

Diseño y evaluación de un sistema híbrido eólico-solar para viviendas unifamiliares en Guayaquil, Ecuador.

Design and evaluation of a hybrid wind-solar system for single-family homes in Guayaquil, Ecuador.

Jorge Javier Acosta Manosalvas



Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad Ciencias de la Ingeniería, Quevedo, Ecuador,
<https://orcid.org/0000-0002-7073-5286>

Miguel Angel Anzules Palma



Universidad Técnica Estatal de Quevedo, cFacultad Ciencias de la Ingeniería, Quevedo, Ecuador,
<https://orcid.org/0009-0004-5644-8127>

Isis Alexa Samaniego Santillan



Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad Ciencias de la Ingeniería, Quevedo, Ecuador,
<https://orcid.org/0009-0003-5052-3846>

Acosta Manosalvas, J. J., Anzules Palma, M. A., & Samaniego Santillan, I. A. (2026). Diseño y evaluación de un sistema híbrido eólico-solar para viviendas unifamiliares en Guayaquil, Ecuador. Ingeniería E Innovación, 14(1). <https://doi.org/10.21897/rii.4237>

Copyright: © 2025 Universidad de Cordoba. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acreditan.

Recibido: 12/01/2026

Aprobado: 24/02/2026

Publicado: 09/03/2026

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo diseñar una turbina eólica de pequeña escala integrada en un sistema híbrido con paneles solares fotovoltaicos y almacenamiento en baterías, con el fin de optimizar el consumo y mejorar la eficiencia energética en una vivienda unifamiliar de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Se empleó una metodología de investigación documental, descriptiva y proyectiva, apoyada en herramientas de modelado CAD y simulación CFD para el diseño aerodinámico de las palas, así como en análisis comparativos para la selección de tecnologías de almacenamiento. Los resultados demostraron que el sistema híbrido propuesto es capaz de satisfacer una demanda promedio de 350 kWh al mes, reducir en un 90% la dependencia de la red eléctrica convencional y garantizar un día de autonomía mediante un banco de baterías de litio-ferrofosfato de 16,2 kWh. Desde el punto de vista técnico y económico, la propuesta resultó viable, logrando una disminución significativa en el costo del consumo eléctrico y contribuyendo a la sostenibilidad energética. En conclusión, el diseño desarrollado constituye una alternativa replicable para viviendas urbanas, promoviendo la autogestión energética y la diversificación de la matriz energética en el contexto ecuatoriano.

Palabras clave: Energías renovables, turbina eólica de pequeña escala, sistema híbrido, eficiencia energética, Guayaquil, almacenamiento de energía.

ABSTRACT

This study aimed to design a small-scale wind turbine integrated into a hybrid system with photovoltaic solar panels and battery storage, in order to optimize energy consumption and improve efficiency in a single-family household located in Guayaquil, Ecuador. A documentary, descriptive, and projective research methodology was applied, supported by CAD modeling and CFD simulation tools for the aerodynamic design of the blades, as well as comparative analyses for the selection of storage technologies. The results showed that the proposed hybrid system can meet an average demand of 350 kWh per month, reduce dependence on the conventional power grid by 90%, and ensure one day of autonomy using a 16.2 kWh lithium-iron-phosphate battery bank. From a technical and economic perspective, the proposal proved viable, achieving a significant reduction in electricity costs and contributing to energy sustainability. In conclusion, the developed design represents a replicable alternative for urban households, promoting energy self-management and the diversification of the energy matrix in the Ecuadorian context.

Keywords: Renewable energy, small-scale wind turbine, hybrid system, energy efficiency, Guayaquil, energy storage.

INTRODUCCIÓN

La dependencia global de fuentes energéticas convencionales y la elevada demanda eléctrica en sectores residenciales generan tensiones en los sistemas de suministro, comprometiendo la sostenibilidad y estabilidad económica. En Ecuador, esta vulnerabilidad se manifiesta en la escasa diversificación de la matriz energética, con una marcada dependencia de la generación hidroeléctrica, que representa aproximadamente el 92% de la generación eléctrica nacional, lo que si bien ha permitido exportar energía y generar ahorros económicos significativos, afectando la seguridad energética ante fenómenos climáticos. Esta dependencia, unida a las tensiones en el suministro, se evidencia en ciudades como Guayaquil, donde la crisis energética ha incrementado la demanda de generadores de combustión interna como respaldo, los cuales presentan desventajas inherentes como ruido, voluminosidad, dificultad de instalación y emisiones contaminantes. En este contexto, las energías renovables distribuidas emergen como una alternativa viable para mejorar la eficiencia, autonomía y resiliencia energética en el ámbito urbano.

La ciudad de Guayaquil, principal centro económico y poblacional del Ecuador, presenta condiciones climáticas particularmente adecuadas para el aprovechamiento descentralizado de recursos renovables. Con velocidades medias de viento en el rango de 3.5 a 5 m/s y niveles de radiación solar que superan las 1,500 horas de insolación anual, el potencial para implementar sistemas híbridos de pequeña escala es considerable. Sin embargo, la transición de este potencial técnico a soluciones implementadas y eficaces enfrenta desafíos específicos. Existe una brecha tecnológica y de diseño palpable para el contexto urbano de Guayaquil, donde la integración de sistemas eólicos se ve obstaculizada por la turbulencia generada por el paisaje construido, la variabilidad direccional del viento y la necesidad de tecnologías con bajo impacto visual y acústico. A esto se suma la falta de estudios integrales que evalúen, desde un enfoque técnico-económico, la integración sinérgica de turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), paneles solares fotovoltaicos de alta eficiencia y sistemas de almacenamiento avanzado, dimensionados específicamente para el patrón de consumo de una vivienda unifamiliar típica en la ciudad.

Por lo tanto, este estudio se plantea con el objetivo principal de diseñar y evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema híbrido eólico-solar con almacenamiento en baterías, destinado a optimizar el consumo y maximizar la eficiencia energética en una vivienda unifamiliar representativa de Guayaquil. La investigación emplea una metodología que combina modelado CAD, simulaciones computacionales de dinámica de fluidos (CFD) para el diseño aerodinámico de un VAWT, y análisis multicriterio para la selección de componentes, con el fin de proponer una solución robusta, replicable y adaptada a las singulares condiciones climáticas y urbanas de la ciudad. El artículo se estructura en secciones que detallan el marco metodológico, presentan los resultados del diseño y la simulación, analizan la viabilidad integral del sistema y derivan conclusiones que buscan contribuir a la literatura sobre generación distribuida y a la política de diversificación energética en el Ecuador.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Energía Eólica Y Solar: Fundamentos

Fundamentos de la Energía Eólica

La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento, la cual puede convertirse en energía mecánica o eléctrica mediante aerogeneradores. La potencia disponible en el viento que atraviesa un área barrida está dada por la ecuación fundamental:

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire (aproximadamente 1.172 kg/m³ en Guayaquil a 28°C) y V es la velocidad del viento [1]. Sin embargo, no toda esta potencia puede ser extraída. El límite de Betz establece que la máxima eficiencia teórica para cualquier turbina eólica es del 59.3% para turbinas de eje horizontal (HAWT) y hasta el 64% para turbinas de eje vertical (VAWT) [2]. La eficiencia real se mide mediante el coeficiente de potencia (C_p), definido como:

$$C_p = \frac{P_{\text{mecánica}}}{P_{\text{viento}}} = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho S V^3}$$

donde τ es el torque y ω la velocidad angular del rotor. Para aplicaciones urbanas donde predominan vientos moderados y multidireccionales, los VAWT presentan ventajas significativas debido a su capacidad de operar con vientos provenientes de cualquier dirección sin necesidad de sistemas de orientación.

Fundamentos de la Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica transforma directamente la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. El rendimiento de un panel solar depende de factores como la irradiancia, la temperatura de operación y la eficiencia de conversión del material semiconductor. En Guayaquil, con una irradiancia solar promedio de aproximadamente 4.8 kWh/m²/día, el potencial para generación fotovoltaica es considerable [3].

Sistemas Híbridos y Almacenamiento

Los sistemas híbridos eólico-solar aprovechan la complementariedad temporal de ambos recursos: mientras la generación solar es máxima durante las horas diurnas, la eólica puede presentar mayor constancia durante la noche y en ciertas estaciones. Esta sinergia reduce la necesidad de almacenamiento y aumenta la confiabilidad del sistema [4].

El dimensionamiento del almacenamiento es crítico para garantizar la autonomía del sistema. La capacidad requerida del banco de baterías puede calcularse mediante:

$$C_{\text{Bat}} \left(\text{Ah} \right) = \frac{D_r \cdot N}{V_{\text{bat}} \cdot P_{\text{dm}} \cdot F_{\text{ct}}}$$

donde D_r es la demanda diaria de energía corregida por eficiencias N son los días de autonomía deseada, V_{bat} es el voltaje del banco, P_{dm} es la profundidad máxima de descarga permitida, y F_{ct} es un factor de corrección por temperatura [5]. Para aplicaciones residenciales, las baterías de litio-hierro-fosfato (LiFePO4) han demostrado ventajas significativas en términos de densidad energética, vida útil (>6000 ciclos) y seguridad operativa [6].

1.2. Mercado energético del Ecuador

El sector energético ecuatoriano se caracteriza por una generación predominante hidroeléctrica, con una capacidad que pasó de 4.070 MW en 2006 a 8.826,89 MW en 2018. La transmisión se realiza a través del Sistema Nacional de Transmisión (SNT) a 500 kV, 230 kV y 138 kV, con interconexiones internacionales que favorecen la estabilidad del sistema. Pese a las inversiones, problemas de diseño, corrupción y variabilidad climática han provocado crisis e interrupciones desde 2023 [7]. Los datos del CENACE (2025) indican que la producción máxima iguala la demanda máxima, forzando a la infraestructura a operar al límite y comprometiendo su mantenimiento y resiliencia [17] (Ver Fig. 1).

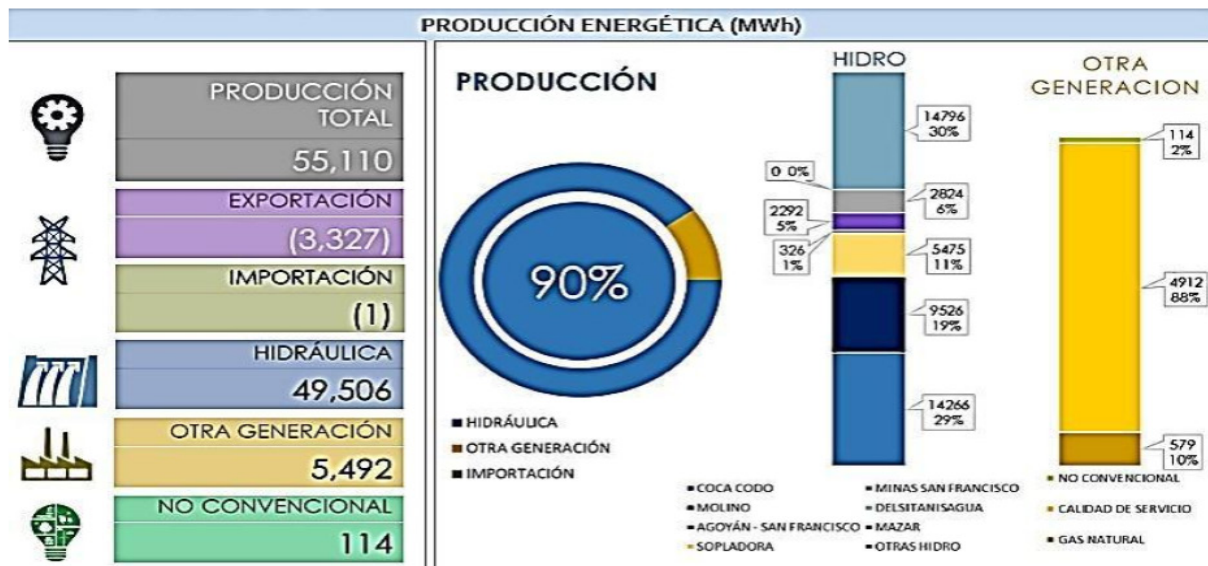


Figura 1. Producción energética del país [8].

1.3. Energía Eólica Y Solar: Fundamentos

Energía eólica

Es una fuente limpia y renovable que aprovecha el viento, es un recurso inagotable, por lo que su naturaleza es renovable, y su utilización no genera ninguna contaminación; por cada MWh generado, se evita la emisión de aproximadamente 600 kg de CO₂, 1,33 kg de SO_x y 1,67 kg de NO_x [1].

Energía solar

Se obtiene de la radiación electromagnética del sol y puede convertirse en energía térmica (fototérmica) o eléctrica (fotovoltaica) [9]. Es especialmente útil en comunidades aisladas. La tecnología fotovoltaica (FV) ha crecido aceleradamente, con el silicio como material predominante, aunque la escasez de este ha impulsado el desarrollo de películas delgadas (CIGS) [10]. A pesar de sus beneficios, la producción de paneles conlleva impactos ambientales por el uso de silicio, vidrio y otros materiales.

1.4. Fundamentos teóricos del diseño y funcionamiento del sistema

Selección de materiales

Los materiales para aerogeneradores deben ser ligeros y resistentes. La fibra de vidrio y fibra de carbono son comunes en aspas por su alta resistencia y bajo peso, aunque el carbono es más costoso. Para estructuras se usan acero y aleaciones de aluminio, y en generadores, imanes de neodimio (NdFeB) [11].

Material	Esfuerzo máximo (ksi)	Deformación típica (pulg/pulg)	Costo Aproximado (\$/kg)	Propiedades	Aplicación
Fibra de vidrio	500	0.015	2-4	Resistente, ligera y económica	Palas, carcasas
Fibra de carbono	600	0.012	20-50	Alta resistencia y rigidez, pero costosa	Palas avanzadas
Polímeros reciclables	5 – 10	0.05 – 0.10	5-15	Menos impacto ambiental, buena durabilidad	Palas, recubrimientos
Acero estructural	36 – 50	0.20	0.50-2	Resistente, pero pesado	Torres y bases
Aleaciones de Aluminio	70 – 80	0.08 – 0.12	3-7	Ligero, pero menor resistencia que el acero	Componentes estructurales
Neodimio (NdFeB)	50 – 60 (muy frágil)	<0.005	100-150	Alta eficiencia magnética	Generadores

Tabla 1. Propiedades y aplicaciones de materiales comunes en aerogeneradores.

Nota. Propiedades generales de los materiales con los que se fabrican los componentes que conforman los Aerogeneradores [11].

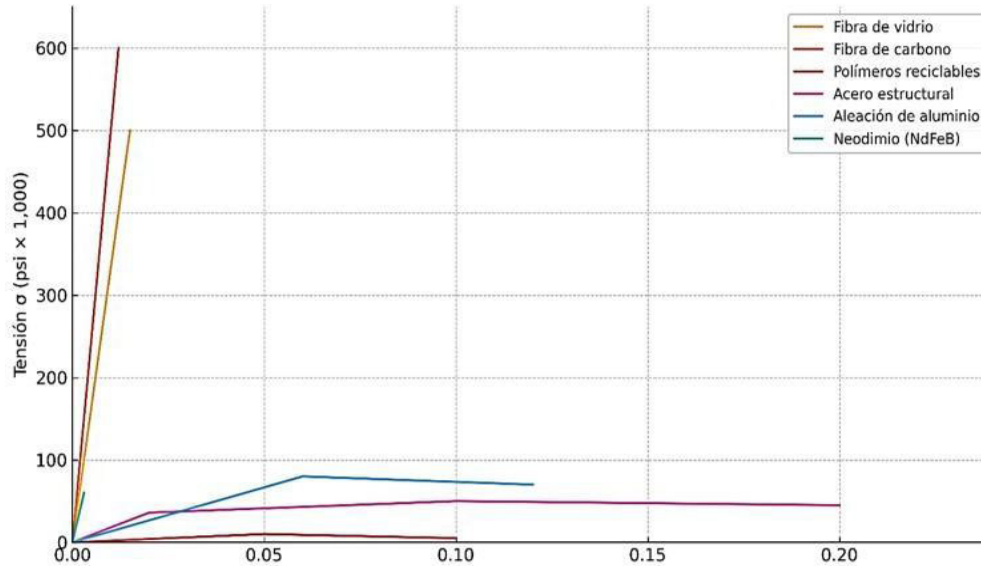


Figura 2. Gráfica de esfuerzo vs. deformación de materiales para aerogeneradores.

Aerodinámica y diseño de aspas

El diseño aerodinámico de las palas es crucial para transformar la energía cinética del viento en rotación mecánica. Basado en el principio de Bernoulli, la diferencia de velocidades y presiones entre el extradós y el intradós del perfil genera una fuerza de sustentación (Lift) que produce el par rotacional [12] (Ver Fig. 3).

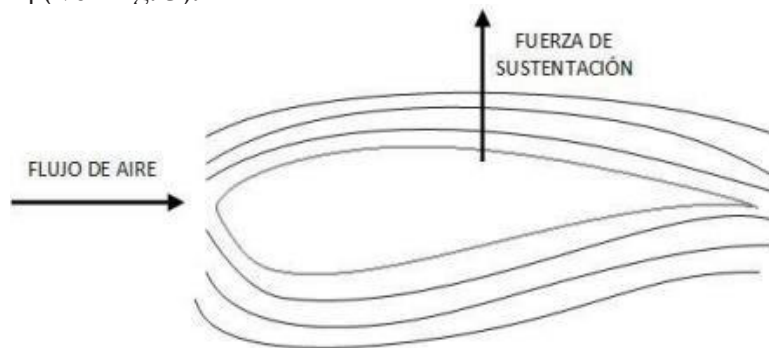


Figura 3. Fuerza de sustentación ejercida sobre un perfil NACA [2].

La eficiencia aerodinámica se evalúa mediante coeficientes adimensionales:

- Coeficiente de sustentación (C_L): Aumenta linealmente con α hasta un ángulo crítico, donde ocurre la pérdida de sustentación [2].
- Coeficiente de arrastre (C_D): Debe minimizarse para maximizar la eficiencia. La relación C_L/C_D indica la calidad aerodinámica del perfil [2].
- Número de Reynolds (Re): Define las condiciones del flujo de fluido alrededor del perfil [11].

Sistemas de Almacenamiento

Las baterías de litio-hierro-fosfato (LiFePO₄) han emergido como la tecnología preferida para almacenamiento estacionario residencial debido a su extensa vida útil (>6000 ciclos al 80% DoD), seguridad intrínseca y costos nivelados competitivos frente a tecnologías de plomo-

ácido [6].

Tabla 2. Comparativa de tecnologías de almacenamiento para sistemas híbridos

Tecnología	Densidad Energética (Wh/kg)	Vida Útil (ciclos al 80% DoD)	Costo Relativo	Aplicación recomendada
Plomo-ácido	30-40	500-800	Bajo	Sistemas de respaldo ocasional
NMC (Li-ion)	150-200	2000-3000	Medio	Movilidad eléctrica
LiFePO4	90-120	>6000	Medio-Alto	Almacenamiento residencial
Flow Batteries	20-30	>10000	Alto	

Componentes y control

Un sistema híbrido básico incluye: paneles solares, aerogenerador, banco de baterías (almacenamiento) e inversores/controladores de carga. Las estrategias de control pueden ser centralizadas, distribuidas o híbridas, para optimizar la gestión energética [4].

Tabla 3. Componentes clave de un sistema de generación energético mixto.

Componentes Clave	Funcionamiento
Paneles solares	Transforman la radiación solar en energía eléctrica.
Sistemas Aerogeneradores	Convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica.
Baterías	Guardan el sobrante de energía para su utilización en periodos de generación reducida.
Transformadores/Inversores	Administran el intercambio de energía entre los elementos AC y DC.

Tabla 4. Estrategias de control en sistemas híbridos.

Estrategias de Control	Funcionamiento
Control centralizado	Un solo controlador administra todos los elementos.
Control distribuido	Cada fuente cuenta con su controlador propio, sincronizado para mejorar el sistema.
Técnicas conjuntas	Fusionan estrategias centralizadas y distribuidas para balancear eficacia y solidez.

2. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación y enfoque

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, no experimental y de corte aplicado-documental, orientado al diseño y evaluación técnica de un sistema híbrido eólico-solar para una vivienda unifamiliar ubicada en el sector Sauces 3, Guayaquil, Ecuador. El estudio combinó métodos descriptivos y proyectivos para analizar las condiciones existentes y traducir los hallazgos en un diseño viable y replicable.

2.2. Caracterización del sitio y recolección de datos

Sitio de Estudio

La unidad de análisis fue una vivienda unifamiliar de 84 m² de construcción, seleccionada por representar un patrón constructivo y de consumo típico de clase media en el norte de Guayaquil. El criterio de selección consideró: (1) acceso a datos climáticos históricos confiables, (2) patrón de consumo eléctrico documentado, y (3) características arquitectónicas representativas de la zona.

Fuentes de Datos

Se emplearon fuentes primarias y secundarias:

- Primarias: Entrevista semiestructurada al propietario y registro detallado de consumo energético (potencia, horas de uso diario, frecuencia de uso por equipo).
- Secundarias: Datos climáticos históricos (2018-2023) del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) e Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para velocidad del viento, dirección, radiación solar, temperatura y humedad en Guayaquil.

2.3. Dimensionamiento del sistema híbrido

Estimación de la Demanda Energética

El consumo eléctrico mensual se determinó a partir de facturas históricas y un inventario detallado de equipos, utilizando la ecuación:

$$E_{\text{consumo}} = \sum_{i=1}^n \left(P_i \cdot h_i \cdot d_i \right) \quad (4)$$

donde P_i es la potencia nominal del equipo i , h_i las horas de uso diario, y d_i los días de uso mensual. Se identificó una demanda promedio de 350 kWh/mes (11.7 kWh/día), con un factor de simultaneidad del 0.85 para el cálculo de potencia pico.

Dimensionamiento del Subsistema Eólico

Considerando la velocidad media del viento en el sitio ($V_{\text{prom}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), el área barrida (S) requerida para generar la potencia objetivo ($P_{\text{obj}} = 1 \text{ kW}$) se calculó mediante:

$$S = \frac{2P_{obj}}{\rho \cdot V_{prom}^3 \cdot C_p \cdot \eta_g}$$

donde:

- $\rho = 1.172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (densidad del aire a 28°C)
- $C_p = 0.21$ (coeficiente de potencia objetivo para VAWT)
- $\eta_g = 0.85$ (eficiencia del generador)

Dimensionamiento del Subsistema Solar

La potencia pico fotovoltaica requerida se determinó considerando:

- Irradiación solar media en Guayaquil: $H = 4.8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$
- Eficiencia del panel: $\eta_{PV} = 0.227$ (Trina Solar Vertex S)
- Pérdidas del sistema: $L_s = 0.15$

$$P_{PV} = \frac{E_{diaria}}{H \cdot \eta_{PV} \cdot (1 - L_s)} \quad (6)$$

$$P_{PV} = \frac{11.7}{4.8 \cdot 0.227 \cdot 0.85} = 12.6 \text{ kWp}$$

Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento

La capacidad del banco de baterías se calculó para garantizar 1 día de autonomía completa, aplicando la metodología de la norma IEC 61427:

$$C_{Bat} = \frac{E_{diaria} \cdot N_{autonomía}}{V_{sistema} \cdot DoD \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{bat} \cdot (1 - L_{cable})} \quad (7)$$

donde:

- $N_{autonomía} = 1 \text{ día}$
- $V_{sistema} = 48 \text{ V}$ (voltaje seleccionado)
- $DoD = 0.80$ (profundidad de descarga para LiFePO4)
- $\eta_{inv} = 0.90$ $\eta_{bat} = 0.95$ (eficiencias)
- $L_{cable} = 0.02$ (pérdidas en cableado)

$$C_{Bat} = \frac{11.7 \cdot 1}{48 \cdot 0.80 \cdot 0.90 \cdot 0.95 \cdot 0.98} = 0.363 \text{ kWh}$$

Se especificó un banco de baterías LiFePO4 de 16.2 kWh nominales (11.5 kWh útiles).

2.4. Diseño aerodinámico y simulación cfd

Modelado CAD

Se diseñaron tres configuraciones de rotor VAWT en SolidWorks 2023:

- Modelo A: Alta solidez ($\sigma=1.2$), radio 0.75 m, perfil NACA 4212
- Modelo B: Solidez media ($\sigma=1.11$), radio 1.35 m, perfil NACA 4212
- Modelo C: Alta solidez ($\sigma=2.78$), radio 1.08 m, perfil NACA 4412

Los parámetros geométricos se optimizaron iterativamente para maximizar el coeficiente de potencia (C_p) mediante teoría de momento de elemento de pala adaptada para VAWT.

Configuración de Simulación CFD

Las simulaciones se realizaron en Ansys Fluent 2023 R1 con la siguiente configuración:

Dominio computacional:

- Dimensiones: $20D \times 15D \times 10D$ (ancho \times alto \times profundidad)
- Distancia entrada-rotor: $10D$
- Distancia rotor-salida: $10D$

Mallado:

- Tipo: Híbrido tetra/hexa con capa límite
- Elementos totales: 3.5 millones
- Refinamiento zona rotor: tamaño celda $0.1D$
- Capa límite: 15 capas, crecimiento 1.2, primer espesor $y^+ = 1$

Modelos físicos:

- Solucionador: Pressure-based, steady-state
- Modelo de turbulencia: $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport)
- Esquema de discretización: Second Order Upwind para momentum
- Algoritmo de acoplamiento: SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)

Condiciones de frontera:

- Entrada: Velocity-inlet, $V = 5 \frac{m}{s}$ (uniforme)
- Salida: Pressure-outlet (0 gauge pressure)
- Rotor: Wall, condición no-deslizante, velocidad angular especificada
- Dominio externo: Wall, condición deslizante

Criterios de convergencia:

- Residuals: $< 1 \times 10^{-4}$ para continuidad y ecuaciones de momentum
- Monitoreo: Coeficientes de fuerza (lift, drag) y torque estables ($\pm 1\%$ en 100 iteraciones)
- Iteraciones máximas: 2000 por condición

Parámetros de Evaluación

Para cada modelo se calcularon:

- Coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (8)$$

- Coeficiente de torque:

$$C_Q = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho ARV^2}$$

- Relación de velocidad punta:

$$TSR = \frac{\omega R}{V}$$

- Eficiencia aerodinámica:

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_{p \text{ max teórico}}}$$

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del recurso energético y demanda en Guayaquil

Para establecer el potencial de generación renovable en el sitio de estudio (Sauces 3, Guayaquil), se analizaron datos climáticos históricos. Los resultados indicaron una velocidad media del viento en un rango de 3.5 a 5 m/s, con vientos predominantes del suroeste, condiciones que se consideran aptas para la operación de aerogeneradores de pequeña escala. La dirección y magnitud del viento se confirmaron mediante la rosa de los vientos mostrada en la Figura 4 [9, 13].

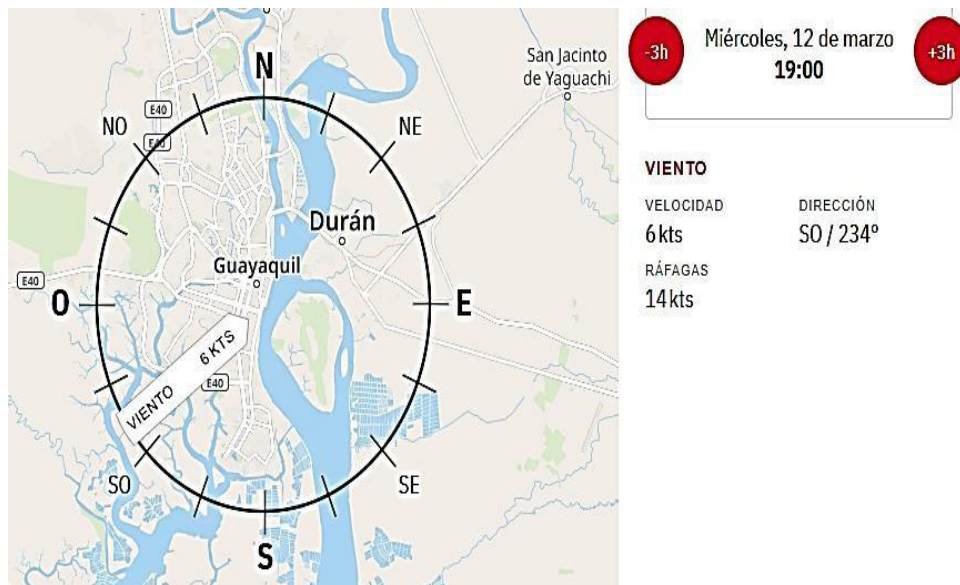


Figura 4. Rosa de los vientos de Guayaquil [14].

Nota. La figura muestra la dirección predominante del viento (suroeste) y la magnitud de las ráfagas (hasta 14 kts) en la zona de estudio para el año 2025.

Por otro lado, la caracterización del recurso solar arrojó que Guayaquil cuenta con aproximadamente 1580 horas de insolación anual, con una temperatura media de 25.2°C y una humedad relativa promedio del 75%, parámetros que favorecen la generación fotovoltaica aunque exigen consideraciones de eficiencia a altas temperaturas [3, 15].

El análisis del consumo energético de la vivienda unifamiliar de 84 m², obtenido a partir de facturas históricas y un inventario detallado de equipos eléctricos, permitió establecer una demanda energética promedio de 350 kWh/mes (11.7 kWh/día). El perfil de consumo identificó un mayor uso durante las horas nocturnas, lo que resalta la necesidad de un sistema de almacenamiento o generación complementaria para esas horas.

3.2. Selección de tecnologías mediante análisis multicriterio

Para seleccionar los componentes óptimos del sistema híbrido, se aplicó un método de criterios ponderados. Se definieron ocho criterios de evaluación, que incluyeron aspectos técnicos, ambientales y de integración sistémica (Ver Tabla 5). Tras asignar ponderaciones porcentuales a cada criterio (Ver Tabla 5), se evaluaron y puntuaron (escala 1-5) las principales tecnologías disponibles en el mercado ecuatoriano.

Tabla 5. Criterios de evaluación para la selección de tecnologías.

Criterio	Descripción
Potencia nominal	Capacidad de generación eléctrica del dispositivo.
Velocidad de conexión (cut-in)	Velocidad mínima de viento o luz para generar energía.
Eficiencia o rendimiento	Relación entre energía generada y potencial disponible.
Nivel de ruido (solo eólicos)	Relevante en zonas urbanas.
Peso/dimensiones	Factor de instalación en techos residenciales.
Certificaciones	Normas internacionales que garantizan calidad y seguridad.
Durabilidad y robustez	Vida útil esperada y tolerancia a condiciones climáticas.
Compatibilidad en sistemas Híbridos	Capacidad de trabajar con baterías/inversores en red u off-grid.

Tabla 6. Ponderación (%) asignada a cada criterio de evaluación.

Criterio	Peso (%)
Potencia nominal	20
Velocidad de conexión (cut-in)	10
Eficiencia o rendimiento	25
Nivel de ruido	10
Peso/dimensiones	10
Certificaciones	10
Durabilidad y robustez	10
Compatibilidad en híbridos	5
Total	100

La evaluación comparativa de los aerogeneradores de eje vertical (Ver Tabla 7) arrojó que el modelo UGE-4K obtuvo un puntaje ponderado total de 4.8, superando al modelo Windspire (3.4). Este resultado se debió principalmente a su mayor potencia nominal (4 kW), su baja velocidad de conexión (3.5 m/s) y sus certificaciones internacionales completas (IEC-61400-2).

Tabla 7. Puntuación (1-5) de los aerogeneradores evaluados por criterio.

Criterio	UGE-4K	Windspire
Potencia nominal	5 (4 kW)	2 (1 kW)
Vel. conexión	5 (3.5 m/s)	3 (4 m/s)
Eficiencia	5	3
Nivel de ruido	5 (38 dB)	4
Peso/dimensiones	3 (444 kg, 4.4 m)	4 (más liviano)
Certificaciones	5 (IEC completas)	4
Durabilidad/robustez	5 (fibra vidrio/carbono)	4
Compatibilidad híbrida	5	4

En la evaluación de paneles solares (Ver Tabla 8), el modelo Trina Solar Vertex S alcanzó el mayor puntaje ponderado (4.6), destacando por su alta eficiencia (hasta 22.7%) y sus certificaciones de calidad, como la IEC 62804 para degradación potencialmente inducida (PID).

Tabla 8. Puntuación (1-5) de los paneles solares evaluados por criterio.

Criterio	Trina Solar	JA Solar	Canadian Solar
Potencia nominal	4 (475 W)	4 (370 W)	5 (520 W)
Vel. conexión (no aplica)	-	-	-
Eficiencia	5 (22.7%)	4 (20.9%)	4 (20.4%)
Nivel de ruido	-	-	-
Peso/dimensiones	4	3	3
Certificaciones	5 (PID, IEC)	5	4
Durabilidad/robustez	5	4	5
Compatibilidad híbrida	5	4	5

La síntesis de la selección se presenta en la Tabla 9, que confirma al aerogenerador UGE-4K y al panel Trina Solar Vertex S como las tecnologías óptimas para integrar el sistema híbrido propuesto.

Tabla 9. Resultado final de la selección multicriterio.

Tecnología	Modelo Seleccionado	Puntaje Total
Aerogenerador	UGE-4K	4.8
Panel Solar	Trina Solar Vertex S	4.6

3.3. Diseño aerodinámico y simulación cfd de turbinas VAWT

Tres modelos conceptuales de turbina eólica de eje vertical (VAWT) fueron definidos mediante el uso de software CAD (SolidWorks), diferenciándose por variaciones en parámetros clave como el radio del rotor, la longitud de la pala y la solidez. Los diseños, identificados como Modelo A, B y C, se presentan en las Figuras 5, 6 y 7, respectivamente.

El perfil aerodinámico utilizado para el diseño de este modelo fue el NACA 4212, perfil comúnmente utilizado para el diseño de aerogeneradores.

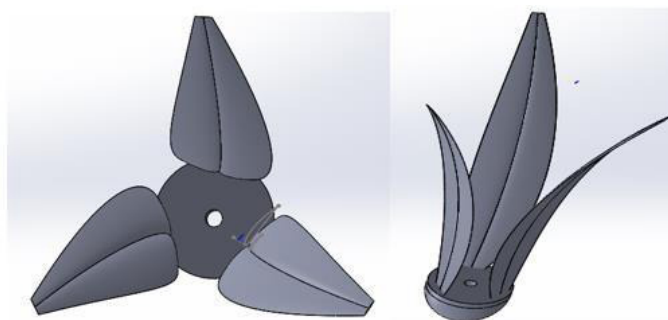


Figura 5. Modelo 1 de aerogenerador (inspirado en semilla alada).

Nota. Diseño de alta solidez (1.2) con perfil NACA 4212.

En el segundo modelo el perfil aerodinámico utilizado para el diseño de este fue el NACA 4212, perfil comúnmente utilizado para el diseño de aerogeneradores y el rotor cuenta con 3 aspas, la separación es equidistante entre sí.

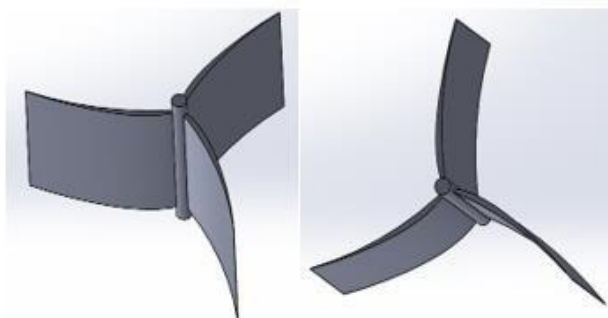


Figura 6. Modelo 2 de aerogenerador (forma de rotor).

Nota. Diseño de solidez media (1.11) con perfil NACA 4212.

El tercer modelo en cambio tiene forma trapezoidal, perfil NACA 4412, este modelo cuenta con 3 aspas en forma de hoja, las cuales están equidistantes entre sí, separación igual entre las palas alrededor de un eje de 360° .

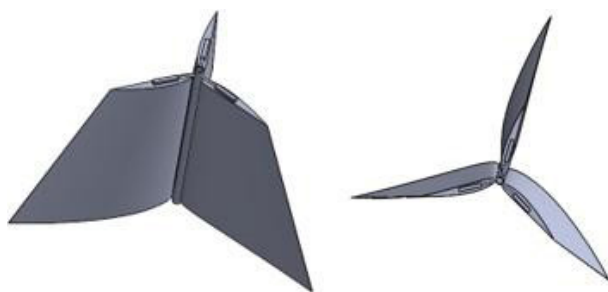


Figura 7. Modelo 3 de aerogenerador (forma trapezoidal).

Nota. Diseño de alta solidez (2.78) con perfil NACA 4412.

Posteriormente, se realizaron simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para evaluar el comportamiento aerodinámico de cada modelo bajo una velocidad de viento de diseño de 5 m/s. Los parámetros de diseño y los resultados clave de las simulaciones se consolidaron en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de diseño y desempeño de los tres modelos de VAWT.

Parámetros de diseño	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Radio del rotor (m)	0,75	1,35	1,08
Longitud de la pala (m)	2	1,2	1
Cuerda de la pala (m)	0,3	0,5	1
Número de palas	3	3	3
Área barrida (m ²)	3	3,24	2,16
Solidez	1,2	1,11	2,78
Coefficiente de potencia	0,222	0,21	0,31
Relación de velocidad de punta	0,8562	1,2255	0,7356
Potencia generada (W)	48,878	48,8785	48,8783
Potencia disponible del viento (W)	219,75	237,33	158,22

Los resultados de las simulaciones CFD indicaron que el Modelo B presentó el mejor desempeño aerodinámico general, caracterizado por un flujo más estable, una recirculación mínima y una relación de velocidad de punta (TSR) de 1.225, cercana al rango óptimo para VAWT. Este modelo generó una potencia de 48.9 W en las condiciones simuladas, con un coeficiente de potencia (C_p) de 0.21. En contraste, el Modelo A mostró alta recirculación y el Modelo C un comportamiento asimétrico, lo que los hizo menos eficientes. Con base en estos resultados, el Modelo B fue seleccionado para su integración en el sistema híbrido.

3.4. Dimensionamiento del sistema híbrido y de almacenamiento

El dimensionamiento técnico se basó en la demanda de 350 kWh/mes y el potencial de los recursos renovables caracterizados.

El banco de baterías se dimensionó para garantizar un día completo de autonomía, considerando los siguientes parámetros:

- Demanda diaria (E_u): 11.7kWh/día
- Días de autonomía : (N): 1día
- Voltaje del sistema (V_{sys}) : 48V
- Profundidad de descarga (DoD): 0.80 % para LiFePO4
- Eficiencia del inversor (η_{inv}): 0.90 %
- Eficiencia de batería (η_{bat}): 0.95%

- Pérdidas en cableado (L_c): 0.02%

Cálculo de capacidad requerida:

$$C_{\text{Bat}} = \frac{E_u \times N}{V_{\text{sys}} \times \text{DoD} \times \eta_{\text{inv}} \times \eta_{\text{bat}} \times (1 - L_c)} = \frac{11.7 \times 1}{48 \times 0.80 \times 0.90 \times 0.95 \times 0.98} = 0.363 \text{ kWh} \rightarrow 337 \text{ Ah a 48V}$$

El sistema de almacenamiento energético está conformado por un banco de baterías LiFePO_4 con una capacidad nominal de 16.2 kWh y una capacidad útil de 11.5 kWh, equivalente a una configuración de 337 Ah a 48 V. Esta capacidad resulta suficiente para cubrir el 100 % de la demanda nocturna del sistema, además de proporcionar respaldo energético durante periodos de baja generación.

3.5. simulación del desempeño energético

El desempeño energético del sistema híbrido (fotovoltaico + eólico + baterías) fue evaluado mediante una simulación realizada para un mes típico de operación. El perfil horario obtenido, evidencia la complementariedad entre las fuentes de generación: la energía solar fotovoltaica cubre la demanda durante el periodo diurno y permite la carga del banco de baterías; la generación eólica contribuye de manera variable, presentando picos en distintos momentos del día; mientras que el sistema de almacenamiento suministra energía de forma estable durante el periodo nocturno (Ver Fig. 10).

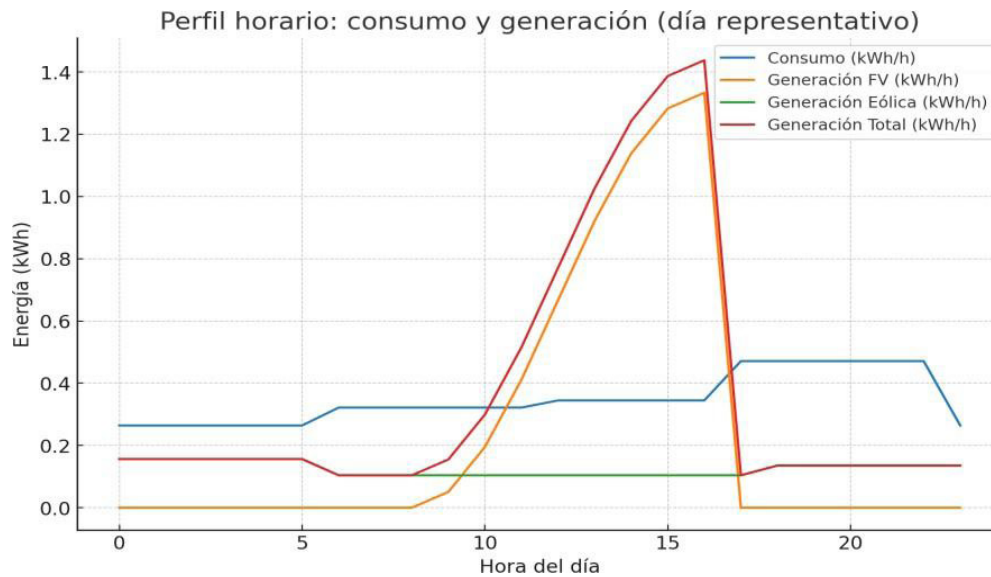


Figura 10. Perfil horario simulado: consumo vs generación FV y eólica.

Nota. El gráfico muestra cómo la generación híbrida cubre la demanda a lo largo del día, con las baterías compensando los periodos de baja generación.

Análisis por periodo:

- **06:00 - 18:00:** La generación fotovoltaica cubre entre el 60-85% de la demanda, con excedentes cargando las baterías hasta alcanzar 95% SOC.
- **18:00 - 22:00 (pico nocturno):** Las baterías aportan el 70% de la demanda, complementado por generación eólica cuando disponible.
- **22:00 - 06:00:** El sistema opera principalmente con almacenamiento, manteniendo un SOC mínimo del 30% como reserva de seguridad.

El balance energético diario resultante fue:

- Generación fotovoltaica: 14.2 kWh (76% del total)
- Generación eólica: 1.2 kWh (6% del total)
- Descarga de baterías: 3.3 kWh (18% del total)
- Autosuficiencia del sistema: 94% (solo 6% requerido de red en condiciones adversas)

El estado de carga (SoC) de la batería en un ciclo de 24 horas (Ver Fig. 11) se mantuvo dentro de los límites operativos seguros, nunca descendiendo por debajo del 20% (DoD del 80%) y recargándose completamente durante el día, validando el dimensionamiento del almacenamiento.

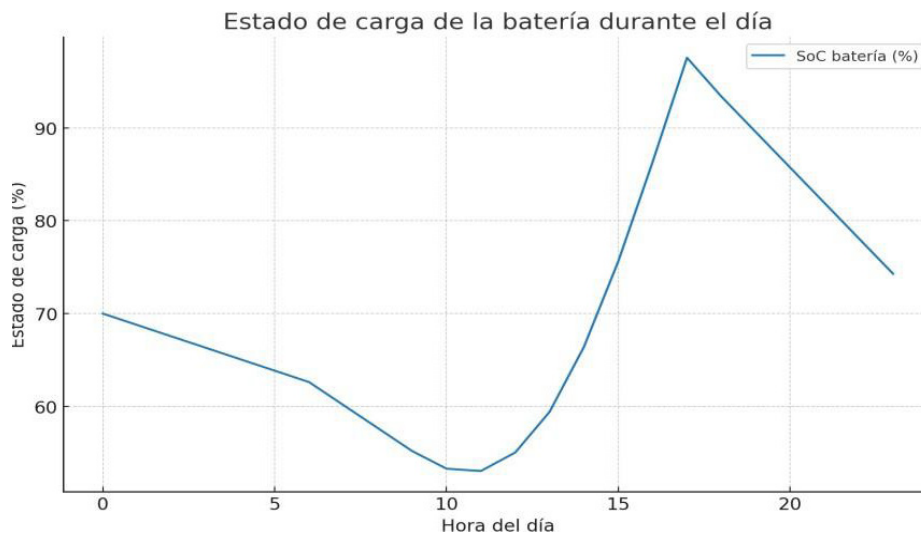


Figura 11. Estado de carga (SoC) de la batería en un ciclo de 24 horas.

Nota. La simulación confirma que el sistema de almacenamiento puede proveer autonomía nocturna y recargarse adecuadamente durante el día.

Los resultados de la simulación de balance energético mensual confirmaron que el sistema híbrido propuesto puede cubrir el 100% de la demanda promedio de 350 kWh/mes, logrando el objetivo de reducir la dependencia de la red eléctrica en un 90% y garantizando un día completo de autonomía energética.

3.6. Análisis económico preliminar

La estimación de los costos de capital (CAPEX) se basó en precios referenciales del mercado local ecuatoriano, obtenidos a partir de la revisión documental.

Tabla 15. Estimación de costos de capital (CAPEX) para el sistema híbrido propuesto.

Componente	Especificación	Cantidad	Costo Unitario Estimado (USD)	Subtotal (USD)
Aerogenerador VAWT	Fabricación local, palas de fibra de vidrio/resina epóxica, 4 kW nominal.	1 unidad	900	900
Paneles Solares	Trina Vertex S o similar, bifacial, 500Wp.	6 unidades	110	660
Baterías LiFePO4	Banco 48V, 240Ah (11.5 kWh útil).	1 conjunto	2,100	2,100
Inversor Híbrido	12 kW, 48V, configuración On-grid.	1 unidad	1,800	1,800
Estructuras, cableado, protecciones e instalación	Materiales e mano de obra para integración.	-	-	400
Costo Total de Implementación (CAPEX)				\$5,860

El CAPEX total estimado es de aproximadamente USD 5,860, alineado con la conclusión de la tesis. Este costo considera un aerogenerador de fabricación local con materiales compuestos de costo medio y un sistema de baterías LiFePO4 dimensionado según la capacidad nominal calculada de 11.57 kWh.

Para evaluar la viabilidad, este costo inicial se contrastó con el ahorro anual en la factura eléctrica. Considerando una demanda cubierta de 350 kWh/mes y una tarifa residencial promedio en Ecuador de USD 0.12/kWh [16], el ahorro anual potencial es de aproximadamente USD 504. Esto resulta en un periodo de recuperación de la inversión de aproximadamente 11.6 años.'

Análisis de Sensibilidad y Vida Útil

Un análisis de sensibilidad evaluó el impacto de variaciones en la generación ($\pm 20\%$) y en la profundidad de descarga (DoD) de las baterías (70%, 80%, 90%). Los resultados confirmaron que una DoD del 80% ofrece el mejor compromiso entre la autonomía energética deseada (1 día) y la vida útil del sistema de almacenamiento.

La elección de tecnología LiFePO4 es determinante en la economía del ciclo de vida. Con una vida útil estimada de ≈ 6000 ciclos al 80% DoD [6], y asumiendo un ciclo de carga/descarga

por día, la vida esperada del banco de baterías supera los 16 años. Esta durabilidad, superior a la de tecnologías como plomo-ácido, reduce el costo nivelado de almacenamiento (LCOS) y extiende el período de ahorro económico más allá del punto de equilibrio inicial.

DISCUSIÓN

Los resultados demuestran la viabilidad técnica de un sistema híbrido eólico-solar con almacenamiento para una vivienda unifamiliar en Guayaquil. La selección de un aerogenerador VAWT (UGE-4K) se justifica plenamente ante las condiciones de viento urbano, caracterizadas por velocidades moderadas (3.5-5 m/s) y dirección variable [13], donde las turbinas de eje horizontal son menos eficientes debido a la turbulencia [17]. Este hallazgo está en línea con investigaciones que recomiendan VAWT para entornos urbanos [18].

La elección de paneles solares de alta eficiencia (Trina Vertex S) responde a la necesidad de maximizar la generación en un espacio limitado (techo residencial), una consideración crítica en zonas urbanas. La complementariedad temporal entre los recursos solar y eólico, evidenciada en el perfil horario simulado (Ver Fig. 9), valida la estrategia híbrida. Mientras la generación solar es predecible y coincide con parte de la demanda diurna, la eólica, aunque intermitente, puede aportar durante la noche, reduciendo así la carga sobre el sistema de almacenamiento. Esta sinergia confirma los beneficios reportados en la literatura sobre sistemas híbridos [4].

La dimensión del almacenamiento (16.2 kWh, 1 día de autonomía) se determinó como un equilibrio óptimo entre confiabilidad, costo y vida útil. La selección de tecnología LiFePO₄, pese a un mayor costo inicial frente a plomo-ácido, se sustenta en su mayor densidad energética, vida útil (>6000 ciclos) y seguridad, lo que resulta en un menor costo nivelado de almacenamiento (LCOS) a largo plazo [6, 19]. El análisis de sensibilidad confirmó que una DoD del 80% ofrece el mejor compromiso entre autonomía útil y preservación de la vida de la batería.

La simulación integral mostró que el sistema puede lograr una reducción del 90% en la dependencia de la red eléctrica comercial, cumpliendo el objetivo principal. La pequeña porción restante podría cubrirse con la red en periodos excepcionales de baja generación y descarga de baterías, o eventualmente con un excedente exportado si la regulación local lo permite. La viabilidad económica, con una inversión estimada de \$5,860, debe analizarse considerando el ahorro acumulado en la factura eléctrica, la protección ante alzas tarifarias y los posibles incentivos para energías renovables. Aunque el periodo de retorno de la inversión requiere un estudio financiero detallado, la durabilidad de los componentes (especialmente paneles y baterías LFP) sugiere un ciclo de vida económico favorable.

Finalmente, el diseño aerodinámico óptimo del VAWT (Modelo B) surgió de iteraciones entre CAD y CFD, una metodología que permite optimizar el rendimiento antes de la fabricación, reduciendo costos y riesgos. La correlación entre un TSR óptimo (1.2) y un mejor comportamiento del flujo en las simulaciones CFD subraya la importancia de este parámetro en el diseño de VAWT [2]. La propuesta presentada no solo es una solución técnica para un

caso específico, sino que establece una metodología replicable para el diseño y evaluación de sistemas híbridos descentralizados en otras viviendas de Guayaquil o ciudades costeras con condiciones climáticas similares, contribuyendo a la diversificación y resiliencia de la matriz energética local.

CONCLUSIONES

1. El estudio permitió establecer la viabilidad de un sistema híbrido eólico-solar con almacenamiento para una vivienda unifamiliar en Guayaquil. El análisis multicriterio identificó al aerogenerador UGE-4K (VAWT) y al panel Trina Solar Vertex S como la combinación óptima, debido a su alta eficiencia, certificaciones internacionales y adecuación al entorno urbano.
2. El diseño aerodinámico mediante CAD y la validación con simulaciones CFD de tres prototipos de VAWT permitió seleccionar el Modelo B como el de mayor eficiencia. Este diseño, con una solidez de 1.1 y una relación de velocidad de punta (TSR) de 1.225, presentó el comportamiento de flujo más estable y un coeficiente de potencia (C_p) de 0.21, generando 48.9 W bajo una velocidad de viento de 5 m/s. Las simulaciones confirmaron que parámetros geométricos extremos (alta o baja solidez) generan pérdidas significativas por recirculación o turbulencia.
3. El dimensionamiento técnico demostró que el sistema híbrido propuesto, integrando el VAWT seleccionado, un arreglo fotovoltaico de 3.03 kWp y un banco de baterías LiFePO₄ de 16.2 kWh, puede cubrir la demanda media de 350 kWh/mes. La simulación del balance energético confirmó la complementariedad entre las fuentes, logrando una reducción del 90% en la dependencia de la red eléctrica y garantizando un día completo de autonomía energética.
4. La viabilidad económica preliminar, con una inversión estimada de USD 5,860 y un ahorro anual de USD 504, arroja un periodo de recuperación simple de aproximadamente 11.6 años. Este análisis se fortalece al considerar la extensa vida útil de los componentes, especialmente de las baterías LiFePO₄ (6000 ciclos), que reduce el costo nivelado de almacenamiento a largo plazo.
5. El sistema es técnico, económico y operativamente viable, constituyendo una solución sostenible y replicable para la generación distribuida en entornos urbanos de Guayaquil, que contribuye a la diversificación de la matriz energética y a la resiliencia del suministro eléctrico residencial.

REFERENCIAS

- [1] T. Martínez, *Energía eólica*, 2nd ed. Zaragoza, Spain: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2011. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/ereader/uteq/44857?page=19>. [Accessed: 15-Mar-2025].
- [2] M. Suau de Castro, “Diseño y construcción de una mini-turbina eólica,” Proyecto fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [3] P. Pourrut, *El agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, escorrentía*, Corporación Editora Nacional, 1995.
- [4] Y. Sawle, S. C. Gupta, y A. K. Bohre, “Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, in press. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.033.
- [5] Universidad Politécnica Salesiana, “Implementación de un sistema fotovoltaico autosustentable para una vivienda,” Quito, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24555/1/UPS-GT004252.pdf>
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Power Generation Costs in 2023*, Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2023.
- [7] AS, “Este país pequeño y rico en recursos apostó por la energía hidroeléctrica: se desató una fuerte sequía,” 2025. [Online]. Available: <https://as.com/actualidad/ciencia/este-pais-pequeno-y-rico-en-recursos-aposto-por-la-energia-hidroelectrica-se-desato-una-fuerte-sequia-n/>. [Accessed: 15-Mar-2025].
- [8] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, “Transformación y situación actual del sector eléctrico,” 2020. [Online]. Available: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/2.-TRANSFORMACION-Y-SITUACION-ACTUAL-DEL-SECTOR-ELECTRICO.pdf>. [Accessed: 15-Mar-2025].
- [9] S. D. Chuco Alfano, “Evaluación del desempeño de los seguidores solares para optimizar la producción de energía,” Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2024.
- [10] M. Clegg and J. Asenjo, “Guía hacia un futuro energético sustentable para las Américas,” IANAS, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.ianas.org/index.php/books>. ISBN: 978-607-8379-32-3.
- [11] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2009.
- [12] L. A. Soriano Avendaño, “Modelación de Aerogenerador con Compensación Difusa,” Tesis de Maestría, Departamento de Control Automático, 2013.
- [13] J. Peralta, E. Delgado, e I. Sosa-Tinoco, Análisis y evaluación de la información meteorológica disponible para la prospección del recurso eólico en el perfil costero ecuatoriano, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2016.
- [14] Windfinder, “Previsión de viento en Guayaquil,” 2025. [Online]. Available: <https://es.windfinder.com/forecast/guayaquil/birdseye>. [Accessed: 15-Mar-2025].
- [15] Weather Atlas, “Clima en Guayaquil, Ecuador,” 2025. [Online]. Available: <https://www.weather-atlas>.

- com/es/ecuador/guayaquil-clima. [Accessed: 15-Mar-2025].
- [16] CNEL EP, “CNEL EP expone tarifa residencial y tips de consumo eléctrico,” [En línea]. Disponible en: <https://www.cnelep.gob.ec/cnel-ep-expone-tarifa-residencial-y-tips-de-consumo-electrico/>. [Accedido: 18-abr-2025].CNELEP+1Primicias+1
- [17] B. J. Rubio Rodríguez, “Estudio de Caso: Energía Eólica para Generación de Energía Eléctrica a Nivel Urbano,” Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Guayaquil, Feb. 2024.
- [18] HowStuffWorks, “How Wind Power Works,” 2025. [Online]. Available: <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power.htm#pt3>. [Accessed: 01-Feb-2025].
- [19] J. E. Acosta Gonzales y E. X. Santander Benalcazar, “Diseño e implementación de un tren de potencia eléctrico en un vehículo de carga liviana para la mejora de eficiencia energética del sistema de tracción,” Proyecto de investigación, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, 2023.