



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

Hábitat, Ingenio y Creatividad

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA CON AUTOPROTECCIÓN EN
CONDICIONES CLIMÁTICAS ADVERSA BASADA EN INTERNET DE LAS COSAS
(IoT).**

ARTOS ORBE JOSE LUIS

TUTOR:

DIEGO RAUL MAFLA RIVADENEIRA

IBARRA – ECUADOR

JULIO, 2025

CERTIFICACIÓN TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo del trabajo de integración curricular del/a estudiantes:
JOSÉ LUIS ARTOS ORBE titulado:

PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA CON AUTOPROTECCIÓN EN CONDICIONES CLIMÁTICAS ADVERSA BASADA EN INTERNET DE LAS COSAS (IoT)., presentado por el estudiante Jose Luis Artos Obre con cédula de ciudadanía N°1004124689, para obtener el Título de Ingeniero en tecnologías de la información

Certifico que el trabajo cumple con todos los parámetros establecidos, mediante el cual el estudiante demuestra el desarrollo de competencias en el campo de conocimiento de su profesión con un nivel de argumentación coherente, para ser sometido a la evaluación por parte de los lectores.

Adicionalmente, se adjunta el certificado de porcentaje de originalidad de TURNITIN.

12/8/25, 12:16 p.m. Turnitin - Informe de Originalidad - Artos_Jose_Tesis.pdf

Turnitin Informe de Originalidad		
Procesado el: 12-ago-2025 12:07 -05	Índice de similitud 1%	Similitud según fuente
Identificador: 2728753176		Fuentes de Internet: 1%
Número de palabras: 11378		Publicaciones: 0%
Entregado: 1		Trabajos del estudiante: 0%
Artos_Jose_Tesis.pdf Por JOSE LUIS ARTOS ORBE		

Coincidencia del 1% (Internet desde 14-mar-2024)
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27277/4/TTS1791.pdf>

RESUMEN La presente tesis tiene como objetivo principal el desarrollo de un prototipo de turbina eólica con un sistema de autoprotección basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), capaz de responder de forma automática ante condiciones climáticas adversas. El proyecto se enfocó en el diseño y construcción de una solución funcional que detecte variables críticas como la velocidad del viento y las vibraciones, activando mecanismos de protección en las palas para evitar daños estructurales. Se

Diego Raúl Mafla Rivadeneira
Firmado digitalmente por Diego Raúl Mafla Rivadeneira
Fecha: 2025.08.14 16:19:35 0500'

Mgs. Diego Raúl Mafla Rivadeneira

TUTOR DE TRABAJO

C.C.: 1001698644

PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El tribunal examinador, aprueba el presente trabajo en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra:

Diego Raúl Mafla
Rivadeneira
(f):.....
Firmado digitalmente por
Diego Raúl Mafla Rivadeneira
Fecha: 2025.08.14 16:19:57
-05'00'

Mgs. Diego Raúl Mafla Rivadeneira

C.C.: 1001698644

Stalin Marcelo
Arciniegas
Aguirre
(f):.....
Firmado digitalmente
por Stalin Marcelo
Arciniegas Aguirre
Fecha: 2025.08.14
16:21:21 -0500'

Mgs. Stalin Marcelo Arciniegas Aguirre

C.C.: 1003496815

Galo Hernán
Puetate Huera
(f).....
Firmado digitalmente por
Galo Hernán Puetate
Huera
Fecha: 2025.08.14
16:22:24 -0500'

Mgs. Galo Hernán Puetate Huera

C.C.: 0401375787

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo, *Jose Luis Artos Orbe*, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 del Código Orgánico de Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derechos de disponer de sus derechos o autorizar las utilidades de sus obras o prestaciones a título gratuito y oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, 12/08/2025

Jose Luis Artos Orbe
(f):
Firmado digitalmente por Jose Luis Artos Orbe
Fecha: 2025.08.14 12:06:20 -05'00'

Jose Luis Artos Orbe

C.C.: 1004124689

AUTORIA

Yo, *Jose Luis Artos Orbe*, portador (@ de la cedula de ciudadanía N° 1004124689 declaro que el presente trabajo de investigación es de total responsabilidad del autor@, y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra de posibles reclamos o acciones legales.

Jose Luis
Artos Orbe
(f):.....

Firmado digitalmente
por Jose Luis Artos
Orbe
Fecha: 2025.08.14
12:06:42 -05'00'

Jose Luis Artos Orbe

C.C.:1004124689

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por brindarme salud, sabiduría y la oportunidad de alcanzar esta meta.

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su esfuerzo incansable y por enseñarme con el ejemplo el valor del trabajo honesto.

A mi familia en general, por sus palabras de aliento, su paciencia y su compañía en los momentos más difíciles del camino.

Cada logro alcanzado es también suyo.

También agradezco a mis docentes y compañeros, quienes con su guía y colaboración aportaron significativamente a mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

CERTIFICACIÓN TUTOR.....	ii
PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iv
ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS	v
AUTORIA.....	vi
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCION	xiv
Objetivo General	xv
Objetivos Específicos.....	xv
CAPITULO I.....	xvi
1.1. Antecedentes de la investigación	xvi
1.2 Conceptos clave.....	xvii
1.2.1 Energía eólica.....	xvii
1.2.2 Turbinas eólicas	xix
1.2.3 Internet de las Cosas (IoT).....	xxiii
1.2.4 Optimización y autoprotección en sistemas eólicos.....	xxv
1.3. Teorías relacionadas.....	xxv
1.3.1 Teoría aerodinámica de las turbinas eólicas	xxv
1.3.2 Teoría del control en sistemas dinámicos	xxvi
1.4 Base legal y normativas.....	xxvi
1.4.1 Regulación sobre energía renovable.....	xxvi
1.4.2 Normas de seguridad en sistemas IoT.....	xxvii
1.4.3 Impacto ambiental y regulaciones.....	xxvii
1.5. Antecedentes	xxviii
1.5.1 Mecanismos de protección en turbinas eólicas.....	xxix
CAPITULO II.....	xxx
2.1 Aspectos generales de la investigación.....	xxx

2.1.1 Alcance del Proyecto	xxxiii
2.1.2 Metodología para el desarrollo.....	xxxiv
2.2 Identificar requisitos iniciales.....	xxxv
2.2.1 Propósito.....	xxxv
2.2.2 Cronograma de actividades	xxxvii
2.3 Construcción del Prototipo	xl
2.3.1 Interconexión de Dispositivos y Arquitectura Física	xl
2.3.2 Configuración del entorno de desarrollo	xliv
2.3.3 Captura de datos y entrenamiento del modelo de clasificación	xliv
2.3.4 Programación del ESP32 y control de actuadores.....	xlvi
2.3.5 Comunicación MQTT y configuración del broker	xlvii
2.3.6 Integración con Node-RED y visualización	xlviii
2.3.7 Implementación de notificaciones a Telegram	xlviii
2.3.8 Envío estructurado de datos desde el ESP32.....	xlix
2.4 Diseño físico de la turbina Savonius.....	l
2.4.1 Materiales utilizados.....	l
2.4.2 Medidas de la turbina	li
2.4.3 Estructura de soporte y servomotores	lii
CAPITULO III	liii
Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1 Desarrollo del Prototipo Físico y Electrónico.....	liv
3.1.1 Diseño y Construcción Física.....	liv
3.1.2 Desarrollo del Sistema Electrónico.....	lv
3.2 Resultados del Entrenamiento con Edge Impulse para XIAO nRF52840 Sense	lix
3.3 Medición Complementaria con Anemómetro	lxii
3.4 Respuesta del Sistema: Protección, Alerta y Registro	lxiv
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	lxv
BIBLIOGRAFÍA	lxvii
ANEXOS	lxx
Guion de Entrevista Semiestructurada.....	lxx

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: REQUISITOS FUNCIONALES.....	XXXII
TABLA 2: REQUISITOS NO FUNCIONALES. ROLES CLAVE EN EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO.....	XXXIII
TABLA 3: HISTORIAS DE USUARIO.....	XXXVI
TABLA 4: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	XXXVII
TABLA 5: LISTA DE MATERIALES Y DIMENSIONES.....	LI

ÍNDICE DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1 EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LA ENERGÍA EÓLICA	XVIII
ILUSTRACIÓN 2: ANÁLISIS DE COEFICIENTE DE POTENCIA C_p , COEFICIENTE TSR PROTOTIPO TURBINA EÓLICA SAVONIUS TURBEOL M01. CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DE NARIÑO	XXI
ILUSTRACIÓN 3 ESQUEMA DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL Y VERTICAL: SAVONIUS, DARRIEUS Y GIROMILL	XXII
ILUSTRACIÓN 4 ANÁLISIS DEL VIENTO	XXII
ILUSTRACIÓN 5: CICLO DE LA METODOLOGÍA DE PROTOTIPADO	XXXV
ILUSTRACIÓN 6 DIAGRAMA DE SECUENCIA.....	XXXIX
ILUSTRACIÓN 7 PATRÓN DE DISEÑO	XL
ILUSTRACIÓN 8: DIAGRAMA DE CONEXIONES ENTRE ESP32 Y XIAO NRF52840.....	XLI
ILUSTRACIÓN 9: CONEXIÓN FÍSICA DEL ANEMÓMETRO CON EL ESP32 USANDO DIVISOR DE VOLTAJE	XLII
ILUSTRACIÓN 10: CONEXIONES ELÉCTRICAS DE LOS SERVOMOTORES AL ESP32 Y FUENTE EXTERNA	XLIII
ILUSTRACIÓN 11 CARGA DEL FIRMWARE EN CADA MICROCONTROLADOR SEGÚN SU ROL.....	XLIV
ILUSTRACIÓN 12: MODELO DE CLASIFICACIÓN UTILIZANDO LA PLATAFORMA EDGE IMPULSE.....	XLV
ILUSTRACIÓN 13: RECEPCIÓN EN TIEMPO REAL DE INFERENCIAS GENERADAS A PARTIR DE LOS DATOS DEL ACELERÓMETRO INCORPORADO EN EL XIAO	XLV
ILUSTRACIÓN 14: LECTURAS ANALÓGICAS PERIÓDICAS PARA ESTIMAR LA INTENSIDAD DEL VIENTO	XLVI
ILUSTRACIÓN 15: FORMATO JSON Y SE ENVÍAN MEDIANTE EL PROTOCOLO MQTT HACIA UN BROKER CONFIGURADO EN NODE-RED	XLVII
ILUSTRACIÓN 16: MOSQUITTO BROKER INSTALADO LOCALMENTE	XLVII
ILUSTRACIÓN 17: ADICIÓN DE NODOS ADICIONALES PARA VISUALIZACIÓN (DASHBOARD), MENSAJERÍA (TELEGRAM) Y ALMACENAMIENTO (INFLUXDB).....	XLVIII
ILUSTRACIÓN 18: CONFIGURACIÓN INICIAL DEL BOT, INCLUYENDO EL ENVÍO DEL PRIMER MENSAJE DESDE EL USUARIO PARA CAPTURAR EL CHAT_ID	XLIX
ILUSTRACIÓN 19: DISEÑO DEL DISCO SUPERIOR, INCLUYENDO LAS POSICIONES ANGULARES DE LOS SERVOS Y LAS DIMENSIONES	LII
ILUSTRACIÓN 20: ENSAMBLADO INTERNO Y EXTERNO.....	LIV
ILUSTRACIÓN 21: PROTOBOARD CON LA ELECTRÓNICA DE CONTROL	LV
ILUSTRACIÓN 22: ESQUEMA DEL CIRCUITO	LVI
ILUSTRACIÓN 23: ALIMENTACIÓN DIRECTA DE LA SALIDA DEL REGULADOR DE 5V.....	LVII
ILUSTRACIÓN 24: POSICIÓN DE AUTOPROTECCIÓN	LVIII
ILUSTRACIÓN 25: POSICIÓN ORIGINAL	LIX
ILUSTRACIÓN 26: RESULTADOS DSP.....	LXI
ILUSTRACIÓN 27: EXPLORADOR DE ANOMALÍAS.....	LXII
ILUSTRACIÓN 28: ANEMÓMETRO CONEXIONES	LXIII
ILUSTRACIÓN 29: CAMBIO DE ALERTA FALSE A TRUE ACTIVANDO EL MECANISMO Y ENVIANDO LA ALERTA.....	LXIV
ILUSTRACIÓN 30: ENVÍO DE LA ALERTA A TELEGRAMA	LXIV
ILUSTRACIÓN 31: DISEÑO DEL CIRCUITO PARA PLACA PCB	LXV
ILUSTRACIÓN 32: DISEÑO FINAL DE LA TURBINA EÓLICA.....	LXV

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal el desarrollo de un prototipo de turbina eólica con un sistema de autoprotección basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), capaz de responder de forma automática ante condiciones climáticas adversas. El proyecto se enfocó en el diseño y construcción de una solución funcional que detecte variables críticas como la velocidad del viento y las vibraciones, activando mecanismos de protección en las palas para evitar daños estructurales.

Se empleó la metodología de prototipado para construir un modelo físico a escala, integrando microcontroladores, sensores y servomotores. La recolección de datos se realizó mediante sensores conectados a un sistema embebido que permitió el monitoreo en tiempo real y el almacenamiento de datos para su posterior análisis. Además, se implementó un sistema de alerta y control que responde automáticamente cuando los parámetros superan ciertos umbrales de seguridad.

Los resultados obtenidos en pruebas controladas demostraron la efectividad del sistema para detectar condiciones de riesgo y activar la autoprotección de forma adecuada. Este trabajo aporta una solución innovadora que puede ser aplicada en futuros desarrollos de energías renovables, mejorando la seguridad y eficiencia de las turbinas eólicas mediante tecnologías IoT.

Palabras clave: Turbina eólica, autoprotección, condiciones climáticas adversas, Internet de las Cosas (IoT), prototipado, sensores, servomotores, monitoreo, energías renovables, microcontroladores.

ABSTRACT

This thesis presents the development of a prototype wind turbine equipped with a self-protection system based on Internet of Things (IoT) technologies, capable of automatically responding to adverse weather conditions. The project focused on designing and constructing a functional solution that detects critical variables such as wind speed and vibrations, triggering protection mechanisms in the blades to prevent structural damage.

A prototyping methodology was employed to build a scaled physical model, integrating microcontrollers, sensors, and servomotors. Data collection was carried out through sensors connected to an embedded system, enabling real-time monitoring and data storage for further analysis. Additionally, an alert and control system were implemented to respond automatically when parameters exceed predefined safety thresholds. The results obtained from controlled tests demonstrated the system's effectiveness in detecting hazardous conditions and activating self-protection mechanisms accordingly. This work contributes an innovative solution that can be applied to future renewable energy developments, enhancing the safety and efficiency of wind turbines through IoT technologies.

Keywords: Wind turbine, self-protection, adverse weather conditions, Internet of Things (IoT), prototyping, sensors, servomotors, monitoring, renewable energy, microcontrollers

INTRODUCCION

La transición global hacia fuentes de energía renovable se ha acelerado debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la energía eólica ha jugado un papel fundamental, emergiendo como una de las fuentes más eficientes y sostenibles para la generación de electricidad. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2020), la capacidad instalada de energía eólica mundial ha superado los 750 gigavatios (GW), lo que representa aproximadamente el 6,1% de la capacidad global total de generación eléctrica. En los últimos 10 años, la capacidad eólica ha crecido de forma exponencial, con un aumento anual promedio de aproximadamente el 12% en los últimos cinco años, y se espera que este ritmo continúe en los próximos años.

A pesar de los avances en la adopción de la energía eólica, la eficiencia operativa de las turbinas sigue siendo un reto considerable debido a las condiciones climáticas extremas y las fluctuaciones del viento. Las turbinas eólicas, al operar a la intemperie, son susceptibles a fallas mecánicas y daños estructurales ocasionados por vientos muy fuertes, corrosión por la humedad y otros factores ambientales. De acuerdo con la International Energy Agency (IEA, 2021), alrededor del 70% de los fallos en las turbinas se deben a problemas mecánicos en componentes clave, como las palas y los sistemas de transmisión, lo que genera costos elevados de mantenimiento y prolongados tiempos de inactividad.

Estos problemas son especialmente graves en regiones donde las condiciones climáticas extremas son frecuentes, lo que subraya la necesidad de soluciones que mejoren la resiliencia y fiabilidad de las turbinas. Actualmente, la mayoría de los sistemas de monitoreo y mantenimiento no son capaces de anticipar fallas con la suficiente precisión, lo que incrementa el riesgo de daños y reduce la vida útil de las turbinas. Ante este escenario, se plantea como esencial la implementación de tecnologías de monitoreo y control automatizado, como el Internet de las Cosas (IoT), para mejorar la capacidad de las turbinas de adaptarse a las condiciones del viento en tiempo real y optimizar su funcionamiento.

La **Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra (PUCE-I)**, una institución de prestigio reconocida por su excelencia académica y su contribución al desarrollo científico y tecnológico en el país. Como parte de su compromiso con la investigación y la innovación en el ámbito de la ingeniería y las ciencias aplicadas, la PUCE-I fomenta el desarrollo de proyectos que aporten soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas a los desafíos actuales. En este contexto, el presente estudio se enfoca en la implementación de tecnologías emergentes, como el **Internet de las Cosas (IoT)**, para optimizar el monitoreo, control y mantenimiento de turbinas eólicas en entornos climáticos adversos, fortaleciendo así la eficiencia y resiliencia de los sistemas de energía renovable.

De esta manera, se plantearon los siguientes objetivos para el logro de la propuesta, los cuales permitieron orientar el diseño, implementación y evaluación del prototipo de turbina eólica basado en IoT, asegurando su funcionamiento óptimo en condiciones climáticas adversas.

Objetivo General

Desarrollar un prototipo de turbina eólica con la capacidad de detectar vibraciones y condiciones de viento peligrosas, mediante el aprendizaje automático; con el fin de proteger las turbinas eólicas.

Objetivos Específicos

1. Investigar las características técnicas y los requisitos con las tecnologías IoT en la turbina eólica.
2. Determinar los componentes y sensores adecuados para monitorear variables como velocidad del viento y vibraciones.
3. Implementar un sistema de recolección y almacenamiento de datos que permita su consulta futura para monitoreo y análisis.
4. Probar el prototipo en un ambiente controlado al realizar pruebas para verificar la funcionalidad

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta un análisis detallado del estado actual del conocimiento relacionado con las turbinas eólicas, los sistemas de protección automatizada y el uso de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) para la supervisión y control en tiempo real. Se revisan investigaciones previas, avances tecnológicos, prototipos existentes y marcos teóricos relevantes que sustentan el desarrollo del presente proyecto. Asimismo, se analizan las principales metodologías, sensores y microcontroladores empleados en el ámbito de la energía eólica, identificando las oportunidades de mejora e innovación que justifican la propuesta de un prototipo con sistema de autoprotección ante condiciones climáticas adversas.

1.1. Antecedentes de la investigación

El desarrollo de la energía eólica ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas debido a la necesidad de fuentes de energía renovable y sostenible. Estudios previos han demostrado la viabilidad de las turbinas eólicas en diversas condiciones ambientales, así como la integración de tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT), para mejorar su eficiencia y seguridad:

- ❖ **Telefónica Tech:** Utiliza sensores IoT para monitorizar turbinas y paneles solares, optimizando el mantenimiento predictivo y reduciendo el desperdicio energético.
- ❖ **Proyecto VirtuWind (Dinamarca):** Implementó redes IIoT para mejorar la eficiencia operativa en parques eólicos terrestres, usando SDN y NFV para procesar datos estructurales.
- ❖ **Adaptación climática:** Los algoritmos de Aytun Ozturk y Norman (2003) permiten ajustar la orientación de las turbinas en tormentas, reduciendo un 20% el desgaste mecánico.

Diversos proyectos han explorado la implementación de sistemas inteligentes en turbinas eólicas para monitorear variables como la velocidad del viento, la temperatura y el rendimiento de los aerogeneradores:

- ❖ **Aplicación TESUP:** Permite gestionar turbinas desde un teléfono, con funciones como detención remota en emergencias y acceso a datos en tiempo real (velocidad del viento, temperatura, rendimiento)
- ❖ **Parque eólico de Gansu (China):** Con 100 subparques y una capacidad de 20.000 MW, es uno de los complejos más grandes del mundo, demostrando la escalabilidad de esta tecnología en diversas regiones

1.2 Conceptos clave

1.2.1 Energía eólica

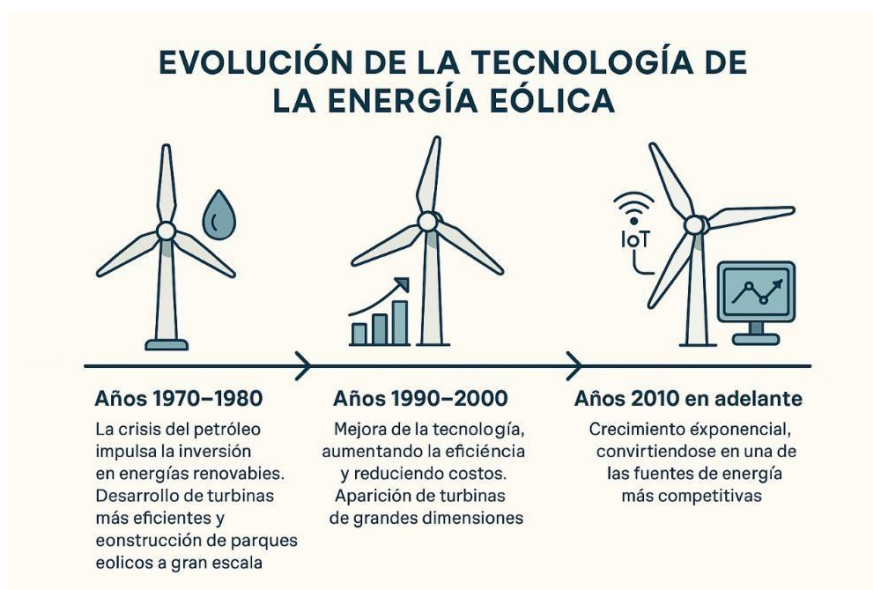
La energía eólica es aquella que se obtiene a partir del viento mediante aerogeneradores, que convierten la energía cinética del aire en energía eléctrica. Este tipo de energía renovable se ha convertido en una de las más utilizadas a nivel mundial debido a su bajo impacto ambiental, su sostenibilidad y su capacidad de generación en diversas geografías (BBVA, s.f.).

La utilización de la energía eólica ha evolucionado significativamente a lo largo de los años:

Historia Temprana: Las primeras formas de energía eólica fueron utilizadas por los antiguos egipcios (moletas de grano) y por los persas (barcos de vela) (Grupo Forma-t, 2023).

Se desarrollaron molinos de viento en Europa para bombear agua y moler grano (St Charger, 2022).

Revolución Industrial: En el siglo XIX, se comenzaron a construir los primeros aerogeneradores eléctricos. El primer generador eléctrico impulsado por viento fue diseñado por Charles F. Brush en 1888, que producía 12 kW de potencia (St Charger, 2022; Grupo Forma-t, 2023). De igual manera ocurrieron varios eventos que provocaron un mayor impulso el desarrollo de estas estructuras como se muestra en La Ilustración 1.



Impacto Ambiental: La energía eólica tiene un bajo impacto ambiental en comparación con las fuentes de energía fósil. No produce emisiones de gases de efecto invernadero durante su operación y requiere una superficie mínima en términos de uso del suelo. Sin embargo, es importante considerar el impacto potencial en la fauna, especialmente las aves y los murciélagos (Renov-Arte, s.f.).

Principales Países que utilizan Energía Eólica

La adopción de la energía eólica varía ampliamente entre los países. Algunos de los más destacados son:

- China es el mayor productor mundial de energía eólica con una capacidad instalada de más de 230 GW (hasta 2023) (BBVA,2023).
- Estados Unidos con más de 140 GW de capacidad instalada, EE.UU. tiene uno de los mercados de energía eólica más grandes del mundo, destacando especialmente en estados como Texas, Iowa y Oklahoma (Iberdrola,2024).
- Alemania ha sido un pionero en la adopción de energía eólica en Europa, con más de 60 GW de capacidad instalada (Endesa,2019)
- En India con una capacidad de más de 40 GW, India ha desarrollado rápidamente su sector eólico, especialmente en los estados de Tamil Nadu y Gujarat (BBVA, s.f.).

- España es uno de los líderes en energía eólica en Europa, con más de 27 GW instalados (Iberdrola, s.f.).
- En Dinamarca a nivel porcentual, Dinamarca es uno de los países que más energía obtiene de fuentes eólicas, alcanzando más del 47% de su consumo eléctrico en 2019 (Renov-Arte,2019).

Se espera que la energía eólica siga en crecimiento, impulsada por la necesidad de reducir las emisiones de carbono y avanzar hacia un modelo energético sostenible. Las innovaciones en diseño de turbinas, eficiencia de generación y almacenamiento de energía continuarán mejorando la viabilidad de la energía eólica (BBVA,2023).

1.2.2 Turbinas eólicas

Las turbinas eólicas son dispositivos diseñados para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Existen diferentes tipos de turbinas, como las de eje horizontal y las de eje vertical, cada una con características específicas para distintas condiciones ambientales.

Las turbinas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés) permiten la captura del viento independientemente de su dirección, lo que las hace especialmente adecuadas para entornos urbanos o áreas donde los patrones de viento son irregulares (Liu & James, 2024). Este tipo de turbinas se caracteriza por ser más compactas y, a menudo, más fáciles de instalar en espacios reducidos.

Características Principales de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés)

Este tipo de turbinas presentan una serie de ventajas que las hacen atractivas para diversas aplicaciones energéticas, tanto a nivel doméstico como comercial. Una de sus principales cualidades es su capacidad para gestionar de forma eficiente los vientos de baja velocidad, lo que las convierte en una solución versátil bajo distintas condiciones climatológicas (Sakib et al., 2023).

Adicionalmente, estas turbinas destacan por su bajo impacto acústico, ya que generan menos ruido en comparación con las turbinas de eje horizontal, siendo más adecuadas para entornos urbanos o residenciales (Liu & James, 2024). A ello se suma la facilidad de mantenimiento, resultado de un diseño que permite un acceso más directo a sus

componentes internos, optimizando así el tiempo y los recursos destinados a las labores de servicio (University of Minnesota, 2018).

Dentro de esta categoría de turbinas, existen diferentes configuraciones con características específicas. Por ejemplo, la turbina Savonius, cuyo diseño se asemeja a dos cucharas enfrentadas, es particularmente eficaz en la captación de vientos suaves y se emplea con frecuencia en sistemas de pequeña escala, como generadores domésticos (Sakib et al., 2023). Por otro lado, la turbina Darrieus, de diseño más aerodinámico, es más eficiente a velocidades de viento elevadas, aunque requiere un umbral mínimo de velocidad para iniciar su operación (Liu & James, 2024).

En los últimos años, las turbinas de eje vertical han ido ganando terreno dentro del panorama de las energías renovables. Su eficiencia, bajo mantenimiento, operación silenciosa y adaptabilidad a espacios reducidos las posicionan como una alternativa viable en entornos tanto rurales como urbanos. Además, su capacidad para operar en condiciones variables las convierte en una excelente opción para sistemas aislados o conectados a la red eléctrica (University of Minnesota, 2018). Finalmente, integrar este tipo de turbinas en la matriz energética representa un paso importante hacia un modelo más sostenible. Gracias a la generación de energía limpia y renovable, las turbinas de eje vertical contribuyen de forma significativa a la reducción de la huella de carbono. La Ilustración 2 muestra los componentes principales:

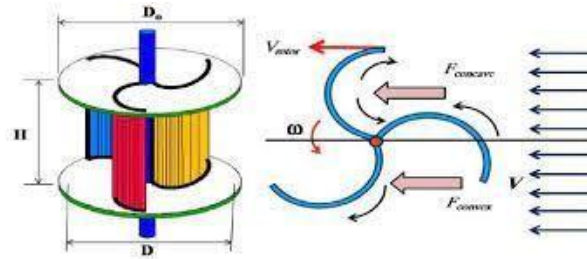
- Eje vertical: El eje alrededor del cual gira el rotor
- Palas: Las palas pueden ser helicoidales o de forma de huevo
- Rotor: El rotor gira alrededor del eje y está accionado por el viento
- Góndola: Contiene el generador
- Generador: Convierte la energía mecánica del rotor en energía eléctrica

Materiales

- La estructura principal de la torre y las palas se hacen de aleaciones de aluminio y acero
- Las palas se hacen de materiales compuestos avanzados como fibra de vidrio o fibra de carbono reforzada con resina epoxi
- La torre y los cimientos se hacen de acero estructural y hormigón

Ilustración 2:

Análisis de coeficiente de potencia C_p , coeficiente TSR prototipo turbina Eólica Savonius TURBEOL M01. Corporación Universitaria Autónoma de Nariño.



Nota: Moriano, E. (2021).

Principios de operación:

Funcionamiento aerodinámico

- **Savonius:**
El viento incide en las palas semicilíndricas, generando un torque por diferencia de presión entre las superficies cóncavas y convexas. Su rendimiento depende del ángulo de ataque y la geometría de las palas.
- **Darrieus:**
Las palas aerodinámicas (ej. perfiles NACA) generan sustentación al rotar, similar a las alas de avión. El ángulo de ataque varía dinámicamente durante la rotación, optimizando la captura de energía. En la Ilustración 3 se muestra los distintos tipos de turbinas eólicas que existen.

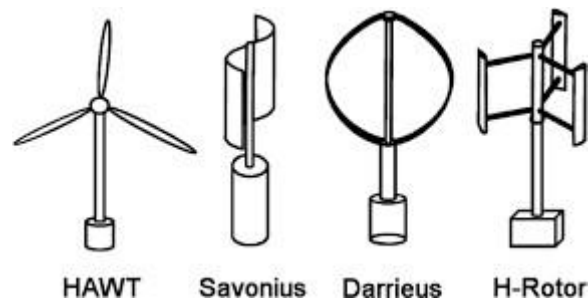
Eficiencia y rendimiento

Coeficiente de potencia (C_p):

- Savonius: $\leq 15\%$ (limitado por el principio de arrastre).
- Darrieus: 30-40%, cercano al límite teórico de Betz (59.3%).

Ilustración 3

Esquema de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical: Savonius, Darrieus y Giromill



Nota: Mehrpooya, 2014.

Factores que influyen:

- **Número de palas:** 3 palas optimizan el equilibrio entre torque y resistencia.
- **Velocidad específica (λ):** Valores entre 2-4 maximizan el Cp en Darrieus como se muestra en la Ilustración 4.
- **Perfil aerodinámico:** Perfiles asimétricos (ej. DU12W262) mejoran el rendimiento en flujos curvos típicos de VAWTs.

Ilustración

4

Análisis del viento



Nota: La Ilustración 4 muestra el análisis de viento en operación, Imagen generada con OpenAI(2025)

1.2.3 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) es un paradigma tecnológico que permite la interconexión de dispositivos a través de internet, facilitando la recopilación y el análisis de datos en tiempo real. En el contexto de las turbinas eólicas, el IoT permite la implementación de sensores para monitorear variables críticas como la velocidad del viento, la velocidad de rotación de la turbina, la temperatura y los niveles de vibración, mejorando así el rendimiento del sistema (Innowise, 2025).

El monitoreo continuo de las condiciones operativas de las turbinas eólicas facilita la detección temprana de posibles fallos y el mantenimiento predictivo (Worldsensing, 2024). Esto no solo reduce los costos operativos, sino que también aumenta la eficiencia general del sistema. Donde el control de las turbinas eólicas, lo que significa que los operadores pueden gestionar las condiciones de funcionamiento desde cualquier lugar, mejorando la flexibilidad y la eficiencia del sistema (TESUP, 2024).

Al analizar los datos recopilados por los sensores IoT, los operadores pueden optimizar el rendimiento de las turbinas eólicas, ajustando las condiciones de operación según las condiciones climáticas y del viento (Innowise, 2025).

La integración de IoT con soluciones de almacenamiento de energía permite una gestión más eficiente del suministro y la demanda de energía, especialmente en sistemas que combinan fuentes renovables intermitentes como la eólica y la solar (Enerlution, 2024). Algunas de las ventajas del IoT en la Generación de Energía Eólica son:

- El uso de IoT reduce los costos operativos al minimizar el mantenimiento no planificado y mejorar la eficiencia del sistema (Daitek, 2023).
- La monitorización continua y el análisis de datos permiten ajustar las condiciones de operación para maximizar la producción de energía (Innowise, 2025).
- El IoT permite predecir fallos y realizar mantenimiento predictivo, lo que aumenta la disponibilidad y vida útil de las turbinas eólicas (Worldsensing, 2024).

Componentes del sistema IoT

Sensores

Velocidad del viento: Anemómetros ultrasónicos o de copa miden con precisión hasta ± 0.1 m/s (Mesurex, 2020).

Vibración: Acelerómetros triaxiales identifican frecuencias anómalas (>2 kHz) asociadas a desgaste mecánico (Mesurex,2020).

Actuadores

Ajuste de palas: Servomotores de 20-50 Nm modifican el ángulo de inclinación (β) con precisión de $\pm 0.5^\circ$, optimizando la potencia en vientos variables (UPV, 2021).

Frenado de emergencia: Sistemas hidráulicos activados por PLCs detienen la turbina en <3 segundos ante ráfagas >25 m/s (TESUP, 2024).

Módulos de comunicación

LoRaWAN: Transmite datos a 2-5 km con bajo consumo (15 mW), ideal para parques remotos (S-Connect, s.f.).

NB-IoT: Ofrece latencia de 10-100 ms para control en tiempo real, integrado en redes 4G/5G (Innowise, 2025).

Ethernet industrial: Conecta sensores y PLCs en la góndola con velocidades de 1 Gbps (Mesurex, 2020).

Interacción sensores-actuadores

El flujo de datos sigue este proceso:

Recolección:

Sensores capturan variables operativas (ej. velocidad del viento = 12 m/s) y las envían a un PLC o gateway mediante protocolos como Modbus TCP (Innowise,2025).

Procesamiento:

Algoritmos en edge computing analizan datos en <100 ms (Innowise, 2025). Por ejemplo, si la vibración supera 5 mm/s², se activan alertas de desbalanceo.

Acción:

En condiciones normales, el PLC ajusta el ángulo de las palas para mantener un TSR (*Tip Speed Ratio*) de 4-6, maximizando C_p .

Ante vientos extremos (>20 m/s), los actuadores giran las palas a feather position (90°), reduciendo la carga un 40% (UPV, 2021).

Retroalimentación:

Los sistemas IoT generan informes predictivos usando modelos ARIMA, pronosticando fallos con un 92% de precisión (Innowise, 2025).

1.2.4 Optimización y autoprotección en sistemas eólicos

La optimización en sistemas eólicos se refiere al uso de técnicas y tecnologías avanzadas para maximizar la eficiencia energética y reducir el impacto de condiciones climáticas adversas. La autoprotección implica el desarrollo de mecanismos automáticos que permitan la protección de la turbina ante situaciones extremas, como ráfagas de viento superiores a los límites de seguridad.

1.3. Teorías relacionadas

1.3.1 Teoría aerodinámica de las turbinas eólicas

Esta teoría establece los principios físicos que rigen la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica y, posteriormente, en electricidad. Se basa en conceptos como el coeficiente de potencia, el efecto de sustentación y resistencia, y la ley de Betz, que define el límite teórico de eficiencia de una turbina eólica (Burton et al., 2011).

Coficiente de Potencia (Cp): Este parámetro mide la eficiencia de una turbina eólica en la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica. Un Cp más alto indica una mayor eficiencia (Manwell et al., 2010).

Efecto de Sustentación y Resistencia: La sustentación es la fuerza que permite a las palas de la turbina generar torque, mientras que la resistencia es la fuerza que se opone al movimiento de las palas. El equilibrio entre estas fuerzas es crucial para optimizar el rendimiento de la turbina (Burton et al., 2011).

Ley de Betz: Esta ley establece que el límite teórico de eficiencia para una turbina eólica es del 59.3%, conocido como el límite de Betz. Este límite se debe a que una parte del viento debe escapar detrás de la turbina para mantener su funcionamiento (Betz, 1919).

Velocidades ideales para operación

- Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) tipo Darrieus operan eficientemente con **velocidades de viento de 8 m/s**, alcanzando coeficientes de potencia (Cp) entre **25-31%** dependiendo del perfil aerodinámico y la relación TSR (*Tip Speed*

Ratio). Para estas turbinas, el TSR óptimo oscila entre **4-5**, maximizando la captura de energía en condiciones de diseño.

- En entornos urbanos o con flujos turbulentos, las turbinas Savonius son preferidas, ya que funcionan con **velocidades mínimas de 3-4 m/s**, aunque su C_p no supera el **15%** (De la Calle Bernardo, R.,2018).

1.3.2 Teoría del control en sistemas dinámicos

El control automático es un componente esencial en la optimización de turbinas eólicas. Se aplican modelos de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y técnicas de inteligencia artificial para ajustar el ángulo de las palas y la velocidad de rotación en función de las condiciones del viento (Jaramillo Martínez et al., 2014). Estos sistemas de control permiten maximizar la eficiencia energética y minimizar el desgaste de los componentes mecánicos.

Este modelo es ampliamente utilizado para regular el ángulo de ataque del viento en las aspas de la turbina, asegurando un rendimiento óptimo bajo condiciones variables de viento (Jaramillo Martínez et al., 2014). El control PID ajusta continuamente la respuesta del sistema para mantener la estabilidad y la eficiencia.

La velocidad de rotación se ajusta según las condiciones del viento para asegurar que la turbina opere dentro de su rango óptimo, reduciendo el desgaste y aumentando la vida útil del equipo (Emerson, s.f.).

Reducción de Costos y Mejora de la Confiabilidad: Los sistemas avanzados de control permiten predecir y prevenir fallos, lo que reduce los costos de mantenimiento y mejora la disponibilidad de la turbina (Emerson,2020).

1.4 Base legal y normativas

1.4.1 Regulación sobre energía renovable

Las turbinas eólicas deben cumplir con normativas nacionales e internacionales que regulan su instalación, operación y mantenimiento. Organismos como la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) y normativas ISO establecen lineamientos para la eficiencia y seguridad de estos sistemas.

1.4.2 Normas de seguridad en sistemas IoT

El uso de IoT en sistemas energéticos debe cumplir con estrictos estándares de ciberseguridad y protección de datos. La norma ISO/IEC 27001 proporciona directrices sobre la seguridad de la información en infraestructuras tecnológicas, lo que es crucial para garantizar la integridad y confiabilidad de los sistemas de control de energía que integran tecnologías IoT (ISO, s.f.).

Importancia de la Ciberseguridad en Sistemas Energéticos con IoT

Riesgos Cibernéticos: La integración de IoT en sistemas energéticos aumenta la superficie de ataque, haciéndolos más vulnerables a ciberataques que podrían interrumpir el suministro de energía o causar daños físicos a la infraestructura (Protectdata, 2023; EY, 2023).

Normas de Seguridad: La norma ISO/IEC 27001 es fundamental para establecer un marco de gestión de la seguridad de la información que proteja los datos y sistemas críticos en la industria energética (ISO, s.f.).

Implementación de Medidas de Seguridad: Las empresas deben implementar medidas robustas de ciberseguridad, como firewalls, sistemas de detección de intrusos y cifrado de datos, para proteger sus sistemas IoT contra amenazas cibernéticas (LinkedIn, 2024).

Tecnologías Avanzadas: La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático pueden ser utilizados para mejorar la detección de amenazas y la respuesta a incidentes, aumentando así la resiliencia de los sistemas energéticos (Protectdata, 2023).

1.4.3 Impacto ambiental y regulaciones

El desarrollo de turbinas eólicas debe considerar evaluaciones de impacto ambiental y normativas de preservación ecológica, garantizando que su instalación y operación no generen afectaciones significativas al ecosistema. A continuación, se presentan algunos aspectos clave sobre el impacto ambiental y las regulaciones asociadas a:

Contaminación Visual y Acústica: Las turbinas eólicas pueden causar contaminación visual y acústica, aunque los niveles de ruido suelen ser bajos y están por debajo del ruido del viento en sí (Aves Argentinas, 2019; Expoknews, 2023).

Impacto en la Fauna: La principal preocupación es el riesgo para las aves y los murciélagos, ya que las aspas de las turbinas pueden causar colisiones. Sin embargo, la

ubicación adecuada de los parques eólicos puede minimizar este impacto (Expoknews, 2023).

Uso del Suelo: Aunque las turbinas ocupan un espacio relativamente pequeño, su instalación puede alterar el hábitat local durante la fase de construcción (Delthawind, 2023). Según las Regulaciones y Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA):

Estas evaluaciones son obligatorias antes de la instalación de parques eólicos para identificar y mitigar posibles impactos ambientales. Incluyen estudios sobre la fauna local, el paisaje y el uso del suelo (Cuerva Energía, 2023).

Normativas de Preservación Ecológica: Muchos países tienen leyes específicas para proteger especies en peligro y ecosistemas sensibles. Las regulaciones pueden incluir restricciones sobre la ubicación de los parques eólicos y medidas para reducir el impacto en la fauna (Aves Argentinas, 2019).

Certificaciones y Estándares: Existen certificaciones como la ISO 14001 para sistemas de gestión ambiental, que ayudan a las empresas a cumplir con los estándares ambientales y a minimizar su huella ecológica (ISO, s.f.).

1.5. Antecedentes

Control remoto y monitoreo en tiempo real de turbinas eólicas mediante IoT
El proyecto de TESUP (2024) introduce una solución innovadora que permite a los usuarios controlar y monitorear sus turbinas eólicas directamente desde una aplicación móvil. Esta tecnología IoT proporciona datos en tiempo real sobre variables como velocidad del viento, temperatura y rendimiento de la turbina, facilitando la gestión remota y la optimización de la eficiencia energética. Este avance representa un nuevo estándar en la industria al ofrecer control personalizado y acceso inmediato a información crítica del sistema.

Monitorización permanente y mantenimiento predictivo en parques eólicos
La integración de IoT y sistemas de inteligencia artificial en el sector eólico ha transformado la gestión de parques eólicos. Ahora es posible realizar una monitorización permanente del "estado de salud" de cada componente de los aerogeneradores, lo que permite anticipar fallos, optimizar el mantenimiento y mejorar la productividad y fiabilidad de las instalaciones. Esta digitalización es clave para la transición energética y la sostenibilidad en el marco del Green Deal europeo (MonoM ,2024; Fracttal, 2025).

En Dinamarca: El proyecto VirtuWind, apoyado por Worldsensing y el programa Horizonte 2020 de la UE, implementó la primera red de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) en turbinas eólicas en Dinamarca. Utilizando tecnologías de redes definidas por software (SDN) y virtualización de funciones de red (NFV), el proyecto demostró cómo la conectividad inalámbrica y la monitorización avanzada pueden aumentar la eficiencia operativa, reducir costos y validar la viabilidad económica de soluciones IoT en el sector eólico.

Optimización y gestión de energía renovable con sensores IoT
La aplicación de sensores IoT en turbinas eólicas permite recopilar datos sobre velocidad y dirección del viento, posición de las aspas y condiciones ambientales. Estos datos se utilizan para ajustar automáticamente la configuración de la turbina y maximizar la producción de energía. Además, el IoT facilita la integración de fuentes renovables descentralizadas en la red eléctrica (IDEA TSG, 2024), mejorando la gestión de la oferta y la demanda en tiempo real.

En la tesis de Sucari Chavez (2022), se desarrolló un sistema IoT para la supervisión de la generación de energía eólica en Puno y Juliaca, Perú. El sistema permite monitorear la potencia generada, analizar ventajas y desventajas de la tecnología, y optimizar el rendimiento energético. La investigación destaca la importancia de un análisis detallado del sitio y las condiciones climáticas, así como la contribución de estos sistemas al desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida en la región.

1.5.1 Mecanismos de protección en turbinas eólicas

Recolocación o plegado de palas: En turbinas offshore, palas se pliegan automáticamente a $\beta=75^\circ$ ante tormentas, minimizando la superficie expuesta y evitando resonancias.

Sistemas como el de Nidec incluyen amortiguadores torsionales para absorber vibraciones durante el plegado.

CAPITULO II

Materiales y Métodos

En este capítulo se describen de manera detallada los materiales, componentes y herramientas utilizadas en el desarrollo del prototipo de turbina eólica automatizada basada en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). Además, se explican los métodos aplicados para su diseño, construcción y validación.

Se abordan aspectos como la selección de materiales estructurales, los sensores empleados para el monitoreo de condiciones ambientales y estructurales, el sistema de control basado en la plataforma ESP32, y el software utilizado para la simulación y análisis de datos. También se describe la metodología de prototipado rápido implementada, que incluye simulaciones aerodinámicas (CFD), la fabricación de componentes y las pruebas funcionales en ambientes controlados.

De esta manera, la investigación combina aspectos de ingeniería mecánica, electrónica e informática, buscando contribuir al avance de soluciones tecnológicas que potencien la eficiencia y durabilidad de los sistemas de energía renovable.

2.1 Aspectos generales de la investigación

El presente proyecto de investigación se enmarca en el desarrollo de un prototipo de turbina eólica inteligente que incorpora tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) para optimizar su funcionamiento y proteger sus componentes ante condiciones climáticas adversas. Este prototipo busca ofrecer una solución innovadora que permita detectar y reaccionar de manera automática frente a eventos como vientos fuertes o movimientos anómalos que puedan comprometer la integridad de la turbina.

La investigación se orienta hacia la integración de sensores (anemómetro y acelerómetro), microcontroladores (ESP32) y plataformas de gestión de datos en tiempo real (Node-RED e InfluxDB), permitiendo no solo el monitoreo continuo del sistema, sino también la emisión de alertas automáticas a través de Telegram. La solución propuesta se enmarca dentro de los esfuerzos por desarrollar tecnologías sostenibles, eficientes y resilientes que aprovechen las energías renovables, y al mismo tiempo integren inteligencia embebida para su operación.

Este proyecto se desarrolló bajo un enfoque experimental y tecnológico, priorizando la implementación práctica de un sistema funcional que sirva como base para futuras investigaciones o aplicaciones reales en entornos donde las condiciones del viento representan un riesgo constante para la infraestructura eólica.

En este contexto, se utilizaron las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de información:

- **Observación experimental directa:**

Se realizaron pruebas controladas del prototipo en condiciones simuladas de viento, observando el comportamiento del sistema ante diferentes niveles de velocidad y vibración.

- **Registro de datos mediante sensores IoT:**

Se emplearon sensores conectados al ESP32, incluyendo acelerómetro y anemómetro, para la medición continua de variables ambientales y de comportamiento estructural.

- **Bitácoras técnicas:**

Se llevaron registros detallados de las configuraciones, ajustes, fallos y mejoras realizadas durante el desarrollo del sistema.

- **Técnicas e instrumentos de recolección de la información:**

Mediante el análisis técnico y entrevistas semiestructuradas, cuyo guion se encuentra en Anexos con el análisis de estructuras y electrónica, se identificaron los requisitos funcionales y no funcionales del prototipo de turbina eólica con sistema de protección automatizada de palas. Esto se detallan en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1:

Requisitos funcionales

Código Descripción

RF-01	El sistema debe monitorear en tiempo real la velocidad del viento.
RF-02	El sistema debe detectar ráfagas de viento repentinas mayores a 15 m/s.
RF-03	El sistema debe activar automáticamente el mecanismo de protección de las palas al detectar velocidades de viento sostenidas superiores a 15 m/s, vibraciones estructurales mayores a 1.5 g, o ráfagas con cambios bruscos de más de 8 m/s en 5 segundos.
RF-04	El sistema debe permitir el registro histórico de datos de viento, vibración y temperatura.
RF-05	El sistema debe enviar notificaciones automáticas a través de Telegram cuando se active la protección.
RF-06	El prototipo debe ser capaz de operar con sensores de bajo consumo y conectividad inalámbrica.
RF-07	El sistema debe contar con una interfaz en Node-RED conectada a InfluxDB para visualizar los datos históricos y en tiempo real.
RF-08	El sistema debe permitir la calibración de umbrales de activación.

Tabla 2:

Requisitos no funcionales.

Roles clave en el desarrollo del prototipo

Categoría	Descripción
Usabilidad	La interfaz de monitoreo debe ser intuitiva y permitir que personal técnico pueda interpretar los datos en menos de 10 minutos de capacitación.
Seguridad	El sistema debe utilizar el protocolo MQTT seguro (con autenticación TLS) para la transmisión de datos del ESP32-S.
Eficiencia	El sistema debe detectar ráfagas de viento mediante el anemómetro y ejecutar el protocolo de protección (movimiento de palas) en menos de 1 a 3 s .
Consumo energético	El sistema completo (ESP32-S, sensores y 3 servomotores) no debe superar los 1.5 A a 5V , mientras que el anemómetro debe alimentarse con una fuente externa de 24V .
Tolerancia a fallos	En caso de pérdida de conexión Wi-Fi, el sistema debe ejecutar localmente las acciones de protección basadas en las lecturas del anemómetro y el acelerómetro.
Escalabilidad	La arquitectura debe permitir añadir sensores adicionales sin modificar la estructura del código base o del sistema de comunicación MQTT.

2.1.1 Alcance del Proyecto

El presente proyecto abarca el diseño, desarrollo y validación de un prototipo funcional de turbina eólica de eje vertical, el cual integra un sistema automatizado de protección para sus palas basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). El objetivo principal es garantizar el funcionamiento seguro y eficiente del sistema ante condiciones climáticas adversas, como vientos extremos.

Dentro del alcance, se establecen las siguientes variables a considerar para la activación del sistema de protección:

- **Velocidad del viento (m/s):** Se define un umbral de seguridad a partir de 15 m/s, a partir del cual el sistema activa mecanismos de protección automática de las palas, para evitar daños estructurales.
- **Nivel de vibración (g):** Se establece un límite máximo de vibración en el eje y en las palas de 1.5 g, superado el cual se activará el sistema de protección preventiva.
- **Condiciones de operación del sistema IoT:** Se incluye la transmisión en tiempo real de las variables medidas, con intervalos de muestreo de 10 segundo, asegurando la toma de decisiones inmediata por parte del sistema automatizado.

Estos límites han sido definidos a partir de referencias técnicas y criterios de seguridad recomendados para turbinas de pequeña escala, considerando tanto la protección de los componentes como la continuidad operativa bajo condiciones de riesgo. Las referencias técnicas consideradas fueron las siguientes:

IEC61400-1:2020: Sistemas de generación de energía eólica, establece requisitos de diseño para turbinas eólicas, incluyendo cargas estructurales y velocidades de viento de supervivencia

IEC 61400-25-1:2021: Comunicaciones para sistemas eólicos.

ISO 20816-1:2016: Evaluación de vibraciones en máquinas rotativas.

ISO/IEC 30141:2018: Arquitectura de referencia IoT.

2.1.2 Metodología para el desarrollo

La metodología adoptada para el desarrollo de este proyecto se basó en el enfoque de prototipado como se muestra en la Ilustración 5, que permitió construir versiones funcionales iterativas del sistema propuesto. Este enfoque fue ideal para validar la viabilidad técnica y ajustar el diseño de acuerdo con los resultados obtenidos en pruebas reales. La metodología se organiza en dos ejes principales: el diseño y desarrollo físico de la turbina, y la implementación del sistema IoT.

Ilustración 5:

Ciclo de la metodología de prototipado



Nota: El grafico muestra las faces que se deben seguir para la metodología de prototipado

2.2 Identificar requisitos iniciales

2.2.1 Propósito

El propósito de esta sección es presentar la autoprotección y optimización en condiciones climáticas adversas. En esta, se detalla la construcción del sistema empleando microcontroladores ESP32, sensores (anemómetro y acelerómetro) y herramientas de monitoreo como Node-RED, InfluxDB y Telegram para la notificación en tiempo real. El objetivo principal del prototipo es detectar eventos climáticos extremos, como vientos fuertes o movimientos anómalos, y activar mecanismos de protección automática que salvaguarden la integridad del sistema. Además, se busca proporcionar una plataforma de monitoreo accesible para el usuario final, con alertas inmediatas y registros históricos que permitan la evaluación del comportamiento del entorno y el rendimiento del sistema.

Planificación. La fase de planificación contempló el diseño de una ruta crítica de desarrollo, identificando los componentes clave del sistema y la secuencia lógica de integración. Esta planificación incluyó el establecimiento de hitos técnicos, la distribución de responsabilidades dentro del equipo de trabajo y la identificación de posibles riesgos durante el desarrollo del prototipo. Se consideraron aspectos como la adquisición de sensores, el modelado del flujo de datos, la configuración de microcontroladores y la definición del sistema de alertas.

Historias de Usuario. En el desarrollo del sistema basado en la metodología de prototipado, se identificaron y definieron historias de usuario clave que permitieron establecer los requerimientos funcionales prioritarios. Estas historias representan necesidades específicas del usuario final y del sistema embebido, permitiendo al equipo de desarrollo enfocarse en funcionalidades críticas desde las primeras iteraciones del prototipo. A continuación, se presenta la Tabla 3 que resume las historias de usuario consideradas para el diseño e implementación del sistema de monitoreo y protección de una turbina eólica.

Tabla 3:

Historias de Usuario

HISTORIA DE USUARIO	USUARIO FINAL (ADMINISTRADOR)	SISTEMA EMBEBIDO (FUNCIÓN AUTÓNOMA)	ADMINISTRADOR DEL SISTEMA / INVESTIGADOR
PRIORIDAD DE NEGOCIO	Alta	Alta	Media
ITERACIÓN	1	2	3
PRIORIDAD DE DESARROLLO	Alta	Media	Alta
PUNTOS	3	4	3
DESCRIPCIÓN	Como sistema inteligente, necesito detectar vibraciones anómalas para activar mecanismos de autoprotección y prevenir daños estructurales.	Como usuario del sistema, necesito recibir una notificación en Telegram cuando se detecten ráfagas de viento fuertes, para tomar decisiones oportunas sobre la turbina.	Como administrador, necesito una interfaz visual en tiempo real para ver valores del viento, sensores y actividad del sistema.

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

- El acelerómetro mide vibraciones constantemente.
 - Si hay valores anómalos, los servos ajustan las palas.
 - El evento se registra en InfluxDB.
 - Se notifica si se supera el umbral crítico.
 - Se realiza verificación post-evento.
- El sistema monitorea el anemómetro constantemente.
 - Si se supera el umbral, se envía una alerta automática a Telegram.
 - El mensaje incluye hora, velocidad del viento y estado de las palas.
 - No se deben enviar alertas duplicadas en corto tiempo.
 - El evento se registra en InfluxDB
- Visualiza velocidad del viento, vibración, estado de servos y registros recientes.
 - Acceso por navegador.
 - Incluye panel de eventos críticos.
 - Actualización mínima cada 5 minutos.

2.2.2 Cronograma de actividades

Tabla 4:

Cronograma de Actividades

ITERACIÓN	ACTIVIDAD PRINCIPAL	HISTORIA DE USUARIO RELACIONADA	DURACIÓN (DÍAS)
1	Integración del ESP32 con acelerómetro y anemómetro	Lectura de sensores ambientales	3
2	Desarrollo del sistema de autoprotección automática de palas	Autoprotección por vibración	3
3	Entrenamiento del modelo en Edge Impulse con datos del acelerómetro en el Seed XIAO	IA para vibraciones	3
4	Carga del modelo en Seed XIAO y validación en condiciones simuladas	Despliegue de IA local	2

5	Programación de control de servomotores para respuesta ante vibraciones	Movimiento de palas	3
6	Configuración del anemómetro con ESP32 para detección de viento fuerte	Monitoreo del viento	2
7	Envío de notificaciones por viento fuerte a través de Node-RED y Telegram	Notificación de alerta	2
8	Integración de sensores con Node-RED y envío de datos a InfluxDB	Canal de datos IoT	2
9	Visualización de datos en tiempo real e históricos en InfluxDB	Análisis visual	2
10	Pruebas con el sistema completo	Verificación funcional	3
11	Optimización de consumo energético en el sistema IoT	Autonomía del prototipo	2

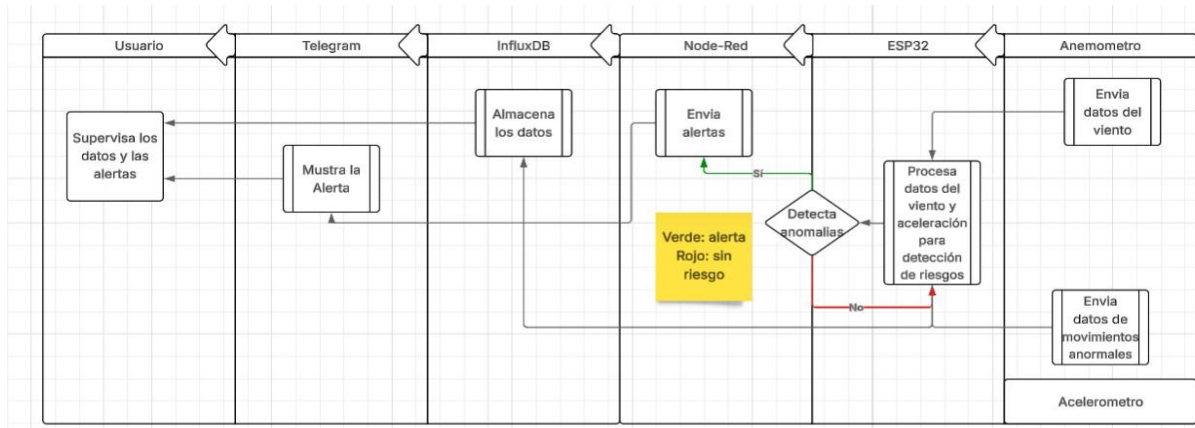
Diseño rápido. Durante esta etapa, se realizaron diversas actividades clave, incluyendo el diseño de casos de uso que definieron los requisitos funcionales del prototipo de turbina eólica con sistema de protección automatizada. Asimismo, se elaboraron diagramas que representan tanto la estructura como el flujo de interacción entre los componentes del sistema IoT, tales como el ESP32, sensores, servomotores, anemómetro y la plataforma de monitoreo. Se determinó las estructuras necesarias para almacenar eficientemente los registros de velocidad del viento, eventos de activación del sistema de protección y datos históricos útiles para el análisis y mejora del prototipo.

Casos de uso. Basándose en los requerimientos y funcionalidades identificados en las historias de usuario, la Ilustración 6 representa las interacciones clave entre el sistema y el usuario final para la notificación por viento fuerte. Este caso de uso detalla cómo el sistema detecta condiciones climáticas adversas mediante sensores, procesa la información en tiempo real a través de Node-RED e InfluxDB, y posteriormente envía

una notificación automática al usuario a través de Telegram, permitiendo una respuesta rápida ante situaciones de riesgo.

Ilustración 6

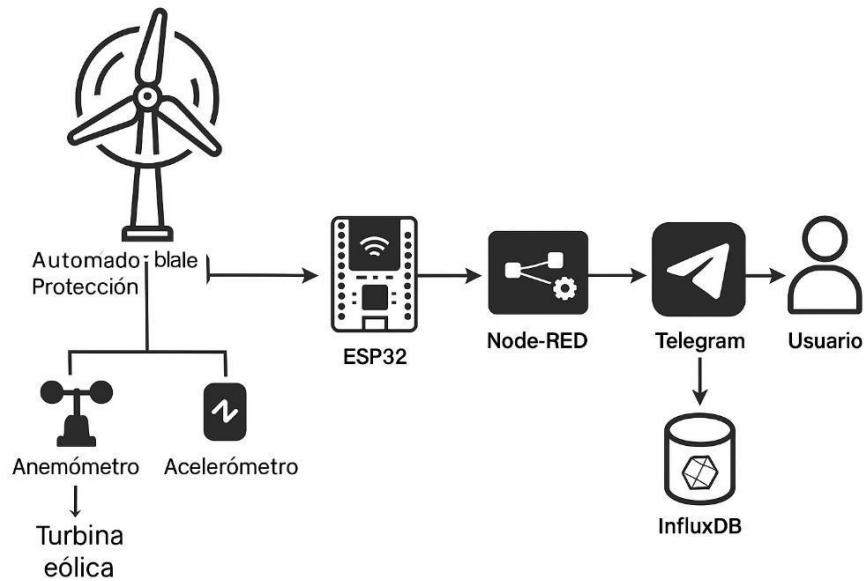
Diagrama de secuencia



Arquitectura del sistema. El prototipo de turbina eólica con IoT se basa en una arquitectura distribuida compuesta por tres capas: sensores y actuadores, borde y servicios como se muestra en la Ilustración 7. Esta estructura permite una gestión eficiente de los datos capturados por los dispositivos, así como una respuesta automática ante condiciones climáticas adversas. El sistema está diseñado para garantizar la protección de las palas y la notificación oportuna al usuario final.

En la capa de sensores y actuadores, el ESP32 recoge datos en tiempo real desde el anemómetro y el acelerómetro. Estos datos se procesan parcialmente en el borde para detectar situaciones críticas y activar de inmediato los servomotores encargados de ajustar las palas. Esta capa permite una rápida reacción local sin depender completamente de la nube o servidores remotos.

En la capa de servicios, el flujo de datos se gestiona mediante Node-RED, que recibe información desde el ESP32 y la almacena en InfluxDB para su análisis. Además, se configura un sistema de alertas que notifica al usuario a través de Telegram cuando se detecta viento fuerte. Esta arquitectura modular mejora la escalabilidad, la mantenibilidad y la capacidad de respuesta del sistema ante eventos ambientales.



2.3 Construcción del Prototipo

2.3.1 Interconexión de Dispositivos y Arquitectura Física

La arquitectura del sistema se basa en la interacción de múltiples componentes electrónicos interconectados. Se establecieron las siguientes conexiones principales:

ESP32 ↔ XIAO nRF52840:

Se empleó comunicación UART para el envío de inferencias en tiempo real desde el acelerómetro integrado del XIAO hacia el ESP32. Esta comunicación permite transmitir datos de vibración procesados por un modelo de aprendizaje automático ejecutado localmente en el XIAO.

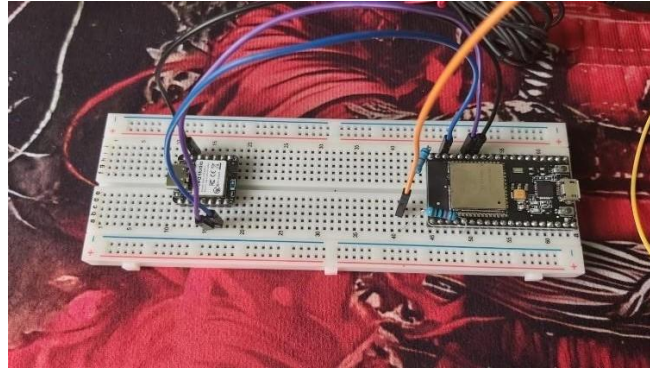
Las conexiones físicas se realizaron de la siguiente manera y se puede observar en la Ilustración 8:

- **ESP32 GPIO21 (RX)** conectado a **XIAO GPIO4 (TX)**
- **ESP32 GPIO22 (TX)** conectado a **XIAO GPIO5 (RX)**
- **GND a GND** para asegurar una referencia de tierra común entre ambos dispositivos

Este canal de comunicación UART permite que el ESP32 actúe como unidad de control principal, interpretando los datos recibidos del XIAO y ejecutando acciones como el control de servomotores, alertas o recolección de datos, según la lógica del sistema.

Ilustración 8:

Diagrama de conexiones entre ESP32 y XIAO nRF52840



Nota: La imagen muestra la configuración física y las conexiones eléctricas realizadas entre el microcontrolador ESP32 y la placa XIAO nRF52840.

ESP32 ↔ Anemómetro (analógico):

Se utilizó un anemómetro con salida de voltaje analógico en el rango de 0–5 V, alimentado mediante una fuente externa de 24 V DC.

Dado que los pines analógicos del ESP32 solo toleran hasta 3.3 V, se implementó un divisor de voltaje utilizando resistencias de 10 k Ω (R1) y 6.8 k Ω (R2) para escalar la señal del sensor a un nivel seguro.

Las conexiones físicas fueron las siguientes y se muestra en la Ilustración 9:

- Rojo (sensor) → V+ 24 V (positivo desde adaptador jack)
- Negro (sensor) → GND (común con GND del ESP32)
- Amarillo (sensor - señal) → Entrada del divisor de voltaje (R1)
- R1 (10 k Ω) conecta desde la señal del sensor al pin analógico del ESP32 (ej. GPIO34)
- R2 (6.8 k Ω) conecta desde el nodo intermedio entre R1 y GPIO34 hacia GND (común con ESP32)

- GND del divisor se conectó directamente al GND del ESP32, garantizando una referencia común

Ilustración 9:

Conexión física del anemómetro con el ESP32 usando divisor de voltaje.



Nota: Se observa el sensor anemométrico conectado a una fuente de 24 V mediante conector jack, con su salida conectada al ESP32 a través de un divisor resistivo formado por resistencias de 10 k Ω y 6.8 k Ω .

ESP32 ↔ Servomotores:

En el prototipo se utilizaron tres servomotores Micro Servo 9g SG90 para realizar la función de autoprotección de las palas de la turbina eólica. Los servomotores son controlados directamente por el ESP32 mediante señales PWM, que permiten controlar la posición angular de cada motor.

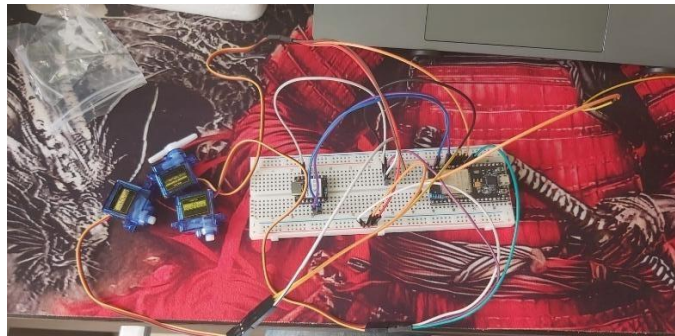
Las conexiones físicas realizadas para los servomotores son las siguientes y se puede ver en la Ilustración 10:

- **Servo 1:**
 - Señal (control) → ESP32 GPIO12
 - Alimentación (VCC) → Fuente externa de 5V
 - Tierra (GND) → Tierra común del sistema
- **Servo 2:**
 - Señal (control) → ESP32 GPIO18
 - Alimentación (VCC) → Fuente externa de 5V

- Tierra (GND) → Tierra común del sistema
- **Servo 3:**
 - Señal (control) → ESP32 GPIO19
 - Alimentación (VCC) → Fuente externa de 5V
 - Tierra (GND) → Tierra común del sistema

Ilustración 10:

Conexiones eléctricas de los servomotores al ESP32 y fuente externa



Nota: La imagen muestra la configuración de las conexiones eléctricas de los tres servomotores Micro Servo 9g SG90 utilizados en el prototipo. Cada servomotor está conectado al ESP32 mediante su cable de señal (amarillo), asignado a los pines GPIO17, GPIO18 y GPIO19 respectivamente.

Se utiliza una fuente de alimentación externa de 5V para alimentar los servomotores, debido a que el ESP32 no puede suministrar la corriente necesaria para el correcto funcionamiento de los servos. Además, todos los componentes comparten un punto de tierra común para garantizar una referencia eléctrica estable, conectando el GND del ESP32, la fuente externa y los servomotores

2.3.2 Configuración del entorno de desarrollo

Para la programación de los microcontroladores se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE como se muestra en la Ilustración 11, tanto para el ESP32 como para el Seeed Studio XIAO nRF52840. La configuración incluyó:

Instalación del gestor de placas para ambos dispositivos.

Inclusión de las librerías necesarias, como ImpulseRunner para la ejecución de modelos EdgeImpulse en el XIAO.

Ilustración 11

Carga del firmware en cada microcontrolador según su rol.



```
PruebaXIAO
Blink

Turns an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the UNO, MEGA and ZERO
it is attached to digital pin 13, on MKR1000 on pin 6. LED_BUILTIN is set to
the correct LED pin independent of which board is used.

If you want to know what pin the on-board LED is connected to on your Arduino
model, check the Technical Specs of your board at:
https://www.arduino.cc/en/Main/Products

modified 8 May 2014
by Scott Fitzgerald
modified 2 Sep 2016
by Arturo Guadalupi
modified 8 Sep 2016
by Colby Newman

This example code is in the public domain.

https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
```

2.3.3 Captura de datos y entrenamiento del modelo de clasificación

Para implementar la detección de vibraciones peligrosas, se realizó el entrenamiento de un modelo de clasificación utilizando la plataforma EdgeImpulse:

Se capturaron datos de vibración normales y anómalas utilizando el acelerómetro LIS3DH del XIAO como se muestra en la Ilustración 12.

Se entrenó un modelo basado en redes neuronales ligeras.

El modelo fue validado con un conjunto de datos de prueba.

Posteriormente, se exportó el modelo como librería C++ optimizada para ser utilizada localmente en el microcontrolador.

Finalmente, el modelo fue integrado al firmware del XIAO, el cual realiza inferencias continuas y envía los resultados al ESP32 vía UART en formato JSON.

Ilustración 12:
modelo de clasificación utilizando la plataforma Edge Impulse



2.3.4 Programación del ESP32 y control de actuadores

El microcontrolador **ESP32** fue programado para cumplir un rol central dentro del sistema, integrando sensores, actuadores y comunicación. Su lógica de funcionamiento se estructuró en cuatro tareas principales:

- **Recepción de inferencias desde el XIAO:**

Se estableció comunicación UART entre el **XIAO nRF52840 Sense** y el ESP32, permitiendo la recepción en tiempo real de inferencias generadas a partir de los datos del acelerómetro incorporado en el XIAO como se muestra en la Ilustración 13. El ESP32 interpreta estas inferencias como condiciones críticas de vibración o estabilidad de la turbina.

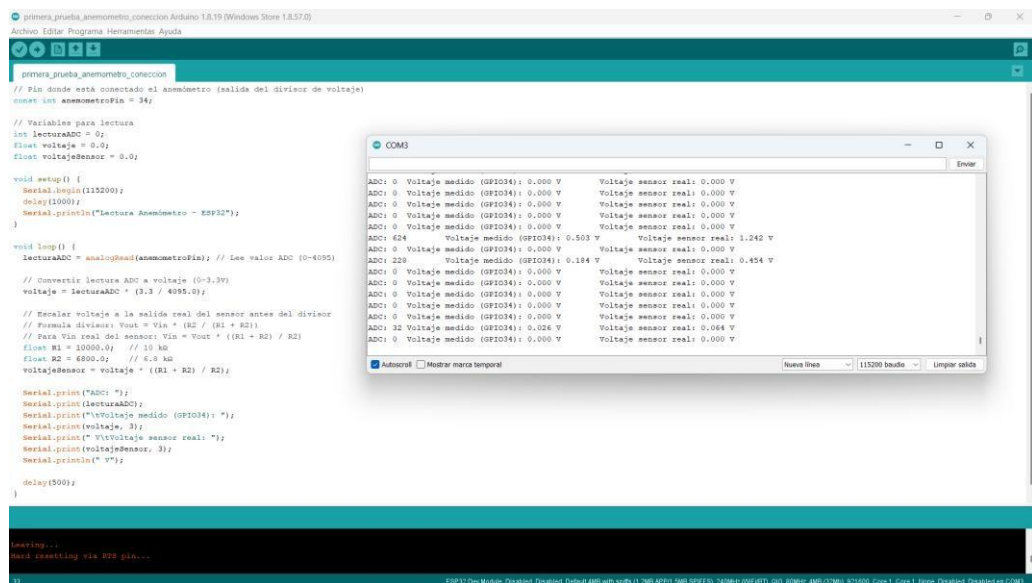
Ilustración 13:
recepción en tiempo real de inferencias generadas a partir de los datos del acelerómetro incorporado en el XIAO



- **Lectura de velocidad del viento mediante anemómetro analógico:**
El anemómetro, con salida de voltaje proporcional a la velocidad del viento, fue conectado al pin GPIO34 del ESP32 a través de un divisor de voltaje. El ESP32 realiza lecturas analógicas periódicas para estimar la intensidad del viento como se muestra en la Ilustración 14. Esta información se utiliza para tomar decisiones de protección del sistema.

Ilustración 14:

lecturas analógicas periódicas para estimar la intensidad del viento



- **Control de servomotores según condiciones detectadas:**

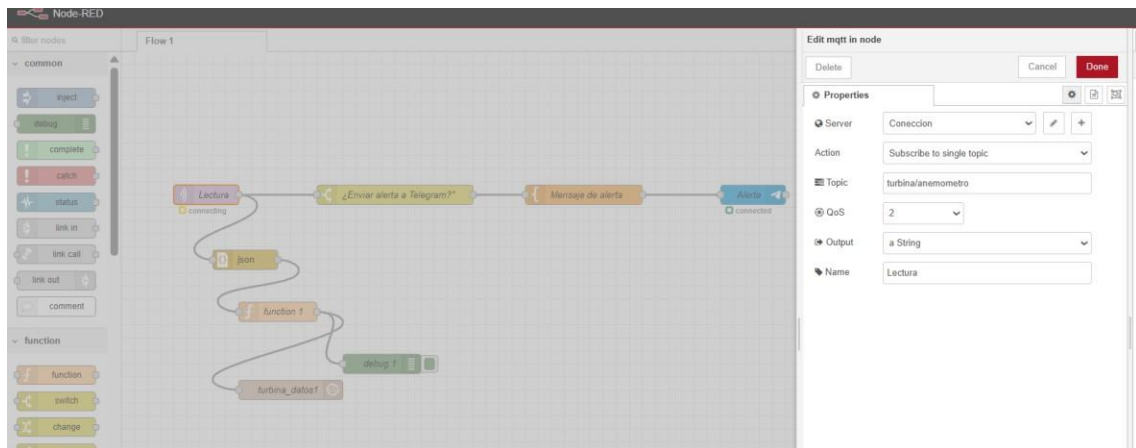
En función de la velocidad del viento y las inferencias del XIAO, el ESP32 gestiona el comportamiento de los **servomotores** que controlan la orientación de las palas de la turbina Savonius. Se implementaron umbrales de activación para desplegar o desplegar las palas como mecanismo de autoprotección.

- **Envío de datos mediante MQTT a Node-RED:**

Todos los datos recolectados y las acciones ejecutadas por el ESP32 se estructuran en formato JSON y se envían mediante el protocolo MQTT hacia un broker configurado en Node-RED como se muestra en la Ilustración 15. Esto permite la visualización, registro y análisis remoto del comportamiento del sistema en tiempo real.

Ilustración 15:

formato JSON y se envían mediante el protocolo MQTT hacia un broker configurado en Node-RED



2.3.5 Comunicación MQTT y configuración del broker

Para la transmisión de datos en tiempo real se utilizó el protocolo MQTT, empleando Mosquitto Broker instalado localmente como se muestra en la Ilustración 16. La configuración incluyó:

Instalación del broker en un entorno PC.

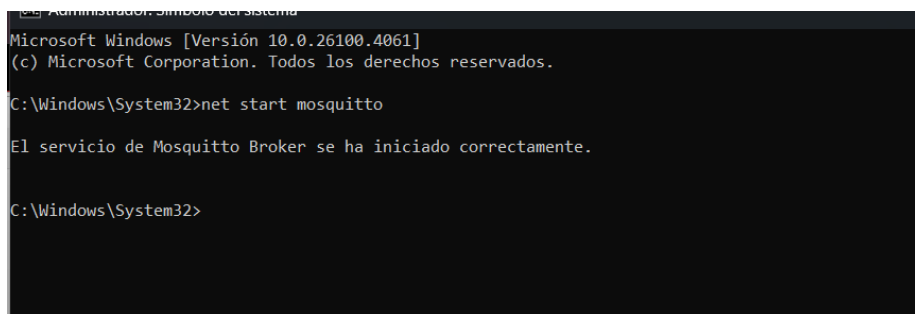
Pruebas de conectividad con el ESP32 como cliente MQTT.

Definición de los siguientes tópicos:

- /prototipo/viento
- /prototipo/vibracion
- /prototipo/eventos

Ilustración 16:

Mosquitto Broker instalado localmente



2.3.6 Integración con Node-RED y visualización

Con el fin de monitorear y gestionar el sistema de forma visual, se integró el broker MQTT con la plataforma Node-RED. El proceso incluyó:

Instalación de Node.js LTS y Node-RED.

Adición de nodos adicionales para visualización (dashboard), mensajería (Telegram) y almacenamiento (InfluxDB).

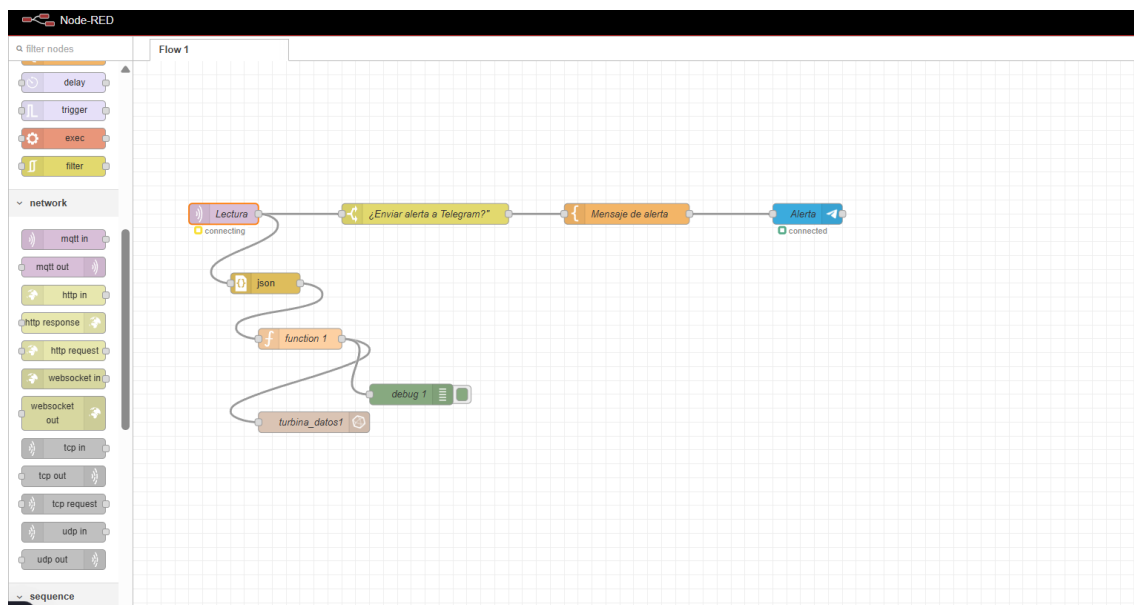
Configuración de nodos MQTT para recibir datos del ESP32.

Creación de gráficas en tiempo real que permiten observar la velocidad del viento y la actividad vibracional.

Panel de alertas críticas y registro histórico en InfluxDB.

Ilustración 17:

Adición de nodos adicionales para visualización (dashboard), mensajería (Telegram) y almacenamiento (InfluxDB).



2.3.7 Implementación de notificaciones a Telegram

Para la generación de alertas automáticas, se utilizó un bot de Telegram. La integración se realizó mediante los siguientes pasos:

Creación del bot utilizando el servicio BotFather de Telegram.

Obtención del token de API para su uso en Node-RED.

Configuración inicial del bot, incluyendo el envío del primer mensaje desde el usuario para capturar el chat_id como se muestra en la Ilustración 17.

Incorporación de nodos de salida en Node-RED que permiten enviar notificaciones en tiempo real al usuario cuando se detectan eventos críticos.

Ilustración 18:

Configuración inicial del bot, incluyendo el envío del primer mensaje desde el usuario para capturar el chat_id



2.3.8 Envío estructurado de datos desde el ESP32

El ESP32 cumple un rol fundamental como unidad de procesamiento y comunicación dentro del sistema de monitoreo de la turbina eólica. Su principal tarea en este contexto es recolectar, estructurar y transmitir datos relevantes del sistema hacia una plataforma central (como Node-RED), utilizando el protocolo MQTT. Esta transmisión se realiza en formato JSON, lo que facilita su integración con dashboards, almacenamiento en bases de datos (como InfluxDB) y análisis en tiempo real o histórico.

Datos enviados

Los datos recopilados por el ESP32 incluyen:

- **Velocidad del viento** (medida mediante el anemómetro)
- **Nivel de vibración** (calculado a partir del acelerómetro incorporado en el Seed XIAO o sensores conectados)
- **Estado de activación** del sistema de autoprotección (servos activos o inactivos)
- **Timestamp** (fecha y hora del envío)
- **Identificador del dispositivo** (útil en despliegues con múltiples turbinas)

Estructura del mensaje JSON

El formato del mensaje estructurado enviado a través de MQTT es el siguiente:

CopiarEditar

```
{  
  "id_dispositivo": "turbina_01",  
  "timestamp": "2025-06-04T15:23:10Z",  
  "viento_kmh": 27.4,  
  "vibracion_g": 3.2,  
  "autoproteccion": true  
}
```

Este formato estandarizado permite que el sistema central pueda interpretar y procesar automáticamente los datos, sin necesidad de transformación adicional.

Periodicidad del envío

El envío de datos se realiza de forma periódica o bien de forma **event-driven** (cuando se detecta un evento como exceso de viento o vibración). Esta flexibilidad permite optimizar el tráfico de red y reaccionar ante situaciones críticas con inmediatez.

Flujo de comunicación con Node-RED

1. El ESP32 publica en el broker MQTT (por ejemplo, Mosquitto en Node-RED) bajo un topic específico:



2.4 Diseño físico de la turbina Savonius

2.4.1 Materiales utilizados

Para la construcción del prototipo de la turbina eólica Savonius de tres palas con sistema de autoprotección, se seleccionaron materiales livianos y accesibles, priorizando la facilidad de modelado y resistencia estructural. A continuación, En la tabla se detalla la lista de materiales:

Tabla 5:

Lista de materiales y dimensiones

Componente	Material	Descripción	Cantidad
Disco (superior inferior)	base e MDF o acrílico de 3–5 mm	Cortado en forma circular, con orificio central y soporte para servos	2 unidades
Palas curvas	Tubo PVC Ø 10 cm	Cortado longitudinalmente en 3 partes iguales (120°)	1 tubo (3 palas)
Eje central	Varilla metálica Ø 6 mm	Soporte principal de la turbina, atraviesa ambos discos	1 unidad
Servomotores	SG90 9g	Controlan el movimiento de las palas	3 unidades
Tornillos y tuercas	Acero inoxidable	Fijación de servos y palas	Varios
Base soporte	MDF o PVC rígido	Plataforma para fijar la turbina y electrónica	1 unidad

2.4.2 Medidas de la turbina

Las dimensiones del prototipo fueron diseñadas con base en criterios de escalado y facilidad de impresión o corte de materiales. Las medidas utilizadas son:

- Altura total del rotor: 15 cm
- Diámetro total del rotor: 23 cm
- Altura de cada pala: 15 cm
- Ancho de cada pala: 6.6 cm (1/3 del tubo PVC de 10 cm Ø)
- Espesor del material de las palas: 2 mm (PVC)
- Diámetro del eje central: 6 mm
- Grosor de los discos: 5 mm (acrílico cortado con láser)

Las palas se montan en forma simétrica en torno al eje central, permitiendo el giro por efecto del viento y su posterior bloqueo con los servomotores cuando se activa el sistema de autoprotección.

2.4.3 Estructura de soporte y servomotores

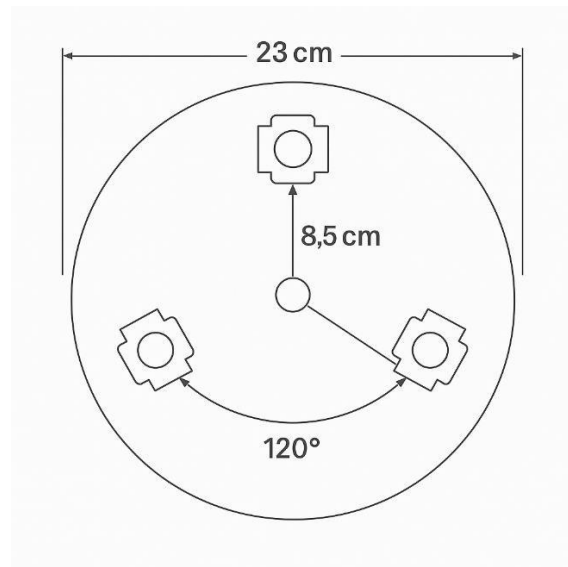
Los servomotores SG90 se encuentra montado sobre el disco superior a una distancia radial de **8.5 cm** desde el eje central. Los servos están espaciados a intervalos de **120°**, permitiendo el control individual de cada una de las tres palas.

El centro del engranaje de salida de cada servomotor (punto de rotación) se alinea con su respectivo orificio en el disco, asegurando estabilidad y precisión en el movimiento. Esta disposición garantiza que cada pala pueda ser girada desde la posición de captación (abierta) a la posición de protección (cerrada).

La siguiente Ilustración 19 muestra el diseño del disco superior, incluyendo las posiciones angulares de los servos y las dimensiones clave:

Ilustración 19:

Diseño del disco superior, incluyendo las posiciones angulares de los servos y las dimensiones



CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la implementación, prueba y validación del sistema de protección para el prototipo de turbina eólica mediante tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) e inteligencia artificial embebida. El enfoque principal fue desarrollar un sistema capaz de identificar condiciones de operación peligrosas, como niveles excesivos de vibración o velocidad del viento, y responder de forma automática mediante el plegado de las palas del rotor.

Para lograr esta funcionalidad, se integraron dos tipos de sensores: el **XIAO nRF52840 Sense**, que permite la detección de patrones de vibración anómalos mediante un modelo de aprendizaje automático entrenado con la plataforma Edge Impulse, y un **anemómetro conectado al microcontrolador ESP32**, que mide directamente la velocidad del viento en tiempo real. Ambos dispositivos trabajan de forma complementaria para garantizar una detección más robusta de situaciones de riesgo.

Además, se implementó un sistema de respuesta basado en el microcontrolador **ESP32**, que actúa como nodo central de control. Este se encarga de recibir los avisos de alerta, activar el mecanismo de protección física (mediante servomotores) y gestionar la notificación remota del evento a través de **Node-RED y Telegram**, así como el almacenamiento de datos históricos en una base de datos **InfluxDB**.

Este capítulo describe el proceso de entrenamiento del modelo, el comportamiento del sistema durante las pruebas de validación, el funcionamiento de cada componente y la interacción entre ellos. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos, el tiempo de respuesta del sistema, y se discute la eficiencia y fiabilidad del enfoque propuesto.

3.1 Desarrollo del Prototipo Físico y Electrónico

3.1.1 Diseño y Construcción Física

3.1.1.1 Diseño de las palas de la turbina

Se diseñó una turbina vertical de tipo **Savonius de tres palas curvas**, ideal para entornos con viento multidireccional. Las palas tienen forma semicilíndrica y están distribuidas uniformemente con una separación de 120° entre sí. Esta configuración permite aprovechar al máximo la energía del viento, incluso a bajas velocidades. El diseño priorizó la estabilidad, la simplicidad de ensamblaje y el equilibrio dinámico.

3.1.1.2 Selección de materiales

Para la construcción se eligieron materiales ligeros y resistentes:

- Las plataformas superior e inferior son de MDF circular de 23 cm de diámetro y 6 mm de espesor.
- Las palas están fabricadas con PVC curvado, por su bajo peso y facilidad de modelado.
- La base de soporte está hecha de madera sólida, para asegurar estabilidad.
- El eje central consiste en una varilla metálica (barrilla roscada), que permite la rotación libre del conjunto superior.

En la Ilustración 20 se muestra como esta ensamblado tanto externamente como internamente.

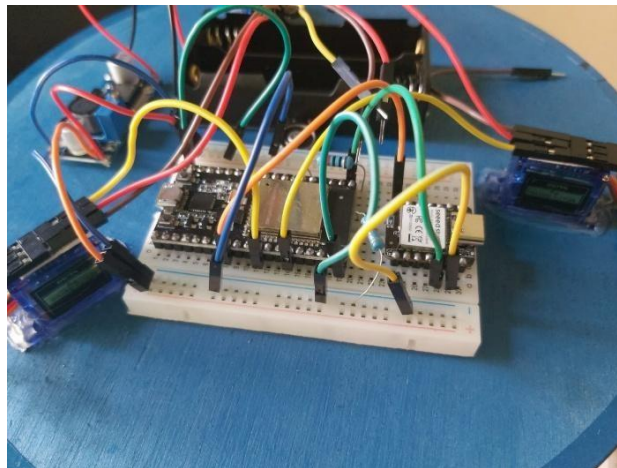
*Ilustración 20:
Ensamblado interno y externo*



3.1.1.3 Ensamblaje de la estructura

El ensamblaje se realizó uniendo las palas a las plataformas superior e inferior, asegurando que cada una estuviera firmemente fijada y simétricamente alineada. Las plataformas están atravesadas por la varilla metálica central, que actúa como eje de rotación. La estructura completa se fija sobre una base de madera que actúa como soporte general. En la parte superior, se instaló una protoboard con la electrónica de control, como se muestra en la Ilustración 21.

*Ilustración 21:
Protoboard con la electrónica de control*



3.1.1.4 Sistema de protección mecánica

El sistema de protección ante vientos fuertes está compuesto por tres servomotores SG90 conectados a cada pala. Estos permiten modificar el ángulo de las palas automáticamente, llevándolas a una posición de cierre para minimizar la resistencia al viento. Esta acción reduce la velocidad de giro y evita daños estructurales. El sistema se activa automáticamente mediante la detección de vibraciones excesivas o condiciones anormales de viento.

3.1.2 Desarrollo del Sistema Electrónico

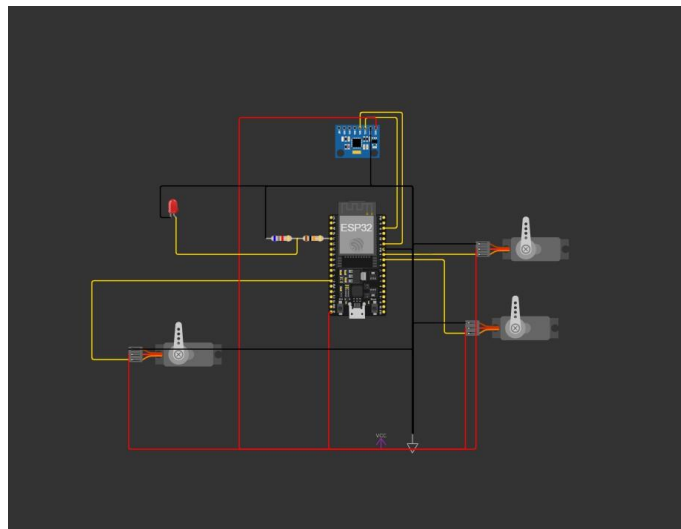
3.1.2.1 Componentes electrónicos

El sistema electrónico fue diseñado para monitorear las condiciones de viento y ejecutar una respuesta automática mediante un mecanismo de autoprotección.

3.1.2.2 Esquema de conexión y circuito

El sistema está compuesto por dos microcontroladores y un conjunto de servomotores controlados automáticamente. La alimentación y las conexiones se organizaron para garantizar un funcionamiento estable y seguro, tanto en condiciones normales como ante eventos de viento fuerte como se muestra en la Ilustración 22.

*Ilustración 22:
Esquema del circuito*



Alimentación del sistema

Se utilizó un sistema autónomo de alimentación compuesto por:

- **Baterías de 7.4V (Li-ion o LiPo):** Proveen energía portátil al sistema.
- **Regulador de voltaje tipo buck (step-down):** Reduce los 7.4V de entrada a 5V estables, necesarios para alimentar tanto el ESP32, como los servomotores y el XIAO (a través de su pin de 5V).

De esta manera, se garantiza una fuente confiable y segura de alimentación para todos los componentes sin riesgo de sobrevoltaje.

Comunicación entre microcontroladores

La comunicación entre el **XIAO Sense** y el **ESP32** se realiza mediante la interfaz UART:

- **TX (XIAO) → RX (ESP32 - GPIO16)**
- **RX (XIAO) ← TX (ESP32 - GPIO17)**

Ambos comparten **GND** para referencia común de señal.

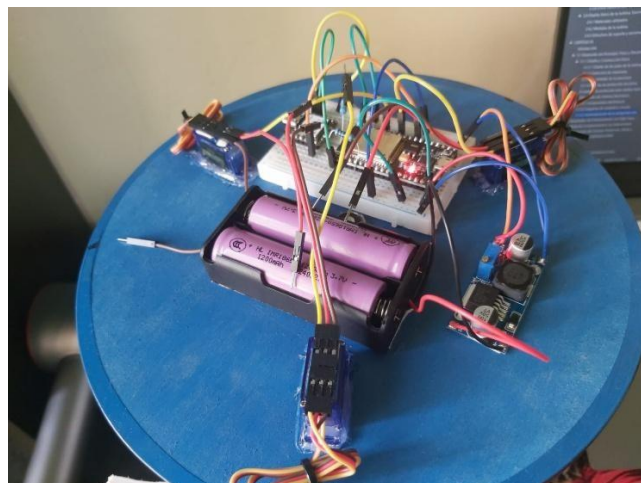
Control de servomotores

Los tres **servomotores SG90** están conectados al **ESP32**, controlados mediante señales PWM:

- Servo 1 → GPIO12
- Servo 2 → GPIO18
- Servo 3 → GPIO19

Cada servo recibe alimentación directa de la salida del **regulador de 5V**, ya que requieren corriente suficiente para operar sin afectar al microcontrolador como se muestra en la Ilustración 23.

*Ilustración 23:
Alimentación directa de la salida del regulador de 5V*



3.1.2.3 Automatización de la autoprotección

El sistema de autoprotección está diseñado para operar de manera autónoma ante la detección de condiciones anormales de viento. La lógica de funcionamiento es la siguiente:

1. El **XIAO** monitorea continuamente los datos del acelerómetro.
2. Cada lectura es clasificada en tiempo real como "**normal**" utilizando un modelo de inteligencia artificial entrenado en Edge Impulse.
3. En caso de condición peligrosa (alta vibración o ráfaga fuerte), el XIAO envía una señal al ESP32 por UART.
4. El **ESP32 activa los tres servos**, girando las palas hacia una posición de autoprotección, alineándolas para reducir su exposición al viento como se muestra en la Ilustración 24.

*Ilustración 24:
Posición de autoprotección*



5. Una vez que las condiciones regresan a la normalidad durante un periodo determinado en este caso 10 segundos, las palas regresan automáticamente a su posición original de operación como se muestra en la Ilustración 25.

Ilustración 25: Posición original



Este sistema permite a la turbina protegerse ante eventos de viento extremos sin intervención humana, aumentando su durabilidad y seguridad, y demostrando la utilidad del enfoque basado en IA embebida.

3.2 Resultados del Entrenamiento con Edge Impulse para XIAO nRF52840 Sense

Con el objetivo de dotar al prototipo de turbina eólica de capacidades de detección inteligente de condiciones peligrosas, se utilizó el microcontrolador Seeed Studio XIAO nRF52840 Sense, que integra un sensor inercial (IMU) capaz de registrar datos de aceleración en los tres ejes (X, Y, Z). Estos datos permitieron monitorear las vibraciones y movimientos asociados al comportamiento de la turbina en distintas condiciones de viento.

Para el procesamiento y análisis de estos datos se empleó la plataforma Edge Impulse, la cual facilitó la creación, entrenamiento y despliegue de un modelo de aprendizaje

automático directamente en el microcontrolador, habilitando la detección en tiempo real de estados anómalos sin necesidad de conexión constante a una computadora.

Proceso de recolección y etiquetado de datos

Como entorno de prueba para simular distintas condiciones de viento que afectan al prototipo, se utilizó una secadora de cabello con tres niveles de velocidad:

- **Clase 0 (Apagado):** Condición de reposo o viento nulo, sin vibraciones detectables.
- **Clase 1 (Movimiento estable):** Condición de operación normal y segura, representada por vibraciones estables y controladas del prototipo bajo viento moderado.
- **Condición de alerta:** Correspondiente a la velocidad máxima de la secadora, que simula un viento excesivo o potencialmente peligroso. Esta condición no fue etiquetada ni incluida en el entrenamiento, ya que se pretende que el sistema la reconozca como una anomalía o estado desconocido.

Diseño del modelo y entrenamiento

Se optó por un modelo de detección de anomalías basado en un modelo de mezcla gaussiana (GMM), debido a que el sistema sólo fue entrenado con datos de las condiciones normales (Clase 0 y Clase 1). Esta configuración permite que cualquier patrón de vibración que se desvíe significativamente de estas clases sea detectado como una anomalía.

Para la extracción de características, se utilizó un bloque de análisis espectral (FFT) sobre las señales del acelerómetro, considerando los tres ejes para capturar el comportamiento tridimensional de las vibraciones.

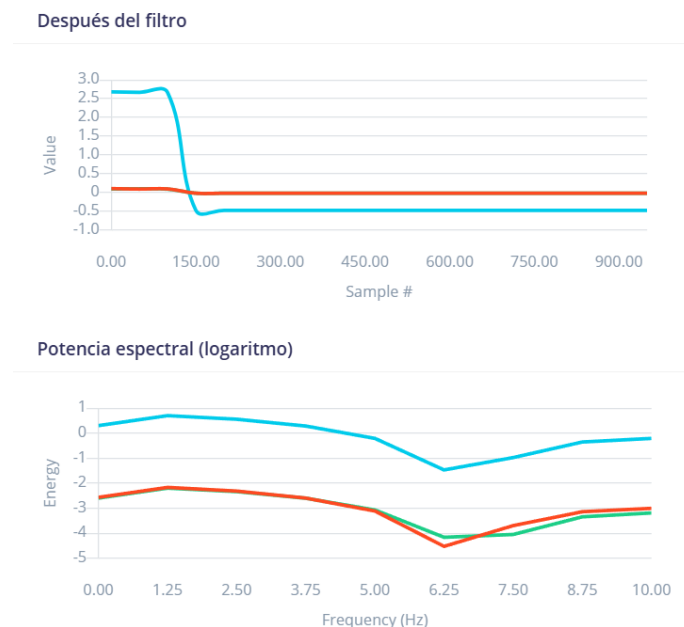
El modelo fue entrenado y validado con un conjunto representativo de muestras, para el entrenamiento fueron de 29.323 muestras mientras que para prueba fueron 3.319

etiquetadas como normal, utilizando la plataforma Edge Impulse para automatizar el proceso y optimizar los parámetros del modelo.

Resultados obtenidos

El modelo alcanzó una precisión del 86% en la clasificación correcta de las condiciones normales (apagado y movimiento estable) durante la fase de prueba como se muestra en la Ilustración 26 donde se presentan los datos procesados por el modelo. El primer gráfico muestra la señal del acelerómetro después del filtrado, donde se observa actividad inicial seguida de estabilidad, indicando que el evento de interés ocurre al comienzo. El segundo gráfico muestra la potencia espectral (en escala logarítmica), donde se identifican las frecuencias con mayor energía. Este análisis permite al modelo identificar patrones de movimiento o vibración que se repiten en ciertas frecuencias y gracias a esto, fue capaz de identificar correctamente las condiciones anómalas simuladas por el viento excesivo (velocidad máxima del secador), activando la lógica de protección diseñada para el prototipo.

Ilustración 26:
Resultados DSP



Las anomalías detectadas correspondieron a patrones de vibración irregulares, cambios bruscos en la aceleración y variaciones abruptas en la velocidad angular, que difieren claramente de las condiciones normales aprendidas por el modelo en la Ilustración 22 se

presenta un gráfico de dispersión de los valores RMS para los ejes X e Y del acelerómetro. Se observa una clara concentración de datos en una región específica, lo que representa el comportamiento normal de la turbina bajo condiciones estándar. Las elipses indican la densidad de los datos y ayudan al modelo a establecer límites de normalidad.

Ilustración 27:
Explorador de anomalías



Esto demuestra que el sistema puede realizar una detección confiable en tiempo real de condiciones potencialmente peligrosas, permitiendo que la turbina eólica active sus mecanismos de autoprotección para evitar daños.

3.3 Medición Complementaria con Anemómetro

Como parte del sistema de seguridad redundante, se incorporó un anemómetro conectado directamente al ESP32, cuya función es medir de forma continua la velocidad real del viento. Esta implementación permite validar de manera independiente los datos obtenidos por el modelo de vibración y aporta una segunda capa de detección ante condiciones peligrosas.

Durante el proceso de pruebas, se utilizó nuevamente la secadora como fuente de viento y se calibró el anemómetro para identificar como umbral crítico la velocidad equivalente

a la tercera velocidad del secador, representando un viento excesivo para la estructura del prototipo.

Cuando el valor medido por el anemómetro supera este umbral, el ESP32 acciona automáticamente el sistema de protección, incluso si el modelo del XIAO no ha detectado vibración anómala. Esto garantiza una detección por redundancia, aumentando la fiabilidad del sistema como se muestra en la Ilustración 28.

Además de accionar el plegado de las palas, el ESP32 también realiza las siguientes acciones:

- **Envía una alerta** a través de Node-RED, que se transmite a un canal de Telegram en tiempo real.
- **Registra el evento** en una base de datos InfluxDB, incluyendo la velocidad del viento, fecha, hora y fuente de la alerta (anemómetro).

Esta configuración mejora la cobertura del sistema frente a distintos tipos de riesgo (vibración mecánica o viento directo) y aumenta su robustez operativa.

*Ilustración 28:
Anemómetro conexiones*



3.4 Respuesta del Sistema: Protección, Alerta y Registro

Tanto si la condición de riesgo es detectada por el XIAO nRF52840 Sense como si lo es por el anemómetro, el ESP32 ejecuta el mismo protocolo de acción:

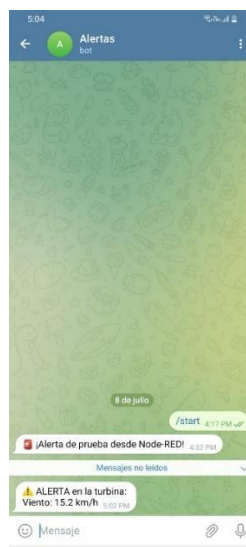
1. Activación de tres servomotores que pliegan automáticamente las palas de la turbina.
2. Envío de una notificación en tiempo real mediante Node-RED a Telegram en la Ilustración 30.
3. Registro de datos técnicos en la base de datos InfluxDB para su posterior análisis Ilustración 29.

El sistema logró un tiempo de reacción promedio entre 1.2 y 2.4 segundos de 20 mediciones desde la detección hasta el plegado completo, confirmando su eficiencia para mitigar daños en un entorno real como se mostró en las Ilustración 28.

Ilustración 29:
cambio de alerta False a True activando el Mecanismo y enviando la alerta

```
entry 0x400805b4
Conectando a WiFi....
✔ WiFi conectado
⬆️ Viento peligroso detectado
Intentando conexión MQTT...Conectado al broker MQTT
⬆️ MQTT enviado: {"velocidad":15.20,"alerta":true}
⬆️ MQTT enviado: {"velocidad":3.16,"alerta":false}
⬆️ MQTT enviado: {"velocidad":2.16,"alerta":false}
⬆️ MQTT enviado: {"velocidad":0.00,"alerta":false}
```

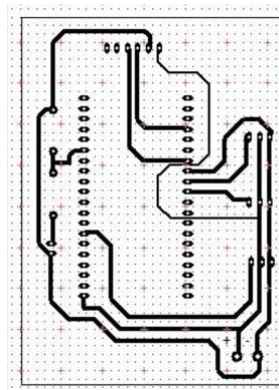
Ilustración 30:
Envío de la Alerta a Telegrama



3.4.1 Diagrama del circuito:

En la Ilustración 31 se presenta el diseño del circuito impreso (PCB) correspondiente al sistema de control de la turbina. Este diseño fue elaborado considerando la distribución óptima de las pistas para minimizar interferencias y garantizar una adecuada conductividad eléctrica. La placa está diseñada para alojar los microcontroladores y componentes electrónicos necesarios, permitiendo una conexión ordenada y segura entre ellos.

*Ilustración 31:
Diseño del circuito de la placa PCB*



3.4.2 Diseño final de la turbina:

Cuenta con una protección para los componentes, fabricada mediante impresión 3D, y dispone de una placa para los microcontroladores, como se muestra en la Ilustración 32.

*Ilustración 32:
Diseño final de la turbina eólica*



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del prototipo permitió validar la factibilidad de integrar tecnologías IoT en sistemas de generación eólica, incorporando mecanismos de autoprotección ante condiciones climáticas adversas como fuertes vientos o vibraciones excesivas.

La implementación de sensores (anemómetro y acelerómetro) junto con el microcontrolador ESP32 y el entorno Node-RED permitió una recolección y procesamiento eficiente de datos ambientales en tiempo real.

El sistema de autoprotección, basado en servomotores que modifican la posición de las palas, demostró ser funcional al activarse de forma automática al superar los umbrales de seguridad establecidos, disminuyendo el riesgo de daños en la turbina.

El uso de Telegram como canal de notificación y la integración con InfluxDB como base de datos en la nube facilitaron el monitoreo remoto del sistema, brindando al usuario acceso oportuno a alertas e historial de datos.

La metodología de prototipado fue adecuada para el diseño, prueba y mejora iterativa del sistema, permitiendo validar sus funciones clave en un entorno controlado.

Busca contribuir al desarrollo de soluciones innovadoras para el sector eólico, proporcionando una alternativa más eficiente y sostenible para la generación de energía eólica mediante el uso de tecnologías avanzadas. A través de este estudio, se espera no solo mejorar la operación de las turbinas, sino también ofrecer una solución escalable y adaptable a diferentes contextos geográficos y meteorológicos.

Ampliar el prototipo hacia un sistema de escala real con materiales más resistentes y estructuras optimizadas para evaluar su comportamiento en condiciones climáticas reales de forma prolongada.

Incorporar nuevos sensores, como sensores de temperatura y humedad, para enriquecer el monitoreo ambiental y mejorar la toma de decisiones del sistema de protección.

BIBLIOGRAFÍA

Aves Argentinas. (2019). *La energía eólica, las aves y el ambiente*. Recuperado de <https://www.avesargentinas.org.ar/noticia/la-energia-eolica-las-aves-y-el-ambiente/>

BBVA. (s.f.). *Historia de la energía eólica: del origen a la actualidad*. Recuperado de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/historia-de-la-energia-eolica-del-origen-a-la-actualidad/>

Betz, A. (1919). *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen* (1ra ed.). Vandenhoeck & Ruprecht.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook* (2da ed.). John Wiley & Sons.

Cuerva Energía. (2023, marzo 1). *Cuáles son las ventajas y desventajas de la energía eólica*. Recuperado de <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/sostenibilidad/cuales-son-las-ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica/>

Daitek. (2023, agosto 29). *El IoT, un aliado fundamental para las energías renovables*. Recuperado de <https://es.linkedin.com/pulse/el-iot-un-aliado-fundamental-para-las-energ%C3%ADas-renovables-daitek>

Emerson. (s.f.). *Sistemas de control de turbinas eólicas*. Recuperado de <https://www.emerson.com/es-es/automation/control-and-safety-systems/distributed-control-systems-dcs/ovation-distributed-control-system/wind-turbine-controls>

Endesa. (s.f.). *La cara e: Energías renovables*. Recuperado de <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-reno>

Enerlution. (2024, agosto 24). *Integración de IoT en soluciones de almacenamiento de energía*. Recuperado de <https://www.enerlution.com.cn/es/a-news-iot-integration-in-energy-storage-solutions>

EY. (2023, febrero 28). *Ciberseguridad en energía y recursos*. Recuperado de https://www.ey.com/es_ec/industries/energy-resources/cybersecurity

Expoknews. (2023, noviembre 9). *Impacto ambiental de la energía eólica*. Recuperado de <https://www.expoknews.com/que-impacto-ambiental-tiene-la-energia-eolica/>

Grupo Forma-t. (2023). *Orígenes e historia de la energía eólica*. Recuperado de <https://www.grupoforma-t.com/2023/01/03/los-origenes-de-la-energia-eolica/>

Iberdrola. (s.f.). *Historia de la energía eólica*. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-terrestre/historia>

Innowise. (2025, febrero 10). *IoT for energy management: up to 6% increase in energy production*. Recuperado de <https://innowise.com/es/caso/iot-for-energy-management/>

ISO. (s.f.). *ISO 14001:2015*. Recuperado de <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>

ISO. (s.f.). *ISO/IEC 27001:2013*. Recuperado de <https://www.iso.org/iso-iec-27001-information-security.html>

Jaramillo Martínez, R., Cabrera Ovalle, R., & López Monteagudo, F. E. (2014). *Sistema de control para una turbina eólica*. *Pistas Educativas*, 108. Recuperado de <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/viewFile/1403/1214>

LinkedIn. (2024, septiembre 2). *Garantizar la seguridad de IoT en los sistemas energéticos*. Recuperado de <https://es.linkedin.com/advice/1/youre-integrating-iot-technologies-energy-control-2rquc?lang=es>

Liu, H., & James, R. D. (2024). *A machine-learning optimized vertical-axis wind turbine*. California Institute of Technology.

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2da ed.). John Wiley & Sons.

Moriano, E. (2021). *Análisis de coeficiente de potencia C_p , coeficiente TSR prototipo turbina Eólica Savonius TURBEOL M01*. Corporación Universitaria Autónoma de Nariño. Recuperado de <http://repositorio.aunar.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/20.500.12276/529/Art.%20IM%2078A.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Proctdata. (2023, agosto 24). *El futuro de la ciberseguridad del sistema energético*. Recuperado de <https://proctdatalatam.com/blog/el-futuro-de-la-ciberseguridad-del-sistema-energetico/>

Renov-Arte. (s.f.). *Evolución de la Energía Eólica*. Recuperado de <https://renov-arte.es/energias-renovables/energia-eolica/evolucion-de-la-energia-eolica/>

Sakib, S., Mohammad, T., Griffith, D., Hossain, S., Bayat Saeid, A., & James T. (2023). *Intracycle RPM control for vertical axis wind turbines*. Wiley Online Library.

St Charger. (2022). *Historia general de la generación de energía eólica*. Recuperado de <https://stcharger.com.ar/historia-general-de-la-generacion-de-energia-eolica/>

TESUP. (2024, marzo 7). *Proyecto de control de turbinas eólicas IoT*. Recuperado de <https://tesup.com/co/blogs/post/ultima-innovacion-proyecto-de-control-de-turbinas-eolicas-iot>

University of Minnesota. (2018). *A novel Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*. Department of Aerospace Engineering Mechanics.

Worldsensing. (2024). *Inalámbrico monitorización de turbinas eólicas en Dinamarca*. Recuperado de <https://www.worldsensing.com/es/news/innovation-wireless-monitoring-wind-turbines-denmark-2-2/>

ANEXOS

Guion de la entrevista

Guion de Entrevista Semiestructurada

Perfil del entrevistado: Ingeniero/a especializado/a en análisis de estructuras y comportamiento mecánico bajo condiciones extremas.

Objetivo de la entrevista: Obtener criterios técnicos, recomendaciones y validación de las variables críticas que deben considerarse para proteger las palas de una turbina eólica de eje vertical frente a condiciones de viento extremo y vibraciones excesivas.

Presentación

- Presentación del proyecto y del objetivo de la entrevista.
- Contextualización del desarrollo del prototipo de turbina eólica de eje vertical con sistema de protección automatizado.
- Solicitud de consentimiento para tomar notas de la entrevista.

Conocimiento general sobre Estructuras y comportamiento mecánico

- Desde su experiencia, ¿cuáles son los principales riesgos estructurales que enfrentan las palas de una turbina eólica de eje vertical?
- ¿Qué tipos de fallos o daños son más frecuentes en este tipo de turbinas en condiciones de viento extremo?

VARIABLES CRÍTICAS Y UMBRALES RECOMENDADOS

- ¿Cuáles considera que son las variables estructurales más críticas que se deberían monitorear para proteger las palas? (Ejemplos: velocidad del viento, vibraciones, torsión, flexión).
- Según su criterio técnico, ¿qué umbrales de velocidad del viento serían considerados de riesgo para la estructura de una turbina de pequeña escala?
- ¿Qué niveles de vibración en g o en mm/s serían considerados de alerta o riesgo para la estructura?

- ¿Qué considera como tiempo de respuesta mínimo aceptable desde la detección de la condición peligrosa hasta la activación del sistema de protección?

Recomendaciones técnicas para el sistema de protección

- ¿Qué mecanismos de protección considera más adecuados para palas de turbinas pequeñas?
- ¿Qué materiales o características constructivas recomienda para aumentar la resistencia estructural de las palas?
- ¿Qué aspectos considera críticos en el diseño de un sistema de protección automática desde el punto de vista estructural?

Validación y cierre

- Según su experiencia, ¿cuáles errores comunes se presentan en el diseño de estructuras y sistemas de protección?
- ¿Recomendaría alguna referencia normativa, bibliográfica o caso de estudio que pueda considerarse como guía?

Agradecimiento

- Agradecimiento por su tiempo y aportes.



A quien pueda Interesar

Por medio de la presente, la Coordinación de Investigación de la carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información, confirma que el estudiante **ARTOS ORBE JOSÉ LUIS** portador de la cédula de ciudadanía N.º 1004124689 desarrolló el Trabajo de Titulación denominado **"PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA CON AUTOPROTECCIÓN EN CONDICIONES CLIMÁTICAS ADVERSAS BASADA EN INTERNET DE LAS COSAS (IOT)"**, cumpliendo con los objetivos establecidos tal como lo ratifica el tribunal de grado para la obtención del título de Ingeniero en Tecnologías de la Información en la PUCE-I.

Esta Coordinación de Investigación, ha verificado que el prototipo cumple con los objetivos establecidos en el proyecto.

Sin otro particular,

Quedamos atentos a cualquier consulta adicional.

**Dulce Milagro
Rivero
Albarrán** Firmado digitalmente
por Dulce Milagro
Rivero Albarrán
Fecha: 2025.08.13
09:27:48 -05'00'

Dra. Dulce Milagro Rivero Albarrán
Cl. 1757608961

Dirección: Av. Jorge Guzmán Rueda y Av. Aurelio Espinosa Pólit. Ciudadela "La Victoria".

Teléf: (593-6) 2615 500 / 2615 453 **Ext.** 1000 **Cel.** 099 236 27 13 / 098 138 3498

Ibarra - Ecuador / www.pucesi.edu.ec

