grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) [38].

#### 1.2.2.4 Sistemas Híbridos

Los sistemas híbridos de generación eólica-fotovoltaica y de aire integran tecnologías de energía eólica y solar con métodos de enfriamiento por aire para mejorar la producción de energía y la eficiencia operativa. Estos sistemas combinan aerogeneradores que capturan la energía del viento y paneles fotovoltaicos que transforman la radiación solar en energía eléctrica. El componente de enfriamiento por aire se utiliza para mantener las temperaturas de operación de los paneles fotovoltaicos en niveles óptimos, aumentando su eficiencia. La sinergia entre la energía eólica y solar, junto con el enfriamiento, proporciona una solución más robusta y confiable para la producción de electricidad, especialmente en regiones con variaciones estacionales de recursos energéticos [36][37][38].

#### 1.2.2.5 Estación Meteorológica para recolección de datos

Es un dispositivo que alberga una variedad de instrumentos y sensores diseñados para observar y registrar las condiciones atmosféricas. Estos datos se utilizan para monitorear el clima y hacer predicciones meteorológicas. Las estaciones

meteorológicas pueden medir una amplia gama de parámetros, como: temperatura del aire, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitación [39] [40].

- **Componentes de la Estación Meteorológica**

- **Termómetro:** Un dispositivo que mide la temperatura del aire. Utiliza sensores electrónicos para proporcionar lecturas precisas de la temperatura ambiente, esencial para monitorear las condiciones climáticas y realizar predicciones meteorológicas [41]. Como se puede apreciar en la Figura 4.
- **Higrómetro:** Instrumento que mide la humedad relativa del aire. Funciona detectando cambios en la resistencia eléctrica o la capacidad de un material higroscópico, lo que permite determinar la magnitud del vapor de agua que se encuentra en el aire [42].
- **Barómetro:** Aparato que mide la presión atmosférica. Los barómetros modernos suelen ser digitales y utilizan sensores de presión para detectar variaciones en la presión de aire, que es crucial para predecir cambios en el clima, como tormentas o buen tiempo [43].
- **Anemómetro:** Dispositivo que mide la velocidad del viento. Los anemómetros de cazoletas y de hélice son comunes, y funcionan midiendo la rotación causada por el viento, proporcionando información referente a la velocidad y, a veces, la dirección del mismo [44].
- **Veleta:** Instrumento que indica la dirección del viento. Se compone de una flecha que gira sobre un eje vertical y se alinea con la dirección del viento, mostrando la orientación cardinal desde la cual proviene el viento [45].
- **Pluviómetro:** Aparato que mide la cantidad de precipitación. Los pluviómetros de balancín son comunes en estaciones meteorológicas automáticas y funcionan recogiendo agua de lluvia en un pequeño balde que se inclina cuando se llena, registrando la cantidad de precipitación [46].

En la Figura 4 se puede observar la imagen de la estación meteorológica WS-2902A y sus componentes.



Figura 4. Componentes de la estación meteorológica WS-2902A [46]

### 1.3 Fundamentación metodológica

#### 1.3.1 Enfoque.

El proyecto presentado comprenderá y analizará la viabilidad de realizar un estudio sobre la generación híbrida (eólica-fotovoltaica) de electricidad, enfocándose en una investigación cuantitativa para abordar el problema del elevado costo mensual del consumo energético mediante una simulación. Así, se definirán diferentes componentes como parámetros de acuerdo a la propuesta de investigación.

La Figura 5 ilustra el procedimiento a seguir para llevar a cabo un análisis del uso y producción de energía eléctrica en un sistema híbrido fotovoltaico-eólico en la azotea de un edificio del campus principal del I.S.T. Tungurahua. En primer lugar, es necesario recopilar información sobre conceptos básicos y metodologías para diseñar sistemas híbridos con fuentes renovables.

Para conocer el estado actual del sistema, se recolectarán datos sobre la demanda y el histórico de consumo eléctrico del edificio educativo. Estos datos, junto con la medición de variables a través de una estación meteorológica WS-2902A, permitirán realizar un análisis de coincidencia entre el uso y la generación de energía.

Además, se dimensionará y modelará el sistema híbrido fotovoltaico-eólico y posteriormente se verificará su funcionamiento mediante una simulación en un software especializado, comparando y contrastando el procedimiento con otras metodologías encontradas en el estado del arte.

Finalmente, el análisis detallado de los resultados de la simulación permitirá evaluar si la propuesta es viable económica, técnicamente y ambientalmente, lo que podría reducir el consumo eléctrico y generar un ahorro monetario para la institución educativa.

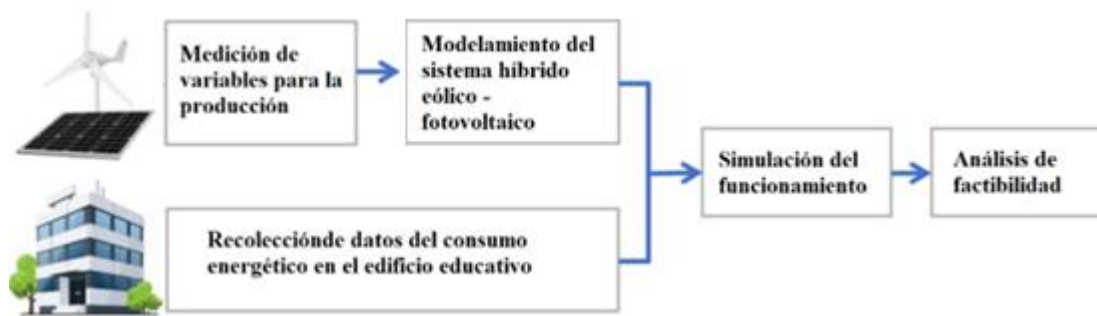


Figura 5. Metodología para el desarrollo de la investigación

### 1.3.2 Tipo de investigación

Se usarán los siguientes tipos de investigación: documental, descriptiva y campo, ya que se requiere diversos análisis vinculados con estudios de viabilidad técnica, económica y ambiental para una posible implementación del sistema de generación híbrida, fuentes textuales al igual que la compilación de datos.

#### 1.3.2.1 Investigación documental

Se necesita la investigación documental para constituir un mecanismo encaminado a la recolección de información, misma que permitirá adquirir nuevas nociones, criterios y conocimientos relacionados a las energías renovables, basada en fuentes de información tales como libros, tesis, artículos científicos, revistas, monografías, publicaciones locales, nacionales e internacionales, etc.

### **1.3.2.2 Investigación descriptiva**

La investigación permitirá describir el funcionamiento de un sistema de generación eléctrica mediante la simulación, la cual será necesaria para realizar un adecuado análisis de su uso y producción. Asimismo, facilitará la interpretación de resultados adquiridos de cálculos como también de mediciones obtenidas con la estación meteorológica.

### **1.3.2.3 Investigación de campo**

Es necesario usar esta investigación para recolectar datos relevantes para el análisis de consumo energético en el campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua, mediante el histórico de consumo eléctrico del edificio educativo se determinará las variaciones de demanda durante el día y con la estación meteorológica WS-2902A será posible la toma de medidas de irradiación solar y de la velocidad del viento en la azotea del edificio in situ.

## **1.3.3 Métodos de investigación**

### **1.3.3.1 Método deductivo**

El presente método se empleará para deducir las nociones adquiridas de referencias bibliográficas, y emplearlas correctamente en el estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental.

### **1.3.3.2 Método inductivo**

Aplicando este método las mediciones serán recolectadas y clasificadas, a fin de conseguir resultados que determinen la factibilidad del sistema.

### **1.3.3.3 Método analítico**

Para adquirir una metodología esencial en el análisis de las mediciones será empleado el método analítico, con el fin de obtener datos reales con instrumentos de medición precisos y así dimensionar correctamente el sistema.

#### **1.3.3.4 Método sintético**

En el proyecto se empleará este método por desempeñar un rol importante, el cual es la sinterización de la información, datos y resultados del análisis, para usarlos en la simulación.

#### **1.3.3.5 Método descriptivo**

Por medio de este método se efectuará una exhibición esquemática detallada de los resultados adquiridos de la recopilación, como también del análisis de datos e interpretación pruebas de funcionamiento.

#### **1.3.3.6 Método estadístico**

Por medio del método estadístico se tabularán y visualizarán ilustrativamente los resultados conseguidos de las distintas mediciones, del mismo modo se analizarán y realizarán proyecciones para determinar la viabilidad del sistema.

### **1.3.4 Técnicas e instrumentos de investigación**

La recopilación de información para el análisis de uso y producción energética en la azotea de un edificio educativo se registrará en hoja de cálculo de Microsoft Excel. Además, la modelación y simulación del sistema de generación híbrida se diseñará con la ayuda del software especializado.

#### **1.3.4.1 Lectura comprensiva**

En toda la investigación, esta técnica estará presente, debido a que la información del estudio se la relacionará con ideas de distintos autores, para alcanzar una ideología común y culminar el proyecto.

#### **1.3.4.2 Sinterización e interpretación de información**

Mediante estas técnicas, se logrará obtener información fundamentada contextualmente para efectuar el análisis de uso y producción energética sin ningún

percance. Además, permitirán comprender y sintetizar adecuadamente los resultados obtenidos a partir de las diversas mediciones tomadas en el desarrollo del proyecto.

#### **1.3.4.3 Observación**

Dentro del registro de los distintos parámetros primordiales en el análisis del proyecto, será esencial usar en cada fase la observación, debido a la ayuda durante la realización de tabulaciones y cálculos de parámetros energéticos. También, facilitará realizar un diagnóstico del estado real actual del sistema eléctrico del edificio.

#### **1.3.4.4 Medición**

Se utilizará esta técnica para adquirir los datos del edificio, niveles actuales de uso de energía eléctrica, radiación solar al igual que la velocidad del viento en la azotea, a través del uso de dispositivos e instrumentos como: el flexómetro, multímetros y estación meteorológica WS-2902A. Por medio de estas mediciones se conseguirán datos fidedignos.

#### **1.3.4.5 Cálculo**

Esta técnica es primordial en el presente proyecto, ya que, con los diferentes parámetros adquiridos se logrará dimensionar de manera adecuada todos los componentes del sistema eólico y fotovoltaico.

#### **1.3.4.6 Simulación**

Para determinar factibilidad técnica y económica del proyecto, se requerirá obtener una aproximación al comportamiento del sistema, con la finalidad de conseguir resultados digitales a corto, mediano y largo plazo.

### **1.4 Conclusiones Capítulo I.**

- En este capítulo se estableció el empleo de normativas mediante el análisis de antecedentes investigados, los cuales consideran las energías renovables como una opción viable para la generación de electricidad limpia y amigable con el cuidado del medio ambiente. os sistemas híbridos, que combinan múltiples

fuentes de energía, incluyendo renovables y convencionales, presentan una solución eficiente para reducir costos energéticos y mejorar la autonomía energética. Estos sistemas, al integrar diferentes fuentes como solar y eólica, pueden ofrecer una generación de energía más estable y descentralizada, disminuyendo las caídas de tensión y la dependencia de combustibles fósiles.

- La investigación destaca la necesidad de realizar evaluaciones técnicas y económicas detalladas para dimensionar correctamente un sistema híbrido fotovoltaico-eólico. La simulación mediante software especializado, como HOMER, permite analizar la viabilidad de estos sistemas en términos de costos y rendimiento, considerando variables como la demanda eléctrica y factores meteorológicos. Este análisis es crucial para determinar la viabilidad de implementar dichos sistemas en instituciones educativas y otras aplicaciones
- La investigación pretende determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de un sistema de generación eléctrica híbrida (eólica-fotovoltaica) en un edificio educativo mediante una metodología cuantitativa, que incluye la recopilación de datos históricos de consumo energético, mediciones meteorológicas y simulaciones detalladas, utilizando diversos métodos y técnicas de análisis.

## **CAPÍTULO II. PROPUESTA**

### **2.1 Título del proyecto.**

Estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental para la implementación de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico en la azotea de un edificio del campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua.

### **2.2 Objetivo del proyecto.**

Realizar un análisis de uso y la producción de la energía eléctrica el empleo de energías alternativas para reducir la facturación de consumo de las instalaciones del Campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua.

### **2.3 Descripción de la propuesta.**

El estudio aborda la producción de electricidad utilizando fuentes alternativas, proponiendo soluciones que buscan reducir el consumo energético y las tarifas asociadas. Las estrategias diseñadas se enfocan en el análisis energético del campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Esto implica que los procedimientos para determinar su viabilidad se investigarán mediante métodos científicos cuantitativos. Después de validar y confirmar su fiabilidad, estos métodos pueden ser utilizados en diferentes contextos de investigación o para avanzar en la ejecución práctica del proyecto.

### **2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados**

Se propusieron cuatro fases:

**Fase uno:** El proceso inicia con una revisión exhaustiva de toda la información disponible para construir el marco teórico. Es esencial familiarizarse con los estudios previos pertinentes. Una lectura profunda, analítica y crítica ayudará a entender el problema en cuestión y a formular una solución adecuada.

**Fase dos:**

Antes de desarrollar un sistema que utilice recursos naturales, es crucial evaluar el potencial, la viabilidad y la rentabilidad de dichos recursos. A partir de los datos recopilados, se usan tres métodos: la distribución de Rayleigh, la distribución estadística de Weibull y el software WRPLOT View. Cada método determina la velocidad promedio, la dirección predominante y la energía eólica basada en la frecuencia del viento. Para el potencial solar fotovoltaico, se calculan los niveles de irradiación promediando los datos de una estación meteorológica del Instituto junto con la información de NASA POWER, y se estima la producción de energía solar que los paneles solares pueden aprovechar.

**Fase tres:**

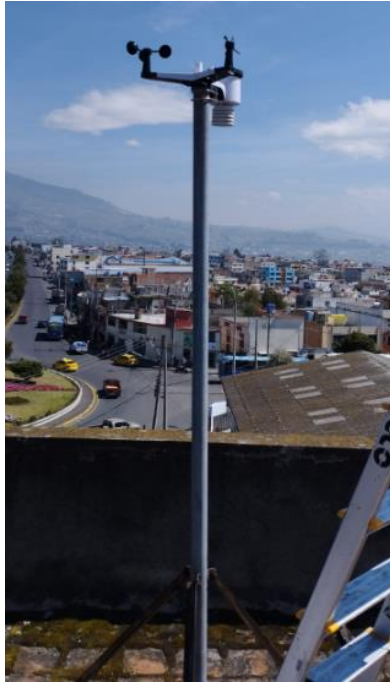
En esta fase, se dimensiona el sistema para seleccionar equipos y materiales, y posteriormente, se realiza la simulación del funcionamiento del sistema híbrido eólico-fotovoltaico propuesto.

**Fase cuatro:**

Se analizan los costos asociados con la adquisición y puesta en marcha de equipos, así como el Retorno financiero derivado de la generación de energía, se proyecta el beneficio en relación con el costo a lo largo de un periodo de tiempo determinado.

**2.4.1 Recopilación de datos meteorológicos**

En el IST Tungurahua se procedió a instalar una estación meteorológica en el campus matriz, ubicada a una altitud de 2667 msnm, con una latitud y longitud de  $1^{\circ}16'6,44''S$  y  $78^{\circ}36'41,24''O$ . Se utilizaron los datos recopilados de manera horaria durante todo el año 2023, es decir, un total de 8760 horas.



*Figura 6. Estación meteorológica instalada en la azotea del edificio educativo.*

#### **2.4.2 Estimación del potencial eólico**

El potencial eólico se base en el cálculo de las velocidades medias mensuales correspondientes al año 2023 utilizando tres métodos distintos: WRPLOT View, la distribución estadística de Weibull y la distribución de Rayleigh. Los resultados de estos métodos se promediarán para garantizar la precisión de los cálculos. Con los datos obtenidos, se evaluará la cantidad de energía que se podrá generar mensualmente y anualmente. Cabe destacar que, en este capítulo, el análisis y los cálculos se presentarán exclusivamente con los datos del primer mes del año.

##### **2.4.2.1 Método software WRPLOT View**

El método emplea un software gratuito y de código abierto, que está diseñado principalmente para crear gráficas de rosa de los vientos mediante la introducción de las direcciones y velocidades del viento a analizar. El software ofrece información sobre la velocidad promedio, histogramas, rosas de los vientos y la cantidad de veces que ocurren las velocidades del viento en distintas direcciones.

### 2.4.2.1.1 Rosas de viento para el estudio de viento

Para crear las rosas de viento, la información se transfiere directamente desde Excel, donde se han registrado las velocidades y direcciones del viento cada hora durante cada jornada del mes. Las gráficas polares se dividen en ocho puntos cardinales y las velocidades del viento se organizan en intervalos de 1.6 m/s. Los datos obtenidos cada mes muestran que las magnitudes del viento con mayor frecuencia tienden a orientarse hacia el oeste en la mayoría de los meses (ver Anexo 1). Las Figuras 7 y 8 presentan el diagrama de vientos general para el año 2023.

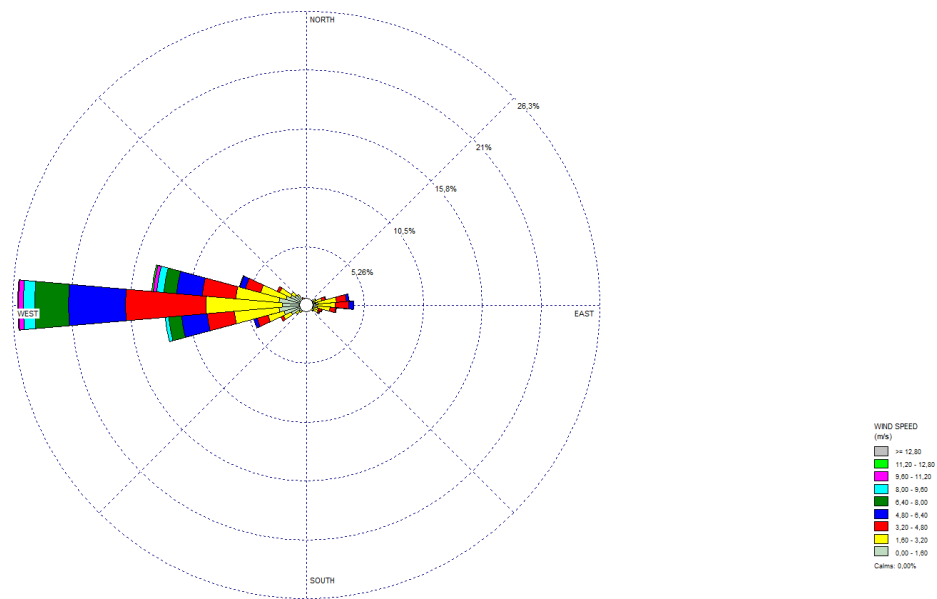


Figura 7. Rosa de Vientos del año 2023 en el software WRPLOT View.

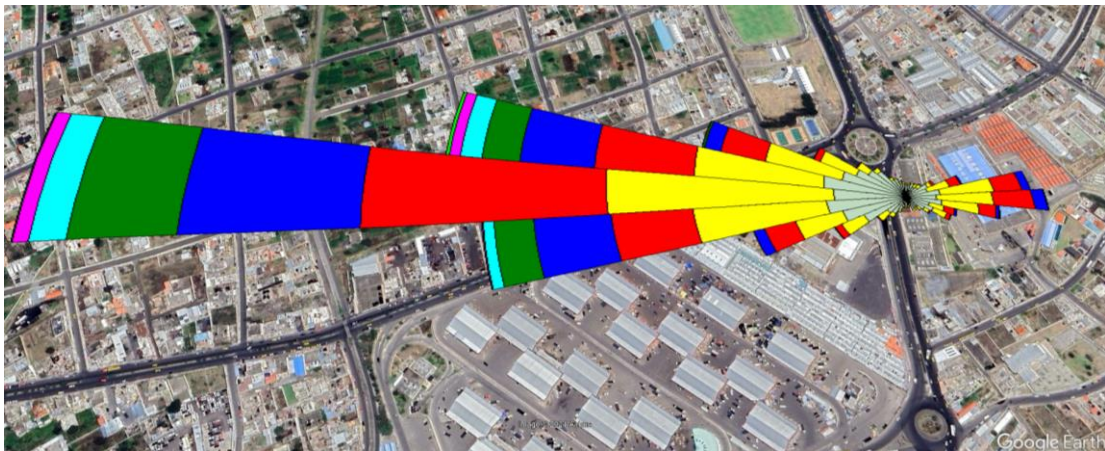


Figura 8. Rosa de Vientos 2023 con Google Earth.

#### 2.4.2.1.2 Velocidad media del viento

El software determina la velocidad promedio del viento basándose en los datos ingresados, y la Tabla 5 muestra los resultados mensuales.

Tabla 5. Velocidad media mensual y anual con el software.

<b>MÉTODO DE SOFTWARE CON WRPLOT VIEW</b>	
<b>Mes</b>	<b>Velocidad Media (m/s)</b>
enero	2,53
febrero	1,83
marzo	1,73
abril	2,91
mayo	3,47
junio	3,44
julio	4,45
agosto	4,24
septiembre	3,58
octubre	2,73
noviembre	2,55
diciembre	2,12
<b>2023</b>	<b>2,97</b>

Fuente: Autor

#### 2.4.2.2 Método distribución estadística de Weibull

Se utiliza una hoja de cálculo de Excel, se calculan la frecuencia absoluta, la frecuencia relativa y la frecuencia acumulada, las cuales son esenciales para derivar una ecuación lineal que suministra los parámetros de forma y de escala.

##### 2.4.2.2.1 Frecuencia absoluta de velocidad de viento

La información obtenida se organiza en intervalos basados en la intensidad del viento, utilizando una variación de 0.9 m/s para este estudio. Las velocidades registradas se asignan a cada intervalo, creando una tabla de frecuencias que permite determinar la cantidad de horas mensuales de cada intervalo. Los datos se muestran en la Tabla 6, y el histograma correspondiente al primer mes del año se representa en la gráfica de la Figura 9.

Tabla 6. Frecuencia absoluta mensual

FRECUENCIA ABSOLUTA DE VELOCIDAD DEL VIENTO													
Intervalo (m/s)		Mes											
>	<=	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
0	0,9	145	217	221	80	42	58	58	71	89	109	114	176
0,9	1,8	161	184	226	169	141	134	91	88	111	185	183	230
1,8	2,7	151	107	137	126	117	121	74	73	116	146	145	111
2,7	3,6	111	69	101	114	131	95	93	96	94	89	105	91
3,6	4,5	67	59	41	88	99	98	77	98	81	88	71	74
4,5	5,4	56	26	14	70	80	72	86	73	65	54	47	33
5,4	6,3	30	6	4	49	57	64	74	75	58	31	28	17
6,3	7,2	16	2	-	11	39	40	61	62	49	15	14	11
7,2	8,1	1	2	-	5	25	22	58	48	23	14	7	1
8,1	9,0	2	-	-	3	10	11	26	31	13	7	3	-
9,0	9,9	1	-	-	2	3	2	30	18	12	2	3	-
9,9	10,8	1	-	-	3	-	2	11	7	3	2	-	-
10,8	11,7	2	-	-	-	-	1	1	3	4	2	-	-
11,7	12,6	-	-	-	-	-	-	4	1	2	-	-	-
12,6	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Número de datos		744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744

Fuente: Autor

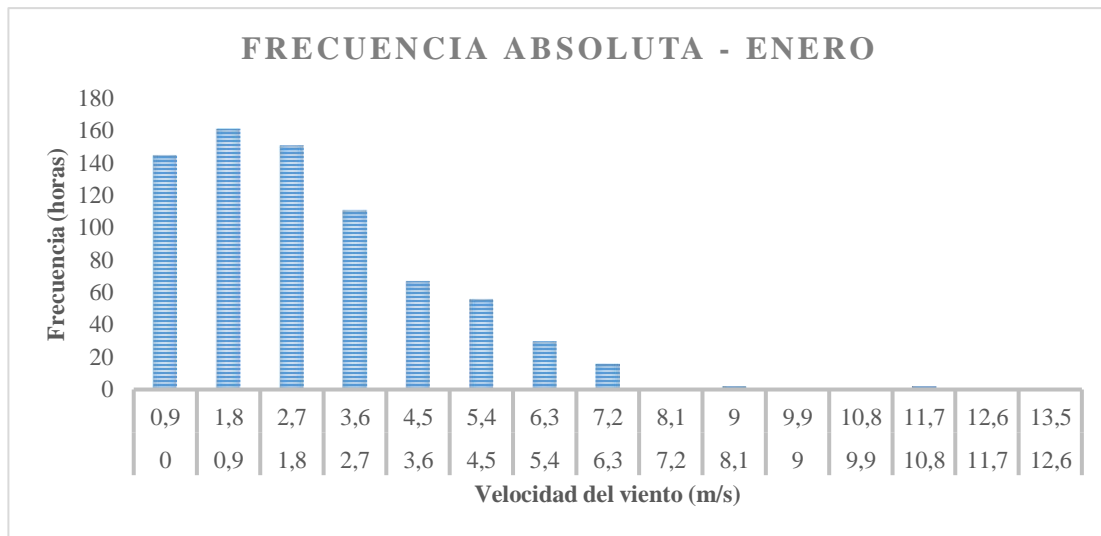


Figura 9. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de enero.

Los histogramas correspondientes a los demás meses del año se pueden apreciar en el Anexo 2.

#### 2.4.2.2.2 Frecuencia relativa

Esta frecuencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Frecuencia\ Relativa = \frac{Frecuencia\ absoluta\ de\ las\ velocidades\ del\ mes}{Número\ de\ Datos}$$

Los resultados se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7. Frecuencia relativa mensual del 2023**

FRECUENCIA RELATIVA MENSUAL DE VELOCIDAD DEL VIENTO													
Rango (m/s)		Mes (%)											
>	<=	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	0,9	0,1949	0,3229	0,2970	0,1111	0,0565	0,0806	0,0780	0,0954	0,1236	0,1465	0,1583	0,2366
0,9	1,8	0,2164	0,2738	0,3038	0,2347	0,1895	0,1861	0,1223	0,1183	0,1542	0,2487	0,2542	0,3091
1,8	2,7	0,2030	0,1592	0,1841	0,1750	0,1573	0,1681	0,0995	0,0981	0,1611	0,1962	0,2014	0,1492
2,7	3,6	0,1492	0,1027	0,1358	0,1583	0,1761	0,1319	0,1250	0,1290	0,1306	0,1196	0,1458	0,1223
3,6	4,5	0,0901	0,0878	0,0551	0,1222	0,1331	0,1361	0,1035	0,1317	0,1125	0,1183	0,0986	0,0995
4,5	5,4	0,0753	0,0387	0,0188	0,0972	0,1075	0,1000	0,1156	0,0981	0,0903	0,0726	0,0653	0,0444
5,4	6,3	0,0403	0,0089	0,0054	0,0681	0,0766	0,0889	0,0995	0,1008	0,0806	0,0417	0,0389	0,0228
6,3	7,2	0,0215	0,0030	-	0,0153	0,0524	0,0556	0,0820	0,0833	0,0681	0,0202	0,0194	0,0148
7,2	8,1	0,0013	0,0030	-	0,0069	0,0336	0,0306	0,0780	0,0645	0,0319	0,0188	0,0097	0,0013
8,1	9,0	0,0027	-	-	0,0042	0,0134	0,0153	0,0349	0,0417	0,0181	0,0094	0,0042	-
9,0	9,9	0,0013	-	-	0,0028	0,0040	0,0028	0,0403	0,0242	0,0167	0,0027	0,0042	-
9,9	10,8	0,0013	-	-	0,0042	-	0,0028	0,0148	0,0094	0,0042	0,0027	-	-
10,8	11,7	0,0027	-	-	-	-	0,0014	0,0013	0,0040	0,0056	0,0027	-	-
11,7	12,6	-	-	-	-	-	-	0,0054	0,0013	0,0028	-	-	-
12,6	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autor

#### 2.4.2.2.3 Frecuencia acumulada

Esta frecuencia se obtiene utilizando la siguiente fórmula matemática:

$$F. Acumulada_n = F. Relativa_n + F. Relativa_{n+1}$$

Se detallan los resultados obtenidos en la Tabla 8:

**Tabla 8. Frecuencia acumulada mensual.**

<b>FRECUENCIA ACUMULADA DE VELOCIDAD DEL VIENTO</b>													
<b>Intervalo (m/s)</b>		<b>Mes (%)</b>											
<b>&gt;</b>	<b>&lt;=</b>	<b>ene</b>	<b>feb</b>	<b>mar</b>	<b>abr</b>	<b>may</b>	<b>jun</b>	<b>jul</b>	<b>ago</b>	<b>sep</b>	<b>oct</b>	<b>nov</b>	<b>dic</b>
<b>0</b>	<b>0,9</b>	0,1949	0,3229	0,2970	0,1111	0,0565	0,0806	0,0780	0,0954	0,1236	0,1465	0,1583	0,2366
<b>0,9</b>	<b>1,8</b>	0,4113	0,5967	0,6008	0,3458	0,2460	0,2667	0,2003	0,2137	0,2778	0,3952	0,4125	0,5457
<b>1,8</b>	<b>2,7</b>	0,6142	0,7560	0,7849	0,5208	0,4032	0,4347	0,2997	0,3118	0,4389	0,5914	0,6139	0,6949
<b>2,7</b>	<b>3,6</b>	0,7634	0,8586	0,9207	0,6792	0,5793	0,5667	0,4247	0,4409	0,5694	0,7110	0,7597	0,8172
<b>3,6</b>	<b>4,5</b>	0,8535	0,9464	0,9758	0,8014	0,7124	0,7028	0,5282	0,5726	0,6819	0,8293	0,8583	0,9167
<b>4,5</b>	<b>5,4</b>	0,9288	0,9851	0,9946	0,8986	0,8199	0,8028	0,6438	0,6707	0,7722	0,9019	0,9236	0,9610
<b>5,4</b>	<b>6,3</b>	0,9691	0,9940	1,0000	0,9667	0,8965	0,8917	0,7433	0,7715	0,8528	0,9435	0,9625	0,9839
<b>6,3</b>	<b>7,2</b>	0,9906	0,9970	-	0,9819	0,9489	0,9472	0,8253	0,8548	0,9208	0,9637	0,9819	0,9987
<b>7,2</b>	<b>8,1</b>	0,9919	1,0000	-	0,9889	0,9825	0,9778	0,9032	0,9194	0,9528	0,9825	0,9917	1,0000
<b>8,1</b>	<b>9,0</b>	0,9946	-	-	0,9931	0,9960	0,9931	0,9382	0,9610	0,9708	0,9919	0,9958	-
<b>9,0</b>	<b>9,9</b>	0,9960	-	-	0,9958	1,0000	0,9958	0,9785	0,9852	0,9875	0,9946	1,0000	-
<b>9,9</b>	<b>10,8</b>	0,9973	-	-	1,0000	-	0,9986	0,9933	0,9946	0,9917	0,9973	-	-
<b>10,8</b>	<b>11,7</b>	1,0000	-	-	-	-	1,0000	0,9946	0,9987	0,9972	1,0000	-	-
<b>11,7</b>	<b>12,6</b>	-	-	-	-	-	-	1,0000	1,0000	1,0000	-	-	-
<b>12,6</b>	<b>13,5</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autor

#### 2.4.2.2.4 Aproximación a la ecuación lineal

Para derivar la ecuación lineal, se realiza el desarrollo y el despeje de la frecuencia acumulada, aplicando la ley de logaritmos neperianos, lo que da lugar a la siguiente fórmula matemática:

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

Esta ecuación se puede expresar en forma lineal como:

$$y = Kx + b$$

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-f(v)}\right)\right)$$

$$x = \ln(v)$$

$$b = -K \ln(c)$$

El parámetro "k" corresponde a la pendiente de la línea de regresión, y el parámetro "c" se relaciona con b mediante la ecuación:

$$c = \exp - \left[ \frac{b}{k} \right]$$

Utilizando las velocidades del viento analizadas mensualmente y las frecuencias acumuladas en cada intervalo de velocidad obtenidas en la Tabla 8, se aplican estas ecuaciones para determinar la ecuación lineal. A continuación, se detalla el procedimiento para los datos del 1 de enero de 2023 a las 10:00:00, con una velocidad del viento de 4,44 m/s y una frecuencia acumulada de 0,8535.

A partir de las velocidades del viento estudiadas mensualmente y las frecuencias acumuladas por cada intervalo de velocidad presentadas en la Tabla 8, se utilizan estas ecuaciones para derivar la ecuación lineal. Se describe el procedimiento para la información correspondiente al 1 de enero de 2023 a las 10:00:00, con una velocidad de 4,44 m/s y frecuencia acumulada de 0,8535.

$$x_{Enero} = \ln(4,44)$$

$$x_{Enero} \approx \mathbf{1.491}$$

$$y_{Enero} = \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - 0,8535} \right) \right)$$

$$y_{Enero} \approx \mathbf{0.653}$$

Con estos datos se genera la gráfica de la Aproximación lineal basada en la distribución de Weibull. En la Figura 10 se puede observar la recta lineal y su correspondiente ecuación, calculadas a partir de los 744 datos horarios del mes de

enero. Las gráficas correspondientes a los demás meses del año se pueden apreciar en el Anexo 3.

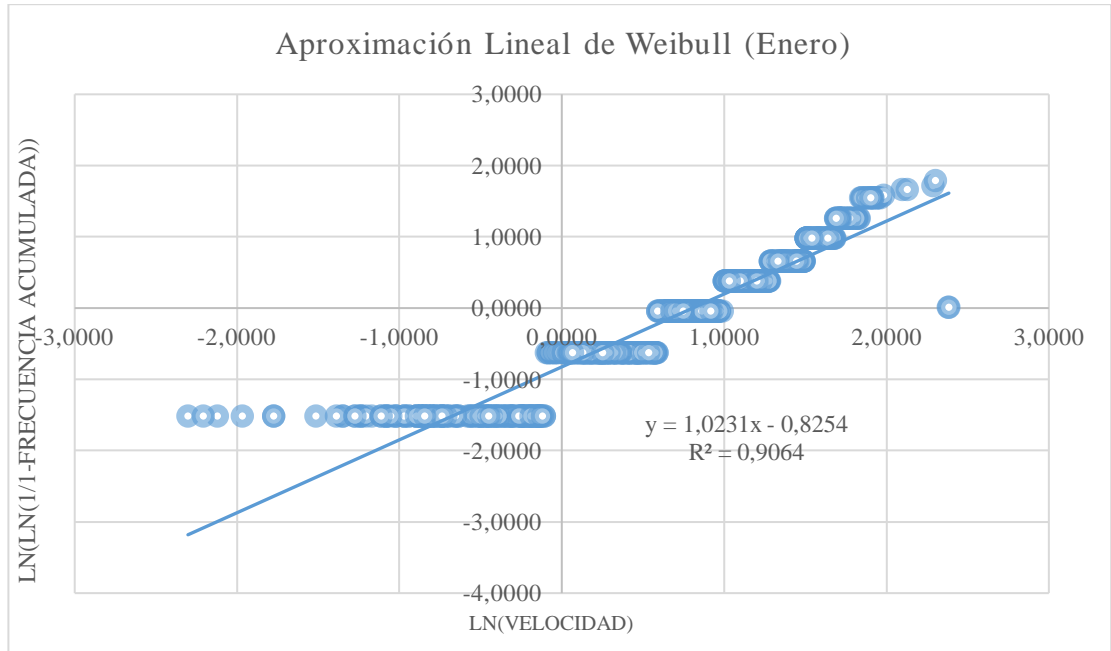


Figura 10. Aproximación lineal Weibull para el primer mes del año.

El resultado del parámetro “ $k$ ”, se obtiene a partir de la ecuación de la recta.

$$k_{Enero} \approx 1,0231$$

El parámetro de escala “ $c$ ” se calcula de la siguiente manera:

$$c = \exp - \left[ \frac{-0,8254}{1,0231} \right]$$

$$c_{Enero} \approx 2,2406$$

En la Tabla 9 se observa la información de los parámetros de forma y escala de forma mensual, así como para el total del año.

**Tabla 9. Parámetros de forma y escala mensual y anual**

Mes	Factor de forma "k" (adimensional)	Factor de escala "c" (m/s)
enero	1,0231	2,2406
febrero	0,7362	1,3270
marzo	0,8889	1,3188

<b>abril</b>	1,2465	2,6948
<b>mayo</b>	1,3954	3,4091
<b>junio</b>	1,3557	3,3073
<b>julio</b>	1,2613	4,4840
<b>agosto</b>	1,205	4,2481
<b>septiembre</b>	1,0973	3,4313
<b>octubre</b>	1,0914	2,4339
<b>noviembre</b>	1,0422	2,3089
<b>diciembre</b>	0,9045	1,7302
<b>2023</b>	<b>1,1040</b>	<b>2,7445</b>

Fuente: Autor

#### 2.4.2.2.5 Análisis de probabilidad

En base a la información mostrada en la Tabla 9, se calculan las probabilidades de Weibull. A continuación, se muestra el procedimiento para una velocidad de 1 m/s:

$$f(v) = \left(\frac{1,0231}{2,2406}\right) \left(\frac{1}{2,2406}\right)^{1,0231-1} \exp \left[ - \left(\frac{1}{2,2406}\right)^{1,0231} \right]$$

$$f(v)_{Enero} \approx \mathbf{0,2892}$$

Tabla 10. Probabilidades de Weibull mensuales

Velocidad m/s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>0</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>1</b>	0,2892	0,2654	0,3180	0,2709	0,2104	0,2198	0,1635	0,1770	0,2190	0,2831	0,2868	0,2996
<b>2</b>	0,1870	0,1287	0,1513	0,2157	0,2061	0,2067	0,1587	0,1624	0,1745	0,1965	0,1897	0,1649
<b>3</b>	0,1194	0,0723	0,0771	0,1514	0,1686	0,1649	0,1387	0,1368	0,1332	0,1301	0,1227	0,0957
<b>4</b>	0,0758	0,0436	0,0408	0,0993	0,1249	0,1202	0,1149	0,1105	0,0994	0,0840	0,0784	0,0571
<b>5</b>	0,0479	0,0275	0,0221	0,0621	0,0864	0,0824	0,0919	0,0869	0,0732	0,0534	0,0498	0,0347
<b>6</b>	0,0302	0,0179	0,0122	0,0374	0,0567	0,0538	0,0716	0,0669	0,0533	0,0335	0,0314	0,0213
<b>7</b>	0,0190	0,0119	0,0068	0,0219	0,0355	0,0338	0,0547	0,0506	0,0385	0,0208	0,0197	0,0133
<b>8</b>	0,0119	0,0081	0,0038	0,0125	0,0214	0,0205	0,0411	0,0378	0,0276	0,0128	0,0123	0,0083
<b>9</b>	0,0074	0,0056	0,0022	0,0069	0,0125	0,0120	0,0304	0,0280	0,0197	0,0078	0,0077	0,0052
<b>10</b>	0,0047	0,0039	0,0013	0,0038	0,0070	0,0069	0,0222	0,0204	0,0140	0,0048	0,0048	0,0033
<b>11</b>	0,0029	0,0028	0,0007	0,0020	0,0039	0,0038	0,0160	0,0148	0,0099	0,0029	0,0030	0,0021
<b>12</b>	0,0018	0,0020	0,0004	0,0011	0,0021	0,0021	0,0114	0,0107	0,0070	0,0017	0,0018	0,0014
<b>13</b>	0,0011	0,0014	0,0003	0,0006	0,0011	0,0011	0,0081	0,0076	0,0049	0,0010	0,0011	0,0009

Fuente: Autor

En la gráfica de la Figura 11, se muestra el ajuste de la distribución de Weibull al histograma del primer mes, que se obtiene, Figura 10, y se presentan los resultados de las probabilidades de Weibull calculadas y mostradas en la Tabla 10.

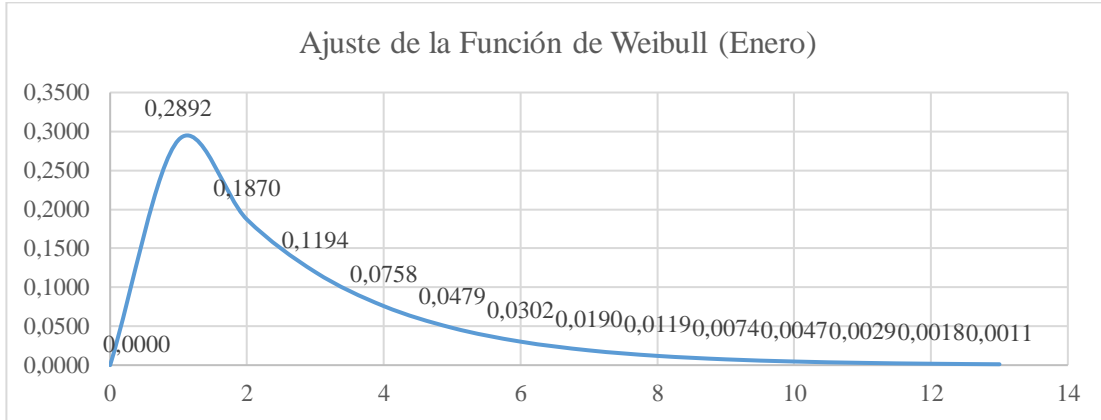


Figura 11. Función distribución de Weibull para el mes de enero

#### 2.4.2.2.6 Velocidad media

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] dv$$

Se utiliza el método de cambio de variables:

$$\bar{v} = c \int_0^{\infty} y^{\frac{1}{k}} \exp[-y] dy$$

$$y = \left(\frac{v}{c}\right)^k$$

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

La función gamma se puede definir como:

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

Aplicando esta ecuación, se obtiene la velocidad promedio mensual y promedio anual, comprobando que "c" se aproxima al valor determinado.

**Tabla 11. Velocidad media mensual y anual con el método de Weibull**

<b>MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL</b>		
<b>Mes</b>	<b>Factor de escala "c" (m/s)</b>	<b>Velocidad media (m/s)</b>
<b>Enero</b>	2,2406	2,2196
<b>Febrero</b>	1,3270	1,6048
<b>Marzo</b>	1,3188	1,3972
<b>Abril</b>	2,6948	2,5115
<b>Mayo</b>	3,4091	3,1087
<b>Junio</b>	3,3073	3,0305
<b>Julio</b>	4,4840	4,1679
<b>Agosto</b>	4,2481	3,9917
<b>Septiembre</b>	3,4313	3,3136
<b>Octubre</b>	2,4339	2,3546
<b>Noviembre</b>	2,3089	2,2709
<b>Diciembre</b>	1,7302	1,8156
<b>2023</b>	<b>2,7445</b>	<b>2,6489</b>

Fuente: Autor

#### 2.4.2.3 Método distribución de Rayleigh

El parámetro de forma "k" es equivalente a dos. Sin embargo, no es confiable para valores inferiores a 4.5 m/s, su análisis no debe aplicarse en estos casos.

##### 2.4.2.3.1 Velocidad media

Debido a que el estudio abarca valores por debajo de 4.5 m/s, no se realizará un análisis estadístico detallado para estos rangos.

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^w m_i v_i$$

Donde:

v: velocidad del viento.

m: frecuencia de datos dentro del rango de velocidad.

n: total de los datos obtenidos.

$n$ : número de diferentes valores de velocidad de viento registrados.

En la Tabla 12 se puede visualizar los datos de frecuencia para cada rango de velocidad, correspondiente al mes de enero, en el Anexo 4 se puede observar las tablas de los demás meses.

**Tabla 12. Información para la velocidad media del primer mes**

<b>Enero</b>		
<b>Rango de velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	145	130,5
1,8	161	289,8
2,7	151	407,7
3,6	111	399,6
4,5	67	301,5
5,4	56	302,4
6,3	30	189,0
7,2	16	115,2
8,1	1	8,1
9	2	18,0
9,9	1	9,9
10,8	1	10,8
11,7	2	23,4
12,6	-	-
13,5	-	-
<b><math>\Sigma</math>Total</b>		<b>2205,9</b>

**Fuente:** Autor

En función del número de datos de la Tabla 6 y  $\Sigma$ Total de la información de la Tabla 12 se emplean en la fórmula:

$$\bar{v}_{Enero} = \left( \frac{1}{744} \right) 2205,9$$

$$\bar{v}_{Enero} \approx 2,9649m/s$$

En la Tabla 13 se detalla la velocidad promedio usando el método:

**Tabla 13. Velocidad media mensual y anual con el método de Rayleigh**

<b>RESULTADOS DEL MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH</b>	
<b>Mes</b>	<b>Velocidad Promedio (m/s)</b>
enero	2,9649
febrero	2,2888
marzo	2,1835
abril	3,3450
mayo	3,9230
junio	3,9075
julio	4,9040
agosto	4,6887
septiembre	4,0163
octubre	3,1960
noviembre	3,0075
diciembre	2,5609
<b>2023</b>	<b>3,4155</b>

Fuente: Autor

#### 2.4.2.4 Promedio de las velocidad calculadas por los tres métodos

Tras calcular la velocidad media mensual, se procede a comparar los resultados para identificar cuál de ellos proporciona una estimación más precisa de la velocidad media del viento. Los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14. Velocidad media promediada mensual y anual**

<b>VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO</b>				
<b>Mes</b>	<b>WRPLOT View (m/s)</b>	<b>Weibull (m/s)</b>	<b>Rayleigh (m/s)</b>	<b>Promedio (m/s)</b>
<b>Enero</b>	2,53	2,2196	2,9649	<b>2,5715</b>
<b>Febrero</b>	1,83	1,6048	2,2888	<b>1,9079</b>
<b>Marzo</b>	1,73	1,3972	2,1835	<b>1,7702</b>
<b>Abril</b>	2,91	2,5115	3,3450	<b>2,9222</b>
<b>Mayo</b>	3,47	3,1087	3,9230	<b>3,5006</b>
<b>Junio</b>	3,44	3,0305	3,9075	<b>3,4593</b>
<b>Julio</b>	4,45	4,1679	4,9040	<b>4,5073</b>
<b>Agosto</b>	4,24	3,9917	4,6887	<b>4,3068</b>
<b>Septiembre</b>	3,58	3,3136	4,0163	<b>3,6366</b>

<b>Octubre</b>	2,73	2,3546	3,1960	<b>2,7602</b>
<b>Noviembre</b>	2,55	2,2709	3,0075	<b>2,6095</b>
<b>Diciembre</b>	2,12	1,8156	2,5609	<b>2,1655</b>
<b>2023</b>	<b>2,97</b>	<b>2,6489</b>	<b>3,4155</b>	<b>3,0098</b>

Fuente: Autor

La Figura 12 ilustra cómo se comporta la velocidad media promedio durante el año. Los meses presentan un comportamiento similar, con variaciones entre 1 y 2 m/s. El mes de julio registra el pico más alto, mientras que marzo muestra la velocidad más baja.

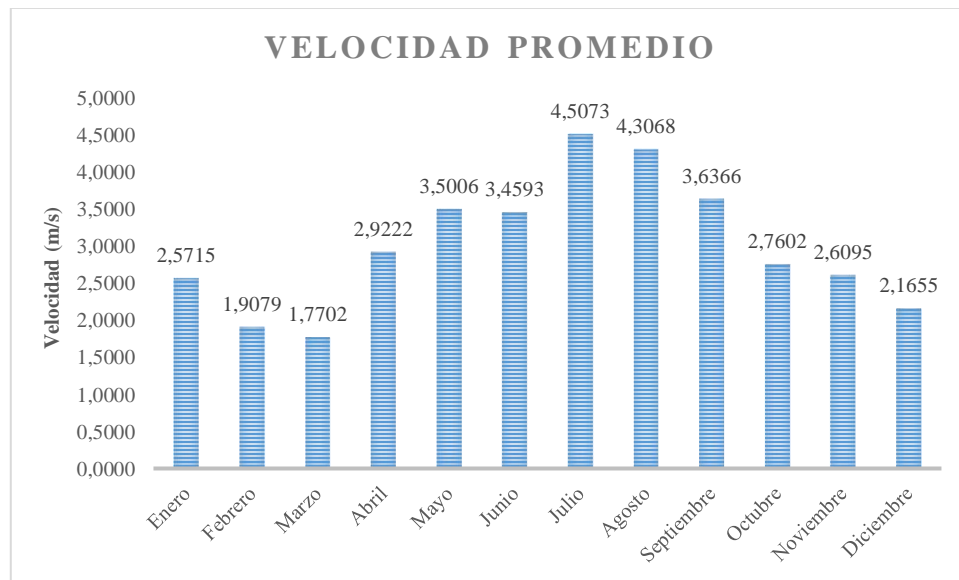


Figura 12. Variación de la velocidad media del 2023

### 2.4.3 Estimación del potencial solar fotovoltaico

Para determinar el potencial solar, es esencial conocer la irradiación mensual a lo largo del año. Este cálculo se efectúa empleando El concepto de exposición solar en Excel. Es importante señalar que el análisis se centrará exclusivamente en los datos correspondientes al primer mes.

#### 2.4.3.1 Determinación de la irradiación solar

Con base en los datos proporcionados por la estación y la información de la página web de NASA POWER, se puede calcular el promedio mensual de la irradiación solar.

**Tabla 15. Promedio de la radiación solar**

<b>RADIACIÓN SOLAR MEDIA</b> (kWh/m <sup>2</sup> día)			
<b>Mes</b>	<b>ISTT</b>	<b>NASA</b>	<b>Promedio</b>
<b>enero</b>	3,96	4,21	<b>4,09</b>
<b>febrero</b>	3,71	3,65	<b>3,68</b>
<b>marzo</b>	3,45	3,58	<b>3,52</b>
<b>abril</b>	3,82	3,70	<b>3,76</b>
<b>mayo</b>	3,84	3,63	<b>3,74</b>
<b>junio</b>	3,92	3,67	<b>3,80</b>
<b>julio</b>	3,79	3,54	<b>3,67</b>
<b>agosto</b>	3,94	3,85	<b>3,90</b>
<b>septiembre</b>	4,64	4,76	<b>4,70</b>
<b>octubre</b>	4,31	4,36	<b>4,34</b>
<b>noviembre</b>	4,59	4,42	<b>4,51</b>
<b>diciembre</b>	4,68	4,52	<b>4,60</b>
<b>2023</b>	<b>4,05</b>	<b>3,99</b>	<b>4,02</b>

Fuente: Autor

En la Figura 13 se observa que marzo es un mes con alta nubosidad y baja captación solar, lo que lo convierte en el mes menos favorable, mientras que septiembre se destaca como el mes más beneficioso.

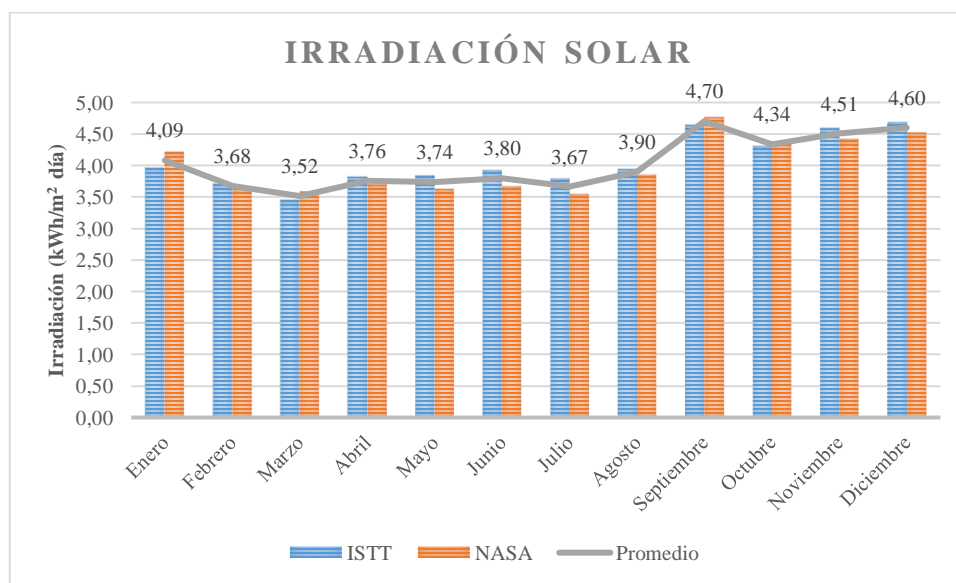


Figura 13. Niveles de irradiación solar.

#### 2.4.4 Estimación de la demanda energética

Para determinar la demanda energética del campus matriz del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua, es necesario llevar a cabo una revisión histórica de los consumos de electricidad y las facturas desde 2015 hasta 2022, tomando en cuenta que en el año 2020 y 2021 se redujo el consumo debido a que las clases fueron virtuales debido a la emergencia sanitaria. Estos datos son esenciales para el estudio económico y determinar la viabilidad del proyecto.

**Tabla 16. Histórico de consumo eléctrico 2015-2022 del IST Tungurahua**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
MES	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)	Consumo (KWh)
enero	7201	7801	8401	10201	10801	8401	3001	3001
febrero	7201	6001	7201	8401	10801	6601	3001	4801
marzo	8401	6601	7201	9601	10201	5401	4801	6601
abril	7801	6601	5401	7201	9001	3601	3001	5401
mayo	8401	6601	5401	7801	7801	3601	3001	6001
junio	7801	6601	9001	10201	9601	3001	3601	6601
julio	8401	7201	9601	12001	10801	3601	3601	7801
agosto	7801	7801	9601	11401	10201	3601	3601	6601
septiembre	6601	7801	9601	10801	10201	3601	3601	7201
octubre	7201	6001	6601	9601	6601	3601	3601	7801
noviembre	6001	6601	9001	9001	5401	3001	3601	6601
diciembre	6001	7800	8401	8401	6601	3001	3001	8401
<b>TOTAL</b>	<b>88812</b>	<b>83412</b>	<b>95412</b>	<b>114612</b>	<b>108012</b>	<b>51012</b>	<b>41412</b>	<b>76812</b>

Fuente: Autor

Se puede verificar que el mes de mayor consumo eléctrico fue agosto del 2018 con 11400 kWh de energía requerida, de igual manera el promedio mensual de consumo es de 6868,75 kWh y el anual es 82425 kWh.

**Tabla 17. Histórico de tarifa eléctrica 2015-2022 del IST Tungurahua**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
MES	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)	Tarifa (USD)
Enero	767,39	770,00	811,78	1017,51	1134,78	882,02	357,02	408,61
Febrero	816,48	611,31	712,27	845,11	1014,34	814,84	282,67	524,56
Marzo	895,00	660,84	685,46	974,57	900,57	588,76	392,18	606,19
Abril	841,24	635,39	497,91	717,20	925,83	318,42	303,30	604,97
Mayo	856,22	659,78	495,93	801,92	772,78	269,32	336,39	579,79

<b>Junio</b>	832,27	684,71	885,61	1047,38	1014,58	331,23	365,49	756,91
<b>Julio</b>	907,63	759,62	934,51	1165,88	1049,64	277,72	325,59	783,31
<b>Agosto</b>	832,27	763,04	954,16	1144,17	1076,57	268,59	362,68	681,55
<b>Septiembre</b>	690,52	762,33	911,99	1083,84	1007,09	333,31	370,58	666,04
<b>Octubre</b>	765,88	585,95	691,73	969,52	712,70	365,49	352,75	785,45
<b>Noviembre</b>	642,67	662,11	908,27	923,82	581,88	326,57	340,59	650,36
<b>Diciembre</b>	649,47	761,25	871,19	846,22	654,66	249,58	303,30	840,56
<b>TOTAL</b>	<b>9497,04</b>	<b>8316,33</b>	<b>9360,81</b>	<b>11537,14</b>	<b>10845,42</b>	<b>5025,85</b>	<b>4092,54</b>	<b>7888,3</b>

Fuente: Autor

En cuanto al valor más alto de la tarifa eléctrica se puede notar que fue en el mes de Julio del 2018 con \$1165,88, el promedio mensual de pago de tarifa es de \$693,37 y el promedio anual es de \$8320,43.

**Tabla 18. Histórico de demanda eléctrica 2015-2022 del IST Tungurahua**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
<b>MES</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>	<b>Demanda (KW)</b>
<b>Enero</b>	42	30	30	42	66	48	12	24
<b>Febrero</b>	48	30	36	42	72	54	12	30
<b>Marzo</b>	48	30	36	42	48	36	18	30
<b>Abril</b>	48	24	24	30	48	12	12	30
<b>Mayo</b>	42	30	24	42	36	12	12	36
<b>Junio</b>	48	36	36	54	54	12	12	42
<b>Julio</b>	54	42	36	54	48	12	12	36
<b>Agosto</b>	48	30	42	54	60	12	18	36
<b>Septiembre</b>	36	30	36	54	48	18	18	30
<b>Octubre</b>	42	24	30	48	36	18	24	36
<b>Noviembre</b>	36	30	48	42	36	12	18	30
<b>Diciembre</b>	36	30	48	42	36	12	12	42
<b>TOTAL</b>	<b>528</b>	<b>366</b>	<b>426</b>	<b>546</b>	<b>588</b>	<b>258</b>	<b>180</b>	<b>402</b>

Fuente: Autor

Se observa que el mes de mayor demanda eléctrica fue agosto del 2019 con 60 kW de potencia requerida, de igual manera el promedio mensual es de 34,31 kW y el promedio anual es 411,75 kW.

## 2.5 Conclusiones Capítulo II.-

- A través de una revisión teórica, se logró identificar y comprender los sistemas de generación de electricidad basados en fuentes renovables, que se caracterizan por su rápida capacidad de puesta en marcha. Además, se concluyó que estos sistemas pueden adaptarse a las necesidades específicas que se deseen satisfacer.
- Mediante una inspección en el sitio, se evaluó la situación actual de los consumos eléctricos en el Instituto y se verificó el funcionamiento adecuado de la estación meteorológica ubicada en la azotea de uno de los edificios.
- Se estimó la capacidad de los recursos meteorológicos en el área de estudio, descubriendo que la generación de energía fotovoltaica es superior a la eólica. Se registraron velocidades de viento menores a 2 m/s, lo que impide que el micro aerogenerador opere en su máxima eficiencia. Aunque la generación de energía fotovoltaica no es óptima en la temporada presente, su rendimiento es adecuado.

## CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA

### 3.1 Análisis de los resultados:

#### 3.1.1 Selección de equipos

La selección de equipos del sistema híbrido eólico fotovoltaico se describe a continuación de manera detallada:

##### 3.1.1.1 Aerogenerador

Para el presente proyecto se seleccionó el aerogenerador Zonhan 600W, sus características se observan en la Tabla 19.

**Tabla 19. Características técnicas del micro aerogenerador**

<b>Característica</b>	<b>Detalle</b>
<b>Modelo</b>	Zonhan NE-600
<b>Potencia nominal</b>	600W
<b>Voltaje</b>	24 V
<b>Aspas</b>	3
<b>Diámetro</b>	1,9 m
<b>Velocidad</b>	2,1 – 45 m/s 14 m/s Nominal
<b>Material</b>	Fibra de vidrio/Aluminio
<b>Peso</b>	18 kg.
<b>Temperatura de operación</b>	-40 °C - 80 °C

##### 3.1.1.1.1 Curva de potencia eléctrica del aerogenerador

Con esta curva característica se puede realizar el análisis de la producción de potencia de acuerdo a la velocidad de viento. Se observa la Tabla 20 y su gráfica mediante la Figura 14.

**Tabla 20. Intervalo de operación del aerogenerador**

<b>Velocidad de viento (m/s)</b>	<b>Potencia Eléctrica (W)</b>
0,0	0,0
1,0	0,0
2,0	0,0

3,0	19,0
4,0	26,0
5,0	42,0
6,0	98,0
7,0	155,0
8,0	251,0
9,0	315,0
10,0	374,0
11,0	501,0
12,0	521,0
13,0	619,0
14,0	672,0
15,0	700,0

Fuente: Autor

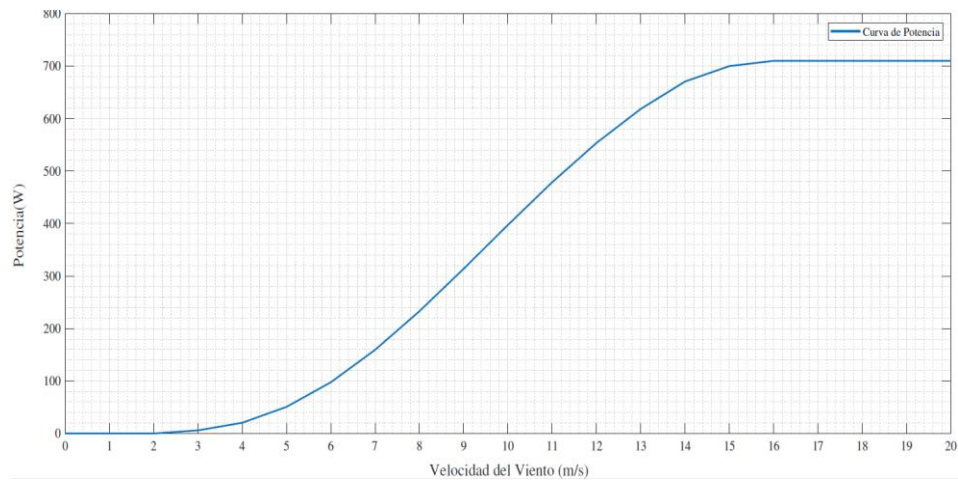


Figura 14. Curva de potencia

### 3.1.1.2 Características del Panel Fotovoltaico

Para el presente proyecto se plantea utilizar paneles solares monocristalinos para la respectiva captación de radiación solar, sus características se aprecian en la Tabla 21.

Tabla 21. Características técnicas del panel fotovoltaico

Característica	Detalle
Marca	Suniva
Tipo de célula	Policristalino
Potencia máxima (Pmax)	250W

<b>Característica</b>	<b>Detalle</b>
<b>Tensión a máxima potencia (Vmp)</b>	30.1V
<b>Intensidad de Corriente eléctrica a máxima potencia (Imp)</b>	8.3A
<b>Voltaje en circuito abierto (Voc)</b>	37.5V
<b>Intensidad de Corriente de cortocircuito (Isc)</b>	8.9A
<b>Eficiencia</b>	15.3%
<b>Tolerancia de potencia eléctrica</b>	±3%
<b>Temperatura de trabajo</b>	-40°C a 85°C
<b>Coefficiente de temperatura de potencia máxima</b>	-0.47%/°C
<b>Coefficiente de temperatura de Voltaje en circuito abierto Voc</b>	-0.34%/°C
<b>Coefficiente de temperatura de Isc</b>	+0.05%/°C
<b>Dimensiones</b>	1640 x 992 x 40 mm
<b>Peso</b>	19 kg
<b>Material del marco</b>	Aluminio anodizado
<b>Vidrio</b>	Vidrio templado de alta transparencia, 3.2 mm
<b>Caja de conexiones</b>	IP65
<b>Longitud de cables</b>	900 mm
<b>Conectores</b>	MC4 o compatibles
<b>Certificaciones</b>	IEC 61215, IEC 61730, CE, TUV

### 3.1.1.2.1 Curvas características del panel

La curva característica es una herramienta que facilita el análisis del voltaje y la corriente de salida de los paneles solares bajo distintas condiciones de temperatura y irradiancia. En la gráfica mostrada en la Figura 15, se representan dos tipos de curvas: una que muestra la relación entre el voltaje y la potencia, identificando el punto de máxima potencia del módulo como "Pmp", y otra que ilustra la relación entre el voltaje y la corriente, donde "Imp" indica la corriente en el punto de máxima potencia.

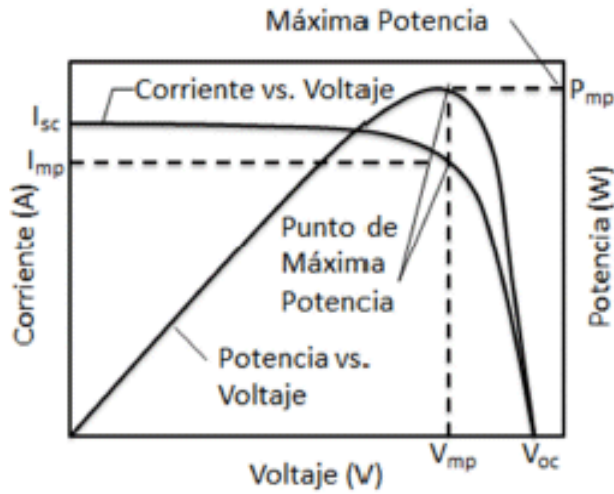


Figura 15. Curvas características de paneles fotovoltaicos

### 3.1.1.2.1 Curvas características a temperatura constante

El modelado se desarrolló con la información de la placa especificados en la Tabla 21, manteniendo una temperatura constante de  $25^{\circ}\text{C}$  y variando el valor de irradiancia. Como se observa en la Figura 16 y Figura 17, empleando una irradiancia de  $1000\text{ W/m}^2$  y un voltaje máximo de 30 Voltios, se alcanza una potencia de  $251,40\text{ W}$  y se produce una corriente de  $8,391\text{ Amperios}$ . Esto indica que "Pmp" e "Imp" son directamente proporcionales a la irradiancia.

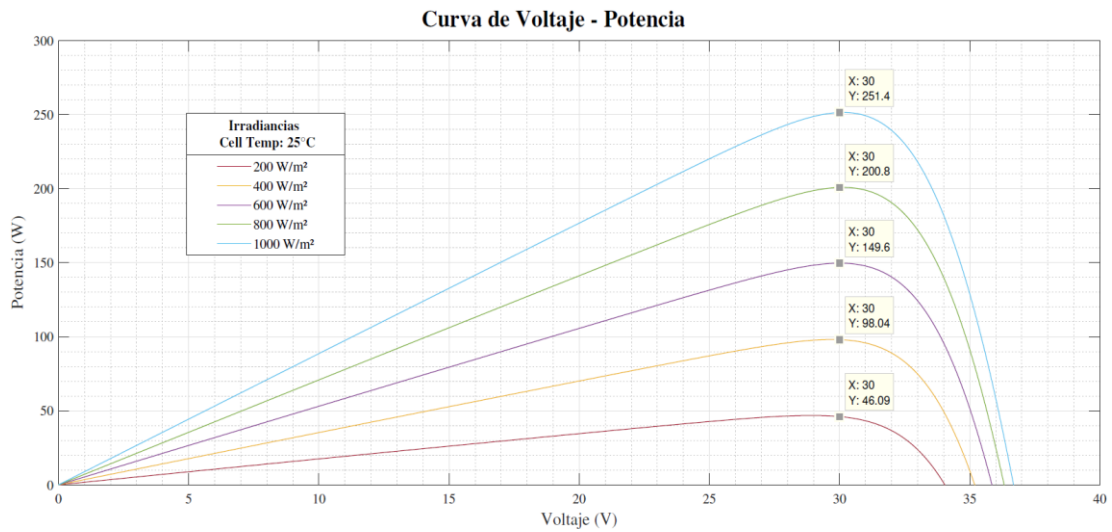


Figura 16. Curva de Voltaje vs Potencia

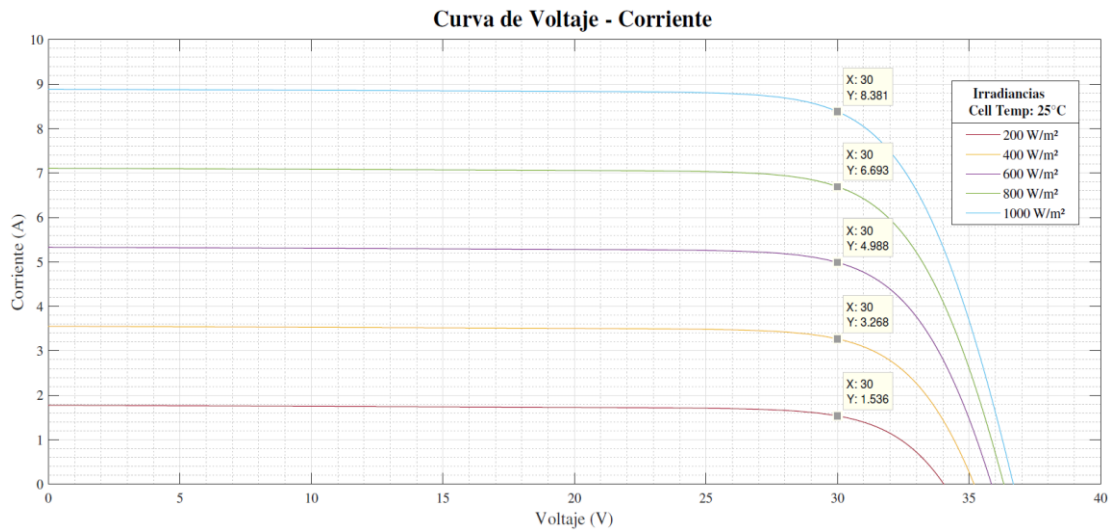


Figura 17. Curva de Voltaje vs Intensidad de Corriente

En la Tabla 22 se muestran los valores de potencia y corriente a temperatura constante.

Tabla 22. Potencia eléctrica e intensidad corriente a temperatura contante

Irradiancia (W/m <sup>2</sup> )	Vmp (V)	Pmp (W)	Imp (A)
200	30	46,09	1,536
400	30	98,04	3,268
600	30	149,6	4,988
800	30	200,8	6,693
1000	30	251,4	8,391

Fuente: Autor

### 3.1.1.2.1.2 Curvas características generadas con irradiancia constante

Asimismo, se utiliza los mismos datos de la placa, pero ahora la irradiancia se mantiene constante a 1000W/m<sup>2</sup>, mientras que la modificación se aplica con la temperatura. En la Figura 18 y Figura 19, a 0°C y con un voltaje máximo de 34,9 V, se alcanza una potencia de 297,6 W y una corriente de 8,52 A. Esto indica que, a medida que la temperatura disminuye, tanto "Pmp" como "Imp" aumentan.

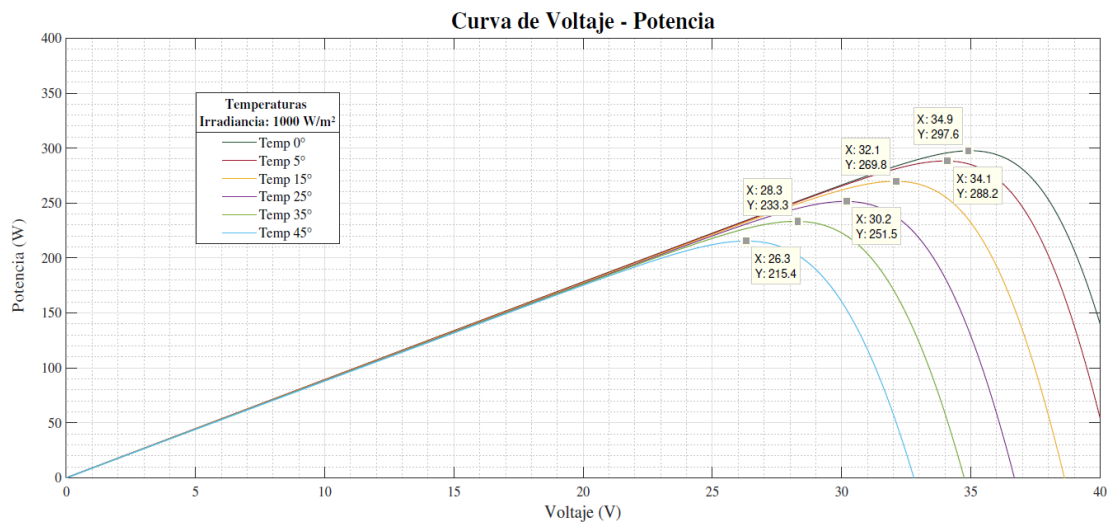


Figura 18. Curva de Voltaje vs Potencia

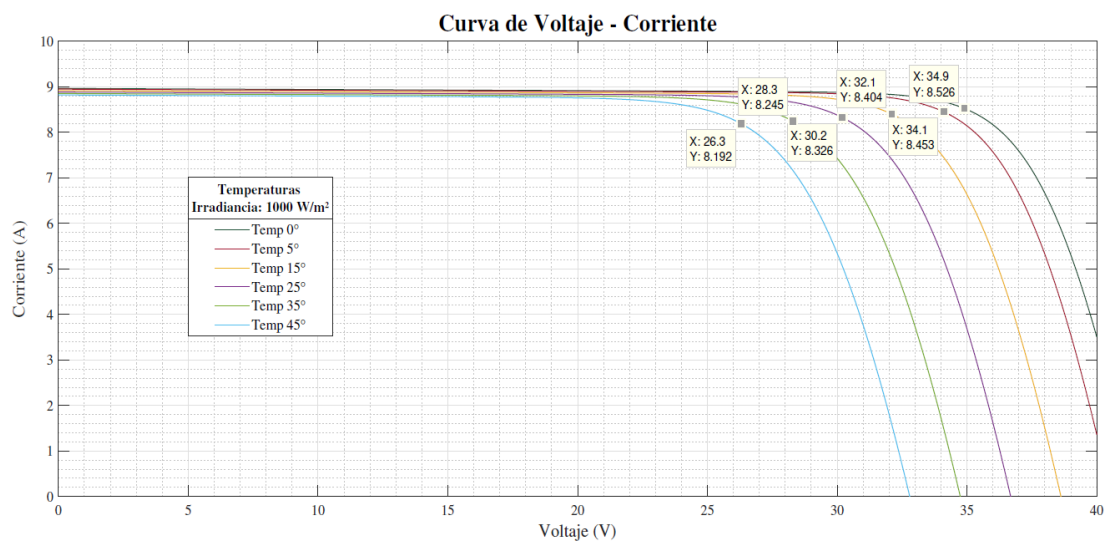


Figura 19. Curva de Voltaje vs Corriente

La Tabla 23 muestran el voltaje, potencia y corriente a irradiancia constante de las gráficas anteriores.

Tabla 23. Voltaje, potencia e intensidad de corriente a irradiancia contante

Temperatura (°C)	Vmp (V)	Pmp (W)	Imp (A)
0	34,9	297,6	8,52
5	34,1	288,2	8,45
15	32,1	269,8	8,4
24	30,2	251,5	8,32
35	28,3	233,3	8,24
45	26,3	215,4	8,19

### 3.1.1.3 Acumulador

Se seleccionan baterías con especificaciones similares, pero de tiene en cuenta determinar la demanda que es posible satisfacer en función de la generación diaria de energía de los dispositivos eléctricos.

$$C_{BB} = \frac{D_E \cdot D_A}{T_S \cdot P_D}$$

Donde:

$C_{BB}$ : Capacidad de baterías (Ah).

$D_E$ : Demanda energética (Wh/día).

$D_A$ : Días de autonomía (Número de días).

$T_S$ : Voltaje del sistema (V).

$P_D$ : Porcentaje Profundidad de descarga (%).

$$D_E = \frac{C_{BB} \cdot T_S \cdot P_D}{D_A}$$

$$C_{BB} \approx \mathbf{210 \text{ Ah}}$$

$$D_A \approx \mathbf{2 \text{ días}}$$

$$T_S \approx \mathbf{24V}$$

Se toma  $P_D$  del 80 %:

$$P_D \approx \mathbf{0,80}$$

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$D_E = \frac{210 \times 24 \times 0,80}{2}$$

$$D_E \approx \mathbf{2016 \text{ Wh/día}}$$

Después de identificar la demanda energética que el banco de baterías podrá satisfacer, se emplean acumuladores de descarga profunda y sin necesidad de mantenimiento. Las especificaciones técnicas de estos acumuladores se presentan en la Tabla 24.

**Tabla 24. Características técnicas del acumulador adquirido.**

<b>Característica</b>	<b>Detalle</b>
<b>Modelo</b>	Suyeego
<b>Tipo</b>	Batería de descarga profunda, libre de mantenimiento
<b>Capacidad nominal</b>	210Ah
<b>Voltaje nominal</b>	12V
<b>Tipo de tecnología</b>	AGM (Absorbent Glass Mat)
<b>Dimensiones</b>	522 x 240 x 219 mm
<b>Peso</b>	58 kg
<b>Temperatura de trabajo</b>	-20°C a 60°C
<b>Eficiencia de carga</b>	85%
<b>Ciclo de vida</b>	1000 ciclos a 50% DOD
<b>Resistencia interna</b>	Baja
<b>Protección</b>	Libre de mantenimiento, resistente a fugas
<b>Terminales</b>	M8
<b>Certificaciones</b>	CE, ISO, UL

### 3.1.1.4 Inversor

El inversor que se va a utilizar depende exclusivamente de la demanda del equipo electrónico. Dado que en el proyecto la demanda es de aproximadamente 38 kW, el inversor deberá tener una capacidad igual o mayor. A continuación, se detallan las características técnicas en la Tabla 25.

**Tabla 25. Características técnicas del inversor a utilizar**

<b>Inversor</b>	<b>MID 40KTL3-X</b>
Marca	Growatt
Potencia eléctrica máxima	60000 W
Voltaje máximo en CC	1100 V
Voltaje de arranque	250 V
Rango de voltaje del MPPT	200V – 1000V
Voltaje nominal de funcionamiento	600 V
Intensidad máxima de entrada:	26A en MPPT

Intensidad máxima de cortocircuito:	32A
Número de seguidores MPPT	4
Máxima eficiencia	98,8 %
Dimensiones	580x435x230 mm
Peso	29,5 kg

### 3.2 Evaluación de impactos o resultados:

Este apartado se llevará a cabo mediante una simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico. Después de analizar diversos programas de simulación y dimensionamiento, se ha seleccionado el software HOMER Pro. En la Figura 20 se puede observar el proceso a seguir. El paso inicial consiste en localizar el lugar en el mapa interactivo que ofrece el software, el cual tiene una resolución de gran calidad. Una vez localizado el punto, se descargan todas las variables meteorológicas principalmente eólicas y solares necesarias para el estudio.

El paso siguiente consiste en introducir los valores de la carga en vatios para cada hora de un día específico. Con la curva resultante, el software realiza el análisis de carga y muestra la potencia de demanda pico y el consumo respectivo de energía. Luego, se seleccionan todos los elementos definidos en la Figura 20. El software cuenta con una librería que incluye la mayoría de componentes existentes en el mercado.

Finalmente, se utiliza la calculadora que se encuentra en la esquina superior derecha para dimensionar técnica y económicamente el sistema híbrido. Al cumplir con las condiciones especificadas por el usuario, el software ofrece la solución más óptima.



El software HOMER es una poderosa herramienta que se utiliza para diseñar y analizar los sistemas de energía híbridos. Fue desarrollado originalmente por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de los Estados Unidos

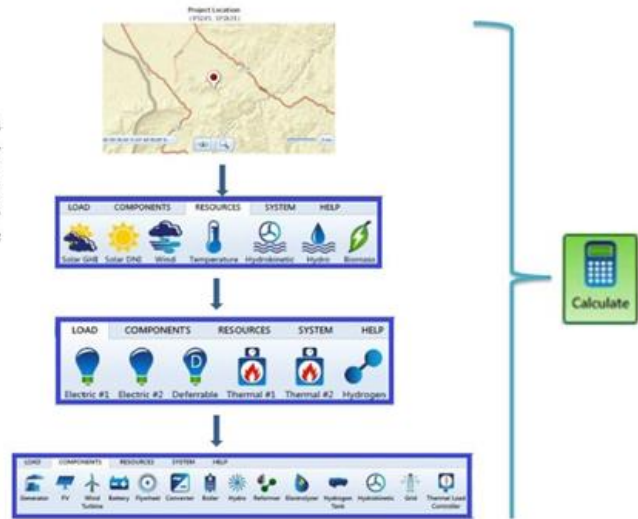
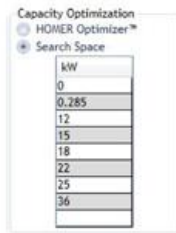


Figura 20. Pasos para la simulación

Para realizar un dimensionamiento adecuado, es necesario descargar las variables meteorológicas con el fin de evaluar las fuentes energéticas a utilizar. El lugar de estudio presenta una buena radiación solar, tal como se puede observar en la Figura 21, con un promedio de 4,48 kWh/m<sup>2</sup>/día. El mes de junio es el menos favorable, con 4,23 kWh/m<sup>2</sup>/día.

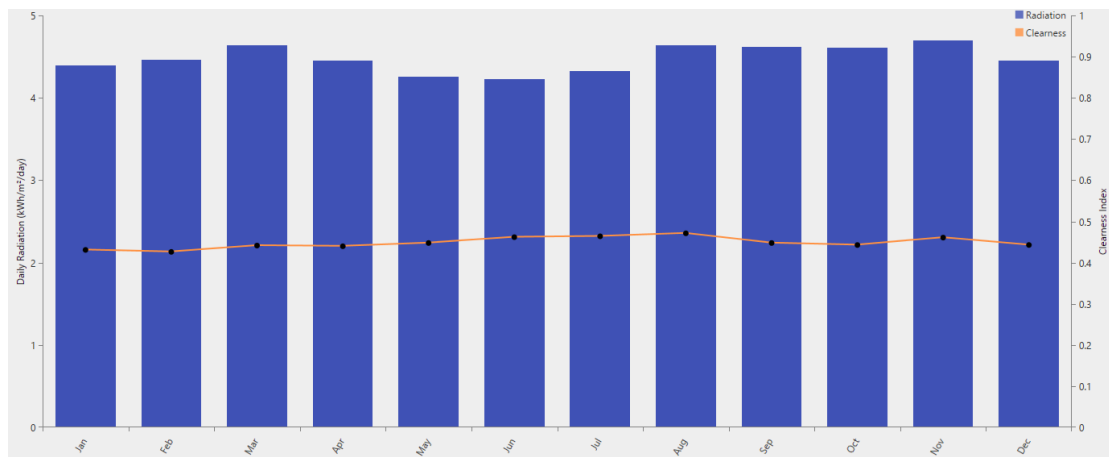


Figura 21. Gráfico estadístico de irradiación solar en el software Homer Pro.

En lo que se refiere a los datos eólicos, la velocidad del viento es baja en la zona de estudio. No obstante, aún se podría aprovechar para generar potencia eléctrica baja en casos emergentes, debido a que el sistema fotovoltaico no se encuentre operativo. La Figura 22 indica que la velocidad del viento tiene un valor promedio de 3,33 m/s.

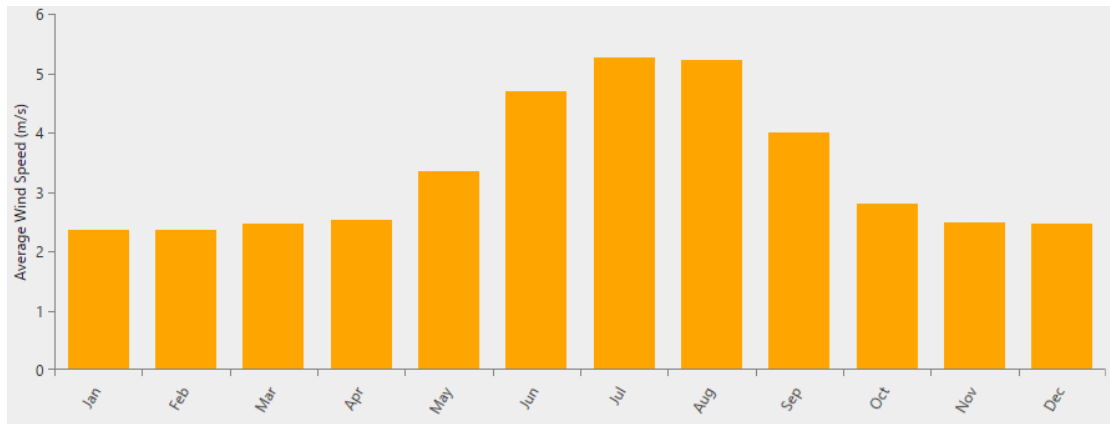


Figura 22. Gráfico estadístico de velocidad de viento en el software Homer Pro.

El software realiza numerosas simulaciones para determinar la configuración más eficiente y de menor costo energético, tal como se ilustra en la Figura 23.

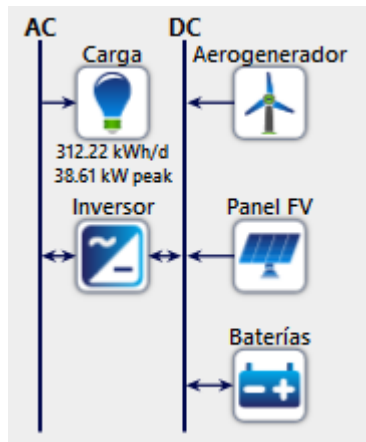


Figura 23. Diagrama esquemático del sistema híbrido.

La configuración óptima incluye 376 paneles fotovoltaicos, 1 aerogenerador, 40 baterías y 1 inversor, con un coste general de \$0,05/kWh y un costo total de implementación de \$58.876,34. En la Figura 24 se puede apreciar los resultados obtenidos.

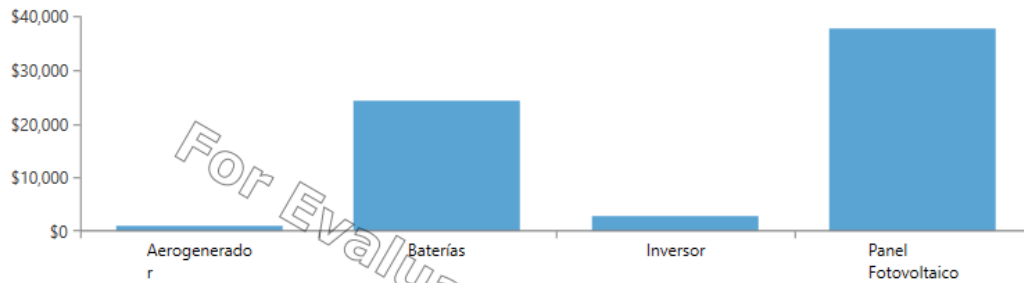


Figura 24. Costos de implementación del sistema.

La energía generada por el sistema híbrido se divide entre las dos fuentes de energía: los paneles fotovoltaicos aportan el 95% con 130.138 kWh/año, el aerogenerador aporta el 5,01% con 6.860 kWh/año. La generación total es de 136.998 kWh/año, mientras que la carga requerida es de 113.921 kWh/año, resultando en un excedente del 13.8% (18.931 kWh/año). La Figura 25 muestra la energía generada por cada fuente.

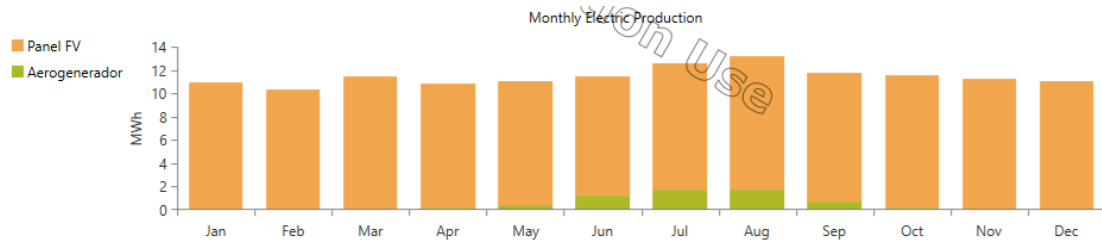


Figura 25. Producción mensual de energía eléctrica por cada fuente.

El primer componente a analizar es el generador fotovoltaico, compuesto por paneles de 250 W, los cuales producen 357 kWh/día y 130.138 kWh/año, con una máxima potencia 87.8 kW y 4.380 horas de operación anuales. El costo de la energía es de \$0,02241/kWh. La Figura 26 muestra los horarios de mayor producción.

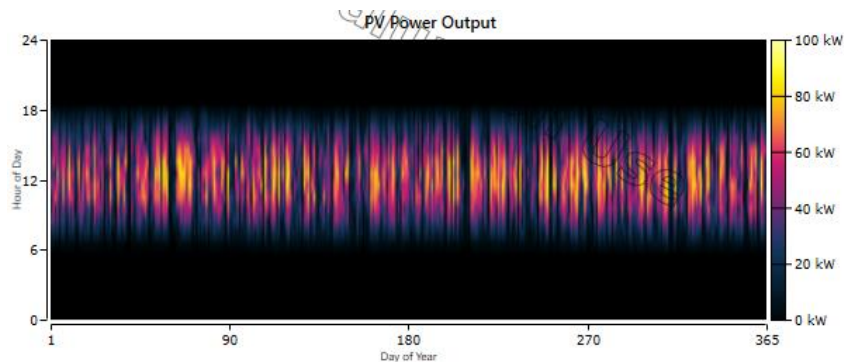


Figura 26. Potencia eléctrica de salida de la generación fotovoltaica

Adicionalmente, se utiliza 1 aerogenerador con una potencia total de 0.783kW, produciendo 6.860 kWh anuales y operando 7280 horas al año. El costo de la energía es de \$0,0125/kWh. La Figura 27 muestra la potencia de salida del aerogenerador durante el año, diferenciada por colores.

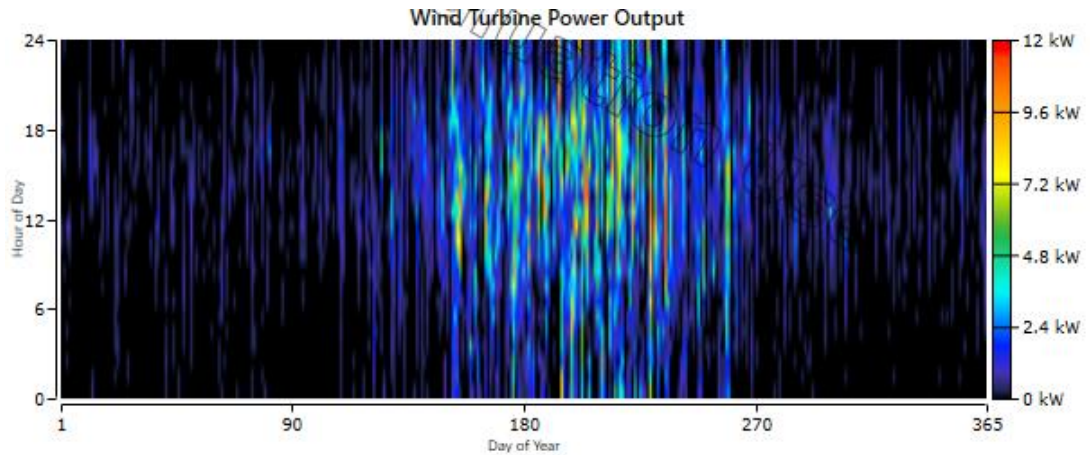


Figura 27. Potencia eléctrica de salida de la generación eólica

El banco de baterías consta de 40 unidades de 12 V cada una, con una autonomía del sistema de 49.2 horas y un costo de almacenamiento de \$0,012/kWh. La capacidad nominal es de 1430 kWh, con una energía esperada de almacenamiento de 1.001 kWh y una vida útil de 15 años. La energía que ingresa al banco de baterías es de 61.324 kWh/año, entregando 59.740 kWh/año a la carga y perdiendo 1844 kWh/año. La Figura 28 muestra el estado de carga del banco de baterías, con las baterías descargadas en azul y cerca del 100% en naranja.

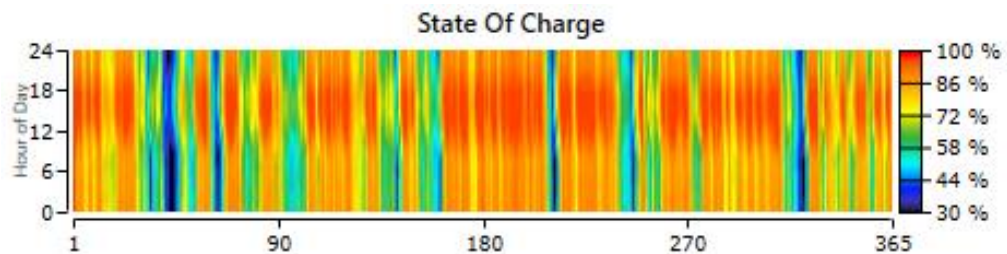


Figura 28. Estado de carga del banco de baterías.

### 3.3 Validación económica de los resultados:

El programa utilizado optimiza el sistema híbrido para encontrar el menor costo de generación. En el proyecto propuesto, el costo nivelado de la energía es de \$0,0446/kWh, con costos de operación de \$527,44 y un costo total del sistema de \$58.876,34. El componente más costoso es el conjunto de paneles fotovoltaicos con \$37.651,17, seguido por el banco de baterías con \$18.000 y el inversor con \$2475.17. La Figura 29 detalla los costos de capital, reemplazo, operación y mantenimiento.

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
▷ Aerogenerador	\$750.00	\$239.11	\$258.55	\$0.00	(\$134.75)	\$1,112.90
▷ Baterías	\$18,000.00	\$7,636.93	\$0.00	\$0.00	(\$1,437.35)	\$24,199.58
▷ Inversor	\$2,475.17	\$0.00	\$255.96	\$0.00	\$0.00	\$2,731.13
▷ Panel Fotovoltaico	\$37,651.17	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$37,651.17
System	\$58,876.34	\$7,876.03	\$514.52	\$0.00	(\$1,572.10)	\$65,694.79

Figura 29. Costo de elementos del sistema híbrido.

El flujo de caja, mostrado en la Figura 30, indica que la inversión inicial se realiza al inicio del proyecto, con gastos de reemplazo de componentes en el año 15, y recuperación de la inversión en el año 7.

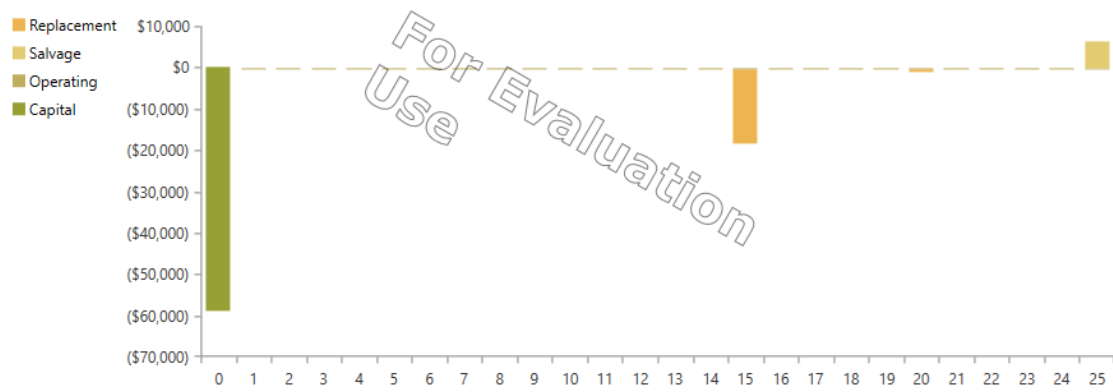


Figura 30. Flujo de caja en el tiempo del sistema

### 3.4 Conclusiones Capítulo III. -

- El sistema híbrido eólico-fotovoltaico diseñado demuestra una capacidad adecuada para satisfacer la demanda energética proyectada, con un excedente del 13,8% en la generación anual de energía. Los paneles solares contribuyen con el 95% de la producción total, mientras que el aerogenerador aporta el 5%. Esto confirma la eficiencia del diseño y la complementariedad de las fuentes energéticas seleccionadas.
- La evaluación económica realizada con el software HOMER muestra que el sistema híbrido tiene un costo nivelado de energía. Los componentes más costosos son el banco de baterías y el inversor, representando una inversión significativa. La simulación proyecta la recuperación de la inversión en 7 años, lo cual indica una viabilidad económica.
- El sistema presenta una sobreproducción de casi el 14%, lo que subraya la necesidad de recurrir a estrategias de gestión de energía para optimizar el uso del excedente y reducir pérdidas. La configuración óptima incluye paneles solares, aerogeneradores, y banco de baterías, proporcionando una autonomía de alrededor de 48 horas. Este balance asegura la continuidad del suministro energético, incluso en condiciones meteorológicas adversas.
- En cuanto a la facturación eléctrica, el costo de generación es de \$0.05/kWh. Considerando que se necesitan generar 82.425 kWh anuales, el costo total de producción energética es de \$4121.25. Dado que el promedio anual de facturación por consumo energético es de \$8320.43, se logra un ahorro anual del 49.53%.

## **Conclusiones generales**

- La investigación realizada sobre la generación de electricidad mediante energías alternativas en instalaciones educativas ha permitido identificar diversas tecnologías y metodologías aplicadas en contextos similares. Se concluye que la combinación de sistemas híbridos fotovoltaicos y eólicos es una solución efectiva para reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales, mejorando la sostenibilidad y la resiliencia energética en el campus del Instituto Superior Tecnológico Tungurahua.
- La evaluación técnica, económica y ambiental del sistema híbrido fotovoltaico-eólico ha demostrado su viabilidad. Los análisis realizados indican que, a pesar de la inversión inicial, el sistema puede generar ahorros significativos en la facturación eléctrica y contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que respalda la implementación de este tipo de tecnologías en el campus.
- La simulación del sistema híbrido utilizando software especializado ha permitido validar su diseño y funcionamiento. Los resultados muestran que el sistema no solo puede satisfacer la demanda energética del campus, sino que también puede generar un excedente de energía, lo que resalta la efectividad de la metodología empleada y su aplicabilidad en futuros proyectos de generación eléctrica en otras instituciones educativas.

## **Recomendaciones**

- Se recomienda establecer un programa de mantenimiento preventivo para el sistema híbrido, que incluya visitas técnicas regulares. Esto ayudará a prolongar la vida útil de los equipos y garantizar su funcionamiento óptimo, lo que es crucial para maximizar la eficiencia y la producción de energía.
- Es fundamental llevar a cabo programas de capacitación para el personal del campus sobre el uso y mantenimiento del sistema híbrido. Además, se sugiere implementar campañas de concienciación sobre la importancia de la eficiencia energética y el uso de energías renovables entre los estudiantes y la comunidad educativa.
- Se recomienda continuar con la investigación sobre la generación de energía a partir de fuentes renovables, adaptando las metodologías y tecnologías a las necesidades específicas del campus. Esto incluye la evaluación periódica del rendimiento del sistema y la consideración de nuevas tecnologías que puedan mejorar la eficiencia y reducir costos.

### Referencias bibliográficas:

- [1] L. D. Guerra Baeza, “Estudio de factibilidad técnico/económica de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para escuelas de Quinchao,” 2013.
- [2] A. Castillo Ramírez, F. Villada Duque, and J. A. Valencia Velásquez, “Diseño multiobjetivo de un sistema híbrido eólico-solar con baterías para zonas no interconectadas,” *Tecnura*, vol. 18, pp. 77 – 93, 01 2014.
- [3] A. Werner de Dios Ortega and M. Errasti Cabrera, “Diseño por simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vaquería en Cuba,” *Ingeniería Mecánica*, vol. 16 (Mayo -, no. 2, pp. 123 – 131, 2013.
- [4] G. Das, M. De, K. K. Mandal, and S. Mandal, “Techno economic feasibility analysis of hybrid energy system,” in *2018 Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques (EDCT)*, pp. 1–5, 2018.
- [5] J. Ge, C. Shen, K. Zhao, and G. Lv, “Energy production features of rooftop hybrid photovoltaic–wind system and matching analysis with building energy use,” *Energy Conversion and Management*, vol. 258, p. 115485, 2023.
- [6] J. A. Serván Sócola, “Análisis técnico-económico de un sistema híbrido de baja potencia eólico solar conectado a la red,” 2015.
- [7] J. Martínez, "Integración de sistemas híbridos en comunidades rurales de América Latina," *Revista de Energía y Desarrollo Sustentable*, vol. 15, no. 2, pp. 45-56, 2020.
- [8] A. Hernández, "Implementación de sistemas híbridos en entornos urbanos: Impactos y beneficios," *Journal of Urban Energy Studies*, vol. 22, no. 4, pp. 67-78, 2021.
- [9] I. Gómez, "Mejora de la eficiencia y confiabilidad en sistemas híbridos mediante tecnologías de almacenamiento de energía", *Revista de Energía Renovable y Sostenibilidad*, vol. 15, no. 3, pp. 45-60, marzo 2023.
- [10] F. J. Ortiz Bonilla, “Evaluación del potencial de radiación solar y geotérmico de baja entalpía en el centro educativo “Latinoamericano” de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, durante el período 2014–2015. propuesta de implementación de un sistema energético híbrido solar y geotérmico para uso

- de consumo eléctrico y calefacción.” Master’s thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2016.
- [11] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Wiley, 2009.
- [12] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3rd ed. Springer, 2013.
- [13] M. Sathyajith, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, 2006.
- [14] A. S. Monin and A. M. Obukhov, "Basic laws of turbulent diffusion in the surface layer of the atmosphere," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 5, no. 3, pp. 387-391, 1954.
- [15] R. B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [16] J. R. Oke, *Boundary Layer Climates*. London: Methuen, 1978.
- [17] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems," John Wiley & Sons, 2005.
- [18] J. G. McGowan and J. F. Manwell, *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press, 2012.
- [19] A. Hau, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics," Springer, 2006.
- [20] M. K. Y. Leung, "Wind Turbine Power Curve Analysis," in *Handbook of Wind Power Systems*, Springer, 2010, pp. 377-400.
- [21] A. S. Wills, *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage*, 3rd ed. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 2010.
- [22] T. Markvart, *Solar Electricity*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2000.
- [23] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [24] J. Twidell and T. Weir, *Renewable Energy Resources*, 3rd ed. London, UK: Routledge, 2015.
- [25] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook*, New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold, 1980.

- [26] T. Markvart y L. Castañer, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier, 2012
- [27] L. Fraas, *Low-Cost Solar Electric Power*, Cham, Switzerland: Springer, 2014.
- [28] M. A. Green, *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [29] A. Luque y S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- [30] G. C. Bass, *Batteries for Sustainability*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013.
- [31] A. Arora y Z. Zhang, "Battery Technologies for Electric Vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 14, pp. 4377-4393, 2010.
- [32] T. R. Crompton, *Battery Reference Book*, 3rd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2017.
- [33] J. K. Kordesch y J. U. Müller, *Fuel Cells and Hydrogen Technology*, Wiley-VCH, 2003.
- [34] C. Zhao, *Redox Flow Batteries for Large-Scale Energy Storage*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2020.
- [35] L. Fraas, *\*Low-Cost Solar Electric Power\**, Cham, Switzerland: Springer, 2014.
- [36] A. K. Gupta, V. Kumar y R. Kumar, "Hybrid wind–solar–thermal energy system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 271-284, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.053.
- [37] M. K. A. Kader, S. M. M. Rahman, y N. A. A. Rahman, "Performance analysis of a hybrid wind-photovoltaic system integrated with a thermal storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 291-299, 2015. doi: 10.1016/j.enconman.2015.01.030.
- [38] N. S. Iqbal, B. S. S. Sutherland, y K. K. Kim, "Design and analysis of a hybrid solar-wind system with an air-based cooling mechanism," *Renewable Energy*, vol. 104, pp. 1-12, 2017. doi: 10.1016/j.renene.2016.12.047.
- [39] F. T. M. Costa, "Meteorological station design and implementation," *Journal of Atmospheric Science*, vol. 67, no. 5, pp. 1453-1462, 2010.

- [40] J. Smith and M. R. Jones, "The role of meteorological stations in modern climate studies," *Climate Dynamics*, vol. 39, no. 4, pp. 1234-1245, 2011.
- [41] J. Doe, *Meteorological Instruments and Methods*, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2018, pp. 45-47.
- [42] A. Smith, "Advances in Hygrometry: Techniques and Applications," *Journal of Atmospheric Science*, vol. 12, no. 4, pp. 234-245, 2019.
- [43] R. Brown, *Atmospheric Pressure Measurement*, 2nd ed. London, UK: Springer, 2017, pp. 89-92.
- [44] M. Johnson, "Wind Speed Measurement Techniques," *International Journal of Meteorology*, vol. 15, no. 2, pp. 101-110, 2020.
- [45] L. White, *Wind Direction Indicators: Design and Function*, 1st ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2016, pp. 33-35.
- [46] P. Green, "Rainfall Measurement and Analysis," *Climatic Research Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 150-160, 2018.

# ANEXOS

## Anexo 1. Rosa de Vientos de cada mes en el IST Tungurahua

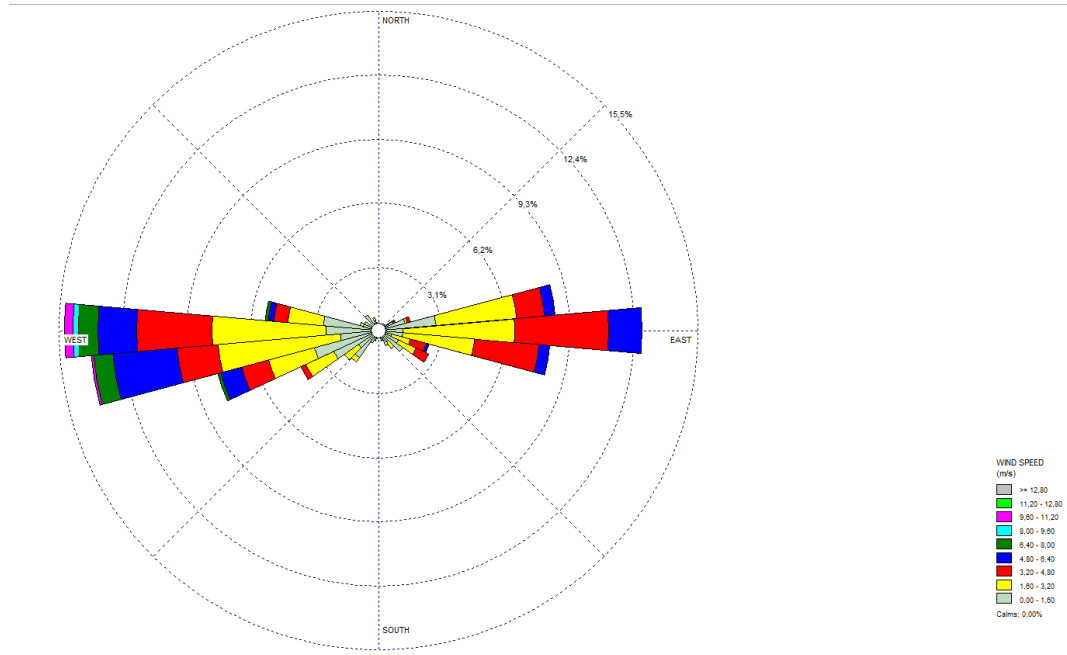


Figura 31. Rosa de Vientos del mes de enero 2023 en el software WRPLOT View.



Figura 32. Rosa de Vientos del mes de enero 2023 con Google Earth.

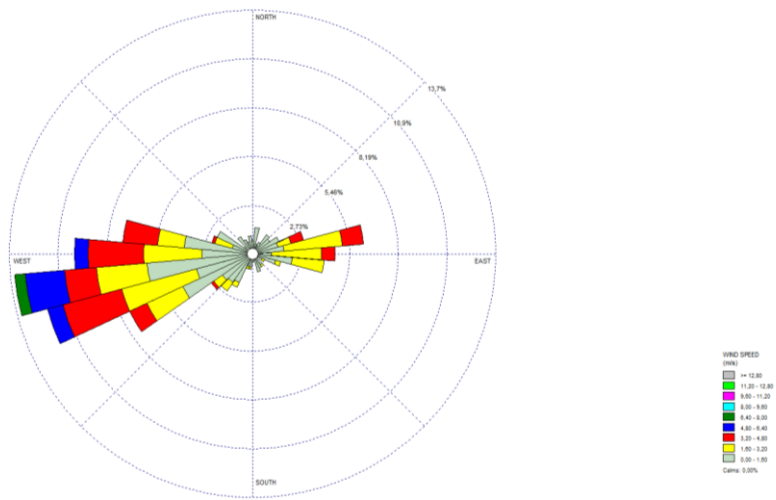


Figura 33. Rosa de Vientos del mes de febrero 2023 en el software WRPLOT View.

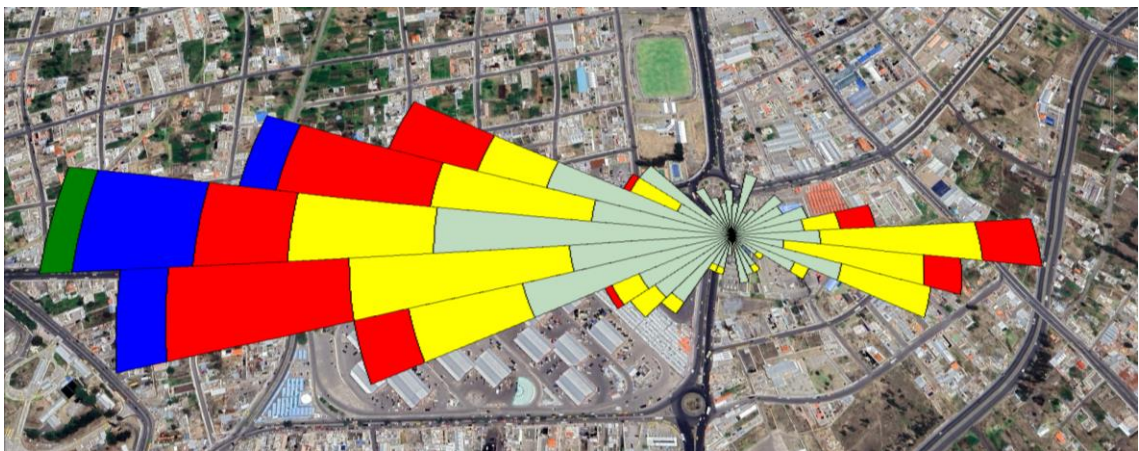


Figura 34. Rosa de Vientos del mes de febrero 2023 con Google Earth.

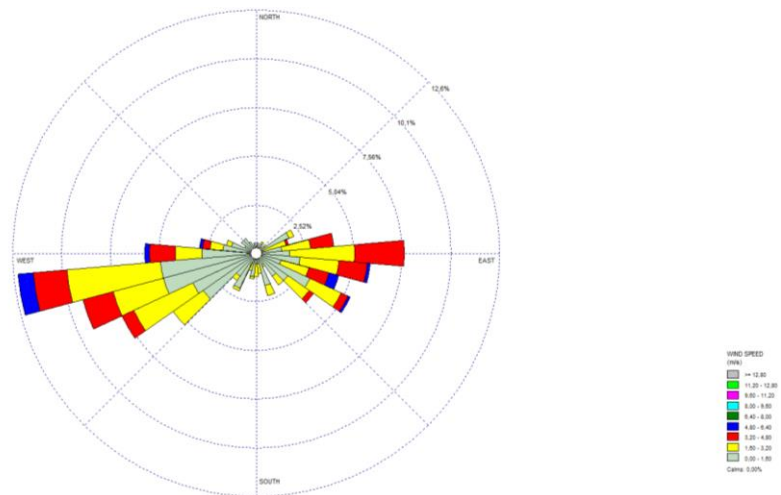


Figura 35. Rosa de Vientos del mes de marzo 2023 en el software WRPLOT View

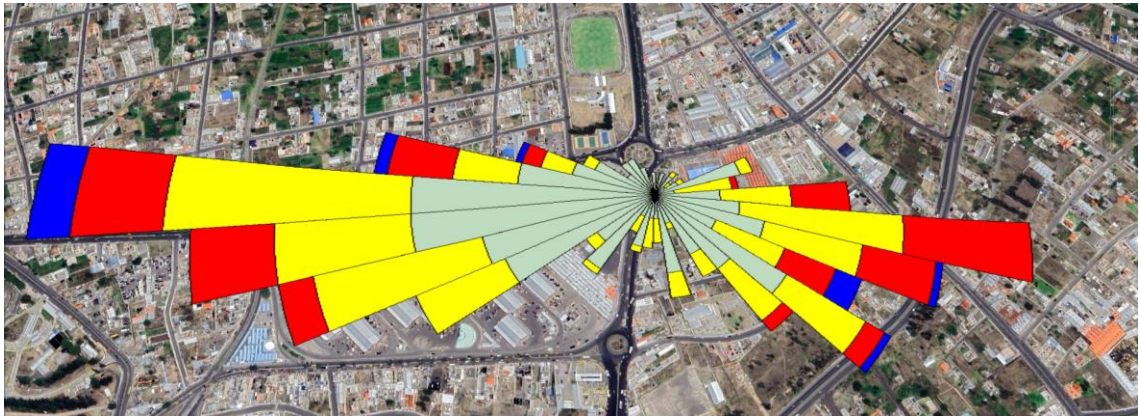


Figura 36. Rosa de Vientos del mes de marzo 2023 con Google Earth

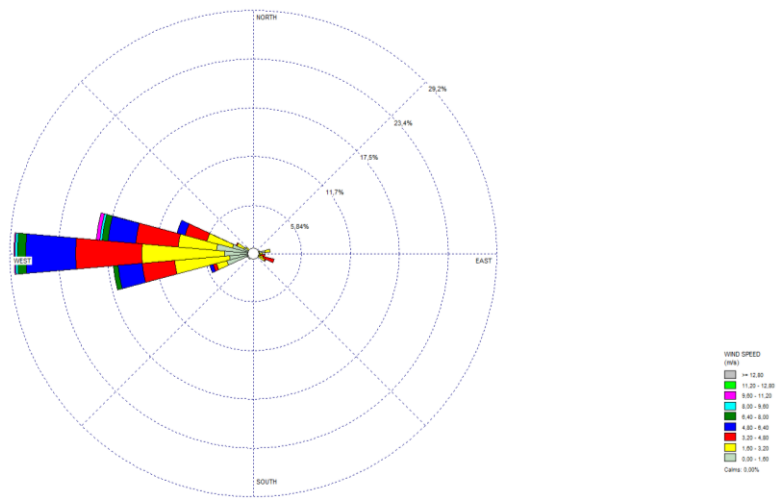


Figura 37. Rosa de Vientos del mes de abril 2023 en el software WRPLOT View

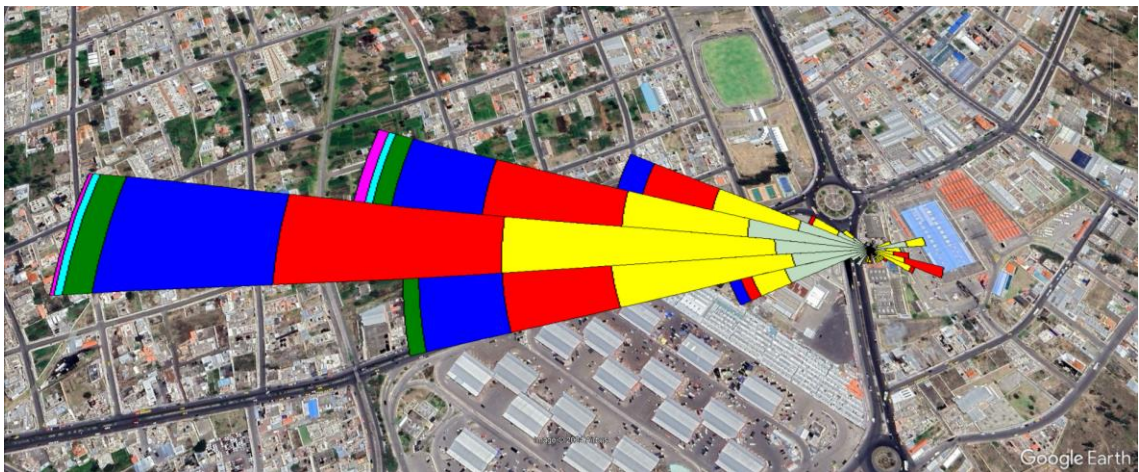


Figura 38. Rosa de Vientos del mes de abril 2023 con Google Earth

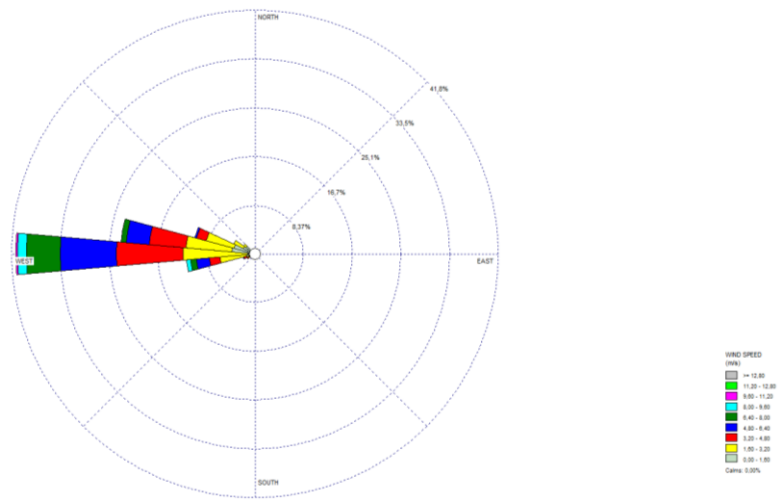


Figura 39. Rosa de Vientos del mes de mayo 2023 en el software WRPLOT View

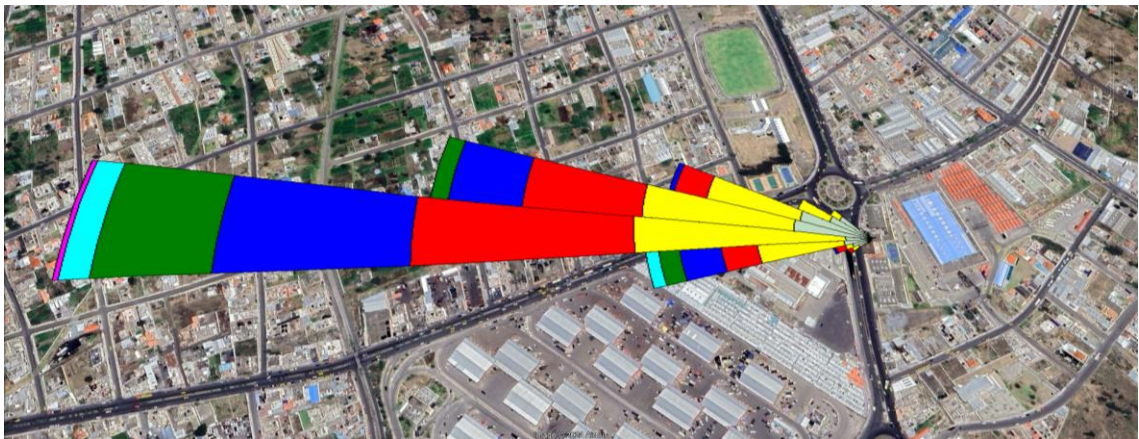


Figura 40. Rosa de Vientos del mes de mayo 2023 con Google Earth

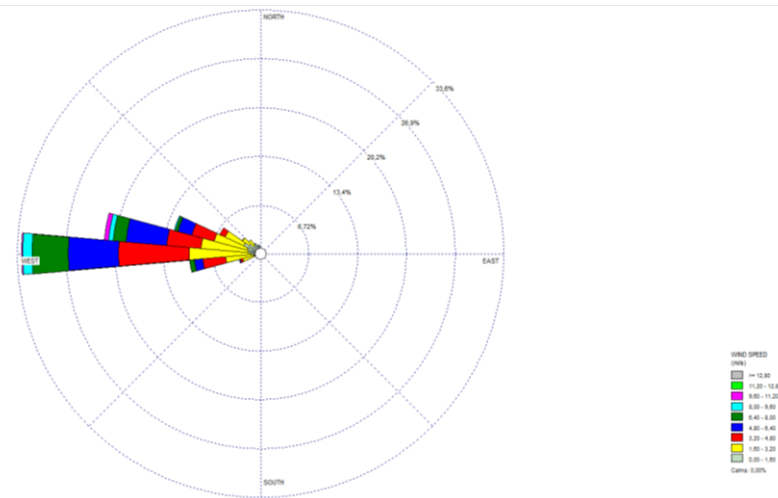


Figura 41. Rosa de Vientos del mes de junio 2023 en el software WRPLOT View

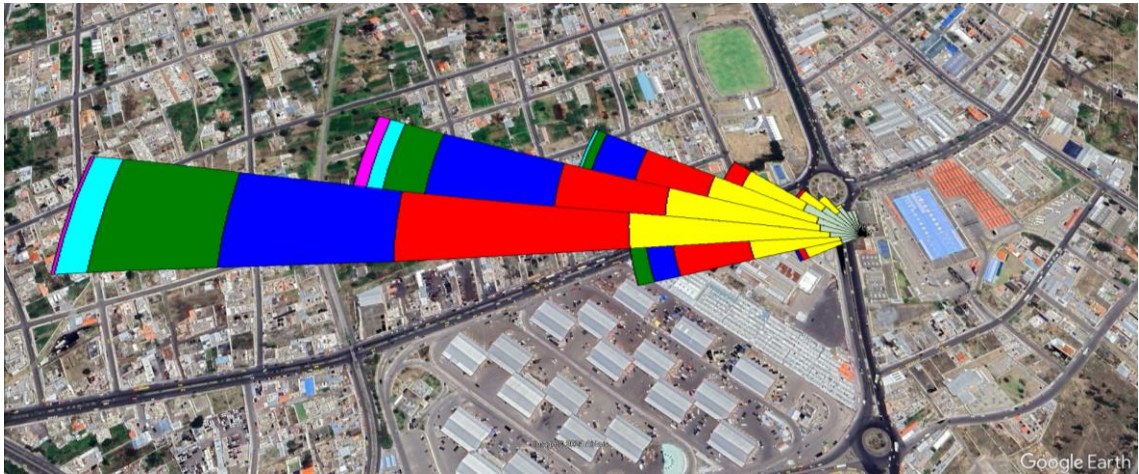


Figura 42. Rosa de Vientos del mes de junio 2023 con Google Earth

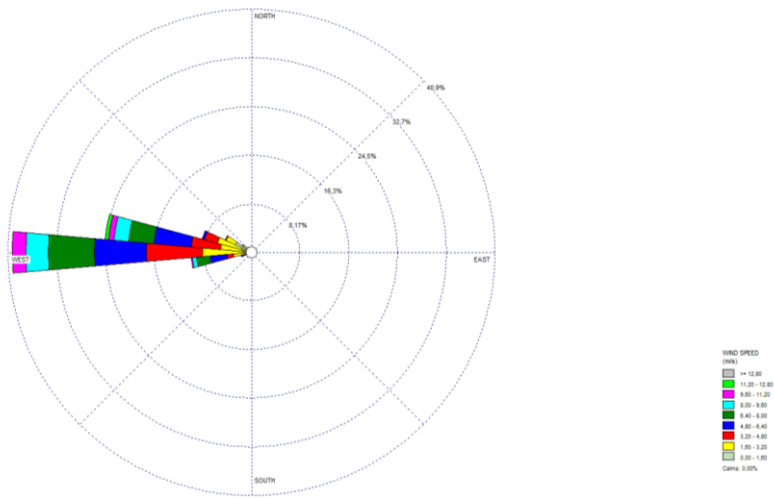


Figura 43. Rosa de Vientos del mes de julio 2023 en el software WRPLOT View

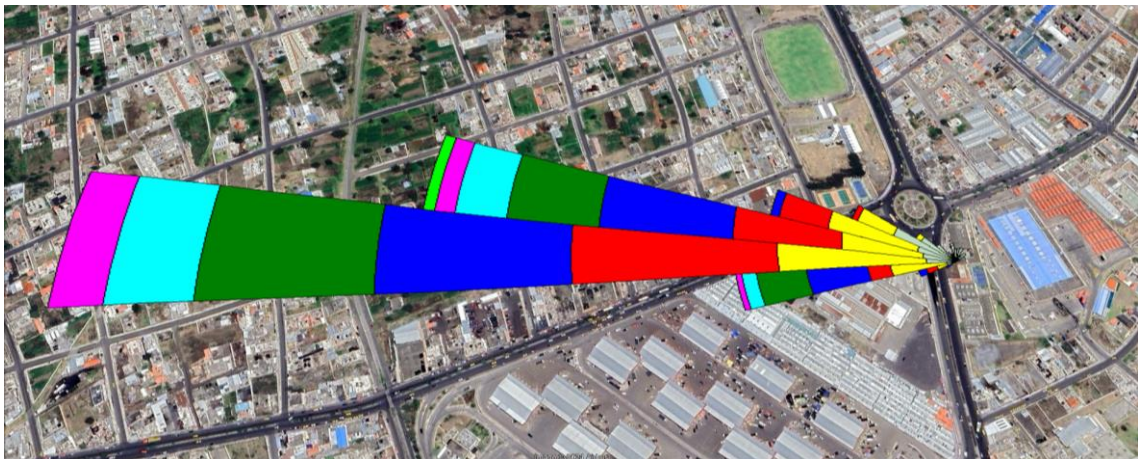


Figura 44. Rosa de Vientos del mes de julio 2023 con Google Earth

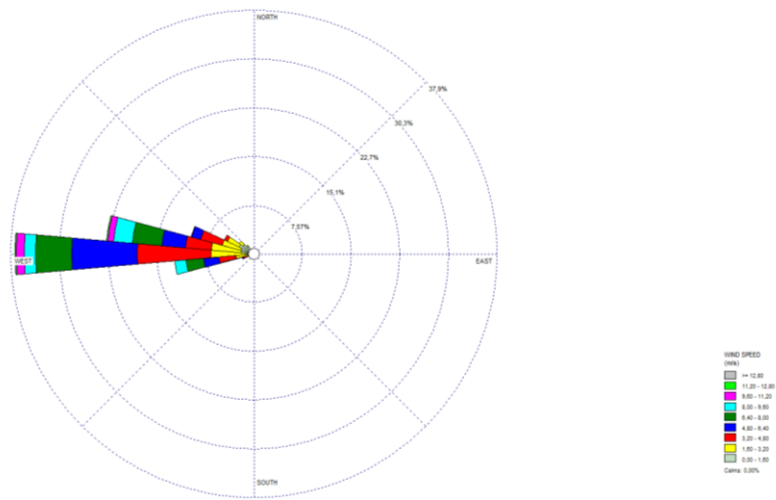


Figura 45. Rosa de Vientos del mes de agosto 2023 en el software WRPLOT View

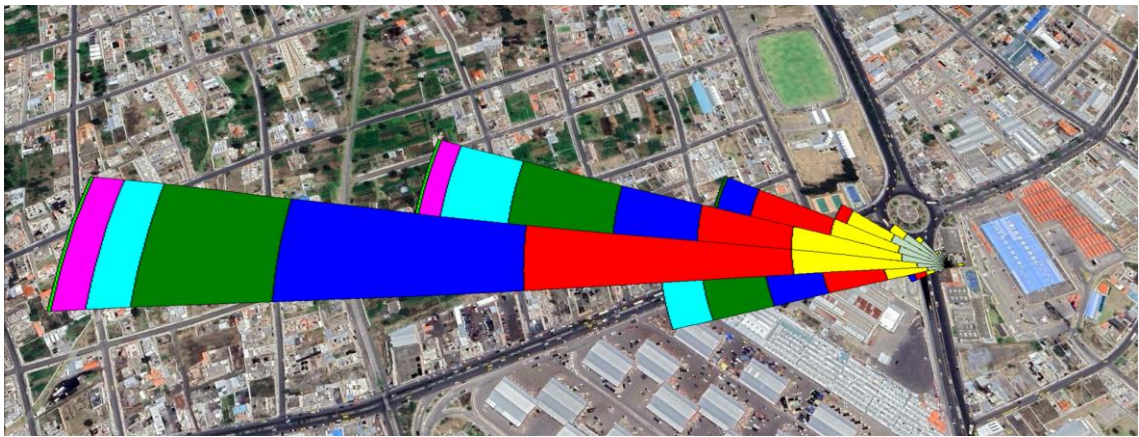


Figura 46. Rosa de Vientos del mes de agosto 2023 con Google Earth

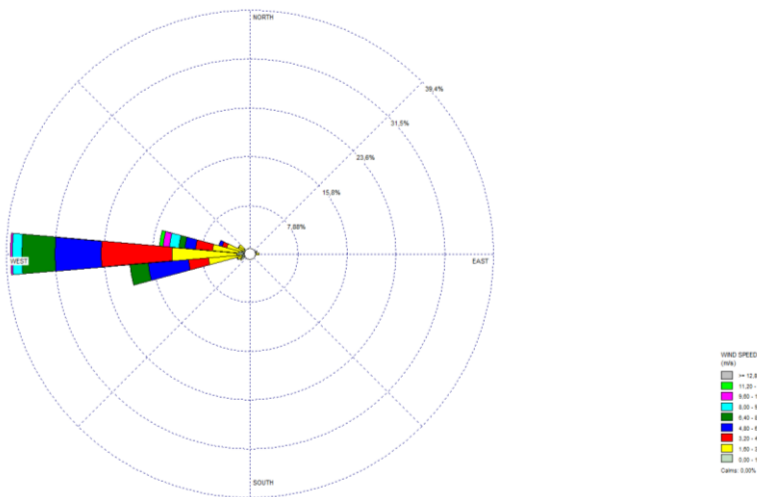


Figura 47. Rosa de Vientos del mes de septiembre 2023 en el software WRPLOT View

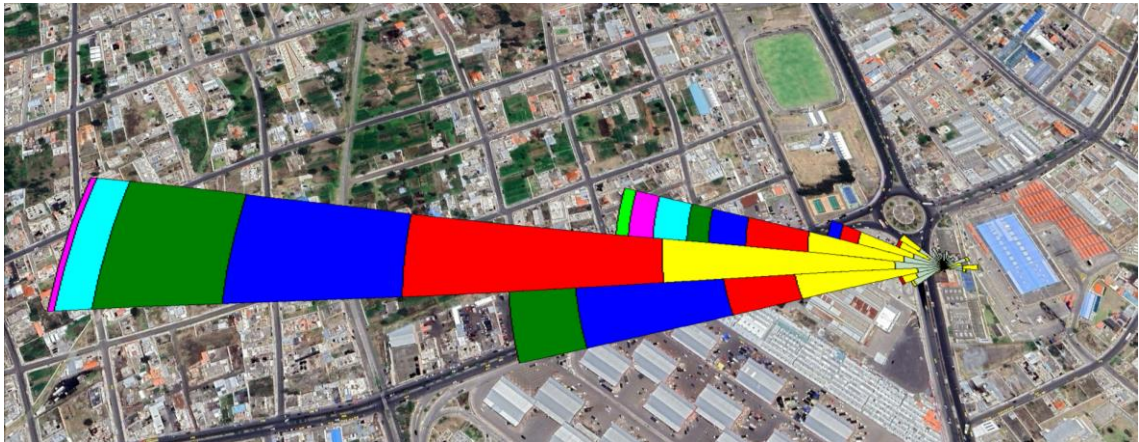


Figura 48. Rosa de Vientos del mes de septiembre 2023 con Google Earth

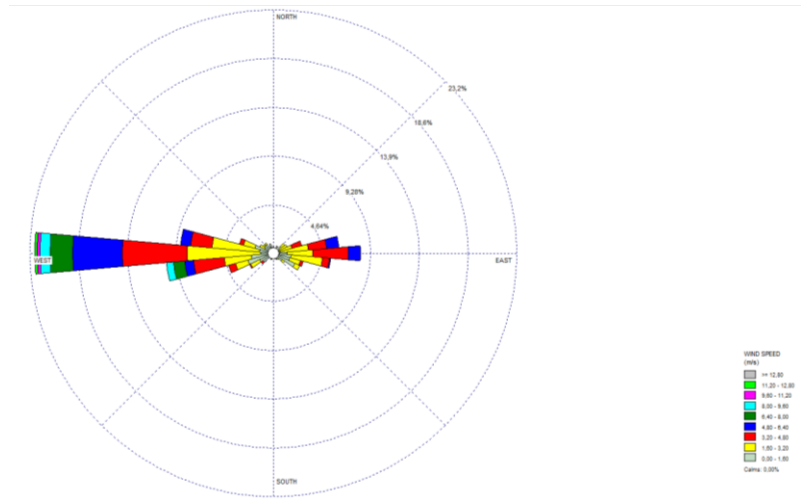


Figura 49. Rosa de Vientos del mes de octubre 2023 en el software WRPLOT View

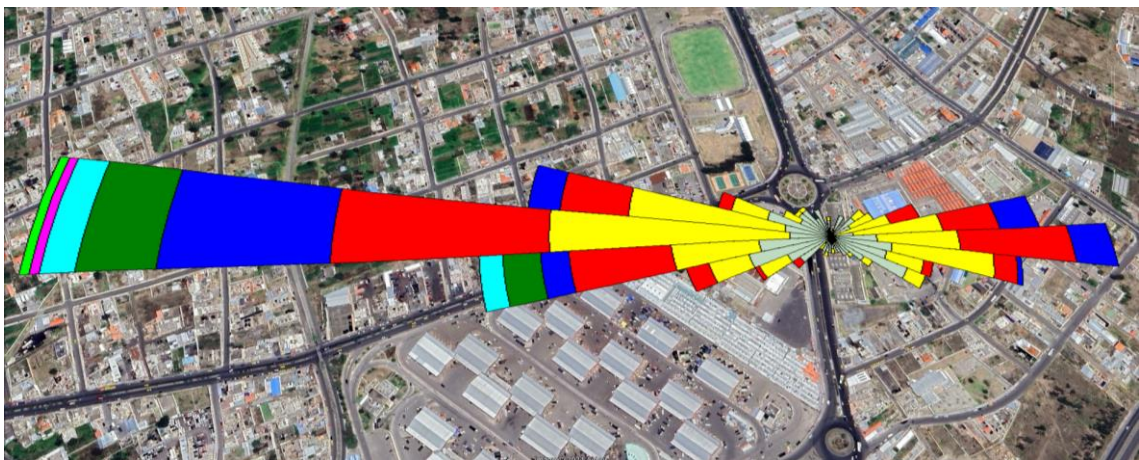


Figura 50. Rosa de Vientos del mes de octubre 2023 con Google Earth

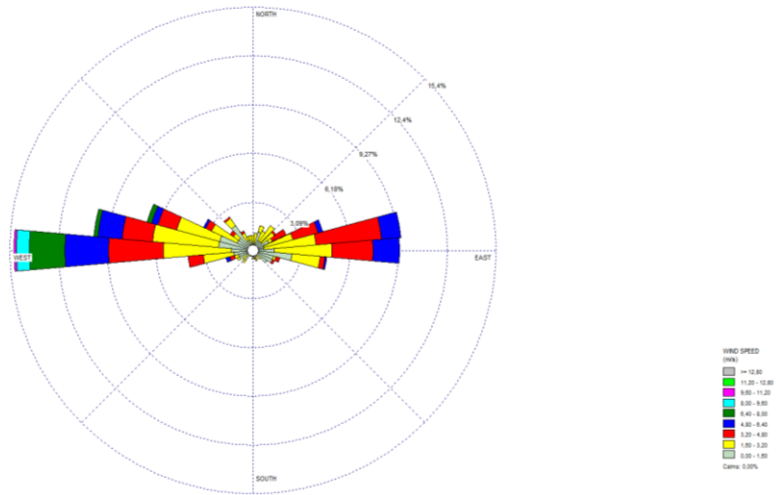


Figura 51. Rosa de Vientos del mes de noviembre 2023 en el software WRPLOT View.

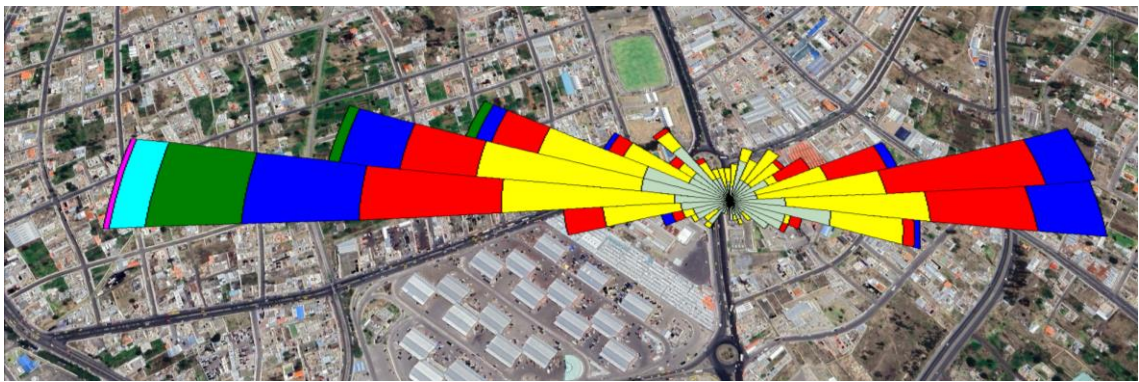


Figura 52. Rosa de Vientos del mes de noviembre 2023 con Google Earth

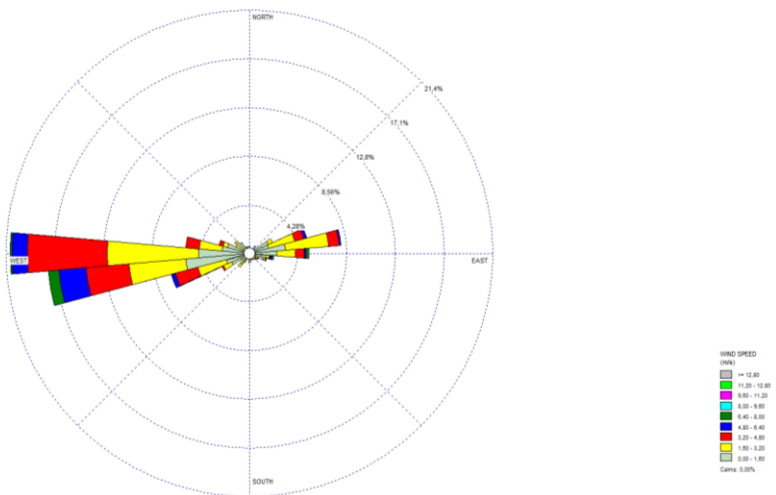
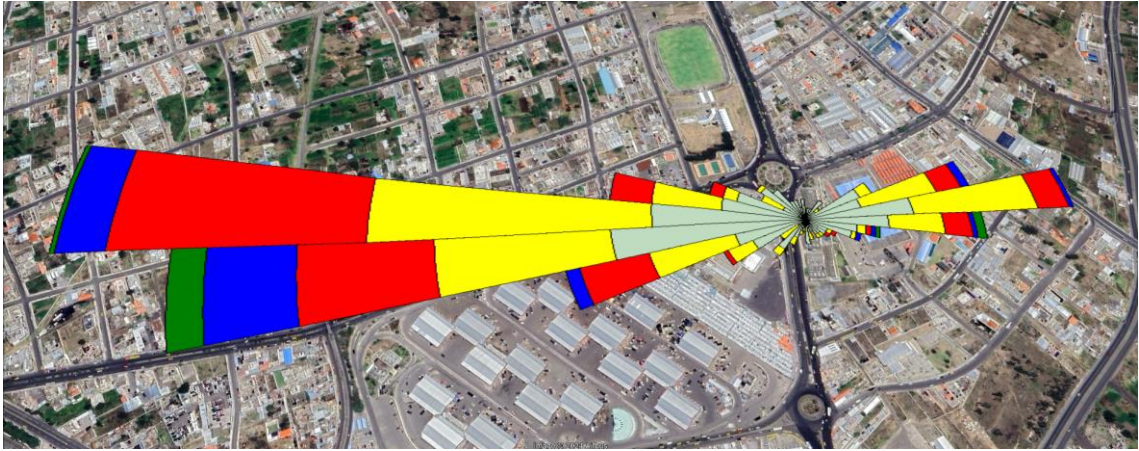
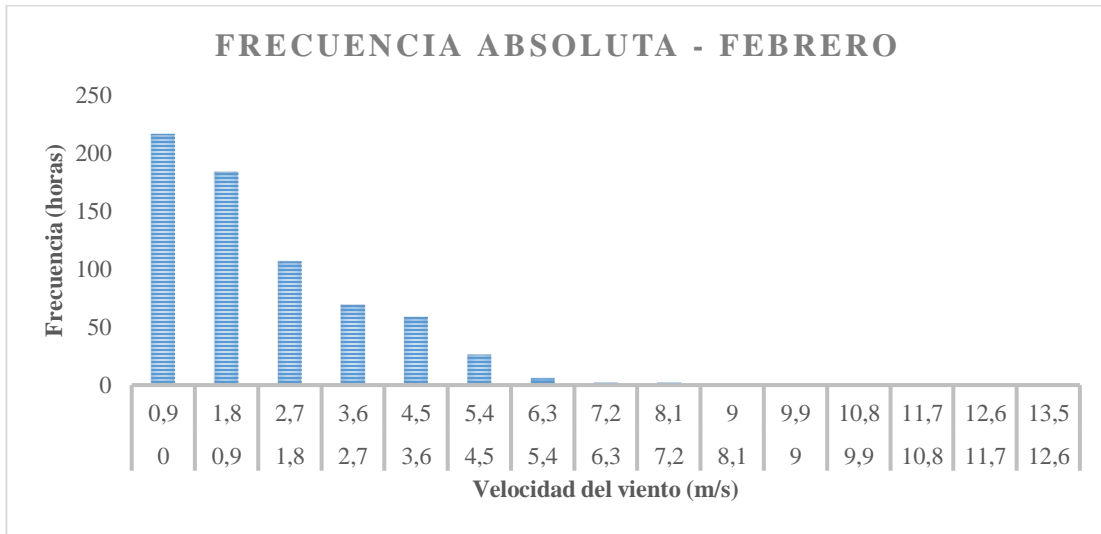


Figura 53. Rosa de Vientos del mes de diciembre 2023 en el software WRPLOT View

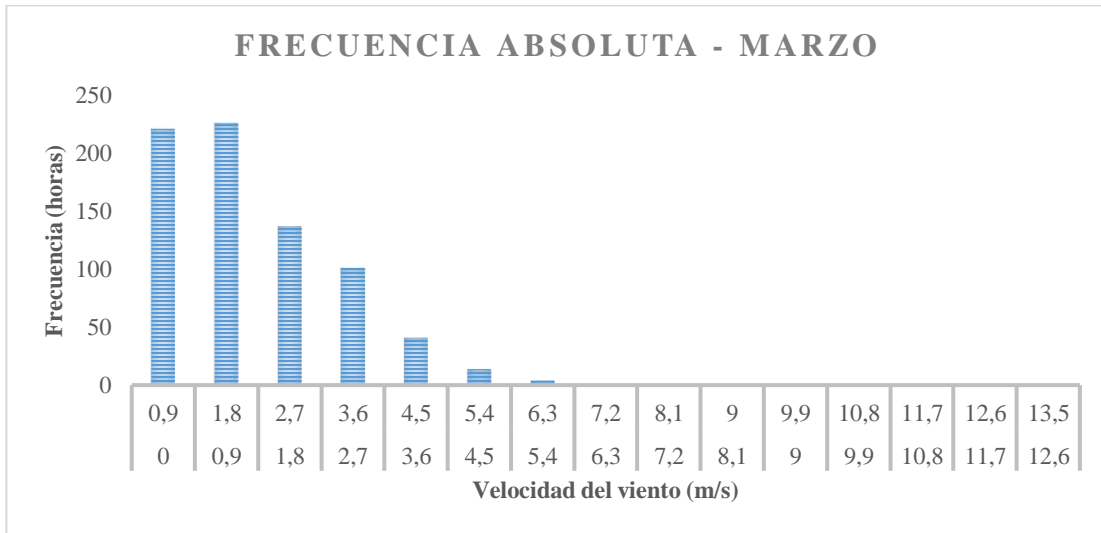


*Figura 54. Rosa de Vientos del mes de diciembre 2023 con Google Earth*

**Anexo 2. Gráficas de frecuencia absoluta de velocidad del viento de todos los meses del 2023**



*Figura 55. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de febrero.*



*Figura 56. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de marzo.*

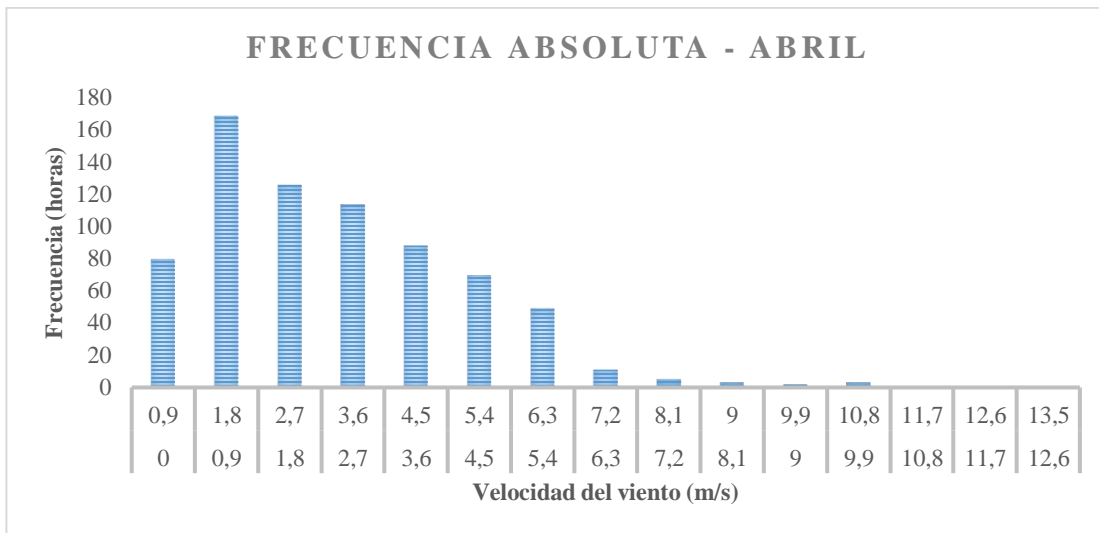


Figura 57. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de abril.

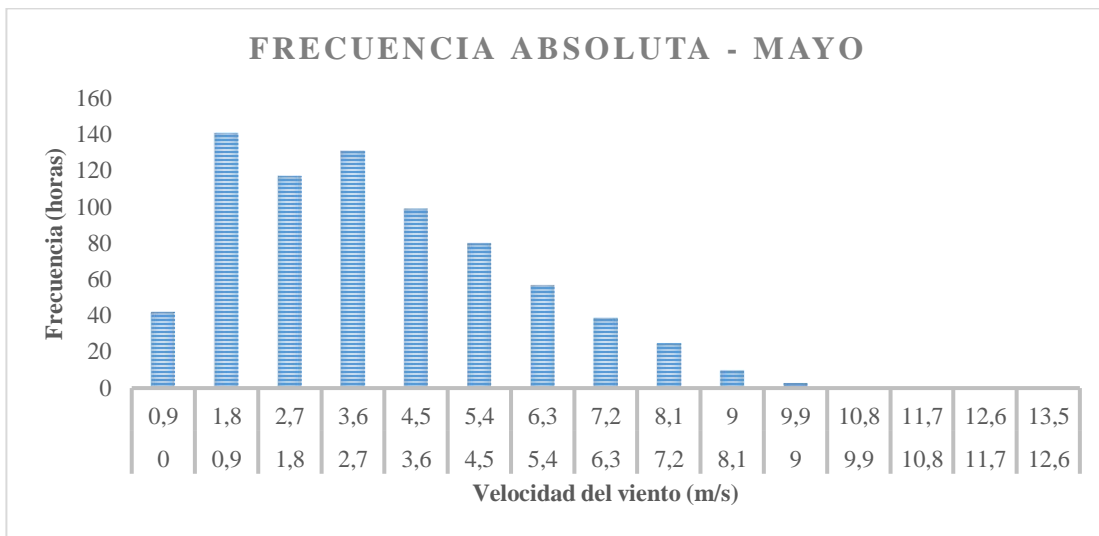


Figura 58. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de mayo.

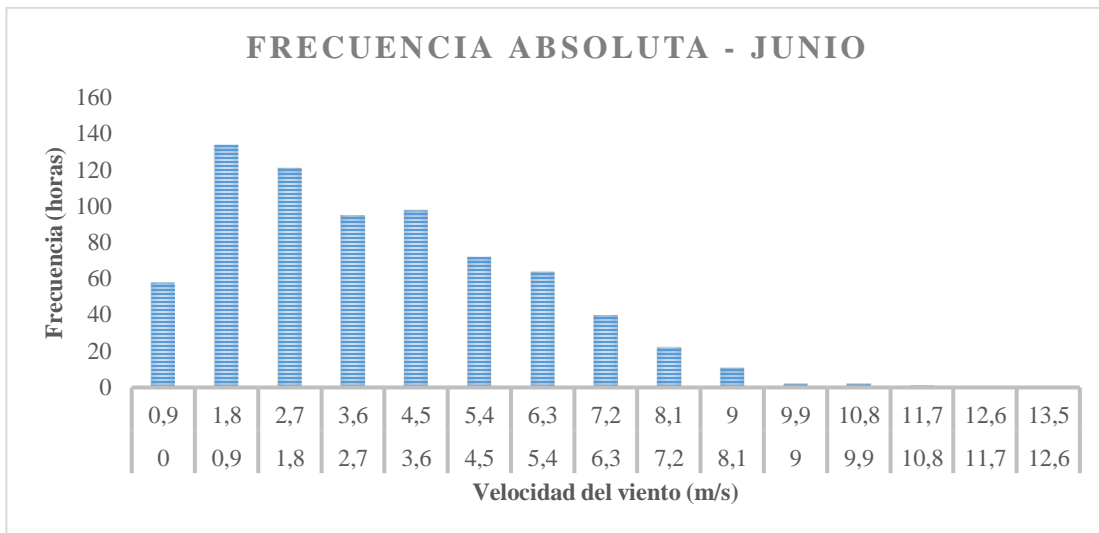


Figura 59. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de junio.

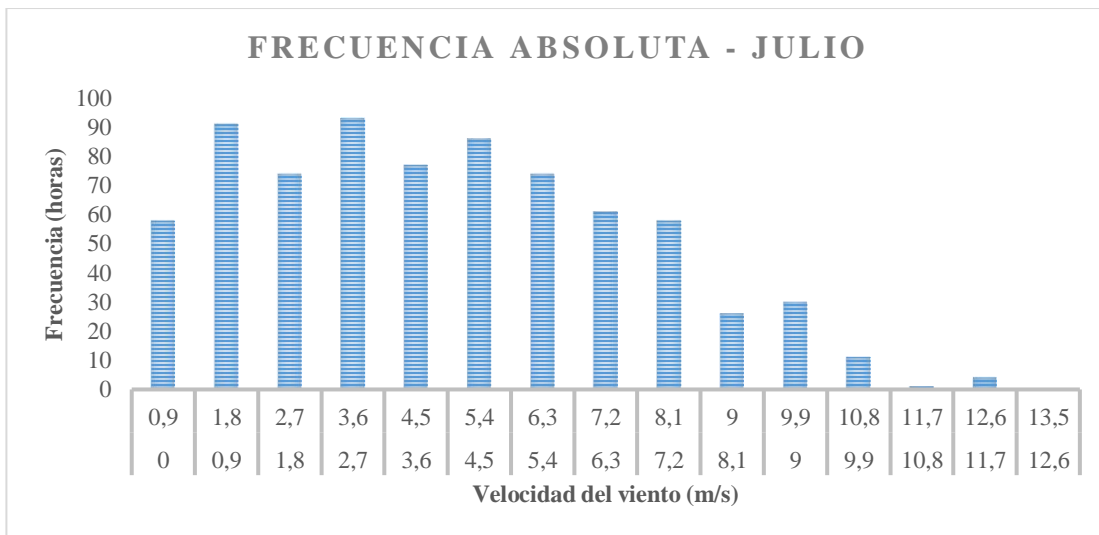


Figura 60. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de julio.

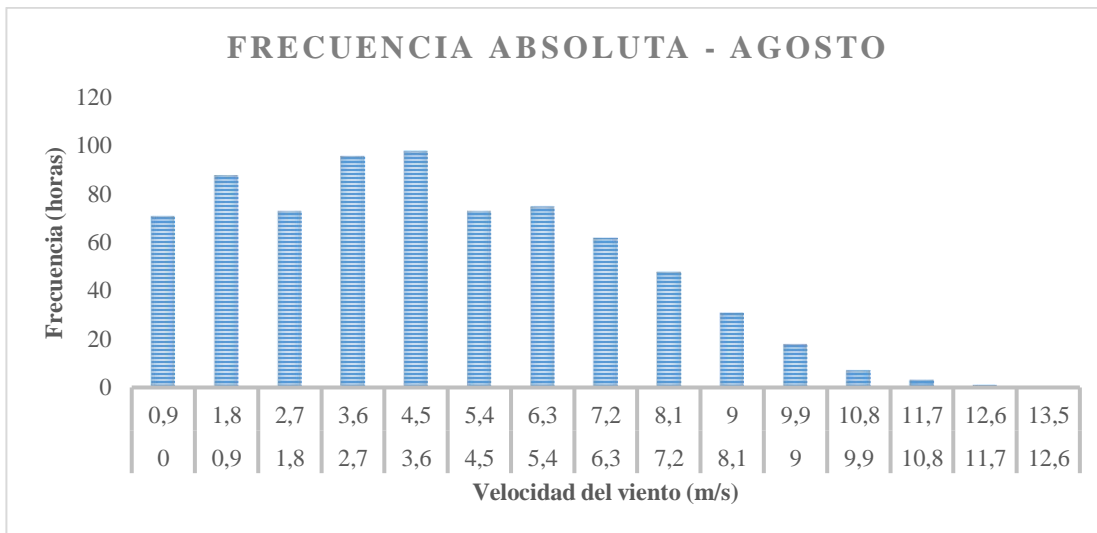


Figura 61. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de agosto.

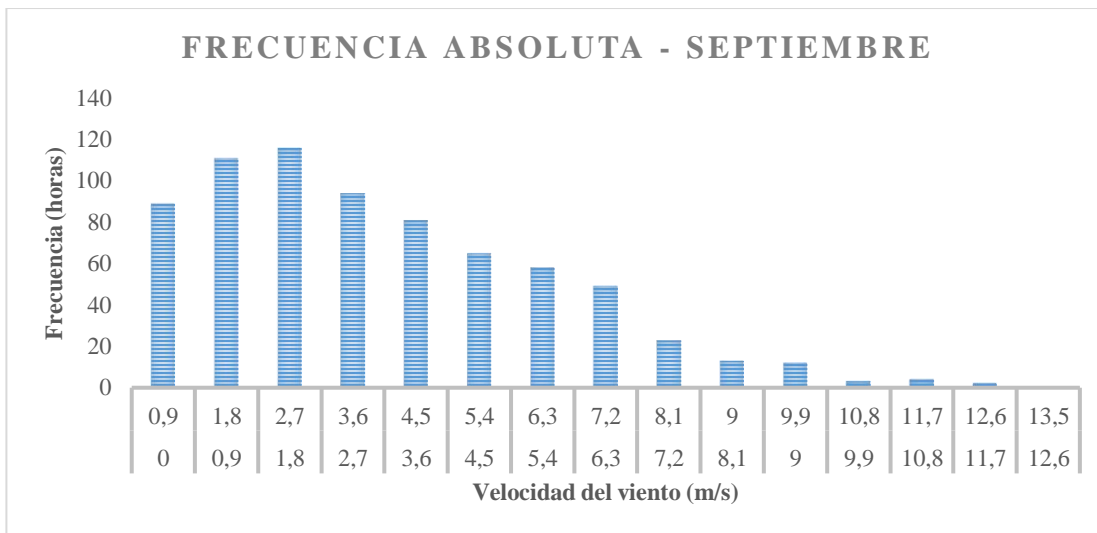


Figura 62. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de septiembre.

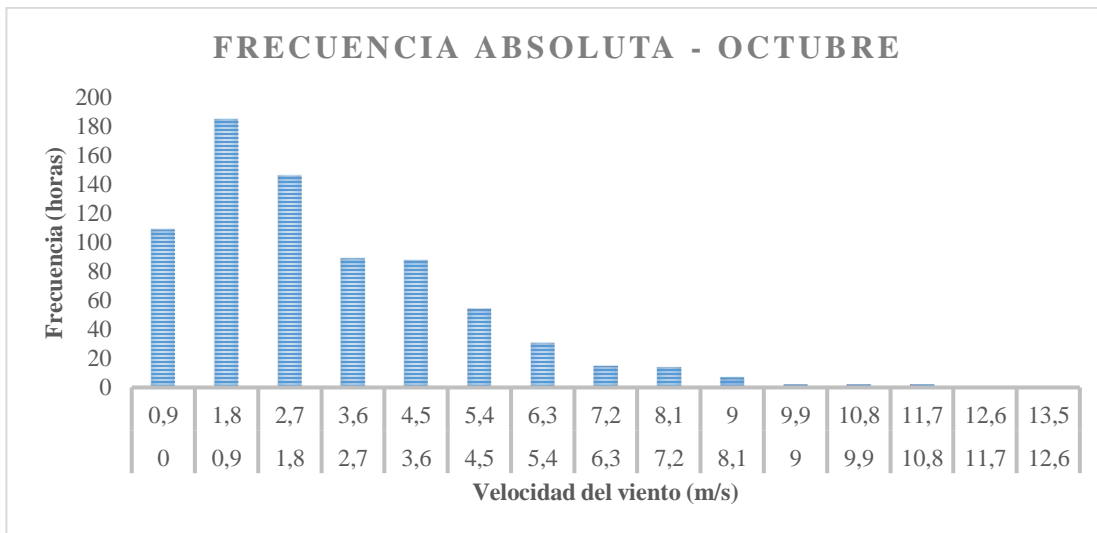


Figura 63. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de octubre.

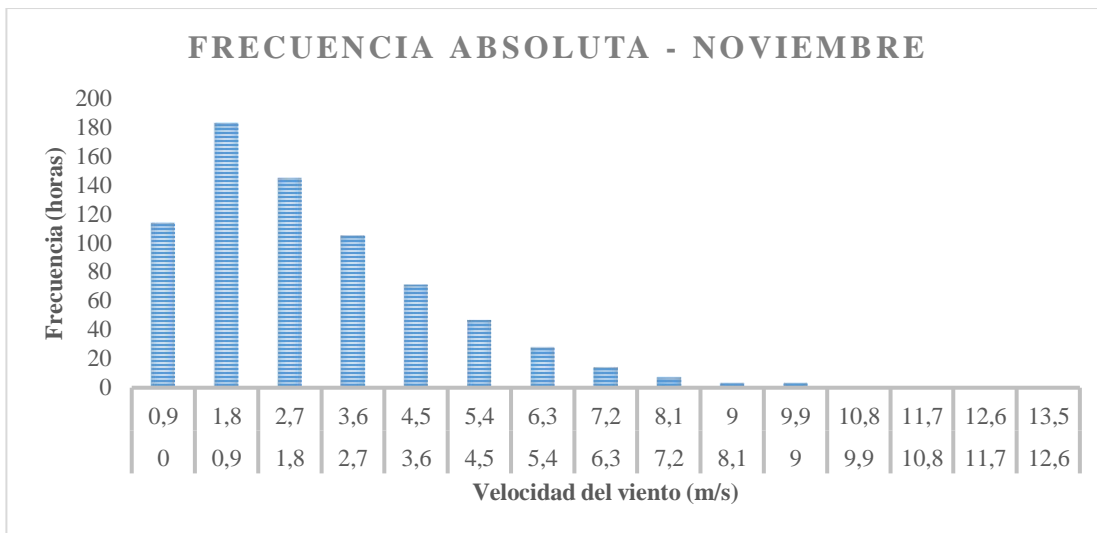


Figura 64. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de noviembre.

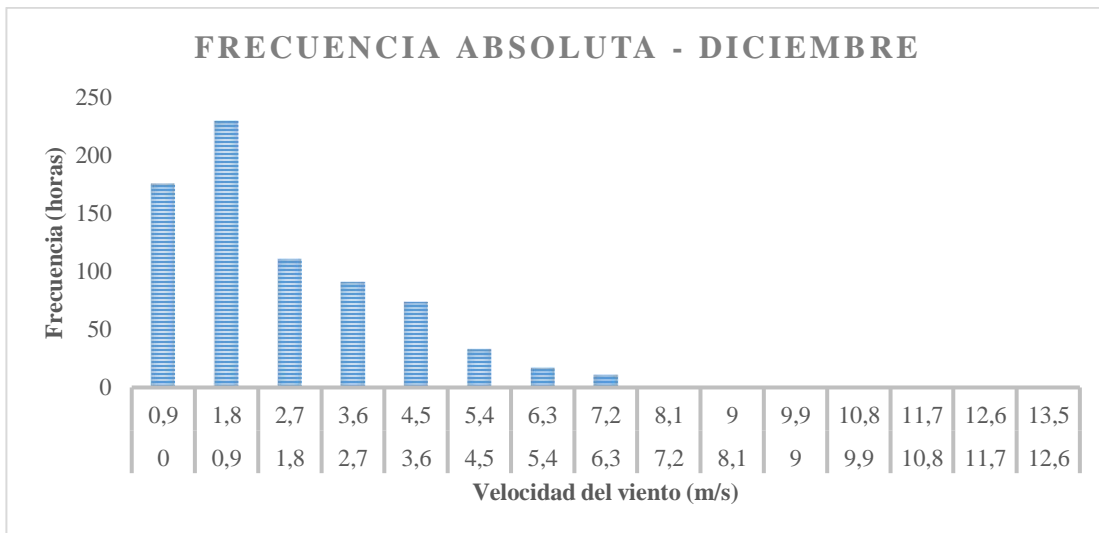


Figura 65. Frecuencia de las velocidades del viento para el mes de diciembre.

### Anexo 3. Gráficas de aproximación lineal de Weibull de todos los meses del 2023

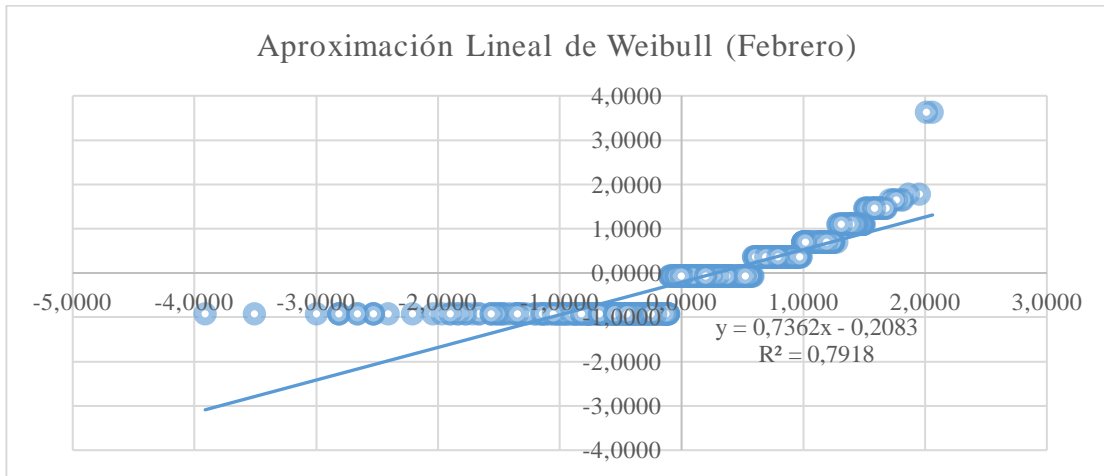


Figura 66. Aproximación lineal de Weibull para el mes de febrero

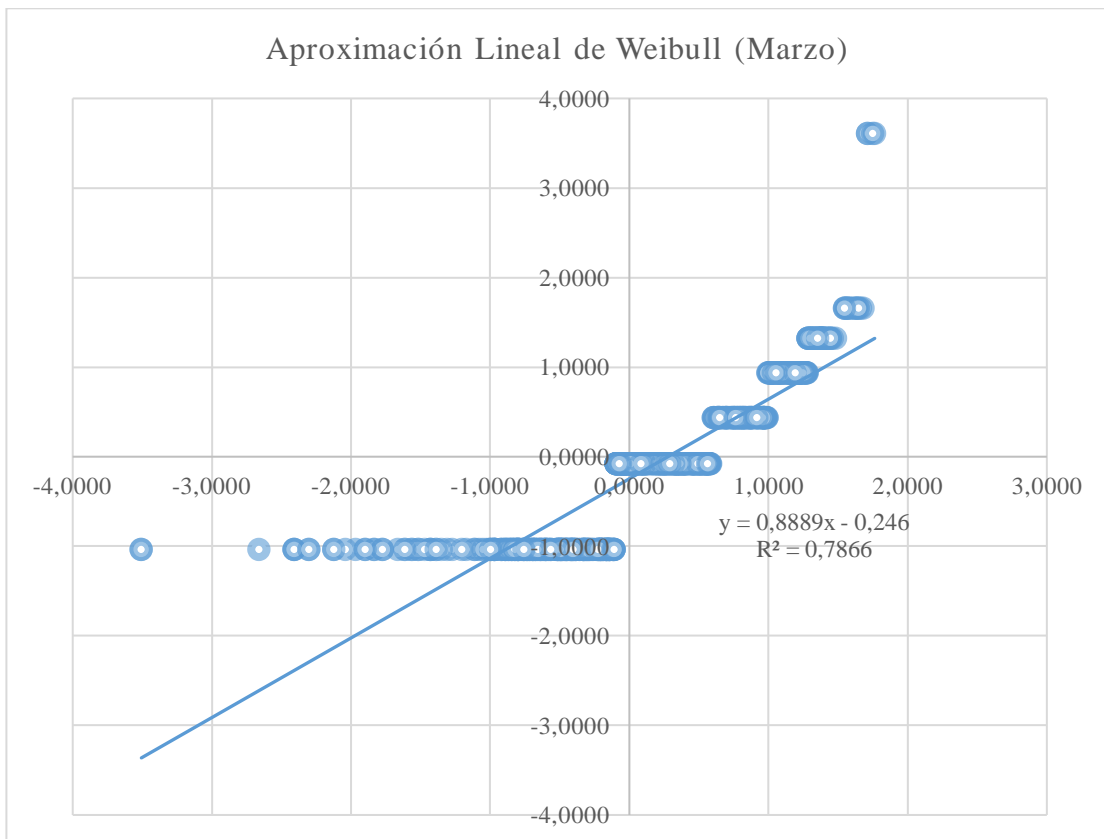
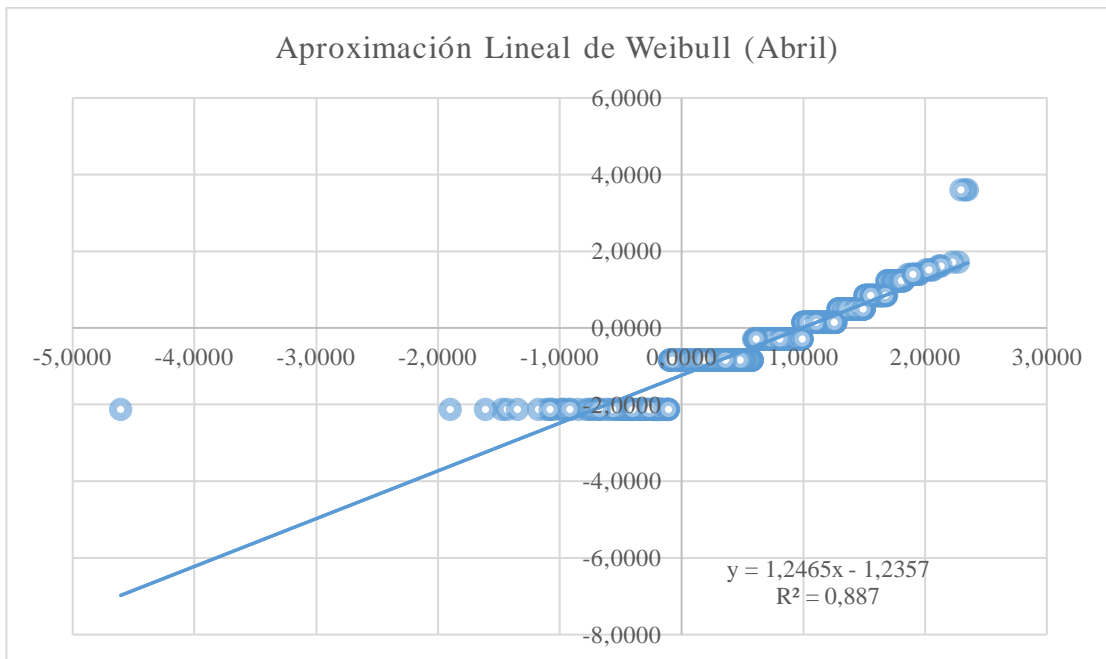
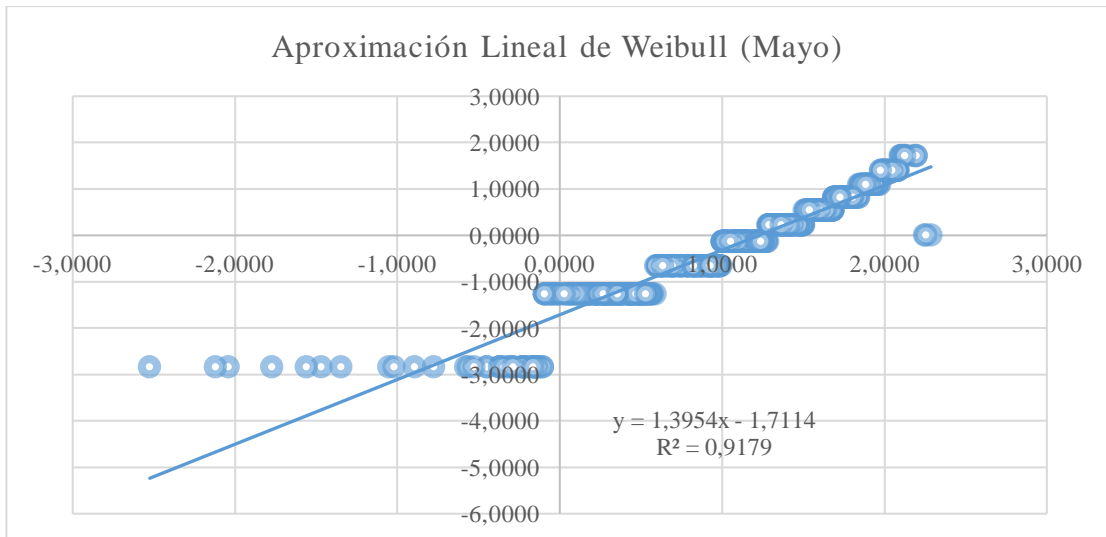


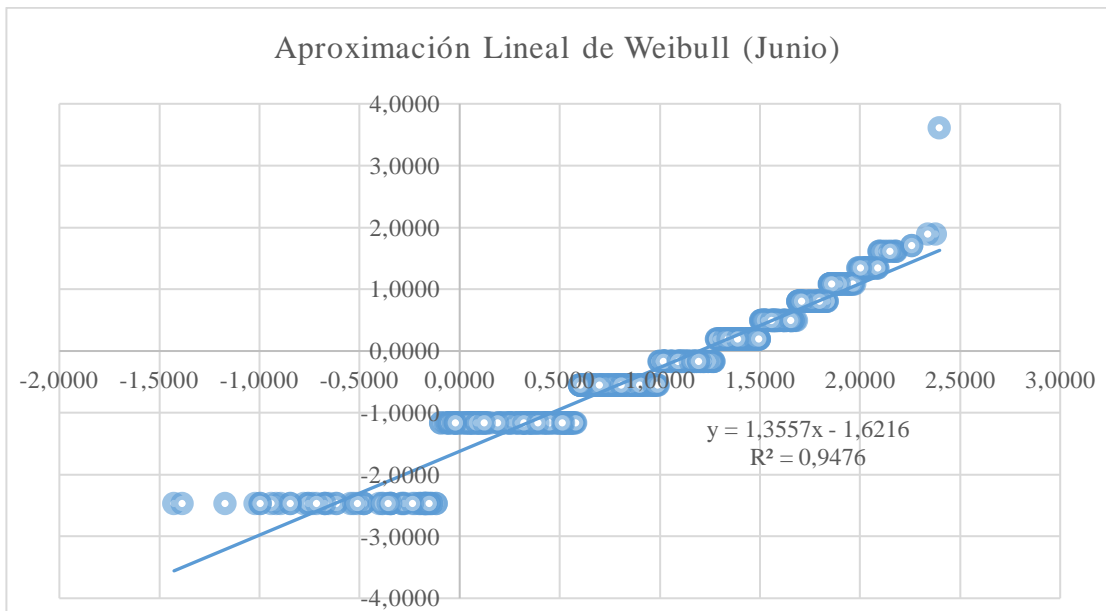
Figura 67. Aproximación lineal de Weibull para el mes de marzo.



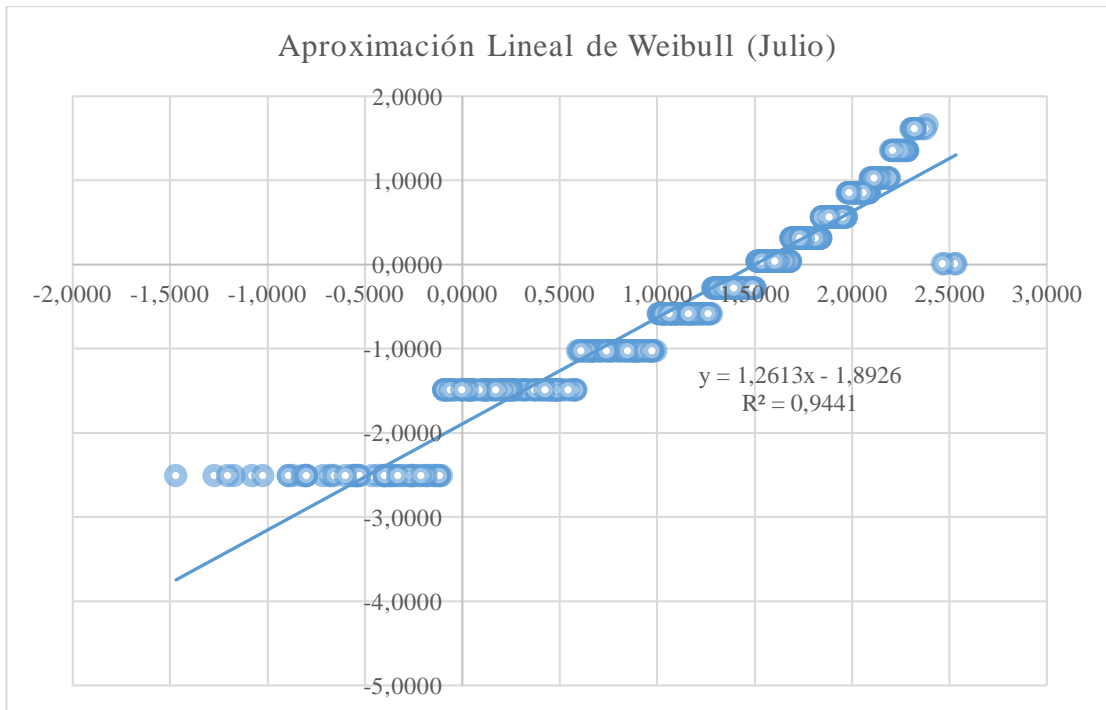
*Figura 68. Aproximación lineal de Weibull para el mes de abril*



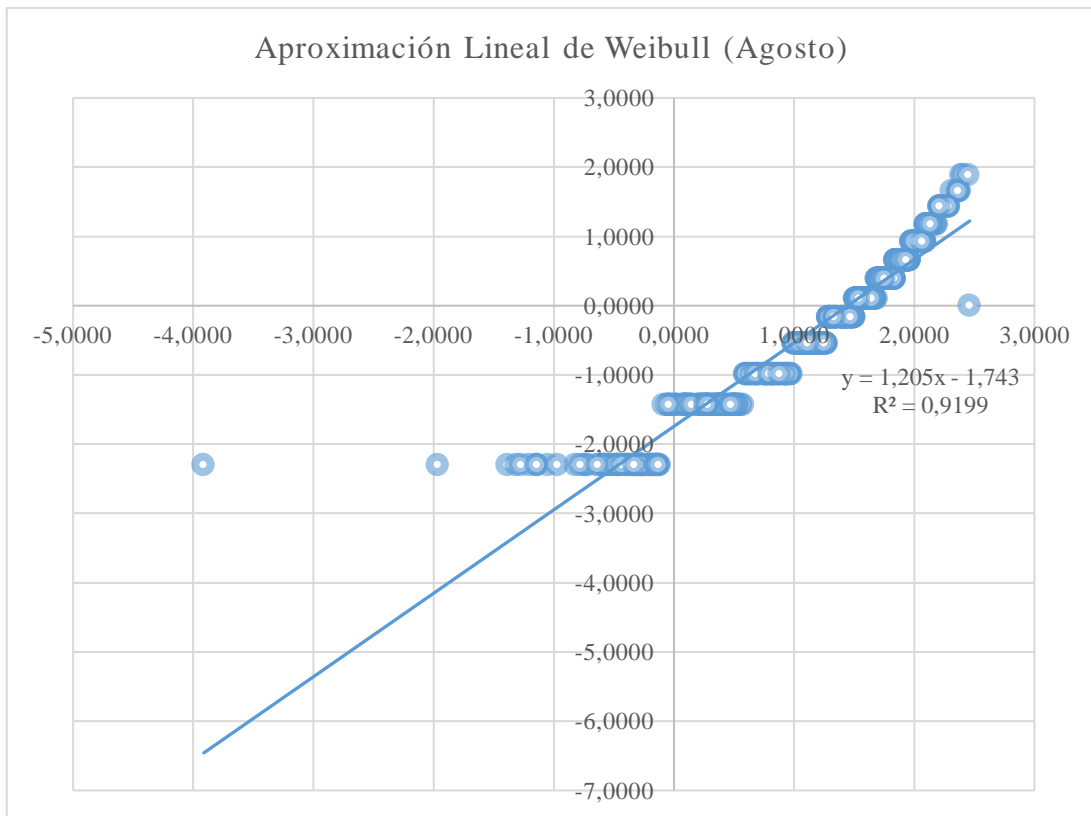
*Figura 69. Aproximación lineal de Weibull para el mes de mayo.*



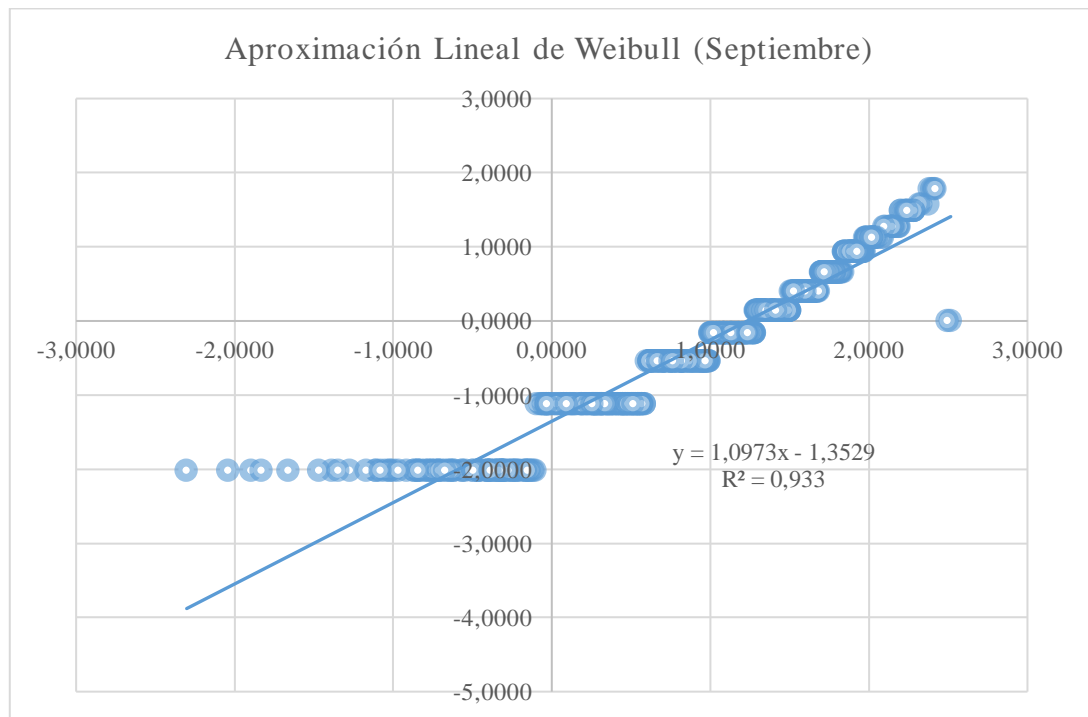
*Figura 70. Aproximación lineal de Weibull para el mes de junio.*



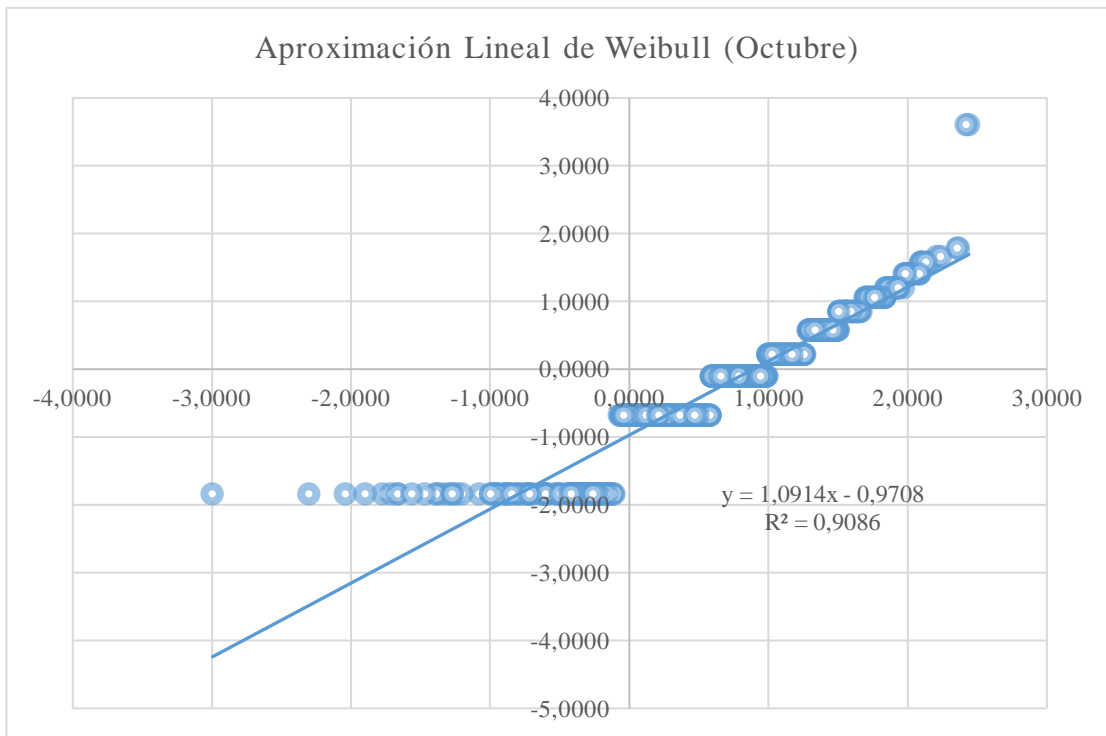
*Figura 71. Aproximación lineal de Weibull para el mes de julio.*



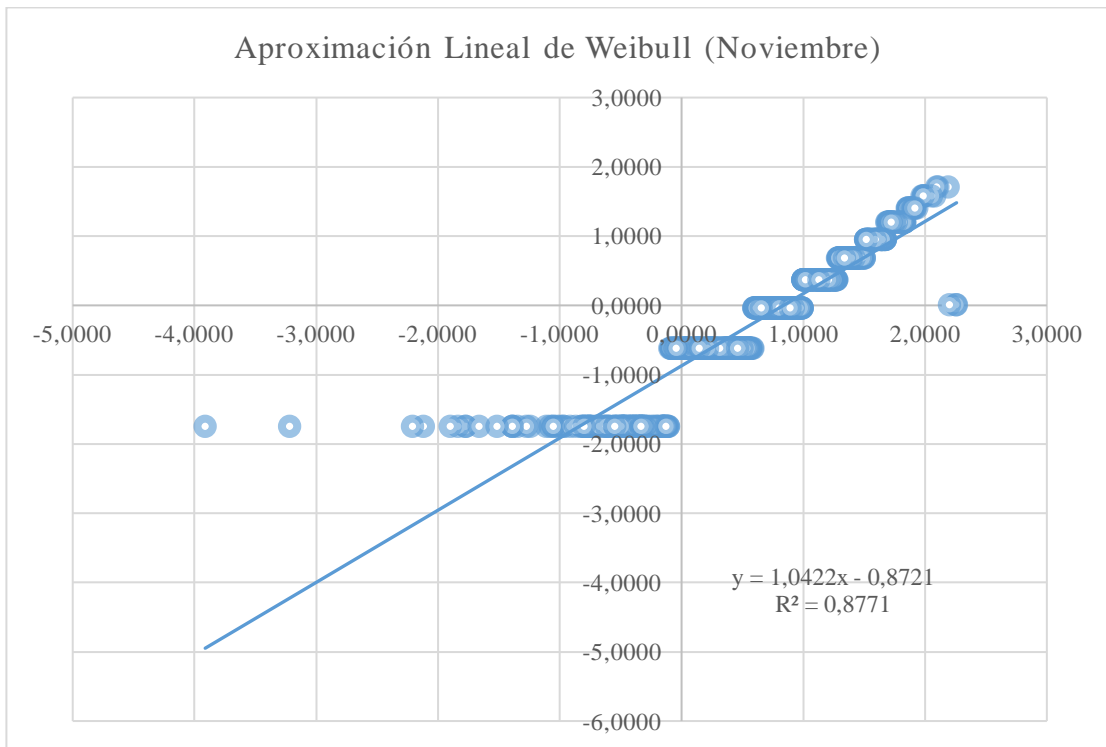
*Figura 72. Aproximación lineal de Weibull para el mes de agosto.*



*Figura 73. Aproximación lineal de Weibull para el mes de septiembre.*



*Figura 74. Aproximación lineal de Weibull para el mes de octubre.*



*Figura 75. Aproximación lineal de Weibull para el mes de noviembre.*

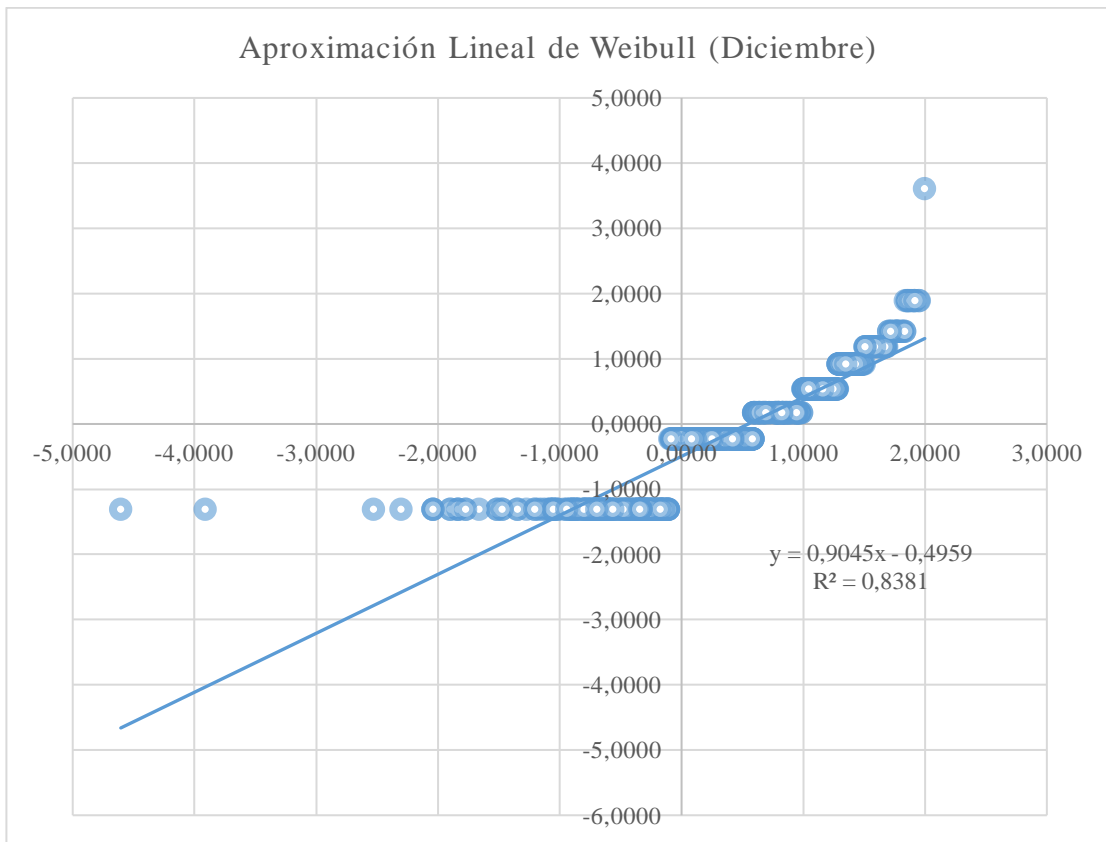


Figura 76. Aproximación lineal de Weibull para el mes de diciembre.

#### Anexo 4. Tablas de datos para velocidad media de todos los meses del 2023

Tabla 26. Datos para la velocidad media del mes de febrero.

<b>Febrero</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	217	195,3
1,8	184	331,2
2,7	107	288,9
3,6	69	248,4
4,5	59	265,5
5,4	26	140,4
6,3	6	37,8
7,2	2	14,4
8,1	2	16,2
9	0	0,0
9,9	0	0,0
10,8	0	0,0
11,7	0	0,0
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>1538,1</b>

Tabla 27. Datos para la velocidad media del mes de marzo

<b>Marzo</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	221	198,9
1,8	226	406,8
2,7	137	369,9
3,6	101	363,6
4,5	41	184,5
5,4	14	75,6
6,3	4	25,2
7,2	0	0,0
8,1	0	0,0
9	0	0,0
9,9	0	0,0
10,8	0	0,0

11,7	0	0,0
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>1624,5</b>

Tabla 28. Datos para la velocidad media del mes de abril.

<b>Abril</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	80	72,0
1,8	169	304,2
2,7	126	340,2
3,6	114	410,4
4,5	88	396,0
5,4	70	378,0
6,3	49	308,7
7,2	11	79,2
8,1	5	40,5
9	3	27,0
9,9	2	19,8
10,8	3	32,4
11,7	0	0,0
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>2408,4</b>

Tabla 29. Datos para la velocidad media del mes de mayo.

<b>Mayo</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	42	37,8
1,8	141	253,8
2,7	117	315,9
3,6	131	471,6
4,5	99	445,5
5,4	80	432,0
6,3	57	359,1
7,2	39	280,8
8,1	25	202,5
9	10	90,0

9,9	3	29,7
10,8	0	0,0
11,7	0	0,0
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>2918,7</b>

**Tabla 30. Datos para la velocidad media del mes de junio**

<b>Junio</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	58	52,2
1,8	134	241,2
2,7	121	326,7
3,6	95	342,0
4,5	98	441,0
5,4	72	388,8
6,3	64	403,2
7,2	40	288,0
8,1	22	178,2
9	11	99,0
9,9	2	19,8
10,8	2	21,6
11,7	1	11,7
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>2813,4</b>

**Tabla 31. Datos para la velocidad media del mes de julio.**

<b>Julio</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	58	52,2
1,8	91	163,8
2,7	74	199,8
3,6	93	334,8
4,5	77	346,5
5,4	86	464,4
6,3	74	466,2
7,2	61	439,2

8,1	58	469,8
9	26	234,0
9,9	30	297,0
10,8	11	118,8
11,7	1	11,7
12,6	4	50,4
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>3648,6</b>

**Tabla 32. Datos para la velocidad media del mes de agosto.**

<b>Agosto</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	71	63,9
1,8	88	158,4
2,7	73	197,1
3,6	96	345,6
4,5	98	441,0
5,4	73	394,2
6,3	75	472,5
7,2	62	446,4
8,1	48	388,8
9	31	279,0
9,9	18	178,2
10,8	7	75,6
11,7	3	35,1
12,6	1	12,6
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>3488,4</b>

**Tabla 33. Datos para la velocidad media del mes de septiembre.**

<b>Septiembre</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	89	80,1
1,8	111	199,8
2,7	116	313,2
3,6	94	338,4
4,5	81	364,5

5,4	65	351,0
6,3	58	365,4
7,2	49	352,8
8,1	23	186,3
9	13	117,0
9,9	12	118,8
10,8	3	32,4
11,7	4	46,8
12,6	2	25,2
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>2891,7</b>

Tabla 34. Datos para la velocidad media del mes de octubre.

<b>Octubre</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	109	98,1
1,8	185	333,0
2,7	146	394,2
3,6	89	320,4
4,5	88	396,0
5,4	54	291,6
6,3	31	195,3
7,2	15	108,0
8,1	14	113,4
9	7	63,0
9,9	2	19,8
10,8	2	21,6
11,7	2	23,4
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>2377,8</b>

Tabla 35. Datos para la velocidad media del mes de noviembre.

<b>Noviembre</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	114	102,6
1,8	183	329,4

2,7	145	391,5
3,6	105	378,0
4,5	71	319,5
5,4	47	253,8
6,3	28	176,4
7,2	14	100,8
8,1	7	56,7
9	3	27,0
9,9	3	29,7
10,8	0	0,0
11,7	0	0,0
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>2165,4</b>

**Tabla 36. Datos para la velocidad media del mes de diciembre.**

<b>Diciembre</b>		
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Producto</b>
0,9	176	158,4
1,8	230	414,0
2,7	111	299,7
3,6	91	327,6
4,5	74	333,0
5,4	33	178,2
6,3	17	107,1
7,2	11	79,2
8,1	1	8,1
9	0	0,0
9,9	0	0,0
10,8	0	0,0
11,7	0	0,0
12,6	0	0,0
13,5	0	0,0
<b>Σtotal</b>		<b>1905,3</b>