

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE MICROGENERACIÓN
DIÉSEL-EÓLICO PARA ZONAS DE MÁS DE 3000 M.S.N.M. EN EL DISTRITO DE
CHINCERO, REGIÓN CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. KEVIN QUILLAHUAMAN VERGARA

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO**

ASESOR:

Dr. EFRAÍN WALTER SEQUEIROS PÉREZ

**FINANCIADO POR CONCYTEC
YACHAYNINCHIS WIÑARINANPAQ**

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNAAC)

El que suscribe, el Asesor EFRAIN WALTER SEQUEIROS PEREZ quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: DISCNO Y ANALISIS DE UN SISTEMA HIBRIDO DE MICROGENERACION DIESEL-EOLICO PARA ZONAS DE MAS DE 3000 M.S.N.M. EN EL DISTRITO DE CHINCHERO, REGION CUSCO.

Presentado por: KEVIN Quillanuan Vergara DNI N° 72614175 ;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de TECNICO MECHANICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6º del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje | Evaluación y Acciones | Marque con una (X) |
|----------------|---|-------------------------------------|
| Del 1 al 10% | No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las subsanaciones. | |
| Mayor a 31% | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | |

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 20 de ENERO de 2026

Firma

Post firma Dr: Efrain Walter Sequeiros Perez

Nro. de DNI 23853221

ORCID del Asesor 0000-0002-0645-683X

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:547811287

Kevin Quillahuaman Vergara

diseño y analisis de un sistema hibrido de microgeneracion diesel-eolico para zonas de mas de 3000 m.s.n.m. en el distrito...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:547811287

145 páginas

Fecha de entrega

20 ene 2026, 9:04 p.m. GMT-5

19.521 palabras

Fecha de descarga

20 ene 2026, 9:23 p.m. GMT-5

110.845 caracteres

Nombre del archivo

diseño y analisis de un sistema hibrido de microgeneracion diesel-eolico para zonas de mas dedocx

Tamaño del archivo

10.8 MB

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

| | |
|----|---|
| 3% |  Fuentes de Internet |
| 1% |  Publicaciones |
| 6% |  Trabajos entregados (trabajos del estudiante) |

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

 **Caracteres reemplazados**

13 caracteres sospechosos en N.º de páginas

Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis con profundo respeto y gratitud a la memoria del Ing. Jesús Eusebio Chancatuma Huamán, quien me convocó a este proyecto cuya enseñanza y ejemplo marcaron el inicio de este camino académico. Aunque no pudo acompañarme hasta el final, su legado de dedicación y compromiso vive en cada página de este trabajo.

A mis padres Celedonio Quillahuaman Cusihuaman y Cleofe Vergara Jara, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y apoyarme en cada paso de mi vida académica y personal.

A mi hermano Alexis Quillahuaman Vergara y seres queridos, por su compañía, aliento y comprensión en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), cuyo financiamiento hizo posible el desarrollo de este proyecto de investigación.

A mi asesor, el Dr. Efraín Walter Sequeiros Pérez, por su constante guía, paciencia y valiosas orientaciones que enriquecieron este trabajo académico y personal.

Extiendo también mi gratitud a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por la formación recibida y el apoyo brindado durante mi etapa de formación profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos, quienes con su respaldo moral y motivación me alentaron a culminar satisfactoriamente esta tesis.

INTRODUCCIÓN

La transición hacia matrices energéticas más limpias y descentralizadas se ha consolidado como una prioridad global para enfrentar la crisis climática y garantizar el acceso universal a energía eléctrica. En el Perú, este desafío adquiere particular relevancia en las zonas rurales y altoandinas, donde la conexión a la red eléctrica nacional es limitada o inexistente. En estas localidades, el desarrollo socioeconómico, incluyendo actividades como el ecoturismo, se ve frecuentemente restringido por la dependencia de generadores diésel, con los conocidos impactos económicos y ambientales que ello conlleva.

En las comunidades altoandinas como Chinchero ubicado a 3,754 metros de altura, el acceso a energía confiable es crucial para el desarrollo del ecoturismo. Sin embargo, la falta de conexión eléctrica obliga a los emprendedores a usar generadores diésel, con los altos costos y contaminación que esto conlleva. Alternativas como los paneles solares muestran limitaciones en esta zona debido a factores geográficos y climáticos, haciendo necesario explorar otras fuentes de energía renovable.

Frente a esta realidad, la energía eólica se presenta como una opción prometedora para complementar el suministro eléctrico. Esta investigación busca diseñar y evaluar por simulación un sistema híbrido que combine energía eólica con un generador diésel, con el propósito de reducir el consumo de combustible y minimizar el impacto ambiental.

Mediante simulaciones y análisis técnico-económicos, el estudio demostrará la viabilidad de esta solución para los Lodge ecoturísticos de la zona, contribuyendo al desarrollo de alternativas energéticas sostenibles para las comunidades altoandinas.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño y la evaluación de un sistema híbrido de microgeneración diésel–eólico para el suministro eléctrico en el distrito de Chinchero (Cusco), zona altoandina aplicado a un Lodge Eco-turístico con una demanda de 2015.05 kWh/año. El recurso eólico fue caracterizado mediante datos meteorológicos anuales y la distribución de Weibull, considerando la corrección por densidad del aire asociada a la altitud, lo que permitió identificar un régimen de viento moderado apto para microgeneración. Con base en este análisis se dimensionó un sistema compuesto por un aerogenerador Aeolos-H de 2 kW, un banco de baterías de litio LiFePO₄ y un generador diésel de respaldo, evaluándose distintas configuraciones mediante simulación en HOMER Pro que simula una operación horaria anual de los sistemas.

Los resultados indican que la configuración híbrida óptima genera 1,516 kWh/año de energía eólica, cubriendo el 67.2% de la demanda anual, y reduce el consumo de diésel a 243 L/año. En comparación con un sistema diésel–baterías, se evita la emisión de 1,505 kg de CO₂ /año, evidenciando un impacto ambiental favorable. El análisis económico muestra que el sistema híbrido presenta un Costo Nivelado de Energía inferior al del sistema diésel convencional, confirmando su viabilidad técnica, económica y ambiental para aplicaciones en zonas rurales aisladas de gran altitud.

Palabras Clave: Microgeneración Híbrida; Energía Eólica; Sistemas en Gran Altitud; Diseño de Microredes.

ABSTRACT

This study presents the design and evaluation of a diesel–wind hybrid microgeneration system for electricity supply in the district of Chinchero (Cusco), a high-Andean area, applied to an eco-tourism lodge with an annual demand of 2,015.05 kWh. The wind resource was characterized using annual meteorological data and the Weibull distribution, incorporating air density correction due to altitude, which allowed the identification of a moderate wind regime suitable for microgeneration. Based on this assessment, a system composed of a 2 kW Aeolos-H wind turbine, a LiFePO₄ lithium battery bank, and a diesel generator as backup was dimensioned, and different configurations were evaluating different settings through simulation in HOMER Pro that simulates an annual hourly operation of the systems.

The results show that the optimal hybrid configuration generates 1,516 kWh/year of wind energy, covering 67.2% of the annual demand, and reduces diesel consumption to 243 L/year. Compared to a diesel–battery system, the proposed hybrid system avoids the emission of 1,505 kg of CO₂ per year, demonstrating a favorable environmental impact. The economic analysis indicates that the hybrid system achieves a lower Levelized Cost of Energy than the conventional diesel system, confirming its technical, economic, and environmental feasibility for isolated rural applications at high altitude.

Keywords: Hybrid Microgeneration; Wind Energy; High-Altitude Systems; Microgrid Design.

ÍNDICE

| | |
|--------------------------------------|-----|
| DEDICATORIAS | II |
| AGRADECIMIENTOS | III |
| INTRODUCCIÓN | IV |
| RESUMEN | V |
| CAPITULO I | 11 |
| 1. Generalidades..... | 11 |
| 1.1. Planteamiento del Problema..... | 11 |
| 1.2. Formulación del Problema..... | 12 |
| 1.2.1. Problema General | 12 |
| 1.2.2. Problemas Específicos..... | 12 |
| 1.3. Objetivos..... | 12 |
| 1.3.1. Objetivo General | 12 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos..... | 13 |
| 1.4. Justificación | 13 |
| 1.5. Hipótesis | 15 |
| 1.5.1. Hipótesis General | 15 |
| 1.5.2. Hipótesis Específicas..... | 15 |
| 1.6. Variables de Estudio..... | 15 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 1.6.1. | Variable Independiente | 15 |
| 1.6.2. | Variable Dependiente..... | 15 |
| 1.7. | Alcances y Limitaciones..... | 16 |
| 1.7.1. | Alcances | 16 |
| 1.7.2. | Limitaciones | 17 |
| 1.8. | Metodología..... | 18 |
| 1.8.1. | Tipo de Metodología de la Investigación..... | 18 |
| 1.8.2. | Nivel de Investigación..... | 18 |
| 1.8.3. | Diseño de la Investigación | 18 |
| 1.8.4. | Recopilación de Información | 18 |
| CAPITULO II | 19 | |
| 2. | MARCO TEORICO..... | 19 |
| 2.1. | Antecedentes..... | 19 |
| 2.1.1. | Antecedentes Nacionales..... | 19 |
| 2.1.2. | Antecedentes internacionales | 21 |
| 2.1.3. | Síntesis y relación con el presente estudio | 22 |
| 2.2. | Bases Teóricas | 23 |
| 2.2.1. | Energía y Sistemas de Generación | 23 |
| 2.2.2. | Generación Diésel | 26 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 2.2.3. | Generación Eólica | 30 |
| 2.2.4. | Rosa de los vientos..... | 35 |
| 2.2.5. | Potencia en el Viento..... | 37 |
| 2.2.6. | Límite de Betz | 38 |
| 2.2.7. | Distribución de Weibull | 39 |
| 2.2.8. | Potencia Media del Viento | 39 |
| 2.2.9. | Aerogeneradores de pequeña escala..... | 40 |
| 2.2.10. | Curva de potencia y estimación del potencial eólico | 41 |
| 2.2.11. | Bancos de baterías sistemas de gestión (BMS)..... | 44 |
| 2.2.12. | Sistemas híbridos Diesel-Eólicos..... | 46 |
| 2.2.13. | Balance de Energía..... | 47 |
| 2.2.14. | Ahorro de Combustible | 48 |
| 2.2.15. | Emisiones Evitadas | 48 |
| 2.2.16. | Nasa Power..... | 49 |
| 2.2.17. | Homer Pro | 52 |
| 2.2.18. | Normativa y Políticas Energéticas en el Perú | 54 |
| CAPITULO III..... | | 57 |
| 3. | Recurso Eólico | 57 |
| 3.1. | Ubicación del sitio de estudio..... | 57 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.1. | Ubicación Geográfica de Chinchero | 57 |
| 3.1.2. | Condiciones Climáticas y Meteorológica | 58 |
| 3.1.3. | Disponibilidad del Recurso Eólico..... | 59 |
| | CAPITULO IV..... | 66 |
| 4. | Demanda Eléctrica del Sistema | 66 |
| 4.1. | Tipos de Carga..... | 66 |
| 4.1.1. | Cargas de iluminación | 66 |
| 4.1.2. | Cargas de servicios y confort | 66 |
| 4.1.3. | Cargas críticas o permanentes | 67 |
| 4.1.4. | Cargas comunes..... | 67 |
| 4.2. | Lista de Aparatos | 67 |
| 4.3. | Perfil Horario por Equipos | 69 |
| 4.4. | Análisis de Sensibilidad de la Demanda..... | 70 |
| 4.4.1. | Aumento de ocupación..... | 70 |
| 4.4.2. | Variaciones en el uso del refrigerador..... | 70 |
| 4.4.3. | Variación en el uso de la bomba | 71 |
| | CAPITULO V | 72 |
| 5. | Selección y Dimensionamiento del Sistema | 72 |
| 5.1. | Aerogenerador | 72 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.1.1. | Criterios de selección | 72 |
| 5.1.2. | Evaluación de alternativas comerciales..... | 73 |
| 5.1.3. | Modelo seleccionado: Aeolos-H 2kW | 74 |
| 5.1.4. | Curva de potencia y ajuste por densidad | 77 |
| 5.1.5. | Producción energética estimada | 79 |
| 5.2. | Baterías | 80 |
| 5.2.1. | Criterios de dimensionamiento..... | 80 |
| 5.2.2. | Evaluación de tecnologías disponibles..... | 81 |
| 5.2.3. | Modelo seleccionado: Felicity Solar 15kWh 48V LPBF48300..... | 82 |
| 5.2.4. | Cálculo según norma IEEE 1562 | 84 |
| 5.3. | Sistema de Control y Conversión | 86 |
| 5.3.1. | Arquitectura de integración | 87 |
| 5.3.2. | Selección del inversor-cargador | 87 |
| 5.3.3. | Controlador de carga | 89 |
| 5.3.4. | Sistema de monitorización y gestión (BMS)..... | 90 |
| 5.3.5. | Panel de distribución y protecciones eléctricas..... | 91 |
| 5.3.6. | Resumen de componentes seleccionados | 93 |
| 5.4. | Grupo electrógeno diésel | 94 |
| 5.4.1. | Criterios de selección | 94 |

| | |
|---|-----|
| 5.4.2. Modelo seleccionado: Hyundai DHY4000SE | 94 |
| 5.4.3. Determinación de la potencia requerida..... | 96 |
| 5.4.4. Análisis de operación en modo híbrido..... | 96 |
| 5.4.5. Integración con el sistema Victron..... | 97 |
| 5.5. Integración del sistema | 97 |
| 5.5.1. Interconexión de componentes..... | 99 |
| 5.5.2. Lógica de control y prioridades operativas | 100 |
| 5.5.3. Modos de operación característicos | 100 |
| CAPITULO VI..... | 102 |
| 6. Simulación y Evaluación del Desempeño del Sistema Híbrido..... | 102 |
| 6.1. Configuración de los escenarios en HOMER Pro | 103 |
| 6.2. Resultados técnicos, ambientales y económicos | 105 |
| 6.2.1. Análisis del desempeño energético y ambiental | 106 |
| 6.2.2. Análisis económico comparativo | 108 |
| CAPITULO VII | 110 |
| 7. Resultados y Discusión | 110 |
| 7.1. Caracterización del recurso eólico y demanda eléctrica..... | 110 |
| 7.1.1. Potencial eólico a 3,754 m.s.n.m..... | 110 |
| 7.1.2. Demanda eléctrica del lodge ecoturístico..... | 111 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| 7.2. | Diseño y desempeño del sistema híbrido diésel–eólico | 111 |
| 7.2.1. | Configuración óptima del sistema..... | 111 |
| 7.2.2. | Resultados de simulación en HOMER Pro | 112 |
| 7.3. | Discusión integral de viabilidad | 114 |
| 7.3.1. | Viabilidad técnica y operativa..... | 114 |
| 7.3.2. | Viabilidad económica y financiera..... | 115 |
| 7.3.3. | Viabilidad ambiental y social..... | 115 |
| 7.4. | Validación de objetivos e hipótesis | 116 |
| CAPITULO VIII..... | | 118 |
| 8. | Conclusiones y Recomendaciones..... | 118 |
| 8.1. | Conclusiones..... | 118 |
| 8.2. | Recomendaciones | 119 |
| BIBLIOGRAFIA | | 120 |
| ANEXOS | | 125 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Clasificación de las fuentes de energía primaria para generación eléctrica | 24 |
| Fig. 2 Sistema eléctrico aislado | 25 |
| Fig. 3 Elementos de conversión y almacenamiento del sistema híbrido | 26 |
| Fig. 4 Comparación de curvas de derating de un grupo electrógeno..... | 28 |
| Fig. 5 Vientos predominantes en la tierra | 31 |
| Fig. 6 Aceleración del viento sobre colinas | 32 |
| Fig. 7 Influencia de obstáculos en el viento | 35 |
| Fig. 8 Anemómetro | 36 |
| Fig. 9 Rosa de los vientos | 36 |
| Fig. 10 Límite de Betz | 38 |
| Fig. 11 Curva de potencia de un aerogenerador | 42 |
| Fig. 12 Portal Nasa Power | 50 |
| Fig. 13 Software HOMER PRO..... | 53 |
| Fig. 14 Estimación de desaparición de nevados en Perú | 55 |
| Fig. 15 Punto de estudio en Chinchorro | 58 |
| Fig. 16 Factor topográfico del punto de estudio | 60 |
| Fig. 17 Grafica de velocidades año 2024..... | 62 |
| Fig. 18 Velocidad promedio mensual a 15m | 62 |
| Fig. 19 Horas promedio de velocidad de viento a 15m | 63 |
| Fig. 20 Rosa de los vientos | 64 |
| Fig. 21 Histograma de velocidad y ajuste de Weibull | 65 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 22 Aerogenerador Aeolos-H 2kW | 76 |
| Fig. 23 Velocidades Extremas de Viento | 77 |
| Fig. 24 Curva de Potencia Aeolos-H 2kW..... | 78 |
| Fig. 25 Batería LPBF48300 | 84 |
| Fig. 26 Esquema de integración..... | 87 |
| Fig. 27 Inversor-cargador Victron Multiplus-II 48/3000/35-32 | 88 |
| Fig. 28 Controlador SmartSolar MPPT 250V 100 A | 90 |
| Fig. 29 Monitorización Cerbo GX | 91 |
| Fig. 30 Panel de distribución | 92 |
| Fig. 31 Generador DHY4000DE | 95 |
| Fig. 32 Esquema general del Sistema..... | 98 |
| Fig. 33 Demanda simulada en Homer Pro | 103 |
| Fig. 34 Recurso eolico en Homer Pro..... | 104 |
| Fig. 35 Configuración del Sistema..... | 105 |
| Fig. 36 Producción Eléctrica del sistema hibrido | 107 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla I COEFICIENTE DE HELLMAN (A) SEGÚN TIPO DE TERRENO | 34 |
| Tabla II INTERPOLACIÓN DE DENSIDAD SEGÚN LA ALTURA..... | 59 |
| Tabla III EXTRAPOLACIÓN VELOCIDAD PROMEDIO VIENTO | 61 |
| Tabla IV DEMANDA ELÉCTRICA POR LODGE | 68 |
| Tabla V PERFIL HORARIO DE DEMANDA ELÉCTRICA | 69 |
| Tabla VI SÍNTESIS DE SENSIBILIDAD | 71 |
| Tabla VII COMPARACIÓN DE AEROGENERADORES | 73 |
| Tabla VIII TABLA DE POTENCIA AJUSTADA..... | 79 |
| Tabla IX DISTRIBUCIÓN DETALLADA DE LA PRODUCCIÓN EÓLICA | 80 |
| Tabla X CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS..... | 81 |
| Tabla XI ESPECIFICACIONES VICTRON MULTIPLUS-II 48/3000/35-32 | 89 |
| Tabla XII COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL Y CONVERSIÓN | 93 |
| Tabla XIII ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERADOR DHY4000SE..... | 95 |
| Tabla XIV EQUIPOS DEL SISTEMA HIBRIDO..... | 101 |
| Tabla XV RESULTADOS TÉCNICOS COMPARATIVOS DE HOMERPRO | 106 |
| Tabla XVI RESULTADOS ECONÓMICOS COMPARATIVOS DE HOMERPRO.. | 106 |
| Tabla XVII COMPARATIVA DE DESEMPEÑO DE LOS ESCENARIOS | 113 |
| Tabla XVIII VALIDACIÓN DE OBJETIVOS E HIPÓTESIS | 116 |

CAPITULO I

1. Generalidades

1.1. Planteamiento del Problema

En regiones altoandinas como el distrito de Chinchero (Cusco), ubicado sobre los 3754 m.s.n.m., el desarrollo de emprendimientos de ecoturismo enfrenta graves limitaciones debido a la falta de acceso a la red eléctrica. Establecimientos como los Lodge en el cerro dependen exclusivamente de grupos electrógenos diésel, lo que genera costos operativos elevados por el transporte de combustible y produce emisiones contaminantes que afectan un entorno natural de alto valor paisajístico y cultural. La alternativa solar fotovoltaica presenta limitaciones en esta geografía debido a la topografía accidentada y la frecuente nubosidad, que impiden una exposición solar óptima y constante.

Frente a esta problemática, los sistemas híbridos que combinan energía eólica con generación diésel se presentan como una alternativa sostenible. No obstante, su implementación en condiciones de gran altitud requiere un diseño técnico específico que considere factores como la baja densidad del aire y los patrones de viento locales, aspectos que hasta ahora no han sido suficientemente estudiados en el contexto peruano.

Este estudio busca evaluar la viabilidad de un sistema de microgeneración híbrido diésel-eólico diseñado para operar en las condiciones específicas de Chinchero. Mediante modelado y simulación, se analizará su potencial para reducir el consumo de combustible, disminuir emisiones de CO₂ y ofrecer una solución energética económicamente viable que impulse un desarrollo turístico sostenible en la zona.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. *Problema General*

¿Es posible diseñar y analizar el desempeño de un sistema híbrido de microgeneración diésel–eólico para zonas de más de 3000 m s. n. m., tomando como referencia el distrito de Chinchero, región Cusco?

1.2.2. *Problemas Específicos*

1. ¿Cuáles son los parámetros del potencial eólico en Chinchero?
2. ¿Qué configuración y dimensionamiento óptimo debe tener un sistema híbrido de microgeneración diésel-eólico para operar eficientemente en gran altitud?
3. Según una simulación operativa, ¿qué reducción en el consumo de diésel y en las emisiones de CO₂ se puede lograr con el sistema híbrido frente a un sistema diésel con baterías?
4. ¿Cuál es el desempeño económico del sistema híbrido diésel–eólico propuesto en comparación con un sistema convencional, considerando costos de operación, energía generada y emisiones asociadas?

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Diseñar y analizar el desempeño de un sistema híbrido de microgeneración diésel–eólico para zonas de más de 3000 m s. n. m., tomando como referencia el distrito de Chinchero, región Cusco.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Cuantificar el potencial eólico del distrito de Chinchero mediante el procesamiento estadístico de datos de velocidad y dirección del viento, determinando curvas de frecuencia Weibull y rosas de viento.
2. Diseñar un sistema híbrido diésel-eólico mediante simulación computacional, considerando las condiciones de gran altitud y estableciendo los parámetros técnicos óptimos de configuración.
3. Simular el desempeño operativo del sistema híbrido versus grupo electrógeno con baterías, calculando el ahorro en consumo de combustible y la reducción de emisiones de CO₂ equivalentes.
4. Evaluar el desempeño económico del sistema híbrido propuesto mediante simulación, comparando costos, producción energética y emisiones frente a un sistema convencional.

1.4. Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de proporcionar soluciones energéticas sostenibles y técnicamente viables para zonas altoandinas como el distrito de Chinchero (3754 m.s.n.m.), donde el acceso a la red eléctrica es limitado y el recurso eólico representa una alternativa. Este estudio permitirá diseñar y validar, mediante modelado y simulación computacional, un sistema híbrido diésel-eólico que optimice el suministro eléctrico para establecimientos de ecoturismo, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y alineándose con los compromisos ambientales del Perú.

Su relevancia se sustenta en tres aspectos clave:

- Técnico-académico: El trabajo aportará una metodología de diseño y simulación aplicable a condiciones de gran altitud, considerando factores críticos como la baja densidad del aire y la variabilidad del viento. Los resultados generarán datos valiosos para futuras investigaciones en el campo de los sistemas híbridos aislados.
- Ambiental y normativo: La propuesta se alinea con las metas peruanas establecidas en el Acuerdo de París y el Plan Energético Nacional, que promueven la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la integración de energías renovables no convencionales en la matriz energética.
- Socioeconómico: Al demostrar la viabilidad de una alternativa energética más limpia y eficiente, este estudio contribuye al desarrollo de actividades productivas, como el ecoturismo, en zonas rurales altoandinas, promoviendo su crecimiento económico local de manera sostenible.

De esta forma, la investigación no solo fortalece la formación profesional en el uso de herramientas avanzadas de simulación, sino que también ofrece un referente técnico para la implementación de sistemas híbridos en contextos geográficos con características similares.

La complejidad operativa de los sistemas híbridos con almacenamiento hace necesario el uso de herramientas de simulación, las cuales permiten evaluar el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones variables.

Este estudio se centra en la energía eólica ante un vacío de investigación identificado: el análisis técnico-económico de este recurso para microgeneración en gran altitud es escaso en comparación con los estudios solares, lo que justifica su priorización y desarrollo en esta tesis.

1.5.Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

Es posible diseñar y analizar el desempeño de un sistema híbrido de microgeneración diésel–eólico para zonas de más de 3000 m s. n. m. en el distrito de Chinchero, región Cusco.

1.5.2. Hipótesis Específicas

1. El potencial eólico de Chinchero será cuantificable y suficiente para la microgeneración.
2. Es posible diseñar un sistema híbrido técnicamente viable para operar en condiciones de gran altitud.
3. La operación del sistema híbrido podría reducir significativamente el consumo de diésel y las emisiones de CO₂ .
4. El sistema híbrido presentará un mejor desempeño económico y ambiental en comparación con un sistema convencional basado únicamente en generación diésel.

1.6.Variables de Estudio

1.6.1. Variable Independiente

- Grupo electrógeno (potencia nominal, consumo específico de combustible)
- Aerogenerador (potencia nominal, curva de potencia, características de arranque)
- Configuración del sistema híbrido diésel–eólico (modo de operación y complementariedad).

1.6.2. Variable Dependiente

- Eficiencia del sistema de generación hibrida Diesel-Eólico.

1.7. Alcances y Limitaciones

1.7.1. *Alcances*

El presente trabajo comprende el diseño y evaluación de un sistema híbrido de generación diésel–eólico, destinado al abastecimiento energético de un Lodge ecoturístico ubicado a más de 3000 m.s.n.m.

El estudio incluye la caracterización del recurso eólico a partir de datos meteorológicos disponibles, el análisis de la demanda eléctrica, la selección y dimensionamiento de los equipos principales del sistema (aerogenerador, generador diésel, banco de baterías, inversor y controlador), así como la simulación del comportamiento operativo del sistema mediante el software HOMER Pro.

Asimismo, se evalúa el desempeño energético, económico y ambiental del sistema propuesto, considerando la producción de energía, el consumo de combustible diésel, los costos asociados y las emisiones de CO₂, y se realiza una comparación entre diferentes configuraciones del sistema.

Los resultados obtenidos permiten analizar la viabilidad técnica y comparativa del sistema híbrido propuesto bajo las condiciones consideradas, sin constituir un estudio de ingeniería de detalle ni una evaluación financiera a nivel de inversión.

1.7.2. Limitaciones

El presente estudio presenta las siguientes limitaciones:

- La caracterización del recurso eólico se realiza a partir de datos meteorológicos secundarios y de un periodo temporal limitado, por lo que los resultados representan un escenario típico y no sustituyen mediciones in situ de largo plazo.
- El análisis correspondiente no se consideran aspectos propios de la ingeniería de detalle, tales como diseño estructural, análisis de cimentaciones, logística de instalación ni estudios geotécnicos.
- La evaluación económica se basa en una comparación de desempeño económico entre configuraciones, utilizando indicadores de costos y simulación, sin incluir una evaluación financiera completa de inversión mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) o la Tasa Interna de Retorno (TIR).
- El comportamiento del sistema híbrido se analiza mediante simulación computacional, debido a que la instalación realizada en el maquicentro de la Unsaac es estacionaria por lo cual ningún equipo pudo ser llevado al área de estudio.
- El alcance del trabajo se centra en el diseño del sistema híbrido y la selección de componentes comerciales. No incluye el diseño mecánico, aerodinámico o estructural de un aerogenerador nuevo, ya que se parte de la selección de un modelo comercial disponible cuyas especificaciones son dadas por el fabricante.

1.8.Metodología

1.8.1. Tipo de Metodología de la Investigación

Este proyecto de investigación es de enfoque cuantitativo. Un enfoque cuantitativo tiene como característica el representar la medición y estimación de magnitudes necesarias en un problema de investigación [1].

1.8.2. Nivel de Investigación

Alcance descriptivo y explicativo. El alcance descriptivo considera al fenómeno estudiado y sus componentes, midiendo conceptos y definiendo variables, y el alcance explicativo brinda una información entendible y estructurada acerca de la causa o causas que originaron un fenómeno[1].

1.8.3. Diseño de la Investigación

No experimental de corte transversal. Este diseño es no experimental porque no hay una manipulación arbitraria de variables, más al contrario el fenómeno se analiza en su propio ambiente sin intervención, también se menciona que, si los datos son recolectados en un único momento la investigación será de corte transversal [1]

1.8.4. Recopilación de Información

La información meteorológica se obtiene exclusivamente del portal satelital NASA POWER, considerando que no existen estaciones cercanas con registros continuos en la zona de estudio. Se recopilan también referencias bibliográficas de artículos científicos, libros especializados, manuales técnicos y documentación oficial relacionada con microgeneración, sistemas híbridos y energía eólica.

CAPITULO II

2. MARCO TEORICO

2.1.Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes Nacionales*

En el Perú se realizaron varios estudios de potencial eólico como la investigación de [2] que analizan el potencial de la energía eólica de un sitio ubicado en el sur del Perú (Laraqueri). Utilizando datos de viento tomados proporcionados por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) durante el periodo de enero de 2000 hasta 2021 además de datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio del periodo 2001 hasta 2021 se desarrolló la función de distribución de Weibull utilizando la velocidad promedio del año 2020 llegando a observarse que la velocidad media anual en Laraqueri es de 3.5 m/s. también registrándose la velocidad alcanza un máximo de 4.94 m/s en noviembre y 4.83 m/s en agosto y un mínimo de 3.05 m/s en marzo teniendo de agosto a diciembre los meses con mayor velocidad registrándose valor máximo de 119.24 W/m² en agosto y 123.40 W/m² con el método empírico. además de que el potencial eólico calculado es de 61.89 w/m², que no es un valor muy grande recomendando que para esta zona en particular por lo cual se recomienda aerogeneradores de baja potencia y de eje vertical.

Otros estudios del potencial eólico más cercanos al de este trabajo de investigación en Cusco seria el desarrollado por [3] realizo un estudio cuantitativo y cualitativo del potencial eólico en la provincia de Cusco usando información meteorológica del SENAMHI y de la NASA POWER desde los años 2017 hasta 2021 usando la distribución de Weibull para la obtener la velocidad promedio del viento utilizando el método gráfico y el método de Justus para calcular los

valores necesarios de c y k los cuales dieron como resultado para cusco a 10 metros de altura sobre el suelo $c=4,2036723$ m/s y $k =1,008308$, se obtuvo la densidad de potencia mediante la densidad del aire , altura del lugar de estudio y temperatura del lugar concluyendo que en cusco se muestra los resultados de la velocidad promedio por meses de los años 2017 al 2021 para una altura de 10 m la velocidad promedio es 4,80864057 (m/s), la densidad de potencia promedio de 35,0876144 (W/m^2) y para la altura de 25 m la velocidad promedio es 5,30 (m/s), la densidad de potencia promedio de 105,60 (W/m^2).

Una vez analizado el potencial eólico del Perú específicamente en zonas de altura como en Cusco también se observó estudios acerca del sistema de generación hibrida como por ejemplo el estudio desarrollado por [4] en el cual presenta una opción de instalación hibrida Diesel-Eólico para el asentamiento humano “Ruta del Sol” con una población de 300 familias teniendo en cuenta un potencian eólico de 100 MW lo cual ayudaría a familias que viven en zonas aisladas no interconectadas al sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN) en el estudio se realiza un comparativo de un sistema Diesel convencional (grupo electrógeno) y un sistema hibrido Diesel-Eólico concluyendo la rentabilidad del sistema hibrido con u costo de 0.20 \$/kWh frente a los 0.32 \$/kWh del grupo electrógeno solo, reduciendo también los costos de operación y mantenimiento del grupo electrógeno.

En conjunto, los antecedentes nacionales revelan que el recurso eólico en zonas altoandinas puede ser aprovechado para proyectos de microgeneración, especialmente cuando se combinan fuentes renovables con tecnologías convencionales para incrementar la confiabilidad del suministro.

2.1.2. Antecedentes internacionales

En el ámbito internacional las investigaciones con respecto al tema de microgeneración híbrida existen varios países con investigaciones avanzadas de generación híbrida tales como España, Australia, Portugal, Irlanda, Brasil entre otros para este estudio se gracias a su similitud se tomó como referencia los siguientes.

[5] desarrollaron un estudio enfocado en la emulación de inercia en sistemas híbridos diésel–eólico mediante control de referencia de modelo. La metodología consistió en diseñar un modelo matemático del sistema y aplicar técnicas de control para mejorar la estabilidad de frecuencia frente a perturbaciones de carga. Los resultados mostraron que la técnica propuesta redujo en más de 40 % las oscilaciones de frecuencia respecto a un sistema sin control avanzado, demostrando que los sistemas híbridos pueden alcanzar un desempeño estable incluso con alta penetración eólica.

[6] realizaron la modelación de un sistema híbrido diésel–eólico aislado en la isla San Cristóbal (Galápagos, Ecuador). Emplearon el software DIgSILENT PowerFactory para simular escenarios de frecuencia con datos reales de operación del sistema insular. La metodología incluyó modelado dinámico, análisis de eventos de carga y validación con mediciones en campo. Los resultados indicaron que la integración eólica redujo en 18 % el uso de diésel y mejoró la respuesta de frecuencia del sistema hasta en 0.3 Hz de estabilidad adicional, respecto al uso exclusivo de generadores diésel.

[7] evaluaron la factibilidad técnica y económica de un sistema híbrido eólico–diésel en el sur de Argelia, aplicando el software HOMER Pro y datos de viento locales (velocidad media: 4.5

m/s). La metodología consistió en simular diferentes configuraciones híbridas y comparar el costo de energía (COE) y las emisiones. El escenario óptimo combinó un aerogenerador de 50 kW con un generador diésel de 40 kW, logrando un COE de 0.22 USD/kWh, con una reducción del 32 % en consumo de diésel y del 29 % en emisiones de CO₂, en comparación con un sistema únicamente diésel.

[8] analizaron el diseño óptimo de un sistema híbrido solar–eólico–diésel en la isla Masirah (Omán), aplicando HOMER Pro y datos meteorológicos locales. La metodología se basó en la evaluación de diferentes configuraciones de generación con y sin almacenamiento en baterías. Los resultados mostraron que la combinación óptima redujo el costo de la energía de 0.28 a 0.21 USD/kWh, con una disminución del 35 % en consumo de diésel y del 40 % en emisiones de CO₂, confirmando la viabilidad económica y ambiental de los sistemas híbridos en islas y regiones aisladas.

Estos antecedentes internacionales destacan que la integración eólica en sistemas híbridos permite mejorar la eficiencia, la estabilidad y la sostenibilidad del suministro energético, especialmente en regiones remotas o de difícil acceso. Asimismo, evidencian la utilidad de herramientas como HOMER Pro para optimizar diseños y evaluar escenarios técnicos y económicos.

2.1.3. Síntesis y relación con el presente estudio

Los estudios revisados tanto nacionales como internacionales coinciden en que la energía eólica puede complementar de manera eficiente a los sistemas basados en diésel, permitiendo reducir el consumo de combustible, los costos operativos y las emisiones contaminantes. Sin

embargo, la mayoría de investigaciones se han centrado en zonas costeras, desérticas o urbanas, y son escasos los estudios orientados específicamente a microproyectos en contextos altoandinos por encima de los 3,000 m, donde la densidad del aire, la climatología y la topografía generan condiciones particulares.

En este sentido, la presente investigación aporta un análisis aplicado al distrito de Chinchero, considerando un escenario real de microgeneración para un Lodge ecoturístico, empleando datos satelitales NASA POWER, caracterización con Weibull y simulaciones técnicas con HOMER Pro. De este modo, el estudio complementa el estado del arte existente y genera evidencia aplicable al desarrollo energético sostenible en comunidades altoandinas del Perú.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Energía y Sistemas de Generación

La energía puede definirse como la capacidad de un sistema para realizar trabajo o producir cambios en su estado físico, constituyendo uno de los pilares fundamentales de la ingeniería y la física aplicada [9]. Desde la perspectiva de la ingeniería, la energía debe transformarse desde fuentes primarias como combustibles fósiles, viento o radiación solar en energía eléctrica capaz de suministrar potencia útil a cargas específicas como se muestra en la Fig. 1. Este proceso de conversión y transferencia de energía se rige por los principios de conservación, eficiencia y equilibrio energético [10].

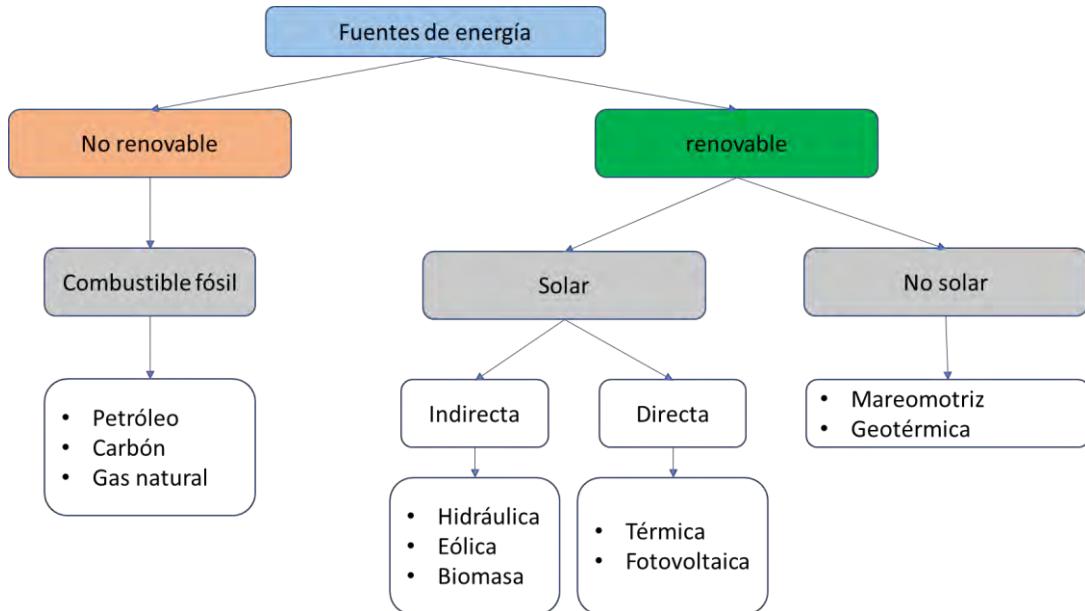


Fig. 1 Clasificación de las fuentes de energía primaria para generación eléctrica[11]

Los sistemas eléctricos aislados, también denominados microredes autónomas, son sistemas que operan sin conexión a una red interconectada de mayor escala como se observa en la Fig. 2. Debido a ello, deben integrar generación, almacenamiento y regulación interna capaces de mantener la continuidad y calidad del suministro eléctrico [12]. Estas configuraciones requieren un diseño que considere variabilidad de la demanda, disponibilidad del recurso energético local, redundancia operativa y mecanismos de estabilidad en frecuencia y tensión.

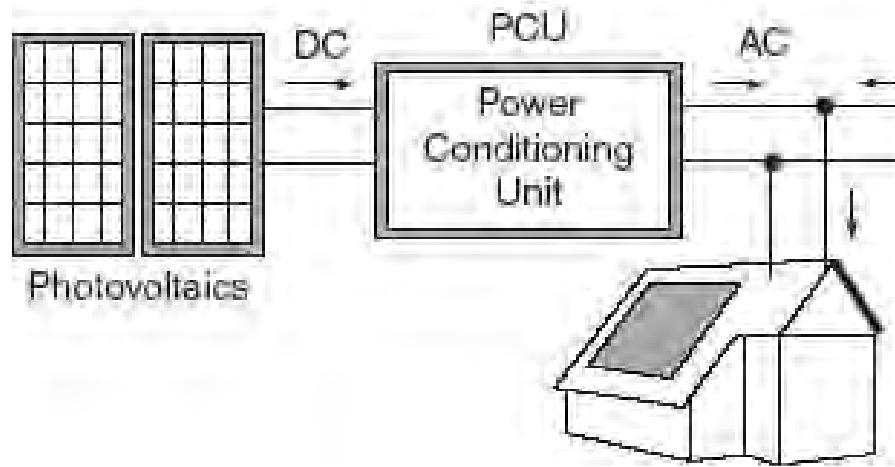


Fig. 2 Sistema eléctrico aislado [12]

Para permitir la operación eficiente de sistemas híbridos, es necesaria la incorporación de elementos de conversión y almacenamiento energético, tales como inversores, controladores y bancos de baterías como se muestra en la Fig. 3. Estos componentes permiten estabilizar la red aislada, gestionar la variabilidad de las fuentes renovables y mantener la continuidad del suministro incluso en condiciones cambiantes [13]. De esta manera, los sistemas aislados evolucionan hacia microredes híbridas más confiables y sostenibles, capaces de aprovechar los recursos energéticos disponibles localmente y reducir la intervención de generadores fósiles.

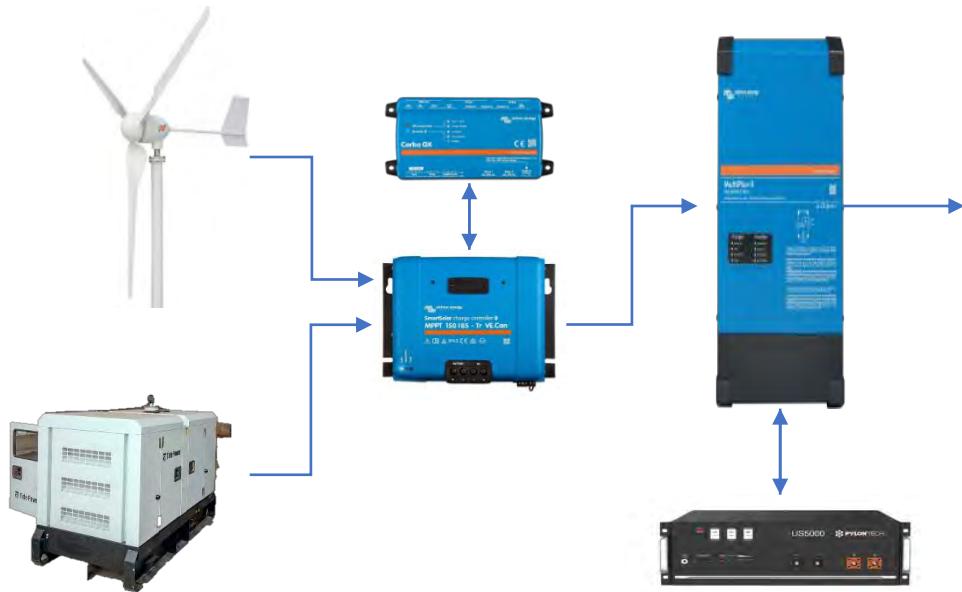


Fig. 3 Elementos de conversión y almacenamiento del sistema híbrido

2.2.2. Generación Diésel

La generación basada en motores diésel constituye una de las tecnologías más utilizadas en sistemas eléctricos aislados debido a su capacidad para proporcionar potencia firme, modularidad, alta disponibilidad y facilidad de operación en zonas remotas [12]. Un generador diésel combina un motor de combustión interna que convierte la energía química del combustible en energía mecánica y un alternador, encargado de transformar esta energía mecánica en energía eléctrica. El proceso de conversión se rige por los principios termodinámicos del ciclo diésel, donde la combustión ocurre por autoignición debido a la elevada compresión del aire dentro del cilindro [14].

En sistemas aislados, los grupos electrógenos funcionan como fuente primaria de potencia o como respaldo frente a la variabilidad y estacionalidad de fuentes renovables como el viento. Su

desempeño se evalúa mediante parámetros fundamentales como la potencia útil entregada, el consumo específico de combustible (*Specific Fuel Consumption*, SFC), y la eficiencia térmica del motor [10]. El SFC permite cuantificar la cantidad de combustible consumido por unidad de energía generada, constituyendo un indicador clave para estimar costos de operación.

La operación de generadores diésel en zonas altoandinas requiere considerar la disminución de la densidad del aire, lo cual reduce la masa de oxígeno disponible para la combustión y, en consecuencia, la potencia efectiva del motor [13]. Este fenómeno, conocido como *derating*, puede estimarse cuando no se dispone de datos del fabricante mediante relaciones empíricas basada en normas internacionales como ISO 3046 [12] como se observa en la Fig. 4. Para alturas superiores a 1000 metros, la potencia corregida puede aproximarse mediante la (1):

$$P_h = P_0 \left[1 - 0.01 \cdot \frac{h - 1000}{100} \right] \quad (1)$$

Donde:

- P_h = potencia disponible a la altura h (kW)
- h = altitud (m)
- P_0 = potencia nominal al nivel del mar (kW)

Esta reducción de potencia suele estar acompañada de un incremento del consumo específico de combustible, debido a una combustión menos eficiente en condiciones de altura.

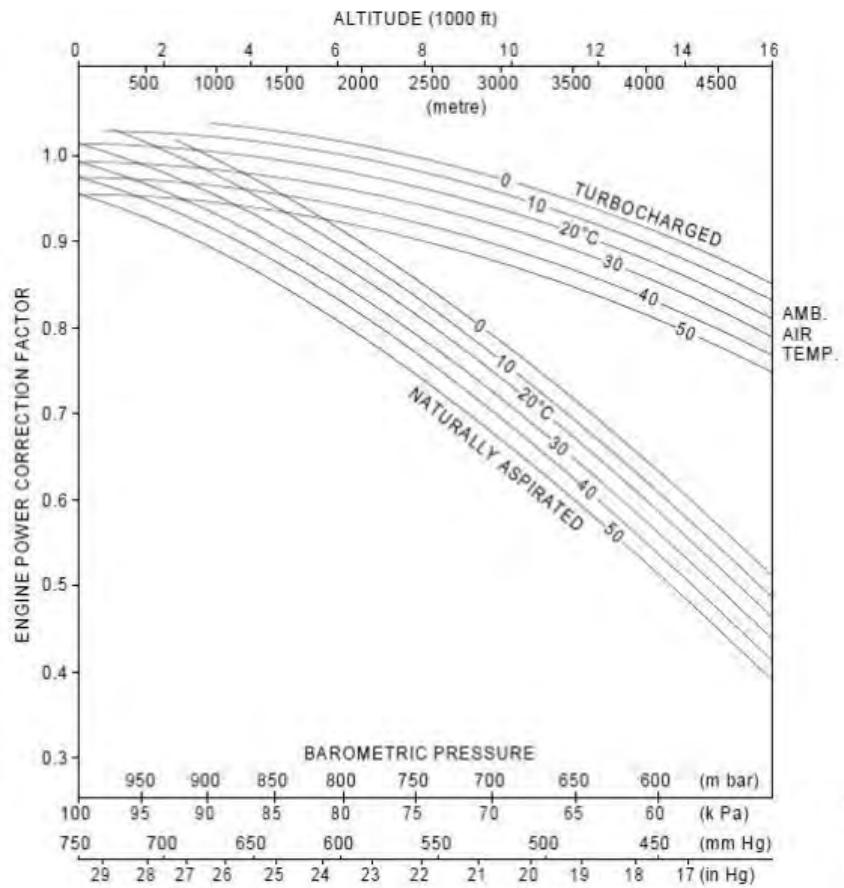


Fig. 4 Comparación de curvas de derating de un grupo electrógeno[15]

La eficiencia térmica del generador puede evaluarse mediante (2) considerando la relación entre la potencia útil entregada y la energía química aportada por el combustible [9]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{\dot{m}_f \cdot LHV} \quad (2)$$

Donde:

- η : Eficiencia térmica del motor
- P_{out} : Potencia útil (kW)

- m_f : Flujo másico de combustible (kg/s)
- LHV: Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

El consumo específico de combustible (3) constituye un indicador directo del rendimiento del generador y se expresa como [14] :

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_{out}} \quad (3)$$

Donde:

- SFC: Consumo específico de combustible
- P_{out} : Potencia útil (kW)
- \dot{m}_f : Flujo másico de combustible (kg/s)

Este parámetro se utiliza para estimar el consumo volumétrico de combustible (4) en función de la carga operativa [12] :

$$FC = SFC \cdot P_{load} \quad (4)$$

Donde:

- FC: Consumo de combustible (L/h)
- SFC: Consumo específico de combustible
- P_{load} : Potencia demandada al generador (kW)

Desde el punto de vista ambiental, las emisiones de dióxido de carbono (5) pueden aproximarse mediante factores de emisión estándar ampliamente utilizados [10]:

$$\text{ECO}_2 = FC \cdot FE \quad (5)$$

Donde:

- ECO_2 : Emisiones totales de CO₂ (kg)
- FC: Consumo de combustible (L/h)
- FE: Factor de emisión del diésel (2.68 kg CO₂ /L)

Finalmente, el mantenimiento de un generador diésel depende directamente de las horas de funcionamiento, dado que intervenciones como cambios de aceite, filtros y ajustes de inyección están basadas en intervalos de operación. Un modelo simplificado (6) para estimar los costos asociados es [12]:

$$C_{\text{maint}} = C_{\text{unit}} \cdot h_{\text{op}} \quad (6)$$

Donde:

- C_{maint} : Costo de mantenimiento
- C_{unit} : Costo de mantenimiento por hora (USD/h)
- h_{op} : Horas anuales de operación del generador

2.2.3. Generación Eólica

La energía eólica es la energía cinética contenida en el movimiento del aire. Su aprovechamiento se basa en la conversión de esta energía en energía mecánica mediante un rotor aerodinámico y, posteriormente, en energía eléctrica a través de un generador. El recurso eólico

depende de variables atmosféricas y geográficas, entre ellas la velocidad del viento, la densidad del aire, la estabilidad atmosférica y los efectos inducidos por la superficie terrestre [13].

2.2.3.1. Características físicas del viento

El movimiento del aire es consecuencia de diferencias de presión producidas por variaciones de temperatura y fenómenos globales como la rotación de la Tierra como se observa en la Fig. 5. Este flujo contiene energía proporcional a la masa de aire que atraviesa una superficie por unidad de tiempo y al cuadrado de su velocidad. Los aerogeneradores capturan una fracción de esta energía mediante la interacción aerodinámica de las palas con el flujo incidente [16].

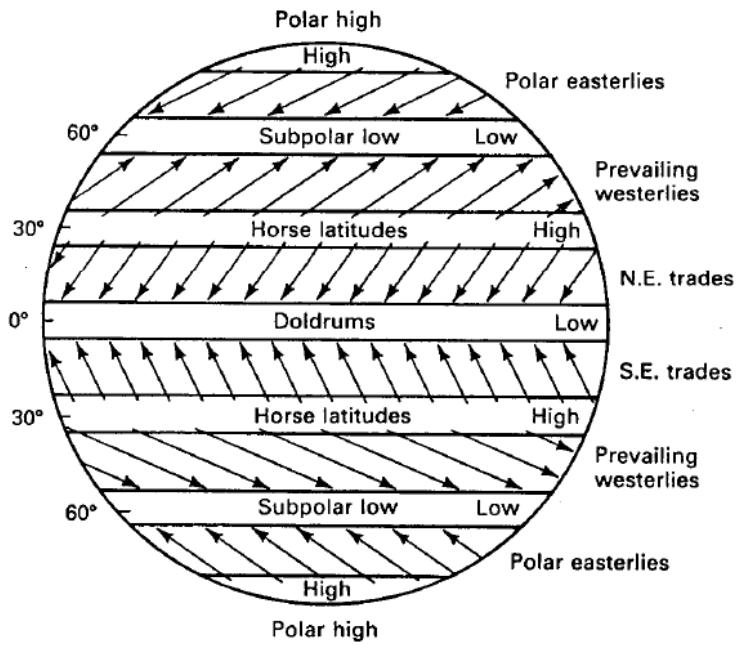


Fig. 5 Vientos predominantes en la tierra [17]

La cantidad de energía disponible también depende de la densidad del aire, la cual varía con la temperatura, la presión atmosférica y la altitud. Aunque la densidad disminuye con la altura,

las velocidades del viento frecuentemente aumentan con la elevación y la exposición, lo que puede compensar la reducción de densidad en muchos entornos geográficos [10].

2.2.3.2. Condiciones orográficas y efectos en el viento

La topografía del terreno modifica significativamente la velocidad y dirección del viento, generando incrementos o disminuciones locales en su magnitud. Los efectos orográficos más relevantes para el análisis del recurso eólico son los siguientes:

a) Aceleración sobre colinas (hill-top speed-up). Cuando un flujo de aire asciende una colina o loma suave, la reducción del área efectiva provoca un incremento local de la velocidad del viento. Este fenómeno puede aumentar la velocidad entre un 10 % y 30 % como se aprecia en la Fig. 6, dependiendo de la pendiente y de la uniformidad del relieve [13].

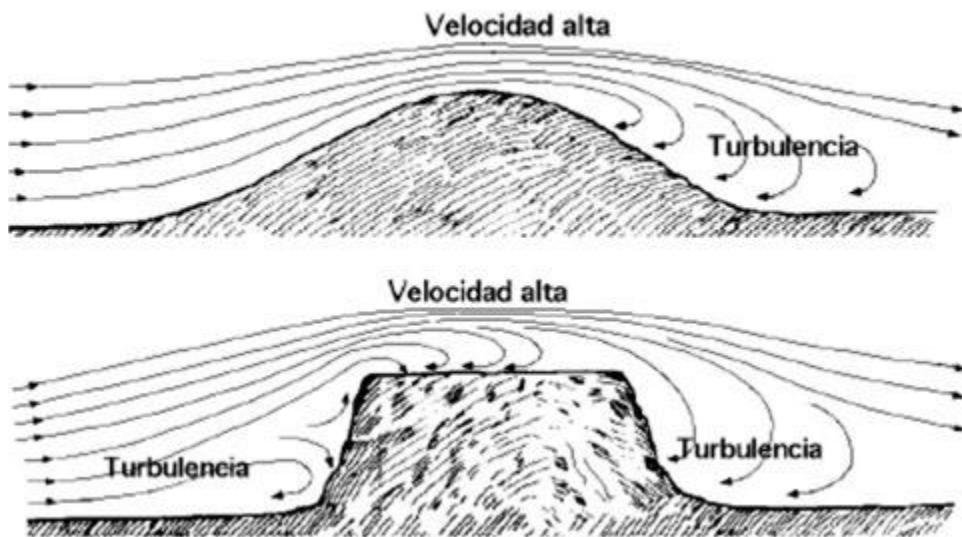


Fig. 6 Aceleración del viento sobre colinas [18]

El incremento de la velocidad del viento debido a la aceleración (7) sobre una cresta o pendiente (hill-top speed-up):

$$U_{hill} = U_{\infty}(1 + S) \quad (7)$$

donde:

- U_{hill} = velocidad del viento sobre la cresta o punto elevado (m/s).
- U_{∞} = velocidad del viento incidente a barlovento (m/s).
- S = factor de speed-up orográfico, adimensional, (8):

$$S = \frac{U_{hill} - U_{\infty}}{U_{\infty}} \quad (8)$$

En términos prácticos, si existe una pendiente pronunciada, el factor S puede adoptarse como un valor porcentual estimado (por ejemplo, 0.15 para 15 %, o 0.30 para 30 %), basado en la geometría local, la inclinación del terreno y la orientación respecto al viento dominante [16].

b) Canalización del viento (flow channeling). En pasos, gargantas o valles estrechos, la restricción lateral del flujo produce una aceleración similar a la de una tobera convergente. Este efecto incrementa la velocidad del viento en corredores naturales donde la topografía dirige el flujo atmosférico [16].

c) Rugosidad del terreno. La rugosidad superficial, definida por características como vegetación, edificaciones o irregularidades del suelo, afecta el perfil vertical de la velocidad del viento. Un terreno más rugoso aumenta la fricción y reduce la velocidad cerca de la superficie, modificando la distribución del viento en altura.

Ley de potencia es una fórmula utilizada para estimar la velocidad del viento a una altura diferente de la tomada por instrumentos de medición esta ley establece que la altura deseada se

calcularse con (9) a partir de una altura de referencia mediante el coeficiente de rugosidad (α) depende del tipo de terreno como se muestra en la Tabla I [19].

Tabla I

COEFICIENTE DE HELLMAN (A) SEGÚN TIPO DE TERRENO

| Tipo de terreno | α (coeficiente de Hellman) |
|-------------------------------------|---|
| Mar abierto | 0.10 |
| Terrenos abiertos (rugosidad media) | 0.14 |
| Zonas boscosas o con edificaciones | 0.20-0.25 |

Nota. La tabla nos muestra los diferentes el coeficiente de Hellman para distintos tipos de relieves para definir el coeficiente de rugosidad. [19].

$$\frac{V_h}{V_{\text{ref}}} = \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (9)$$

Donde:

- V_h : Es la Velocidad del Viento a la altura h .
- V_{ref} : Es la Velocidad del Viento de Referencia medida a la altura conocida.
- h : Es la Altura Objetivo a la que se desea estimar la velocidad.
- H_{ref} : Es la Altura de Referencia donde se midió la velocidad.
- α : Es el Exponente de Hellmann (o Coeficiente de Rugosidad).

d) Turbulencia inducida por obstáculos. Los obstáculos producen zonas de estela donde disminuye la velocidad del viento y aumenta la turbulencia como se muestra en la Fig. 7. Estas

regiones presentan condiciones desfavorables para la captación eólica, debido a la mayor carga dinámica sobre los componentes del aerogenerador.

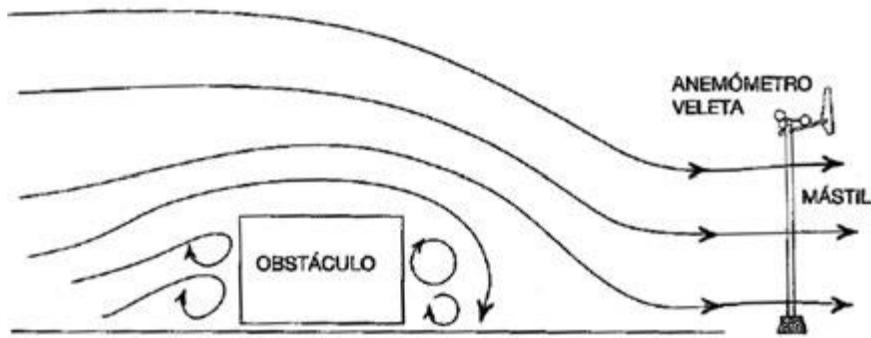


Fig. 7 Influencia de obstáculos en el viento [18]

2.2.4. Rosa de los vientos

El viento al ser un fenómeno que se da por movimiento de grandes cantidades de aire a causa de la rotación de la tierra y la radiación solar que produce variación de temperatura en la atmósfera genera que el aire fluya en diferentes direcciones, estas en un inicio se midieron con veletas que contaban con una placa giratoria y una flecha que marcaba la dirección del viento con respecto a los 4 puntos cardinales Norte, Sur, este y oeste. Posteriormente con el avance de la tecnología y la necesidad de estudiar el viento para aprovechar su energía para diferentes usos se desarrolló el anemómetro un instrumento de medición más sofisticado como se muestra en la Fig. 8. Este instrumento de medición recopila los datos de dirección y velocidad de viento en una memoria la con la cual se puede realizar un gráfico que nos detalla la dirección y velocidades del viento como se observa en la Fig. 9 este grafico se denomina rosa de los vientos[20].



Fig. 8 Anemómetro

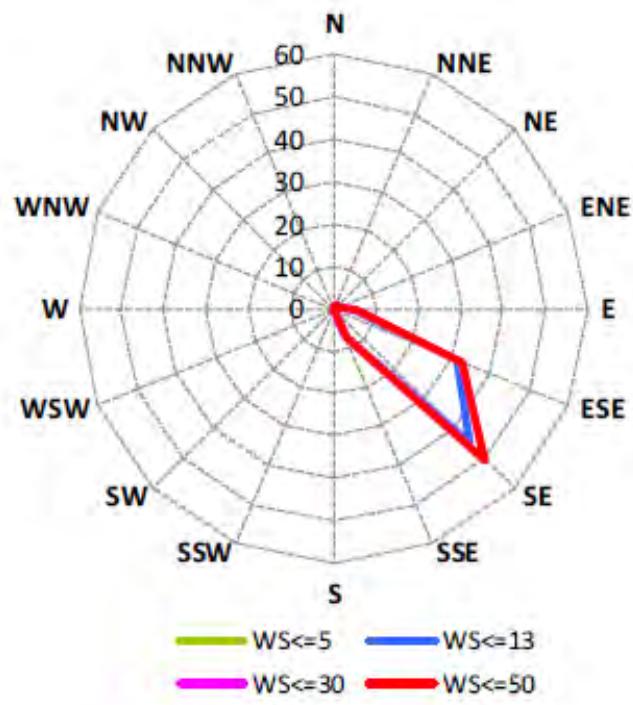


Fig. 9 Rosa de los vientos [20]

El viento este compuesto por dos variables la dirección y la velocidad, los científicos desarrollaron una forma de caracterizar estas dos variables a esto se le denomina la rosa de los vientos este grafico suele dividirse en un numero múltiplo de cuatro (12,16,32, etc.) [20].

2.2.5. Potencia en el Viento

La potencia contenida en una corriente de aire que atraviesa un área A con velocidad v está dada por (10):

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (10)$$

Donde:

- P_v = Potencia del viento (W),
- ρ = Densidad del aire (kg/m^3),
- A = área barrida por el rotor (m^2),
- v = velocidad del viento (m/s).

Este principio muestra la gran dependencia de la potencia eólica con la velocidad del viento al cubo, lo que explica la necesidad de ubicar los aerogeneradores en sitios con vientos estables y suficientes [19].

2.2.6. Límite de Betz

El físico alemán Albert Betz demostró que ningún aerogenerador puede extraer más del 59.3 % de la energía cinética del viento como se aprecia en la Fig. 10. Este límite se conoce como coeficiente de potencia máximo [19]:

$$C_{p,\max} = \frac{16}{27} = 0.593$$

En la práctica, los aerogeneradores comerciales alcanzan valores de C_p entre 0.35 y 0.45.

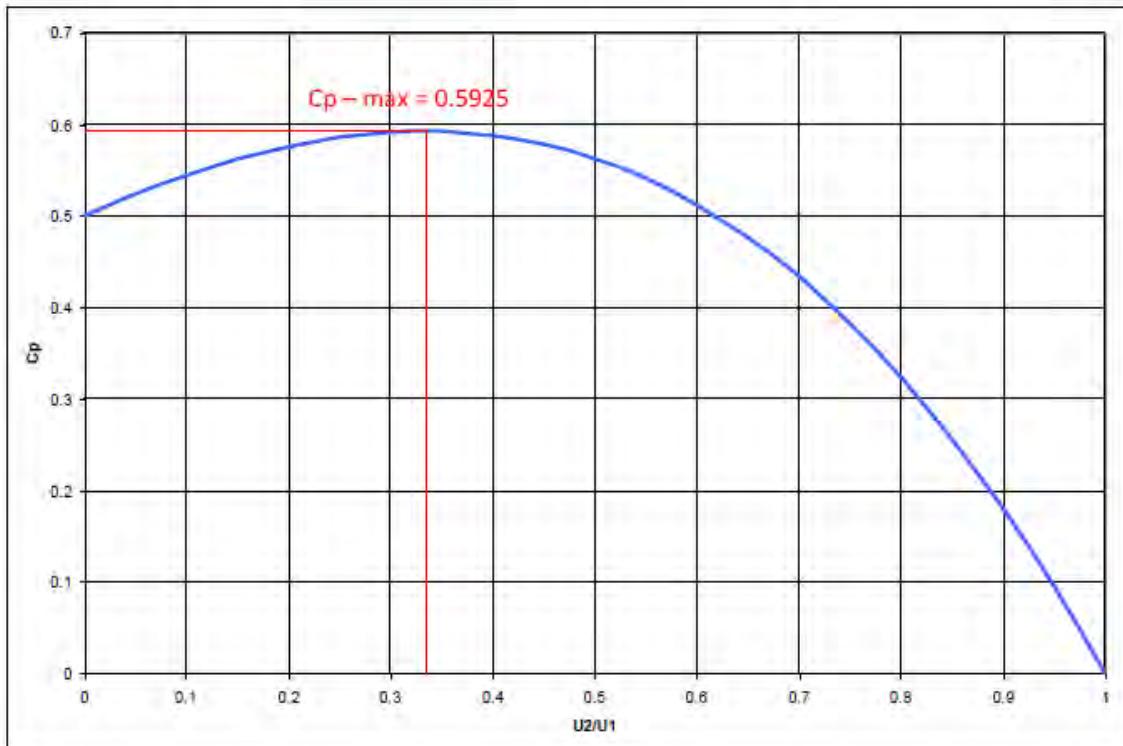


Fig. 10 Límite de Betz [20]

2.2.7. Distribución de Weibull

La variabilidad del viento en un sitio determinado se describe comúnmente mediante la distribución de Weibull [16], la cual caracteriza la frecuencia de las velocidades de viento a lo largo del tiempo. Su función de densidad de probabilidad esta dado por (11):

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (11)$$

Donde:

- $f(v)$ = función de densidad de probabilidad,
- v = velocidad del viento (m/s),
- k = parámetro de forma (indica la uniformidad del viento),
- c = parámetro de escala (aproximadamente la velocidad media del viento).

La media de la velocidad se obtiene con (12):

$$\bar{v} = c \cdot \Gamma(1 + 1/k) \quad (12)$$

Donde Γ es la función gamma.

2.2.8. Potencia Media del Viento

Combinando la potencia del viento con la distribución de Weibull, la potencia media disponible en el sitio se calcula con (13):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (13)$$

donde:

- P_m : potencia media del viento disponible en el área de barrido [W].
- ρ : densidad del aire [kg/m³].
- A : área barrida por el rotor del aerogenerador [m²].
- c : parámetro de escala de la distribución de Weibull [m/s].
- k : parámetro de forma de la distribución de Weibull.
- $\Gamma(\cdot)$: función gamma de Euler, adimensional.

Esta expresión será clave en el análisis experimental para estimar el potencial eólico y compararlo con otras condiciones de altitud [19].

2.2.9. Aerogeneradores de pequeña escala

Los aerogeneradores de pequeña escala son dispositivos diseñados para producir energía eléctrica aprovechando el recurso eólico en comunidades rurales, viviendas aisladas o sistemas híbridos. Se caracterizan por potencias que van desde unos pocos cientos de vatios hasta 100 kW, lo que los convierte en una opción viable para aplicaciones descentralizadas [21].

Estos equipos se instalan generalmente en torres que les permiten alcanzar mayor velocidad de viento y evitar turbulencias cercanas al suelo. Su diseño puede ser de eje horizontal o eje vertical; los primeros son más comunes debido a su mayor eficiencia aerodinámica, mientras que los segundos destacan por su simplicidad y menor necesidad de sistemas de orientación [22].

La selección del aerogenerador depende de variables como la velocidad promedio anual del viento, la topografía del terreno, la densidad del aire y la demanda energética prevista. Además,

la vida útil de estos equipos suele estar entre 15 y 20 años, con un mantenimiento preventivo que incluye la inspección de palas, rodamientos y sistemas eléctricos [19].

2.2.10. Curva de potencia y estimación del potencial eólico

La curva de potencia es la relación funcional entre la velocidad del viento y la potencia eléctrica producida por un aerogenerador en condiciones estandarizadas. Representa la respuesta tecnológica de la máquina y constituye el elemento central para estimar la energía generada a partir del recurso eólico disponible. Para realizar dicha estimación, se combina la curva de potencia con la distribución estadística de las velocidades del viento mediante un método discreto denominado método de la frecuencia de distribución de velocidades [19].

Este método permite calcular la energía anual utilizando datos reales de viento organizados en intervalos (bins), y resulta especialmente adecuado cuando se dispone de mediciones horarias o de alta resolución temporal.

A. Curva de potencia del aerogenerador

La curva de potencia $P_{curve}(v)$ se define habitualmente por tramos (ver figura):

- **Región I:** sin generación para $v < v_{in}$.
- **Región II:** potencia creciente con aproximadamente v^3 , en el intervalo $v_{in} \leq v < v_r$.
- **Región III:** potencia nominal constante entre v_r y v_{out} .
- **Región IV:** desconexión por seguridad para $v > v_{out}$.

El fabricante proporciona esta curva para condiciones estándar (ver Fig. 11), generalmente a densidad del aire $\rho_{ref}=1.225 \text{ kg/m}^3$.

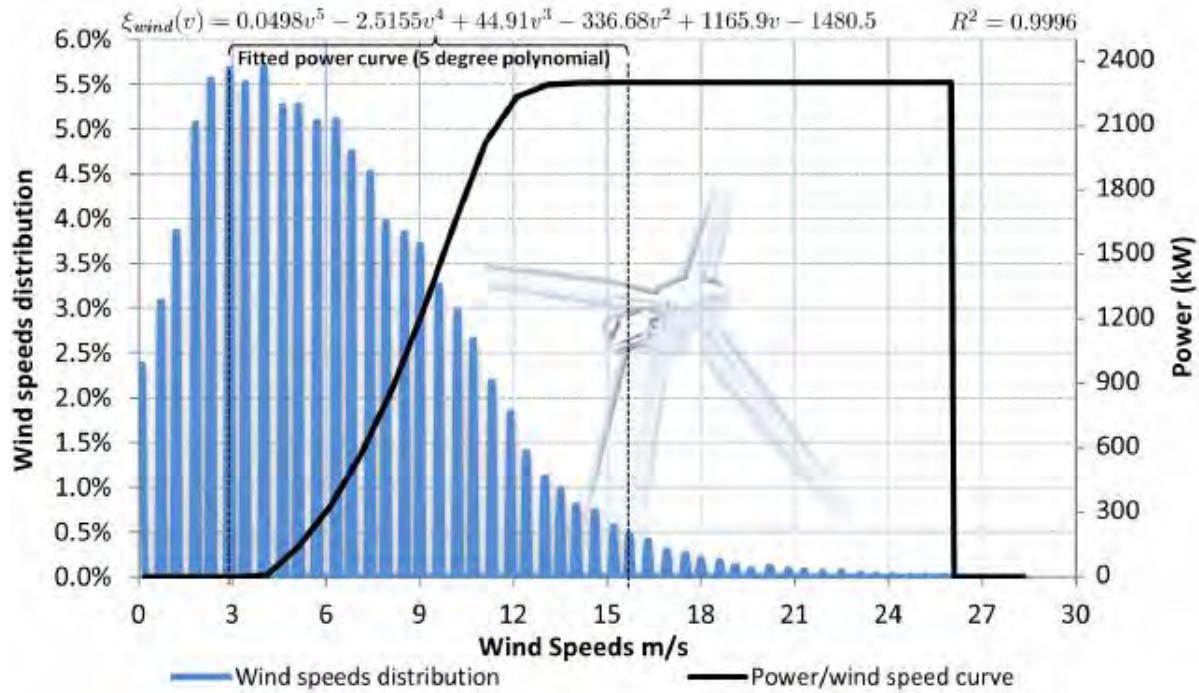


Fig. 11 Curva de potencia de un aerogenerador[23]

B. Corrección de la curva de potencia por densidad del aire

Dado que la potencia aerodinámica es proporcional a la densidad del aire, la curva de potencia debe ajustarse cuando el aerogenerador opera en condiciones de densidad distintas a las de referencia (Hau, 2013). El ajuste se realiza mediante (14):

$$P_{adj}(v) = P_{curve}(v) \cdot \left(\frac{\rho_{sitio}}{\rho_{ref}} \right) \quad (14)$$

donde:

- $P_{adj}(v)$: potencia ajustada.

- $P_{\text{curve}}(v)$: potencia de la curva estándar,
- P_{sitio} : densidad del aire en el sitio de instalación,
- P_{ref} : densidad estándar del fabricante.

C. Método de la frecuencia de distribución de velocidades

El método consiste en agrupar los datos de velocidad del viento en intervalos de anchura Δv , formando un histograma donde cada bin tiene:

- v_i : velocidad representativa del intervalo,
- N_i : número de horas del año en que la velocidad cayó en ese intervalo.

Por definición ecuación (15):

$$\sum_{i=1}^n N_i = 8760 \quad (15)$$

En este contexto, la potencia media generada por el aerogenerador se calcula de forma discreta (16):

$$P_{\text{media}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{sitio}}(v_i) \cdot f_i \quad (16)$$

Donde f_i está definido por (17):

$$f_i = \frac{N_i}{8760} \quad (17)$$

es la fracción de tiempo asociada a cada bin.

D. Energía anual generada

La energía anual se determina con (18) multiplicando la potencia media por el número total de horas del año:

$$E_{\text{anual}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{sitio}}(v_i) \cdot N_i \quad (18)$$

o de forma equivalente (19):

$$E_{\text{anual}} = P_{\text{media}} \cdot 8760 \quad (19)$$

Esta expresión representa la forma estándar utilizada en análisis de producción eólica basados en datos reales.

2.2.11. Bancos de baterías sistemas de gestión (BMS)

Los bancos de baterías cumplen un rol esencial en los sistemas híbridos diésel–eólicos, ya que permiten almacenar la energía excedente generada en los períodos de alta producción eólica, para posteriormente suministrarla en momentos de baja generación o alta demanda. De esta forma, se garantiza la continuidad del servicio eléctrico y se reduce la dependencia del grupo electrógeno diésel [10].

El dimensionamiento de un banco de baterías debe considerar el consumo energético diario, el tiempo de autonomía requerido, la profundidad máxima de descarga (DoD) y la eficiencia de la batería. La capacidad total necesaria del banco se determina mediante (20):

$$C_{\text{bat}} = \frac{E_d \cdot N_{\text{aut}}}{V_{\text{bat}} \cdot \text{DoD} \cdot \eta_{\text{bat}}} \quad (20)$$

donde:

- E_d = energía diaria de consumo [Wh/día]
- N_{aut} = número de días de autonomía [días]
- V_{bat} = voltaje nominal de la batería [V]
- DoD = profundidad de descarga admisible (generalmente 0.5 – 0.8)
- η_{bat} = eficiencia de la batería (0.85 – 0.95)

Para configurar el banco se requiere definir el número de baterías en serie y en paralelo. El número de baterías en serie depende del voltaje total deseado para el banco en (21):

$$N_s = \frac{V_{banco}}{V_{bat}} \quad (21)$$

donde N_s es el número de baterías conectadas en serie, V_{banco} el voltaje total del banco y V_{bat} el voltaje nominal de cada batería.

En paralelo, el número de ramas está dado por la relación (22):

$$N_p = \frac{C_{bat}}{C_{unidad}} \quad (22)$$

donde N_p es el número de ramas en paralelo y C_{unidad} la capacidad de cada batería [Ah].

La energía útil almacenada en el banco se expresa en (23) como:

$$E_{alm} = C_{bat} \cdot V_{bat} \cdot DoD \quad (23)$$

lo que refleja la energía realmente disponible para el sistema, considerando las limitaciones de descarga.

Adicionalmente, el control del estado de carga (SOC) es indispensable para evitar sobrecargas o descargas profundas que deterioren la vida útil. Este se estima mediante (24):

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t - 1) + \frac{(I_{\text{carga}} \cdot \Delta t - I_{\text{descarga}} \cdot \Delta t)}{C_{\text{bat}}} \quad (24)$$

Donde:

- I_{carga} = la corriente de carga [A],
- I_{descarga} = corriente de descarga [A],
- Δt = intervalo de tiempo [h]
- C_{bat} = la capacidad de la batería [Ah].

El sistema de gestión de baterías (BMS, por sus siglas en inglés) se encarga de monitorear parámetros críticos como voltaje, corriente y temperatura de cada celda, así como de equilibrar la carga entre ellas. Su función es garantizar la seguridad, prolongar la vida útil del banco y optimizar la operación del sistema híbrido [24].

2.2.12. Sistemas híbridos Diesel-Eólicos

Los sistemas híbridos de generación eléctrica combinan dos o más tecnologías con el objetivo de garantizar un suministro más confiable y eficiente. En el caso de los sistemas diésel–eólico, se busca aprovechar la energía renovable del viento para reducir el consumo de combustible fósil y al mismo tiempo, mantener la seguridad energética que ofrecen los grupos electrógenos. Estos sistemas son especialmente adecuados para zonas rurales y aisladas, donde la extensión de redes eléctricas resulta costosa o inviable [25].

Principio de funcionamiento

El sistema híbrido puede operar de la siguiente manera:

- Cuando la velocidad del viento es suficiente, el aerogenerador suministra parte o toda la demanda eléctrica.
- Si el viento es bajo o nulo, el grupo electrógeno diésel entra en operación para cubrir la demanda.
- En configuraciones con baterías, el excedente de energía eólica se almacena, y el diésel se utiliza únicamente como respaldo.

De esta manera, se busca reducir el número de horas de funcionamiento del generador diésel, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones contaminantes [8].

2.2.13. Balance de Energía

El balance energético de un sistema híbrido establece que la demanda eléctrica debe ser satisfecha por la suma de las contribuciones del aerogenerador, el grupo diésel y, cuando exista, las baterías de almacenamiento. Esto se expresa de forma simple como (25) [8]:

$$E_{load} = E_{wind} + E_{diesel} + E_{batt} \quad (25)$$

Donde:

- E_{load} = demanda eléctrica total (kWh),
- E_{wind} = energía aportada por el aerogenerador (kWh),

- E_{diesel} = energía aportada por el grupo electrógeno (kWh),
- E_{batt} = energía proveniente de baterías (kWh).

2.2.14. Ahorro de Combustible

El ahorro de combustible puede cuantificarse comparando el consumo específico del sistema híbrido con el de un sistema basado únicamente en diésel. Una forma práctica de expresarlo es mediante la diferencia entre ambos consumos específicos como se muestra en (26) [8].

$$SFC_h = SFC_d - SFC_{hyb} \quad (26)$$

Donde:

- SFC_h = ahorro en consumo específico de combustible (L/kWh),
- SFC_d = consumo específico en sistema diésel puro,
- SFC_{hyb} = consumo específico en sistema híbrido.

2.2.15. Emisiones Evitadas

La reducción de emisiones de CO₂ derivada del uso del sistema híbrido se estima a partir de la diferencia en consumo de combustible entre el escenario diésel puro y el híbrido, multiplicada por un factor de emisión (27) [26]

$$\Delta E_{CO_2} = (FC_d - FC_{hyb}) \cdot FE_{CO_2} \quad (27)$$

Donde:

- ΔE_{CO_2} = reducción de emisiones de CO₂ (kg),
- FC_d = consumo de combustible en sistema diésel puro (L),
- FC_{hyb} = consumo de combustible en sistema híbrido (L),
- FE_{CO_2} = factor de emisión de CO₂ por litro de diésel (= 2.68 kg CO₂ /L, IPCC, 2006).

2.2.16. Nasa Power

NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) es un sistema global de información climática desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (ver Fig. 12) para proporcionar datos atmosféricos y meteorológicos estandarizados para aplicaciones energéticas, agrícolas y de sostenibilidad. Su objetivo principal es ofrecer series temporales confiables basadas en observaciones satelitales y modelos de reanálisis, especialmente en regiones donde no existen estaciones meteorológicas cercanas o donde los registros son discontinuos [27].

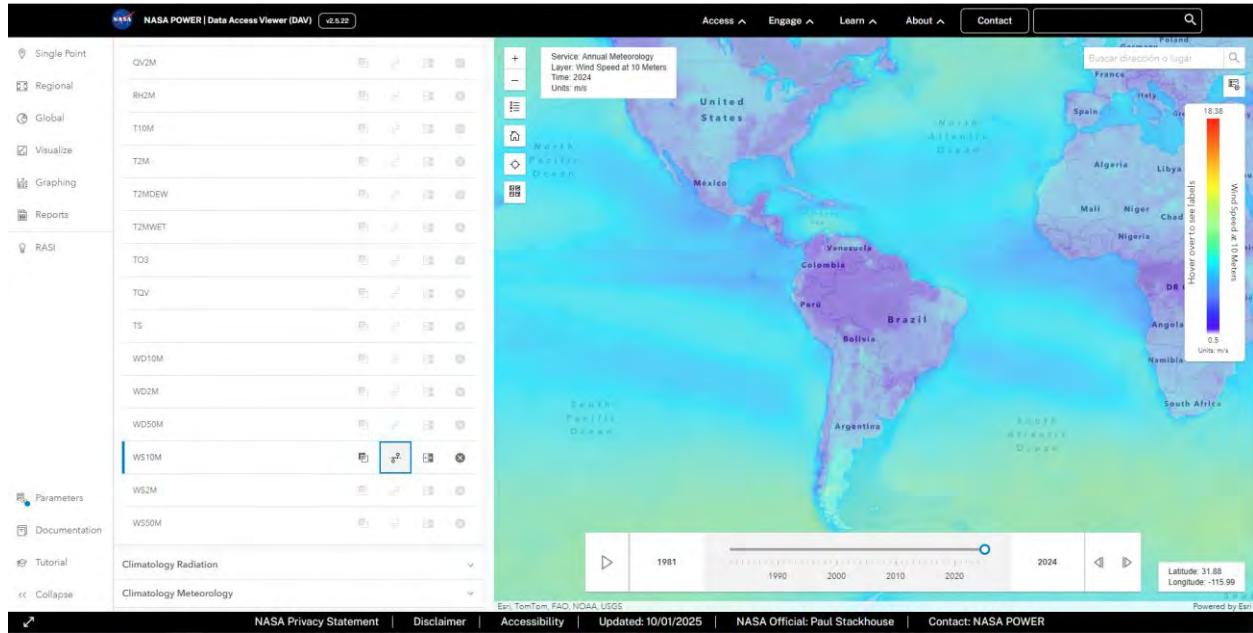


Fig. 12 Portal Nasa Power [27]

A. Origen y fundamentos del sistema

Los datos del portal POWER se generan a partir del conjunto de modelos MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications), el cual integra observaciones satelitales del sistema EOS (Earth Observing System) mediante un modelo de circulación global. De esta forma, POWER produce estimaciones homogéneas y continuas de variables atmosféricas con cobertura mundial.

B. Resolución espacial y temporal

- Resolución espacial: aproximadamente $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, equivalente a 50 km en latitudes medias.
- Resolución temporal: series horarias, diarias o mensuales, según la variable.

- Cobertura temporal: desde 1984 hasta el presente.

Esta resolución permite obtener datos representativos para estudios energéticos cuando no se dispone de mediciones in situ, aunque se reconoce que no reemplazan la precisión de una estación local.

C. Variables disponibles relevantes para energía eólica

NASA POWER proporciona las siguientes variables útiles en el análisis del recurso eólico:

- Velocidad del viento a 2 m y 10 m
- Temperatura del aire
- Presión atmosférica
- Radiación solar (para estudios híbridos)
- Humedad relativa
- Densidad del aire (derivable a partir de T y p)

Estas variables permiten el cálculo de la distribución de velocidades, la extrapolación vertical mediante la ley de potencia y la estimación de la densidad del aire utilizada en la corrección de la curva de potencia.

D. Fuentes de incertidumbre y limitaciones

Aunque NASA POWER es ampliamente utilizado en investigaciones energéticas, presenta las siguientes limitaciones técnicas:

- Resolución espacial moderada: puede no capturar efectos orográficos locales como aceleración en crestas o canalización del viento.

- Suavización del terreno: los modelos interpolan sobre topografía general, reduciendo la variabilidad espacial.
- Incertidumbre en zonas montañosas: los modelos atmosféricos presentan mayores errores en regiones complejas, donde la estabilidad y los flujos locales son intensos.

Por estos motivos, es recomendable utilizar estos datos en conjunto con ajustes estadísticos o comparaciones con estaciones cercanas cuando sea posible.

E. Justificación de su uso en estudios energéticos

En ausencia de estaciones meteorológicas locales o cuando la distancia entre el sitio de estudio y las estaciones disponibles es considerable, NASA POWER constituye una alternativa válida y aceptada por la literatura técnica para el análisis de recurso eólico. Su consistencia temporal, disponibilidad gratuita y validación internacional lo convierten en una fuente adecuada para la estimación inicial de parámetros como el perfil de viento, la distribución de Weibull y el cálculo del potencial energético [27].

2.2.17. Homer Pro

HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) es un software especializado para el análisis, diseño y optimización de sistemas energéticos híbridos (ver Fig.13). Fue desarrollado inicialmente por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) y posteriormente ampliado por HOMER Energy LLC con el propósito de facilitar la evaluación técnica y económica de combinaciones de tecnologías en microredes aisladas, conectadas y sistemas distribuidos [28].

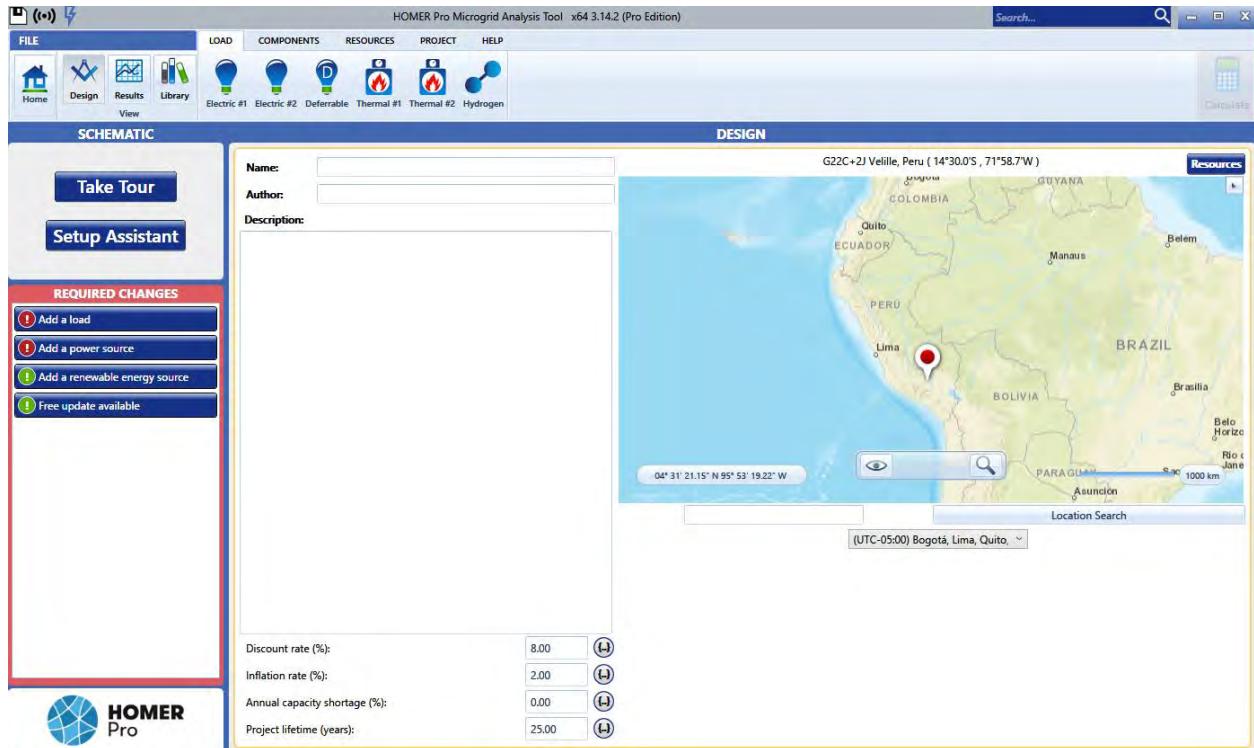


Fig. 13 Software HOMER PRO

El modelo se basa en tres componentes principales:

A. Simulación horaria

HOMER Pro resuelve el balance energético en intervalos de una hora durante un año, considerando:

- recursos renovables (viento, radiación),
- demanda eléctrica,
- reglas de operación,
- rendimiento de cada componente.

Para aerogeneradores, el software utiliza la curva de potencia del fabricante, corrige automáticamente por densidad del aire o altitud, y calcula la energía entregada en cada intervalo.

B. Optimización

Evalúa múltiples combinaciones posibles (diésel, baterías, aerogenerador, inversores) y determina las configuraciones técnicamente factibles. Para cada una calcula:

- Costo Presente Neto (NPC),
- Costo Nivelado de Energía (LCOE),
- fracción renovable y consumo de combustible.

C. Análisis de sensibilidad

Permite analizar cómo cambian los resultados ante variaciones del recurso eólico, precios de combustible o costos de equipos, lo cual mejora la robustez del diseño final.

Esta herramienta es ampliamente utilizada en el diseño de microredes y sistemas híbridos diésel-renovables debido a su capacidad para combinar operación horaria, análisis económico y comparación sistemática de alternativas tecnológicas.

2.2.18. Normativa y Políticas Energéticas en el Perú

La contaminación ambiental es un problema cada vez más notorio en la calidad del medio ambiente originando climas extremos en diversos lugares del mundo, en Perú se logra apreciar estos cambios a simple vista como por ejemplo el deshielo de los glaciares a través de los años como se muestra en el estudio desarrollado por el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN) en 2023 donde se muestra un preocupante proyección de desaparición de cordilleras

nevadas en el territorio peruano como se observa en la Fig. 14, el calentamiento global es producido en su mayoría por dióxido de carbono (CO₂) resultado de la quema de combustibles fósiles como el diésel en los grupos electrógenos (Peirano et al., 2023).

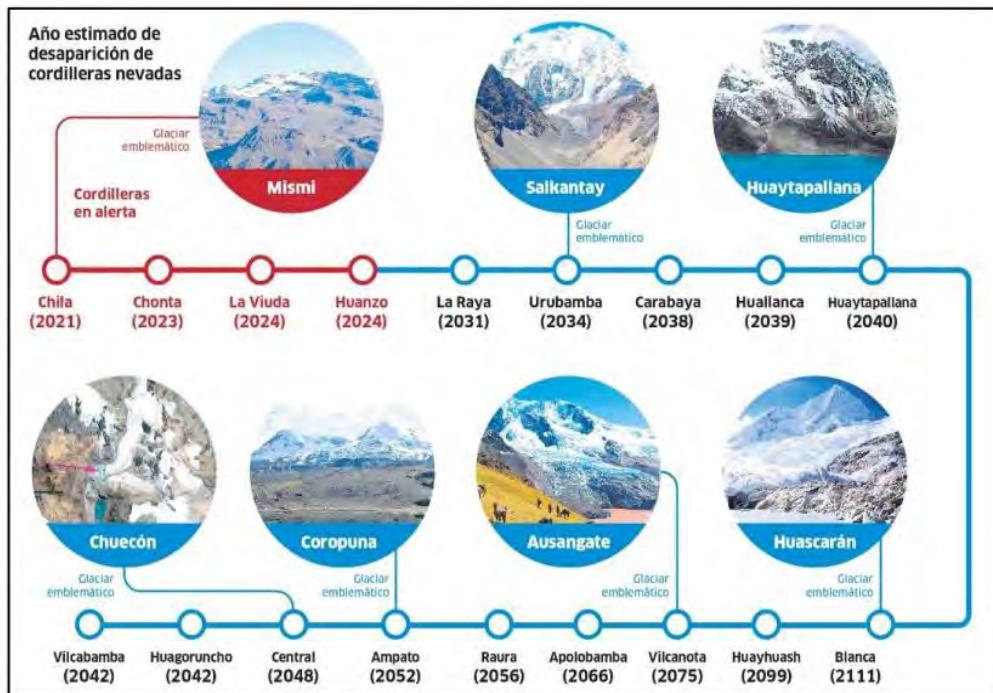


Fig. 14 Estimación de desaparición de nevados en Perú [29]

El Perú ha venido impulsando un marco normativo orientado a diversificar su matriz energética y fomentar el uso de energías renovables no convencionales. La Ley de Promoción de la Inversión en Energías Renovables (Ley N.^o 1002, 2008) establece mecanismos para incentivar proyectos de energía eólica, solar, biomasa y pequeñas hidroeléctricas. A partir de esta ley se han realizado varias subastas de Recursos Energéticos Renovables (RER), que han permitido instalar parques eólicos en las regiones de Ica, La Libertad y Piura, demostrando el potencial del país en este sector [31].

En el plano ambiental, el Perú es signatario del Acuerdo de París (2015) y ha presentado sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), comprometiéndose a reducir en un 40% sus emisiones de gases de efecto invernadero al 2030 respecto al escenario tendencial. Estas metas incluyen medidas en el sector energía, donde el reemplazo de combustibles fósiles por tecnologías limpias juega un papel central [32].

El Plan Energético Nacional 2014–2025 también plantea la necesidad de fortalecer los sistemas eléctricos aislados mediante soluciones híbridas, en especial en la Amazonía y zonas rurales de la sierra. Estas propuestas buscan garantizar el acceso universal a la energía, en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible N.º 7 (ODS-7) de Naciones Unidas: “Energía asequible y no contaminante” [33].

En términos técnicos, los Estándares de Emisión para Motores de Combustión Interna (Decreto Supremo N.º 010-2017-MINAM) fijan límites máximos permisibles de contaminantes como material particulado, óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO). El uso de sistemas híbridos diésel–eólico contribuye a que los motores trabajen menos horas, disminuyendo el riesgo de superar estos límites.

De esta manera, proyectos de microgeneración híbrida en zonas altoandinas como Chincheró no solo responden a una necesidad local de acceso a energía, sino que también se alinean con los compromisos internacionales de reducción de emisiones y con las políticas nacionales de diversificación energética y sostenibilidad.

CAPITULO III

3. Recurso Eólico

3.1.Ubicación del sitio de estudio

El presente proyecto se desarrolla en el distrito de Chinchero, provincia de Urubamba, región Cusco, ubicado en la sierra sur del Perú. Las condiciones geográficas, meteorológicas y de recurso eólico son determinantes para el diseño del sistema híbrido diésel–eólico, ya que influyen en la disponibilidad energética y en la eficiencia de los equipos seleccionados.

3.1.1. Ubicación Geográfica de Chinchero

El distrito de Chinchero se localiza a una altitud de 3 754 m s. n. m., el punto de estudio con coordenadas geográficas de 13°22'47.80"S y 72° 2'54.00"O como se muestra en la Fig. 15. Limita al norte con el distrito de Maras, al sur con Anta, al este con Poroy y al oeste con Urubamba. Su topografía es predominantemente montañosa y presenta valles interandinos que generan condiciones particulares de viento y temperatura. Estas características hacen que sea una zona representativa para la evaluación de sistemas de microgeneración en ambientes altoandinos [34], el lugar exacto es:

- País: Perú
- Departamento: Cusco
- Provincia: Urubamba
- Distrito: Chinchero
- Coordenadas: latitud 13°22'47.80"S, longitud 72° 2'54.00"O.

- Altura: 3 754 m s. n. m.

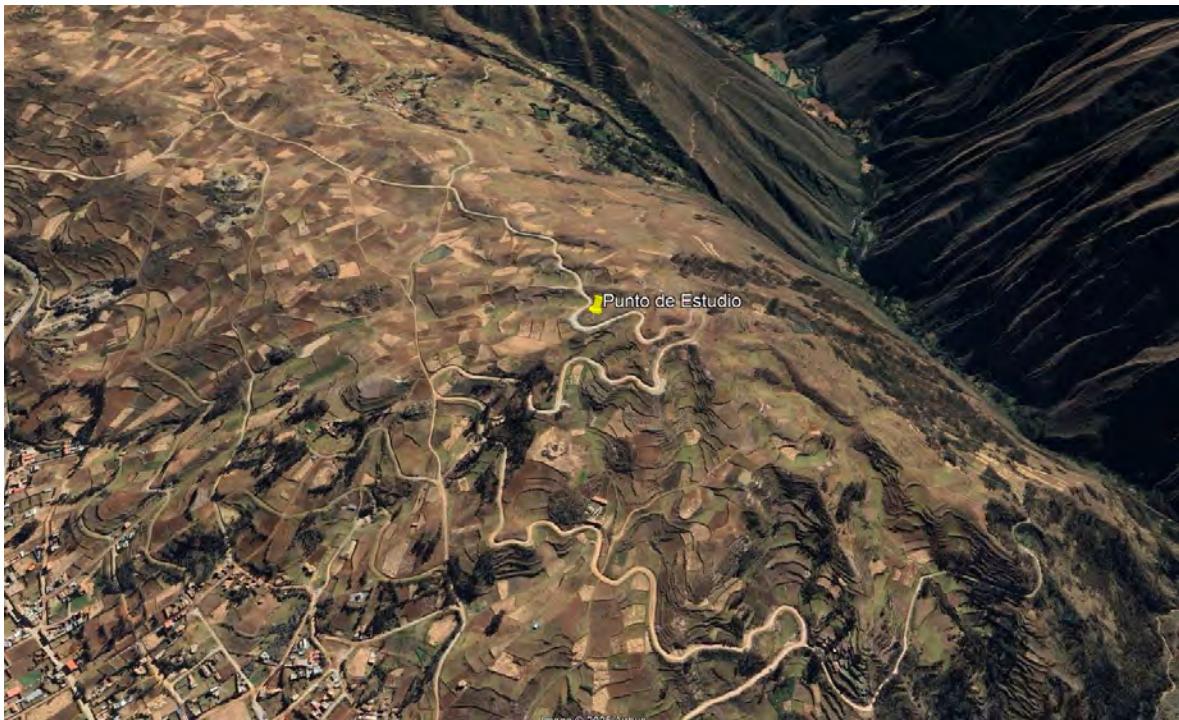


Fig. 15 Punto de estudio en Chinchero

3.1.2. *Condiciones Climáticas y Meteorológica*

Chinchero presenta un clima frío y seco en gran parte del año, con temperaturas promedio anuales cercanas a 9 °C. Durante la temporada de lluvias (noviembre a marzo), las precipitaciones son frecuentes y superan los 700 mm anuales. La humedad relativa oscila entre 60 % y 80 %. [34].

Las condiciones de baja temperatura y menor presión atmosférica afectan la densidad del aire, estimada en aproximadamente 0.84 kg/m³ a la altitud de Chinchero este dato se interpolo con datos iniciales sacados de el atlas eólico del Perú Tabla II, en comparación con 1.225 kg/m³ al nivel del mar [27]. Este factor es crítico, ya que impacta directamente tanto en la combustión de los motores diésel como en la generación eólica.

Tabla II

INTERPOLACIÓN DE DENSIDAD SEGÚN LA ALTURA.

| Altitud (m) | Densidad (kg/m ³) |
|-------------|-------------------------------|
| 3000 | 0.909 |
| 3754 | 0.841 |
| 4000 | 0.819 |

Nota. Datos extraídos del atlas eólico del Perú.[20]

3.1.3. Disponibilidad del Recurso Eólico

Para el presente estudio se utilizaron los datos horarios de velocidad de viento proporcionados por la base NASA POWER para el año 2024, en las coordenadas correspondientes al distrito de Chinchero (latitud: -13.38°, longitud: -72.07°). Se seleccionó la resolución temporal horaria a fin de obtener un mayor nivel de detalle en la variabilidad del recurso eólico.

Si bien la caracterización completa del recurso eólico requiere series temporales de largo plazo, el uso de datos anuales resulta adecuado para predecir la velocidad media del viento en las cuatro estaciones con un nivel de confianza de 90 % [27].

Dado que los datos disponibles en NASA POWER corresponden a la altura de referencia de 10 m, se realizó la extrapolación a la altura de 15 m utilizando la ley de potencia como se muestra en la tabla 3, expresada con la (28) además también se aplicó la fórmula del efecto de Hill-Top (29) como:

$$v(z) = v(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha} \quad (28)$$

$$U_{hill} = U_{\infty}(1 + S) \quad (29)$$

Donde $v(z)$ es la velocidad a la altura deseada z , $v(z_{ref})$ la velocidad a la altura de referencia, y α el exponente de Hellmann. Para el presente análisis se adoptó un valor $\alpha=0.14$, típico de terrenos abiertos de rugosidad media además para Hill-Top se aplicó un factor orográfico de 0.279 por la geometría local como se muestra en la Fig. 16 y los resultados en la Tabla III.

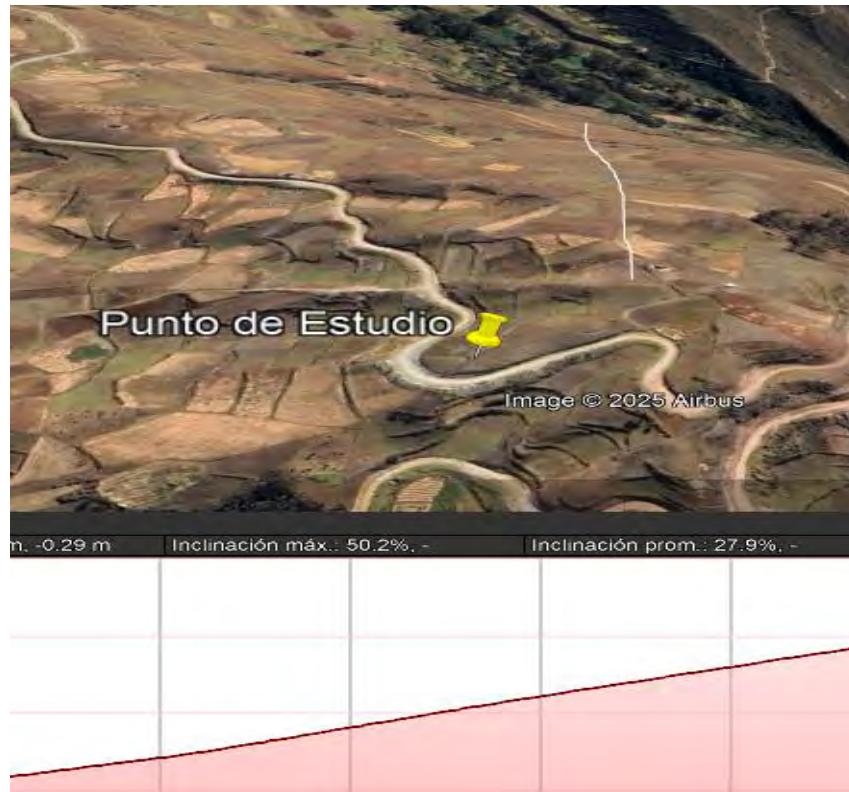


Fig. 16 Factor topográfico del punto de estudio

Tabla III

EXTRAPOLACIÓN VELOCIDAD PROMEDIO VIENTO.

| Mes | Promedio 10m (m/s) | Promedio 15m (m/s) | Promedio 15m + Tophills (m/s) |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| Enero | 2.56 | 2.71 | 3.45 |
| Febrero | 2.52 | 2.67 | 3.41 |
| Marzo | 2.48 | 2.63 | 3.35 |
| Abril | 2.21 | 2.34 | 2.98 |
| Mayo | 2.24 | 2.37 | 3.03 |
| Junio | 2.35 | 2.49 | 3.18 |
| Julio | 2.68 | 2.83 | 3.62 |
| Agosto | 2.88 | 3.05 | 3.89 |
| Septiembre | 3.02 | 3.20 | 4.08 |
| Octubre | 2.90 | 3.07 | 3.91 |
| Noviembre | 2.43 | 2.57 | 3.28 |
| Diciembre | 2.23 | 2.36 | 3.01 |
| Promedio anual | 2.54 | 2.69 | 3.41 |

Nota. la tabla describe la extrapolación promedio mes por mes de la velocidad de viento de 10m/s a 15m/s con efecto top-hill.

Posteriormente se analiza estos datos observando vientos regulares con picos de hasta 10m/s como se observa en la Fig. 17 en todo el año 2024.

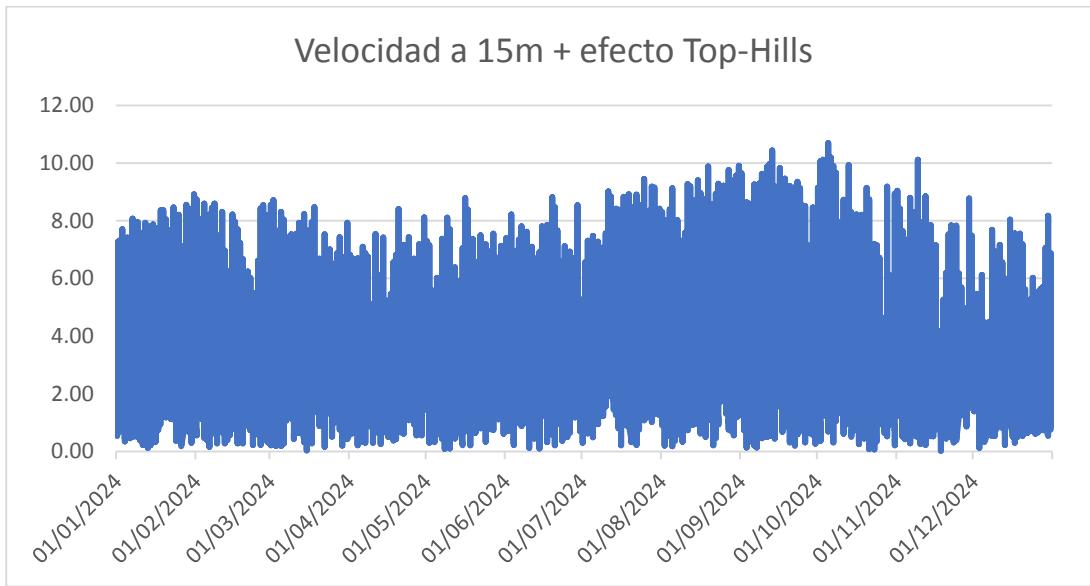


Fig. 17 Grafica de velocidades año 2024

Se analizo también los meses con mayor potencial eólico en el año siendo los meses de julio, Agosto, septiembre y octubre los meses con un mayor promedio de velocidad de viento por lo tanto también serían los meses en los cuales la hay mayor producción de energía eléctrica mediante el aerogenerador como se muestra en la Fig. 18.

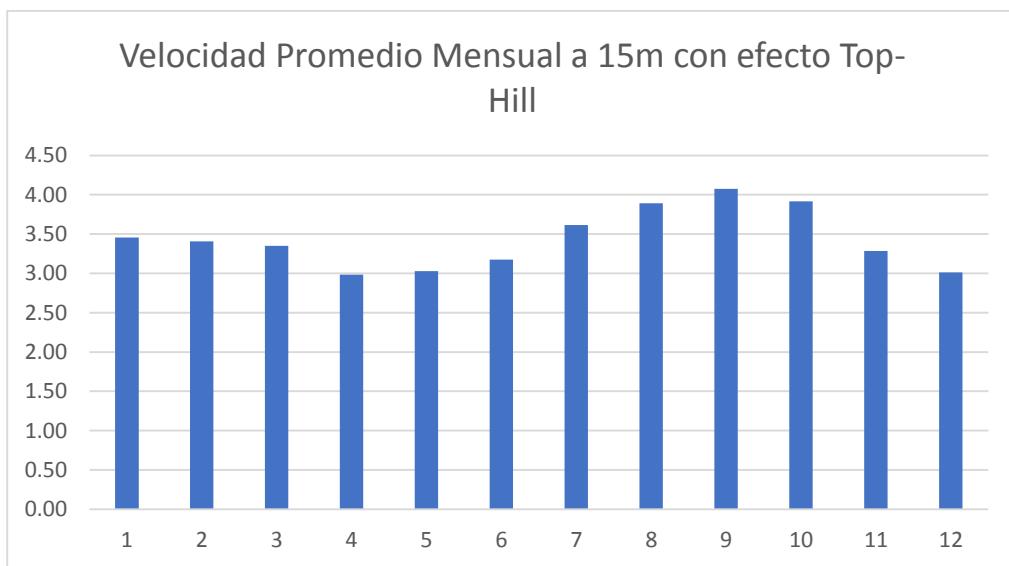


Fig. 18 Velocidad promedio mensual a 15m

Otro punto importante que se observa son las horas promedio del día donde se puede explotar más el recurso eólico mostrando según los datos con una curva de tendencia muy marcada las horas desde las 9 am hasta las 6 pm horas aprovechables de potencial eólico como se muestra en la Fig. 19.



Fig. 19 Horas promedio de velocidad de viento a 15m

Por último, antes de proceder a los cálculos se analizó la dirección del viento para considerar una mejor instalación en la zona de estudio, el análisis muestra tendencia de viento hacia el norte como se muestra en la Fig. 20 esto ayudara a realizar una mejor instalación del aerogenerador para sacar su mejor rendimiento.

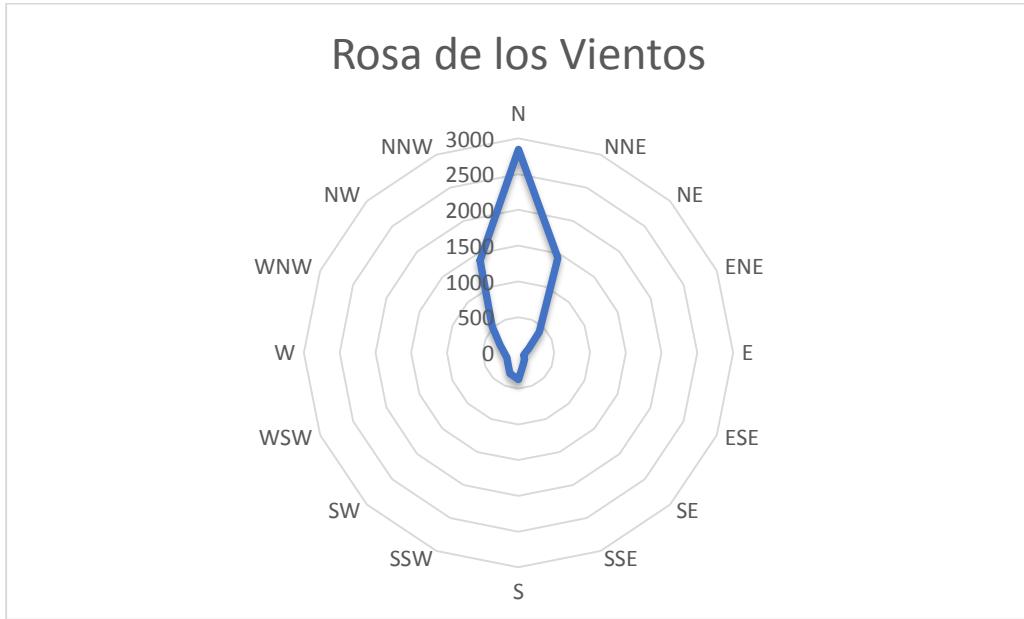


Fig. 20 Rosa de los vientos

El ajuste de los datos a la distribución de Weibull se realizó mediante una rutina de programación desarrollada en MATLAB. El código completo utilizado para el cálculo y la generación de la Fig. 21 se incluye para su revisión en el Anexo A, para los datos de viento a 15m se obtuvieron $k = 1.52$ y $c = 3.82$ m/s. El valor de k refleja una alta variabilidad del recurso, mientras que c indica una velocidad promedio moderada. Estos parámetros describen adecuadamente el comportamiento del viento y sirven de base para evaluar el potencial eólico en la zona.

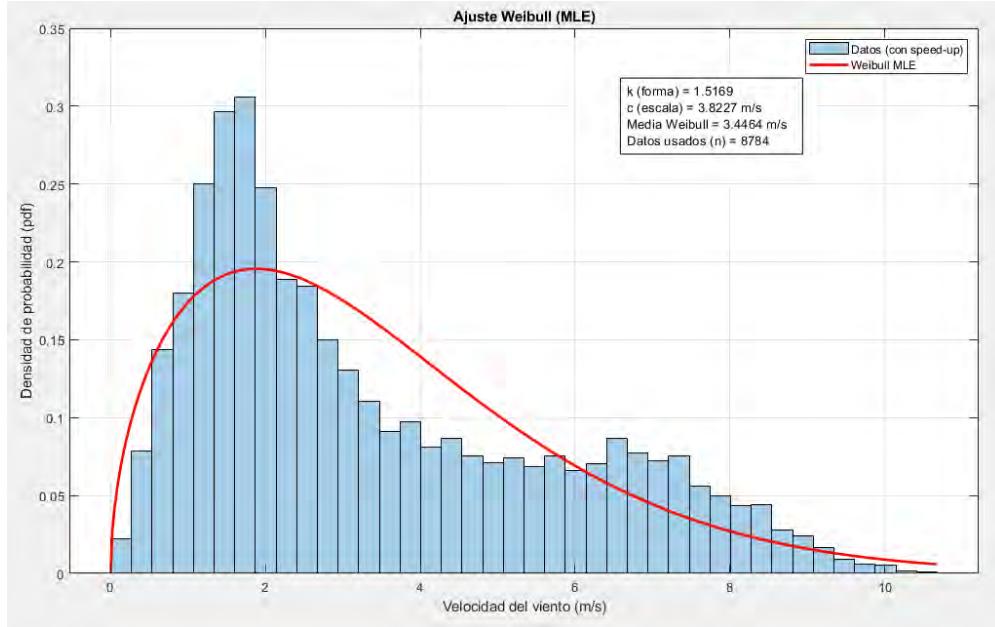


Fig. 21 Histograma de velocidad y ajuste de Weibull

La distribución Weibull se expresa en (30) como:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(\frac{v}{c})^k} \quad (30)$$

La potencia media por unidad de área del viento disponible se calculó mediante (31):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (31)$$

donde ρ corresponde a la densidad del aire (0.84 kg/m^3) y Γ es la función gamma. El valor obtenido fue de 45 W/m^2 , lo que corresponde a una energía anual específica de $395 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$.

CAPITULO IV

4. Demanda Eléctrica del Sistema

La caracterización de la demanda eléctrica constituye un elemento fundamental para el diseño y análisis del sistema híbrido diésel–eólico. En este capítulo se definen los tipos de cargas presentes analizados en varios eco-Lodge cercanos a la zona de estudio, se presenta la lista de equipos básicos seleccionados con sus fichas técnicas, se construye el perfil horario de consumo y se calcula la demanda diaria, mensual y anual. Finalmente, se incluye un análisis de sensibilidad de la demanda, útil para evaluar la robustez del sistema ante variaciones en el uso real.

4.1.Tipos de Carga

Las cargas consideradas en el eco-Lodge se clasifican en tres grupos principales:

4.1.1. Cargas de iluminación

Incluyen luminarias LED de alta eficiencia para interiores y exteriores. Estas presentan bajo consumo, larga vida útil y baja distorsión armónica. Su comportamiento es prácticamente constante durante las horas de uso asignadas.

4.1.2. Cargas de servicios y confort

Comprenden equipos de baja potencia destinados a mejorar la experiencia del usuario, como puntos de carga USB, luminarias de lectura y un ventilador de techo para ventilación natural. Estas cargas operan en horarios determinados y contribuyen con consumos moderados.

4.1.3. *Cargas críticas o permanentes*

El refrigerador tipo *frigobar* constituye la carga continua más importante, debido a su operación a lo largo del día. Adicionalmente, se incluyen consumos en *standby* y pérdidas internas de conversión.

4.1.4. *Cargas comunes*

Se incorpora una bomba eléctrica compartida entre los cuatro Lodges, utilizada para el llenado diario del tanque de agua. Su operación es intermitente, con un tiempo de funcionamiento limitado.

Estas categorías permiten estructurar el análisis energético, definir patrones de uso y elaborar perfiles de carga realistas.

4.2. Lista de Aparatos

La Tabla IV resume los equipos seleccionados para un Lodge, incluyendo potencias, horas de uso y consumos diarios. Se emplearon equipos comercialmente disponibles en Perú, priorizando eficiencia energética y confiabilidad.

Tabla IV
DEMANDA ELÉCTRICA POR LODGE

| Equipo | Potencia (W) | Horas/día | Energía diaria (kWh/día) | Observaciones |
|---|--------------|-----------|--------------------------|-----------------------------------|
| Iluminación interior (4×10 W LED) | 40 | 5 | 0.2 | Luminarias LED estándar |
| Iluminación exterior (1×15 W LED) | 15 | 8 | 0.12 | Encendido nocturno |
| Puntos de carga USB y lectura (2×5 W) | 10 | 3 | 0.03 | Carga de teléfonos y luz auxiliar |
| Ventilador de techo | 50 | 4 | 0.2 | Operación diurna/matutina |
| Refrigerador frigobar Hyundai 88 L | — | — | 0.38 | Consumo certificado: 138 kWh/año |
| Pérdidas y standby | — | — | 0.15 | Conversión, control, standby |
| TOTAL, por Lodge | — | — | 1.08 kWh/día | |

Nota. Se detalla la demanda eléctrica que consume un Lodge por día.

Bomba compartida entre 4 Lodges:

- Potencia: 500 W
- Horas/día: 0.5
- Energía diaria compartida: 0.25 kWh/día

Fuentes de las fichas técnicas utilizadas

- Frigobar Hyundai 88 L – consumo declarado 138 kWh/año.
- Bombas Pedrollo – catálogo técnico oficial (versión doméstica).

- Lámparas LED (Philips, Osram) – catálogos comerciales de luminarias para uso residencial.
- Ventilador de techo (Oster/Imaco) – fichas estándar disponibles en distribuidores locales.

Estas fichas se observan en el ANEXO B del documento.

4.3. Perfil Horario por Equipos

Para elaborar el perfil horario se adoptaron patrones de uso característicos de un eco-Lodge turístico:

- Bajo consumo en la madrugada (00:00–06:00).
- Incremento moderado durante horas de actividad (06:00–10:00).
- Consumo mínimo durante salidas/actividades externas (10:00–14:00).
- Pico de consumo en la tarde-noche (17:00–23:00).

La Tabla V presenta el perfil horario consolidado para los cuatro Lodges.

Tabla V

PERFIL HORARIO DE DEMANDA ELÉCTRICA

| Hora | Energía (kWh/h) |
|-------|-----------------|
| 00–06 | 0.092 |
| 06–10 | 0.184 |
| 10–14 | 0.092 |
| 14–17 | 0.092 |
| 17–23 | 0.368 |
| 23–24 | 0.092 |

Nota. se muestra la estimación de consumo por horas.

Demanda Diaria y Anual

a) Por Lodge

La demanda total de un Lodge es:

$$E_{\text{Lodge}} = 1.08 \text{ kWh/día}$$

b) Para cuatro Lodges

La suma de las cargas más la bomba compartida da:

$$E_{4\text{-lodges}} = 5.52 \text{ kWh/día}$$

c) Energía anual total

$$E_{\text{anual}} = 5.52 \text{ kWh/día} \times 365 = 2015.05 \text{ kWh/año}$$

4.4. Análisis de Sensibilidad de la Demanda

Se aplican escenarios de sensibilidad en la tabla VI para evaluar la robustez del sistema híbrido ante variaciones en:

4.4.1. Aumento de ocupación

- Escenario +20%: mayor uso de iluminación, ventilación y carga USB.
- Escenario +40%: demanda máxima esperada en temporada alta.

4.4.2. Variaciones en el uso del refrigerador

Los refrigeradores pequeños tienden a incrementar consumo ante:

- temperaturas ambientales altas,
- incremento de aperturas de puerta,

- carga interna excesiva.

Estimación: +10 a +25%.

4.4.3. Variación en el uso de la bomba

- Incremento en demanda de agua → más horas de bombeo.
- Escenarios: 0.5 h/d (base), 0.75 h/d (+50%), 1 h/d (pico).

Tabla VI

SÍNTESIS DE SENSIBILIDAD

| Escenario | Energía diaria (kWh/día) | Variación |
|-------------------|--------------------------|-----------|
| Base | 5.52 | 0% |
| +20% uso general | 6.62 | +20% |
| +40% uso general | 7.73 | +40% |
| Bomba +50% | 5.77 | +4.5% |
| Refrigerador +20% | 5.87 | +6.3% |

Nota. Se detalla la sensibilidad estimada de la demanda del sistema.

CAPITULO V

5. Selección y Dimensionamiento del Sistema

El presente capítulo detalla la selección técnica de los componentes del sistema híbrido diésel-eólico, basada en el análisis del recurso eólico (Capítulo III) y la demanda eléctrica (Capítulo IV). La selección prioriza la eficiencia operativa en condiciones de gran altitud, la disponibilidad comercial internacional y la compatibilidad entre componentes, garantizando un diseño técnicamente viable para el distrito de Chinchero.

5.1.Aerogenerador

5.1.1. *Criterios de selección*

La selección del aerogenerador se basa en los siguientes criterios técnicos, derivados del análisis del recurso eólico local:

- Velocidad de arranque (cut-in): $\leq 3.0 \text{ m/s}$, acorde con el análisis de velocidades en Chinchero.
- Potencia nominal: 2-3 kW para cubrir la demanda pico de 1.8 kW con margen de seguridad y capacidad de carga de baterías.
- Robustez y adaptación a altura: Diseño certificado para operar en condiciones de baja densidad del aire (0.84 kg/m^3) y temperaturas bajo cero.
- Voltaje de salida: Preferiblemente AC para compatibilidad con inversores estándar.
- Tecnología de generador: Imanes permanentes (PMG) para alta eficiencia en bajas revoluciones.

- Documentación técnica: Curva de potencia certificada y fichas técnicas disponibles públicamente.

5.1.2. Evaluación de alternativas comerciales

Se evaluaron modelos de la marca Aeolos Wind Energy Ltd. (UK) como se observa en la Tabla VII, cuyas fichas técnicas completas están disponibles (ver ANEXO C):

Tabla VII
COMPARACIÓN DE AEROGENERADORES

| Modelo | Potencia nominal | V. arranque (m/s) | Voltaje salida | Diámetro rotor (m) | Peso (kg) |
|--------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------|
| Aeolos-H 1kW | 1.0 kW | 3.0 | 48 V DC | 3.2 | 60 |
| Aeolos-H 2kW | 2.0 kW | 3.0 | 96 V DC | 4.0 | 125 |
| Aeolos-H 3kW | 3.0 kW | 3.0 | 220-240V AC | 5.0 | 138 |

Nota. Comparación de características técnicas de aerogeneradores Aeolos-H.

Se evaluaron los aerogeneradores Aeolos-H de 1 kW, 2 kW y 3 kW como posibles alternativas para el sistema híbrido propuesto.

El modelo de 1 kW, si bien presenta una velocidad de arranque adecuada (3.0 m/s) y compatibilidad con sistemas de 48 V DC, fue descartado debido a su potencia nominal insuficiente frente a la demanda pico del sistema, estimada en 1.8 kW (Capítulo IV). Su uso limitaría la

capacidad de atender cargas simultáneas y reduciría la flexibilidad operativa para la carga del banco de baterías, comprometiendo la confiabilidad del suministro.

El aerogenerador Aeolos-H de 3 kW, aunque técnicamente capaz de cubrir holgadamente la demanda, fue descartado por resultar sobredimensionado para el perfil de consumo y el recurso eólico caracterizado. Los resultados del análisis energético muestran que este modelo permitiría cubrir prácticamente la totalidad de la demanda anual únicamente con generación eólica, relegando al generador diésel a un rol marginal o inexistente. Esta condición desvirtúa el enfoque de sistema híbrido eólico-diésel, transformándolo en un sistema predominantemente eólico, además de incrementar innecesariamente los costos de inversión y estructura.

En consecuencia, se seleccionó el aerogenerador Aeolos-H de 2 kW, al representar un equilibrio adecuado entre capacidad de generación, demanda del sistema y operación híbrida real. Su potencia nominal permite cubrir la mayor parte del consumo energético, manteniendo al generador diésel como respaldo operativo efectivo, coherente con los objetivos de confiabilidad, optimización económica y reducción del consumo de combustible fósil establecidos en el presente estudio.

5.1.3. *Modelo seleccionado: Aeolos-H 2kW*

El Aerogenerador Aeolos-H 2kW, fabricado por Aeolos Wind Energy Ltd. (Reino Unido) ver Fig. 22, fue seleccionado como modelo de referencia en este diseño por ser una turbina de eje horizontal (HAWT) optimizada para vientos lentos. Esta característica de diseño es fundamental para la viabilidad del proyecto, pues asegura una máxima eficiencia de captura y minimiza la

velocidad de arranque, lo cual es crucial para garantizar una contribución energética significativa en las condiciones de baja velocidad de viento y alta altitud del distrito de Chinchero.

Especificaciones técnicas principales:

- Fabricante: Aeolos Wind Energy Ltd., Londres, Reino Unido
- Modelo: Aeolos-H 2kW
- Potencia nominal: 2,000 W a 10 m/s
- Voltaje de salida: 96 V DC
- Velocidad de arranque: 3.0 m/s (6.7 mph)
- Velocidad de corte: 25 m/s (55.9 mph)
- Velocidad de supervivencia: 45 m/s (100.7 mph)
- Vida de diseño: 25 años
- Peso total: 125 kg (incluye generador y palas)
- Diámetro de rotor: 4.0 m (13.4 ft)
- Tecnología: Generador trifásico de imanes permanentes
- Eficiencia del generador: >96%



Fig. 22 Aerogenerador Aeolos-H 2kW

Cabe señalar que, según el Mapa Eólico del Perú [35] (Anexo 6.3.1) ver Fig.23, la zona de Cusco presenta velocidades de viento extremas de hasta 65 km/h (18.1 m/s), valor que se encuentra muy por debajo de los límites de operación y supervivencia del equipo seleccionado, garantizando su seguridad estructural.



Fig. 23 Velocidades Extremas de Viento [35]

5.1.4. Curva de potencia y ajuste por densidad

La curva de potencia proporcionada por el fabricante (Fig. 24) tomada con densidad 1.225 kg/m³ se ajustó por la densidad del aire en Chinchorro (0.84 kg/m³) mediante (32):

$$P_{\text{ajust}} = P_{\text{std}} \times \frac{\rho_{\text{Chinchero}}}{\rho_{\text{std}}} \quad (32)$$

Donde el factor de escala dio como resultado 0.686 entonces:

$$P_{\text{ajust}} = P_{\text{std}} \times 0.686$$

Teniendo este factor se procede a calcular la nueva curva de potencia Tabla VIII.



Fig. 24 Curva de Potencia Aeolos-H 2kW[36]

Tabla VIII
TABLA DE POTENCIA AJUSTADA

| Velocidad (m/s) | Potencia estándar (W) | Potencia ajustada (W) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1.0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 35 | 24 |
| 4.0 | 90 | 62 |
| 5.0 | 200 | 137 |
| 6.0 | 365 | 250 |
| 7.0 | 600 | 412 |
| 8.0 | 930 | 638 |
| 9.0 | 1,380 | 947 |
| 10.0 | 1,890 | 1,297 |
| 11.0+ | 2,000 | 1,372 |

Nota. variación de potencia producida del aerogenerador con el factor de corrección de 0.686 generando nuevos valores de potencia [36].

5.1.5. Producción energética estimada

El análisis con datos horarios NASA POWER 2024 (8,784 datos) mediante integración directa de la curva ajustada arroja producción anual estimada: 3,668 kWh la cual se detalla en la Tabla IX.

Tabla IX

DISTRIBUCIÓN DETALLADA DE LA PRODUCCIÓN EÓLICA

| Bin (m/s) | Horas | % tiempo | P (W) | Energía (kWh) |
|------------------|--------------|-----------------|--------------|----------------------|
| 0-1 | 879 | 10.0% | 0 | 0 |
| 1-2 | 2431 | 27.7% | 0 | 0 |
| 2-3 | 1569 | 17.9% | 5 | 8 |
| 3-4 | 934 | 10.6% | 42 | 39 |
| 4-5 | 700 | 8.0% | 99 | 69 |
| 5-6 | 624 | 7.1% | 195 | 122 |
| 6-7 | 655 | 7.5% | 333 | 218 |
| 7-8 | 566 | 6.4% | 512 | 290 |
| 8-9 | 316 | 3.6% | 769 | 243 |
| 9-10 | 101 | 1.1% | 1077 | 109 |
| 10-11 | 9 | 0.1% | 1330 | 12 |
| TOTAL | 8784 | 100.0% | | 1109 |

Nota. se muestra la producción anual que genera el aerogenerador Aeolos-H 2kW calculado mediante sumatoria de horas de producción con la curva de potencia,

La producción energética anual estimada del aerogenerador Aeolos-H 2kW, una vez ajustada por la altitud, es de 1,109 kWh. Al contrastar esta cifra con la demanda anual total de los Lodges 2,015kWh, se determina que el componente eólico es capaz de cubrir el 55.0% de la energía requerida. Este resultado, que arroja que se requiere complemento diésel para cubrir 906kWh/año lo cual minimiza las horas de funcionamiento y el consumo de combustible del generador diésel.

5.2.Baterías

5.2.1. *Criterios de dimensionamiento*

Para el dimensionamiento del banco de baterías se basa en los siguientes criterios técnicos:

- Autonomía: Capacidad para suministrar energía durante períodos sin generación eólica.
- Profundidad de descarga (DoD): Límite máximo de descarga para garantizar vida útil.
- Voltaje del sistema: Compatibilidad con inversor y controladores.
- Tecnología: Balance entre costo, vida útil y desempeño en altura.
- Temperatura de operación: Adaptación a condiciones frías de Chinchero (0-15°C).

5.2.2. Evaluación de tecnologías disponibles

Para el punto de baterías se analizó las tecnologías disponibles en el mercado actual como se muestra en la tabla X.

Tabla X
CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS

| Tecnología | DoD | Ciclos | Eficiencia | Temperatura |
|----------------------|-----|--------|------------|--------------|
| LiFePO ₄ | 85% | >6,000 | 95% | -20°C a 60°C |
| NMC Li-ion | 80% | 4,000 | 95% | 0°C a 45°C |
| Plomo-Ácido AGM | 50% | 1,200 | 85% | 20°C a 25°C |
| Plomo-Ácido inundado | 50% | 800 | 80% | 20°C a 25°C |

Nota. se observa las características técnicas de las baterías.[37]

La selección de la tecnología Litio-Hierro-Fosfato (LiFePO₄) se justifica por ser la solución óptima para el emplazamiento en altura de Chinchero. Esta tecnología ofrece una superior tolerancia a las bajas temperaturas y permite una Profundidad de Descarga (DoD) de hasta el 85%, lo cual es crucial para reducir la capacidad instalada además del costo inicial frente a alternativas como el plomo-ácido. Adicionalmente, las baterías LiFePO₄ garantizan una larga vida útil (más de

6,000 ciclos) y requieren un mantenimiento nulo, simplificando la operación del sistema a largo plazo.

5.2.3. *Modelo seleccionado: Felicity Solar 15kWh 48V LPBF48300*

La selección del sistema de almacenamiento de energía se basa en el módulo LPBF48300 del fabricante Felicity Solar, empresa con amplia presencia en el mercado de soluciones de almacenamiento con tecnología de Litio-Hierro-Fosfato (LiFePO₄) para aplicaciones estacionarias.

El modelo LPBF48300 es una batería de alta capacidad energética (15 kWh) que opera a un voltaje nominal de 51.2 V DC (ver Fig. 25), diseñada específicamente para sistemas aislados e híbridos. Su elevada densidad energética permite reducir el número de módulos requeridos, simplificando la configuración del banco de baterías y disminuyendo los costos asociados a cableado, protecciones e instalación.

Este sistema incorpora un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) integrado, que garantiza una operación segura mediante protección contra sobrecarga, sobredescarga, sobrecorriente y temperatura, además de permitir la comunicación directa con inversores híbridos a través de los protocolos CAN y RS485. Estas características aseguran una operación eficiente y confiable dentro del sistema diésel-eólico propuesto.

Asimismo, la elevada profundidad de descarga admisible (hasta 95 %) y su vida útil superior a 6 000 ciclos convierten al LPBF48300 en una solución adecuada para aplicaciones de operación continua, contribuyendo a maximizar el aprovechamiento del recurso eólico y a reducir la dependencia del generador diésel a lo largo de la vida útil del sistema (ver ANEXO C):

- Tecnología: Litio-Hierro-Fosfato (LiFePO₄)
- Voltaje nominal: 51.2 V DC
- Rango de voltaje de operación: 48 – 57.6 V DC
- Capacidad energética total: 15 kWh
- Profundidad de descarga (DoD): hasta 95 %
- Vida útil: $\geq 6\,000$ ciclos (a 25 °C, 80 % DoD)
- Corriente recomendada de carga/descarga: 120 A
- Corriente máxima de carga/descarga (15 s): 200 A
- Comunicación: CAN y RS485
- Sistema de protección: BMS integrado, fusible y breaker
- Rango de temperatura de operación (descarga): -20 °C a 60 °C
- Rango de temperatura de operación (carga): 0 °C a 55 °C
- Configuración: Hasta 6 módulos en paralelo



Fig. 25 Batería LPBF48300[38]

5.2.4. Cálculo según norma IEEE 1562

El dimensionamiento de la capacidad de almacenamiento se fundamenta en la demanda diaria de diseño y en el principio de autonomía para asegurar la estabilidad del sistema híbrido. Se seleccionó una autonomía de 2 días según norma IEEE 1562 que denomina esta autonomía como óptima para confiabilidad, siguiendo las prácticas de diseño para sistemas aislados. Al utilizar tecnología LiFePO₄, se establece una profundidad de descarga máxima (DoDmax) del 85% para maximizar el ciclo de vida. El cálculo final de la capacidad requerida se ajusta por la eficiencia combinada de todos los componentes del sistema.

El cálculo de eficiencia (33) total del sistema se realiza de la siguiente forma:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{bat}} \times \eta_{\text{inv}} \times \eta_{\text{cable}} \quad (33)$$

Donde:

η_{total} = eficiencia total

η_{bat} = eficiencia de la batería 0.95

η_{inv} = eficiencia del inversor 0.94

η_{cable} = eficiencia del cable. 0.98

Reemplazando valores y operando se obtiene:

$$\eta_{\text{total}} = 0.95 \times 0.94 \times 0.98 = 0.875 \text{ (87.5%)}$$

Una vez obtenida la eficiencia se realiza el cálculo de capacidad requerida en kWh de la siguiente manera:

$$C_{\text{kWh}} = \frac{E_d \times N_d}{\text{DoD}_{\text{max}} \times \eta_{\text{total}}}$$

Donde:

C_{kWh} = Capacidad requerida.

E_d = demanda diaria 5.52kWh/día (capítulo IV).

N_d = días de autonomía 2 días.

DoD_{max} = profundidad de descarga máxima 0.85

η_{total} = eficiencia del sistema.

Entonces:

$$C_{\text{kWh}} = \frac{E_d \times N_d}{\text{DoD} \times \eta_{\text{total}}} = \frac{5.52 \times 2.0}{0.85 \times 0.875} = \frac{11.04}{0.74375} = 14.84 \text{ kWh}$$

Dado que se selecciona un voltaje de bus DC de 48 V para minimizar las pérdidas en el sistema, la capacidad de la batería se convierte a Amperios-hora (C_{Ah}).

$$C_{\text{Ah}} = \frac{C_{\text{kWh}} \times 1000}{V_{\text{sistema}}} = \frac{14.84 \text{ kWh} \times 1000}{48 \text{ V}} = 309.17 \text{ Ah}$$

Teniendo estos datos se procede a calcular el número de baterías a usar de la siguiente manera la capacidad unitaria es 48V multiplicada por 100Ah nos da un total de 4.8 kWh entonces:

$$\frac{14.84 \text{ kWh}}{15 \text{ kWh/unidad}} = 0.98 \Rightarrow 1 \text{ unidades}$$

La capacidad total sería de 1 unidad dando un total de 15 kWh cumpliendo a la capacidad requerida.

Por último, la configuración será en paralelo para mantener los 48 V DC y dándonos una autonomía total de 2 días cumpliendo con la norma IEEE 1562 esto garantiza días consecutivos sin viento común en junio y julio según el análisis eólico en chincher.

5.3.Sistema de Control y Conversión

El sistema de control y conversión constituye el núcleo inteligente del sistema híbrido, integrando las tres fuentes de energía mediante electrónica de potencia avanzada. Su diseño prioriza la eficiencia de conversión, la gestión automática de fuentes y la protección integral del sistema.

5.3.1. Arquitectura de integración

La arquitectura adoptada se basa en un bus de corriente continua (DC) a 48V, donde convergen todas las fuentes de generación antes de su conversión a corriente alterna (AC). Esta configuración centralizada, ilustrada en la Fig. 25, permite un control unificado y minimiza las pérdidas por conversión múltiple.

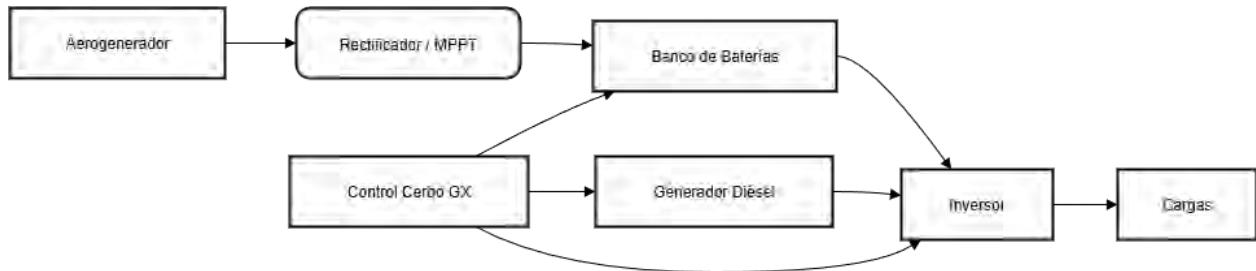


Fig. 26 Esquema de integración

5.3.2. Selección del inversor-cargador

El inversor-cargador es el componente encargado de convertir la energía almacenada en el banco de baterías (48V DC) en corriente alterna (AC) de 220V para alimentar las cargas del Lodge, además de gestionar la recarga de las baterías desde las fuentes de generación disponibles. Su selección se basa en los siguientes criterios técnicos:

- Compatibilidad con el bus DC: Voltaje de entrada nominal de 48V DC.
- Potencia nominal continua: Debe cubrir la demanda máxima simultánea estimada en 1,465 W (Capítulo IV), incluyendo la bomba de agua en operación continua.

- Capacidad de pico (surge): Debe soportar los picos de arranque de cargas inductivas, principalmente la bomba de agua de 500 W, cuyo arranque puede alcanzar 3–5 veces su potencia nominal.
- Integración con baterías LiFePO₄: Comunicación nativa mediante protocolo CAN-bus para gestión del estado de carga (SOC) y protección de ciclo de vida.
- Entradas de recarga múltiples: Capacidad para recibir energía desde el aerogenerador (vía rectificador externo o entrada AC) y desde el generador diésel (entrada AC auxiliar).

De acuerdo con estos criterios, se selecciona el modelo Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 (Fig. 27), cuyas especificaciones técnicas se resumen en la Tabla XI (ver ANEXO C).



Fig. 27 Inversor-cargador Victron Multiplus-II 48/3000/35-32 [39]

Tabla XI

ESPECIFICACIONES VICTRON MULTIPLUS-II 48/3000/35-32

| Parámetro | Valor | Unidad |
|------------------------------------|-----------------|--------|
| Potencia aparente nominal | 3,000 | VA |
| Potencia activa continua (a 25°C) | 2,400 | W |
| Potencia de pico (30 s) | 6,000 | VA |
| Voltaje de entrada DC | 38 – 66 | V |
| Voltaje de salida AC | 220 – 240 | V |
| Frecuencia de salida | 50 | Hz |
| Cargador de batería integrado | 35 | A |
| Eficiencia máxima (inversor) | 95 | % |
| Comunicación con BMS | CAN-bus | – |
| Peso aproximado | 19 | kg |
| Dimensiones (alto × ancho × fondo) | 499 × 268 × 141 | mm |

Nota: Datos técnicos extraídos del manual del fabricante Victron Energy [39].

La potencia de pico de 6,000 VA (4,8 kW) garantiza el arranque seguro de la bomba de agua sin necesidad de incorporar un arrancador suave externo, simplificando la instalación y reduciendo costos adicionales. El cargador integrado de 35 A (1.68 kW a 48V) permite una recarga rápida del banco de baterías desde el generador diésel en períodos de baja generación eólica.

5.3.3. *Controlador de carga*

Se requiere un controlador de carga que rectifique esta energía a DC y regule su transferencia al banco de baterías. Se selecciona el controlador híbrido Victron SmartSolar MPPT 250/100 (Fig. 28), cuyas características principales incluyen (ver ANEXO C):

- Entrada máxima de voltaje: 250V DC o AC rectificada.
- Corriente de carga máxima: 100 A a 48V.

- Tecnología MPPT (Maximum Power Point Tracking) para maximizar la captura de energía eólica.
- Comunicación integrada con el inversor-cargador MultiPlus-II vía VE. Can.

La potencia máxima manejable por este controlador es 4.8 kW valor que supera la potencia ajustada del aerogenerador (2,058 W), asegurando un margen de operación seguro.



Fig. 28 Controlador SmartSolar MPPT 250V 100 A [40]

5.3.4. Sistema de monitorización y gestión (BMS)

La comunicación entre el inversor-cargador, el controlador MPPT y la batería LPBF48300 se realiza mediante el protocolo CAN-bus, permitiendo una gestión coordinada que incluye (ver ANEXO C):

- Balance de carga/descarga en tiempo real.

- Limitación de corriente según el estado de salud (SOH) de las baterías.
- Protección contra sobredescarga (<10% SOC) y sobrecarga (>90% SOC).
- Registro de datos operativos para mantenimiento predictivo.

La supervisión remota se implementa mediante el dispositivo Victron GX (Cerbo GX) (Fig. 29), que centraliza la información de todos los componentes y permite su visualización en la plataforma Victron Remote Management (VRM).



Fig. 29 Monitorización Cerbo GX [41]

5.3.5. Panel de distribución y protecciones eléctricas

Para garantizar la seguridad operativa del sistema, se incorpora un panel de distribución CC/CA (Fig. 30) que integra:

- Interruptor principal DC: 250 A, 48V.
- Interruptores automáticos DC: para aerogenerador (80 A), baterías (150 A), e inversor (125 A).

- Interruptores automáticos AC: para salidas del inversor (16 A) y entrada del generador diésel (32 A).
- Protector contra sobretensiones (SPD): en entrada AC y DC.
- Relevador de transferencia automática (ATS): integrado en el MultiPlus-II, que conmuta entre inversor y generador en caso de fallo.



Fig. 30 Panel de distribución

5.3.6. Resumen de componentes seleccionados

La Tabla XII presenta la lista consolidada de componentes del sistema de control y conversión:

Tabla XII
COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL Y CONVERSIÓN

| Componente | Modelo | Especificación clave | Función |
|-------------------------------|---|--------------------------------|---|
| Inversor-cargador | Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 | 3,000 VA, 35 A cargador | Conversión DC/AC, gestión de fuentes |
| Controlador de carga | Victron SmartSolar MPPT 250/100 | 100 A, 250 V max | Regulación de carga desde aerogenerador |
| Dispositivo de monitorización | Victron Cerbo GX | Pantalla táctil, VRM integrado | Supervisión y registro de datos |
| Baterías (x4) | LPBF48300 | 15 kWh | Almacenamiento energético |
| Interruptor principal DC | Victron Lynx Power In | 250 A, con shunt integrado | Distribución y medición DC |
| Panel de distribución | Caja IP65, breakers DC/CA | Personalizado | Protecciones y distribución eléctrica |
| Cableado y conectores | Solar cable 35 mm ² , conectores MC4 | Certificado UV/resistente | Interconexión de componentes |

Nota: Todos los componentes seleccionados son compatibles entre sí vía comunicación CAN-bus/VE.Can.

Esta configuración asegura una operación estable, maximiza el uso de energía renovable y minimiza las horas de funcionamiento del generador diésel, cumpliendo con los objetivos técnicos y ambientales planteados en el Capítulo I.

5.4. Grupo electrógeno diésel

5.4.1. Criterios de selección

La selección del grupo electrógeno diésel se basa en los siguientes criterios técnicos y operativos:

- Potencia corregida por altitud: Debe compensar la reducción de densidad del aire a 3,754 m.s.n.m. según la norma ISO 3046.
- Compatibilidad con el inversor-cargador Victron: Debe poder sincronizarse con el MultiPlus-II 48/3000/35-32 para operación en paralelo y carga de baterías mediante la entrada AC auxiliar.
- Capacidad de suministro en modo híbrido: Debe aportar energía suficiente para recargar el banco de baterías y eventualmente alimentar cargas AC simultáneas, considerando el apoyo de las baterías a través de la función PowerAssist del inversor.

5.4.2. Modelo seleccionado: *Hyundai DHY4000SE*

Se selecciona el generador diésel Hyundai DHY4000SE (ver Fig. 31) (3.5 kW nominales a nivel del mar), cuyas características técnicas se resumen en la Tabla XIII (ver ANEXO C).

Tabla XIII
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERADOR DHY4000SE

| Parámetro | Valor | Unidad |
|--------------------------------------|------------------|--------|
| Potencia nominal (nivel del mar) | 3.5 | kW |
| Potencia aparente (kVA) | 4.0 | kVA |
| Método de arranque | Manual/Eléctrico | - |
| Voltaje de salida | 220 | V |
| Frecuencia | 50/60 | Hz |
| Tipo de motor | Diésel | - |
| Capacidad de tanque | 12 | L |
| Consumo específico (SFC) a 75% carga | 0.45 | L/kWh |
| Nivel de ruido a 7 m | 72 | dB(A) |
| Dimensiones (L × A × H) | 720 × 490 × 560 | mm |
| Peso | 85 | kg |

Nota: Datos técnicos extraídos del catálogo oficial del modelo DHY4000SE [42]



Fig. 31 Generador DHY4000DE [42]

5.4.3. Determinación de la potencia requerida

El inversor-cargador Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 incluye un cargador de baterías de 35 A a 48V, lo que representa una demanda máxima de 1.68 kW se corrige con la eficiencia de 94% teniendo una carga de 1.79kW, se selecciona el generador diésel Hyundai DHY4000SE, con una potencia nominal de 3.0 kW a nivel del mar (50 Hz). Para verificar su idoneidad en Chincheró, se aplica la corrección por altitud según ISO 3046 (34):

$$P_h = P_0 \left[1 - 0.01 \times \left(\frac{h - 1000}{100} \right) \right] \quad (34)$$

Donde:

- P_h = potencia disponible a la altura h (kW)
- P_0 = potencia nominal al nivel del mar = 3.0 kW
- h = altitud = 3,754 m

$$P_h = 3.0 \left[1 - 0.01 \times \left(\frac{3754 - 1000}{100} \right) \right] = 3.0 \times 0.7246 = 2.17 \text{ kW}$$

5.4.4. Análisis de operación en modo híbrido

La potencia corregida del generador (2.17 kW) permite:

- Carga exclusiva de baterías: 1.79 kW (82.3% de su capacidad corregida 2.17 kW).
- Carga combinada con cargas AC: Hasta $1.79 + 1.465 = 3.255$ kW teóricos, pero el PowerControl del inversor limitará la toma del generador a un valor seguro (2.0–2.1 kW), complementando el déficit con energía de baterías vía PowerAssist.

De este modo, el generador operará predominantemente entre el 75% y 85% de su capacidad corregida, dentro del rango de máxima eficiencia térmica y mínimo consumo específico de combustible.

5.4.5. Integración con el sistema Victron

El generador se conecta a la entrada AC auxiliar del MultiPlus-II 48/3000/35-32. La configuración incluye:

- Umbral de arranque automático: Cuando el estado de carga (SOC) de las baterías cae al 40%, se activa el generador mediante un relé de arranque por contacto seco integrado en el inversor.
- Limitación de corriente (PowerControl): Se configura para limitar la toma del generador a 9.5–10 A AC (2.0–2.1 kW), protegiéndolo de sobrecargas y manteniéndolo en rango eficiente.
- Carga combinada: El generador recarga las baterías a través del cargador de 35 A del inversor y puede alimentar cargas AC simultáneamente, con apoyo de baterías mediante PowerAssist en picos de demanda.
- Apagado automático: Cuando el SOC alcanza el 85%, el generador se detiene automáticamente.

5.5. Integración del sistema

El sistema híbrido diésel-eólico diseñado integra los componentes seleccionados en los puntos anteriores bajo una arquitectura de control unificada (ver Fig.32) que prioriza el aprovechamiento del recurso renovable, la estabilidad del suministro y la eficiencia operativa.

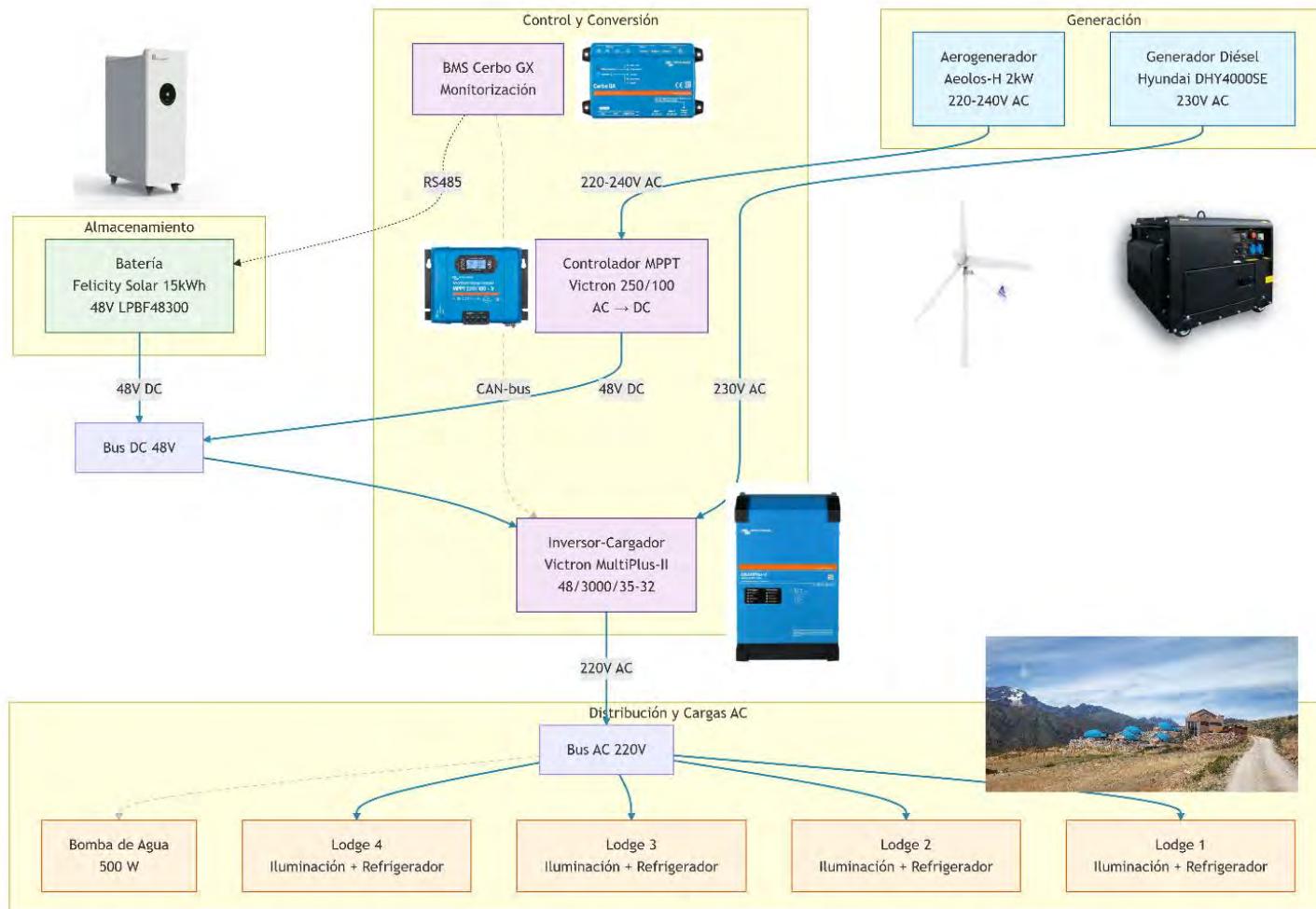


Fig. 32 Esquema general del Sistema.

La configuración adoptada es del tipo DC-coupled con un bus de corriente continua a 48V como nodo central de integración. Esta topología minimiza las pérdidas por conversión múltiple y permite una gestión coordinada de las fuentes de generación y el almacenamiento.

5.5.1. Interconexión de componentes

La interconexión física y eléctrica se realiza conforme a los siguientes criterios:

- Aerogenerador Aeolos-H 2kW: Conectado a la entrada del controlador Victron SmartSolar MPPT 250/100, el cual rectifica la salida y la adapta al bus de 48V.
- Banco de baterías LPBF48300: Un módulo conectado al bus DC mediante el distribuidor Lynx Power In, con protecciones individuales por rama.
- Inversor-cargador Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32: Conectado al bus DC y a la salida AC para alimentar las cargas del Lodge. Su entrada AC auxiliar recibe la energía del generador diésel.
- Generador diésel Hyundai DHY4000SE: Conectado a la entrada AC auxiliar del inversor-cargador mediante un interruptor automático de 16 A.
- Sistema de monitorización Cerbo GX: Interconectado vía CAN-bus con todos los componentes Victron y vía RS485 con las baterías Pylontech para gestión unificada.

5.5.2. Lógica de control y prioridades operativas

El sistema opera bajo una lógica de control automatizada implementada en el Cerbo GX, con las siguientes prioridades:

1. Prioridad 1 – Generación eólica: Siempre que la velocidad del viento supere los 3 m/s, el aerogenerador suministra energía al bus DC para cubrir las cargas y cargar las baterías.
2. Prioridad 2 – Almacenamiento en baterías: El excedente de generación eólica carga las baterías hasta un SOC máximo del 90%. En ausencia de viento, las baterías suministran energía a través del inversor.
3. Prioridad 3 – Generador diésel (respaldo): Se activa automáticamente cuando se cumplen simultáneamente:
 - SOC de baterías < 40%
 - Generación eólica insuficiente (< 500 W por más de 30 minutos)
4. Prioridad 4 – PowerAssist: Durante picos de demanda que superen la capacidad del generador, el inversor complementa con energía de las baterías.

5.5.3. Modos de operación característicos

El sistema puede operar en cuatro modos principales, gestionados automáticamente por el controlador:

- Modo Eólico Puro: Generación eólica \geq demanda, baterías en flotación o carga lenta.

- Modo Híbrido Eólico-Baterías: Generación eólica parcial, complementada con baterías.
- Modo Diésel-Baterías: Generador cargando baterías y alimentando cargas, con PowerAssist activo.
- Modo de Respaldo Crítico: Fallo simultáneo de eólico y diésel, alimentación exclusiva desde baterías (autonomía: 2 días).

La Tabla XIV resume las características técnicas finales del sistema integrado.

Tabla XIV
EQUIPOS DEL SISTEMA HIBRIDO

| Componente | Modelo | Parámetro clave | Valor |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Aerogenerador | Aeolos-H 2kW | Potencia máxima (corregida) | 1,372 W |
| Baterías | LPBF48300 (x1) | Capacidad total / Autonomía | 15 kWh / 2 días |
| Inversor-cargador | Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 | Potencia continua / Cargador | 2,400 W / 35 A |
| Controlador eólico | Victron SmartSolar MPPT 250/100 | Corriente máxima de carga | 100 A |
| Generador diésel | Hyundai DHY4000SE | Potencia corregida (3,754 m) | 2,170 W |
| Monitorización | Victron Cerbo GX | Comunicación | CAN-bus, RS485, Ethernet |
| Voltaje del sistema | Bus DC | Nominal | 48 V DC |
| Voltaje de salida | AC para cargas | Nominal | 220-230 V AC |

Nota. resumen de equipos del sistema de microgeneración híbrido.

CAPITULO VI

6. Simulación y Evaluación del Desempeño del Sistema Híbrido

El presente capítulo tiene como objetivo presentar y analizar los resultados obtenidos mediante la simulación computacional en el software HOMER Pro, considerando los tres escenarios de configuración evaluados para el sistema de microgeneración en el distrito de Chinchero:

- Escenario 1: Sistema híbrido eólico–baterías
- Escenario 2: Sistema híbrido diésel–eólico–baterías
- Escenario 3: Sistema diésel–baterías.

Los resultados se contrastan en términos de desempeño energético, impacto ambiental y viabilidad económica, con el fin de validar la hipótesis de que el sistema híbrido diésel–eólico representa una solución técnica, económica y ambientalmente viable para zonas altoandinas.

La simulación del sistema híbrido se realiza mediante el software HOMER Pro, el cual permite evaluar el comportamiento operativo horario de sistemas energéticos híbridos considerando la variabilidad de la demanda, la disponibilidad del recurso renovable y las reglas de despacho entre los distintos componentes. Esta herramienta no reemplaza los cálculos analíticos previos, sino que complementa el dimensionamiento inicial al permitir analizar la interacción dinámica entre el generador diésel, el aerogenerador, el banco de baterías y el inversor bajo condiciones variables de operación

6.1. Configuración de los escenarios en HOMER Pro

Para la simulación se utilizaron los siguientes parámetros comunes, derivados de los capítulos anteriores:

- Demanda eléctrica anual: 2,161 kWh/año, con perfil horario característico de Lodges ecoturísticos aumentando una variación de 15% en el consumo eléctrico como se muestra en la Fig. 33.
- Recurso eólico: Datos NASA POWER 2024 (Fig. 34) extrapolados a 15 m con factor orográfico (velocidad promedio: 3.41 m/s).

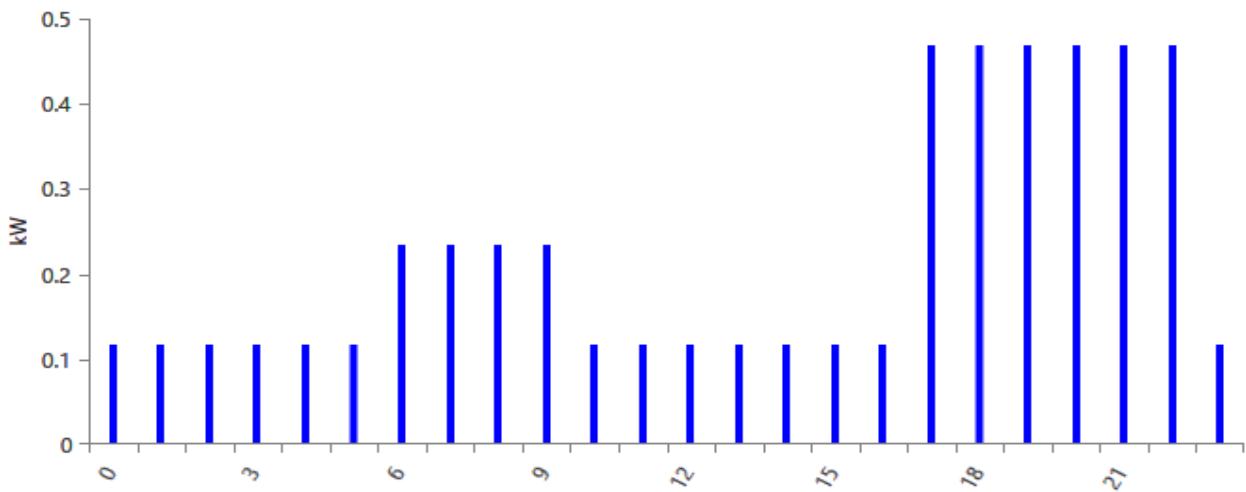


Fig. 33 Demanda simulada en Homer Pro

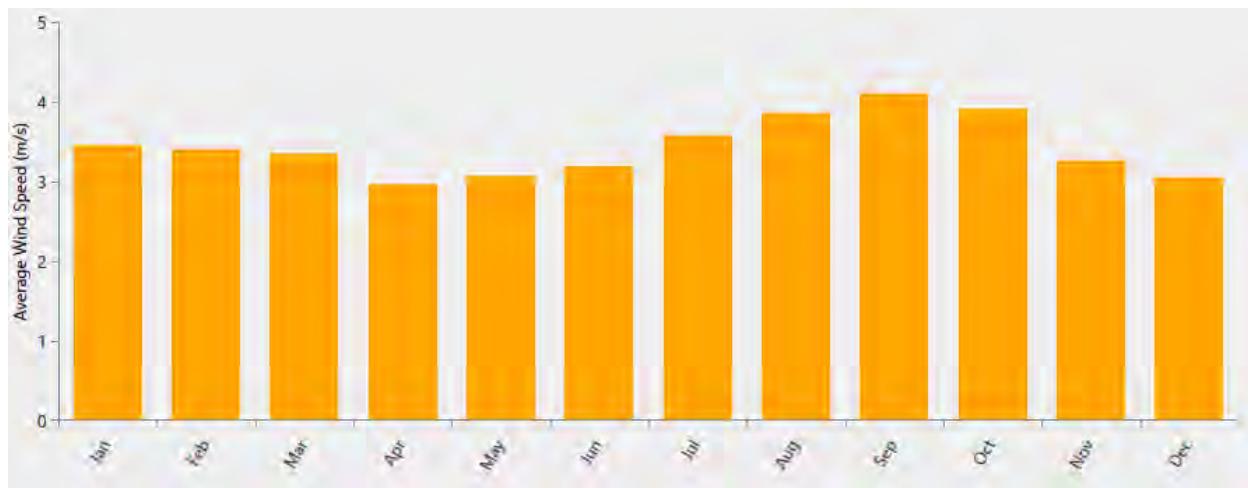


Fig. 34 Recurso eólico en Homer Pro

Componentes modelados (ver Fig.35):

- Aerogenerador: Aeolos-H 2 kW (curva de potencia ajustada por densidad).
- Baterías: 1 módulo LPBF48300 (15 kWh total, DoD 85%).
- Inversor-cargador: Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 (3 kW).
- Generador diésel: Hyundai DHY4000SE (3.5 kW nominal, corregido a 2.17 kW a 3,754 m.s.n.m.).

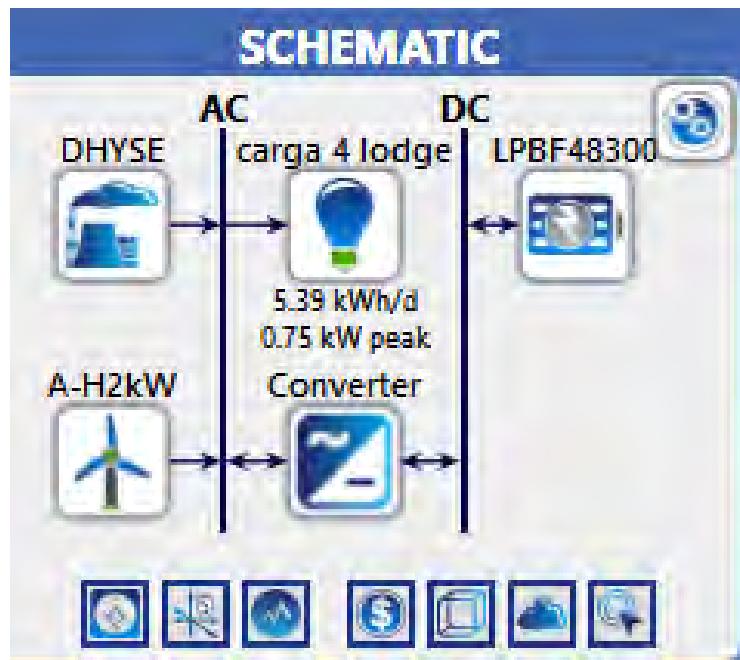


Fig. 35 Configuración del Sistema

6.2.Resultados técnicos, ambientales y económicos

En la Tabla XV se resumen los resultados proporcionados por HOMER Pro para cada escenario se considera una demanda según HomerPro de 2,161 kWh/año.

Los datos técnicos y económicos utilizados como parámetros de entrada en la simulación corresponden a valores reales y representativos del mercado, obtenidos a partir de catálogos de fabricantes y precios comerciales vigentes (ver Anexo D). Estos datos incluyen características técnicas de los equipos, costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, así como parámetros económicos asociados (ver Tabla XVI).

Tabla XV

RESULTADOS TÉCNICOS COMPARATIVOS DE HOMERPRO

| Configuración del sistema | Grupo diésel (kW) | Aerogeneradores | Baterías | Producción eólica (kWh/año) | Producción diésel (kWh/año) | Fracción renovable (%) | Excedente (%) |
|---------------------------|-------------------|-----------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------|
| Escenario 1 | – | 2 × 2 kW | 3 | 3031 | 0 | 100 | 30.5 |
| Escenario 2 | 2.17 | 1 × 2 kW | 1 | 1516 | 645 | 67.2 | 1.18 |
| Escenario 3 | 2.17 | – | 1 | 0 | 2172 | 0 | 0 |

Nota. resultados de las simulaciones de HomerPro. Fuente. Elaboración propia.

Tabla XVI

RESULTADOS ECONÓMICOS COMPARATIVOS DE HOMERPRO

| Configuración del sistema | Costo inicial (S/.) | NPC total (S/.) | COE (S/. kWh) | Costo operativo anual (S/. año) |
|---------------------------|---------------------|-----------------|---------------|---------------------------------|
| Escenario 1 | 61,000 | 68,400.76 | 3.00 | 853.67 |
| Escenario 2 | 43,500 | 52,152.30 | 2.29 | 1,341.70 |
| Escenario 3 | 29,000 | 66,071.67 | 2.90 | 3,839.00 |

Nota. resultados de las simulaciones de HomerPro. Fuente. Elaboración propia.

6.2.1. Análisis del desempeño energético y ambiental

Escenario 1: Este escenario presenta una producción eólica anual de 3,031 kWh, valor superior a la demanda energética anual del sistema, lo que genera un excedente de 924 kWh/año. La totalidad de la energía suministrada proviene de fuentes renovables, alcanzándose una fracción renovable del 100%. Al no incorporar un grupo electrógeno, el sistema elimina completamente el consumo de combustible fósil y las emisiones de CO₂ asociadas a la operación, logrando el mejor desempeño ambiental entre los escenarios analizados. No obstante, este resultado se obtiene mediante un sobredimensionamiento del sistema eólico y del almacenamiento, lo que impacta negativamente en la inversión inicial.

Escenario 2 (seleccionado): El sistema híbrido combina de manera óptima el aprovechamiento del recurso eólico con el respaldo del grupo electrógeno. La producción eólica

anual alcanza los 1,516 kWh supera en 37% el cálculo teórico inicial (1,109 kWh/año). Esta variación es positiva y se explica porque HOMER optimiza dinámicamente el sistema: gestiona las baterías para almacenar excedentes instantáneos y reduce pérdidas por desacople, maximizando así el aprovechamiento del recurso eólico, mientras que el generador diésel aporta 645 kWh/año, permitiendo cubrir completamente la demanda energética. El grupo electrógeno opera únicamente 258 horas al año, con un consumo de combustible de 243 L/año, lo que se traduce en emisiones de CO₂ de 636 kg/año. Esta configuración alcanza una fracción renovable del 67.2%, representando una reducción significativa tanto del consumo de combustible como del impacto ambiental en comparación con un sistema puramente diésel, sin incurrir en el sobredimensionamiento del escenario 100% renovable como se observa en la Fig. 36 de producción eléctrica.

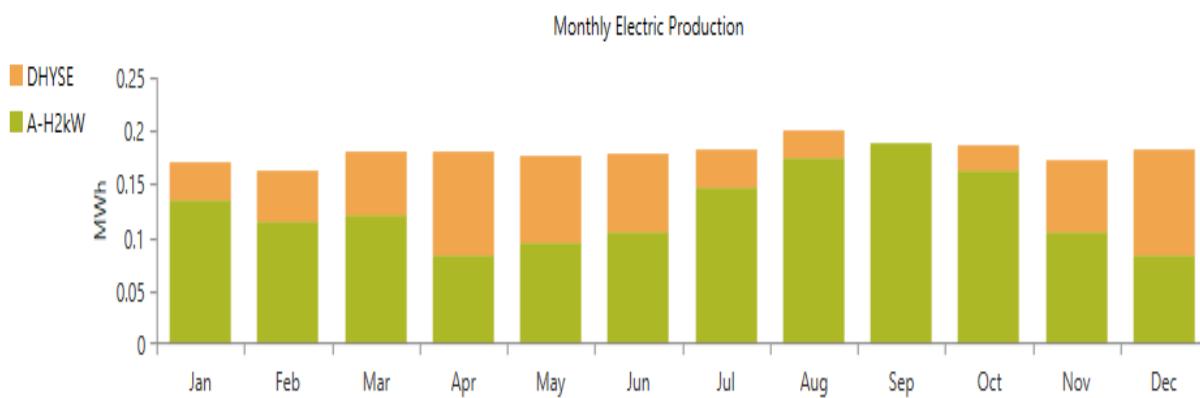


Fig. 36 Producción Eléctrica del sistema híbrido

Escenario 3: En este escenario, la totalidad de la demanda energética es cubierta por el grupo electrógeno, registrándose una producción anual de 2,172 kWh. El generador opera 869 horas al año, con un consumo de combustible de 819 L/año y emisiones de CO₂ de 2,141 kg/año, lo que evidencia la alta dependencia de combustibles fósiles. Este comportamiento se traduce en mayores costos operativos y el peor desempeño ambiental entre las alternativas evaluadas.

6.2.2. Análisis económico comparativo

Costo Nivelado de Energía (COE). El análisis del costo nivelado de energía evidencia diferencias claras entre las configuraciones evaluadas. El sistema diésel–eólico–baterías presenta el menor COE, con un valor de S/ 2.29 por kWh, reflejando una operación económicamente eficiente al combinar generación renovable con respaldo convencional. El sistema diésel–baterías alcanza un COE de S/ 2.90 por kWh, penalizado por su elevada dependencia del combustible fósil. Por su parte, el sistema eólico–baterías, aunque libre de consumo de combustible, registra el COE más alto (S/ 3.00 por kWh) debido a la elevada inversión inicial asociada al sobredimensionamiento del sistema.

Costo Presente Neto (NPC). El sistema diésel–eólico–baterías presenta el menor Costo Presente Neto, con un valor de S/ 52,152.30, consolidándose como la alternativa económicamente más conveniente a lo largo de la vida útil del proyecto. En comparación, el sistema eólico–baterías alcanza un NPC de S/ 68,400.76, valor superior debido a los mayores costos de inversión inicial, mientras que el sistema diésel–baterías registra un NPC de S/ 66,071.67, afectado principalmente por los elevados costos de operación y consumo de combustible. Estos resultados confirman que una menor inversión inicial no garantiza un menor costo total del proyecto en el largo plazo.

Costo operativo anual. El análisis de los costos operativos muestra que el sistema diésel–baterías presenta el mayor costo anual, con S/ 3,839/año, asociado principalmente al consumo de combustible y al mantenimiento del grupo electrógeno. El sistema diésel–eólico–baterías reduce significativamente este valor a S/ 1,341.70/año, gracias a la disminución del uso del generador diésel. Finalmente, el sistema eólico–baterías presenta el menor costo operativo anual (S/ 853.67/año), al no requerir combustible, aunque este beneficio no compensa el mayor costo de inversión inicial.

CAPITULO VII

7. Resultados y Discusión

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del diseño, dimensionamiento y simulación del sistema híbrido diésel–eólico para el distrito de Chinchero, y los discute a la luz de los objetivos planteados, el marco teórico y los antecedentes revisados. Se organiza en tres secciones principales: (1) caracterización del recurso eólico y demanda eléctrica, (2) resultados del diseño y simulación del sistema híbrido, y (3) discusión integral de viabilidad técnica, económica y ambiental.

7.1.Caracterización del recurso eólico y demanda eléctrica

7.1.1. *Potencial eólico a 3,754 m.s.n.m.*

El análisis del recurso eólico mediante datos NASA POWER 2024 y ajuste por altura y efecto orográfico (hill-top) arrojó los siguientes resultados clave:

Velocidad promedio anual a 15 m: 3.41 m/s, con el factor topográfico ($S = 0.279$).

- Distribución de Weibull: parámetro de forma $k=1.52$ y escala $c=3.82$ m/s, indicando un régimen de viento moderado con variabilidad media.
- Potencia media específica: 45 W/m², equivalente a 395 kWh/m²·año.
- Dirección predominante: vientos del norte, con persistencia en horas diurnas (9:00–18:00).

Discusión: Estos valores confirman que Chinchero posee un recurso eólico aprovechable para microgeneración, a pesar de su altitud. La velocidad ajustada (3.41 m/s) supera la velocidad de arranque de aerogeneradores comerciales pequeños (3.0 m/s), lo que valida la Hipótesis

Específica 1. El potencial estimado es consistente con estudios en zonas altoandinas similares, como el reportado por [3] para Cusco (4.81 m/s a 10 m).

7.1.2. Demanda eléctrica del Lodge ecoturístico

La caracterización de la demanda para 4 Lodges resultó en:

- Consumo diario: 5.52 kWh/día.
- Consumo anual: 2,015 kWh/año.
- Potencia pico: 1.465 kW.
- Perfil típico: mayor demanda en horario tarde-noche (17:00–23:00).

Discusión: La demanda es moderada y típica de establecimientos ecoturísticos básicos, con cargas eficientes (LED, frigobar de bajo consumo). El perfil coincide parcialmente con la generación eólica (diurna), lo que refuerza la necesidad de almacenamiento en baterías para garantizar suministro nocturno.

7.2. Diseño y desempeño del sistema híbrido diésel–eólico

7.2.1. Configuración óptima del sistema

El dimensionamiento técnico condujo a la siguiente configuración:

- Aerogenerador: Aeolos-H 2 kW, con curva de potencia ajustada por densidad ($\rho = 0.84 \text{ kg/m}^3$). Producción anual simulada: 1,109 kWh (teórico) / 1,516 kWh (HOMER Pro).
- Baterías: 1 Batería LPBF48300 (LiFePO₄, 15 kWh total), autonomía de 48 h (2 días).

- Generador diésel: Hyundai DHY4000SE (3.5 kW), potencia corregida a 2.17 kW a 3,754 m.s.n.m.
- Sistema de control: Arquitectura DC-coupled con inversor-cargador Victron MultiPlus-II y controlador MPPT.

Discusión: La selección del aerogenerador Aeolos-H de 2 kW evita el sobredimensionamiento identificado en evaluaciones preliminares y se ajusta adecuadamente a la demanda anual de 2,015.5 kWh. Los resultados indican que el sistema diésel–eólico–baterías cubre el 67.2% de la demanda con energía eólica (1,516 kWh/año), mientras que el generador diésel opera de forma limitada (258 h/año), manteniendo el carácter híbrido del sistema.

El empleo de baterías LiFePO₄ resulta técnicamente adecuado por su alta vida útil, elevada profundidad de descarga y buen desempeño en condiciones de baja temperatura, permitiendo una gestión eficiente de la intermitencia eólica y reduciendo la dependencia del diésel, lo que respalda la Hipótesis Específica 2.

7.2.2. Resultados de simulación en HOMER Pro

La simulación energética horaria realizada en HOMER Pro para un período de un año (8,760 horas) permitió evaluar el desempeño integral de los tres escenarios planteados, considerando la variabilidad real del recurso eólico y el perfil de demanda característico del Lodge ecoturístico. Los resultados sintetizados en la Tabla XVII no solo cuantifican las diferencias entre configuraciones, sino que revelan el impacto transformador de la integración eólica en sistemas aislados de gran altitud.

Tabla XVII
COMPARATIVA DE DESEMPEÑO DE LOS ESCENARIOS

| Indicador | Escenario 1 | Escenario 2 (Optimo) | Escenario 3 |
|------------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Fracción renovable (%) | 100 | 67.2 | 0 |
| Consumo diésel (L/año) | 0 | 243 | 819 |
| Emisiones CO ₂ (kg/año) | 0 | 636 | 2,141 |
| COE (S/kWh) | 3.00 | 2.29 | 2.90 |
| NPC (S/) | 68,400.76 | 52,152.30 | 66,071.67 |
| Horas operación diésel | 0 | 258 | 869 |

Nota. los resultados de cada escenario en la simulación de Homer Pro

Discusión:

- Reducción de consumo de combustible y emisiones. El sistema diésel–eólico–baterías reduce significativamente el uso de diésel, cubriendo 1,516 kWh/año con energía eólica (67.2% de la demanda), lo que limita el consumo a 243 L/año y las emisiones a 636 kg CO₂ /año, frente a 819 L/año y 2,141 kg CO₂ /año del sistema diésel puro. Esto valida la Hipótesis Específica 3.
- Viabilidad económica. El sistema híbrido presenta el menor Costo Presente Neto (NPC) y un COE inferior al sistema diésel convencional, demostrando que la integración de energía eólica permite reducir los costos totales del proyecto a lo largo de su vida útil, aun considerando una inversión inicial mayor. Estos resultados confirman la Hipótesis Específica 4.

- Confiabilidad del sistema. El sistema diésel–eólico–baterías ofrece el mejor equilibrio entre sostenibilidad y seguridad de suministro, manteniendo la continuidad del servicio con 258 h/año de operación del generador diésel como respaldo, lo que lo convierte en una solución robusta para zonas aisladas con alta variabilidad del recurso eólico.

7.3.Discusión integral de viabilidad

7.3.1. Viabilidad técnica y operativa

El sistema diésel–eólico–baterías demuestra capacidad para abastecer de forma confiable la demanda anual, combinando generación eólica y respaldo diésel. Los resultados de simulación indican que el 67.2% de la energía anual es suministrada por el aerogenerador, mientras que el generador diésel opera de manera limitada (258 h/año), garantizando continuidad del servicio durante períodos de baja disponibilidad eólica. La configuración híbrida permite una operación estable del sistema, mitigando la intermitencia del recurso renovable.

En comparación con antecedentes, los resultados obtenidos son consistentes con estudios realizados en sistemas aislados. Kheder-Haddouche et al. (2024) reportan reducciones significativas en el consumo de diésel mediante la integración eólica, mientras que Kazem et al. (2017) evidencian mejoras económicas al reducir el COE mediante esquemas híbridos. A nivel nacional, el presente estudio amplía el trabajo de Jordán Arias (2009), demostrando que la hibridación diésel–eólica es técnicamente viable incluso en condiciones de gran altitud, con beneficios operativos y ambientales cuantificables.

7.3.2. Viabilidad económica y financiera

El análisis económico muestra que el sistema diésel–eólico–baterías presenta la mejor relación costo–beneficio a lo largo de la vida útil del proyecto, a pesar de requerir una inversión inicial superior al sistema diésel convencional. Los resultados de simulación indican que la reducción significativa del consumo de combustible (243 L/año frente a 819 L/año) permite disminuir los costos operativos anuales y el Costo Presente Neto (NPC), posicionando al sistema híbrido como la alternativa económicamente más conveniente.

Asimismo, el Costo Nivelado de Energía (COE) del sistema híbrido resulta inferior al del sistema diésel, lo que evidencia la ventaja económica de integrar generación eólica en sistemas aislados. Estos resultados respaldan la Hipótesis General, al demostrar que la hibridación permite reducir los costos totales de generación sin comprometer la confiabilidad del suministro.

7.3.3. Viabilidad ambiental y social

La implementación del sistema híbrido contribuye a:

- Reducción de huella de carbono (1.505 toneladas CO₂ evitadas anuales).
- Menor contaminación acústica y atmosférica local.
- Promoción del ecoturismo sostenible en Chinchero, alineado con el ODS 7.

Limitaciones reconocidas:

- Los datos eólicos provienen de modelos satelitales (NASA POWER), con incertidumbre en topografía compleja.
- El análisis económico no incluye variaciones extremas en precio de combustible o costos de importación.

- No se consideró el diseño estructural de la torre ni estudios geotécnicos.

7.4. Validación de objetivos e hipótesis

La validación de los objetivos e hipótesis permite evaluar sistemáticamente el alcance y contribución de esta investigación. Este análisis determina la correspondencia entre las metas establecidas inicialmente y los hallazgos obtenidos mediante el diseño, simulación y evaluación del sistema híbrido. La Tabla XVIII correlaciona cada objetivo específico e hipótesis con los resultados cuantitativos y cualitativos derivados del estudio, verificando así el cumplimiento de las premisas investigativas y demostrando la coherencia metodológica del trabajo desarrollado.

Tabla XVIII

VALIDACIÓN DE OBJETIVOS E HIPÓTESIS

| Objetivo/Hipótesis | Cumplimiento | Evidencia |
|---|--------------|--|
| Objetivo 1: Cuantificar potencial eólico | Sí | Weibull: k=1.52, c=3.82 m/s; Potencia específica: 45 W/m ² |
| Objetivo 2: Diseñar sistema híbrido | Sí | Configuración óptima: Aeolos-H 2kW + LPBF48300 + Victron |
| Objetivo 3: Reducción diésel y CO ₂ | Sí | Ahorro del 67.2% diésel, 1,505 kg CO ₂ evitados/año |
| Objetivo 4: Viabilidad económica | Sí | COE = S/ 2.29; NPC = S/ 52,152 |
| Hipótesis General: Sistema viable | Sí | Se confirma técnica, económica y ambientalmente |
| Hipótesis Específica 1: Potencial suficiente | Sí | Velocidad ≥ 3.41 m/s con efecto orográfico |
| Hipótesis Específica 2: Diseño viable en altura | Sí | Componentes seleccionados con especificaciones para altura |
| Hipótesis Específica 3: Reducción diésel/CO ₂ | Sí | Consumo diésel = 243 L/año con 1.505 toneladas de CO ₂ evitadas |

| | | |
|---|----|---|
| Hipótesis Específica 4: Rentabilidad favorable | Sí | COE menor y NPC menor con reducción de OPEX |
|---|----|---|

Nota. Se muestra el resumen de la validación de objetivos e hipótesis de la tesis.

Discusión final: Los resultados globales confirman que el sistema híbrido diésel–eólico es una solución factible y beneficiosa para microgeneración en zonas altoandinas mayores a 3,000 m.s.n.m. La integración eólica no solo mejora la sostenibilidad, sino que también reduce costos a mediano plazo, ofreciendo un modelo replicable para negocios turísticos aislados del Perú.

CAPITULO VIII

8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

1. El recurso eólico del distrito de Chinchero es cuantificable y aprovechable para microgeneración. El análisis estadístico de los datos de viento 2024 mediante la distribución de Weibull arrojó parámetros $k = 1.52$ y $c = 3.82$ m/s a 15 m de altura (ver pag.69), con una potencia media específica de 45 W/m^2 ($395 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$). La rosa de los vientos evidenció una dirección predominante del norte, confirmando la disponibilidad del recurso para aplicaciones energéticas en zonas altoandinas.
2. Se diseñó un sistema híbrido diésel–eólico–baterías técnicamente viables para operar a más de 3,000 m.s.n.m., considerando la corrección por densidad del aire ($\rho = 0.84 \text{ kg/m}^3$). La configuración óptima incluyó un aerogenerador Aeolos-H de 2 kW, baterías LiFePO₄ de 15 kWh, un inversor Victron de 3 kW y un generador diésel corregido a 2.17 kW, garantizando continuidad del suministro con una operación diésel limitada a 258 h/año.
3. El sistema híbrido cubre el 67.2 % de la demanda anual mediante generación eólica (1,516 kWh/año), reduciendo el consumo de diésel a 243 L/año frente al sistema convencional. Esta reducción permite evitar aproximadamente 1,505 kg de CO₂ /año (ver pag.119), evidenciando el impacto ambiental positivo de la integración eólica en sistemas aislados.
4. Económicamente, el sistema diésel–eólico–baterías presentó el mejor desempeño comparativo, con un NPC de S/ 52,152 y un COE de S/ 2.29/kWh, valores inferiores al sistema diésel convencional. La disminución del consumo de combustible reduce los costos operativos y

confirma la viabilidad económica del sistema propuesto para Lodges ecoturísticos en zonas altoandinas.

8.2.Recomendaciones

- Se recomienda realizar el análisis de viento con mediciones in situ con un plazo mínimo de 12 meses a la altura correspondiente a operación del aerogenerador para una mejor precisión en el tratamiento de datos eólicos.
- Para futuras investigaciones del estudio se identificó que un levantamiento topográfico de alta resolución mediante dron habría permitido caracterizar con mayor precisión los efectos orográficos locales; sin embargo, su aplicación se vio limitada por costos y disponibilidad de equipos, por lo que se recomienda considerarlo en estudios posteriores para refinar la estimación del recurso eólico.
- Se recomienda extender el análisis económico para incluir escenarios con fluctuaciones en los precios del combustible y posibles incentivos gubernamentales para energías renovables en zonas rurales.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, vol. 6. México: mcGraw-Hill, 2014.
- [2] U. Yancachajilla Tito y O. A. Vilca Huayta, “Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri-Perú”, *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 24, núm. 3, pp. 190–198, 2022.
- [3] M. I. García La Torre, “Evaluación de la potencia eólica en las provincias de Cusco, Calca, Canchis 2017–2021”, 2023.
- [4] J. Jordán Arias, “Estudio de la utilización de energía eólica para la generación de electricidad en un asentamiento humano de San Juan de Marcona”, 2009.
- [5] Y. Zhang, A. Melin, S. Djouadi, y M. Olama, “Performance Guaranteed Inertia Emulation for Diesel-Wind System Feed Microgrid via Model Reference Control”, *2017 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2017*, feb. 2018, doi: 10.1109/ISGT.2017.8085976.
- [6] D. Ochoa y S. Martinez, “Modeling an Isolated Hybrid Wind-Diesel Power System for Performing Frequency Control Studies. A Case of Study: San Cristobal Island, Galapagos-Ecuador”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, núm. 5, pp. 775–787, may 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8891946.

- [7] S. Kheder-Haddouche, H. Daaou Nedjari, y S. Adjiri, “Feasibility Study of a Wind-Diesel Hybrid System in a Remote Site on Southern of Algeria”, *Journal of Renewable Energies*, vol. 2024, núm. Special Issue, pp. 189–197, sep. 2024, doi: 10.54966/JREEN.V1I1.1260.
- [8] H. A. Kazem, H. A. S. Al-Badi, A. S. Al Busaidi, y M. T. Chaichan, “Optimum design and evaluation of hybrid solar/wind/diesel power system for Masirah Island”, *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 19, núm. 5, pp. 1761–1778, oct. 2017, doi: 10.1007/S10668-016-9828-1/METRICS.
- [9] M. J. Moran y H. N. Shapiro, *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverté, 2018.
- [10] J. Twidell, *Renewable energy resources*. Routledge, 2021.
- [11] R. Everett, G. Boyle, S. Peake, y J. Ramage, *Energy systems and sustainability: power for a sustainable future*. Oxford University Press, 2012.
- [12] G. M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power Systems-second edition”, *J. Exp. Psychol. Gen.*, vol. 136, núm. 1, 2013.
- [13] E. Hau, *Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics*, vol. 9783642271519. 2013. doi: 10.1007/978-3-642-27151-9.
- [14] J. B. Heywood, “Combustion engine fundamentals”, *1a Edição. Estados Unidos*, vol. 25, pp. 1117–1128, 1988.
- [15] KOSOV, “Ficha técnica Modelo 175 KPD 1106TA”, Ciudad de México, 2018.
- [16] B. Tony, J. Nick, S. David, y E. Bosanyi, *Wind Energy Handbook, second edition*, vol. 210. 2011.

- [17] G. L. Johnson, *Wind Energy Systems*, Electronic Edition. Kansas State University, 2006.
- [18] M. Villarrubia López, “Ingeniería de la energía eólica”, 2013.
- [19] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [20] MINEM, “Atlas eólico del Perú”, 2016, *Ministerio de Energía y Minas Lima-Perú*.
- [21] T. Ackermann y L. Söder, “An overview of wind energy-status 2002”, 2002. doi: 10.1016/S1364-0321(02)00008-4.
- [22] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, y Z. Hussain, “Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques”, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2011.12.004.
- [23] P. C. Del Granado, S. W. Wallace, y Z. Pang, “The impact of wind uncertainty on the strategic valuation of distributed electricity storage”, *Computational Management Science*, vol. 13, núm. 1, 2016, doi: 10.1007/s10287-015-0235-0.
- [24] M. V. López, *Ingeniería de la energía eólica*. Alpha Editorial, 2013.
- [25] B. K. Bala y S. A. Siddique, “Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island-Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 13, núm. 3, 2009, doi: 10.1016/j.esd.2009.07.002.
- [26] J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, W. Irving, y T. Krug, *2006 IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006.

- [27] NASA POWER Project., “NASA POWER: Prediction Of Worldwide Energy Resources.”, NASA Langley Research Center. Consultado: el 25 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/>
- [28] T. Lambert, P. Gilman, y P. Lilienthal, “Micropower System Modeling with Homer”, en *Integration of Alternative Sources of Energy*, 2006. doi: 10.1002/0471755621.ch15.
- [29] G. Peirano, L. Enrique de la Flor Sáenz Director Ejecutivo del Ceplan Jordy Vílchez Astucuri, E. Sobrino Vidal, F. del Águila Patroni, y M. Francisco Torres Editado por, “ANÁLISIS DEL PROCESO DE PÉRDIDA Y RETROCESO GLACIAR A NIVEL NACIONAL Y EL IMPACTO A NIVEL REGIONAL”. [En línea]. Disponible en: www.ceplan.gob.pe
- [30] C. de la R. Perú, *Decreto Legislativo No 1002, Ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables*. Perú, 2008.
- [31] OSINERGMIN, “La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribución a la transición energética.”, Lima, Perú., 2019.
- [32] Ministerio del Ambiente, “Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, Lima, 2016.
- [33] Ministerio de Energía y Minas, “Plan Energético Nacional 2014–2025”, Lima, 2014.
- [34] SENAMHI, “Boletín meteorológico regional – Cusco 2022”, Cusco, 2022.
- [35] Ministerio de Energía y Minas (MINEM), “Mapa Eólico del Perú - Anexo 6.3.1: Velocidades Extremas”, Lima, 2006.

- [36] Ltd. Aeolos Wind Energy, “Aeolos-H 2kW Wind Turbine Specifications”, London, UK, 2024.
- [37] M. Amir *et al.*, “Energy storage technologies: An integrated survey of developments, global economical/environmental effects, optimal scheduling model, and sustainable adaption policies”, 2023. doi: 10.1016/j.est.2023.108694.
- [38] Felicity Solar, “Product Parameters: LiFePO4 Battery System LPBF48300”, Guangzhou, China, 2024.
- [39] Victron Energy, “Inversor/cargador MultiPlus-II”, Almere, 2024.
- [40] Victron Energy, “Controladores de carga SmartSolar MPPT 250/60, 250/70, 250/85 & 250/100”, Almere, 2024.
- [41] Victron Energy, “Cerbo GX y GX Touch 50”, Almere, 2024.
- [42] Hyundai Power Products, “Portable Petrol Generator HYUNDAI HY4000SEi Spec Sheet”, Carrara, QLD, 2021.

ANEXOS

Anexos A Código de Matlab del análisis eólico Weibull

```

%% =====
% WEIBULL MLE PARA DATOS REALES DE VIENTO (CON HILLTOP YA APLICADO)
% Kevin Quillahuamán – Tesis 2025
% =====

clear; clc; close all;

%% === 1. Cargar datos desde Excel =====
% Los datos YA tienen aplicado el speed-up por hill-top

filename = 'datos_viento1.xlsx';
v_eff = xlsread(filename, 'Hoja1', 'B2:B90000');    % YA INCREMENTADOS

% Eliminar no válidos
v_eff = v_eff(~isnan(v_eff) & v_eff > 0);

n = length(v_eff);    % número de datos
fprintf('Datos cargados: %d registros (YA CON SPEED-UP APLICADO)\n', n);

%% === 2. Ajuste Weibull por MLE =====

% Neg log-likelihood
negLogLik = @(params) ...
    -sum( log(params(1)/params(2)) + ...
        (params(1)-1).*log(v_eff/params(2)) - ...
        (v_eff/params(2)).^params(1) );

% Inicialización con método de momentos
vmean = mean(v_eff);
vstd = std(v_eff);
k0 = (vmean / vstd)^1.086;
c0 = vmean / gamma(1 + 1/k0);

params0 = [k0, c0];

% Optimización
options = optimset('Display','off', 'TolX',1e-8, 'TolFun',1e-8);
params = fminsearch(negLogLik, params0, options);

k = params(1);
c = params(2);
vmedia_weibull = c * gamma(1 + 1/k);

%% === 3. Graficar datos vs Weibull y mostrar valores =====

figure;
histogram(v_eff, 40, 'Normalization','pdf', 'FaceAlpha',0.35);
hold on;

```

```
v_plot = linspace(0,max(v_eff),500);
pdf_weib = (k/c)*(v_plot/c).^(k-1).*exp(-(v_plot/c).^k);

plot(v_plot, pdf_weib, 'r', 'LineWidth', 2);
grid on;

xlabel('Velocidad del viento (m/s)');
ylabel('Densidad de probabilidad (pdf)');
title('Ajuste Weibull (MLE)');

legend('Datos (con speed-up)', 'Weibull MLE');

%% === 4. Insertar valores en la figura =====

txt = {
    ['k (forma) = ', num2str(k, '.4f')]
    ['c (escala) = ', num2str(c, '.4f'), ' m/s']
    ['Media Weibull = ', num2str(vmmedia_weibull, '.4f'), ' m/s']
    ['Datos usados (n) = ', num2str(n)]
};

annotation('textbox',[0.60 0.55 0.3 0.3],...
    'String',txt,...
    'FitBoxToText','on',...
    'BackgroundColor',[1 1 1 0.8],...
    'FontSize',10);
```

Anexo B. Fichas técnicas aparatos eléctricos



Catálogo Frigobares

Frigobar Hyundai 88 L Defrost HYRF912F Gris
Hyundai 1001535617



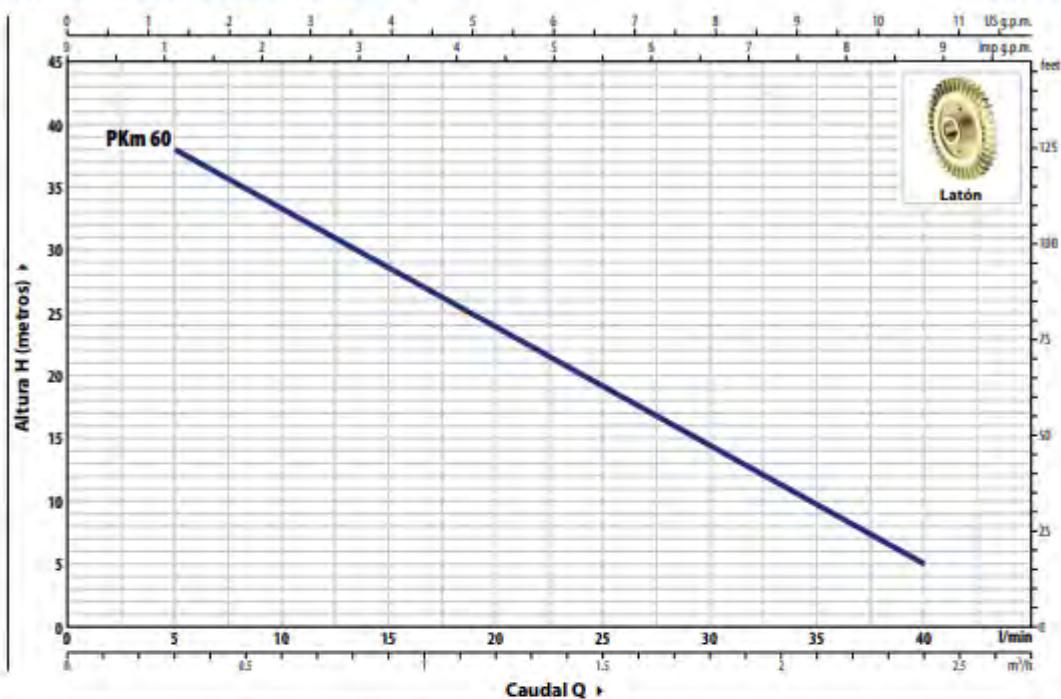
FICHA TÉCNICA

| | |
|---------------------------------------|---|
| Color principal Gris | Modelo HYRF912F |
| Compresor Estándar | Consumo de energía 138 kwh/año |
| Número De Compartimientos En Puerta 3 | Observaciones Tecnología Defrost |
| Alarma de puerta abierta No | Tipo de Producto Frigobar |
| Capacidad del congelador 9 | Capacidad total útil 88L |
| Eficiencia energética A | Antideslizante No |
| Número de puertas 1 | Alto 83.1 |
| Largo 44.7 | Dispensador de Agua No |
| Dispensador de Hielo No | Número de Bandejas 3 |
| Control de temperatura Manual | Material de la bandeja Bandeja de Vidrio templado |



CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES - HS=0 m

60 Hz



| TIPO | | POTENCIA (P ₂) | | | Q l/min | m ³ /h | 0 | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.4 |
|------------|-----------|----------------------------|------|-----|------------|-------------------|----|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Monofásico | Trifásico | kW | HP | 3~ | | | | | | | | | | | |
| PKm 60 | PK 60 | 0.37 | 0.50 | IE2 | H m | 40 | 38 | 33.5 | 29 | 24 | 19.5 | 15 | 10 | 5 | |
| PKm 60 | PK 60 | 0.37 | 0.50 | IE2 | Q l/min | 40 | 38 | 33.5 | 29 | 24 | 19.5 | 15 | 10 | 5 | |

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

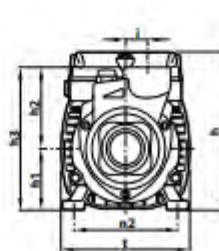
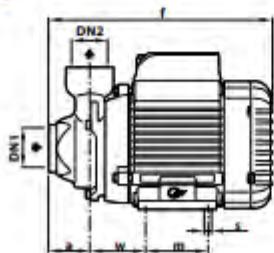
Tolerancia de las curvas de prestaciones según EN ISO 9906 Grado 3B.

CONSUMOS

| TIPO | TENSIÓN | |
|---------|---------|-------|
| | 220 V | 110 V |
| PKm 60* | 2.6 A | 5.5 A |

| TIPO | TENSIÓN | | | |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 220 V - Δ | 380 V - Δ | 220 V - Δ | 440 V - Δ |
| PK 60* | 2.0 A | 1.15 A | 2.1 A | 1.2 A |

DIMENSIONES Y PESOS



PALETIZACIÓN

| TIPO | BOCAS | | | | | | | | | | | | DIMENSIONES mm | | | | | | kg | GROUPAGE | CONTAINER |
|------------|-----------|-----|----|----|-----|-----|----|----|-----|----|----|-----|----------------|----|----|-----|-----------|-----------|-----|----------|-----------|
| | DN1 | DN2 | a | f | h | h1 | h2 | h3 | i | m | t | n2 | w | s | 1~ | 3~ | n° bombas | n° bombas | | | |
| Monofásico | Trifásico | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PKm 60* | PK 60* | 1" | 1" | 38 | 208 | 145 | 56 | 75 | 131 | 20 | 55 | 118 | 94-100 | 53 | 7 | 5.0 | 5.0 | 240 | 330 | | |

PKm 60* | 60 Hz

FICHA TÉCNICA

Cod. 51603

PHILCO iluminación

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

- Lámpara de LED
- Luz Blanca
- Tecnología SMD
- Óptica Opalina

INSTALACIÓN

Para luminarios con base E26

USO

Interior

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Potencia: 10 W
 Características eléctricas: 100-240 V ~ 60 Hz
 Flujo lumínico: 800 lm
 Temperatura de color: 6 500 K
 Base: E26
 Bulbo: A
 Tipo de lámpara: Omnidireccional
 ILC>80
 Ángulo de apertura: 200°
 Vida útil: 30 000 h
 Certificado: NOM-030-ENER-VIGENTE
 Dictamen de Hipoteca Verde:

PRODUCTO



MEDIDAS



CURVA FOTOMÉTRICA

N/A

CONO DE DISTRIBUCIÓN

N/A

GARANTÍA

1 año de garantía por defecto de fabricación en condiciones normales de operación.

NOTA

Con un uso de 24 h al día la vida útil reduce a 10 000 h.
 Se pierde la garantía cuando su uso es de 24 horas continuas.

MARCA
PHILCO

CATEGORÍA
LÁMPARA LED

FAMILIA
BULBO

APLICACIONES

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

Concesionaria para: Comercio Exterior Industrial, Luminotecnia, Autónoma S.A., Av. Lázaro Cárdenas No. 1150 Piso 2do., 302 Col. Centro Histórico, Alcalde Miguel Hidalgo, México, Ciudad de México C.P. 11200, P.R.C. C.S.L. 100412F26, Tel. (55) 9149 9970
www.philco.com.mx, ventas@philco.com.mx

PHILCO iluminación

Modelo 51603

Spot Light LED 15W

LED 220V

LIGHT

15W > 135W

equivalente halógeno



OPALUX
Lighting

Iluminación

El Spot Light LED "OPALUX", utilizado para destacar objetos o ambientes. Acabado en blanco, disponible en dos temperaturas de color: Cálida (3500K) y Blanca (7000K).

Características

- Hasta 90% de ahorro de energía
- Vida útil de 25 000 horas
- Garantía de 2 años
- Alto flujo lumínoso, ideal para aplicaciones profesionales
- Fácil instalación



EMPOTRABLE EN
CAJA OCTOGONAL

Aplicaciones

- Uso en oficinas, pasillos, salas de juntas, comercios, salas de exhibición y otras áreas

Información Técnica

Código:

Marca: OPALUX

Alimentación: 185-265VAC

Frecuencia: 50Hz

Potencia: 15W

Factor de Potencia: <0.5

Ángulo de Proyección: 120°

Tipo de LED: SMD 2835

Tiempo de Vida LED: 25,000 Horas

Lumen: 1350 Lm

Temperatura de Color: 3500K

Empotrable: Sí, en caja Octagonal

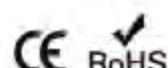
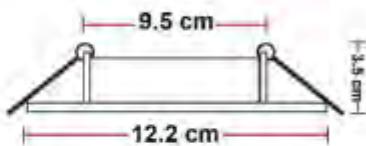
Carcasa: PVC Alto Impacto

Protección: IP44

Equivalente Halógeno: 135W

Dimensiones (cm)

Medidas: 9.5 x 3.5 cm
Ø 12.2 cm



Anexo C. Fichas técnicas de Equipos



Aeolos-H 2kW
windturbinestar.com

| TURBINE | |
|---------------------|---|
| Rated power | 2 kW |
| Start wind speed | 2.5 m/s |
| Cut-in wind speed | 3.0 m/s (6.7 mph) |
| Cut-out wind speed | 25 m/s (55.9 mph) |
| Survival wind speed | 45 m/s (100.7 mph) |
| Design lifetime | 25 years |
| Overall weight | 125 kg (275.5 lbs) including generator and blades |

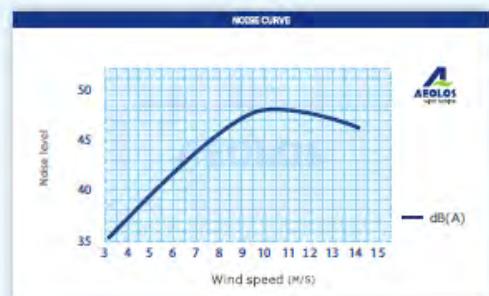
| ROTOR | |
|----------------|-----------------|
| Rotor diameter | 4.0 m (13.1 ft) |
| Rotor speed | 250 rpm |
| Blade material | Glass fiber |

| GENERATOR | |
|----------------------|--|
| Frequency | 50 Hz or 60 Hz (System Output) |
| Voltage | 96 VDC |
| Type | Three Phase Permanent magnetic generator |
| Generator efficiency | >0.96 |

| CONTROL & SAFETY SYSTEM | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Power control | Lateral deflection of the wind wheel |
| Secondary safety system | Electronic brake system |

| TOWERS | |
|---------------------|------|
| Free standing tower | 9 m |
| Guyed tower | 12 m |

| WARRANTY | |
|-------------------|----------|
| Standard warranty | 5 years |
| extended warranty | 10 years |

| Aeolos-H 2kW Wind Turbine Output | | | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Wind Speed(m/s) | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Generator Power(w) | 35 | 90 | 200 | 365 | 600 | 930 | 1380 | 1890 |
| Annual Energy Output(kWh) | 613 | 1419 | 2978 | 5116 | 7884 | 11406 | 15715 | 19686 |

5 YEAR WARRANTY **CE**

Aeolos Wind Energy,Ltd (UK)

27 Old Gloucester Street, London WC1N 3AX
United Kingdom
Tel: +44 208 242 1884
E-mail: sales@windturbinestar.com



LiFePO4 BATTERY SYSTEM LPBF48300



FEATURES



- ⌚ Super long warranty: 5 years warranty.
- 🔋 High quality lithium iron phosphate battery.
-)size Big capacity with small volume for household.
- ⌚ ≥6000 times deep cycle charge and discharge.
- 🛡️ High class of safety with built-in BMS protection.
- ➕ Support 6 pcs connected in parallel mode for expansion.

PRODUCT PARAMETERS

| Model | | LPBF48300 |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Usable Capacity | | 15Kwh |
| Battery Type | | LiFePO4 |
| Nominal Voltage | | 51.2V |
| Operating Voltage | | 48-57.6V |
| Recommend Charge/Discharge Current[1] | | <120A |
| Recommend Charge/Discharge Power[1] | | <6000W |
| Maximum Charge/Discharge Current(15s) | | 200A |
| Maximum Charge/Discharge Power(15s) | | 10000W |
| Depth of Discharge(DOD) | | ≥95% |
| Scalability | | Up to 6 units in parallel |
| Communication | | CAN&RS485 |
| Ingress Protection | | IP21 |
| Cycle Life[2] | | ≥ 6000 Cycles@25°C, 80% DOD |
| Charging Temperature Range | | 0~55°C |
| Discharging Temperature Range | | -20~60°C |
| Display | | LED |
| Installation | | Floor-Mounted |
| Protection | | Built-in smart BMS, Breaker, Fuse |
| Warranty | | 5 Years |
| Net Weight(KG) | | 154KG |
| Gross Weight(KG) | | 177KG |
| Product Dimension(MM) | | 615*350*955MM |
| Package Dimension(MM) | | 718*460*1112MM |

[1] Recommend charge/discharge current/power is affected by temperature and SOC.

[2] Test conditions: 0.2C Charging/Discharging @25°C, 80% DOD

Convenient CAN&RS485 Communication



1. MAIN TECHNICAL SPECIFICATIONS & DATA

1.2 Main technical specifications and data soundproof type

Generator Unit Dimensions:

- Length (L): 920 mm
- Width (W): 520 mm
- Height (H): 760 mm

HYUNDAI Generator Specifications:

| | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------------|---------------|----------------------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Model | Product Size (mm) | | | Packaging Size (mm) | | | Package Material |
| | Length | Width | Height | Length | Width | height | |
| DHY4000SE | 920 | 520 | 760 | 950 | 570 | 790 | Carton |
| DHY6000SE | 920 | 520 | 760 | 950 | 570 | 790 | Carton |
| DHY6000SE-3 | 920 | 520 | 760 | 950 | 570 | 790 | Carton |

| | DHY4000SE | DHY6000SE | DHY6000SE-3 |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|
| Generator Set | 50 / 60 | 50 / 60 | 50 / 60 |
| | 3 / 3.3 kW | 5 / 5.5 kW | 6.3 / 6.9 kW |
| | 3.3 / 3.6 kW | 5.5 / 6.0 kW | 6.9 / 7.6 kW |
| | 230 / 120, 240 | 230 / 120, 240 | 400 / 120, 240 |
| | 14.3 / 30 | 23.9 / 50 | 16.2 / 36 |
| | 2x16A / XX | 2x16A / XX | 1x16A + 2x16A (1~7X1) |
| | LED4 | LED4 | LED4 |
| | 17 | 17 | 17 |
| | 23 / 21 | 16 / 14.5 | 16 / 14.5 |
| | 72 / 72.1 | 72.6 / 72.8 | 72.6 / 72.8 |
| Engine | 12 / 8.3 | 12 / 8.3 | 12 / 8.3 |
| | 17 | 36 | 36 |
| | Diesel | Diesel | Diesel |
| | D300E | D400E | D400E |
| | 6 | 10 | 10 |
| Alternator | Elec. start | Elec. start | Elec. start |
| | 296 | 418 | 418 |
| | 1.1 | 1.65 | 1.65 |
| | A3-1S / A3.3-1S | A5-1S / A5.5-1S | A5-3S / A5.5-3S |
| | 3 / 3.3 | 5 / 5.5 | 6.3 / 6.9 |
| Log-data | 1 | 1 | 0.8 |
| | AVR | AVR | AVR |
| | N.G.(kg) | 160 | 160 |
| | G.W.(kg) | 167 | 167 |
| | Loading capacity 20/40/40HQ | 68/144/144 | 68/144/144 |

(1) Single phase socket thermal protected



| Cerbo GX | |
|--|---|
| Tensión de alimentación | 8 – 70 V CC |
| Montaje | Pared o carril DIN (35 mm) ^[2] |
| Puertos de comunicaciones | |
| Puertos VE.Direct (siempre aislados) | 3 ^[3] |
| VE.Bus (siempre aislado) | 2 tomas RJ45 en paralelo |
| VE.Can | sí - sin aislar |
| Otros | |
| Dimensiones externas (al x an x p) | 78 x 154 x 48 mm |
| Rango de temperatura de trabajo | -20 a +50 °C |
| Normativas | |
| Seguridad | Por determinar |
| EMC | Por determinar |
| Automoción | Por determinar |
| GX Touch 50 | |
| Montaje | Con accesorios de montaje incluidos |
| Resolución de la pantalla | 800 x 480 |
| Otros | |
| Dimensiones externas (al x an x p) | 87 x 128 x 12,4 mm |
| Longitud del cable | 2 metros |
| Notas | |
| 1. Para más información acerca del Cerbo GX y del GX Touch 50, visite la página de la gama de productos Victron GX en Victron live: www.victronenergy.com/live/venus-os-start | |
| 2. Para el montaje sobre un carril DIN se necesita un accesorio adicional: adaptador DIN35. | |
| 3. El máximo indicado en la sección de Rendimiento de la tabla anterior es el número total de dispositivos VE.Direct conectados, como controladores de carga solar MPPT. El total se refiere a todos los dispositivos conectados directamente más los dispositivos conectados mediante USB. El límite está determinado principalmente por la potencia de procesamiento de la CPU. Tenga en cuenta que también hay un límite para los otros tipos de dispositivos de los que a menudo se conectan varios: inversores FV. Normalmente se pueden monitorizar hasta tres o cuatro inversores trifásicos en un CCGX. Los dispositivos con CPU más potentes pueden monitorizar más unidades. | |



Controladores de carga SmartSolar 250V y 99% de eficiencia MPPT 250/60, 250/70, 250/85 & 250/100

Seguimiento ultrarrápido del Punto de Máxima Potencia (MPPT)
Especialmente con cielos nubosos, cuando la intensidad de la luz cambia continuamente, un controlador MPPT ultrarrápido mejorará la recogida de energía hasta en un 30%, en comparación con los controladores de carga PWM, y hasta en un 10% en comparación con controladores MPPT más lentos.

Detección avanzada del Punto de Máxima Potencia en caso de nubosidad parcial
En casos de nubosidad parcial, pueden darse dos o más puntos de máxima potencia (MPP) en la curva de tensión de carga. Los MPPT convencionales suelen seleccionar un MPP local, que no necesariamente es el MPP óptimo. El innovador algoritmo de SmartSolar maximizará siempre la recogida de energía seleccionando el MPP óptimo.

Excepcional eficiencia de conversión
Sin ventilador. La eficiencia máxima excede el 98%.

Algoritmo de carga flexible
Un algoritmo de carga totalmente programable (consulte la página de software de nuestra página web) y ocho algoritmos de carga preprogramados, que se pueden elegir con un selector giratorio (consulte más información en el manual).

Amplia protección electrónica
Protección de sobretensión y reducción de potencia en caso de alta temperatura.

Protección de cortocircuito y polaridad inversa en los paneles FV.

Protección de corriente inversa FV.

Sensor de temperatura interna

Compensa la tensión de carga de absorción y flotación, en función de la temperatura.



Controlador de carga SmartSolar
MPPT 250/100-Tr
Con pantalla conectable opcional.



Controlador de carga SmartSolar
MPPT 250/100-MC4
Sin pantalla

Bluetooth Smart integrado: no necesita mochila

La solución inalámbrica para configurar, supervisar y actualizar el controlador con un teléfono inteligente, una tableta u otro dispositivo Apple o Android.

VE.Direct

Para una conexión de datos con cable a un Color Control GX, otros productos GX, PC u otros dispositivos.

On/Off remoto

Para conectarse a un VE.BUS BMS, por ejemplo.

Relé programable

Se puede programar (entre otros, con un teléfono inteligente) para activar una alarma u otros eventos.

Opcional: pantalla LCD conectable

Simplemente retire el protector de goma del enchufe de la parte frontal del controlador y conecte la pantalla.



| Controlador de carga SmartSolar | MPPT 250/60 | MPPT 250/70 | MPPT 250/85 | MPPT 250/100 |
|--|---|---|---|---|
| Tensión de la batería | Ajuste automático a 12, 24 o 48V (Se precisa una herramienta de software para ajustar el sistema en 36V) | | | |
| Corriente de carga nominal | 60A | 70A | 85A | 100A |
| Potencia PV nominal, 12 V (a,b) | 860W | 1000W | 1200W | 1450W |
| Potencia PV nominal, 24 V (a,b) | 1720W | 2000W | 2400W | 2900W |
| Potencia PV nominal, 48 V (a,b) | 3440W | 4000W | 4900W | 5800W |
| Máxima corriente de corto circuito FV 2) | 35A (máx. 30A x con. MC4) | | | 70A (máx. 30A x MC4 con.) |
| Tensión máxima del circuito abierto FV | | | 250V máximo absoluto en las condiciones más frías 245V en amanecer y funcionando al máximo. | |
| Eficacia máxima | | | 99% | |
| Autoconsumo | | | | Menos de 35mA a 12V / 20mA a 48V |
| Tensión de carga de "absorción" | | | | Valores predeterminados: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6V (Regulable con selector giratorio, pantalla, VE.Direct o Bluetooth) |
| Tensión de carga de "flotación" | | | | Valores predeterminados: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2V (Regulable con selector giratorio, pantalla, VE.Direct o Bluetooth) |
| Algoritmo de carga | | | | adaptativo multifase -16 mV/-32 mV/-64 mV / °C |
| Compensación de temperatura | | | | Polaridad inversa de la batería (fusible, no accesible por el usuario) |
| Protección | | | | Polaridad inversa/Cortocircuito de salida/Sobretensión -30 a +60°C (potencia nominal completa hasta los 40°C) |
| Temperatura de trabajo | | | | 95% sin condensación |
| Humedad | | | | VE.Direct o Bluetooth |
| Puerto de comunicación de datos | | | | Si (conector bifásico) |
| Interruptor on/off remoto | | | IP25 Capacidad nominal CA 240V AC / 4 A - Capacidad nominal CC 4 A hasta 35 V DC, 1 A hasta 60 V DC | |
| Relé programable | | | | Si (no sincronizado) |
| Funcionamiento en paralelo | | | | |
| CARCASA | | | | |
| Color | Azul (RAL 5012) | | | |
| Terminales FV 3) | 35mm ² / AWG2 (modelos Tr), Dos pares de conectores MC4 (modelos MC4 de 250/60 y 250/70), Tres pares de conectores MC4 (modelos MC4 de 250/85 y 250/100) | | | |
| Bornes de batería | | 35mm ² / AWG2 | | |
| Grado de protección | IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión) | | | |
| Peso | 3 kg | 4,5 kg | | |
| Dimensiones (al x an x pr) en mm | Modulos Tr: 185 x 250 x 95 mm Modulos MC4: 216 x 295 x 95 mm | Modulos Tr: 216 x 295 x 103 mm Modulos MC4: 246 x 295 x 103 mm | | |

NORMATIVAS

Seguridad EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2

1a) Si se conecta más potencia PV, el controlador limitará la potencia de entrada al máximo estipulado.

1b) La tensión PV debe exceder en 5 V la Vbat (tensión de la batería) para que arranque el controlador.

Una vez arrancado, la tensión PV mínima será de Vbat + 1V.

2) Un generador fotovoltaico con una corriente de cortocircuito más alta puede dañar el controlador.

3) Modelos MC4 se podrán necesitar varios separadores para conectar en paralelo las cadenas de paneles solares.

Corriente máxima por conector MC4: 5A (los conectores MC4 están conectados en paralelo a un rastreador MPPT)





| | | | | | | |
|---|--|------------------------------------|---|------------------|--|--|
| MultiPlus-II | 12/3000/120-32 24/3000/70-32 48/3000/35-32 | 24/5000/120-50 48/5000/70-50 | 48/8000/110-100 | 48/10000/140-100 | | |
| PowerControl y PowerAssist | Sí | | | | | |
| Comutador de transferencia | 32 A | 50 A | 100 A | 50 A | | |
| Corriente máxima de entrada CA | 32 A | 50 A | 100 A | 50 A | | |
| INVERSOR | | | | | | |
| Rango de tensión de entrada CC | 12V - 9,5-17 V | 24 V - 19-33 V | 48 V - 38-66 V | | | |
| Salida | Tensión de salida: 230 V CA ± 2 % Frecuencia: 50 Hz ± 0,1 % (1) | | | | | |
| Potencia cont. de salida a 25 °C (3) | 3000 VA | 5000 VA | 8000 VA | 10000 VA | | |
| Potencia cont. de salida a 25°C | 2400 W | 4000 W | 6400 W | 8000 W | | |
| Potencia cont. de salida a 40 °C | 2200 W | 3700 W | 5500 W | 7000 W | | |
| Potencia cont. de salida a 65 °C | 1700 W | 3000 W | 4000 W | 6000 W | | |
| Balance neto máximo aparente (corriente retornada a la red) | 3000 VA | 5000 VA | 8000 VA | 10000 VA | | |
| Pico de potencia | 5500 W | 9000 W | 15000 W | 18000 W | | |
| Eficacia máxima | 93 % / 94 % / 95 % | 96 % | 95 % | 96 % | | |
| Consumo en vacío | 13 / 13 / 11 W | 18 W | 29 W | 38 W | | |
| Consumo en vacío en modo AES | 9 / 9 / 7 W | 12 W | 19 W | 27 W | | |
| Consumo en vacío en modo búsqueda | 3 / 3 / 2 W | 2 W | 3 W | 4 W | | |
| CARGADOR | | | | | | |
| Entrada de CA | Rango de tensión de entrada: 187-265 V CA Frecuencia de entrada: 45 - 65 Hz | | | | | |
| Tensión de carga de "absorción" | 28,8 V | 57,6 V | | | | |
| Tensión de carga de "flotación" | 27,6 V | 55,2 V | | | | |
| Modo de almacenamiento | 26,4 V | 52,8 V | | | | |
| Máxima corriente de carga de la batería (4) | 120 / 70 / 35 A | 120 / 70 A | 110 A | 140 A | | |
| Sensor de temperatura de la batería | Sí | | | | | |
| GENERAL | | | | | | |
| Salida auxiliar | Sí (32 A) | | Sí (50 A) | | | |
| Sensor de CA externa (opcional) | 50 A | | | | | |
| Relé programable (5) | Sí | | | | | |
| Protección (2) | a - g | | | | | |
| Puerto de comunicación VE.Bus | Para funcionamiento paralelo (no para los modelos de 8k y 10k) y trifásico, control remoto e integración del sistema | | | | | |
| Puerto de comunicaciones de uso general | Sí , 2 puertos | | | | | |
| On/Off remoto | Sí | | | | | |
| Temperatura de trabajo | -40 a +65 °C (refrigerado por ventilador) | | | | | |
| Humedad (sin condensación) | máx. 95 % | | | | | |
| CARCASA | | | | | | |
| Material y color | acero, azul RAL 5012 | | | | | |
| Grado de protección | IP22 | | | | | |
| Conexión de la batería | Pernos M8 | | Cuatro pernos M8 (2 conexiones positivas y 2 negativas) | | | |
| Conexión 230 V CA | Bornes de tornillo de 13 mm ² (6 AWG) | | Pernos M6 | Pernos M6 | | |
| Peso | 19 kg | 30 kg | 42 kg | 49 kg | | |
| Dimensiones (al x an x pi) | 546 x 275 x 147 499 x 268 x 141 499 x 268 x 141 | 565 x 328 x 240 560 x 320 x 141 | 642 x 363 x 206 | 677 x 363 x 206 | | |
| NORMAS | | | | | | |
| Seguridad | EN-IEC 60335-1, EN-IEC 60335-2-29, EN-IEC 62109-1, EN-IEC 62109-2 | | | | | |
| Emissions, Inmunidad | EN 55014-1, EN 55014-2 EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3 IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-3 | | | | | |
| Sistema de alimentación ininterrumpida | Puede consultar los certificados en nuestro sitio web | | | | | |
| Antisila | Puede consultar los certificados en nuestro sitio web | | | | | |
| 1) Puede ajustarse a 60 Hz | 3) Carga no lineal, factor de cresta 3:1 | | | | | |
| 2) Claves de protección: | 4) A 25 °C de temperatura ambiente | | | | | |
| a) cortocircuito de salida | 5) Relé programable que puede configurarse para las funciones de alarma general, subtensión CC o señal de arranque para el generador. Capacidad nominal CA: 230 V/4 A, Capacidad nominal CC: 4 A hasta 35 VCC y 1 A hasta 80 VCC | | | | | |
| b) sobrecarga | | | | | | |
| c) tensión de la batería demasiado alta | | | | | | |
| d) tensión de la batería demasiado baja | | | | | | |
| e) temperatura demasiado alta | | | | | | |
| f) 230 VCA en la salida del inversor | | | | | | |
| g) ondulación de la tensión de entrada demasiado alta | | | | | | |

Anexo D. Costos de Equipos



| AEOLOS-V 1kW (Grid-on) | Unit Price |
|-------------------------|------------|
| 1kW Wind Turbine | USD 3100 |
| Grid on Controller | USD 560 |
| Grid on Inverter (MPPT) | USD 1150 |
| 6m Monopole Tower | USD 1090 |
| 9m Monopole Tower | USD 1480 |
| 12m Monopole Tower | USD 2180 |
| 12m Hydraulic Tower | USD 3720 |
| 2m Roof Top Tower | USD 380 |
| 3m Roof Top Tower | USD 550 |

| AEOLOS-V 2kW (Grid-off) | Unit Price |
|------------------------------------|------------|
| 2kW Wind Turbine | USD 4100 |
| Grid off Controller (MPPT 48V/96V) | USD 1080 |
| Grid off Inverter | USD 580 |
| 6m Monopole Tower | USD 1090 |
| 9m Monopole Tower | USD 1480 |
| 12m Monopole Tower | USD 2180 |
| 12m Hydraulic Tower | USD 3720 |
| 2m Roof Top Tower | USD 380 |
| 3m Roof Top Tower | USD 550 |

| AEOLOS-V 2kW (Grid-on) | Unit Price |
|-------------------------------------|------------|
| 2kW Wind Turbine | USD 4100 |
| Grid on Controller (with Dump Load) | USD 680 |
| Grid on Inverter (MPPT) | USD 1250 |
| 6m Monopole Tower | USD 1090 |
| 9m Monopole Tower | USD 1480 |
| 12m Monopole Tower | USD 2180 |
| 12m Hydraulic Tower | USD 3720 |
| 2m Roof Top Tower | USD 380 |
| 3m Roof Top Tower | USD 550 |

| AEOLOS-V 3kW (Grid-off) | Unit Price |
|--|------------------|
| 3kW Wind Turbine | USD 5820 |
| Grid off Controller (MPPT 48V) / (PWM 48V) | USD 1350/USD 525 |
| Grid off Inverter | USD 860 |

 Batería de Litio 15kWh 48V LPBF48300 Felicity Solar



S/. 7.375,59

SIN IGV
S/. 6.250,50

Descuento 2% (S/. 7.500,00 sin descuento)

Envío: Envío gratuito a provincias!

Entrega: Recójalo el miércoles, 28.01.2026 en la agencia Marvisur o

Shalom de provincias

Estimated delivery time. Envío gratuito no aplicable para las delegaciones de Marvisur de Lima y Callao. El tiempo de entrega puede variar según destino o rotura de stock, consúltanos para más información.

Fabricante: Felicity Solar | Código de artículo: 1880950

Cantidad:

AÑADIR AL CARRITO

COMPRAR

 Secured by GeoTrust

 Inversor Victron MultiPlus-II 48V 3000VA 35+32A



S/. 2.136,51

SIN IGV
S/. 1.810,60

Descuento 4% (S/. 2.236,65 sin descuento)

Envío: Envío gratuito a provincias!

Entrega: Recójalo el miércoles, 28.01.2026 en la agencia Marvisur o

Shalom de provincias

Estimated delivery time. Envío gratuito no aplicable para las delegaciones de Marvisur de Lima y Callao. El tiempo de entrega puede variar según destino o rotura de stock, consúltanos para más información.

Fabricante: Victron Energy | Código de artículo: 3004043

Cantidad:

AÑADIR AL CARRITO

COMPRAR

 1 año de garantía  14 días de devolución  100% pago seguro

 Secured by GeoTrust

Monitorización Cerbo GX de Victron Energy



S/. 1.031,54 SIN IGV
S/. 874,19

Descuento 7% (S/. 1.105,22 sin descuento)

Envío: Envío gratuito a provincias!

Entrega: Recójalo el martes, 30.12.2025 en la agencia Marvisur o Shalom de provincias

Estimated delivery time. Envío gratuito no aplicable para las delegaciones de Marvisur de Lima y Callao. El tiempo de entrega puede variar según destino o rotura de stock, consultanos para más información.

Fabricante: Victron Energy | Código de artículo: 1700580

Cantidad:

AÑADIR AL CARRITO
COMPRAR

1 año de garantía
14 días de devolución
100% pago seguro



Controlador SmartSolar MPPT 250V 100A TR VICTRON



S/. 2.197,80 SIN IGV
S/. 1.862,54

Envío: Envío gratuito a provincias!

Entrega: Recójalo el jueves, 08.01.2026 en la agencia Marvisur o Shalom de provincias

Estimated delivery time. Envío gratuito no aplicable para las delegaciones de Marvisur de Lima y Callao. El tiempo de entrega puede variar según destino o rotura de stock, consultanos para más información.

Fabricante: Victron Energy | Código de artículo: 2008110

Cantidad:

AÑADIR AL CARRITO
COMPRAR

1 año de garantía
14 días de devolución
100% pago seguro

