



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN
ENERGÍAS RENOVABLES

T E S I S

SISTEMA DE CONTROL ACTIVO PARA LA
ESTABILIDAD DE POTENCIA EN AEROGENERADORES
DE BAJA POTENCIA

PARA OBTENER EL GRADO EN

DOCTOR EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS
RENOVABLES

P R E S E N T A :

MTRO. ROBERTO ADRIÁN GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ

DIRECTOR(ES)

DIRECTOR: DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT

CODIRECTOR: DR. NEIN FARRERA VÁZQUEZ

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, OCTUBRE 2024





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS AUTÓNOMA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 24 de octubre de 2024

Oficio No. SA/DIP/0737/2024

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Roberto Adrián González Domínguez

CVU: 897788

Candidato al Grado de Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables

UNICACH

Presente

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Sistema de control activo para la estabilidad de potencia en aerogeneradores de baja potencia** cuyo Director de tesis es el Dr. Orlando Lastres Danguillecourt (CVU: 252788) y Co-Director el Dr. Neín Farrera Vázquez (CVU: 239865) quienes avalan el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

Atentamente

“Por la Cultura de mi Raza”

Dra. Carolina Orantes García
Directora



**DIRECCIÓN DE
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

C.c.p. Dr. José Francisco Pola Albores, Director del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables UNICACH. Para su conocimiento.

Dra. Laura Elena Vereá Valladares, Coordinadora de Posgrado, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.

Archivo/minutario.

RJAG/COG/hyb/igp/gtr

2024 Año de Felipe Carrillo Puerto
BENEMÉRITO DEL PROLETARIADO,
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR DEL MAYAB.



Secretaría Académica

Dirección de Investigación y Posgrado

Libramiento Norte Poniente No. 1150

Colonia Lajas Maciel C.P. 29039

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Tel:(961)6170440 EXT.4360

investigacionyposgrado@unicach.mx

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Orlando Lastres Danguillecourt, por su inquebrantable apoyo, paciencia y orientación a lo largo de este proyecto.

Quiero agradecer a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables por brindarme el entorno necesario para llevar a cabo esta tesis.

De igual manera, agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de este proyecto, Núm. de CVU 897788.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, por su amor incondicional y su apoyo a lo largo de todos estos años de estudio. A mis padres, por creer siempre en mí y motivarme a seguir adelante, y a mis hermanos, por su constante ánimo y comprensión.

Roberto Adrián González Domínguez

Resumen

En esta tesis se propone el desarrollo de un sistema de control activo para controlar la salida de potencia de un aerogenerador de eje horizontal (HAWT) de baja potencia cuando opera a velocidades del viento por encima de la velocidad de viento nominal del aerogenerador. El sistema está compuesto por una veleta articulada activa (AAV) a cargo de la orientación del aerogenerador, la cual es accionada por un actuador eléctrico que cambia el ángulo de la AAV para mantener una salida de potencia constante. En comparación con los sistemas de regulación pasiva de potencia más utilizados en los HAWTs de baja potencia, los sistemas activos permiten un mejor control, por lo tanto, una mayor estabilidad de la potencia suministrada y permite un frenado controlado en cualquier condición de viento o durante fallas del sistema. El sistema de control fue diseñado y simulado utilizando el software MATLAB, y luego fue construido y evaluado en condiciones de laboratorio. Para el diseño del control, se determinó la función de transferencia (TF) entre el ancho de pulso (PWM) y el ángulo de la AAV (θ) mediante pruebas de laboratorio utilizando la herramienta PID-Turner de MATLAB. Para la simulación, se determinó la relación entre la salida de potencia y el ángulo de la AAV utilizando la descomposición vectorial de la velocidad del viento y el área del rotor del viento. Se realizaron pruebas de respuesta simuladas de tipo escalon, rampa, senoidal y a pasos de velocidad del viento (V) empleando una técnica de control proporcional-integral-derivativo (PID). Los resultados obtenidos demuestran que una veleta activa es capaz de regular y frenar el aerogenerador, implementando una técnica de control PID. Se lograron tiempos de estabilización (t_s) de 6.7 s en la respuesta a escalón, 2.8 s en la respuesta a rampa, y un frenado total del aerogenerador en 3.2 s.

Índice general

Índice de figuras	VI
1. Introducción	1
1.1. Conceptualización	1
1.1.1. Aerogenerador de eje horizontal	1
1.2. Diseño de la veleta activa	6
1.2.1. Sistema de control	7
1.2.2. Modelo en teoría de control	8
1.2.3. Tipos de controladores industriales	9
1.2.4. Técnicas de modulación	9
1.2.5. Sistema SCADA	11
1.3. Antecedentes	12
1.3.1. Modelo de descomposición vectorial del área	12
1.3.2. Modelo de descomposición vectorial del viento	17
1.3.3. Técnicas de control en los HAWT	18
1.4. Planteamiento del Problema	23
1.5. Justificación	24
1.6. Objetivos	25
1.6.1. Objetivo General	25
1.6.2. Objetivos Específicos	25
2. Marco teórico	26
2.1. Diseño de veleta activa	26

2.1.1.	Determinación de la fuerza de arrastre	26
2.1.2.	Determinación del momento de fuerza actuante	26
2.1.3.	Determinación del área de la veleta	27
2.1.4.	Determinación de la longitud del timón	27
2.2.	Parámetros y ecuaciones de diseño de la tarjeta de control	28
2.2.1.	Parámetros de espaciado y trazado	28
2.2.2.	Ancho de Pista	29
2.2.3.	Capacidad de carga de vías	29
2.2.4.	Parámetros de diseño térmico	29
2.2.5.	Parámetros de resistencia y capacitancia parásita	30
2.3.	Modelo del Aerogenerador simulado	31
2.3.1.	Momento de inercia	34
2.3.2.	Simulación del rotor del aerogenerador	34
2.3.3.	Modelo del generador eléctrico	35
2.3.4.	Sensor de potencia trifásico	37
2.4.	Teorema del muestreo	39
2.5.	Función de transferencia	39
2.5.1.	Obtención de la función de transferencia experimental	41
2.6.	Control clásico	42
2.6.1.	Control P	42
2.6.2.	Control PD	44
2.6.3.	Control PID	44
2.7.	Ajuste del control PID	45
2.7.1.	Método Ziegler-Nichols	45
2.7.2.	Método Tyreus-Luyben	46
2.7.3.	Método Experimental	47
2.8.	Respuesta transitoria	48
3.	Metodología	49
3.1.	Metodología general del proyecto	49

3.2. Metodología de diseño y construcción del sistema de veleta activa . . .	50
3.3. Metodología de simulación de algoritmos con técnicas de control . . .	52
3.4. Metodología de evaluación de algoritmos en condiciones de laboratorio	53
3.4.1. Pruebas de laboratorio	54
3.5. Método de control de potencia del aerogenerador	54
4. Resultados	56
4.1. Diseño y construcción de sistema de control activo	56
4.1.1. Condiciones iniciales	56
4.1.2. Modelado matemático de potencia del sistema de la veleta activa	57
4.1.3. Diseño del sistema mecánico y control de la veleta activa . . .	58
4.1.4. Construcción del sistema mecánico y control de la veleta activa	60
4.2. Simulación de los algoritmos y el sistema con técnica de control . . .	62
4.2.1. Definición del modelo a bloques del sistema	62
4.2.2. Diseño del control PID	63
4.2.3. Diagrama de bloques del sistema en Matlab	64
4.2.4. Análisis de curvas de respuesta	65
4.3. Evaluación de los algoritmos en el sistema de control en condiciones de laboratorio	76
4.3.1. Análisis de curvas de respuesta	76
4.4. Discusión	84
5. Conclusiones	86

Índice de figuras

1.1.	Diagrama de conversión de energía del control pitch de un aerogenerador.	3
1.2.	Curva de potencia del aerogenerador.	4
1.3.	Clasificación de los sistemas de control en HAWT de eje horizontal. .	5
1.4.	Componentes de la veleta de orientación.	6
1.5.	Ejemplo de diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.	8
1.6.	Ejemplo de diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.	8
1.7.	Modulación de ancho de pulso [10].	10
1.8.	Diagrama de bloques del control pitch con PID [22].	20
2.1.	Diagrama para el cálculo del mástil [31].	28
2.2.	Diagrama de bloques empleados para modelar un aerogenerador en Matlab	31
2.3.	Gráfica de respuesta al sistema de primer orden [39].	41
2.4.	Gráfica de obtención de Ganancia crítica y Tiempo Crítico [42]. . . .	46
2.5.	Gráfica de comportamiento del controlador PID en el tiempo [39]. . .	48
3.1.	Metodología general del proyecto.	50
3.2.	Metodología de diseño y construcción de sistema de control activo. . .	51
3.3.	Metodología de simulación de algoritmos y técnicas de control.	52
3.4.	Metodología de evaluación de algoritmos en condiciones de laboratorio.	53
3.5.	Diagrama PFD de pruebas en laboratorio.	54
3.6.	Diagrama de control del aerogenerador.	55
4.1.	Sistema de aerogenerador con veleta activa.	58

4.2. Diseño del sistema mecánico de la veleta activa.	59
4.3. Elementos de diseño del sistema de control de veleta activa.	59
4.4. Construcción de la veleta activa en vista isométrica.	60
4.5. Construcción de la tarjeta principal de control.	61
4.6. Construcción del sensor de voltaje.	62
4.7. Construcción del módulo de entradas y salidas.	62
4.8. Respuesta al escalón del actuador.	63
4.9. Diagrama de bloques de prueba simulada.	64
4.10. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada escalón. . .	69
4.11. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada rampa. . . .	71
4.12. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada senoidal sobre la nominal.	74
4.13. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada perfil de viento.	76
4.14. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada escalón. Con- trol PID.	78
4.15. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada rampa. Con- trol PID.	80
4.16. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada senoidal sobre la nominal. Control PID.	82
4.17. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada de perfil de viento. Control PID.	84

Capítulo 1

Introducción

1.1. Conceptualización

1.1.1. Aerogenerador de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) son máquinas utilizadas generalmente para transformar la energía mecánica rotacional provocada por el viento en energía eléctrica. La mayoría de las turbinas fabricadas hoy en día son de eje horizontal. Los principales componentes son[1]:

- **Rotor:** Es el conjunto formado por el eje y los álabes, y se encarga de transmitir el movimiento mecánico al generador. El rotor puede ser de dos tipos: el rotor de eje horizontal, que es el más común y está formado por un eje horizontal y los álabes, y el rotor de eje vertical, que tiene un eje vertical y los álabes dispuestos radialmente alrededor de él.
- **Aspas:** Son encargadas de capturar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica. Están diseñadas para maximizar la eficiencia aerodinámica y minimizar la resistencia al viento. Los álabes pueden tener diferentes longitudes y perfiles aerodinámicos.
- **Caja multiplicadora:** Es un componente esencial en los aerogeneradores de gran escala. Su función es aumentar la velocidad de rotación del rotor y adap-

tarla al generador eléctrico para generar energía a una velocidad óptima.

- **Generador o alternador:** Es el componente que convierte la energía mecánica del rotor en energía eléctrica. Los generadores pueden ser diferentes tipos, pero los más utilizados en la actualidad son los generadores síncronos de imanes permanentes, que son más eficientes y requieren menos mantenimiento que los generadores de inducción.
- **Veleta:** son dispositivos de orientación situados en la prolongación del eje del rotor y tienen por misión orientar la aeroturbina en la dirección del viento. Están constituidas por una superficie plana metálica o de madera, sobre la que el viento ejerce una presión en el momento en que no están orientadas paralelamente en la dirección del mismo, provocando un par de giro que orienta la máquina [2] .
- **Torre:** Es la estructura que soporta al rotor y la góndola, y se encarga de elevar la turbina hasta una altura adecuada para aprovechar la velocidad del viento. Las torres pueden ser de acero, hormigón o una combinación de ambos materiales, y su altura puede variar desde los 50 metros hasta más de 150 metros en las turbinas de última generación.
- **Central de control:** Es el conjunto de sensores, actuadores y dispositivos electrónicos que monitorizan y regulan el funcionamiento del aerogenerador. El sistema de control recibe información sobre la velocidad y dirección del viento, la posición del rotor, la potencia generada, etc., y envía ordenes al sistema de orientación, al convertidor de potencia, etc., para optimizar el rendimiento y la seguridad del aerogenerador.

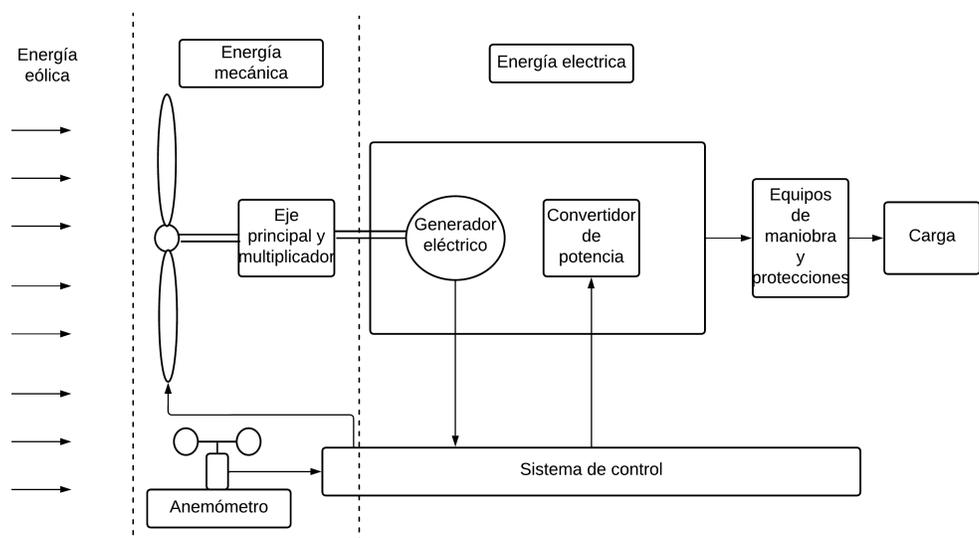


Figura 1.1. Diagrama de conversión de energía del control pitch de un aerogenerador.

En la Figura 1.1, se muestra el proceso de transformación de energía cinética del viento a energía eléctrica consumida en una carga. A continuación, se describen los procesos:

- Energía eólica: el viento al estar en movimiento, contiene energía cinética, la cual, al incidir sobre las palas del aerogenerador, provoca el giro de las mismas.
- Energía mecánica: el rotor transforma la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación.
- El rotor transmite esta velocidad al multiplicador a través del eje de baja velocidad.
- El multiplicador, compuesto por una cadena de engranajes, aumenta la velocidad que llega a través del eje de baja velocidad y la transmite al generador a través del eje de alta velocidad.
- Energía eléctrica: el generador eléctrico transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.
- Una vez que se produce la energía eléctrica, esta es transportada, mediante conductores eléctricos, hasta la red de electricidad [1].

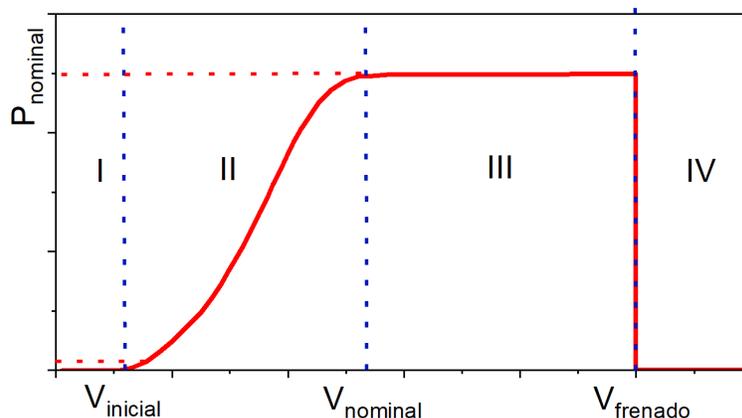


Figura 1.2. Curva de potencia del aerogenerador.

Cada aerogenerador tiene una curva de potencia (PV) que relaciona la potencia entregada en función de la velocidad del viento, como se puede observar en la Figura 1.2, donde se presenta la curva PV de un HAWT de baja potencia, que se divide en cuatro regiones importantes [3]:

- **Región I:** La velocidad del viento es inferior a la velocidad inicial ($V_{inicial}$); en esta etapa, el rotor comienza a girar sin producir electricidad hasta romper el momento de inercia.
- **Región II:** En esta etapa, el inversor sigue el punto de máxima potencia (MPPT), comenzando desde la velocidad inicial ($V_{inicial}$) cuando el viento alcanza una velocidad suficiente para que el aerogenerador comience a suministrar potencia ($P_{inicial}$), hasta llegar a la velocidad nominal ($V_{nominal}$), donde el rotor gira a su velocidad óptima, produciendo la máxima potencia posible ($P_{nominal}$). Durante esta fase, el aerogenerador opera de manera más eficiente y genera la mayor cantidad de energía eléctrica posible.
- **Región III:** Cuando la velocidad del viento excede la velocidad nominal del aerogenerador ($V_{nominal}$), ingresa en la etapa de control de potencia. Aquí, el aerogenerador ajusta su velocidad de rotación para limitar la cantidad de potencia que produce. Esto se hace para proteger el sistema de posibles daños

causados por velocidades excesivas del viento.

- Región IV:** Si la velocidad del viento continúa aumentando más allá de la $V_{frenado}$, el aerogenerador entra en la fase de frenado. Durante esta fase, el sistema de frenado se activa para reducir la velocidad del rotor y proteger la integridad estructural del aerogenerador. Dependiendo del diseño del aerogenerador, el frenado se puede conseguir reorientando las palas para reducir su eficiencia aerodinámica o utilizando frenos mecánicos.

Los HAWT de eje horizontal presentan diferentes sistemas de control, ya sean activos o pasivos, como se muestra en el diagrama de la Figura 1.3. Un aerogenerador debe contar con un sistema de control que permita maximizar la captura de energía proveniente del viento, limitando las cargas pero manteniendo la producción de potencia eléctrica, por lo que es necesario limitar la potencia a un valor nominal.

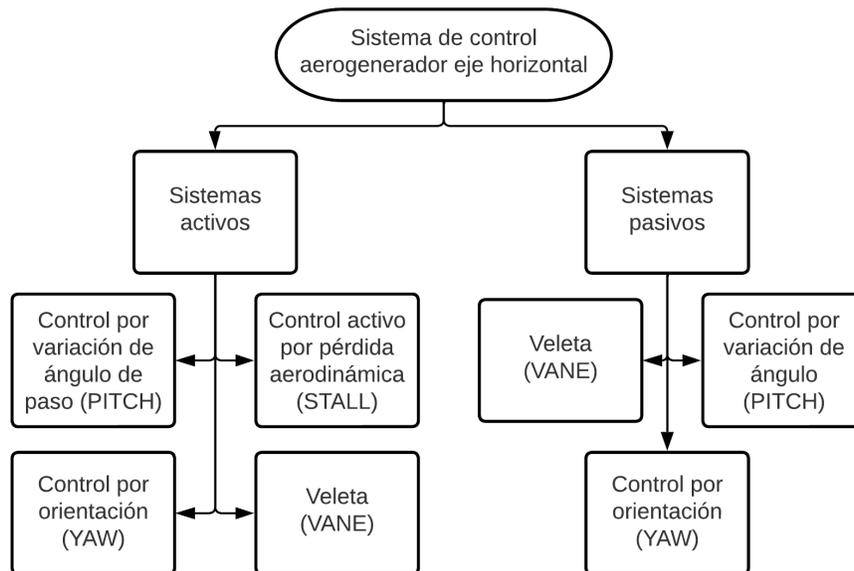


Figura 1.3. Clasificación de los sistemas de control en HAWT de eje horizontal.

Los sistemas activos se usan fundamentalmente a barlovento [4]. En este caso, un mecanismo activa la rotación de la góndola sobre la torre. Estos mecanismos de orientación son movidos por un solo motor eléctrico o por varios motores al mismo tiempo.

Un aerogenerador debe contar con un sistema de control que permita maximizar la captura de energía proveniente del viento, limitando las cargas pero manteniendo la producción de potencia eléctrica mediante el direccionamiento del aerogenerador con sistemas activos. La norma IEC 61400-2 indica que debe contar con un botón de paro de emergencia que permita frenar el aerogenerador en cualquier momento y debe incluir uno o más sistemas de control (mecánicos, eléctricos o aerodinámicos) [5].

1.2. Diseño de la veleta activa

Las veletas o timones son dispositivos de orientación situados en la prolongación del eje del rotor y tienen por misión orientar al aerogenerador en la dirección del viento, además de frenar al aerogenerador, como se presentan los componentes de una veleta en la Figura 1.4. Para calcular el largo del mástil de la veleta en un aerogenerador, se deben considerar varios factores que aseguren que la veleta pueda generar el momento de fuerza necesario para orientar el rotor en la dirección del viento.

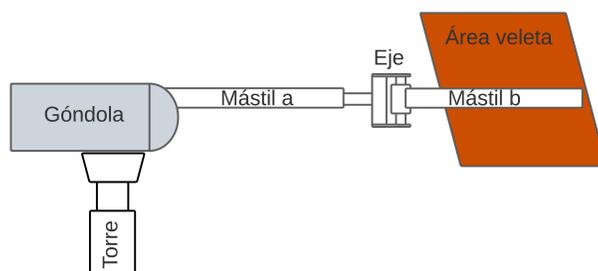


Figura 1.4. Componentes de la veleta de orientación.

- **Timón A:** Es una de las secciones que conforman el plano del timón, cuya función es incrementar la estabilidad y la precisión en la orientación. Generalmente, trabaja junto con el timón B para corregir la dirección del viento.
- **Timón B:** Complementa al timón A. Ambos timones en conjunto permiten que la veleta mantenga su orientación correcta, alineando el aerogenerador o dispositivo con la dirección del viento de forma estable.

- **Área de la veleta:** Es la superficie total de la veleta que queda expuesta al viento. A mayor área, mayor será la capacidad de captar cambios en la dirección del viento, lo que ayuda en la función de seguimiento.
- **Eje:** Es el eje que conecta el timón A y el timón B. Permite que la veleta gire libremente en respuesta a los cambios de dirección del viento, actuando como el punto de pivote o rotación.

1.2.1. Sistema de control

Un sistema se puede definir como un conjunto de partes o entidades que interactúan y operan a lo largo del tiempo y del espacio para realizar algún fin lógico o trabajo dado [6].

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos [7]:

- Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores.
- Ser eficiente, según un criterio preestablecido. Normalmente, este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
- Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

En los sistemas de control, la señal de salida puede operar o no sobre el funcionamiento del sistema. Por esto, se diferencia entre dos tipos de sistemas.

Sistema de lazo abierto

Son aquellos en los que la señal de salida no afecta al funcionamiento del sistema total, como se ilustra en la Figura 1.5 donde actúa sin verificar su accionamiento [8].

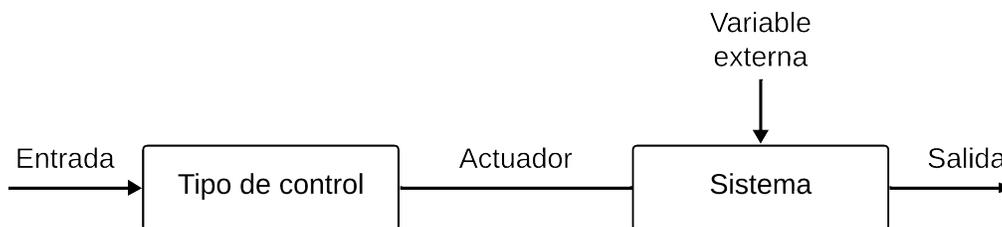


Figura 1.5. Ejemplo de diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.

Sistema de lazo cerrado

Son aquellos en los que se produce un proceso de realimentación, es decir, que son capaces de modificar las señales de entrada en función de la señal de salida como se observa en la Figura 1.6. La toma de decisiones no depende solo de la entrada sino también de la salida, donde se indica que el sensor realiza la función [7].

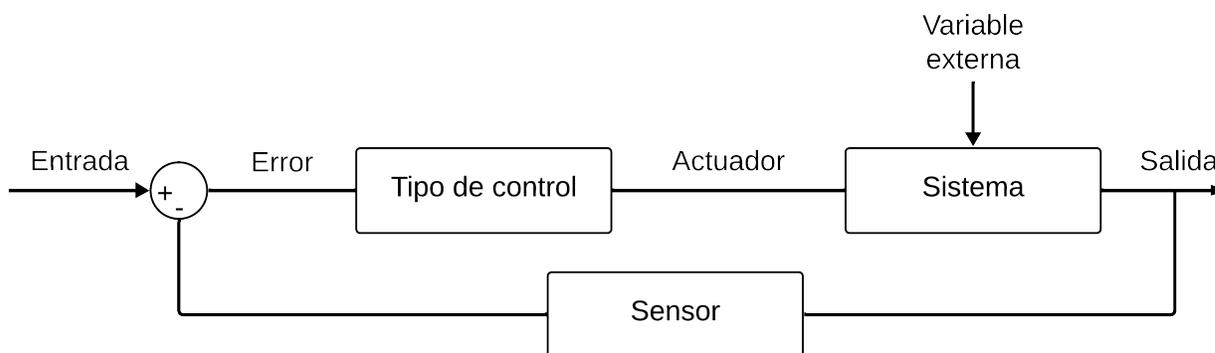


Figura 1.6. Ejemplo de diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

1.2.2. Modelo en teoría de control

En sistemas de control, un modelo es una representación matemática o física que describe las relaciones entre las entradas, salidas y variables internas de un sistema, facilitando el análisis y diseño de estrategias de control en el dominio de la frecuencia.[6].

1.2.3. Tipos de controladores industriales

Los controladores industriales son mecanismos de control que, a través de un lazo de retroalimentación o lazo cerrado, permiten regular la velocidad, temperatura, presión, y voltaje, entre otras variables de un proceso en general. Estos controladores permiten calcular la diferencia entre la variable real y la variable deseada. Los controladores se pueden clasificar de acuerdo al control clásico o moderno [9], como se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Tipos de controladores industriales [9].

Clasificación de control	Controlador
Clásicos	Controlador OFF – ON Controladores lógicos programables (PLC) Controlador proporcional (P) Controlador derivativo (D) Controlador integrativo (I) Controlador proporcional derivativo (PD) Controlador proporcional integral (PI) Controlador proporcional integral derivativo (PID)
Moderno	Lógica difusa Redes neuronales Control robusto Control adaptativo Control inteligente

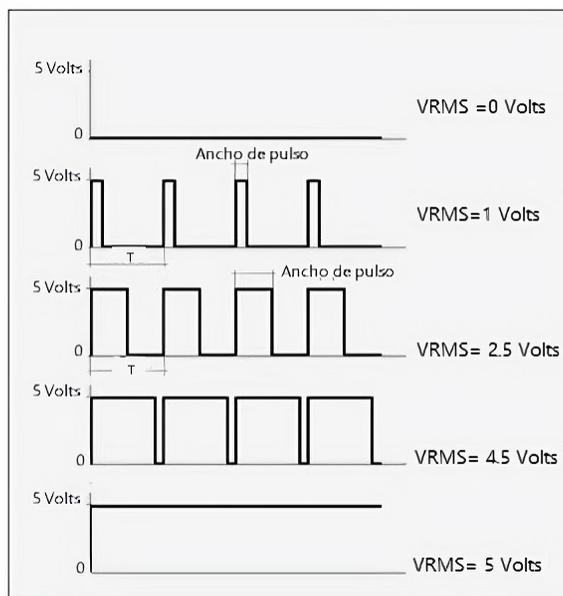
1.2.4. Técnicas de modulación

La modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda. Estas técnicas permiten hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que se quiere transmitir, esto se logra mediante técnicas de modulación por impulsos presentados Tabla 1.2 [8].

Tabla 1.2. Tipos de modulaciones conjuntas [8].

Técnica	Modulación
Conjunción	Modulación por impulsos codificados Modulación por anchura de pulsos (PWM) Modulación por duración de pulsos (PDM) Modulación por amplitud de pulsos (PAM) Modulación por posición de pulsos (PPM)

La modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica que logra reproducir el efecto de una señal analógica sobre una carga, a partir de la variación de la frecuencia y ciclo de trabajo de una señal digital. El ciclo de trabajo describe la cantidad de tiempo que la señal está en un estado lógico alto. La frecuencia determina qué tan rápido se completa un ciclo, y por consiguiente, qué tan rápido se cambia entre los estados lógicos alto y bajo, como se observa en la Figura 1.7.

**Figura 1.7.** Modulación de ancho de pulso [10].

Las señales de PWM son utilizadas comúnmente en el control de aplicaciones. Su uso principal es el control de motores de corriente continua, aunque también pueden ser

utilizadas para controlar válvulas, etc.

1.2.5. Sistema SCADA

El sistema SCADA es una herramienta de automatización y control industrial utilizada en los procesos productivos que puede controlar, supervisar, recopilar datos, analizar datos y generar informes a distancia mediante una aplicación informática. Su principal función es la de evaluar los datos con el propósito de subsanar posibles errores [11].

Adquisición de datos: permite conectar y comunicarse con los diferentes sensores y actuadores del sistema de control. Esto implica recopilar información en tiempo real sobre variables como (en el caso de una veleta activa) la dirección y velocidad del viento, posición de la veleta activa, potencia generada, entre otros datos relevantes para el funcionamiento del sistema. A continuación se explica cómo se relacionan.

Visualización en tiempo real: ofrece una amplia gama de herramientas gráficas que facilitan la creación de interfaces de usuario interactivas. Estas interfaces permiten mostrar de forma clara y comprensible los datos recopilados, como gráficos, tablas, indicadores, medidores, entre otros elementos visuales. De esta manera, los operadores o ingenieros pueden monitorear el comportamiento del sistema de control en tiempo real.

Control y supervisión: se pueden implementar algoritmos y lógica de control para gestionar el sistema de control. Esto implica establecer estrategias de control basadas en los datos adquiridos, que en el caso de una veleta activa pueden ser; ajustar la orientación de la veleta activa en función de la dirección del viento o activar los mecanismos de seguridad en situaciones anormales. Además, se pueden establecer alarmas y notificaciones para alertar a los operadores sobre condiciones críticas o eventos importantes en el sistema.

Registro y análisis de datos: permite almacenar los datos adquiridos en bases de datos o archivos para su posterior análisis. Esto facilita la evaluación del rendimiento del sistema de control a largo plazo, identificando tendencias, patrones y posibles mejoras. Además, proporciona herramientas para realizar análisis y cálculos avanzados sobre los datos registrados.

1.3. Antecedentes

Entre los sistemas de control más utilizados en los HAWT se encuentran el control *pitch* y *yaw*, que permiten ajustar la velocidad de giro del rotor y, por lo tanto, adaptarse a las diferentes condiciones de viento. Además, es importante tener en cuenta en el modelo de potencia del aerogenerador la descomposición del área del rotor y de la velocidad del viento, ya que esto permite analizar con mayor precisión el comportamiento del rotor ante diferentes condiciones de viento. Este modelo se basa en la idea de que el viento que se aproxima al rotor puede ser descompuesto en dos vectores: uno paralelo al plano de rotación del rotor y otro perpendicular a este plano. De esta manera, se puede analizar cómo el viento afecta al rendimiento del aerogenerador en función de la dirección y la velocidad del viento.

1.3.1. Modelo de descomposición vectorial del área

Han-Soon et al. abordan la problemática del control de la dirección del rotor en turbinas eólicas de clase MW, donde los vientos variables pueden afectar la eficiencia y la vida útil de la estructura considerando la descomposición vectorial del área representada por la ecuación (1.1).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c_p(\lambda, \beta) A(v_w)^3 \cos \theta \quad (1.1)$$

donde:

- P_w es la potencia del aerogenerador.
- ρ es la densidad del aire.
- $c_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia, que depende de la relación de velocidad de punta λ y el ángulo de paso de las palas β .
- A es el área barrida por las palas del aerogenerador.
- v_w es la velocidad del viento.
- θ es el ángulo de inclinación del aerogenerador con respecto a la dirección del viento.

El estudio propone una estrategia de control activo del ángulo de *yaw* (dirección del rotor) utilizando un modelo de controlador de potencia de dos etapas. En la primera etapa, el modelo utiliza una técnica de control de velocidad del rotor para mantener la velocidad constante. En la segunda etapa, se implementa un control de dirección para ajustar el ángulo de *yaw* en respuesta a las condiciones del viento.

Los resultados de la simulación y pruebas experimentales muestran que el modelo propuesto mejora significativamente la eficiencia del aerogenerador y reduce la fatiga en la estructura en comparación con los sistemas de control de dirección convencionales. Esto sugiere que el control activo del ángulo de *yaw* puede ser una solución eficaz para mejorar el rendimiento y la vida útil de las turbinas eólicas de clase MW [12].

Farret et al. abordan el problema del control de la dirección del rotor en turbinas eólicas mediante la implementación de la Ecuación (1.2), que establece que la potencia es afectada directamente por la descomposición del área, utilizando un modelo de controlador de potencia sin sensores.

$$P_g = P_{max} \cos \theta \quad (1.2)$$

donde:

- P_g es la potencia generada .
- P_{max} es la máxima potencia disponible.
- θ es el ángulo de inclinación del aerogenerador con respecto a la dirección del viento.

La estrategia de control propuesta utiliza un algoritmo de control vectorial sin sensores para estimar la velocidad del rotor y la dirección del viento. El modelo de controlador de potencia sin sensores consta de dos etapas: en la primera, se utiliza un filtro de Kalman para estimar la velocidad del rotor y la dirección del viento a partir de las señales de corriente y voltaje del generador eléctrico. En la segunda etapa, se utiliza un controlador proporcional integral (PI) para ajustar el ángulo de *yaw* en función de las estimaciones de velocidad y dirección del viento.

Los resultados de la simulación y pruebas experimentales muestran que el modelo propuesto es efectivo en el control activo del ángulo de *yaw* del aerogenerador sin necesidad de sensores adicionales. Además, el controlador propuesto es capaz de reducir significativamente las vibraciones y la fatiga en la estructura del aerogenerador, lo que puede mejorar la vida útil del sistema [13].

Hamid et al. proponen un nuevo modelo que considera el área efectiva como el producto del área por el coseno del ángulo, representada en la Ecuación (1.3), para el control de la dirección de las turbinas eólicas con generadores de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés).

$$A_{ef} = \pi R^2 \cos \theta \quad (1.3)$$

donde:

- A_{ef} es la área efectiva.
- R es el rotor.
- θ es el ángulo de inclinación del aerogenerador con respecto a la dirección del viento.

En este modelo, se utiliza un controlador de ángulo de *Yaw* basado en un sistema de control de realimentación de estado y un filtro de Kalman extendido para estimar la velocidad y dirección del viento. El modelo propuesto también tiene en cuenta la influencia de la velocidad de rotación del rotor en la producción de energía del aerogenerador.

Además, el artículo propone un nuevo método de control de ángulo de *yaw* basado en un algoritmo de control de lazo cerrado, que utiliza un controlador proporcional-integral (PI) y una lógica de control adaptativa. Este método de control adapta el ángulo de *yaw* de la turbina en función de la velocidad y dirección del viento, lo que permite mejorar la eficiencia energética y reducir las cargas mecánicas en la turbina.

Los resultados de la simulación y pruebas experimentales muestran que el modelo propuesto y el método de control de ángulo de *yaw* pueden mejorar significativamente el rendimiento del aerogenerador y reducir las cargas mecánicas en la estructura [14].

Bouhouch et al. presenta el desarrollo de un sistema de control de dirección de aerogenerador utilizando lógica difusa para generadores eólicos de baja potencia. El control de dirección activo es importante para mejorar la eficiencia de las turbinas eólicas al mantener una orientación adecuada ante cambios en las condiciones del viento. Además, estos sistemas también pueden proteger la turbina en caso de velocidades excesivas del viento. Sin embargo, la relación compleja y no lineal entre las

variables mecánicas y la potencia eléctrica hace que el diseño del controlador sea difícil utilizando técnicas convencionales como controladores proporcional-integral (PI) o proporcional-integral-derivativo (PID). Se implementó un modelo que considera la descomposición vectorial del área en la Ecuación (1.4), con un generador eólico de 20 kW que incluye un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) para evaluar el rendimiento del sistema de dirección propuesto en términos de la potencia generada.

$$P_m = \frac{1}{2}c_p\rho(v_w)^3A\cos\theta \quad (1.4)$$

donde:

- P_m es la potencia mecánica.
- c_p es el coeficiente de potencia.
- ρ es la densidad del aire.
- v_w es la velocidad del viento.
- A es el área.
- θ es el ángulo de inclinación del aerogenerador con respecto a la dirección del viento.

Los resultados de simulación obtenidos en el entorno MATLAB/Simulink considerando diferentes condiciones de viento muestran la efectividad del método propuesto. En resumen, el modelo de potencia utilizado en este artículo es un sistema de control de dirección de aerogenerador utilizando lógica difusa, que puede mejorar la eficiencia de las turbinas eólicas de baja potencia mediante el mantenimiento de la orientación adecuada y la protección de la turbina en caso de velocidades excesivas del viento [15].

1.3.2. Modelo de descomposición vectorial del viento

Wael et al. introdujeron tres diferentes controladores para el sistema Yaw de la góndola. El primero fue un regulador proporcional-integral-derivativo (PID); el segundo, un regulador de lógica difusa con diseño intuitivo y flexible (FLC); y el tercero, un modelo-controlador predictivo (MPC).

Obtuvieron como resultado que la dirección del viento causa una pérdida considerable de energía, lo cual quedó representado por la Ecuación (1.5) [16]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c_p(\beta, \lambda) \pi R^2 (v_w \cos \theta)^3 \quad (1.5)$$

donde:

- P_w es la potencia del aerogenerador.
- ρ es la densidad del aire.
- $c_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia, que depende de la relación de velocidad de punta λ y el ángulo de paso de las palas β .
- R es el rotor.
- v_w es la velocidad del viento.
- θ es el ángulo de inclinación del aerogenerador con respecto a la dirección del viento.

Esta pérdida es proporcional a tres veces el error del ángulo de Yaw. Para evaluar el rendimiento de las tres estrategias de control y comparar la efectividad de cada técnica para el mejor seguimiento de la dirección del viento mediante el sistema de actuación de guiñada, emplearon el método de Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés). Para esta comparación, se emplearon tres perfiles de viento denominados “Dirección del Viento 1 (WD1)”, “Dirección del Viento 2 (WD2)” y

“Dirección del Viento 3 (WD3)” respectivamente, con los resultados de una simulación de 80 segundos.

El MPC supera con 0.1330 de RMSE significativamente a los otros dos controladores, como se puede observar en la Tabla 1.3; sin embargo, el controlador PID mostró un rendimiento aceptable de 0.1949 RMSE en comparación con el MPC.

Tabla 1.3. Error producido por diferentes controladores [16].

	WD1	WD2	WD3	Mean RMSE
PID	0.0967	0.1043	0.3836	0.1949
FLC	0.1518	0.1917	0.6521	0.3319
MPC	0.0966	0.1008	0.2016	0.1330

1.3.3. Técnicas de control en los HAWT

Farret et al. presentan los resultados de la técnica de control on/off para un sistema Yaw activo sin la medición de la intensidad y dirección del viento. Lograron esto a partir del muestreo de la potencia generada para la orientación del sistema, realizando la adquisición de voltaje y corriente, generando una respuesta de salida para el sentido de rotación y el tiempo de encendido del actuador. Como resultado, demostraron que no es necesaria la medición de los parámetros del viento para regular el sistema Yaw, lo que permitió obtener un error aproximado del 8 por ciento [17].

Anjun et al. presentan un enfoque para el control del ángulo de paso de las palas (PITCH) en turbinas eólicas de gran escala utilizando un controlador proporcional integral derivativo (PID) basado en un sistema de control experto. Los autores implementan el controlador en una aerogenerador a gran escala y realizan simulaciones en condiciones de viento variable. Los resultados de la simulación muestran que el controlador experto PID puede ajustar de manera efectiva el ángulo de paso de las palas de la turbina en tiempo real, mejorando la eficiencia de generación de energía y reduciendo el desgaste mecánico en la turbina [18].

Kumar et al. abordan la problemática del control de las turbinas eólicas en cuanto a la orientación y ajuste de las palas en relación con la dirección y velocidad del viento. Los autores presentan un sistema de control para ajustar los ángulos de paso y dirección del aerogenerador, utilizando un controlador proporcional integral derivativo (PID). El sistema propuesto es capaz de ajustar los ángulos de paso y dirección en función de la velocidad y la dirección del viento, y se implementa en simulaciones de turbinas eólicas. Los resultados de la simulación muestran que el sistema de control propuesto es capaz de mejorar significativamente la eficiencia de la generación de energía en una amplia gama de condiciones de viento [19].

Kanti et al. presentan un estudio comparativo de diferentes estrategias de control del ángulo de paso en un aerogenerador de velocidad variable. Los autores comparan el control de ángulo de paso convencional (CP), el control de retroalimentación de velocidad de rotor (RRFC) y el control basado en el modelo (MBC) en términos de su capacidad para mejorar la eficiencia y reducir la carga en el aerogenerador. Se realizó una simulación de un aerogenerador de 2 MW, y se comparó el rendimiento de los tres enfoques de control en términos de producción de energía, velocidad del rotor, potencia de salida y carga en el rotor. Los resultados muestran que el control MBC proporciona la mejor eficiencia de generación de energía, mientras que el control CP proporciona el mejor rendimiento en términos de reducción de la carga en el rotor. El control RRFC también muestra una mejora en la eficiencia de generación de energía [20].

Alarcón et al. presentan un nuevo control híbrido para el control del Pitch, utilizando una combinación de control PID y lógica difusa. Los autores describen los fundamentos teóricos del control híbrido y su implementación en un modelo de simulación. Los resultados muestran que la combinación de ambos controles logra un mejor rendimiento en términos de seguimiento de la velocidad del viento y reducción de las oscilaciones en comparación con un control PID convencional. En conclusión, el control híbrido PID-difuso propuesto en el estudio puede considerarse una solución

efectiva para el control de la inclinación de las aspas en HAWT [21].

Soued et al. aplicaron diferentes tipos de controladores para conocer y obtener un mejor comportamiento dinámico de la planta de energía eólica. El controlador PID se aplica al BPC (blade pitch control) multivariable, para un sistema generador de turbinas eólicas, conectado a un sistema de gran potencia. Los resultados de la simulación mostraron que el GWO-PID es más efectivo que el ABC (artificial bee colony), GA (the genetic algorithm) y los métodos convencionales. Por otra parte, la robustez del regulador del GWO-PID se comprueba en presencia de variaciones del parámetro del sistema, lo cual pudo ser representado con las funciones de transferencia que se encuentran en el diagrama de bloques de la Figura 1.8 [22].

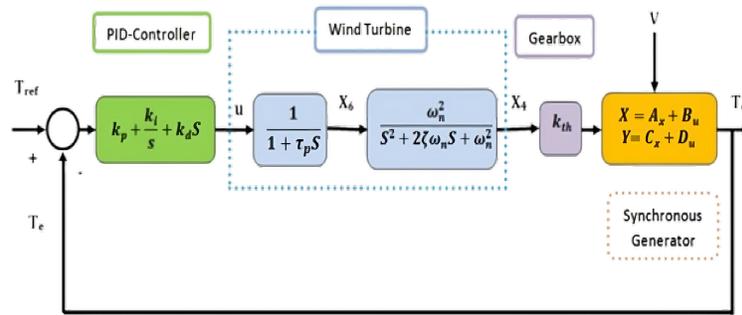


Figura 1.8. Diagrama de bloques del control pitch con PID [22].

López et al. plantearon como objetivo principal regular el nivel de potencia entregada por un aerogenerador de eje horizontal. Para tal fin, diseñaron un controlador que permite a las palas del rotor girar alrededor de su eje longitudinal, aprovechando al máximo la captación de energía proveniente del viento. La investigación propuso el uso de lógica difusa, lo que brindó la posibilidad de utilizar un sistema de control basado en un conjunto de reglas de actuación especificadas mediante descriptores lingüísticos. Como resultado, se demostró que la potencia de salida de un aerogenerador puede alcanzar un valor de salida constante [23].

Ordoñez et al. desarrollaron tres casos de estudio donde realizaron un análisis compa-

rativo entre el control lógica difusa y algunas adaptativas convencionales y técnicas adaptativas no lineales. En cada caso, el análisis se realizó tanto en simulación como en implementación, se comparan con los controladores convencionales en sistemas reales[24].

Hwas et al. sugirieron dos métodos para calcular las ganancias de un ángulo de inclinación con control proporcional-integral para una aerogenerador de 5 MW. El primer método es analítico y el segundo se basa en simulación. En primer lugar, se calcularon las características del coeficiente de potencia para diferentes ángulos de inclinación. En segundo lugar, se simularon las potencias de salida frente a las curvas de velocidad del rotor desde las velocidades del viento de corte hasta las de superiores. Los resultados del primer y segundo análisis fueron utilizados para encontrar las ganancias de control a diferentes velocidades del viento. Finalmente, los resultados se comparan utilizando un modelo de aerogenerador para determinar la característica de seguimiento de la turbina [25].

Bhanu et al. Controlaron la frecuencia de carga (LFC) de dos sistema térmico de recalentamiento interconectado de área utilizando un controlador proporcional integral (PI). El sistema está incorporado con gobernador de banda muerta, restricción de tasa de generación no lineal y dinámica de la caldera. Los controladores PID y P convencionales no logran un control de rendimiento adecuado con la consideración de no linealidades y dinámica de calderas. Para superar este inconveniente se utilizó un controlador PI en el sistema. Las simulaciones en el dominio de tiempo se utilizan para estudiar el rendimiento del sistema eléctrico. El rendimiento del sistema es examinado considerando en 1 por ciento de perturbación de carga escalonada en cualquier área de el sistema[26].

Javaid et al. proponen un nuevo esquema de control para resorte eléctrico basado en lógica difusa para regular la red voltaje. Se realizaron simulaciones basadas en controlador PI convencional, controlador de lógica difusa y PI difuso adaptativo y

sus resultados son analíticamente comparado. Se puede usar cada controlador para cumplir con los parámetros deseados [27].

Agarwal et al. realizaron un análisis comparativo entre la Grey wolf optimization (GWO) y el algoritmo Sine Cosine (SCA) para ajustar el controlador PID para el control de velocidad del motor de CC. Debido a la simplicidad y la eficiencia. El rendimiento del controlador PID ajustado por ambos algoritmos se ha comparado en términos de respuestas, aumento, tiempos de establecimiento y sobre impulso. El controlador PID sintonizado GWO supera al controlador PID sintonizado SCA en términos de parámetros de rendimiento [28].

En la descripción anterior se observa el uso mayoritario de los controladores clásicos y su eficiencia en el control de los sistemas YAW de aerogeneradores para controlar la potencia y que a pesar de los avances en modelización y control, los aerogeneradores de baja potencia aún dependen mayoritariamente de sistemas pasivos, limitando su eficiencia energética y aumentando los esfuerzos estructurales. La tendencia hacia técnicas de control más avanzadas, como la lógica difusa, refleja un esfuerzo por mejorar estas limitaciones, aunque los altos costos siguen siendo una barrera para su adopción generalizada. Es esencial continuar desarrollando soluciones de control que equilibren eficacia técnica y viabilidad económica para optimizar el rendimiento de estos aerogeneradores.

De los estudios anteriores sobre aerogeneradores de baja potencia, se ha destacado la importancia de la descomposición del área de captación en los modelos de potencia, lo que permite una mayor precisión en la estimación del rendimiento energético. De igual manera, la descomposición del vector de viento ha sido identificada como un factor clave para mejorar la eficiencia en estos modelos, ya que facilita una mejor adaptación del control a las variaciones en la dirección y velocidad del viento.

Sin embargo, se ha comenzado a implementar sistemas de control activo, como el yaw, en algunos aerogeneradores de baja potencia con técnicas de control PID. Es-

tos sistemas han demostrado su capacidad para mejorar la regulación de potencia y aumentar la estabilidad del sistema, subrayando la necesidad de adoptar técnicas de control más avanzadas en esta categoría de aerogeneradores

1.4. Planteamiento del Problema

Los sistemas activos de control se han implementado mayormente en aerogeneradores de alta y media potencia, mientras que en los de baja potencia la tendencia ha sido el uso de sistemas pasivos de regulación, y en los de mayor tamaño de esta categoría en algunos casos se utilizan sistemas de control activo tipo yaw. Esta situación plantea un problema significativo, ya que los sistemas pasivos, que generalmente dependen de mecanismos como las veletas, presentan limitación en la eficiencia de la regulación de potencia, lo cual, puede observarse en la calidad de la regulación de potencia en sus curvas de potencia. Los sistemas de control activo tipo yaw han tenido resultados satisfactorios en el control de aerogeneradores de baja potencia, pero esto aun resultan económicamente poco factibles en la mayorías de estos, debido a sus altos costos, sobretodo en los de menores potencia.

De lo anterior otros problemas, cómo aplicar las ventajas de los sistemas de control activo en los aerogeneradores de baja potencia para mejorar la estabilidad de la regulación de potencia y cómo optimizar el rendimiento del sistema de control considerando los modelos de descomposición vectorial de la velocidad del viento y el área del rotor eólico a la vez. Además resulta necesario analizar cuál de estas variables, o qué combinación de ellas, tiene un impacto más significativo en la mejora de la eficiencia energética del sistema, y cómo se pueden ajustar para maximizar el rendimiento bajo distintas condiciones operativas.

1.5. Justificación

La adopción de una veleta activa en aerogeneradores es esencial para abordar las problemáticas actuales en el diseño y funcionamiento de estos sistemas, especialmente en el contexto de los aerogeneradores de baja potencia. Los beneficios de esta innovación son significativos:

- **Prevención de daños:** La veleta activa permite mantener una orientación óptima frente al viento, evitando así cargas excesivas en las palas y la estructura. Esto reduce el riesgo de daños mecánicos y fallos prematuros, abordando uno de los principales desafíos en la durabilidad de los aerogeneradores.
- **Incremento de la eficiencia:** Al asegurar que el aerogenerador esté siempre alineado con la dirección del viento, la veleta activa maximiza la captura de energía eólica. Esto es crucial para mejorar la eficiencia operativa y la producción de energía.
- **Estabilización del sistema:** La capacidad de ajuste continuo de la veleta activa contribuye a la estabilidad del aerogenerador, mitigando fluctuaciones y fuerzas desequilibradas que pueden afectar su funcionamiento. Este aspecto es vital para mantener un rendimiento confiable en condiciones de viento variables.
- **Mejora de la seguridad:** Al prevenir condiciones operativas peligrosas y mantener la orientación correcta, la veleta activa incrementa la seguridad del aerogenerador y su entorno, protegiendo tanto a los operarios como a la infraestructura circundante.

La integración de la veleta activa no solo aborda las deficiencias actuales, sino que también impulsa su uso generalizado, aportando en diversas áreas:

- **Científica:** Contribuye al desarrollo e investigación en energía eólica, promoviendo avances tecnológicos y optimizaciones en la generación de energía renovable, lo que es fundamental ante la creciente demanda energética.

- Técnica: Mejora la eficiencia y estabilidad del sistema, lo que se traduce en reducción de costos operativos y aumento de la vida útil del equipo. Esto hace que la energía eólica sea más competitiva y sostenible en comparación con otras fuentes de energía.
- Social: Facilita el acceso a fuentes de energía renovable en áreas remotas y rurales, mejorando la calidad de vida de las comunidades y reduciendo la brecha energética, promoviendo el desarrollo social y económico.
- Ambiental: Ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y a combatir el cambio climático, fomentando el uso de energía limpia y sostenible, y contribuyendo así a un futuro más sostenible.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Diseñar, simular y evaluar un sistema de control activo de veleta articulada para aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un sistema de control activo con sistema de lazo cerrado.
- Simular los algoritmos y sistemas con técnica de control.
- Evaluar los algoritmos en el sistema de control en condiciones de laboratorio.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Diseño de veleta activa

2.1.1. Determinación de la fuerza de arrastre

El viento ejerce una fuerza al impactar sobre el área de veleta. Esa fuerza se denomina fuerza de arrastre (F_d) [29] la cual se calcula por Bernoulli representado en la ecuación (2.1).

$$F_d = \frac{1}{2}\rho V^2 AC_d \quad (2.1)$$

donde:

- ρ es la densidad del aire (aproximadamente 1.225 kg/m^3 a nivel del mar).
- V es la velocidad del viento.
- A es el área proyectada de la veleta perpendicular a la dirección del viento.
- C_d es el coeficiente de arrastre, que depende de la forma de la veleta.

2.1.2. Determinación del momento de fuerza actuante

Empleando el concepto de momento [30] en esta aplicación el momento de fuerza (M) actuante en la veleta esta descrito en la Ecuación (2.2).

$$M = F_d L \quad (2.2)$$

donde:

- L Longitud de la veleta.
- F_d Fuerza de arrastre.

2.1.3. Determinación del área de la veleta

El área de la veleta (A_{tail}) se relaciona con el área de barrido (A_{sweep}) del rotor del aerogenerador [31] mediante la Ecuación (2.3).

$$A_{\text{sweep}} = R^2 \pi \quad (2.3)$$

- R Es el radio del rotor

El autor Justin Arcara determina que A_{tail} debe ser al menos el 5% de A_{sweep} para mantener la correcta orientación del rotor frente al viento [31].

2.1.4. Determinación de la longitud del timón

La longitud del timón de la veleta (L) [31] que se observa en la Figura 2.1 se calcula con la Ecuación (2.4).

$$L = 1.2 \times R \quad (2.4)$$

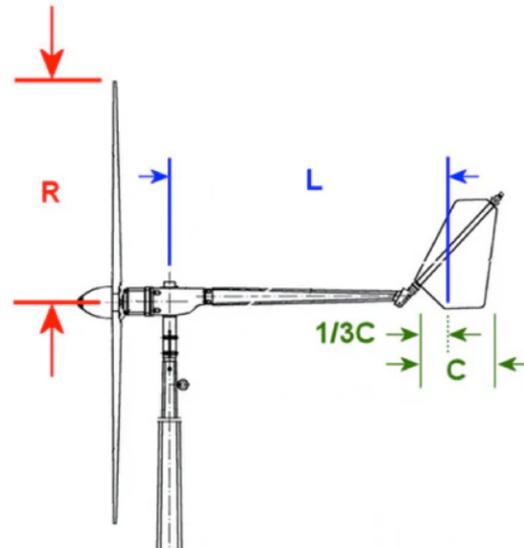


Figura 2.1. Diagrama para el cálculo del mástil [31].

2.2. Parámetros y ecuaciones de diseño de la tarjeta de control

El diseño de la tarjeta de control de la veleta activa debe considerar el tamaño de las pistas, el espaciado para evitar cortocircuitos, planos de tierra y alimentación para estabilidad, optimización de rutas de señal y gestión térmica para prevenir sobrecalentamiento y asegurar su eficiencia.

2.2.1. Parámetros de espaciado y trazado

La norma IEC-61188 [32] establece la relación entre la tensión de operación y el voltaje máximo (V_{max}) (ecuación 2.5) para determinar la distancia mínima entre pistas, vías y otros elementos de cobre en la PCB, para evitar cortocircuitos y asegurar una separación adecuada para voltajes específicos.

$$\text{Espaciado mínimo} = \frac{\text{Tensión de operación}}{V_{\text{máx}}} \quad (2.5)$$

2.2.2. Ancho de Pista

Para determinar el ancho de las pistas en función de la corriente que deben manejar, considerando la temperatura y el material del PCB de acuerdo a la norma IPC-2221 [33], se utiliza la ecuación (2.6).

$$\text{Ancho de Pista (W)} = \frac{I}{k\Delta T^b} \quad (2.6)$$

donde:

- I = Corriente en amperios (A).
- k = Constante de material y condiciones.
- ΔT = Aumento de temperatura permitido ($^{\circ}\text{C}$).
- b = Exponente basado en el tipo de trazado.

2.2.3. Capacidad de carga de vías

La capacidad de corriente de una vía se puede calcular usando la Ecuación (2.7) determinada por la norma IPC-2221 [33].

$$I_{\text{via}} = \frac{k}{h^{\alpha}} \quad (2.7)$$

donde:

- I_{via} = Capacidad de corriente de la vía (A).
- k y α son constantes basadas en el diámetro de la vía y el material.

2.2.4. Parámetros de diseño térmico

Para calcular la disipación térmica, se utiliza la resistencia térmica con la Ecuación (2.8).

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{P} \quad (2.8)$$

donde:

- R_{th} = Resistencia térmica ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).
- ΔT = Diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
- P = Potencia disipada (W).

2.2.5. Parámetros de resistencia y capacitancia parásita

La resistencia de una pista se puede calcular usando la Ecuación (2.9).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.9)$$

donde:

- R = Resistencia (Ω).
- ρ = Resistividad del material conductor (Ωm)
- L = Longitud de la pista (m).
- A = Área de la sección transversal de la pista (m^2).

La capacitancia entre pistas se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.10)$$

donde:

- C = Capacitancia (F).
- ϵ_0 = Permitividad del vacío.
- ϵ_r = Constante dieléctrica del material entre las pistas.
- A = Área superpuesta de las pistas (m^2).
- d = Distancia entre las pistas (m).

2.3. Modelo del Aerogenerador simulado

En la Figura 2.2, se presentan los bloques utilizados por el modelo de Matlab Wind-Turbine reportado por TheMathWorks, Inc [34], que simula un aerogenerador interconectado a la red eléctrica. Este modelo permite modificar los parámetros específicos para cada aerogenerador, facilitando la personalización y análisis de su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

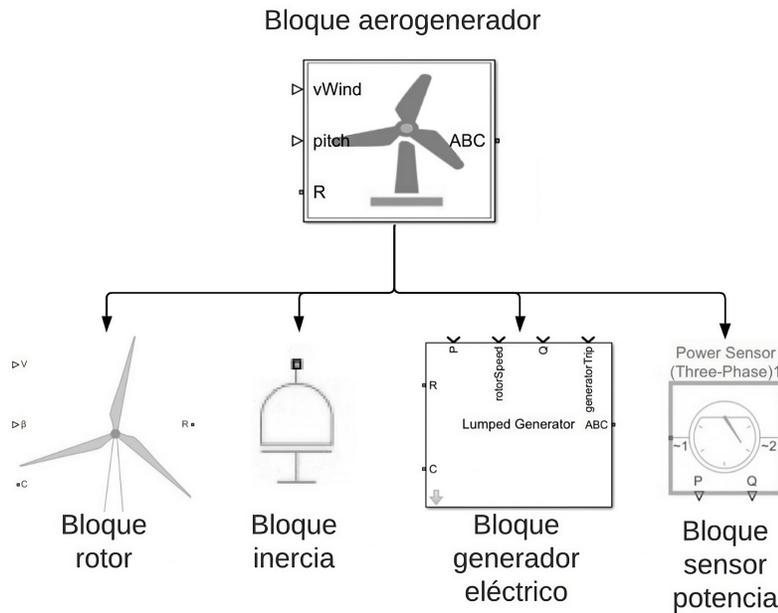


Figura 2.2. Diagrama de bloques empleados para modelar un aerogenerador en Matlab

El bloque del aerogenerador de la Figura 2.2 de simulink representa una turbina que convierte el movimiento del viento en energía rotacional mecánica [35]. Especifica la velocidad del viento incidente y el ángulo colectivo de paso de las palas como entradas, y opcionalmente puedes obtener la fuerza de empuje actuando sobre la turbina. El bloque calcula los coeficientes de potencia y par con las Funciones (2.11) y (2.12).

$$C_P = \text{tablelookup}(\beta_{\text{Ref}}, \lambda_{\text{Ref}}, C_{P,\text{Ref}}, \beta, \lambda_{\text{Smooth}}, \text{interpolación}, \text{extrapolación}) \quad (2.11)$$

$$C_T = \text{tablelookup}(\beta_{\text{Ref}}, \lambda_{\text{Ref}}, C_{T,\text{Ref}}, \beta, \lambda_{\text{Smooth}}, \text{interpolación}, \text{extrapolación}) \quad (2.12)$$

donde:

- β_{Ref} es el ángulo de paso de referencia.
- λ_{Ref} es la relación de velocidad de punta de referencia.
- $C_{P,\text{Ref}}$ y $C_{T,\text{Ref}}$ son los parámetros de las tablas de coeficientes de potencia y coeficientes de empuje, respectivamente.
- λ_{Smooth} es la relación de velocidad de punta suavizada.

El bloque del aerogenerador utiliza la ecuación como base para la relación instantánea de velocidad de punta descrita en la Ecuación (2.13).

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (2.13)$$

donde:

- R es el parámetro del radio de la turbina.
- ω es la velocidad angular diferencial entre el eje y el caso.
- V es la velocidad del aire incidente en el rotor. Este valor es el puerto de entrada de la señal física V .

El bloque utiliza la Ecuación (2.14). para describir la versión suavizada empleando la transformada de Fourier de la ecuación instantánea de relación de velocidad de punta:

$$\lambda_{\text{Smooth}} = \frac{R\omega V}{\sqrt{V^2 + V_{\text{Thr}}^2}} \quad (2.14)$$

donde V_{Thr} es el parámetro del umbral de velocidad. El bloque utiliza las Ecuaciones (2.15 - 2.16) como base para la potencia y el empuje:

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2}C_P\rho AV^3 = \text{Par}\omega \quad (2.15)$$

$$\text{Empuje} = \frac{1}{2}C_T\rho AV^2 \quad (2.16)$$

donde:

- ρ es el parámetro de densidad del aire.
- A es el área del círculo barrido por las palas de la turbina, y $A = \pi r^2$.

Para relacionar los parámetros del bloque con la potencia mecánica nominal del aerogenerador, se determina la potencia del aerogenerador en el coeficiente de potencia máximo y la velocidad del viento nominal. La potencia nominal corresponde a los parámetros del bloque utilizando la ecuación (2.17).

$$\text{Potencia nominal} = 0.5C_{P,\max}\rho AV_{\text{rated}}^3 \quad (2.17)$$

donde:

- $C_{P,\max}$ es el coeficiente de potencia máximo. Este es el valor máximo en la tabla de coeficientes de potencia, $C_p(\beta, TSR)$ parámetro.
- V_{rated} es la velocidad del viento nominal.
- A es el área barrida por el rotor, donde $A = \pi r^2$.

El bloque utiliza las Ecuaciones (2.18 - 2.20), que han sido suavizadas empleando la transformada de Fourier para evitar transiciones bruscas, a fin de calcular de manera más estable el empuje, la potencia y el par.

$$\text{Potencia suavizada} = C_P\rho A\sqrt{V^2 + V_{\text{thr}}^2}^{3/2}/2 \quad (2.18)$$

$$\text{Par suavizado} = \text{Potencia suavizada}\sqrt{\omega^2 + (V_{\text{Thr}}/R)^2} \quad (2.19)$$

$$\text{Empuje suavizado} = \frac{1}{2}C_T\rho AV\sqrt{V^2 + V_{\text{Thr}}^2} \quad (2.20)$$

Cuando $R\omega < V_{\text{Thr}}$, el bloque satura suavemente la potencia a un umbral cercano a cero proporcional a V_{Thr}^3 .

2.3.1. Momento de inercia

El bloque Inercia de la Figura 2.2 representa una inercia rotacional mecánica ideal [36] que se describe con la ecuación (2.21).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.21)$$

donde:

- T es el par de inercia.
- J es la inercia.
- ω es la velocidad angular.
- t es el tiempo.

2.3.2. Simulación del rotor del aerogenerador

El rotor de un aerogenerador de eje horizontal se modela utilizando el bloque de la Figura 2.2 de Simscape . En este bloque, la potencia mecánica extraída del viento, P , se calcula como se describe en la ecuación (2.22) [37]:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_r v_{\text{Wind}}^3 c_p(\text{pitch}, \lambda) \quad (2.22)$$

donde:

- ρ es la densidad del aire.
- A_r es el área barrida por las palas del rotor.
- v_{Wind} es la velocidad del viento.
- c_p es el coeficiente de potencia en función de λ y el ángulo de paso (*pitch*).

- λ es la relación entre la velocidad de la punta de la pala del rotor y la velocidad del viento, también llamada Relación de Velocidad de Punta (TSR).
- *pitch* es el ángulo de paso de la pala del rotor.

2.3.3. Modelo del generador eléctrico

Este subsistema ilustra la modelización del generador ubicado en la góndola, representado de manera simplificada en la Figura 2.2.

El sistema de generador eléctrico doblemente alimentado (DFIG) de lazo cerrado es más rápido que los sistemas de control de un aerogenerador, como el control de paso. Por lo tanto, un sistema de generador DFIG agrupado de baja fidelidad es práctico para mejorar la velocidad de la simulación y proporcionar flexibilidad. El bloque de generador simplificado se integra con el sistema de un aerogenerador para simular diferentes aspectos del algoritmo de control [37].

El bloque de generador agrupado rastrea el voltaje de la red y el ángulo de fase en el punto de acoplamiento común (PCC) utilizando lazos de bloqueo de fase (PLL). Para mejorar la velocidad de simulación, el PLL de actuación rápida se modela utilizando la detección de cruce por cero del voltaje de la red. El generador agrupado utiliza el voltaje y la fase de la red obtenidos del PLL e implementa la ecuación de flujo de potencia con la inductancia de fuga y la resistencia agrupadas del generador. El modelo de generador agrupado toma la potencia real (P), la potencia reactiva (Q) y la velocidad de referencia del eje del generador como entrada con base a las Ecuaciones (2.23 - 2.29).

En el sistema de un aerogenerador, el bloque de generador agrupado obtiene la referencia de potencia y la entrada de referencia de velocidad aproximada del sistema de control de potencia del aerogenerador. Basado en la entrada de referencia, el generador aplica el par de carga al eje del aerogenerador y suministra la potencia eléctrica

a la red.

$$3V_g I_g^* = P + jQ \quad (2.23)$$

$$I_{gm}^* = \frac{2(P + jQ)}{3V_{gm}} \quad (2.24)$$

$$V_g = V_{gm} \angle 0^\circ \quad (2.25)$$

$$V_{ig} = V_{gm} + jX_L I_{gm} + R I_{gm} = V_{igm} \angle \phi \quad (2.26)$$

$$V_{iga}(t) = V_{igm} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.27)$$

$$V_{igb}(t) = V_{igm} \sin(\omega t + \phi - 120^\circ) \quad (2.28)$$

$$V_{igc}(t) = V_{igm} \sin(\omega t + \phi - 240^\circ) \quad (2.29)$$

donde:

- V_g es el voltaje de fase RMS de la red en el PCC.
- I_g es la corriente de fase RMS de la red en el PCC.
- V_{gm} es el voltaje de fase pico de la red en el PCC.
- I_{gm} es la corriente de fase pico de la red en el PCC.
- V_{igm} es el voltaje de fase pico inducido del generador eléctrico.
- V_{ig} es el voltaje de fase inducido del generador eléctrico.
- X_L es la reactancia de fuga agrupada del generador de inducción (respecto al estator).

- R es la resistencia agrupada del generador de inducción (respecto al estator).
- ωt es el ángulo de voltaje instantáneo de la red.

Aquí, V_{gm} y ωt se obtienen del PLL.

2.3.4. Sensor de potencia trifásico

El bloque Sensor de Potencia (Trifásico) de la Figura 2.2 implementa un sensor ideal para la medición de potencia activa y reactiva en fases trifásicas balanceadas o desbalanceadas, el cual asegura una evaluación completa del rendimiento del sistema, facilita el equilibrio de carga, optimiza la generación de energía y permite un monitoreo y diagnóstico efectivos. [38].

Ecuaciones para fases desbalanceadas

Para fases desbalanceadas, la tensión de fase equivalente balanceada, la corriente y la potencia aparente se calculan con Ecuaciones (2.30),(2.31) y (2.32).

$$V_e = \frac{1}{3} \sqrt{V_{ab,RMS}^2 + V_{bc,RMS}^2 + V_{ca,RMS}^2} \quad (2.30)$$

$$I_e = \sqrt{I_{a,RMS}^2 + I_{b,RMS}^2 + I_{c,RMS}^2 + \frac{\rho I_{n,RMS}^2}{3}} \quad (2.31)$$

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.32)$$

Potencia activa

En un aerogenerador, la potencia activa es la energía eléctrica real que se convierte a partir de la energía cinética del viento y que se suministra a la red eléctrica o a cargas específicas; esta potencia es crucial para medir el rendimiento y la eficiencia del aerogenerador.

La potencia activa P se define Ecuación (2.33).

$$P = V_{a_{\text{RMS}}} I_{a_{\text{RMS}}} \cos(\phi_{V_a} - \phi_{I_a}) + V_{b_{\text{RMS}}} I_{b_{\text{RMS}}} \cos(\phi_{V_b} - \phi_{I_b}) + V_{c_{\text{RMS}}} I_{c_{\text{RMS}}} \cos(\phi_{V_c} - \phi_{I_c}) \quad (2.33)$$

donde:

- $V_{a_{\text{RMS}}}, V_{b_{\text{RMS}}}, V_{c_{\text{RMS}}}$ son las tensiones de las fases a, b y c respectivamente.
- $\phi_{V_a}, \phi_{V_b}, \phi_{V_c}$ son los desfases de las tensiones de las fases a, b y c respectivamente.
- $I_{a_{\text{RMS}}}, I_{b_{\text{RMS}}}, I_{c_{\text{RMS}}}$ son las corrientes RMS de las fases a, b y c.
- $\phi_{I_a}, \phi_{I_b}, \phi_{I_c}$ son los desfases de las corrientes de las fases a, b y c respectivamente.

Potencia reactiva

Por otro lado, la potencia reactiva es necesaria para mantener el campo magnético en los generadores y transformadores, es esencial para la estabilidad del voltaje en la red eléctrica y el correcto funcionamiento de equipos inductivos.

Para calcular la potencia reactiva Q , el bloque primero calcula su valor absoluto y luego determina el signo observando el signo del desfase determinado por la Ecuación (2.34).

$$\begin{aligned} |Q| &= \sqrt{S_e^2 - P^2} \\ \text{signo}(Q) &= \text{signo}(\phi) \\ Q &= |Q| \cdot \text{signo}(Q) \end{aligned} \quad (2.34)$$

donde $\phi = \phi_V - \phi_I$. El símbolo ϕ denota la fase central en el rango $[-\pi, \pi]$.

La potencia eléctrica total en un sistema se compone de la combinación de potencia activa y reactiva, y una gestión adecuada de ambas es vital para el funcionamiento eficiente y estable del aerogenerador y su integración a la red eléctrica.

2.4. Teorema del muestreo

El teorema del muestreo, también conocido como teorema de Shannon-Nyquist, establece las limitaciones de la frecuencia de muestreo que permiten asegurar que es posible reconstruir una señal previamente muestreada. Este teorema se aplica a señales continuas de banda limitada, que son aquellas señales cuya energía se encuentra dentro de un rango finito de frecuencias. Esto incluye tanto señales de control como otras variables analógicas.

El teorema se puede enunciar de la siguiente forma: “Al muestrear una señal, la frecuencia de muestreo (f_s) debe ser más de dos veces superior a la frecuencia de la onda muestreada (f_c) o a la máxima frecuencia del espectro de frecuencias en las que se descompone”. Esta frecuencia por lo general se conoce como la frecuencia Nyquist, f_N , representada en la Ecuación (2.35).

$$f_s > 2f_N \quad (2.35)$$

2.5. Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace (dominio de la frecuencia) de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son iguales a cero [6].

Para los sistemas de primer orden, la relación entrada-salida se obtiene mediante la Ecuación (2.36):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2.36)$$

donde:

- $C(s)$ es la salida del sistema.
- $R(s)$ es la entrada del sistema.

- T es la constante del tiempo del sistema.
- s es la variable en el dominio de Laplace.

Para los sistemas de segundo orden, la relación entrada-salida se obtiene mediante la Ecuación (2.37):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} \quad (2.37)$$

donde:

- $C(s)$ es la salida del sistema.
- $R(s)$ es la entrada del sistema.
- b_0 es el coeficiente de la función de transferencia.
- a_1 es el coeficiente asociado al término lineal en s .
- a_0 es el coeficiente constante.
- s es la variable en el dominio de Laplace.

Para los sistemas de tercer orden o de orden superior, la relación entrada-salida se obtiene mediante la Ecuación (2.38):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.38)$$

donde:

- $C(s)$ es la salida del sistema.
- $R(s)$ es la entrada del sistema.
- $G(s)$ es la función de transferencia directa del sistema.
- $H(s)$ es la función de transferencia de retroalimentación del sistema.
- s es la variable en el dominio de Laplace.

Donde $G(s)$ representa la función de transferencia del sistema y $H(s)$ la función de transferencia del lazo de realimentación, si existe. Estas expresiones son fundamentales para el análisis y diseño de sistemas de control, permitiendo determinar cómo una entrada dada se transforma en una salida deseada bajo ciertas condiciones.

2.5.1. Obtención de la función de transferencia experimental

Antes de diseñar un controlador para un sistema físico real, es necesario conocer su función de transferencia, lo cual puede lograrse mediante el proceso de identificación. La identificación paramétrica del sistema consiste en estructurar un modelo matemático en el dominio de la frecuencia para el sistema y determinar la interrelación entre sus variables y parámetros mediante datos experimentales. La identificación en tiempo es un método común que implica aplicar una función escalón en la entrada del sistema y observar su respuesta en una gráfica. Este método es adecuado para sistemas de primer y segundo orden, que son relativamente lentos y no presentan sobreoscilación, como se muestra en la Figura 2.3.

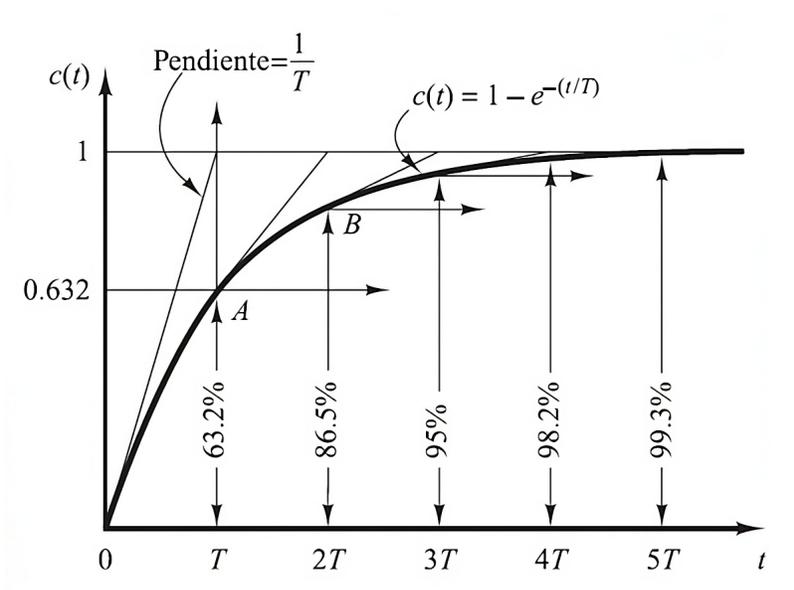


Figura 2.3. Gráfica de respuesta al sistema de primer orden [39].

El valor de la constante de tiempo se obtiene a partir de la gráfica, observando el tiempo correspondiente a un valor del 63% de $U(t)$. Normalmente, se trabaja con un

factor denominado tiempo de establecimiento, que suele estar comprendido entre un 95-98 %. Este factor determina el tiempo en el cual la respuesta se estabiliza dentro de los límites indicados por ese porcentaje. La respuesta típica de este tipo de sistemas presenta la misma configuración que un sistema de primer orden puro, descrito por la Ecuación (2.39), en la cual la respuesta presenta un desfase o retardo respecto a la señal de entrada [40].

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (2.39)$$

donde:

- $H(s)$ es la función de transferencia de retroalimentación.
- K es la ganancia de sistema.
- T es la constante de tiempo del sistema.
- s es la variable en el dominio de Laplace.

2.6. Control clásico

2.6.1. Control P

El ajuste de la ganancia o el control proporcional permite la selección de las ubicaciones de los polos de lazo cerrado a partir de los polos dados por el gráfico de locus raíz del lazo del sistema. Para sistemas de orden inferior, es posible diseñar sistemas de control proporcional de forma analítica, pero un esquema del lugar de la raíz sigue siendo útil en el proceso de diseño [41].

La acción proporcional se caracteriza por un parámetro, la ganancia proporcional (K_p), que es la constante por la que se multiplica la señal de error ($e(t)$) para obtener la acción proporcional (u_p), como se observa en la Ecuación (2.40) [6]:

$$u_p = K_p e(t) \quad (2.40)$$

O bien por cantidades transformadas por el método de Laplace, que realaciona la entrada ($R(s)$) y la salida ($C(s)$) del sistema en el dominio de Laplace (s) como en la Ecuación (2.41):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = K_p \quad (2.41)$$

En general, si la ganancia proporcional es pequeña, las acciones sobre la planta serán suaves y la respuesta será lenta y sin oscilaciones. Si la ganancia proporcional es demasiado grande, las acciones serán fuertes y la respuesta será rápida, pero con inestabilidad [39].

Control PI

El aumento del número de tipo del sistema mejora drásticamente su respuesta en estado estacionario. Si se añade un controlador integral al sistema, su número de tipo aumenta en uno, pero su respuesta transitoria se deteriora o el sistema se vuelve inestable. Si se añade un término de control proporcional al control integral, el controlador tiene un polo y un cero. La función de transferencia del Controlador Proporcional – Integral (PI) se muestra en la Ecuación (2.42):

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \frac{s + a}{s} \quad (2.42)$$

$$a = \frac{K_i}{K_p} \quad (2.43)$$

donde:

- $C(s)$ representa la función de transferencia del controlador PI.
- k_i es la ganancia integral del controlador.
- a es un parámetro auxiliar que relacionada la relación entre K_i y k_p .

Un término integral en la ruta de retroalimentación es equivalente a un diferenciador en la ruta de avance y, por lo tanto, es indeseable. Si se utiliza un controlador PI, se

asume implícitamente que el control proporcional cumple con la respuesta transitoria pero no con las especificaciones de error en estado estacionario [41].

2.6.2. Control PD

Añadir un cero a la ganancia del bucle mejora la respuesta temporal del sistema. La adición de un cero se realiza mediante un controlador en cascada o de retroalimentación, como se observa en la Ecuación (2.44):

$$C(s) = K_p + K_d s = K_d(s + a) \quad (2.44)$$

donde:

- k_d es la ganancia derivativa del controlador

Esto se conoce como controlador Proporcional - Derivativo, o PD. El término derivativo solo es realizable de forma aproximada y, además, no es deseable porque al diferenciar una entrada ruidosa se producen grandes errores. El diseño de los controladores PD depende de las especificaciones dadas para el sistema de lazo cerrado y de si se utiliza un controlador de retroalimentación o en cascada [41].

2.6.3. Control PID

Con un Controlador Proporcional – Integral – Derivado (PID), se añaden dos ceros y un polo en el origen. Esto aumenta el número de tipo y permite una remodelación satisfactoria del lugar de la raíz. El regulador PID reúne las tres acciones básicas de control, las cuales se describieron anteriormente. Su relación entrada/salida se obtiene por superposición (suma) de estas tres acciones, como se muestra en la Ecuación (2.45):

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) = K_p e(t) + K_i \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.45)$$

donde:

- $u(t)$: La **salida del controlador PID** en el dominio del tiempo, que es la señal de control que se aplica al sistema.
- $u_P(t)$: La **contribución proporcional** al control, representada por $K_p e(t)$.
- $u_I(t)$: La **contribución integral** al control, dada por $K_I \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau$.
- $u_D(t)$: La **contribución derivativa** al control, expresada como $K_D \frac{de(t)}{dt}$.
- τ : Variable de integración utilizada en la integral del error acumulado.

Por aplicación de la transformada de Laplace se puede obtener la función de transferencia del regulador PID que relaciona la transformada de Laplace de la señal de error con la transformada de Laplace de la acción de control, como se muestra en la Ecuación (2.46):

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (2.46)$$

donde:

- $G_{PID}(s)$: La función de transferencia del controlador PID en el dominio de Laplace, que describe la relación entre la señal de control $U(s)$ y el error $E(s)$.
- $U(s)$: La transformada de Laplace de la salida del controlador PID.
- $E(s)$: La transformada de Laplace del error en el sistema.

2.7. Ajuste del control PID

2.7.1. Método Ziegler-Nichols

El método de Ziegler – Nichols en bucle cerrado se emplea para procesos que se vuelven inestables a partir de una cierta ganancia crítica K_C del regulador proporcional. Tiene el inconveniente adicional de que hay que llevar al proceso a su límite de estabilidad, lo que no siempre es seguro ni conveniente.

Este método sitúa el proceso de un servosistema con control proporcional (es decir, anula las acciones derivada e integral). Se aumenta la ganancia proporcional hasta que la salida de la planta evolucione con la forma de una senoidal mantenida (comportamiento marginalmente estable). En la Figura 2.4 se muestra una oscilación sostenida donde el tiempo de pico a pico es el tiempo crítico (T_C) [42]. Para obtener el valor de las ganancias del controlador, se deben sustituir estos parámetros en la Tabla 2.1.

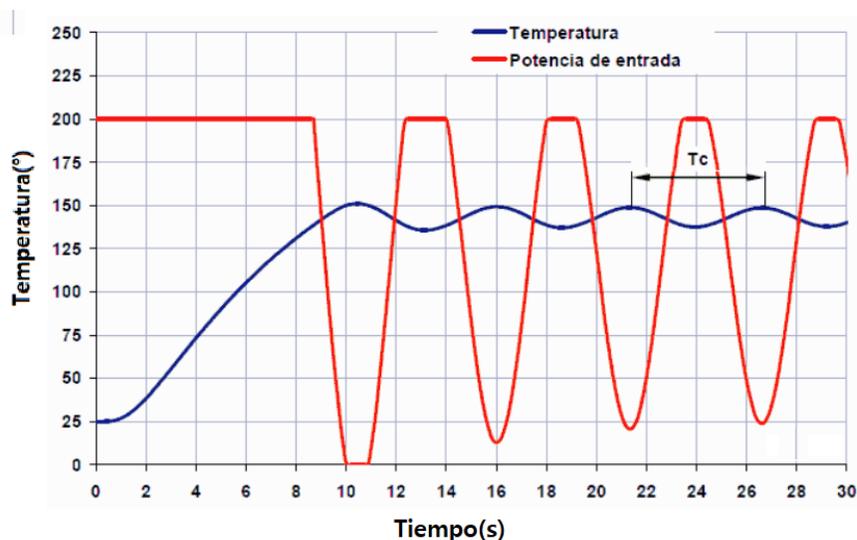


Figura 2.4. Gráfica de obtención de Ganancia crítica y Tiempo Crítico [42].

Tabla 2.1. Parámetros de Ziegler-Nichols para controladores P, PI y PID.

Controlador	K_P	K_I	K_D
P	$0.5K_C$	-	-
PI	$0.45K_C$	$T_C/1.2$	-
PID	$0.59K_C$	$T_C/2$	$T_C/8$

2.7.2. Método Tyreus-Luyben

El método de sintonización Tyreus-Luyben es una técnica popular de sintonización de controladores PID que se ha demostrado eficaz en la práctica. Fue desarrollado en 1992 por Tyreus y Luyben como una forma de mejorar la sintonización de controladores PID para sistemas con respuesta lenta.

Este método se diseñó específicamente para aplicaciones de procesos y es menos agresivo que el método de Ziegler-Nichols, ya que reduce los picos. Esto se logra con menores valores para la ganancia proporcional y mayores valores para los integrales. El método se basa en la observación de que la ganancia proporcional y la ganancia integral están fuertemente acopladas y, por lo tanto, deben ajustarse juntas para optimizar el rendimiento del sistema de control [43]. Para obtener el valor de las ganancias del controlador, se deben sustituir los parámetros de ganancia crítica y tiempo crítico en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros de Tyreus-Luyben para controladores PI y PID.

Controlador	K_P	K_I	K_D
PI	$K_C/3.2$	$2.2T_C$	-
PID	$K_C/2.2$	$2.2T_C$	$T_C/6.3$

2.7.3. Método Experimental

El ajuste de control PID experimental (Manual) es una técnica que se basa en la experiencia del operador para ajustar los parámetros del control PID. Este método consiste en modificar manualmente los parámetros del control PID mientras se observa el comportamiento del proceso, con el fin de lograr una respuesta satisfactoria. Aunque este método puede ser menos preciso que los métodos teóricos, tiene la ventaja de ser más simple y fácil de implementar en la práctica debido a que se puede realizar un ajuste en dependencia del criterio observado por el usuario[44].

Para implementar el ajuste de control PID experimental (Manual), es importante tener en cuenta algunas consideraciones prácticas, como la selección del tipo de controlador PID (directo o inverso), la elección de los valores iniciales de los parámetros, la observación del comportamiento del proceso y la modificación gradual de los parámetros para evitar oscilaciones o saturación de la señal de control [45].

2.8. Respuesta transitoria

La respuesta transitoria de un sistema para una entrada escalón unitario depende de las condiciones iniciales. La respuesta transitoria de un sistema de control práctico muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario [46], como se observa en la Figura 2.5 . El valor de tolerancia permitida en la respuesta transitoria de un sistema de control se debe a la necesidad de equilibrar entre el tiempo que el sistema tarda en alcanzar un estado estable y la magnitud de las oscilaciones o el sobrepaso que puede ocurrir antes de estabilizarse.

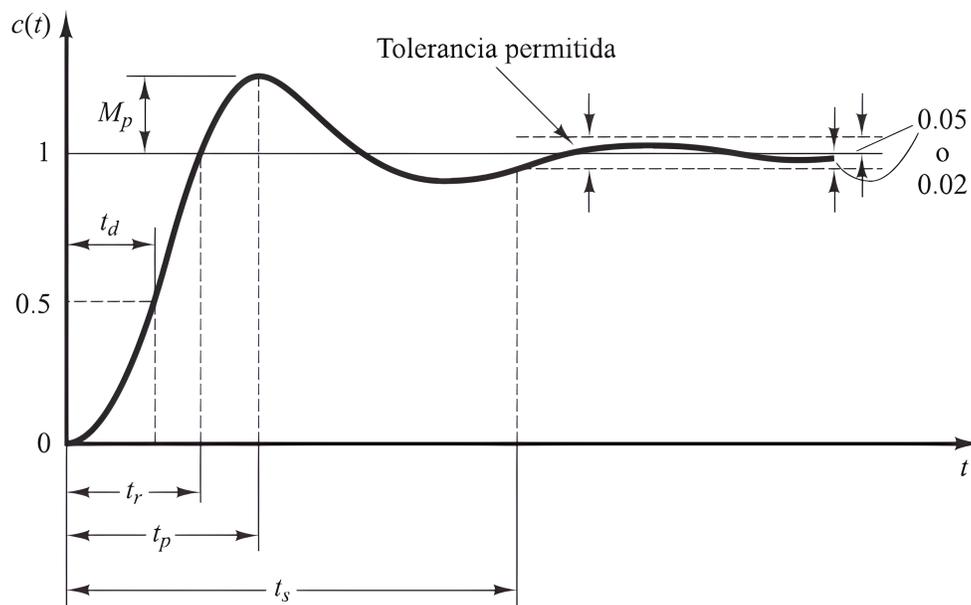


Figura 2.5. Gráfica de comportamiento del controlador PID en el tiempo [39].

Donde:

- t_d = Tiempo de retardo.
- t_p = Tiempo pico.
- t_s = Tiempo de asentamiento.
- t_r = Tiempo de subida.
- M_p = Sobreoscilación

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología general del proyecto

En la Figura 3.1 se representa un esquema de la metodología implementada en este trabajo, es una propuesta innovadora, ya que no existe una metodología encontrada previamente para sistemas de orientación y control en aerogeneradores de baja potencia. Esta estrategia general se desarrolla para cumplir los tres objetivos del proyecto. Primero, en el objetivo de diseño y construcción, se lleva a cabo el diseño en el software Solidworks y la construcción del mecanismo de veleta y del sistema de control, garantizando su funcionamiento mediante pruebas y ajustes. Luego, en el objetivo de simulación en el software Matlab, se implementa el sistema de lazo cerrado del control junto con el aerogenerador, aplicando diferentes técnicas y métodos de control para obtener las curvas de respuesta y analizar la estabilidad del sistema. Finalmente, en el objetivo de evaluación en laboratorio, se valida la simulación mediante pruebas en condiciones de laboratorio utilizando un banco de pruebas, obteniendo así las curvas de respuesta y comparación de los criterios de control.

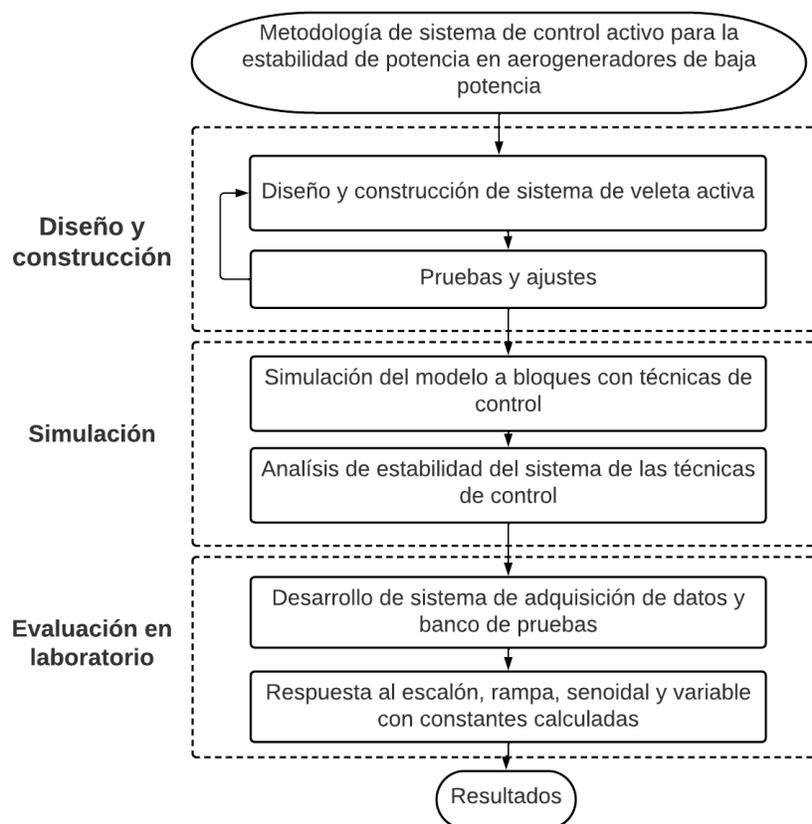


Figura 3.1. Metodología general del proyecto.

3.2. Metodología de diseño y construcción del sistema de veleta activa

La metodología para diseñar y construir un sistema de control activo con sistema de lazo cerrado, representada en la Figura 3.2, primero, se requiere obtener el modelo matemático de potencia del aerogenerador. Esto se logra utilizando la Ecuación (2.22), incorporando la velocidad del viento efectiva de la Ecuación (1.5) y el área efectiva de la Ecuación (1.3).

Posteriormente, se realiza el diseño mecánico de la veleta activa en el software Solidworks, utilizando la Ecuación (2.1), que permite conocer la fuerza con la que impactará el viento sobre la veleta, la Ecuación (2.2), que permite conocer el momento de giro de la masa del aerogenerador al ser movido por la fuerza aplicada en la veleta, la

Ecuación (2.3) y la Ecuación (2.4) que relaciona el largo de la veleta a partir de las dimensiones del aerogenerador a implementar para tener las dimensiones de la veleta. Para el diseño de la tarjeta de control, considerando las dimensiones del aerogenerador, se diseña en un software para diseño de PCB, teniendo en cuenta las Ecuaciones (2.5 - 2-10) basadas en la norma IPC 2221 [33]. Utilizando estos parámetros de diseño, se construye la veleta activa, considerando la norma UNE EN 287-2004 [47] para la técnica de soldadura y métodos de seguridad implementados, así como las normas IPC 600 [48], JSTD 001 [49] y IPC 7711/21 [50], que consideran la fabricación para asegurar la calidad y fiabilidad en la fabricación de tarjetas electrónicas.

Una vez obtenidos los prototipos, se realiza la calibración de los sensores, manteniendo un margen de error del 1%. Si las pruebas básicas de control no arrojan los valores esperados en la curva de potencia, es necesario un rediseño.

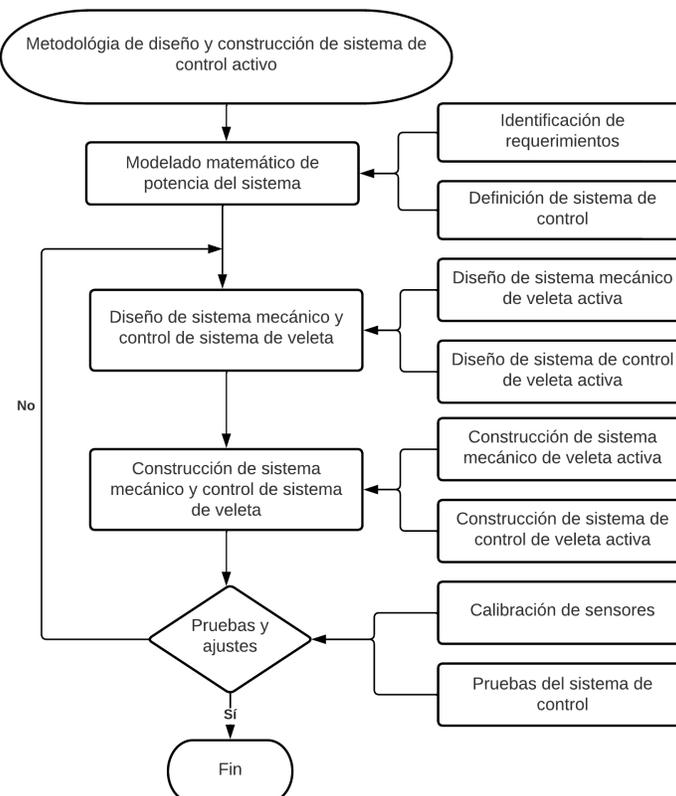


Figura 3.2. Metodología de diseño y construcción de sistema de control activo.

3.3. Metodología de simulación de algoritmos con técnicas de control

Para la metodología de simulación de algoritmos de la Figura 3.3, es necesario comenzar con la obtención del modelo del aerogenerador en los modelos a bloques de Matlab [51]. En dicho modelo se utilizan las Ecuaciones (2.11- 2.34), a continuación se obtiene la función de transferencia del movimiento de veleta a partir de datos experimentales y la implementación de las Ecuaciones (2.36 - 2.39) para poder representarlo todo en un sistema de lazo cerrado.

Para el diseño de control PID, se utilizarán tres técnicas de sintonización: Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben y ajuste manual, en donde se obtendrán las constantes de las ganancias a partir de las ecuaciones de la Tabla 2.1 y 2.2 respectivamente. Para finalizar, se realiza la simulación en Simulink-Matlab con las técnicas de control P, PI y PID para cada método mencionado. Para validar el comportamiento del sistema, es necesario obtener las curvas de respuesta.

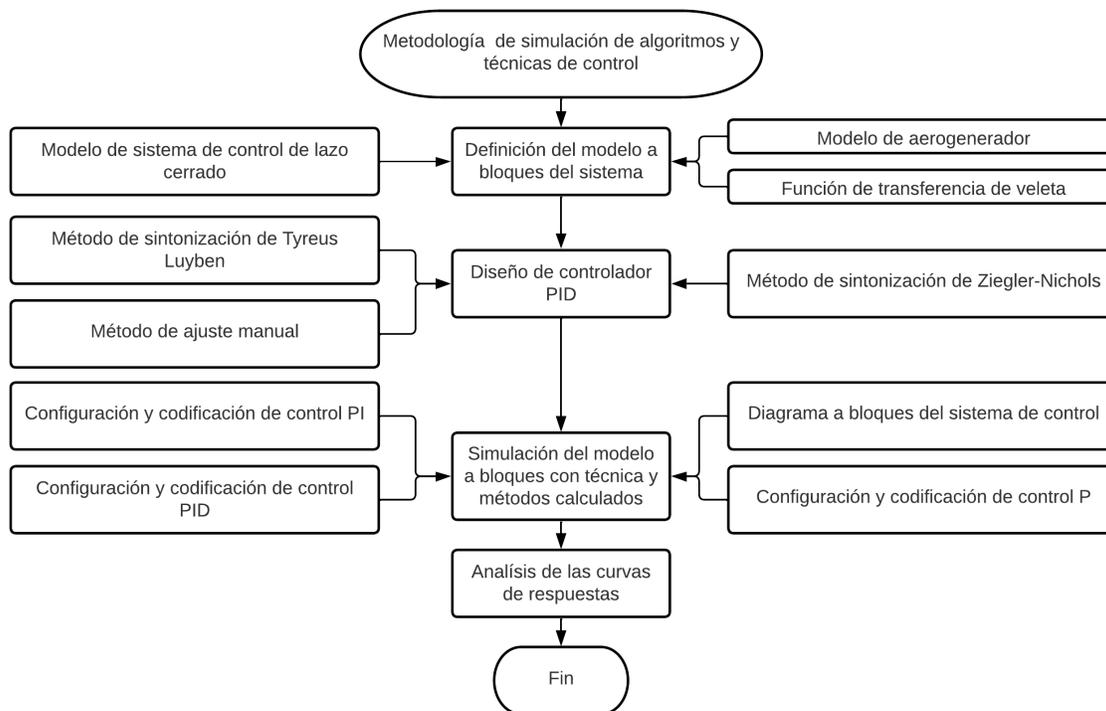


Figura 3.3. Metodología de simulación de algoritmos y técnicas de control.

3.4. Metodología de evaluación de algoritmos en condiciones de laboratorio

Para las pruebas de laboratorio, se presenta la metodología de la Figura 3.4, la cual consiste en realizar un sistema SCADA para el monitoreo de las variables, acoplado a un banco de pruebas con un motor y un variador de frecuencia para simular el comportamiento del sistema. Al motor se le aplican señales de entrada escalón, rampa y variables utilizando las diferentes técnicas de control P, PI y PID, empleando los mejores métodos obtenidos en la simulación, para observar y analizar el sistema de veleta en distintas condiciones y ajustar los parámetros de control en un entorno controlado.

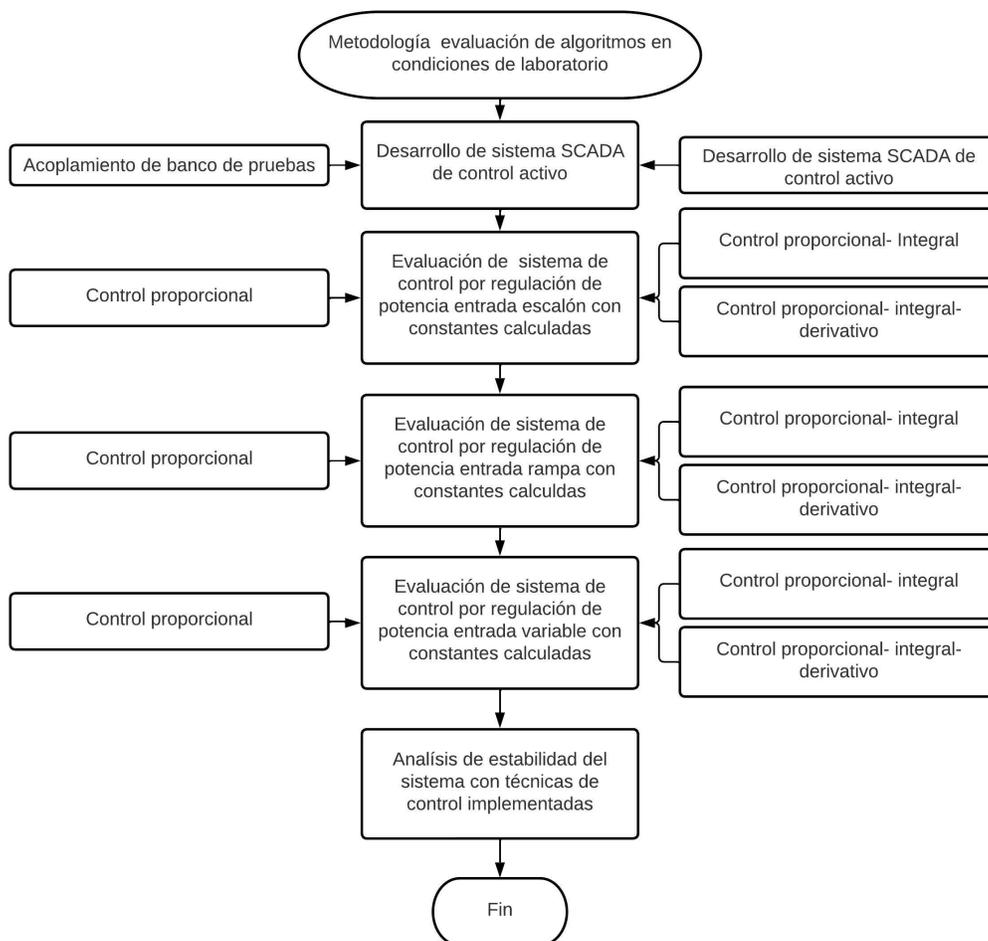


Figura 3.4. Metodología de evaluación de algoritmos en condiciones de laboratorio.

3.4.1. Pruebas de laboratorio

En la Figura 3.5 se ilustra el diagrama PFD en donde se observa en donde se encuentran ubicados los sensores y los tipos de sensores de acuerdo a la norma ANSI/ISA-S5.1 [52] del sistema de pruebas en laboratorio para la evaluación del sistema de veleta activa.

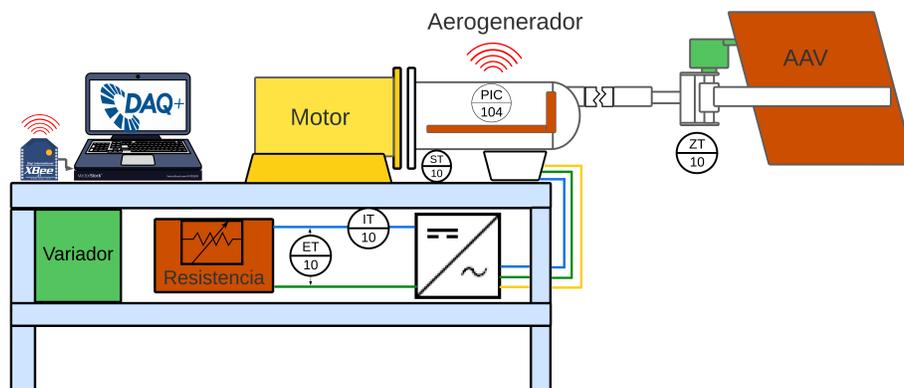


Figura 3.5. Diagrama PFD de pruebas en laboratorio.

3.5. Método de control de potencia del aerogenerador

Se presenta un diagrama de flujo del algoritmo de control del sistema de veleta activa en la Figura 3.6. Este algoritmo evalúa la velocidad del viento; cuando la velocidad del viento excede V_{frenado} , el control posiciona la veleta activa perpendicular al flujo, lo que reduce la carga del viento al mover el aerogenerador debido al fenómeno de la veleta. Cuando V es menor que V_{nominal} , el controlador posiciona la veleta activa paralelo al flujo del viento. De lo contrario, cuando V es mayor que V_{nominal} , el sistema de veleta activa controla la posición de θ utilizando el valor de la potencia de entrada, lo que permite corregir la posición de la veleta activa. Cuando el error es igual a 0, el sistema se detiene y reinicia el ciclo; si el error es mayor que 0, gira en el sentido de las agujas del reloj y estima la velocidad del actuador con un controlador PID. Si

el error es menor que 0, la dirección de rotación de la veleta activa cambia al sentido contrario a las agujas del reloj y se mantiene en un rango entre 0 y 72° , que está mecánicamente restringido, como se muestra en la Figura 3.6.

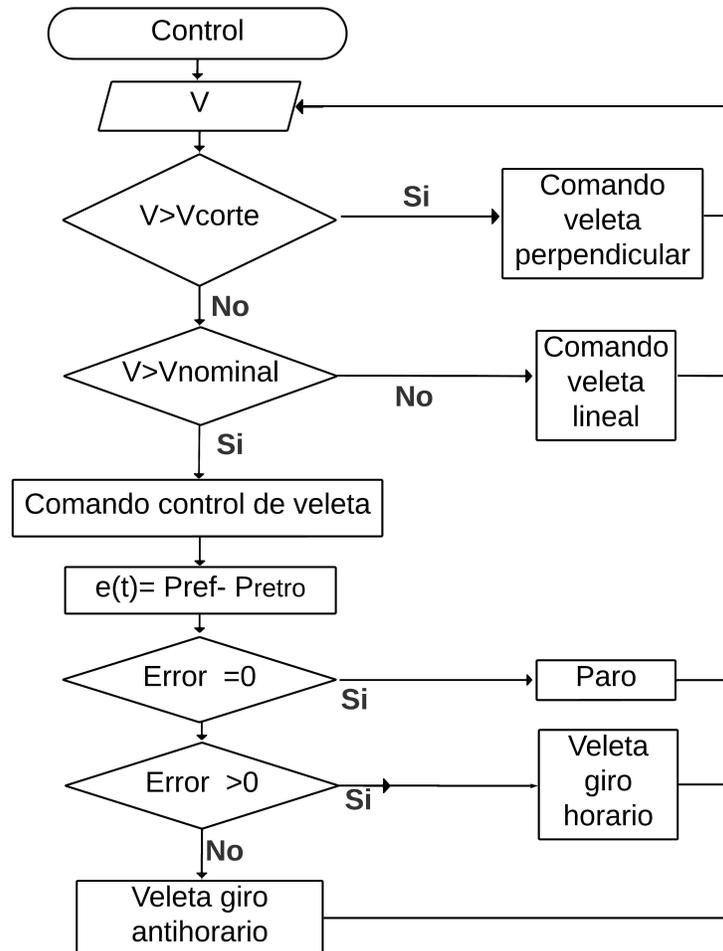


Figura 3.6. Diagrama de control del aerogenerador.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Diseño y construcción de sistema de control activo

Obtener el diseño y el modelado matemático de la potencia de un sistema de veleta activa para HAWT tomando en cuenta el sistema de veleta activa, permite conocer la relación entre la velocidad del viento, ángulo y la potencia generada.

4.1.1. Condiciones iniciales

Se utilizó un HAWT de baja potencia con las características presentadas en la Tabla 4.1. El aerogenerador fue diseñado para mantenerse paralelo a la dirección del viento en las Regiones I y II para mantener una potencia constante a velocidades de viento más altas (Región III) de la curva de potencia de la Figura 1.2 mediante la regulación del ángulo de la veleta activa, y para ejecutar un frenado suave y seguro en una emergencia (Región IV) colocando la veleta activa perpendicular a la dirección del viento.

Tabla 4.1. Parámetros para el aerogenerador RTO ENERGY 1000 W [53].

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Potencia eléctrica nominal	P_{nominal}	1000	W
Potencia de referencia	P_{ref}	1000	W
Velocidad de arranque	V_{frenado}	13	m/s
Velocidad de operación nominal	V_{nominal}	11	m/s
Velocidad de inicio	V_{inicial}	3	m/s
Límites mecánicos	θ	0–72	°
Diámetro del rotor	D_R	2	m
Inercia de la pala del rotor	R_i	0.8141	kg·m ²
Revolución nominal	R_{nominal}	950	rpm
Resistencia total del generador eléctrico	G_R	0.616	Ohm
Inductancia de fuga total del generador eléctrico	G_I	0.000277832	H
Eficiencia del generador eléctrico		90	

4.1.2. Modelado matemático de potencia del sistema de la veleta activa

La Figura 4.1 ilustra el esquema mecánico del aerogenerador con la veleta activa. Este mecanismo es operado por un actuador, que controla el ángulo de guiñada (YAW) y el ángulo de la veleta activa (θ), siendo este último el formado entre el plano perpendicular al rotor eólico y la dirección del viento.

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \cos^4(\theta) \quad (4.1)$$

El ángulo (θ) influye tanto en la descomposición del vector velocidad del viento como en la reducción del área, afectando así la eficiencia de captura de energía del aero-

generador. Teniendo esto en cuenta, la potencia del aerogenerador se puede expresar mediante la Ecuación (4.1), donde el factor de guiñada (YAW) está dado por $(\cos^4 \theta)$.

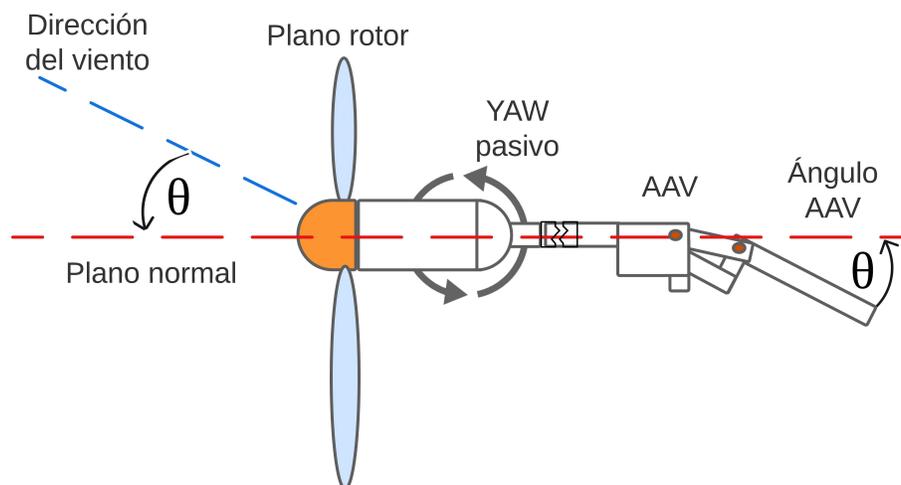


Figura 4.1. Sistema de aerogenerador con veleta activa.

4.1.3. Diseño del sistema mecánico y control de la veleta activa

A partir del modelo propuesto en la Figura 4.1, se estimó el modelo matemático de la curva de potencia. Teniendo en cuenta la variación en el ángulo de guiñada (YAW), se llevó a cabo el diseño mecánico del sistema de veleta activa representado en la Figura 4.2, el cual se construyó con los parámetros mecánicos y eléctricos del actuador de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros para la veleta activa en un aerogenerador RTO ENERGY.

Parámetro	Valor	Unidad
Área de la veleta activa	0.13	m ²
Longitud del mástil a	1146.07	mm
Longitud del mástil b	460.37	mm
Radio de la pala	951.76	mm
Par del actuador	100	N
Velocidad del actuador	90	mm/s

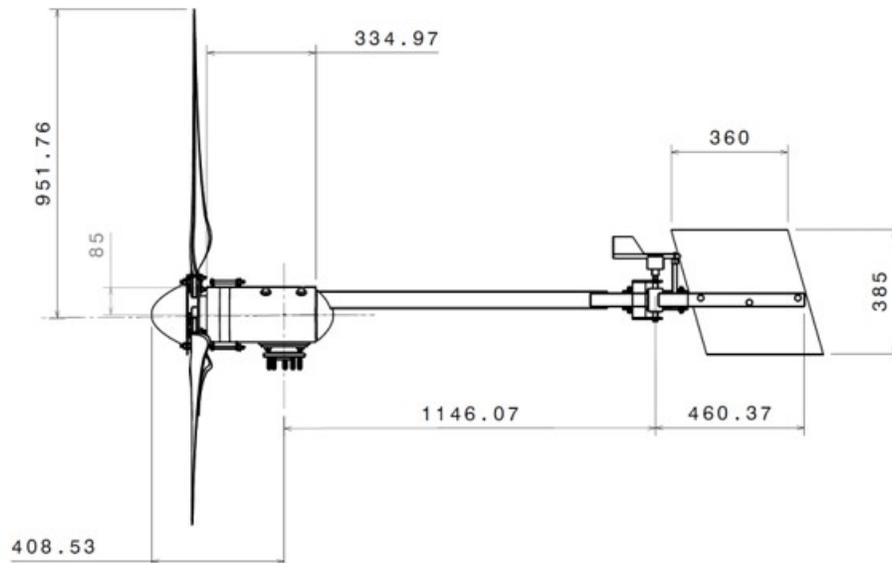


Figura 4.2. Diseño del sistema mecánico de la veleta activa.

Posteriormente, se diseñó el sistema de control representado por los elementos principales en la Figura 4.3 para obtener las variables de medición del sistema, sensores, actuadores, controlador y la planta del sistema.

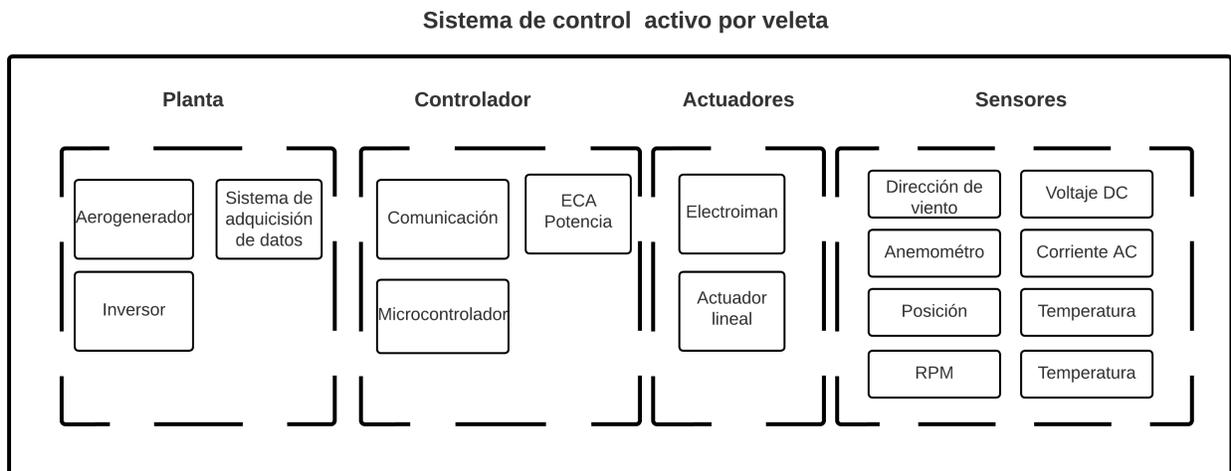


Figura 4.3. Elementos de diseño del sistema de control de veleta activa.

4.1.4. Construcción del sistema mecánico y control de la veleta activa

La construcción de un sistema mecánico y control de veleta activa implica varios componentes y procesos que trabajan juntos para permitir el funcionamiento adecuado del aerogenerador.

Mecanismo de veleta activa: El sistema mecánico de la veleta activa está compuesto por un actuador eléctrico lineal instalado dentro del eje que conecta la veleta con la góndola (timón A). Además, cuenta con tres sensores inductivos de final de carrera que permiten detectar la posición de la veleta, así como un sensor de posición tipo potenciómetro ubicado en el eje de rodamiento entre el timón A y el timón B, que proporciona una medición precisa del ángulo formado entre el eje del timón A y la veleta. La veleta, de forma trapezoidal, está fijada al timón B, como se muestra en la Figura 4.4. Este sistema permite el ajuste del rotor eólico.

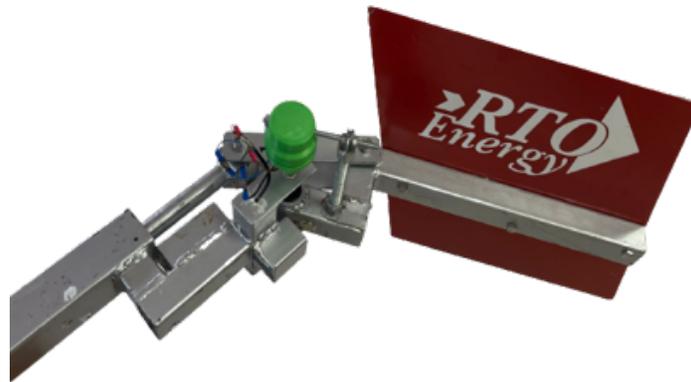


Figura 4.4. Construcción de la veleta activa en vista isométrica.

Unidad de control: La unidad de control cuenta con: módulo puente H (A) para la etapa de potencia, módulo Xbee (D) para la comunicación inalámbrica, módulo buck boost (B) para la regulación de voltaje en la placa, el microcontrolador Atmega2560 (E) que determina la orientación óptima del rotor eólico en función de la información recibida y envía las señales PWM de control adecuadas al mecanismo de veleta activa

con el módulo de entradas y salidas (G). Además, cuenta con un módulo de alimentación de 12 V (C) y el sensor de voltaje (F) que permite medir el voltaje generado por el aerogenerador. En la Figura 4.5 se observa una fotografía de la tarjeta de control .

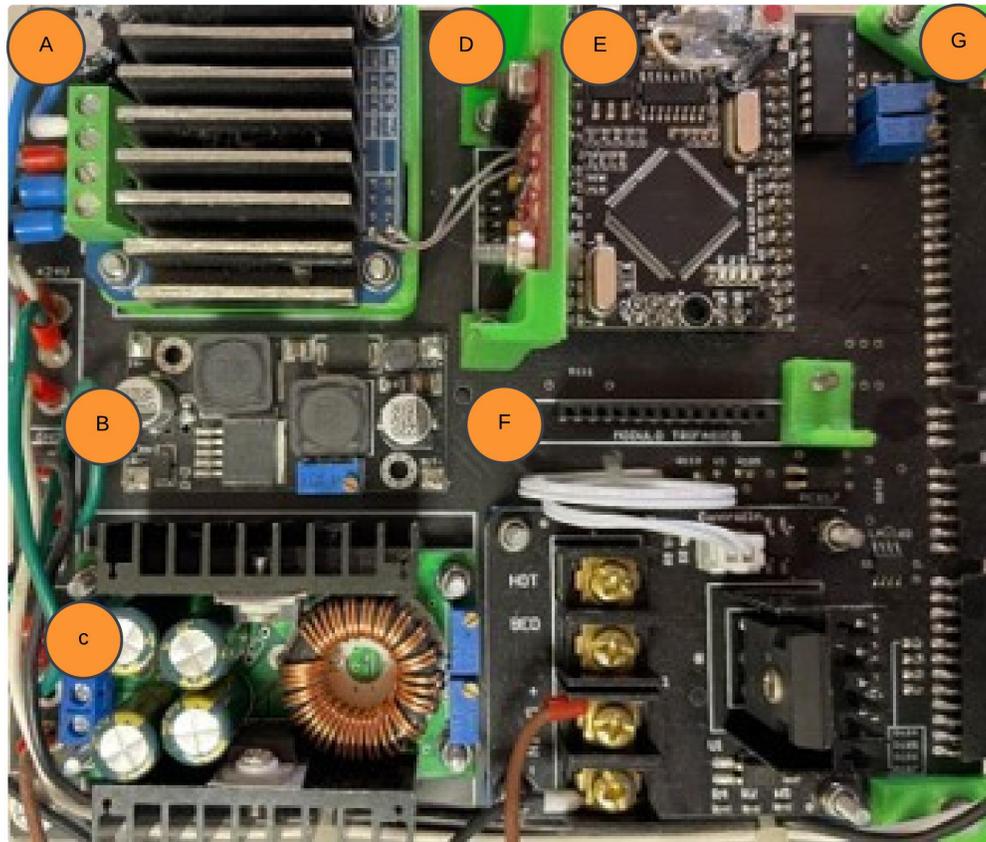


Figura 4.5. Construcción de la tarjeta principal de control.

Sensores de voltaje: La unidad de control cuenta con sensores, sin embargo, uno de los sensores más importantes es el de voltaje (Figura 4.6). El sistema de control de veleta activa utiliza sensores de medición para recopilar datos sobre la velocidad y la dirección del viento, así como sobre otras variables relevantes..

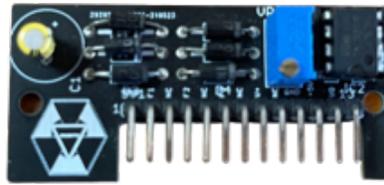


Figura 4.6. Construcción del sensor de voltaje.

Este módulo tiene sistemas de protección (fusibles), led indicador de operación, protección de polarización inversa, módulo de memoria SD para adquisición de datos. Este módulo de entradas permite la conexión y comunicación entre el sistema de control y el entorno en el que opera, como se aprecia en la tarjeta de la Figura 4.7.



Figura 4.7. Construcción del módulo de entradas y salidas.

4.2. Simulación de los algoritmos y el sistema con técnica de control

4.2.1. Definición del modelo a bloques del sistema

Al implementar el esquema representado en la Figura 3.3, aplicando una entrada escalón del ancho de pulso de 0 a 255 se obtuvo la curva de respuesta ilustrada en la Figura 4.8. La línea roja representa la variación experimental en el ángulo (θ), que se movió de 0 a 78 grados en 1.6 s, mientras que la línea negra representa la la función de transferencia con un coeficiente de determinación del 91.33%. La Ecuación (4.2) se aproximó a partir de la curva de la función de transferencia, que representa un

sistema de primer orden que modela la respuesta experimental del sistema de veleta.

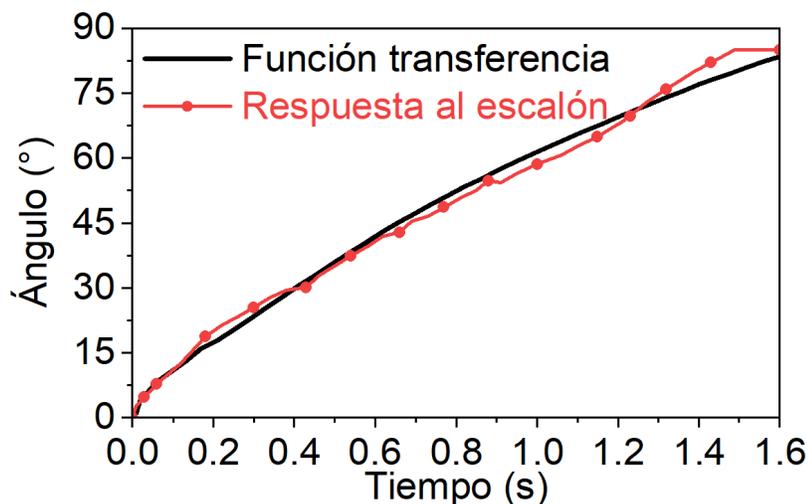


Figura 4.8. Respuesta al escalón del actuador.

$$Ft = \frac{0.02689s + 0.30914}{s + 0.597372} \quad (4.2)$$

4.2.2. Diseño del control PID

Utilizando el método de Ziegler Nichols y Tyreus Luyben [39], se obtuvieron las constantes de control PID mostradas en la Tabla 4.3 para una ganancia crítica (K_c) de 5 y un tiempo crítico (T_c) de 10 s, valores obtenidos a partir del modelo de bloques de la veleta activa. Al comparar los resultados de los métodos de Ziegler y Tyreus, estos valores se ajustaron para obtener las constantes experimentales. En la Tabla 4.3 se pueden observar los valores de las constantes del PID obtenida por los tres métodos.

Tabla 4.3. Cálculo de constantes del controlador PID

Constantes	Ziegler	Tyreus	Experimental
K_p	3	2.27	1.8
K_i	0.6	0.103	0.013
K_d	3.75	3.607	3.3

4.2.3. Diagrama de bloques del sistema en Matlab

Primero, el sistema se definió utilizando bloques que representan cada componente del proceso de control. Se comenzó con un bloque de medición para capturar la potencia de salida del aerogenerador (P_{retro}) y calcular el error (e), restando esta potencia de salida de la potencia de referencia deseada (P_{ref}).

Luego, se utilizó un bloque PID para determinar la señal de control que corrige el error calculado. Esta señal de control se aplicó a través del bloque ancho de pulso, que simula la acción de control sobre la velocidad del actuador.

Al sustituir la Ecuación (4.2) en el modelo de la Figura 4.9, se obtuvo el modelo de bloques del sistema de la veleta activa propuesto que representa al bloque de la función de transferencia, que modela la relación entre la velocidad del viento y el ángulo de la veleta activa. Este ángulo está limitado por el bloque de límite mecánico del prototipo con los datos de diseño de la Tabla 4.2.

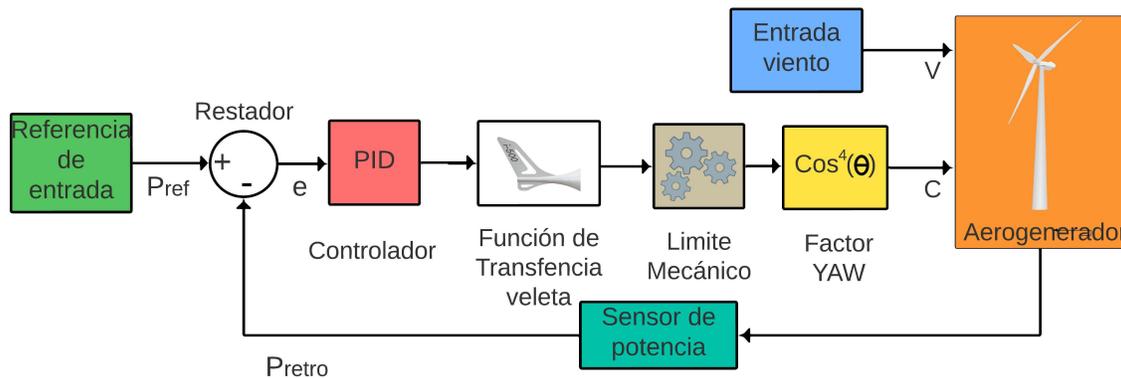


Figura 4.9. Diagrama de bloques de prueba simulada.

Para evaluar el efecto del viento, se utilizó un bloque de entrada de viento para determinar la velocidad del viento en el modelo del aerogenerador. Finalmente, se usó un bloque que representa el modelo del aerogenerador [51] con los parámetros del aerogenerador RTO ENERGY 1000 W [53] de la Tabla 4.1 para estimar el compor-

tamiento de la potencia de salida en función de la velocidad del viento, influenciada por el factor de YAW que gobierna el comportamiento de giro de YAW.

4.2.4. Análisis de curvas de respuesta

Las condiciones de simulación y de laboratorio para las pruebas del aerogenerador HAWT, están detalladas en la Tabla 4.1, donde establecen los parámetros específicos bajo los cuales se realizaron las evaluaciones y también empleando la técnica de control PID con ajuste manual presentado en la Tabla 4.3. Los resultados presentados en la Tabla 4.4 son los criterios de control del sistema de veleta para cada tipo de entrada de viento (Escalón, rampa, senoidal y perfil) que se evaluaron con las diferentes técnicas de control (Proporcional, Proporcional integral y Proporcional integral derivativo) con los diferentes métodos existentes.

Tabla 4.4. Resultados de las técnicas de control.

Técnica	Entrada	Escalón			Rampa			Senoidal			Perfil viento		
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	M_p (W)	t_s (s)	Aa	M_p (W)	t_s (s)	Aa	M_p (W)	t_s (s)	Aa
P	ZN	186.2	8.3	Alta	106.5	26.1	Alta	50.0	1.7	Media	285.0	2.5	Alto
	M	206.1	8.7	Alta	115.5	26.3	Alta	30.0	1.5	Media	275.0	2.5	Alto
PI	ZN	215.41	11.5	Alta	199.9	40.0	Baja	120.0	4.5	Media	710.0	5.1	Baja
	TL	199.9	8.5	Alta	180.3	38.6	Media	90.0	3.0	Baja	650.0	4.8	Baja
	M	216.4	9.0	Alta	142.4	28.0	Media	100.0	3.1	Baja	500.0	4.6	Baja
PID	ZN	140.76	15	Baja	204.2	26.1	Baja	85.0	4.5	Baja	710.0	5.5	Baja
	TL	31.70	8	Baja	94.7	40.0	Media	53.0	2.0	Baja	340.0	5.5	Baja
	M	11.1	7.5	Baja	4.09	25.0	Alta	35.0	1.5	Baja	95.0	5.5	Baja

El criterio de selección de la mejor técnica de control empleada para cada entrada se basa en la determinación del valor mínimo de sobreoscilación M_p en el menor tiempo de asentamiento del sistema t_s . Además de analizar el comportamiento de la curva de potencia, es necesario interpretar la curva de respuesta de la veleta activa. Esta puede generar oscilaciones que provoquen perturbaciones estructurales en la torre; por lo tanto, se selecciona aquella técnica que presente la menor amortiguación angular (A_a) tomando en cuenta las consideraciones de la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Consideraciones de amortiguación angular

Aa	Rango de C_V
Baja	10-25
Media	25-39
Alta	39-100

Basándose en los resultados obtenidos de las simulaciones presentadas en la Tabla 4.4, las siguientes gráficas muestran las comparaciones de los mejores métodos para cada técnica de control (P, PI y PID) en los distintos tipos de entrada de viento.

Para fines de compresión de las gráficas se describe la nomenclatura utilizada.

▪ **Nomenclatura de las Gráficas**

- P_{ZN} : Proporcional Ziegler Nichols.
- PI_{TL} : Proporcional Integral Tyreus Luyben.
- PID_M : Proporcional Integral Derivativo Manual.
- P_{ref} : Potencia de referencia.
- V_V : Velocidad del viento.
- A_{ZN} : Ángulo Ziegler Nichols
- A_{TL} : Ángulo Tyreus Luyben
- A_M : Ángulo Manual
- A_P : Ángulo Proporcional
- A_{PI} : Ángulo Proporcional Integral
- A_{PID} : Ángulo Proporcional Integral Derivativo

Simulación del modelo a bloques con entrada escalón**Tabla 4.6.** Parámetros de entrada viento escalón

Parámetro	Valor	Unidad
P_{ref}	1000	W
$V_{inicial}$	0	m/s
V_{final}	13	m/s
$T_{inicial}$	0	s

Para realizar la simulación del modelo a bloques con una entrada de tipo escalón, se han definido los parámetros de entrada que se detallan en la Tabla 4.6. Estos parámetros son fundamentales para observar el comportamiento del sistema bajo un cambio abrupto en la velocidad del viento, donde se pasa de una condición inicial en reposo a una velocidad final en un tiempo determinado.

Como se observa en la Tabla 4.6, el valor de referencia de potencia P_{ref} es de 1000 W, y el viento varía desde una velocidad inicial de $V_{inicial} = 0$ m/s hasta una velocidad final de $V_{final} = 13$ m/s. El tiempo inicial $T_{inicial}$ está fijado en 0 segundos, lo que permite analizar el tiempo de respuesta del sistema ante este tipo de perturbación.

Tabla 4.7. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada escalón

Técnica	Entrada	Escalón					
		Criterios de control		Criterios de ángulo			
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	$\sigma^2(\sigma^2)$	C_V (%)
P	ZN	186.2	8.3	Alta	10	50.71	71.21
PI	TL	199.9	8.5	Alta	10	36.12	60.10
PID	M	11.1	7.5	Media	10	7.01	26.48

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos para las mejores técnicas de control en respuesta transitoria ante una entrada escalón, destacando los valores de la sobreoscilación (M_p) y el tiempo de asentamiento (t_s). La comparación se realiza considerando los métodos (Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben y manual) que optimizan

ambos parámetros para cada tipo de control (P, PI y PID), respectivamente como tambien se puede observar en la Figura 4.10.

En cuanto a la amortiguación angular de la veleta(Aa), los criterios de ángulo presentados en la tabla incluyen la media (\bar{x}), varianza (σ^2) y coeficiente de variación (C_V), que son valores estadísticos que analizan la oscilación en la velecta activa.

Para el control P, el método de Ziegler-Nichols (ZN) muestra un M_p de 186.2 W y un t_s de 8.3 s, con $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 50.71^\circ{}^2$ y un $C_V = 71.21\%$. Estos valores indican que, aunque el sistema presenta una alta sobreoscilación, la respuesta angular es bastante variable.

Para el control PI, el método Tyreus Luyben (TL) reporta un M_p de 199.9 W y un t_s de 8.5 s. A pesar de la mayor sobreoscilación, el sistema logra mantener una $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 36.12^\circ{}^2$ y un $C_V = 60.10\%$. Esto sugiere que, aunque hay más oscilaciones en potencia, las oscilaciones en la respuesta angular son moderadas.

Finalmente, el control PID, utilizando el ajuste manual (M), demostró ser el más efectivo, con un M_p de 11.1 W y un t_s de 7.5 s. Este método también presenta una $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 7.01^\circ{}^2$ y un $C_V = 26.48\%$, indicando que es el sistema más consistente y menos variable en su respuesta angular.

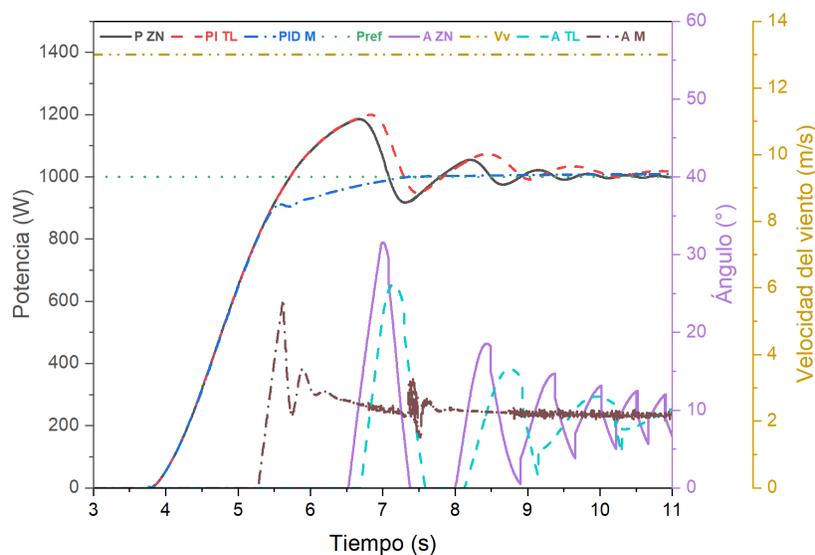


Figura 4.10. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada escalón.

Simulación del modelo a bloques con entrada rampa

En esta sección se presenta la simulación del modelo utilizando una entrada de tipo rampa. A diferencia de la entrada escalón, en este caso la velocidad del viento aumenta de manera gradual y lineal desde un valor inicial hasta un valor final, tal como se define en los parámetros de la Tabla 4.8. Este tipo de entrada es útil para evaluar cómo responde el sistema ante cambios progresivos en la velocidad del viento, lo que permite estudiar su comportamiento en condiciones más realistas.

Tabla 4.8. Parámetros de entrada viento rampa

Parámetro	Valor	Unidad
P_{ref}	1000	W
$V_{inicial}$	0	m/s
V_{final}	13	m/s
$T_{inicial}$	0	s
m	0.5	

Como se detalla en la Tabla 4.8, el valor de referencia de potencia P_{ref} se mantiene en 1000 W, mientras que la velocidad del viento varía de $V_{inicial} = 0$ m/s a $V_{final} = 13$ m/s con una pendiente m de 0.5. El tiempo inicial $T_{inicial}$ se fija en 0 segundos.

El parámetro m representa la pendiente de la rampa, lo cual determina la tasa de incremento de la velocidad del viento y, por lo tanto, la velocidad con la que el sistema debe adaptarse a las nuevas condiciones.

Tabla 4.9. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada rampa

Técnica	Entrada	Rampa					
		Criterios de control		Criterios de ángulo			
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (° ²)	C_V (%)
P	ZN	106.5	26.1	Media	10	11.90	34.49
PI	M	142.4	28.0	Media	10	7.51	27.40
PID	M	4.09	25.0	Baja	10	2.59	16.10

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados obtenidos para las mejores técnicas de control en respuesta transitoria ante una entrada rampa como tambien se puede observar en la Figura 4.11, destacando los valores de la sobreoscilación (M_p) y el tiempo de asentamiento (t_s). La comparación se realiza considerando los métodos que optimizan ambos parámetros para cada tipo de control (P, PI y PID).

Para el control P, el método de Ziegler-Nichols (ZN) fue el más efectivo, con una sobreoscilación de 106.5 W y un tiempo de asentamiento de 26.1 s. Aunque presenta una oscilación de ángulo relativamente alta, el método ofrece un balance aceptable entre estabilidad y respuesta rápida. Los valores \bar{X} son de 10°, con una σ^2 de 11.90°² y un C_V de 34.49%, lo que indica cierta variabilidad en la respuesta angular.

En el caso del control PI, el ajuste manual (M) se destacó como la mejor opción, logrando una sobreoscilación de 142.4 W y un tiempo de asentamiento de 28.0 s. Aunque los valores de M_p son más elevados, este método permite reducir las oscilaciones a un nivel medio. Para esta técnica, la \bar{x} es de 10°, con una σ^2 de 7.51°² y un C_V de 27.40 %, sugiriendo un comportamiento más consistente en la respuesta angular.

Finalmente, para el control PID, el ajuste manual (M) también resultó ser superior, con una sobreoscilación significativamente baja solo 4.09 W y un tiempo de asentamiento de 25.0 s. Este método tiene una \bar{x} de 10° , con una σ^2 de 2.59°^2 y un C_V de 16.10 %, lo que indica que es el método más eficiente y menos variable en la oscilación angular para la entrada rampa.

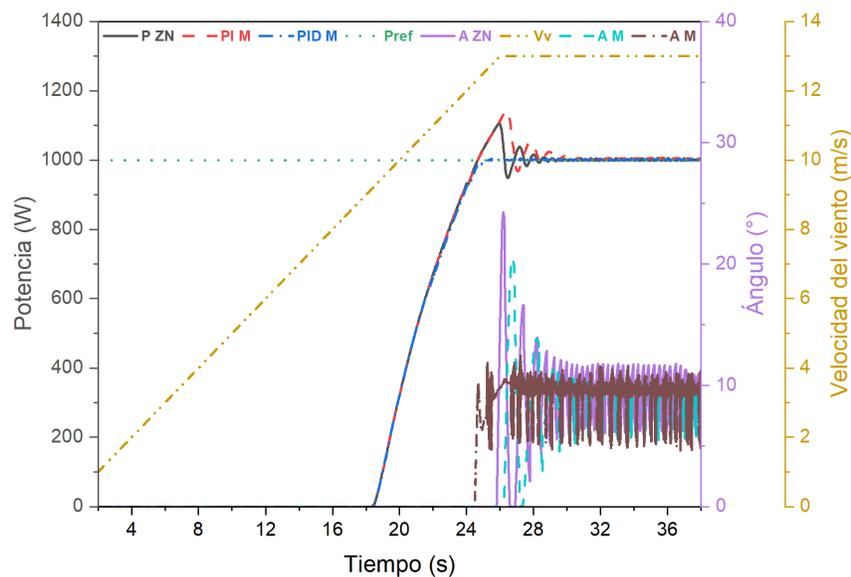


Figura 4.11. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada rampa.

Simulación del modelo a bloques con entrada senoidal

En esta sección se aborda la simulación del modelo utilizando una entrada senoidal. Este tipo de entrada permite evaluar el comportamiento dinámico del sistema ante variaciones periódicas en la velocidad del viento, lo cual es fundamental para analizar la respuesta del sistema en condiciones más complejas y realistas.

Tabla 4.10. Parámetros de entrada viento senoidal

Parámetro	Valor	Unidad
P_{ref}	1000	W
V_{min}	12	m/s
V_{nom}	13	m/s
V_{max}	14	m/s
$T_{inicial}$	0	s
F	0.2	rad/s

Los parámetros de entrada utilizados en esta simulación se presentan en la Tabla 4.10. En ella, se mantiene el valor de referencia de potencia P_{ref} en 1000 W. La velocidad del viento oscila entre un valor mínimo $V_{min} = 12$ m/s y un valor máximo $V_{max} = 14$ m/s, con un valor nominal $V_{nom} = 13$ m/s, que se considera como la velocidad promedio en el ciclo senoidal. El tiempo inicial $T_{inicial}$ está fijado en 0 segundos, y la frecuencia de la señal senoidal se define como $F = 0.2$ rad/s.

Tabla 4.11. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada senoidal

Técnica	Entrada	Senoidal					
		Criterios de control		Criterios de ángulo			
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (°²)	C_V (%)
P	ZN	50.0	1.7	Alta	10	22.55	47.49
PI	TL	90.0	3.0	Alta	10	21.11	45.95
PID	M	35.0	1.5	Media	10	15.02	38.79

En la Figura 4.12 se comparan las mejores técnicas de control para la entrada senoidal sobre la nominal, considerando los valores mínimos de sobreoscilación (M_p) y tiempo de asentamiento (t_s) presentados en la Tabla 4.11. Es importante destacar que la primera respuesta transitoria ha sido ignorada en este análisis, ya que corresponde a un fenómeno de escalón, mientras que el interés principal es evaluar la respuesta del sistema ante una entrada senoidal.

Para el control proporcional (P), el método más efectivo fue el de Ziegler-Nichols

(ZN), con una sobreoscilación de 50.0 W y un tiempo de asentamiento de 1.7 s. Este método logró un equilibrio aceptable entre una oscilación media y un tiempo de asentamiento relativamente rápido. Los valores estadísticos muestran una \bar{x} de 10° , con una σ^2 de $22.55^{\circ 2}$ y un C_V de 47.49 %, indicando una notable variabilidad en la respuesta angular.

En el caso del control proporcional-integral (PI), el método de Tyreus-Luyben (TL) mostró los mejores resultados, con una sobreoscilación de 90.0 W y un tiempo de asentamiento de 3.0 s. Aunque la sobreoscilación es mayor en comparación con el control P, este método logró mantener las oscilaciones en un nivel bajo. Para esta técnica, la \bar{x} es también de 10° , con una σ^2 de $21.11^{\circ 2}$ y un C_V de 45.95 %, lo que sugiere un comportamiento ligeramente más consistente que en el control P.

Finalmente, para el control proporcional-integral-derivativo (PID), el ajuste manual (M) resultó ser la opción más adecuada, con una sobreoscilación de 35.0 W y un tiempo de asentamiento de 1.5 s. Este método no solo redujo significativamente la sobreoscilación, sino que también presentó el menor tiempo de asentamiento. Además, la oscilación de ángulo es baja, lo que lo convierte en el método más eficiente para la entrada senoidal. Los resultados estadísticos para esta técnica incluyen una \bar{x} de 10° , con una σ^2 de $15.02^{\circ 2}$ y un C_V de 38.79 %, lo que indica una respuesta angular más estable.

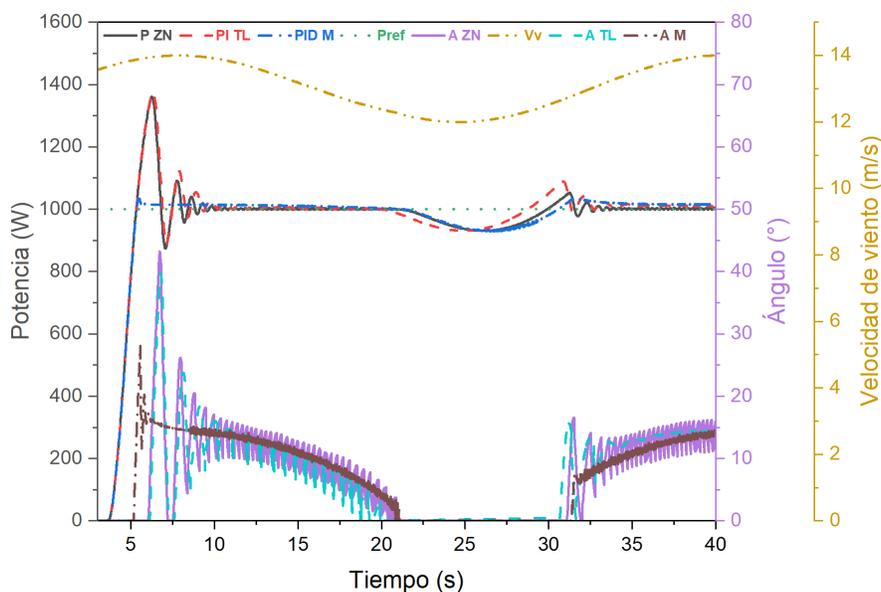


Figura 4.12. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada senoidal sobre la nominal.

Simulación del modelo a bloques con entrada perfil de viento

En esta sección se presenta la simulación del modelo utilizando un perfil de viento como entrada. Este enfoque permite analizar cómo el sistema responde a variaciones más complejas en la velocidad del viento, que pueden ocurrir en condiciones reales de operación.

Tabla 4.12. Parámetros de entrada viento perfil de viento

Parámetro	Valor	Unidad
P_{ref}	1000	W
V_{min}	7.63	m/s
V_{max}	13.5	m/s

Los parámetros de entrada definidos para esta simulación se muestran en la Tabla 4.12. En ella, el valor de referencia de potencia P_{ref} se establece en 1000 W, lo que representa la potencia que el sistema debe regular. La velocidad del viento varía entre un valor mínimo de $V_{min} = 7.63$ m/s y un valor máximo de $V_{max} = 13.5$ m/s.

Tabla 4.13. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada perfil de viento

Técnica	Entrada	Perfil de viento					
		Criterios de control		Criterios de ángulo			
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (° ²)	C_V (%)
P	M	275.0	2.5	Media	18	69.24	28.07
PI	M	500.0	4.6	Media	18	53.86	25.81
PID	M	95.0	5.5	Baja	18	43.66	20.81

En la Figura 4.13 se comparan las mejores técnicas de control para la entrada de perfil de viento, considerando los valores mínimos de sobreoscilación (M_p) y tiempo de asentamiento (t_s). Esta entrada es la más importante del análisis, ya que representa un perfil de viento real, lo que la hace altamente representativa de las condiciones operativas reales del sistema. Para el análisis, se estimaron los resultados correspondientes a uno de los tres picos más significativos de la simulación(únicamente se analizó el último). Los resultados detallados de cada técnica se presentan en la Tabla 4.13.

En el caso del control proporcional (P), el ajuste manual (M) mostró ser el más efectivo, con una sobreoscilación de 275.0 W y un tiempo de asentamiento de 2.5 s. Aunque la sobreoscilación es considerablemente alta, el tiempo de asentamiento es relativamente corto, lo que permite una rápida respuesta ante las variaciones del viento. Los valores estadísticos muestran una \bar{x} de 18°, con una σ^2 de 69.24°² y un C_V de 28.07%, indicando un nivel moderado de variabilidad en la respuesta angular.

Para el control proporcional-integral (PI), el ajuste manual (M) también se destacó, aunque con una sobreoscilación mayor de 500.0 W y un tiempo de asentamiento de 4.6 s. A pesar de la elevada sobreoscilación, este método mantuvo las oscilaciones en un nivel bajo, permitiendo una respuesta estable a largo plazo. En este caso, la \bar{x} es de 18°, con una σ^2 de 53.86°² y un C_V de 25.81%, lo que sugiere una respuesta angular más consistente que la del control P.

En cuanto al control proporcional-integral-derivativo (PID), el ajuste manual (M) nuevamente demostró ser la opción más adecuada, logrando reducir la sobreoscilación a solo 95.0 W. Sin embargo, el tiempo de asentamiento fue más largo, con 5.5 s, aunque se observó la menor oscilación en la respuesta de ángulo, lo que se traduce en una baja sobreoscilación y una mayor estabilidad. Los resultados estadísticos para esta técnica incluyen una \bar{x} de 18 °, con una σ^2 de 43.66°² y un C_V de 20.81 %, indicando un comportamiento muy estable.

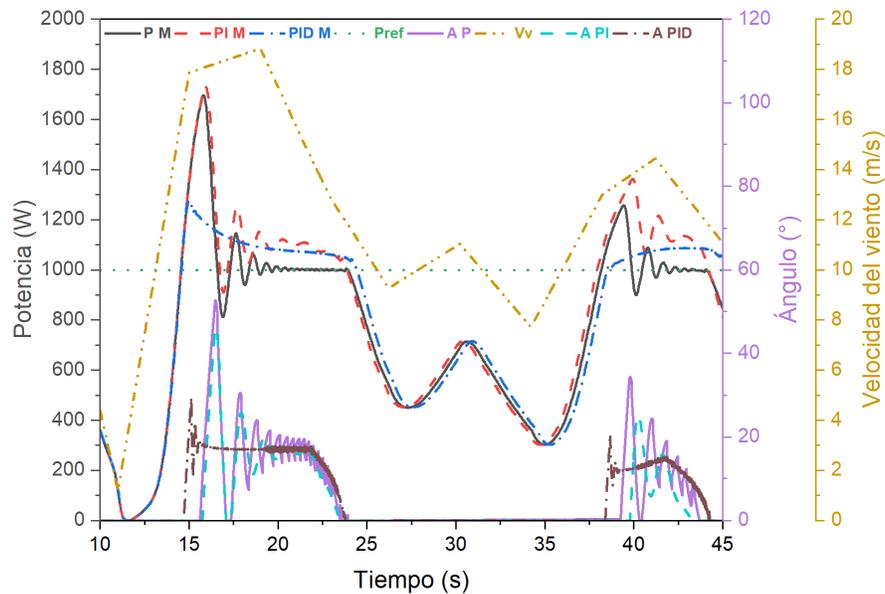


Figura 4.13. Comparación de las mejores técnicas de control. Entrada perfil de viento.

4.3. Evaluación de los algoritmos en el sistema de control en condiciones de laboratorio

4.3.1. Análisis de curvas de respuesta

En la Tabla 4.6 se presentan los parámetros de entrada utilizados para la prueba en laboratorio del sistema con un perfil escalón, rampa, senoidal y perfil de viento

para obtener los criterios de control y la respuesta angular de la veleta activa.

Simular el modelo a bloques con técnicas y métodos calculados entrada perfil escalón

En la Tabla 4.14 se presentan los resultados obtenidos para las mejores técnicas de control en respuesta transitoria ante una entrada escalón destacando los valores de la sobreoscilación (M_p) y el tiempo de asentamiento (t_s). La comparación se realiza considerando los métodos (Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben y manual) que optimizan ambos parámetros para el tipo de control PID, como tambien se puede observar en la Figura 4.14.

Tabla 4.14. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada escalón

Técnica	Entrada	Escalón					
		Criterios de control		Criterios de ángulo			
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (o ²)	C_V (%)
PID	ZN	140.20	15	Alta	10	27.47	52.41
PID	TL	31.08	8.0	Media	10	6.89	26.42
PID	M	11.31	7.5	Baja	10	4.29	20.60

Para el control PID, el método de Ziegler-Nichols (ZN) muestra un M_p de 140.20 W y un t_s de 15 s, con $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 27.47$ y un $C_V = 52.41\%$. Estos valores indican que, aunque el sistema presenta una alta sobreoscilación, la respuesta angular es bastante variable.

Para el control PID, el método Tyreus Luyben (TL) reporta un M_p de 31.08 W y un t_s de 8.0 s. A pesar de la mayor sobreoscilación, el sistema logra mantener una media de $\bar{x} = 10^\circ$, con una varianza de $\sigma^2 = 6.89^{o^2}$ y un $C_V = 26.42\%$. Esto sugiere que, aunque hay más oscilaciones en potencia, las oscilaciones en la respuesta angular son moderadas.

Para el control PID, utilizando el ajuste manual (M), demostró ser el más efectivo, con un M_p solo 11.31 W y un t_s de 7.5 s. Este método también presenta una $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 4.29^{\circ 2}$ y un $C_V = 20.60\%$, indicando que es el sistema más consistente y menos variable en su respuesta angular.

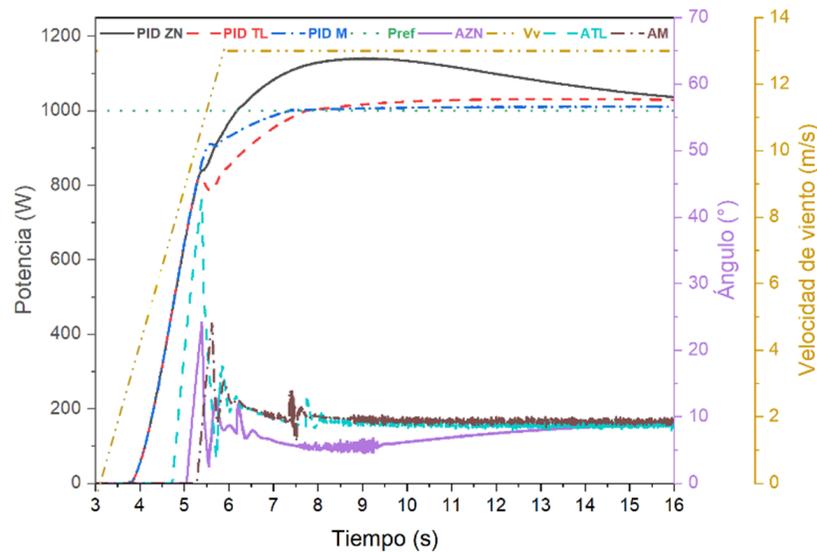


Figura 4.14. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada escalón. Control PID.

Simular el modelo a bloques con técnicas y métodos calculados entrada perfil rampa

En la Tabla 4.8 se presentan los parámetros de entrada utilizados para la prueba en laboratorio del sistema con un perfil rampa.

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados obtenidos para las mejores técnicas de control en respuesta transitoria ante una entrada rampa destacando los valores de la sobreoscilación (M_p) y el tiempo de asentamiento (t_s). La comparación se realiza considerando los métodos (Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben y manual) que optimizan ambos parámetros para el tipo de control PID, como también se puede observar en la Figura 4.15.

Tabla 4.15. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada rampa

Técnica	Entrada	Rampa					
		Criterios de control			Criterios de ángulo		
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (° ²)	C_V (%)
PID	ZN	204.22	40.0	Alta	10	19.61	44.29
PID	TL	94.79	40.0	Baja	10	4.10	20.25
PID	M	4.09	25.0	Baja	10	2.68	16.38

Para el control PID, el método de Ziegler-Nichols (ZN) muestra un M_p de 204.22 W y un t_s de 40.0 s, con $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 19.61$ y un $C_V = 44.29\%$. Estos valores indican que, aunque el sistema presenta una alta sobreoscilación, la respuesta angular es bastante variable.

Para el control PID, el método Tyreus Luyben (TL) reporta un M_p de 94.79 W y un t_s de 40.0 s. A pesar de la mayor sobreoscilación, el sistema logra mantener una media de $\bar{x} = 10^\circ$, con una varianza de $\sigma^2 = 4.10^{o^2}$ y un $C_V = 20.25\%$. Esto sugiere que, aunque hay más oscilaciones en potencia, las oscilaciones en la respuesta angular son moderadas.

Para el control PID, utilizando el ajuste manual (M), demostró ser el más efectivo, con un M_p solo 4.09 W y un t_s de 25 s. Este método también presenta una $\bar{x} = 10^\circ$, una $\sigma^2 = 2.68^{o^2}$ y un $C_V = 16.38\%$, indicando que es el sistema más consistente y menos variable en su respuesta angular.

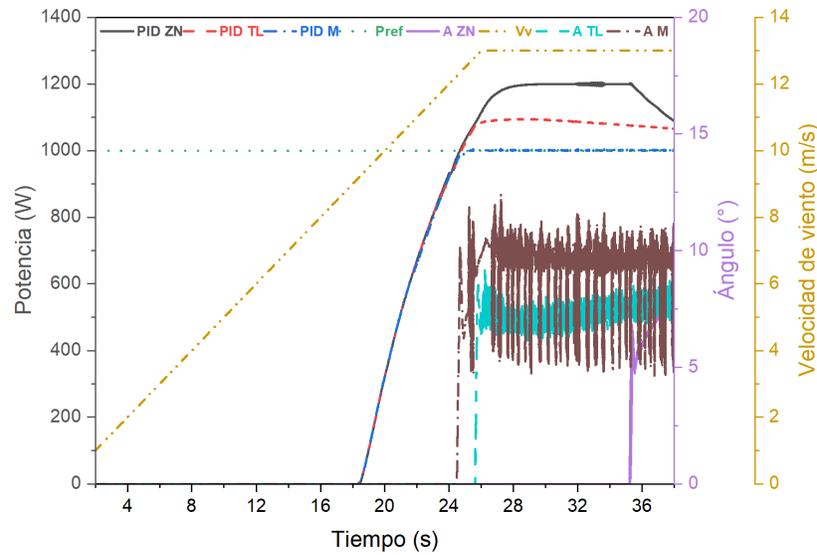


Figura 4.15. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada rampa. Control PID.

Simular el modelo a bloques con técnicas y métodos calculados entrada perfil senoidal

En la Tabla 4.10 se presentan los parámetros de entrada utilizados para la prueba en laboratorio del sistema con un perfil senoidal.

En la Tabla 4.16 se presentan los resultados obtenidos para las mejores técnicas de control en respuesta transitoria ante una entrada rampa destacando los valores de la sobreoscilación (M_p) y el tiempo de asentamiento (t_s). La comparación se realiza considerando los métodos (Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben y manual) que optimizan ambos parámetros para el tipo de control PID, como también se puede observar en la Figura 4.16.

Tabla 4.16. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada senoidal

Técnica	Entrada	Senoidal					
		Criterios de control		Criterios de ángulo			
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (° ²)	C_V (%)
PID	ZN	85.0	4.5	Media	17	13.44	36.66
PID	TL	53.0	2.0	Media	17	8.75	29.57
PID	M	35.0	1.5	Media	17	9.71	31.17

Para el control PID, el método de Ziegler-Nichols (ZN) muestra un M_p de 85 W y un t_s de 4.5 s, con $\bar{x} = 17^\circ$, una $\sigma^2 = 13.44$ y un $C_V = 36.66\%$. Estos valores indican que, aunque el sistema presenta una alta sobreoscilación, la respuesta angular es bastante variable.

Para el control PID, el método Tyreus Luyben (TL) reporta un M_p de 53.0 W y un t_s de 2.0 s. A pesar de la mayor sobreoscilación, el sistema logra mantener una media de $\bar{x} = 17^\circ$, con una varianza de $\sigma^2 = 8.75^{\circ 2}$ y un $C_V = 29.57\%$. Esto sugiere que, aunque hay más oscilaciones en potencia, las oscilaciones en la respuesta angular son moderadas.

Para el control PID, utilizando el ajuste manual (M), demostró ser el más efectivo, con un M_p solo 35.0 W y un t_s de 1.5 s. Este método también presenta una $\bar{x} = 17^\circ$, una $\sigma^2 = 9.71^{\circ 2}$ y un $C_V = 31.17\%$, indicando que es el sistema más consistente y menos variable en su respuesta angular.

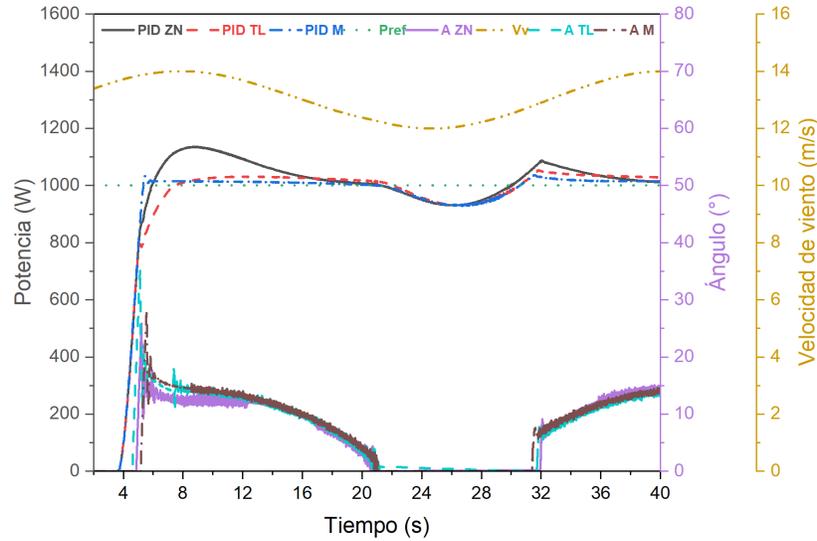


Figura 4.16. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada senoidal sobre la nominal. Control PID.

Simular el modelo a bloques con técnicas y métodos calculados entrada perfil viento

En la Tabla 4.12 se presentan los parámetros de entrada utilizados para la prueba en laboratorio del sistema con un perfil de viento

En la Tabla 4.17 se presentan los resultados obtenidos para las mejores técnicas de control en respuesta transitoria ante una entrada rampa destacando los valores de la sobreoscilación (M_p) y el tiempo de asentamiento (t_s). La comparación se realiza considerando los métodos (Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben y manual) que optimizan ambos parámetros para el tipo de control PID, como tambien se puede observar en la Figura 4.17.

Tabla 4.17. Criterios de control de respuesta transitoria de veleta activa a entrada perfil de viento

Técnica	Entrada	Perfil de viento					
		Criterios de control			Criterios de ángulo		
	Método	M_p (W)	t_s (s)	Aa	\bar{x} (°)	σ^2 (° ²)	C_V (%)
PID	ZN	836.58	5.5	Alta	17	73.91	50.57
PID	TL	390.66	5.5	Baja	17	16.56	23.99
PID	M	115.28	5.5	Baja	17	6.85	15.40

Para el control PID, el método de Ziegler-Nichols (ZN) muestra un M_p de 836.58 W y un t_s de 5.5 s, con $\bar{x} = 17^\circ$, una $\sigma^2 = 73.91^{\circ 2}$ y un $C_V = 50.57\%$. Estos valores indican que, aunque el sistema presenta una alta sobreoscilación, la respuesta angular es bastante variable.

Para el control PID, el método Tyreus Luyben (TL) reporta un M_p de 390.66 W y un t_s de 5.5 s. A pesar de la mayor sobreoscilación, el sistema logra mantener una media de $\bar{x} = 17^\circ$, con una varianza de $\sigma^2 = 16.56^{\circ 2}$ y un $C_V = 23.99\%$. Esto sugiere que, aunque hay más oscilaciones en potencia, las oscilaciones en la respuesta angular son moderadas.

Para el control PID, utilizando el ajuste manual (M), demostró ser el más efectivo, con un M_p solo 115.28 W y un t_s de 5.5 s. Este método también presenta una $\bar{x} = 17^\circ$, una $\sigma^2 = 6.85^{\circ 2}$ y un $C_V = 15.40\%$, indicando que es el sistema más consistente y menos variable en su respuesta angular.

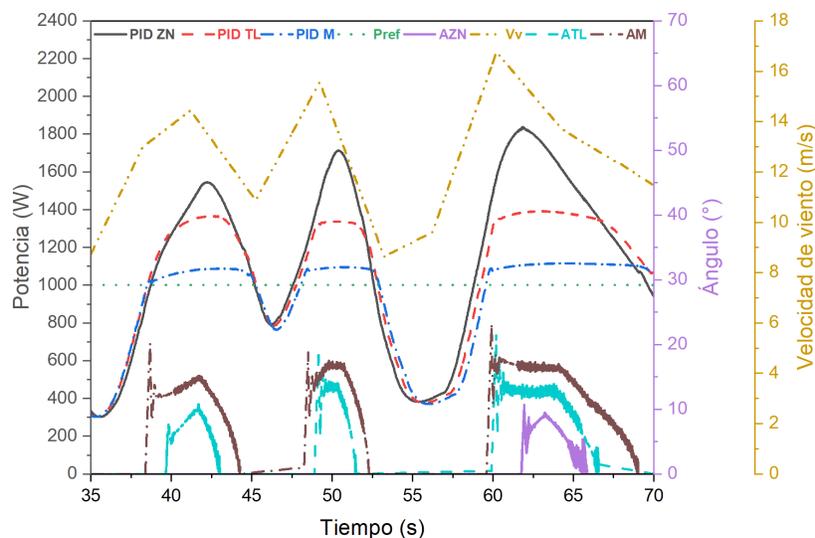


Figura 4.17. Comparación de respuestas del sistema ante una entrada de perfil de viento. Control PID.

4.4. Discusión

Una comparación entre el sistema de veleta activa de este estudio y los presentados por otros autores puede verse en la Tabla 4.18. Esta comparación destaca la superioridad de la veleta activa en términos de rendimiento dinámico, eficiencia y complejidad de control. El rendimiento del sistema de veleta activa controlado por PID superó significativamente a los sistemas de otras investigaciones que utilizan controles On/Off y lógica difusa.

En la prueba de entrada escalón, el sistema de veleta activa presentó un valor M_p notablemente más bajo (139.5%) en comparación con los obtenidos por otros autores (170%), y un tiempo de asentamiento (t_s) más rápido de 6.7 s.

En la prueba de rampa, la veleta activa mantuvo una tasa baja de M_p (105%), en contraste con los hallazgos de otros autores (180%), y logró un tiempo de asentamiento (t_s) más corto (2.8 s vs. 10 s). Esto confirmó la capacidad de la veleta activa para proporcionar respuestas rápidas y eficientes.

Además, en comparación con el trabajo de [54], se observó que la veleta activa detuvo el rotor en 3.2 s, mientras que un freno hidráulico detuvo el rotor en 1.1 s. Sin embargo,

un sistema hidráulico es más costoso de implementar y mantener que un sistema de veleta activa .

Tabla 4.18. Comparativa de sistemas de regulación.

Criterio	Escalón			Rampa		Frenado	Unidad
	VA	[55]	[56]	VA	[14]	[54]	
Sistema	VA	YAW	YAW	VA	YAW	YAW	
Criterio θ	$\cos^4 \theta$	$\cos^3 \theta$	$\cos \theta$	$\cos^4 \theta$	$\cos \theta$	-	
Técnica de control	PID	On/Off	Lógica difusa	PID	PI	On/Off	
P_{nominal}	1	2.1	20	1	10	100	kW
M_p	139.5	170	136.85	105	180	-	%
t_s	6.7	8.1	300	2.8	10	-	s
t_b	3.2	-	-	3.2	-	1.2	s
θ	14.66	33	83.31	14.68	32	-	°
ω	22.5	5	-	22.5	90	-	$\frac{^\circ}{s}$

Capítulo 5

Conclusiones

El sistema de control activo para la estabilización de potencia en aerogeneradores de baja potencia ha demostrado su efectividad tanto en la simulación como en las pruebas de laboratorio. El sistema de control, basado en una veleta articulada activa, ha mejorado significativamente la estabilidad de la potencia entregada. El uso del software MATLAB permitió diseñar y ajustar el controlador PID que regula la orientación del aerogenerador en respuesta a diferentes velocidades de viento. Este control preciso garantiza una operación más segura y eficiente, incrementando la captación de energía eólica.

El diseño y construcción del sistema de control con lazo cerrado se logró con éxito, utilizando componentes clave como la veleta articulada activa controlada por un actuador eléctrico, y un sistema de monitoreo y ajuste en tiempo real mediante SCADA. La veleta permitió ajustar el ángulo en función de la dirección del viento, asegurando una regulación precisa de la potencia. El actuador eléctrico, encargado de accionar la veleta, facilitó una respuesta rápida y controlada ante variaciones del viento, lo que resultó en una mayor estabilidad en la potencia generada. Durante las pruebas de laboratorio, se observaron tiempos de respuesta óptimos y un control eficiente de la potencia bajo diferentes condiciones de viento.

Además, los sensores de ángulo y los sensores de corriente y voltaje proporcionaron

retroalimentación constante al controlador PID, garantizando un control preciso de la orientación. El sistema fue capaz de mantener una potencia estable incluso cuando la velocidad del viento superaba el rango nominal del aerogenerador. El análisis de las pruebas mostró una estabilización de potencia en un rango de error menor al 2% del valor nominal, asegurando una salida de potencia constante y controlada.

Los algoritmos de control fueron diseñados y simulados en MATLAB utilizando un controlador PID ajustado manualmente. Se realizaron simulaciones para diferentes perfiles de viento, como escalón, rampa, senoidal y a pasos de velocidad, obteniendo tiempos de estabilización de 6.7 s en la respuesta a escalón y 2.8 s en la respuesta a rampa. Estos tiempos de respuesta demuestran que el sistema es capaz de ajustarse rápidamente ante cambios repentinos en la velocidad del viento. Las simulaciones también mostraron una reducción significativa en la sobreoscilación, que se mantuvo por debajo del 1.5% en la mayoría de los casos, lo que implica una mayor eficiencia y control preciso en la regulación de la potencia. Además, la veleta activa, junto con el actuador eléctrico y el sistema de control, permitió frenar completamente el aerogenerador en 3.2 s durante condiciones críticas, como vientos por encima de la velocidad nominal.

Las pruebas de laboratorio fueron consistentes con los resultados simulados, demostrando que el sistema de control activo es capaz de operar de manera efectiva en un entorno real. Se observó una alta concordancia entre los tiempos de estabilización simulados y los obtenidos experimentalmente, confirmando la precisión del controlador PID y la robustez del diseño del sistema. En las pruebas de respuesta a escalón, el sistema alcanzó un tiempo de estabilización de 6.8 s, mientras que en la respuesta a rampa se estabilizó en 2.9 s, valores muy cercanos a los obtenidos en simulación.

Además, el sistema fue capaz de manejar variaciones de velocidad de viento entre 12 m/s y 16 m/s sin que se produjeran oscilaciones significativas en la potencia entregada, manteniéndose dentro de un margen de error del 1.8%. El uso de un sistema

SCADA para monitorear y ajustar las condiciones de operación permitió evaluar el rendimiento del sistema en tiempo real, logrando un frenado total en 3.3 s bajo condiciones de viento extremas. Este monitoreo fue clave para asegurar la estabilidad y seguridad operativa del aerogenerador.

Referencias

- [1] D. Pérez. *Energía eólica. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. 1.^a ed. Marcombo, 2023.
- [2] P. Fernández Díez. *Energía eólica*. Sep. de 2006. URL: <https://www.kimerius.com/app/download/5780666687/Energ%C3%ADa+e%C3%B3lica.pdf>.
- [3] *Aerogenerador*. URL: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-eolica/aerogenerador>.
- [4] A. recuperado. *Generalidades sobre aerogeneradores*. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70162/fichero/Volumen+\%C3\%BAnico%\newline252F02+Generalidades+sobre+aerogeneradores.pdf>.. Accedido en Mayo de 2018.
- [5] *IEC 61400-1: Wind turbines - Part 1: Design requirements*. Ed. 4.0. International Electrotechnical Commission, 2019. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5433>.
- [6] J. J. S. Llobregat et al. *Control automático: Tiempo Continuo y Tiempo Discreto*. Reverté, 2015.
- [7] L. Prado. *Universidad de Pamplona*. <https://slideplayer.es/slide/14206855/>.. Accedido en 09 noviembre 2019. Agosto de 2018.
- [8] analfatecnicos. *Sistemas de modulación*. <https://analfatecnicos.net/archivos/15.SistemasModulacionWikipedia.pdf>.. Accedido en 20 Noviembre 2019. Diciembre de 2019.

- [9] D. R. A. R. M. Dr. Rubén Morales Menéndez. *Sistemas de control moderno volumen 1*. <http://prod77ms.itesm.mx/podcast/EDTM/ID295.pdf>. Accedido en 19 noviembre 2019. 2013.
- [10] Showdeluces. *¿Qué es PWM (Modulación de Ancho de Pulso) y cómo se aplica al control de intensidad de luz en artefactos de iluminación?* Argentina. 2013.
- [11] Admin. *Qué es un sistema SCADA? Información completa*. Oct. de 2022. URL: <https://www.autex-open.com/automatizacion-industrial/que-es-un-sistema-scada-informacion-completa/>.
- [12] Han-Soon Choi et al. “Active yaw control of MW class wind turbine”. En: *ICCAS 2010*. 2010, págs. 1075-1078. DOI: 10.1109/ICCAS.2010.5669699.
- [13] F.A. Farret, L.L. Pfitscher y D.P. Bernardon. “Sensorless active yaw control for wind turbines”. En: *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)*. Vol. 2. 2001, 1370-1375 vol.2. DOI: 10.1109/IECON.2001.975981.
- [14] Hamid Shariatpanah, Roohollah Fadaeinedjad y Masood Rashidinejad. “A New Model for PMSG-Based Wind Turbine With Yaw Control”. En: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 28.4 (2013), págs. 929-937. DOI: 10.1109/TEC.2013.2281814.
- [15] Alfredo Haro, Hector Young y Boris Pavez. “Fuzzy Logic Active Yaw Control of a Low-Power Wind Generator”. En: *IEEE Latin America Transactions* 19.11 (abr. de 2021), págs. 1941-1948. URL: <https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/4840>.
- [16] Wael Farag et al. “A comparative study and analysis of different yaw control strategies for large wind turbines”. En: *2017 Intl Conf on Advanced Control Circuits Systems (ACCS) Systems 2017 Intl Conf on New Paradigms in Electronics Information Technology (PEIT)*. 2017, págs. 132-139. DOI: 10.1109/ACCS-PEIT.2017.8303031.

- [17] F.A. Farret, L.L. Pfischer y D.P. Bernardon. "Active yaw control with sensorless wind speed and direction measurements for horizontal axis wind turbines". En: *Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (Cat. No.00TH8474)*. 2000, págs. I25/1-I25/6. DOI: 10.1109/ICDCS.2000.869856.
- [18] Xia Anjun et al. "Pitch control of large scale wind turbine based on expert PID control". En: *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*. 2011, págs. 3836-3839. DOI: 10.1109/ICECC.2011.6068002.
- [19] P Rajesh Kumar Reddy. "Wind turbine pitch and yaw control". En: *International Journal of Engineering Research and Applications* 5.9 (2015), págs. 105-113.
- [20] Mrinal Kanti Dhar et al. "Study on pitch angle control of a variable speed wind turbine using different control strategies". En: *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. 2017, págs. 285-290. DOI: 10.1109/ICPCSI.2017.8392258.
- [21] O. Felipe Alarcón et al. "Hybrid PID-fuzzy pitch control for wind turbines". En: *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CHILECON.2017.8229625.
- [22] Salah Soued et al. *Optimal blade pitch control for enhancing the dynamic performance of wind power plants via metaheuristic optimisers*. IEE. 2017.
- [23] Maximiliano López, Diego Barrero y Sandra Garzon. "Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa". En: *Difu100ci@ Revista en Ingeniería y Tecnología, UAZ* 8 (abr. de 2015), pág. 1.
- [24] Ordoñez et al. *Adaptive Fuzzy Control: Experiments and Comparative Analyses*. IEEE. 1997.
- [25] Abdulhamed Hwas y Reza Katebi. *Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller*. IEEE. 2012.

- [26] P.Bhanu et al. *Load Frequency Controller with PI Controller Considering non-linearities and Boiler Dynamics*. IEEE. 2011.
- [27] M.S.Javaid et al. *A Novel Fuzzy Logic Controller for Smart Load Voltage Regulation*. IEEE. 2017.
- [28] Agarwal et al. *Comparative Analysis of PID Controller for Speed Control of DC motor with Intelligent Optimization Algorithms*. IEEE. 2018.
- [29] SlideShare. *Continuidad-Bernoulli*. en. <https://es.slideshare.net/slideshow/2-continuidadbernoulli10pag/75608373#9>. Diapositivas. Mayo de 2017.
- [30] F.W. Sears, M.W. Zemansky y H.D. Young. *FISICA UNIVERSITARIA*. Física universitaria v. 2. PEARSON EDUCACION, 2004. ISBN: 9789702605126. URL: <https://books.google.com.mx/books?id=dI-eRAAACAAJ>.
- [31] Justin Arcara. *Sizing your wind turbine tail*. Feb. de 2023. URL: <https://www.windynation.com/blogs/articles/sizing-your-wind-turbine-tail>.
- [32] *UNE-EN IEC 61188-6-2:2021 (Ratificada) Tarjetas con circuito i...* URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065461>.
- [33] *Normas*. Jul. de 2024. URL: <https://mexico.ipc.org/normas/>.
- [34] MathWorks. *Wind Turbine - Implement model of variable pitch wind turbine*. Accessed: 2024-10-07. 2024. URL: <https://la.mathworks.com/help/sps/ug/wind-turbine.html>.
- [35] *Turbine that converts wind kinetic energy into rotational motion - MATLAB - MathWorks América Latina*. URL: https://la.mathworks.com/help/sdl/ref/windturbine.html?searchHighlight=Wind%20Turbine&s_tid=srchtitle_support_results_5_Wind%20Turbine.
- [36] *Inercia de mecánica de rotación ideal - MATLAB - MathWorks América Latina*. URL: <https://la.mathworks.com/help/simscape/ref/inertia.html>.
- [37] *Wind Turbine - MATLAB Simulink - MathWorks América Latina*. URL: https://la.mathworks.com/help/sps/ug/wind-turbine.html?searchHighlight=Rotor%20Hub&s_tid=srchtitle_support_results_4_Rotor%20Hub.

- [38] MathWorks América Latina. *Three-phase ideal active and reactive power sensor - MATLAB*. Accedido: 19 de octubre de 2024. URL: https://la.mathworks.com/help/sps/ref/powersensorthreephase.html?searchHighlight=power%20Sensor%20%28Three-Phase%29&s_tid=srchtitle_support_results_1_power%20Sensor%20%2528Three-Phase%2529.
- [39] K. Ogata. *Ingeniería de control moderna*. 5.^a ed. Pearson Educación, 2010.
- [40] A. Flores Novelo. “Obtención de la Función de Transferencia de Sistemas mediante la Identificación Paramétrica a partir de datos Experimentales”. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA, feb. de 2013.
- [41] M. S. Fadali y A. Visioli. *Digital Control Engineering: Analysis and Design*. Elsevier Gezondheidszorg, 2019.
- [42] C. F. Pardo Martín. *Método de Ziegler-Nichols - control automático*. Dic. de 2018. URL: <https://www.picuino.com/es/control-ziegler-nichols.html>.
- [43] R. P. Ñeco García. *Apuntes de sistemas de control*. ECU, 2013. URL: <https://elibro.net/es/ereader/uvm/62263?page=1>.
- [44] R. C. Dorf y R. H. Bishop. *Modern Control Systems*. Pearson Education, 2016.
- [45] W. L. Luyben. *Practical Process Control for Engineers and Technicians*. Butterworth-Heinemann, 2006.
- [46] National instruments. *Wind Turbine Control Methods*. <http://www.ni.com/white-paper/8189/en/>.. Diciembre de 2008.
- [47] *UNE-EN 287-1:2004 Cualificación de soldadores. Soldeo por fusi...* URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0032414>.
- [48] IPC International. *IPC International, Inc*. Oct. de 2023. URL: <https://www.ipc.org/ipc-600-acceptability-printed-boards-endorsement-program>.
- [49] Piek. *Certificación IPC J-STD-001 - IPC Accredited Training Partner - PIEK*. Nov. de 2021. URL: <https://piek.international/es/certificacion-ipc-j-std-001/>.

- [50] Piek. *Certificación IPC-7711/7721 - IPC Accredited Training Partner - PIEK*. Nov. de 2021. URL: <https://piek.international/es/certificacion-ipc-7711-7721/>.
- [51] MathWorks América Latina. *Wind Turbine - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina*. s. f.-b. URL: https://la.mathworks.com/help/sps/ug/wind-turbine.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_wind%20turbine.
- [52] *Instrumentation Symbols and Identification*. ANSI/ISA-S5.1-2009 (R2018) - Standard. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation (ISA), 2009.
- [53] *Todo cambio comienza con un RTO*. URL: <http://rtoenergy.com.mx/>.
- [54] Estiko Rijanto, Aditya Nugraha y Anwar Muqorobin. “Development of a hydraulic brake control system for 100kW horizontal axis wind turbines using pressure relief and directional valves”. En: 7 (ene. de 2012), págs. 383-396.
- [55] Simon De Zutter et al. “Modeling of active yaw systems for small and medium wind turbines”. En: *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/UPEC.2017.8231885.
- [56] Alfredo Haro, Hector Young y Boris Pavez. “Fuzzy Logic Active Yaw Control of a Low-Power Wind Generator”. En: *IEEE Latin America Transactions* 19.11 (2021), págs. 1941-1948. DOI: 10.1109/TLA.2021.9475848.