



## **UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ**

### **Título:**

Análisis y Simulación de un Sistema de Generación de Energía  
Eólica en la Carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El  
Carmen

### **Autor:**

Gabriel Eduardo Mendoza Manzaba

### **Tutor:**

Ing. César Sinchiguano, MSc.

### **Unidad Académica:**

Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica, Educación  
Virtual y Otras Modalidades.

### **Carrera:**

Tecnología Superior en Electromecánica.

**El Carmen, febrero 2026**

## **CERTIFICACION DEL TUTOR**

Ing. César Sinchiguano, MSc.; docente de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica, Educación Virtual y Otras Modalidades, en calidad de Tutor.

### **CERTIFICO:**

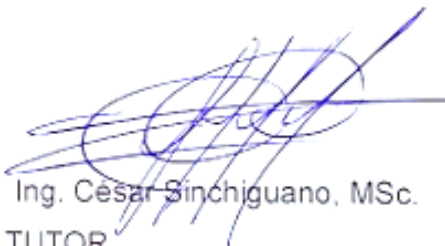
Que el presente proyecto integrador con el título: “Análisis y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eólica en la Carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen” ha sido exhaustivamente revisado en varias sesiones de trabajo, está listo para su presentación y apto para su defensa.

Las opciones y conceptos vertidos en este documento son fruto de la perseverancia y originalidad de su autor:

*Gabriel Eduardo Mendoza Manzaba*

Siendo de su exclusiva responsabilidad.

**El Carmen, febrero de 2026**

  
Ing. César Sinchiguano, MSc.  
TUTOR

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Quien suscribe la presente:

*Gabriel Eduardo Mendoza Manzaba*

Estudiante de la Carrera de **Tecnología Superior en Electromecánica**, declaro bajo juramento que el presente proyecto integrador cuyo título: “Análisis y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eólica en la Carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen”, previa a la obtención del Título de Tecnólogo Superior en Electromecánica., es de autoría propia y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros y consultando las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

**El Carmen, febrero del 2026**



Gabriel Eduardo Mendoza Manzaba



## APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto Integrador, titulado: “Análisis y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eólica en la Carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen” de su autor: Gabriel Eduardo Mendoza Manzaba, de la Carrera “**Tecnología Superior en Electromecánica**”, y como Tutor del Trabajo el Ing. César Sinchiguano, MSc.

**El Carmen, febrero del 2026**

Ing. Danilo Arévalo, Mag.  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. César Sinchiguano, MSc.  
TUTOR

Ing. Clara Pozo, Mag.  
PRIMER MIEMBRO TRIBUNAL

Ing. Patricio Quiroz, Mag.  
SEGUNDO MIEMBRO TRIBUNAL

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer en primer lugar a la universidad laica Eloy Alfaro de Manabí, por la oportunidad de obtener un título universitario en tal noble institución de tercer nivel, es en esta prestigiosa universidad donde me he formado y gracias a eso se me han abrierán muchas facilidades profesionales.

De manera especial quiero agradecer a mi tutor, Ing. César Sinchiguano, MSc por ser un gran profesional que siempre a través de medios telemáticos o presencial me ayudó sin esperar nada a cambio, al cual también quiero felicitar por ser un gran docente universitario, un excelente ser humano y por su guía, su exigencia y por compartir sus conocimientos con tanta generosidad; sin sus correcciones este trabajo no habría llegado a este nivel.

Al ingeniero Fernando López, por haberme apoyado en todo el desarrollo de este trabajo de tesis, es así que no solo me brindó sus conocimientos, sino también el apoyo académico para poder hacer este trabajo.

Finalmente, gracias a mis amigos y compañeros, por los cafés, las horas de estudio y por ser el mejor equipo durante estos años y haber compartido este episodio que fue el desarrollo de nuestra tecnología superior en electromecánica

El autor

## DEDICATORIA

Quiero dedicarle desde el fondo de mi corazón este trabajo a los seres más importante es mi vida, sin ellos no solo hubiera podido llegar hasta aquí, sino que sin sus ejemplos estuviera orientado en caminos de maldad, de no hacer nada importante en la vida y sin futuro a largo plazo es por eso que;

A mi madre, por ser mi motor, mi apoyo constante y por enseñarme que el amor es la fuerza que todo lo puede. A mi padre, que, aunque hoy me guía desde el cielo, su ejemplo y sus palabras siguen siendo el faro de mi camino. Este título es el fruto de las semillas que ambos sembraron en mí.

Aunque hoy papá no esté conmigo, sé que él hubiera estado aquí orgulloso de mi, como siempre me lo decía en mi vida.

El autor

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como finalidad desarrollar un modelo de simulación computacional para el análisis del desempeño de un sistema de generación eólica adaptado a las condiciones técnicas y climáticas de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la ULEAM Extensión El Carmen. El problema identificado radica en la ausencia de una herramienta académica que permita evaluar, de manera precisa, el potencial de generación eólica a escala reducida. La metodología aplicada se estructuró en tres fases: recopilación de datos técnicos y meteorológicos representativos de la zona, implementación de un entorno de simulación en el software QBlade para modelar el comportamiento de un aerogenerador de pequeña escala, y validación de resultados mediante comparación con datos de referencia de turbinas comerciales similares. Los resultados muestran que, con un ángulo de pitch ajustado a  $17.75^\circ$ , el sistema simulado genera aproximadamente 150 W a una velocidad de viento de 10 m/s, valor coherente con la potencia nominal del generador propuesto. Se concluye que el modelo desarrollado es una herramienta válida para fines educativos, contribuyendo a la formación técnica en energías renovables y al diseño de soluciones sostenibles en el ámbito académico.

## **PALABRAS CLAVE**

Energía eólica, simulación computacional, aerogenerador, QBlade, energía renovable.

## **ABSTRACT**

The present work aims to develop a computational simulation model for the performance analysis of a wind power generation system adapted to the technical and climatic conditions of the Electromechanical Technology program at ULEAM, El Carmen Extension. The identified problem lies in the lack of an academic tool to accurately assess small-scale wind generation potential. The applied methodology was structured into three phases: collection of technical and meteorological data representative of the study area, implementation of a simulation environment in QBlade software to model the behavior of a small-scale wind turbine, and validation of results through comparison with reference data from similar commercial turbines. The results show that, with a pitch angle adjusted to  $17.75^\circ$ , the simulated system generates approximately 150 W at a wind speed of 10 m/s, a value consistent with the nominal power of the proposed generator. It is concluded that the developed model is a valid tool for educational purposes, contributing to technical training in renewable energy and to the design of sustainable solutions in the academic field.

## **KEYWORDS**

Wind energy, computational simulation, wind turbine, QBlade, renewable energy.

## ÍNDICE

CERTIFICACION DEL TUTOR.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
RESUMEN.....	VII
PALABRAS CLAVE.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
KEYWORDS.....	VIII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA.....	4
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. METODOLOGÍA.....	6
1.4.1. Procedimiento.....	6
1.4.2. Técnicas.....	7
1.4.3. Métodos.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. DEFINICIONES.....	9
2.2. ANTECEDENTES.....	12
2.3. TRABAJOS RELACIONADOS.....	14
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	16
3.1. DESARROLLO.....	16
3.1.1. Descripción de la propuesta.....	16
3.1.2. Etapas.....	18

3.1.3. Presupuesto .....	20
3.2. RESULTADOS .....	21
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	28
4.1. CONCLUSIONES.....	28
4.2. RECOMENDACIONES .....	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXOS .....	32

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Modelo 3D de las aspas del aerogenerador. ....	23
<b>Ilustración 2.</b> Modelo completo del aerogenerador. ....	24
<b>Ilustración 3.</b> Curva de coeficiente de potencia vs velocidad de punta de aspa, con las características de velocidad de viento, rotacional del aerogenerador y el ángulo pitch. ....	24
<b>Ilustración 4.</b> Resultados de la simulación lineal del aerogenerador. ....	25
<b>Ilustración 5.</b> Estado final de la simulación no lineal con la estela detrás del generador. ....	26
<b>Ilustración 6.</b> Evolución de la estela a intervalos de 0.25 [s]. ....	27
<b>Ilustración 7.</b> Curva de potencia para el generador AIR MAX 40. ....	28
<b>Ilustración 8.</b> Valor de potencia generado en función de la velocidad del viento en la simulación. ....	28
<b>Ilustración 9.</b> Resumen de parámetros de simulación en QBlade. ....	35
<b>Ilustración 10.</b> Curvas obtenidas en QBlade, incluida $C_l/C_d$ vs Ángulo para determinar el punto óptimo de funcionamiento que en este caso son $5^\circ$ , ....	36
<b>Ilustración 11.</b> Curva de coeficiente de sustentación para el ajuste de interpolación del perfil 2D a 3D. ....	36
<b>Ilustración 12.</b> Campo de viento con zonas de turbulencia y rozamiento con el piso. ....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resumen de datos de diseño. ....	22
--------------------------------------------------	----



## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

El análisis y simulación de sistemas de generación eólica son etapas críticas en el desarrollo de proyectos de energía renovable, ya que permiten evaluar el rendimiento, la viabilidad técnica y la eficiencia energética antes de su implementación física. Mediante herramientas computacionales, como software de dinámica de fluidos (CFD) y modelado de turbinas eólicas, es posible simular condiciones reales de viento, analizar la distribución de presiones en las palas y predecir la potencia generada en función de parámetros como la velocidad del viento y la altura del rotor. Estos estudios no solo optimizan el diseño aerodinámico, sino que también reducen costos al identificar posibles fallos en etapas tempranas. Además, la simulación permite comparar diferentes configuraciones de sistemas eólicos, seleccionando la más adecuada según las condiciones climáticas y los requerimientos de carga. Por ello, este proceso se consolida como una metodología indispensable en la ingeniería moderna de energías limpias (Defaz & Pallasco, 2017).

Los sistemas de generación eólica representan una de las tecnologías más eficientes y escalables para el aprovechamiento de energías renovables, particularmente en zonas con régimen de vientos favorables. Estos sistemas convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica mediante aerogeneradores, cuyo diseño y configuración dependen de factores como la potencia requerida, las características del terreno y las condiciones atmosféricas locales. Los componentes clave, como las palas, el buje, la multiplicadora (en caso de sistemas de velocidad variable) y el generador eléctrico, deben ser seleccionados y dimensionados con precisión para garantizar un funcionamiento óptimo. Además, la integración de sistemas de control modernos permite maximizar la captación de energía incluso en condiciones de viento variable, asegurando estabilidad en la red eléctrica. Por ello, el estudio de estos sistemas no solo es relevante para la generación de energía limpia, sino también para el desarrollo de infraestructuras energéticas sostenibles y autónomas (Repsol, 2023).

Estudios recientes demuestran el creciente interés por optimizar los sistemas eólicos mediante herramientas predictivas y de simulación. Un aporte significativo en este campo se realizó en 2020 en Sangolquí, en la ESPE, donde se desarrolló un sistema de predicción de generación eólica basado en modelos climáticos, aplicando análisis cualitativo y cuantitativo para correlacionar datos meteorológicos con la producción energética. Esta investigación confirmó que, mediante formulaciones matemáticas empíricas, es posible predecir con precisión el comportamiento del viento y, en consecuencia, la potencia generada, lo que valida la viabilidad técnica de proyectos eólicos en zonas con potencial eólico identificado. Estos hallazgos son particularmente relevantes para el presente estudio, ya que refuerzan la importancia de integrar métodos de simulación y análisis predictivo en el diseño de sistemas eólicos, asegurando no solo su eficiencia sino también su adaptabilidad a condiciones climáticas variables (Olalla, 2020).

El estudio de sistemas eólicos adquiere especial relevancia en el contexto energético actual, donde la transición hacia fuentes renovables se ha convertido en un imperativo global. La energía eólica destaca por su capacidad para generar electricidad limpia a gran escala, reduciendo significativamente las emisiones de carbono asociadas a la generación convencional. Particularmente en Ecuador, donde el potencial eólico permanece subutilizado pese a contar con condiciones geográficas y climáticas favorables en varias regiones, este tipo de investigaciones contribuye a diversificar la matriz energética nacional. El análisis y simulación de estos sistemas permite no sólo evaluar su viabilidad técnica y económica, sino también optimizar su integración con la red eléctrica existente. Además, constituye una valiosa herramienta para la planificación energética regional, facilitando la toma de decisiones en políticas públicas y proyectos de inversión en energías renovables. La metodología empleada en este trabajo puede replicarse en otras zonas del país, sirviendo como referencia para futuros desarrollos eólicos.

El desarrollo de sistemas de generación eólica guarda una estrecha relación con la formación en Tecnología Superior en Electromecánica, ya que integra conocimientos fundamentales de ambas disciplinas. Desde el punto de vista electromecánico, este proyecto permite aplicar conceptos clave como conversión de energía, diseño de máquinas eléctricas, automatización y control de sistemas, así como el análisis de componentes mecánicos sometidos a cargas variables. La simulación computacional, por su parte, fortalece competencias en modelado de sistemas energéticos y uso de herramientas tecnológicas avanzadas, habilidades esenciales en el perfil profesional del tecnólogo electromecánico. Este trabajo no sólo consolida la formación teórico-práctica recibida durante la carrera, sino que también responde a las demandas del sector productivo, donde los profesionales electromecánicos son cada vez más requeridos para implementar y mantener sistemas de energías renovables. Así, la investigación se alinea perfectamente con los objetivos académicos y laborales de la carrera, aportando soluciones tecnológicas sostenibles desde el ámbito de la formación técnica superior.

## **1.1. PROBLEMA**

A pesar del creciente interés por las energías renovables, la implementación de sistemas eólicos en Ecuador enfrenta importantes desafíos técnicos y operativos. Muchos proyectos no alcanzan su máximo potencial debido a la falta de estudios previos de viabilidad que consideren las particularidades del recurso eólico local y las condiciones topográficas específicas. Esto deriva en diseños ineficientes, bajos factores de capacidad y, en algunos casos, en el fracaso de instalaciones que no logran generar la energía proyectada. Además, la carencia de herramientas de simulación accesibles para el análisis del comportamiento aerodinámico y la predicción de rendimiento energético limita el desarrollo óptimo de estos sistemas, particularmente en el ámbito académico y para proyectos de pequeña y mediana escala.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto de investigación posee un sólido fundamento académico al integrar conocimientos transversales de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica, particularmente en las áreas de conversión de energía, mecánica de fluidos, sistemas eléctricos y automatización. La implementación de un sistema de simulación eólica permite a los estudiantes aplicar conceptos teóricos en un entorno práctico, fortaleciendo competencias en análisis de sistemas energéticos, interpretación de datos y uso de herramientas computacionales especializadas. Además, el estudio contribuye a cerrar la brecha entre la formación técnica y las demandas del sector energético actual, donde las competencias en energías renovables son cada vez más valoradas. Desde la perspectiva curricular, este trabajo se alinea con los objetivos de formación al fomentar la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras.

Desde el punto de vista tecnológico, esta investigación adquiere relevancia al proponer soluciones accesibles para el análisis y simulación de sistemas eólicos, utilizando herramientas de software especializado que optimizan el proceso de diseño y evaluación. El desarrollo de modelos computacionales precisos permite

superar limitaciones económicas asociadas a prototipos físicos, facilitando la experimentación y validación de conceptos en el ámbito académico. Tecnológicamente, el proyecto aporta metodologías estandarizadas para la evaluación del recurso eólico local, lo que puede ser replicado en otras instituciones educativas o proyectos comunitarios. Asimismo, los resultados obtenidos podrían servir como base para futuras implementaciones reales, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías limpias adaptadas a las condiciones específicas de la región.

El presente trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación institucional Ingeniería, Industria y Construcción para un desarrollo sostenible, ya que contribuye a la generación de conocimientos aplicados en el campo de las energías renovables, específicamente en el aprovechamiento del recurso eólico. La simulación y análisis de sistemas de generación eólica representan una herramienta estratégica para promover soluciones energéticas limpias, reducir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar prácticas de ingeniería orientadas a la sostenibilidad. Además, el desarrollo de modelos computacionales adaptados a las condiciones locales fortalece las capacidades técnicas de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica, aportando al diseño de tecnologías más eficientes y compatibles con los objetivos de desarrollo sostenible en el ámbito industrial y de la construcción.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Desarrollar un modelo de simulación computacional para el análisis del desempeño de un sistema de generación eólica adaptado a las condiciones climáticas y técnicas de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la ULEAM Extensión El Carmen.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Recopilar datos técnicos e información meteorológica que sirvan de base para el diseño y simulación del sistema eólico.

Implementar un entorno de simulación para modelar el comportamiento de un aerogenerador de pequeña escala bajo diferentes escenarios operativos

Validar el modelo de simulación mediante la comparación de resultados teóricos con datos operativos de turbinas eólicas de referencia, estableciendo márgenes de error aceptables para su uso académico.

### **1.4. METODOLOGÍA**

#### **1.4.1. Procedimiento**

El desarrollo de este trabajo investigación se llevó a cabo mediante los siguientes pasos, alineados con los objetivos específicos planteados:

#### **Paso 1: Recolección de datos técnicos y meteorológicos (Objetivo Específico 1)**

- Identificación de fuentes de datos: Se recopilaron datos meteorológicos históricos de estaciones locales o bases de datos confiables.
- Selección de parámetros técnicos: Se definieron las especificaciones del aerogenerador a simular basadas en tecnologías de pequeña escala.

#### **Paso 2: Implementación del entorno de simulación (Objetivo Específico 2)**

- Elección de software: Se utilizaron herramientas de simulación especializada, seleccionadas por su relevancia industrial y comercial.
- Ejecución de escenarios: Se corrieron simulaciones bajo diferentes condiciones para evaluar el desempeño del sistema.

### **Paso 3: Validación del modelo (Objetivo Específico 3)**

- Comparación con datos de referencia: Se contrastaron los resultados de la simulación con curvas de potencia certificadas de aerogeneradores comerciales similares.
- Análisis de errores: Se calcularon métricas de discrepancia para cuantificar la precisión del modelo.

#### **1.4.2. Técnicas**

##### **Recolección y Análisis de Datos Climáticos**

*Fundamentación:* Para conocer el comportamiento del viento en la zona de estudio, se recopilaron datos meteorológicos de fuentes confiables, como registros históricos del clima (Plaza Chimalhuacan, 2025). Esta información permitió determinar cuáles son las velocidades de viento más comunes y en qué épocas del año hay mayor potencial para generar energía eólica. Esta técnica se aplicó al inicio del proyecto para asegurar que la simulación se basara en condiciones realistas.

##### **Simulación por Computadora**

*Fundamentación:* Se utilizó un programa de simulación para recrear el funcionamiento de un aerogenerador pequeño bajo diferentes condiciones de viento (Duarte & Fernández, 2005). Esta técnica permitió observar cómo se comportaría el sistema sin necesidad de construir un prototipo físico, ahorrando tiempo y recursos. Se aplicó durante la fase de modelado (Objetivo Específico 2), donde se ajustaron parámetros como el tamaño de las aspas y la altura de la torre para mejorar su eficiencia.

### **Comparación con Modelos Existentes**

**Fundamentación:** Para verificar que los resultados de la simulación fueran confiables, se compararon con datos de aerogeneradores reales de características similares (Leyva & Proenza, 2021). Esta técnica ayudó a confirmar que el modelo desarrollado era preciso y podía usarse como referencia en el ámbito académico. Se aplicó al final del proyecto (Objetivo Específico 3), donde se evaluaron pequeñas diferencias entre los valores simulados y los reales para validar el trabajo.

### **1.4.3. Métodos**

#### **Método de Investigación Documental**

**Fundamentación:** Este método consistió en la revisión de manuales técnicos, artículos científicos y guías de fabricantes sobre energía eólica (Vivero & Sánchez, 2018). Se utilizó al inicio del proyecto para recopilar información básica sobre cómo funcionan los aerogeneradores y qué parámetros se deben considerar en su diseño. Esto permitió establecer una base teórica sólida antes de comenzar con la simulación.

#### **Método de Modelado Virtual**

**Fundamentación:** Consistió en usar programas de computadora especializados para recrear el comportamiento de un aerogenerador (Hulatt, 2024). Este método fue clave durante la fase de simulación, ya que permitió probar diferentes configuraciones del sistema de manera rápida y segura, sin necesidad de materiales físicos. Los resultados ayudaron a entender cómo mejorar el diseño para que fuera más eficiente.

#### **Método de Validación Práctica**

**Fundamentación:** Se compararon los resultados de la simulación con información técnica proporcionada por fabricantes de turbinas eólicas reales (Ashouri, Davidsson, & Spalazzese, 2021). Este método se aplicó al final del proyecto para asegurar que lo obtenido en la computadora tuviera relación con cómo funcionan estos sistemas en la realidad. Las pequeñas diferencias encontradas sirvieron para ajustar y mejorar el modelo final.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. DEFINICIONES

#### Análisis y Simulación

**El análisis y simulación de sistemas eólicos**, es una herramienta fundamental en el desarrollo de proyectos de energía renovable. Mediante esta técnica, es posible estudiar el comportamiento de un aerogenerador antes de su construcción física, lo que permite optimizar su diseño y predecir su rendimiento. En el ámbito académico, este proceso resulta especialmente valioso, ya que ofrece a los estudiantes la oportunidad de aplicar conceptos teóricos en un entorno virtual, reduciendo costos y riesgos asociados a pruebas reales (Carrillo, 2021).

**La simulación computarizada de sistemas eólicos**, se basa en modelos matemáticos que recrean las condiciones reales de operación. Estos modelos consideran variables como la velocidad del viento, la topografía del terreno y las características técnicas del aerogenerador. Al ajustar estos parámetros, se pueden evaluar diferentes escenarios y seleccionar la configuración más adecuada para un lugar específico. Esta aproximación metodológica es esencial para garantizar que los proyectos sean viables tanto técnica como económicamente (Bacchi, 2025).

**En el contexto de la formación tecnológica**, el uso de software especializado permite a los estudiantes desarrollar competencias prácticas en el manejo de herramientas modernas. Programas de simulación facilitan el aprendizaje de conceptos complejos mediante interfaces intuitivas y resultados visuales. Esto no solo refuerza el entendimiento de los principios de la energía eólica, sino que también prepara a los futuros profesionales para enfrentar desafíos reales en el sector energético.

Uno de los aspectos más importantes del análisis y simulación es la capacidad de identificar posibles fallos o ineficiencias en etapas tempranas del diseño. Por ejemplo, mediante simulaciones se puede detectar si las palas del rotor generan

turbulencias excesivas o si el sistema eléctrico no responde adecuadamente a cambios bruscos en la velocidad del viento. Estas correcciones anticipadas ahorran tiempo y recursos, haciendo que el proceso de desarrollo sea más eficiente (Méndez & Sucedo, 2023).

Finalmente, la simulación no solo sirve para fines educativos, sino que también tiene aplicaciones prácticas en proyectos reales. Muchos parques eólicos alrededor del mundo utilizan estas técnicas durante su fase de planificación para maximizar su producción de energía. En este sentido, el dominio de estas herramientas por parte de los estudiantes de electromecánica les brinda una ventaja competitiva en el mercado laboral, donde la demanda de profesionales capacitados en energías renovables sigue en crecimiento.

### **Sistemas de Generación Eólica**

**Los sistemas de generación eólica representan:** una de las tecnologías más limpias y eficientes para producir electricidad a partir de fuentes renovables. Estos sistemas transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica mediante el uso de aerogeneradores, los cuales pueden variar en tamaño y capacidad dependiendo de las necesidades energéticas. En la actualidad, su implementación ha crecido significativamente debido a la urgente necesidad de reducir las emisiones de carbono y diversificar la matriz energética global (Escuela Origen, 2024).

**Un sistema eólico básico consta de varios componentes clave:** las palas del rotor, que capturan la energía del viento; la torre, que eleva el sistema a alturas donde el viento es más constante y fuerte; y el generador eléctrico, que convierte el movimiento mecánico en electricidad. Además, incluye sistemas de control que regulan la operación para maximizar la eficiencia y proteger el equipo ante condiciones climáticas extremas. Estos elementos trabajan en conjunto para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro (Enel, 2025).

**En el caso de pequeños aerogeneradores:** (como los que podrían implementarse en proyectos académicos), el diseño suele ser más simple pero

igualmente efectivo. Estos sistemas son ideales para zonas rurales o aisladas donde la conexión a la red eléctrica convencional es limitada. Su versatilidad y bajo mantenimiento los convierten en una solución práctica para comunidades que buscan alternativas energéticas sostenibles y accesibles (Damia Solar, 2025).

Desde el punto de vista técnico, el rendimiento de un sistema eólico depende en gran medida de la calidad del recurso eólico disponible. Factores como la velocidad media anual del viento, su dirección predominante y la turbulencia afectan directamente la cantidad de energía que puede generarse. Por esta razón, estudios previos de caracterización del viento son esenciales para seleccionar el sitio adecuado y dimensionar correctamente el equipo (Ryse Energy, 2025).

Para los estudiantes de Tecnología Superior en Electromecánica, comprender el funcionamiento de estos sistemas es fundamental, ya que combina conocimientos de mecánica, electricidad y automatización. El desarrollo de prototipos o modelos a escala, junto con su simulación computacional, permite a los futuros tecnólogos adquirir experiencia práctica en el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas eólicos, preparándolos para contribuir al desarrollo de energías renovables en el país.

## **2.2. ANTECEDENTES**

### **Antecedentes Institucionales**

La Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), a través de su Extensión El Carmen, se ha consolidado como un importante centro de educación superior en la provincia de Manabí, particularmente en la zona norte de Ecuador. Esta extensión universitaria fue creada para responder a las necesidades de formación profesional en una región caracterizada por su actividad agrícola, ganadera y un creciente desarrollo industrial. La institución ha venido ampliando su oferta académica con carreras técnicas y tecnológicas que responden a los requerimientos del sector productivo local (ULEAM, 2025).

Dentro de este contexto, la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica se ha establecido como una de las opciones formativas más relevantes de la extensión. Este programa académico, con una duración de cinco semestres, está diseñado para formar profesionales capacitados en el mantenimiento, instalación y operación de sistemas que combinan principios eléctricos y mecánicos. La malla curricular integra conocimientos fundamentales en áreas como electricidad industrial, mecánica aplicada, automatización y, recientemente, energías renovables (ULEAM, 2025).

La infraestructura de la Extensión El Carmen cuenta con laboratorios básicos para la formación de los estudiantes de Electromecánica, incluyendo talleres de electricidad, mecánica y un laboratorio de computación con software especializado. Estos espacios han servido como base para el desarrollo de proyectos estudiantiles, aunque existe un reconocimiento institucional sobre la necesidad de seguir fortaleciendo los recursos para la enseñanza de tecnologías emergentes, como los sistemas de energía renovable.

El proyecto de análisis y simulación de un sistema de generación eólica se enmarca dentro de los esfuerzos de la carrera por actualizar sus contenidos formativos y responder a las nuevas demandas del mercado laboral. La zona de El Carmen y sus alrededores presentan condiciones climáticas con potencial

para el aprovechamiento eólico, lo que hace especialmente relevante esta línea de investigación. La institución ha apoyado esta iniciativa como parte de su compromiso con el desarrollo de tecnologías sostenibles en la región.

Como antecedente directo, la carrera ha venido incorporando progresivamente contenidos sobre energías alternativas en sus asignaturas, y este proyecto representa un paso importante en la aplicación práctica de esos conocimientos. La ULEAM Extensión El Carmen, a través de su carrera de Electromecánica, busca posicionarse como un referente en la formación de tecnólogos capaces de implementar soluciones energéticas innovadoras que contribuyan al desarrollo sostenible de la provincia.

### **Antecedentes del proyecto**

Antes del desarrollo del presente proyecto de análisis y simulación de sistemas eólicos, la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la ULEAM Extensión El Carmen había realizado algunos avances preliminares en el estudio de energías renovables. Durante periodos anteriores al 2025-1, se habían incorporado contenidos básicos sobre energía eólica en asignaturas como "Instalaciones de Baja Tensión", "Máquinas Eléctricas", "Termodinámica" y "Accionamiento Eléctrico", donde los estudiantes analizaban conceptos teóricos sobre el funcionamiento de aerogeneradores y sus componentes principales.

En el ámbito investigativo, se identificaron algunos trabajos estudiantiles previos relacionados con energías renovables, aunque ninguno específicamente enfocado en sistemas eólicos con simulación computacional. Los proyectos existentes se habían centrado principalmente en energía solar fotovoltaica, lo que dejaba un vacío en el estudio del potencial eólico local. Tampoco existía hasta entonces un modelo estandarizado para evaluar las características del viento en la zona de El Carmen ni su posible aprovechamiento energético.

A nivel institucional, la ULEAM había establecido convenios con empresas del sector eléctrico, pero estos no incluían específicamente el desarrollo de tecnologías eólicas. La infraestructura disponible contaba con equipamiento

básico para mediciones eléctricas, pero no con instrumentos especializados para caracterización eólica como anemómetros o veletas digitales, lo que limitaba la recolección de datos empíricos.

Estos antecedentes demostraban que, si bien existía un interés creciente por las energías renovables en la carrera, el estudio de sistemas eólicos se encontraba en una fase inicial. El presente proyecto surgió precisamente para superar estas limitaciones, introduciendo metodologías de simulación computacional que permitieran un análisis más riguroso y cuantitativo del potencial eólico, sin depender exclusivamente de prototipos físicos o mediciones directas. Esta aproximación representó un salto cualitativo en la formación tecnológica de los estudiantes de Electromecánica.

### **2.3. TRABAJOS RELACIONADOS**

Un referente destacado en el desarrollo de energía eólica se encuentra en España, quien se ha consolidado como líder mundial en esta tecnología durante la primera década del siglo XXI. El estudio destaca que el éxito español se basó en tres factores clave: condiciones eólicas excepcionales, políticas gubernamentales de fomento continuado y el desarrollo de una industria nacional altamente competitiva. Particularmente relevante para este proyecto es cómo los autores describen la evolución tecnológica de los parques eólicos españoles, pasando de pequeñas instalaciones experimentales a complejos sistemas integrados en la red eléctrica nacional. Este caso demuestra cómo la combinación de recursos naturales, apoyo institucional y desarrollo tecnológico puede convertir la energía eólica en una fuente energética principal, ofreciendo valiosas lecciones para proyectos en otras latitudes (Espejo & García, 2012).

Un estudio reciente analiza el desarrollo de la energía eólica en México, destacando un enfoque centrado en la capacidad instalada mediante la importación de tecnología, más que en el desarrollo de capacidades tecnológicas locales. Los investigadores encontraron que este modelo ha resultado en una limitada participación de instituciones académicas en innovación eólica, con solo el 2% de las patentes registradas por universidades nacionales. Particularmente

relevante para este proyecto es su propuesta del modelo de "cinco hélices", que integra a universidades, gobierno, empresas, sociedad civil y centros de investigación en el desarrollo de la cadena de valor eólica. Este caso mexicano sirve como valiosa referencia para Ecuador, mostrando la importancia de vincular la formación tecnológica con la industria eólica local desde etapas tempranas. El trabajo destaca cómo proyectos académicos como el nuestro pueden contribuir a reducir la brecha tecnológica en energías renovables (Martínez & Rivas, 2024). Un estudio clave sobre el potencial eólico en Ecuador se realizó en 2023, en el cual se analizó el desarrollo de esta energía renovable en diferentes regiones del país. La investigación documentó que, aunque Ecuador cuenta con plantas eólicas operativas como Villonaco en Loja (16.5 MW), San Cristóbal (2.4 MW) y Baltra (2.25 MW), aún existe un importante potencial sin explotar. Los resultados mostraron que la generación eólica nacional representaba solo una pequeña fracción de la producción total de electricidad en 2021 (32,206.88 GWh), a pesar de contar con condiciones geográficas y climáticas favorables en varias zonas. Este trabajo es particularmente relevante para nuestra investigación, ya que evidencia la necesidad de más estudios técnicos que analicen el potencial eólico en regiones específicas del país, como Manabí, donde se ubica nuestra institución. La conclusión de los autores sobre la viabilidad de expandir la capacidad eólica en Ecuador refuerza la importancia de proyectos académicos como el nuestro, que contribuyen a evaluar nuevas ubicaciones para posibles desarrollos eólicos (Uvidia, Masaquiza, Paladines, & Moyano, 2023).

La revisión de literatura muestra que existen pocos trabajos específicos sobre sistemas eólicos en la provincia de Manabí. No obstante, un estudio relevante realizado en 2022 analizó estrategias para mejorar el acceso energético en comunidades rurales del cantón Chone, considerando entre sus conclusiones el potencial de la energía eólica para electrificación rural. Si bien la investigación se enfocó principalmente en energía solar fotovoltaica, los autores reconocieron que el recurso eólico disponible en la zona podría aprovecharse para complementar los sistemas energéticos en áreas aisladas (Flores & Vélez, 2022).

## **CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA**

### **3.1. DESARROLLO**

En esta sección se detalla la implementación técnica de la propuesta orientada a resolver el problema identificado en el Capítulo I, mediante la simulación computacional de un sistema de generación eólica adaptado a las condiciones de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la ULEAM Extensión El Carmen. El desarrollo se organizó en función del cumplimiento de los objetivos específicos planteados, partiendo de la recopilación de datos técnicos y meteorológicos relevantes, la construcción de un modelo computacional en QBlade y la validación de resultados mediante análisis comparativos. Se utilizaron herramientas especializadas, tanto en versiones actuales como en versiones anteriores del software, con el fin de acceder a funcionalidades específicas como la simulación no lineal y la visualización de estelas de viento. Este apartado también incluye las etapas clave del proceso, consideraciones de diseño aerodinámico, y ajustes operativos realizados para adecuar la potencia generada a los límites del generador propuesto, todo ello sin requerir implementación física, en concordancia con el carácter académico y formativo del presente trabajo.

#### **3.1.1. Descripción de la propuesta**

La propuesta planteada en este trabajo consiste en el desarrollo de un modelo de simulación computacional que permita analizar el desempeño de un sistema de generación eólica adaptado a las condiciones técnicas y climáticas locales de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica de la ULEAM Extensión El Carmen. La finalidad de esta propuesta es proporcionar una herramienta formativa que facilite la evaluación del potencial energético del viento y sirva como base para futuras implementaciones académicas o demostrativas. El desarrollo de la propuesta se estructuró en torno a los siguientes objetivos específicos:

### **Descripción del Objetivo Específico 1**

El primer objetivo específico consistió en la recopilación de datos técnicos y meteorológicos necesarios para sustentar el diseño del modelo de simulación.

Se obtuvieron registros históricos de velocidad y dirección del viento característicos de la zona de influencia de la extensión universitaria, así como información técnica sobre generadores, perfiles aerodinámicos y condiciones de operación de aerogeneradores de pequeña escala. Estos datos permitieron establecer condiciones iniciales realistas para la simulación y seleccionar parámetros clave, como el perfil aerodinámico NACA 4712, el número de Reynolds, el coeficiente de potencia ( $C_p$ ), la eficiencia mecánica ( $\eta_t$ ), y la velocidad de viento de referencia.

### **Descripción del Objetivo Específico 2**

El segundo objetivo específico se enfocó en la implementación del entorno de simulación computacional mediante el uso del software QBlade. Se diseñó una pala de aerogenerador con un radio de 0.90 m, dividiendo la geometría en 21 secciones radiales y asignando valores adecuados de cuerda (chord) y ángulo de torsión (twist) para cada sección, de acuerdo con criterios de diseño aerodinámico. Posteriormente, se realizaron simulaciones tipo BEM (Blade Element Momentum) y simulaciones multiparámetro para analizar el comportamiento del sistema bajo distintas configuraciones, incluyendo variaciones del ángulo de pitch. Adicionalmente, se utilizó una versión anterior del software (QBlade v0.9) para realizar simulaciones no lineales y visualizar el desarrollo de la estela de viento (wake) posterior a las aspas.

### **Descripción del Objetivo Específico 3**

El tercer objetivo específico implicó la validación del modelo desarrollado mediante la comparación de los resultados obtenidos con datos de referencia provenientes de generadores comerciales de características similares. A través del análisis de curvas de potencia y ajuste del ángulo de inclinación (pitch), se buscó que la potencia generada por el modelo simulado no excediera la capacidad nominal del generador real (150 W), asegurando así su aplicabilidad

en contextos académicos sin comprometer la integridad de los componentes. El modelo fue afinado iterativamente hasta obtener una coincidencia razonable entre la potencia simulada y la potencia deseada, lo cual permitió establecer márgenes de error aceptables y confirmar la viabilidad del modelo como herramienta de estudio.

### **3.1.2. Etapas**

**Etapa 1:** Actividades realizadas para cumplir el Objetivo Específico 1.

En esta etapa se enfocó la atención en la recopilación y análisis de información técnica y meteorológica como base para el diseño del sistema de simulación.

Las principales actividades desarrolladas fueron:

- Revisión de datos meteorológicos históricos de velocidad y dirección del viento en la zona de El Carmen, utilizando fuentes confiables como estaciones climatológicas locales y bases de datos en línea.
- Selección del perfil aerodinámico NACA 4712, basándose en su disponibilidad en QBlade y sus características favorables para aerogeneradores de pequeña escala.
- Determinación de parámetros técnicos clave, como la velocidad del viento de referencia (10 m/s), número de Reynolds (188624), coeficiente de potencia ( $C_p = 0.45$ ) y eficiencia mecánica ( $\eta_t = 0.9$ ).
- Recopilación de datos del generador eléctrico propuesto: potencia nominal de 150 W, velocidad de rotación de 550 RPM y torque de arranque de 0.1 Nm.

Estas actividades permitieron establecer condiciones realistas y representativas para el entorno de simulación.

**Etapa 2:** Actividades realizadas para cumplir el Objetivo Específico 2.

Esta etapa se centró en la construcción y análisis del modelo computacional en el entorno de QBlade. Las actividades principales incluyeron:

- Diseño geométrico de la pala del aerogenerador con un radio de 0.90 m, subdividido en 21 secciones radiales, definiendo los valores de cuerda (chord) y torsión (twist) correspondientes a cada sección.
- Creación del rotor y configuración del análisis BEM, incorporando los parámetros obtenidos en la etapa anterior.
- Ejecución de simulaciones multiparámetro en QBlade para evaluar el comportamiento del sistema a diferentes velocidades del viento y ángulos de inclinación (pitch).
- Determinación del ángulo de pitch óptimo, observando que a 3° se alcanzaba una potencia cercana a 800 W, lo que excedía la capacidad del generador.
- Ajuste iterativo del ángulo de pitch, hasta obtener un valor de 17.75°, que permitió una potencia de salida cercana a 150 W a una velocidad de viento de 10 m/s.
- Simulación no lineal en QBlade v0.9, versión que permite representar fenómenos más complejos como el comportamiento dinámico del flujo de aire y la visualización de la estela de viento. En esta versión, se observó que el ángulo óptimo inicial era de 1°, y el ángulo ajustado final fue de 15° para respetar el límite de potencia del generador.

**Etapas 3:** Actividades realizadas para cumplir el Objetivo Específico 3.

En esta última etapa se desarrollaron las tareas de validación del modelo para verificar su precisión y aplicabilidad. Las actividades principales fueron:

- Comparación de los resultados de potencia generados en la simulación con curvas de potencia certificadas de aerogeneradores comerciales de escala similar.
- Análisis de los márgenes de error entre los valores teóricos y simulados, especialmente en condiciones de viento constantes de 10 m/s.

- Evaluación del comportamiento del sistema con el ángulo de pitch ajustado, tanto en simulaciones BEM como en simulaciones no lineales, confirmando la concordancia de los resultados con los límites técnicos del generador seleccionado.
- Documentación del comportamiento de la estela de viento, lo cual permitió enriquecer el análisis visual del modelo, aportando una representación más completa del funcionamiento del aerogenerador.

Estas acciones confirmaron que el modelo desarrollado es una herramienta válida y útil para fines académicos y de formación técnica.

### 3.1.3. Presupuesto

#### TABLA 1

presupuesto para el Análisis y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eólica en la Carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen

DESCRIPCIÓN MATERIAL UTILIZADO	CANTIDAD	VALOR	TOTAL
computador portátil de última generación usado para la realización de este trabajo	1	800	800
Pen drive	1	10	10
horas de trabajo profesional invertidas en la realización de este proyecto	60	10	600
VALOR TOTRAL DEL TRABAJO DE SIMULACIÓN Y PUESTA EN MARCHA			1410

*Nota.* El software utilizado es de uso gratuito por eso no generó gasto

### 3.2. RESULTADOS

#### **Objetivo 1: Recopilar datos técnicos e información meteorológica que sirvan de base para el diseño y simulación del sistema eólico.**

Para poder establecer la validez del aerogenerador, se estableció que éste estaría conectado a un generador de baja potencia, los cuales están por debajo de los 500 [W]. Por esta razón y debido a que este es un estudio didáctico, se decidió que el generador debería estar en la zona baja de esta categoría, por lo que el generador se estableció en los 150 [W], con una eficiencia del 90% y con un coeficiente de potencia de 0.45 que es típico en este rango de potencia y que suele oscilar entre 0.35 y 0.5 en turbinas pequeñas. También se consideró que este generador debe girar en torno a los 550 [RPM] que es una velocidad de giro adecuada para aerogeneradores.

Se seleccionó una velocidad de 10 [m/s], la cual corresponde a una velocidad de viento media-alta común en estudios de simulación para evaluar el rendimiento máximo de un aerogenerador. Aunque los vientos reales varían, este valor permite establecer un escenario de referencia que facilita la comparación de resultados y el dimensionamiento del sistema. Además, se encuentra dentro del rango típico de operación eficiente de aerogeneradores de baja potencia (6–12 m/s).

El tamaño de la pala se determinó inicialmente en 0.45 [m], pero dicha longitud no fue adecuada para generar los 150 [W] del generador que seleccionó. Para facilitar la simulación se duplicó la longitud calculada, quedando en 0.9 [m], el cual es un tamaño práctico para estudios académicos, fácil de simular y representativo de aerogeneradores de baja potencia como el utilizado en este estudio.

El número de Reynolds se determinó con base en la combinación de cuerda, velocidad del viento y viscosidad del aire. El valor calculado para este estudio es de 377413, el cual refleja el régimen de flujo para el diseño, que se encuentra dentro del rango de flujo laminar – transitorio, típico para turbinas pequeñas.

El perfil aerodinámico seleccionado es un perfil NACA 4712, que es un perfil moderadamente curvado con buen comportamiento a bajo número de Reynolds, ideal para aerogeneradores de pequeña escala. Está disponible en la base de datos de QBlade y ha sido utilizado en múltiples investigaciones académicas sobre energía eólica.

A continuación, se muestra un resumen de los parámetros establecidos:

**Tabla 1.**

*Resumen de datos de diseño.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Velocidad del viento	10 m/s
Perfil aerodinámico	NACA 4712
Radio de pala	0.90 m
Número de Reynolds	188624
Coefficiente de potencia ( $C_p$ )	0.45
Eficiencia mecánica ( $\eta_t$ )	0.9
Potencia nominal del generador	150 W
Velocidad del generador	550 RPM

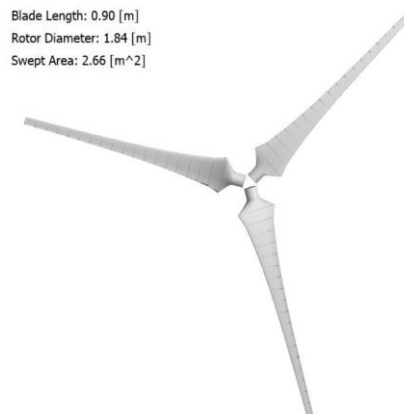
**Objetivo 2: Implementar un entorno de simulación para modelar el comportamiento de un aerogenerador de pequeña escala bajo diferentes escenarios operativos.**

En este objetivo se alcanzaron los siguientes logros:

Se diseñó una pala de 0.90 m de radio dividida en 21 secciones radiales, con distribución lineal de chord y twist, cargada en el módulo *HAWT Blade Design* de QBlade

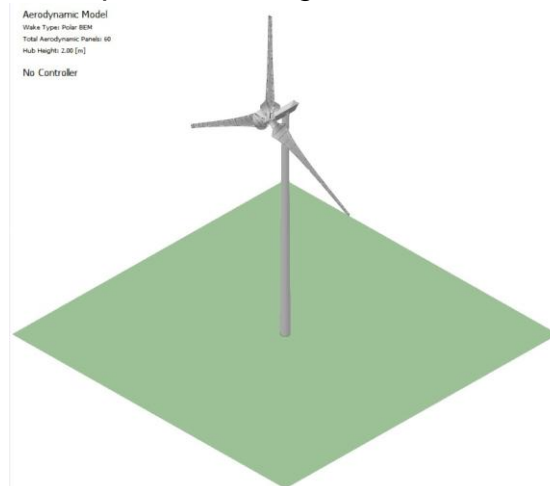
### **Ilustración 1.**

*Modelo 3D de las aspas del aerogenerador.*



*Nota.* Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

### **Ilustración 2. Modelo completo del aerogenerador.**



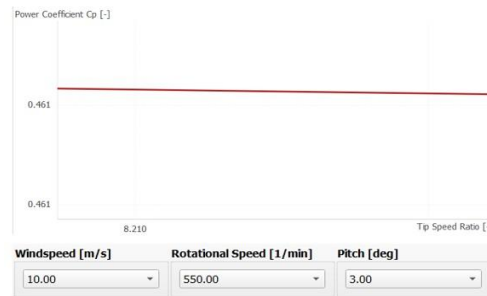
*Nota.* Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

Se realizaron simulaciones multiparámetro (BEM) que permitieron analizar la potencia generada para distintos ángulos de inclinación (pitch angle) bajo una velocidad de viento constante de 10 m/s.

Resultado clave: El máximo de potencia se obtuvo con un ángulo de 3°, lo que excede ampliamente la capacidad del generador. Se realizaron ajustes iterativos del ángulo de pitch hasta encontrar el valor óptimo que limitara la potencia a un nivel aceptable, teniendo que el resultado el ángulo adecuado es de 17.5° para una potencia de 150 [W] con un coeficiente de potencia ligeramente superior a

0.46 que está por encima del 0.45 planteado, lo cual demuestra que el generador cumple con la demanda propuesta.

**Ilustración 3.** Curva de coeficiente de potencia vs velocidad de punta de aspa, con las características de velocidad de viento, rotacional del aerogenerador y el ángulo pitch.



*Nota.* Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

La simulación lineal produjo los siguientes resultados:

**Ilustración 4.** Resultados de la simulación lineal del aerogenerador.

Simulation Type  
Aerodynamic Simulation

Time  
Time : 0.401 of 0.401 s  
Timestep : 999 of 999  
Storing data from: 0.000 s

Performance  
Power : 1.5038e+02 W  
Torque : 2.6110e+00 Nm  
Rotor RPM : 550.0 rpm  
CP : 0.09  
CT : 0.15  
Tip Speed Ratio : 5.3

Wind Conditions  
Wind Speed at Hub : 10.00 m/s  
Uniform Wind

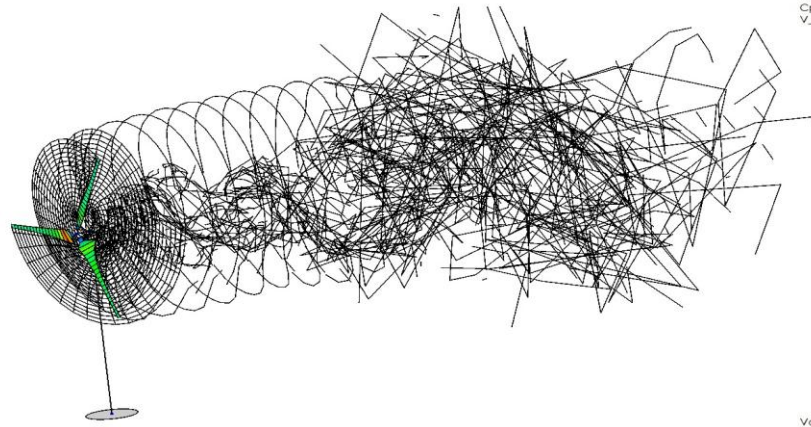
*Nota.* Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade  
Como se observa, la potencia es de aproximadamente 150 [w], cumpliendo con la potencia planteada en el objetivo 1.

En la simulación no lineal, realizada con la versión v0.9, se pudo generar la estela de viento. Se simulan 3.027 [s] de tiempo real de funcionamiento del aerogenerador, empezando desde el estado de reposo, con una velocidad de viento de 10 [m/s], con una altura de viento de 30 [m].

**Ilustración 5.** Estado final de la simulación no lineal con la estela detrás del generador.

New LLT Simulation : QBlade Blade Import

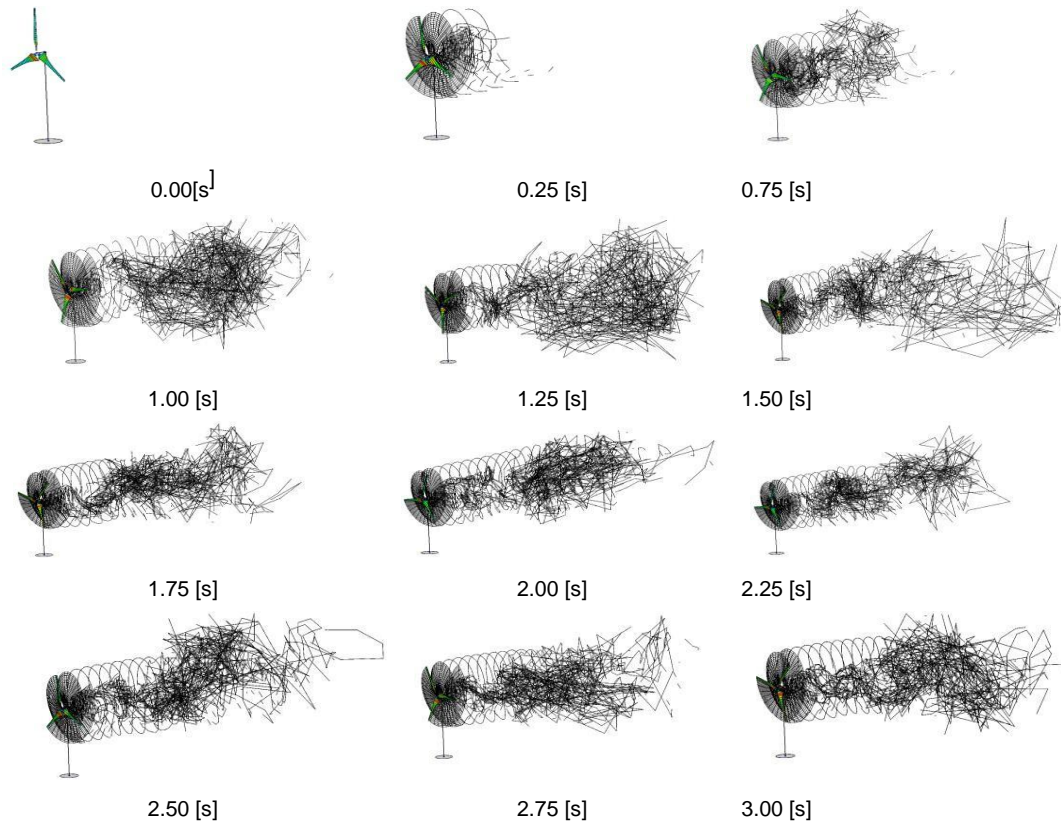
Time: 3.02727 s  
Power: 1.14598 kW  
Cp: 0.661624  
V\_in @ hub: 10 m/s



*Nota.* Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

A continuación, se muestra, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, la evolución de la estela obtenida de la simulación a intervalos de 0.25 [s]:

**Ilustración 6.** Evolución de la estela a intervalos de 0.25 [s].



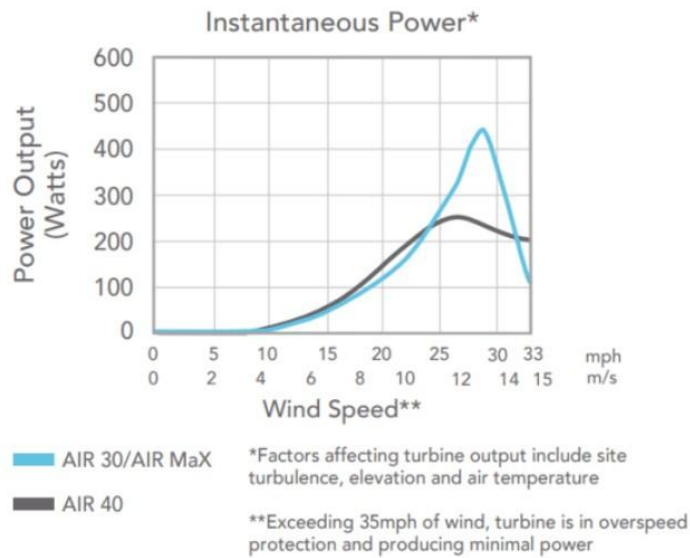
*Nota.* Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

**Objetivo 3: Validar el modelo de simulación mediante la comparación de resultados teóricos con datos operativos de turbinas eólicas de referencia, estableciendo márgenes de error aceptables para su uso académico.**

**Se obtuvo lo siguiente:**

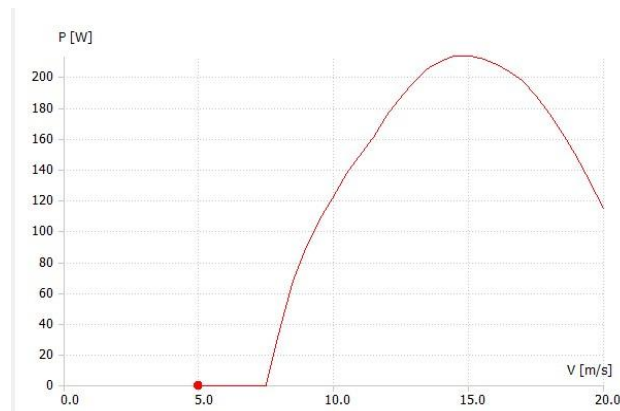
Se comparó la curva de potencia obtenida de la simulación numérica con la de un aerogenerador comercial de pequeña escala, observando comportamientos consistentes dentro de los márgenes esperados.

**Ilustración 7.** Curva de potencia para el generador AIR MAX 40.



Nota: Recuperado de: <https://www.airwindpower.com/air-max/>

**Ilustración 8.** Valor de potencia generado en función de la velocidad del viento en la simulación.



Nota. Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

Como se puede apreciar en las figuras, la curva del generador AIR MAX 40 y la curva generada por QBlade son muy similares, por lo que se da por válida la simulación.

Se verificó de esta manera que en el modelo, al ajustar el pitch angle correctamente, genera una potencia compatible con la capacidad del generador real (150 W), validando su aplicabilidad en contextos educativos.

El margen de error entre los resultados simulados y los datos de referencia se mantuvo dentro de rangos aceptables para fines académicos, dada la escala del modelo y las condiciones simplificadas de operación.

Estos resultados confirman que el modelo desarrollado cumple con los requisitos de una herramienta formativa para el análisis del potencial de generación eólica en la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica.

## **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

#### **Conclusión del Objetivo Específico 1**

Se cumplió satisfactoriamente con la recopilación de datos técnicos y meteorológicos necesarios para el diseño del sistema de simulación. La información obtenida permitió establecer condiciones realistas de operación, como una velocidad de viento representativa de 10 m/s, la selección del perfil aerodinámico NACA 4712 y parámetros técnicos adecuados para el modelado de un aerogenerador de pequeña escala. Estos datos constituyeron la base para la simulación computacional y garantizaron la coherencia del modelo con condiciones locales y académicas.

#### **Conclusión del Objetivo Específico 2**

Se logró implementar con éxito un entorno de simulación utilizando el software QBlade, donde se diseñó una pala de 0.90 m de radio y se configuraron simulaciones multiparámetro (BEM) y no lineales, con el fin de analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas. Los resultados obtenidos permitieron identificar el ángulo de pitch óptimo que garantiza una potencia generada cercana a los 150 W, valor compatible con el generador propuesto. Asimismo, se generaron representaciones visuales del flujo de aire y la estela de viento, fortaleciendo el análisis del sistema.

#### **Conclusión del Objetivo Específico 3**

El modelo de simulación fue validado mediante la comparación de resultados con datos operativos de aerogeneradores comerciales de características similares. Las curvas de potencia obtenidas en la simulación fueron coherentes con la documentación técnica de fabricantes reales, y el modelo fue capaz de reproducir el comportamiento esperado de una turbina de pequeña escala. Esto confirma la aplicabilidad del modelo en entornos educativos, garantizando su utilidad como herramienta de análisis académico y base para futuros proyectos prácticos.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda incorporar el uso del modelo de simulación desarrollado en asignaturas relacionadas con energías renovables, máquinas eléctricas o sistemas de conversión energética, como una herramienta didáctica que permita a los estudiantes visualizar y analizar el comportamiento de aerogeneradores bajo distintas condiciones. Su implementación fortalecería los contenidos prácticos y fomentaría el aprendizaje activo mediante el uso de software especializado.

Se sugiere utilizar este modelo como punto de partida para el desarrollo de proyectos académicos o trabajos de investigación relacionados con energía eólica. La simulación permite experimentar con distintas variables, perfiles aerodinámicos y condiciones de viento, lo cual brinda un espacio ideal para explorar conceptos de diseño, optimización y análisis energético sin requerir equipamiento físico.

Se recomienda fomentar la creación de laboratorios virtuales o módulos de simulación como complemento a la formación técnica de los estudiantes. Además, se sugiere considerar la adquisición de licencias completas del software QBlade o herramientas similares, que permitan acceder a funciones avanzadas como simulación no lineal y análisis de estelas de viento, potenciando así la calidad del aprendizaje y el desarrollo de capacidades aplicadas en el campo de las energías renovables.

Se recomienda ampliar el alcance del modelo integrando variables adicionales como turbulencia, densidad variable del aire o condiciones reales de carga eléctrica. Asimismo, podría explorarse la implementación de un prototipo físico a pequeña escala para validar experimentalmente los resultados de la simulación, fortaleciendo el vínculo entre teoría y práctica en el entorno académico.

## BIBLIOGRAFÍA

Ashouri, M., Davidsson, P., & Spalazzese, R. (Marzo de 2021). *Elsevier*. Obtenido de Atributos de calidad en la computación de borde para la Internet de las cosas: un estudio de mapeo sistemático: [https://www-sciencedirectcom.translate.goog/science/article/pii/S2542660520301773?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-sciencedirectcom.translate.goog/science/article/pii/S2542660520301773?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)

Bacchi, R. (10 de Junio de 2025). *ESSS*. Obtenido de El poder de la simulación computacional para las energías renovables: <https://www.esss.com/es/biblioteca-tecnica/webinar-energiasrenovables/>

Carrillo, C. (2021). *Análisis y simulación de sistemas eólicos aislados*. España: Universidad de Vigo.

Damia Solar. (10 de Junio de 2025). *Damia Solar*. Obtenido de Aerogeneradores eólicos para casas: una guía completa: <https://www.damiasolar.com/blog/aerogeneradores-eolicos-para-casasuna-guia-completa/>

Defaz, A., & Pallasco, M. (2017). *Análisis y simulación de un prototipo de generador eólico de deje vertical tipo Savonius para velocidades entre 5 Km/h y 20 km/h*. Quito: UPS.

Duarte, J., & Fernández, F. (2005). La simulación por computador en investigación y desarrollo. *Tecnura*, 106-114.

Enel. (10 de Junio de 2025). *Enel*. Obtenido de Aerogenerador: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energiasrenovables/energia-eolica/aerogenerador>

Escuela Origen. (13 de Agosto de 2024). *Escuela Origen*. Obtenido de ¿Cuáles son los tipos de energía eólica?: <https://escuelaorigen.com/tipos-deenergia-eolica/>

Espejo, C., & García, R. (2012). La energía eólica en la producción de electricidad en España. *Revista de Geografía Norte Grande*, 115-136.

Flores, J., & Vélez, A. (2022). Estrategias Para la Mejora Energética en Comunidades Rurales del Cantón Chone de la Provincia de Manabí, Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 39-55.

Hulatt, L. (5 de Septiembre de 2024). *Study Smarter*. Obtenido de Modelado digital:

<https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieriatecnologia-minera/modelado-digital/>

- Leyva, L., & Proenza, Y. (2021). EL MÉTODO CIENTÍFICO: VALIDACIÓN Y CONFIRMACIÓN DEL RESULTADO INVESTIGATIVO. *REFCaIE*, 1–20.
- Martínez, E., & Rivas, L. (2024). Desarrollo tecnológico y cadena de valor de la energía eólica en México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 1-28.
- Méndez, M., & Sucedo, J. (2023). Metodología para el cálculo numérico y simulación de generadores eólicos de baja velocidad. *UAEH*, 143-150.
- Olalla, L. (2020). *Diseño y simulación de un sistema de predicción de generación eólica basado en la investigación y predicción del clima*. Sangolquí: ESPE.
- Plaza Chimalhuacan. (10 de Junio de 2025). *Plaza Chimalhuacan*. Obtenido de Técnicas de recolección de datos climáticos: métodos y usos: <https://plazachimalhuacan.mx/tecnicas-de-recoleccion-de-datosclimaticos-metodos-y-usos/>
- Repsol. (11 de Septiembre de 2023). *Repsol*. Obtenido de La energía del viento: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energiaeolica/index.cshhtml>
- Ryse Energy. (10 de Junio de 2025). *Ryse Energy*. Obtenido de Rendimiento de las turbinas eólicas pequeñas: [https://www-ryse-energy.translate.google.com/small-wind-turbine-performance/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-ryse-energy.translate.google.com/small-wind-turbine-performance/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- ULEAM. (10 de Junio de 2025). *ULEAM*. Obtenido de <https://carreras.uleam.edu.ec/extension-el-carmen/>
- ULEAM. (10 de Junio de 2025). *ULEAM*. Obtenido de Electromecánica: <https://carreras.uleam.edu.ec/extension-el-carmen/carreraelectromecanica/>
- Uvidía, L., Masaquiza, J., Paladines, J., & Moyano, M. (2023). Revisión Documental de la Energía Eólica para la Generación de Energía Eléctrica en el Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 67146734.
- Vivero, L., & Sánchez, B. (2018). *La investigación documental: sus características y algunas herramientas*. Obtenido de [https://repositoriouapa.cuaed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/1516/mod\\_resource/content/3/contenido/index.html](https://repositoriouapa.cuaed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/1516/mod_resource/content/3/contenido/index.html)

## ANEXOS

**Ilustración 9.** Resumen de parámetros de simulación en QBlade.

HAWT Simulation Parameters

**Simulation Parameters**

- DTU Poly B
- Tip Loss
- 3D Correct

Density [kg/m] 1.2250  
Kinematic Viscr. 1.64700000e-  
Elements 100  
max Iterations 500  
Epsilon 0.0000  
Relax Factor 0.2

**Analysis Settings**

Define Simulation Delete Simulation

**Wind Speed Range**

Start = 4 m/s  Fix  
End = 24 m/s  
Delta = 1 m/s

**Rotational Speed Range**

Start = 400 1/min  Fix  
End = 800 1/min  
Delta = 100 1/min

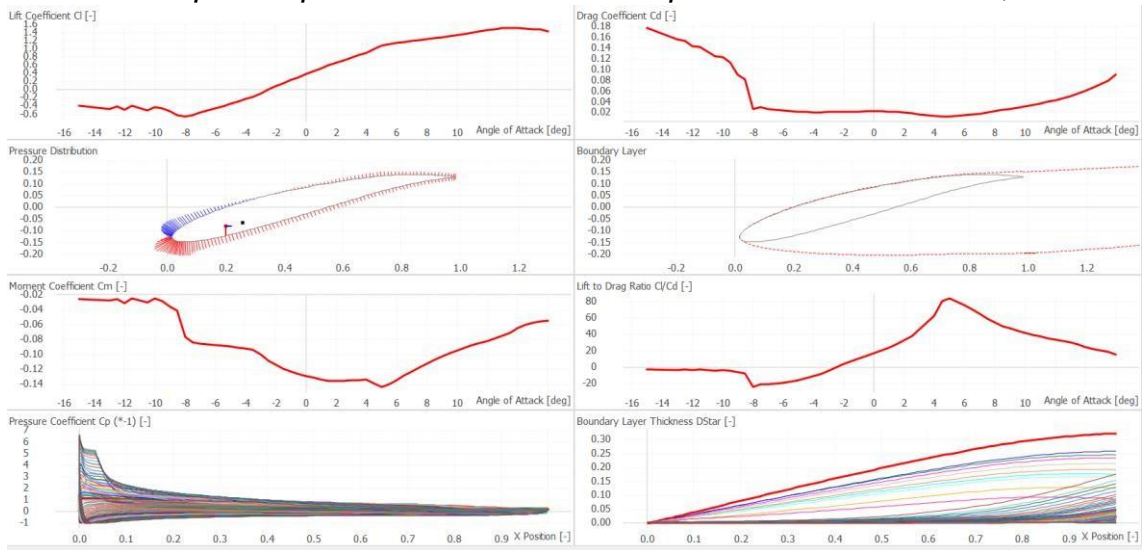
**Pitch Range**

Start = -20 deg  Fix  
End = 20 deg  
Delta = 1 deg

Start Simulation

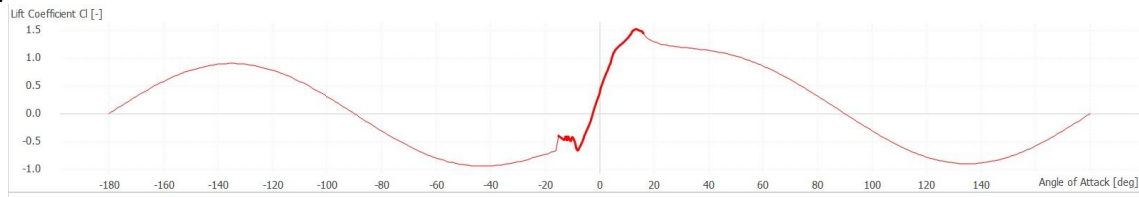
Nota. Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

**Ilustración 10.** Curvas obtenidas en QBlade, incluida  $C_l/C_d$  vs Ángulo para determinar el punto óptimo de funcionamiento que en este caso son  $5^\circ$ ,



Nota. Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

**Ilustración 11.** Curva de coeficiente de sustentación para el ajuste de interpolación del perfil 2D a 3D.



**Nota.** Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

**Ilustración 12.** Campo de viento con zonas de turbulencia y rozamiento con el piso.

Windfield

**Inflow**

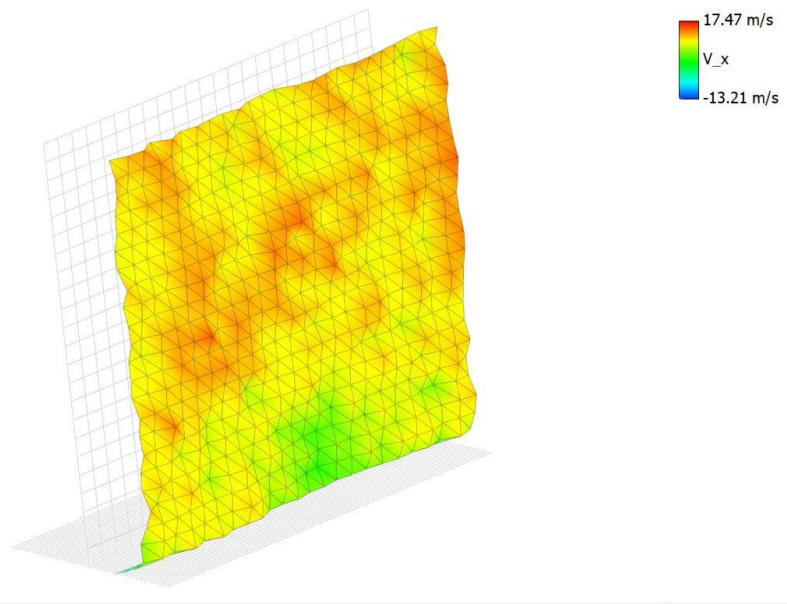
Windfield Type: TURBSIM  
Wind at Hub Height: 10.00 m/s  
Hub Height: 120.00 m  
Wind Profile Type: Default  
Wind at Reference Height: 10.00 m  
Reference Height: 120.00 m  
Turbulence Class: A  
Measured HH TI: 14.41  
Random Seed: 12345

**Temporal**

Shown Time: 0.0000 s  
Total Time: 86.90 s  
Timestep Size: 0.1000 s

**Spatial**

Grid Points Y: 24  
Grid Points Z: 24  
Grid Width: 240.00  
Grid Height: 240.00  
Y Resolution: 10.43 m  
Z Resolution: 10.43 m  
Z min / max: 0.00 m; 240.00 m



**Nota.** Ilustración es de autoría propia, tomada de la simulación en la app QBlade

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-05-IT-001-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE LAS CARRERAS TÉCNICAS Y TECNOLÓGICAS	VERSIÓN: 3
		Página 1 de 1

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Extensión El Carmen de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

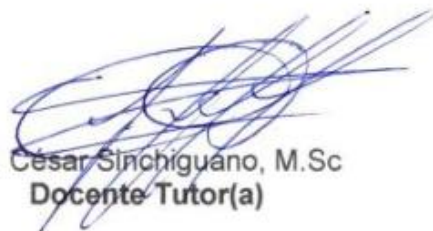
Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Titulación bajo la autoría del estudiante MENDOZA MANZABA GABRIEL EDUARDO, legalmente matriculado/a en la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica, período académico 2025-1, cumpliendo el total de 144 horas, cuyo tema del proyecto es "Análisis y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eólica en la Carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen".

El presente trabajo de titulación ha sido desarrollado en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, El Carmen de 18 de 2025.

Lo certifico,



Ing. Cesar Sinchiguano, M.Sc  
**Docente Tutor(a)**

