

**DESARROLLO DE UN AEROGENERADOR TRIPALA DE EJE HORIZONTAL  
CON CONTROL ACTIVO**

**JOSUE HUMBERTO BARRERA MORALES**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PAMPLONA  
2019**

**DESARROLLO DE AEROGENERADOR TRIPALA DE EJE HORIZONTAL CON  
CONTROL ACTIVO**

**JOSUE HUMBERTO BARRERA MORALES**

**Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniero en mecatrónica**

**Director**  
**PhD. CRISTHIAN MANUEL DURÁN ACEVEDO**  
**Ingeniero Electrónico**  
**Codirector**  
**Ing. LUIS ERNESTO NEIRA**  
**Ingeniero Mecatrónico**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PAMPLONA**  
**2019**

## CONTENIDO

<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	12
<b>OBJETIVOS</b> .....	13
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	17
<b>1.1 Tipos de aerogeneradores</b> .....	17
<b>1.1.1. Por el tipo de eje</b> .....	17
<b>1.1.1.1 Eje vertical</b> .....	17
<b>1.1.1.2 Eje horizontal</b> .....	17
<b>1.1.2 Por la posición respecto al viento</b> .....	18
<b>1.1.2.1 A sotavento</b> .....	18
<b>1.1.2.2 A barlovento</b> .....	18
<b>1.1.2 Por el número de aspas</b> .....	18
<b>1.1.2.1 Un aspa</b> .....	18
<b>1.1.2.2 Dos aspas</b> .....	18
<b>1.2.2.3 Tres aspas</b> .....	18
<b>1.2 Límite de Betz y potencia expresada en parámetros físicos</b> .....	19
<b>1.3 Cambio en la potencia y velocidad angular según los ángulos de ataque del viento</b> .....	20
<b>1.4 Regiones de operación según la velocidad del viento</b> .....	21
<b>1.5 Teoría del elemento del aspa</b> .....	22
<b>1.6 Determinación del par y la potencia del rotor</b> .....	23

1.7 Aerodinámica de una turbina eólica teniendo en cuenta cambios en el ángulo de yaw .....	24
1.8 Teoría del impulso para un rotor de turbina en orientación constante .....	24
1.9 Fuentes de carga .....	26
1.10 Vibraciones inestables causadas por el control de tono variable (pitch) de velocidad fija .....	27
1.11 Fatiga .....	28
1.12 Investigaciones anteriores .....	28
1.13 Sensores .....	30
1.13.1 Veleta .....	30
1.13.2 Encoder .....	31
1.14 Definición de los objetivos del control .....	32
1.15 Control en lazo cerrado: métodos de diseño analítico .....	33
<b>2. DESARROLLO DEL AEROGENERADOR .....</b>	<b>34</b>
2.1 Descripción de los sistemas de control y seguridad .....	35
2.2 Diseño aerodinámico con Flow simulation .....	36
2.3 Modelamiento y simulación por medio de la herramienta para análisis de elementos mecatrónicos “Simscape” a través de Simulink .....	42
2.3.1 Componentes y parámetros físicos a utilizar .....	44
2.3.1.1 Rotor .....	46
2.3.1.2 Torre .....	47
2.3.1.3 Aspas .....	53
2.3.1.4 Tren de engranajes .....	54
2.3.1.5 Actuador hidráulico del pitch .....	56
2.3.1.6 Generador .....	58

2.3.1.7 Actuator del control de Yaw .....	58
2.3.1.8 Góndola .....	58
2.4 Diseño e impresión de partes del prototipo didáctico .....	58
2.4.1 Mecanismo de anillos deslizantes .....	63
2.4.2 Rodamiento .....	63
<b>3. SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>65</b>
3.1 Sistema de control de pitch .....	66
3.2 Sistema de control de yaw .....	72
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
4.1 Control de referencia de control por medio de máquina de estados finitos	74
4.2 Control difuso .....	74
4.3 Prototipo aerogenerador eólico.....	81
4.3.1 Interfaz HMI .....	93
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Turbina de eje vertical

Figura 2. Aerogeneradores de eje horizontal a sotavento y barlovento.

Figura 3. Límite de Betz en un aerogenerador de eje horizontal

Figura 4. Control de cabeceo de las aspas

Figura 5. Curva de potencia de aerogenerador de velocidad variable generalizada

Figura 6. Análisis de componentes vectoriales de la velocidad del aspa

Figura 7. Coeficiente de potencia: curva de rendimiento de la relación de velocidad de la punta

Figura 8. Variación del azimut vs momento de guiñada

Figura 9. Flujo inestable y velocidades estructurales adyacentes a una cuchilla de rotor

Figura 10. Diagrama de bloques de un control difuso

Figura 11. Sensor de dirección del viento PCE-FST-200-202

Figura 12. Encoder incremental NPN

Figura 13. Esquema general de control

Figura 14. Modelo en SolidWorks

Figura 15. Análisis de esfuerzos a 20m/s

Figura 16. Análisis de deformaciones a 20m/s

Figura 17. Análisis de esfuerzos a 30m/s

Figura 18. Análisis de deformaciones a 30m/s

Figura 19. Transformaciones de energía de un aerogenerador

Figura 20. Esquema general de simulación

Figura 21. Esquema con los componentes de la góndola

Figura 22. Esquema de la góndola en simulink

Figura 23. Modelo del rotor utilizando Simscape

Figura 24. Rango de alturas de las torres según su potencia

Figura 25. Fuerzas en las aspas

Figura 26. Modelo dinámico de las aspas

Figura 27. Modelo geométrico de las tres aspas

Figura 28. Fuerza de elevación y ángulo de ataque

Figura 29. Fallo por deformación plástica

Figura 30. Fractura en los dientes

Figura 31. Modelo del tren de engranaje

Figura 32. Control de pitch utilizando actuador electrohidráulico

Figura 33. Modelo del generador eléctrico

Figura 34. Modelo del actuador de control de yaw

Figura 35. Modelo CAD (Diseño Asistido por Computador) de la góndola

Figura 36. Medidas de la góndola en milímetros

Figura 37. Modelo CAD del rotor

Figura 38. Medidas del rotor en milímetros

Figura 39. Modelo CAD de la tapa del rotor

Figura 40. Medidas de la tapa del rotor en milímetros

Figura 41. Impresión de las piezas en 3D

Figura 42. Anillos deslizantes

Figura 43. Rodamiento

Figura 44. Control de pitch

Figura 45. Sistema de control de pitch con las aspas como carga mecánica

Figura 46. Diagrama de bode del actuador electrohidráulico

Figura 47. Diagrama de bode editado

Figura 48. Planos con lugar de las raíces

Figura 49. Respuesta al escalón del controlador

Figura 50. Diagrama de bode para sistema discreto

Figura 51. Lugar de las raíces para sistema discreto

Figura 52. Respuesta al paso

Figura 53. Orientación hacia la dirección del viento

Figura 54. Lazo de control de yaw

Figura 55. Potencia generada con máquina de estados finitos

Figura 56. Esquema del control difuso

Figura 57. Funciones de pertenencia para la velocidad del viento

Figura 58. Funciones de pertenencia para las RPM del rotor

Figura 59. Superficie de control resultante

Figura 60. Esquema de control simplificado

Figura 61. Entradas del sistema

Figura 62. Comportamiento del ángulo de pitch controlado

Figura 63. Energía generada con control difuso

Figura 64. Entradas al sistema segunda prueba

Figura 65. Energía generada

Figura 66. PLC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC de Siemens

Figura 67. Conexión del encoder al PLC

Figura 68. Activación de contador rápido

Figura 69. Configuración para entrada del encoder

Figura 70. Filtro de la entrada digital

Figura 71. Prototipo de aerogenerador

Figura 72. Vista frontal de la parte superior del aerogenerador

Figura 73. Creación de función SCL

Figura 74. Programación en TIA Portal

Figura 75. Función SCL con control difuso y escalado para salida analógica

Figura 76. Propiedades de hardware del PLC para configurar la modulación por ancho de pulso

Figura 77. Parametrización del periodo y el ciclo de trabajo

Figura 78. Transferencia de los datos del control a la palabra del PWM

Figura 79. Realización de pruebas con ventilador del laboratorio de control

Figura 80. Caracterización de la velocidad angular respecto a los ángulos en las aspas

Figura 81. Grafica velocidad angular en relación a su respuesta en el tiempo

Figura 82. Imagen raíz HMI

Figura 83. Configuración lectura analógica de la dirección del viento

Figura 84. Lectura y conversión de los pulsos del encoder en rpm

Figura 85. Lista de variables usadas en el bloque de función SCL

Figura 86. Armado de la góndola con los actuadores y sensores

Figura 87. Cableado del rotor y los anillos deslizantes

Figura 88. Colocación de las bananas tipo hembra en el panel de conexiones

Figura 89. Soldadura de los puentes eléctricos que comunican las bananas

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al apoyo incondicional de mi padre Humberto Barrera y mi madre Isabel Morales, a la asesoría académica del Ing. Luis Neira, Ing. Oswal Vera y PhD Cristian Durán, y a mis compañeros Jonathan Buitrago y Darwin Cruz.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Al momento de implementar un aerogenerador como modelo de negocio y producción limpia de energía, es necesario ampliar la vida útil de la planta, para que sea rentable para el constructor y asegurar que no hallan accidentes que puedan llegar a fracturar las aspas o fallas mecánicas que aumenten la frecuencia de mantenimiento, para esto es posible utilizar un control sobre el ángulo de las aspas, con el fin de utilizarlo como freno aerodinámico. Además, es bueno para el análisis de ingeniería monitorear todo el tiempo la dirección del viento y otras variables que intervienen. En el mundo de la industria eólica lo requerido es utilizar hardware para control de uso robusto como los PLC, por tal motivo se requiere investigar sobre la utilización de uno en este tipo de plantas. Además, el proyecto puede convertirse en una planta para que los estudiantes estudien control no lineal, y sepan más sobre energía eólica.

## **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un aerogenerador tripala de eje horizontal con control activo

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Modelar un aerogenerador de eje horizontal de 2MW con control de pitch y yaw en Matlab utilizando simulink y simscape.
- Simular los controladores PID y Fuzzy como alternativa usando técnicas de control industrial
- Desarrollar un prototipo de aerogenerador de eje horizontal
- Implementar el PLC S7-1200 en un prototipo a escala.
- Incluir una interfaz HMI

## JUSTIFICACIÓN

En la Universidad de Pamplona ha sido poca la investigación en el campo del control activo de aerogeneradores, por medio de este proyecto es posible crear una base académica que permita a interesados en el tema tener una herramienta para investigar, experimentar y un enfoque de control automático. Como estudiante de ingeniería mecatrónica el autor pretende profundizar constantemente sobre este tema, para así poder hacer mejor investigación y aportar en el desarrollo tecnológico del país. En vez de utilizar como en múltiples proyectos la función predeterminada que tiene Siemens para control PID, se quiere dar un enfoque poco explorado con este proyecto al utilizar SCL (lenguaje de control estructurado).

## INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son de gran ayuda para colmar la creciente demanda de electricidad a nivel mundial, la energía eólica puede servir como fuente de energía en lugares remotos sin conexión a las redes domiciliarias nacionales. Según investigadores la energía eólica es una fuente renovable verde inagotable de energía [1-2]. Llama la atención de todo el mundo debido a ricas reservas, protección ambiental baja en carbono, amplia distribución y otras ventajas [3-4]. Contribuye a la mitigación del cambio climático global generado en gran parte por la emisión de gases de efecto invernadero, que son producidos por otras fuentes de energía convencionales que utilizan combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo. Además, es una fuente de energía inagotable ya que se obtiene de procesos atmosféricos naturales y continuos [5].

El sistema de control de tono de las aspas es uno de los componentes indispensables del aerogenerador de eje horizontal, ya que permite servir como freno aerodinámico, siendo una opción barata, de fácil mantenimiento y buen desempeño [6]. Juega un papel importante en el generador de turbina eólica debido a que las velocidades del viento pueden tener cambios abruptos que pueden disminuir la vida útil, aumentar la frecuencia en que se realice mantenimiento e inclusive crear accidentes, donde las aspas o la torre se fracturen instantáneamente, como ha ocurrido repetidas veces en parques eólicos. Por lo tanto, se hace necesario sintonizar correctamente los parámetros de ajuste con el fin de crear un controlador robusto que se adapte a los cambios estocásticos producidos por el viento. El controlador PID convencional no es adecuado para todos los puntos de operación porque los parámetros de ajuste no se cambian constantemente.

En [7] se asegura que el PLC como herramienta industrial puede ser utilizado para desarrollar sistemas de control avanzados. Debido a su enorme uso en la industria, el PID es un controlador que es necesario implementar en este proceso, en variados PLC se puede implementar, no produce alto coste computacional, está al alcance de los conocimientos del ejecutor del proyecto. Debido al auge del control difuso se considera idóneo también implementarlo.

Aunque, tecnológicamente, los sistemas de conversión de energía eólica han evolucionado fuertemente, todavía no se ha logrado obtener el sistema ideal, debido a la variabilidad y al comportamiento no lineal de su fuente motriz, el viento, que varía tanto geográficamente como temporalmente [8]. Con el crecimiento de la industria eólica de los EE. UU y la introducción de turbinas mayores a 1 MW, las cargas más altas y los mayores esfuerzos están afectando la vida útil del cojinete del eje principal y de la caja de engranajes. Los modos de daño y falla se están

produciendo antes de lo esperado, y para muchos operadores de parques eólicos, el costo de las reparaciones inesperadas en la torre se está sumando.[9]

La turbulencia se genera principalmente por dos causas: la 'fricción' con la superficie de la tierra, que se puede considerar que se extiende hasta las perturbaciones del flujo causadas por características topográficas como colinas y montañas, y efectos térmicos que pueden hacer que las masas de aire se muevan verticalmente como un resultado de variaciones de temperatura, y por lo tanto de la densidad del aire. A menudo, estos dos efectos están interconectados, como cuando una masa de aire fluye sobre una cadena montañosa y es forzada hacia regiones más frías donde ya no está en equilibrio térmico con sus alrededores. La turbulencia es claramente un proceso complejo, y no se puede representar simplemente en términos de ecuaciones deterministas. Al ser Colombia un país con multitud de montañas y accidentes geográficos, se pueden crear muchas dificultades en la generación por los constantes cambios en la dirección y velocidad del viento.

Mediante este proyecto se quiere mejorar el conocimiento de los estudiantes y docentes de los programas de electrónica, mecatrónica y eléctrica, en la simulación de estructuras mecánicas y eléctricas complejas en Matlab, y la programación de controladores en PLC.

## 1. MARCO TEÓRICO

**1.1 Tipos de aerogeneradores:** se pueden distinguir los aerogeneradores según las siguientes características

### 1.1.1. Por el tipo de eje

**1.1.1.1 Eje vertical:** El eje de rotación de las palas es perpendicular al suelo donde se apoya. Su principal ventaja es que no requiere un sistema de orientación para optimizar la generación, ya que independientemente de la dirección del viento, siempre producirá la misma cantidad de energía. Otra ventaja es que, al poder prolongar el eje de rotación hasta el nivel del suelo, es posible colocar el generador eléctrico en la base del mismo, facilitando así las labores de mantenimiento.



Figura 1. Turbina de eje vertical [25]

Entre sus desventajas está que tienen más posibilidades de pararse debido a la menor inercia de su rotor y de caerse de su punto de anclaje, por lo que no son idóneos para zonas con vientos fuertes. Debido a su menor eficiencia aerodinámica y menores tamaños producen considerablemente menos energía que uno de eje horizontal.

**1.1.1.2 Eje horizontal:** El eje de rotación es paralelo al suelo. Son los más utilizados y en los que este proyecto va a tratar. Según [5],[9] y [15] son las que mayor eficiencia y carga aerodinámica uniforme presentan.

## 1.1.2 Por la posición respecto al viento

**1.1.2.1 A sotavento:** el aire se encuentra antes con la torre que con el rotor. No es necesario un sistema de orientación, pero en cambio presentan una menor eficiencia que los aerogeneradores a barlovento.

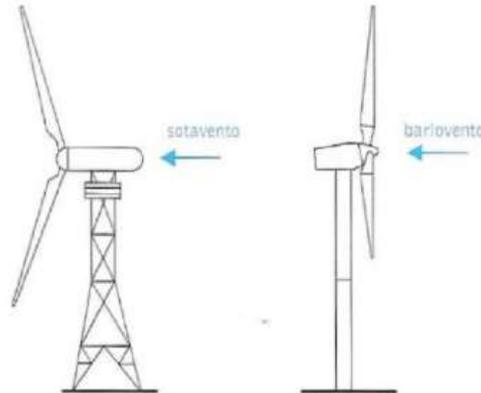


Figura 2. Aerogeneradores de eje horizontal a sotavento y barlovento. [20]

**1.1.2.2 A barlovento:** el aire se encuentra antes con el rotor que, con la torre, esto hace que no haya interferencia aerodinámica con la torre y así tener mayor eficiencia.

## 1.1.2 Por el número de aspas

**1.1.2.1 Un aspa:** Necesitan de un contrapeso para generar equilibrio mecánico, sus velocidades de rotación son muy altas y su vida útil es reducida ya que se introducen en el eje esfuerzos muy variables.

**1.1.2.2 Dos aspas:** En el instante en que una de las aspas pasa por la torre, esta deja de recibir viento, ello provoca una inestabilidad de momentos en el rotor que supone la aparición de grandes esfuerzos en la base del aspa opuesta. Deben una velocidad de giro mayor que los tripala para producir la misma energía. Una velocidad de giro mayor en el rotor supone más desgaste en los rodamientos.

**1.1.2.3 Tres aspas:** Es diseño más extendido en el mercado, debido a que su momento de inercia provoca un giro suave y uniforme, disminuyendo los esfuerzos en las aspas y la estructura. Además, es el diseño que menor velocidad angular necesita para producir la misma cantidad de electricidad, disminuyendo el mantenimiento y aumentando la vida útil.

## 1.2 Límite de Betz y potencia expresada en parámetros físicos

La potencia extraída puede ser expresada como:

$$P = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A_d$  es el área barrida por las aspas,  $U_\infty$  es la velocidad de flujo libre y  $a$  es el factor de inducción de flujo axial (típicamente su valor es de 1/3)

Teniendo en cuenta (1), el coeficiente de potencia se puede expresar como:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} \quad (2)$$

Reemplazando (1) en (2), eliminando términos y simplificando, se halla la siguiente expresión del coeficiente de potencia:

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (3)$$

Derivando la expresión (3) e igualando a cero

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (4)$$

Evaluando con  $a = 1/3$ , se obtiene:

$$C_P = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (5)$$

La máxima potencia extraíble en aerogeneradores se limita a 59,3% de la energía eólica disponible [21]. Esto es conocido como límite de Betz, que proporciona la máxima aerodinámica alcanzable.

La potencia extraída también puede ser expresada como:

$$P_S = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_P(\lambda, \beta) v^3 \quad (6)$$

Donde  $\rho$  denota la densidad del aire,  $R$  es el radio del rotor,  $v$  es la velocidad del viento antes de interactuar con la turbina y  $C_P(\lambda, \beta)$  es la eficiencia aerodinámica, que es una función no lineal de la relación velocidad-punta (TSR)  $\lambda$  y el ángulo de inclinación de la cuchilla  $\beta$ . TSR se define como:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (7)$$

Donde  $\Omega$  denota la velocidad angular del rotor, R es el radio del rotor y  $v$  representa la velocidad del viento entrante.

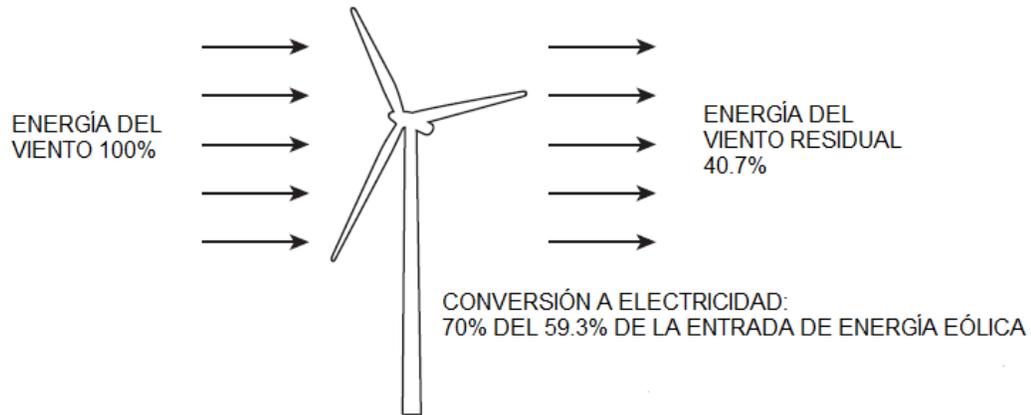


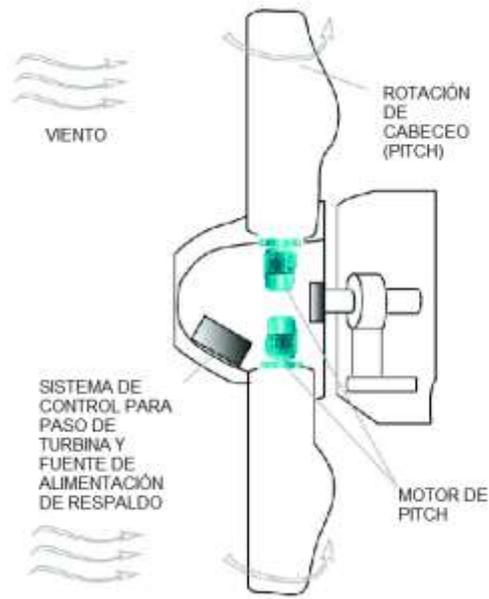
Figura 3. Límite de Betz en un aerogenerador de eje horizontal [13]

### 1.3 Cambio en la potencia y velocidad angular según los ángulos de ataque del viento

Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética proveniente del viento en energía eléctrica. La potencia de salida resultante de la rueda de viento, que absorbe energía del viento, puede ser representada por la siguiente fórmula:

$$P_s = k C_p v^3 \cos^3(\theta) \quad (8)$$

En la fórmula 8,  $k$  significa el coeficiente determinado por la densidad del aire y  $C_p$  el área barrida del rotor.  $\theta$  significa la diferencia entre el ángulo de giro y el ángulo de la dirección del viento. Dado que  $k$  y  $C_p$  son constantes, la potencia se ve afectada principalmente por la velocidad y dirección del viento. Si se determina la velocidad del viento y el  $\theta$  aumenta, la potencia será menor. Cuando  $\theta = 0^\circ$ , el plano de rotación de la turbina eólica es perpendicular a la dirección del viento, y la potencia alcanza el máximo. Cuando  $\theta = 90^\circ$ , el plano de rotación de la rueda del viento es paralelo a la dirección del viento, y la potencia se reduce a cero. [7] Dependiendo de la velocidad del viento es importante para aumentar la vida útil de aerogenerador, implementar un control de paso en las aspas, esto queda representado en la figura 4.



*Figura 4. Control de cabeceo de las aspas [26]*

#### **1.4 Regiones de operación según la velocidad del viento**

Como se observa en la figura 4 hay tres regiones de operación distintas, la región de velocidad de corte (I), entre el corte y por debajo de la velocidad nominal del viento (II), la región por encima de la velocidad nominal (III) y una última que sería la que supera la velocidad máxima permitida para evitar exceso de cargas mecánicas.

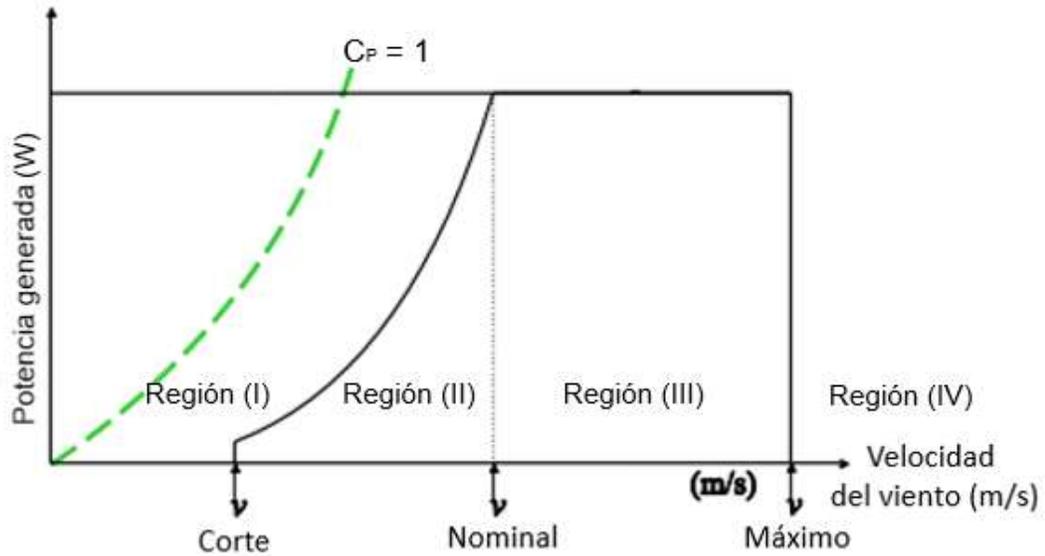


Figura 5. Curva de potencia de aerogenerador de velocidad variable generalizada  
Fuente: Autor

### 1.5 Teoría del elemento del aspa

Se supone que las fuerzas sobre un elemento de cuchilla pueden calcularse mediante características de perfil aerodinámico bidimensional utilizando un ángulo de ataque determinado a partir de la velocidad resultante incidente en el plano de sección transversal del elemento; el componente de velocidad en la dirección del tramo se ignora. Los efectos tridimensionales también se ignoran. Los componentes de velocidad en una posición radial en la pala expresados en términos de la velocidad del viento, los factores de flujo y la velocidad de rotación del rotor determinarán el ángulo de ataque.

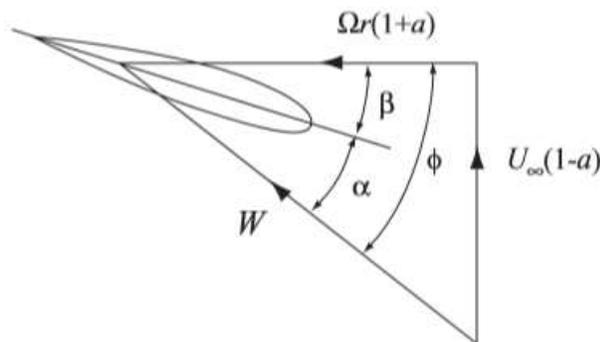


Figura 6. Análisis de componentes vectoriales de la velocidad del aspa [Burton]

A partir de la figura 6, se puede hallar la siguiente expresión.

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1 - a)^2 + \Omega^2 r^2(1 + a')^2} \quad (9)$$

Donde  $U_{\infty}$  es la velocidad de flujo libre,  $a$  es el factor de inducción de flujo axial (típicamente su valor es de 1/3),  $\Omega$  es la velocidad angular del rotor,  $r$  es el radio del aspa y  $W$  es la velocidad del viento relativa a un punto en la pala giratoria

### 1.6 Determinación del par y la potencia del rotor

El coeficiente de potencia es

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 \pi R^2} \quad (10)$$

El coeficiente de potencia máxima se produce en una relación de velocidad de punta para la cual el factor de inducción de flujo axial  $a$ , que en general varía con el radio, se aproxima más al valor límite de Betz de 1/3. En la Figura () se muestra una curva de rendimiento típica para una turbina eólica moderna de alta velocidad.

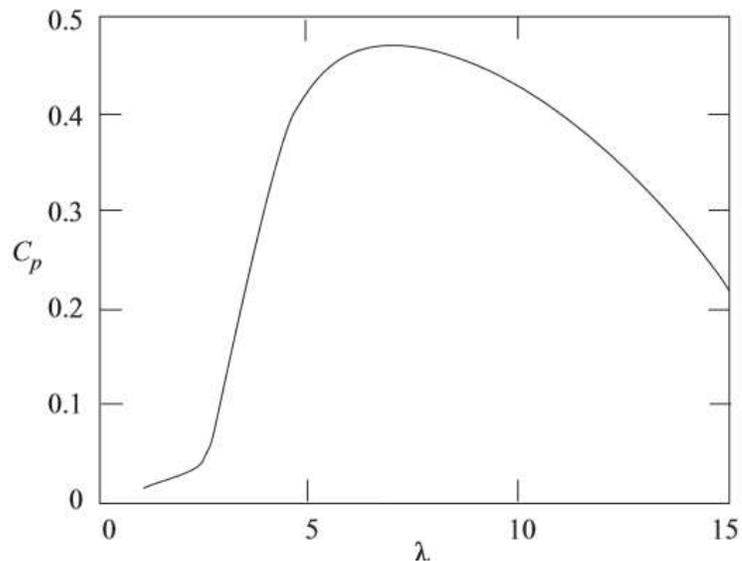


Figura 7. Coeficiente de potencia: curva de rendimiento de la relación de velocidad de la punta [Burton]

## **1.7 Aerodinámica de una turbina eólica teniendo en cuenta cambios en el ángulo de yaw**

El eje del rotor de un aerogenerador generalmente no está alineado con el viento porque el viento está cambiando continuamente de dirección; el rotor no es capaz de seguir esta variabilidad y, por lo tanto, pasa la mayor parte de su tiempo en una condición de guiñada. El rotor de guiñada es menos eficiente que el rotor sin guiñada y, por lo tanto, es vital evaluar la eficiencia con el fin de estimar la producción de energía. En la condición de guiñada, incluso en un viento constante, el ángulo de ataque en cada pala cambia continuamente a medida que gira y las cargas en las palas del rotor fluctúan, causando daños por fatiga. Los cambios en el ángulo de ataque significan que las fuerzas de la cuchilla causan no solo un empuje en la dirección axial, sino también momentos sobre el eje de guiñada ( $z$ ) y el eje de inclinación. Incluso si el rotor está operando con una velocidad inducida uniforme sobre el disco del rotor cuando está alineado con un viento constante, una vez que el rotor está desalineado, la velocidad inducida varía tanto de forma azimutal como radial, lo que hace que su determinación sea mucho más difícil.

## **1.8 Teoría del impulso para un rotor de turbina en orientación constante**

La aplicación de la teoría del impulso a un disco actuador que representa un rotor con guiñada es algo problemática. La teoría del impulso solo es capaz de determinar una velocidad inducida promedio para todo el disco del rotor, pero, aunque en el caso rotor sin guiñada la restricción se relajó para permitir alguna variación radial, no sería apropiado hacerlo en el caso de guiñada porque la circulación de la cuchilla también está cambiando con la posición de azimut. Si se asume que la fuerza en el disco del rotor, que es una fuerza de presión y, por lo tanto, normal al disco, es responsable de la velocidad de cambio del impulso del flujo, entonces la velocidad promedio inducida también debe estar en una dirección en ángulos rectos al plano del disco, es decir, en la dirección axial. Por lo tanto, la estela se desvía hacia un lado porque un componente de la velocidad inducida está en ángulos rectos a la dirección del viento. Como en el caso de no guiñadas, la velocidad promedio inducida en el disco es la mitad que en la estela. Deje que el eje del rotor se mantenga en un ángulo de giro a la dirección constante del viento, luego, suponiendo que la tasa de cambio de momento en la dirección axial es igual a la tasa de flujo de masa a través del disco del rotor por el cambio de hora. Velocidad normal al plano del rotor.

Tomando el coeficiente de potencia en función del ángulo de yaw como:

$$C_p = 4a(\cos\theta - a)^2 \quad (11)$$

Para encontrar el valor máximo de CP, se diferencia la ecuación (2) con respecto a  $a$  y se establece un valor igual a cero, cuando  $a = \frac{\cos(\theta)}{3}$

$$C_p = \frac{16}{27} \cos^3\theta \quad (12)$$

En la figura 8 se muestra como al ir variando el ángulo del azimut (orientación respecto al norte) en un aerogenerador sin control de yaw, se va creando un momento, que no va a colaborar con el movimiento de las aspas, y en cambio va a generar vibraciones no deseadas en la torre y góndola, con un desperdicio de energía proveniente del viento que podría usarse en generar electricidad. Es evidente que cuando el desfase angular es cada vez más grande, más momento no deseado se crea.

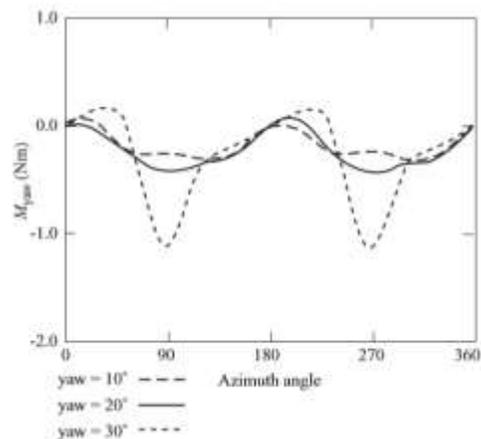


Figura 8. Variación del azimut vs momento de guiñada [Fuente: Wind Energy Handbook]

Además de las fuerzas circulatorias, hay fuerzas en el perfil aerodinámico causadas por la inercia del aire circundante que se acelera a medida que el perfil aerodinámico acelera en su movimiento

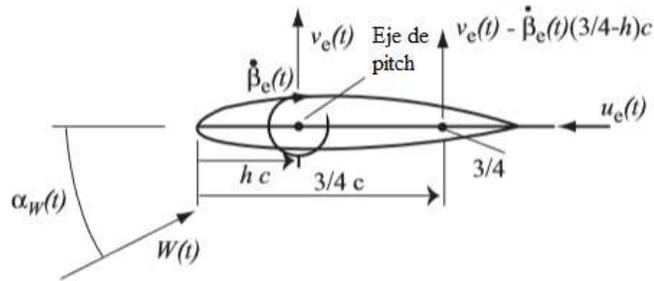


Figura 9. Flujo inestable y velocidades estructurales adyacentes a una cuchilla de rotor [Fuente: Wind Energy Handbook]

$$M_m = -\frac{1}{128} \pi \rho c^4 \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} \quad (13)$$

De la ecuación 13 se puede concluir se puede utilizar esta propiedad aerodinámica para arrancar la máquina cuando este a bajas velocidades variando el ángulo  $\beta$ .

### 1.9 Fuentes de carga

Las fuentes de carga que deben tenerse en cuenta pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Cargas aerodinámicas
- Cargas gravitacionales
- Cargas de inercia (incluidos los efectos centrífugos y giroscópicos)
- Cargas operacionales que surgen de las acciones del sistema de control (por ejemplo, frenado, giro, control de inclinación de la pala, desconexión del generador)

Los casos de carga seleccionados para el diseño de carga final deben cubrir combinaciones realistas de una amplia gama de condiciones de viento externo y estados de la máquina. Es una práctica común distinguir entre condiciones de viento normales y extremas, por un lado, y entre estados normales de la máquina y estados de fallas, por el otro. Los casos de carga para el diseño se eligen entre:

- Condiciones normales del viento en combinación con estados normales de la máquina

- Condiciones normales del viento en combinación con estados de falla de la máquina
- Condiciones extremas del viento en combinación con estados normales de la máquina.

Para garantizar que la turbina eólica produzca la máxima cantidad de energía eléctrica en todo momento, el mecanismo de giro se utiliza para mantener el rotor orientado hacia el viento a medida que cambia la dirección de este. El sistema de giro por guiñada (yaw) se encuentra entre la góndola y la torre.

### 1.10 Vibraciones inestables causadas por el control de tono variable (pitch) de velocidad fija.

La ecuación 14 representa el modelo matemático de la fuerza sobre las aspas en función del ángulo de pitch y de la velocidad del viento.

Donde  $B$  representa el ángulo de las aspas,  $v$  la velocidad del viento,  $\lambda$  es la eficiencia característica y  $d$  es el amortiguamiento

$$F(\beta, v) = F_0 + \frac{\partial F}{\partial \beta} d\beta + \frac{\delta F}{\delta v} dv \quad (14)$$

Considerando la fuerza según el principio de Bernoulli:

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_T(\lambda, \beta) v^2 \quad (15)$$

Se reemplaza en la ecuación 14 y se resuelve

$$F(\beta, v) = F_0 - \frac{F_0}{\beta_0} \frac{\frac{\partial C_T}{\partial \beta}}{\frac{C_T}{\beta}} k_1 \Delta \dot{x} - \frac{F_0}{v_0} \left[ 2 - \frac{\frac{\partial C_T}{\partial \lambda}}{\frac{C_T}{\lambda}} \right] \Delta \dot{x} \quad (16)$$

La ecuación 17 muestra que, bajo el control de paso variable de velocidad fija, la amortiguación de la vibración axial de las turbinas de viento no cambia. [18]

$$d_\beta = d + k \frac{F_0}{\beta_0} \frac{\frac{\partial C_T}{\partial \beta}}{\frac{C_T}{\beta}} + \frac{F_0}{v_0} \left( 2 - \frac{\frac{\partial C_T}{\partial \lambda}}{\frac{C_T}{\lambda}} \right) \quad (17)$$

### **1.11 Fatiga**

La fatiga es producida por los ciclos de carga constantes a los que están expuestos los materiales, para el caso del aspa, el cual se considera un elemento delgado, la fatiga se puede generar por las fuerzas de gravedad, fuerzas giroscópicas o las fuerzas producidas por el viento. Para determinar el número de ciclos de carga para un aerogenerador durante su tiempo de vida se puede estimar con ayuda del diagrama de Goodman

### **1.12 Investigaciones anteriores**

En 1997 se diseñó un sistema de control basado en tres controladores difusos, cada uno con un objetivo diferente. El primero, sigue la velocidad del generador con la velocidad del viento para extraer la máxima potencia. El segundo, programa el flujo de la máquina para el mejoramiento de la eficiencia con cargas ligeras. El tercero, entrega un control de velocidad robusto contra las ráfagas de viento y el torque oscilatorio de la turbina. [9]

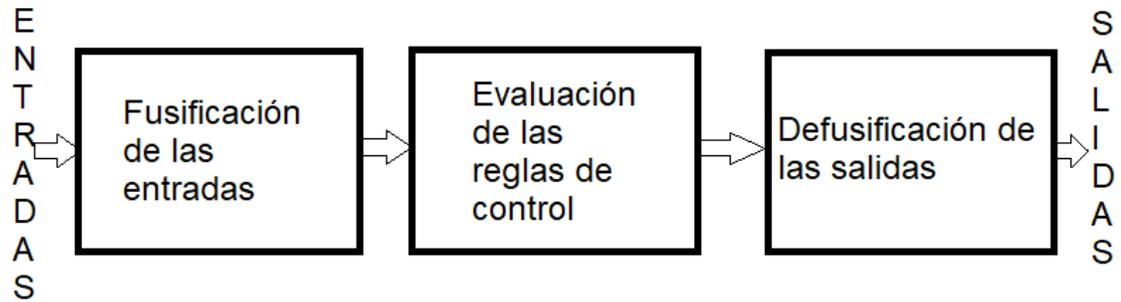
Métodos de control como el  $h$  infinito y el control adaptativo también se han querido implementar en este sistema, pero debido a su alto costo computacional no parecen ser la herramienta más adecuada para esta ocasión. En general el modelo difuso más sencillo de implementar es el tipo Takagi-Sugeno, debido a que el cálculo de la salida tiene un costo computacional mucho menor que el modelo Mandami

Es necesario utilizar dos sensores, uno conocido como Valeta que permita saber la dirección del viento y otro llamado anemómetro que otorga la velocidad del viento, y una será la salida compuesta por un servomotor. Los aerogeneradores tripalas son los más utilizados y la razón principal de su uso es el momento de inercia constante del rotor para todo el ángulo circunferencial del acimut respecto a los movimientos en operaciones alrededor del eje longitudinal de la torre (orientación). Todos los rotores con tres o más palas tienen esta favorable propiedad. Una turbina eólica tripala tiene un momento de inercia nulo en su giro, por consiguiente, no induce ninguna carga sobre la estructura lo que deviene en una simplificación estructural y reducción de los costos de fabricación. [10]

Para el análisis de sistema de control se puede utilizar la herramienta SISOTOOL Control System Designer de Matlab donde es posible usar RootLocus, además es necesario usar la herramienta fuzzyLogicDesigner para simular el control difuso.

Para el sistema difuso se puede utilizar el S7-300. En [12] y [13] se presenta una metodología para la implementación de controlador difuso Takagi-Sugeno en PLC s7-300. La elección del esquema Takagi-Sugeno se debe a su menor costo computacional comparado con el sistema difuso tipo Mandami [14]. Los pasos de

aplicación de un modelo difuso son: fusificación de las entradas, evaluar las funciones de pertenencia de cada entrada de acuerdo con el valor fusificado, evaluación de las reglas, cálculo y defusificación de la salida. Los pasos de fusificación y defusificación consisten en llevar los valores de entrada y salida a una escala definida en el sistema difuso.



*Figura 10. Diagrama de bloques de un control difuso [13]*

En 2013 se desarrolló un sistema inalámbrico para la supervisión y control de un aerogenerador en la Universidad de Pamplona [15], este utilizaba una placa Arduino y se enfocaba en la comunicación usando módulos XBee.

### 1.13 Sensores

La velocidad angular del rotor y la dirección del viento son los dos parámetros clave para caracterizar las condiciones del viento. Su medición precisa es esencial para la operación eficiente de las turbinas eólicas. La precisión afectará la eficiencia de generación y los ingresos de los propietarios de parques eólicos. [20].

#### 1.13.1 Veleta



*Figura 11. Sensor de dirección del viento PCE-FST-200-202 [Fuente: [www.pce-instruments.com](http://www.pce-instruments.com)]*

La veleta o sensor de dirección de viento mide la dirección de viento y transmite el valor de medición de forma analógica. Gracias a su montaje sencillo, el sensor de dirección de viento puede adaptarse a numerosos instrumentos de medición. El sensor de dirección de viento empieza a medir a partir de los movimientos del viento más insignificantes y transmite directamente los valores medidos. El sensor de dirección de viento mide ya a partir de una velocidad del viento inferior a 0,8 m/s. El sensor de dirección de viento se presenta en diferentes versiones, en función de la señal de salida. El sensor de dirección de viento está disponible con una salida de 4 a 20 mA y otra de 0 a 10 V DC. Los sensores de dirección de viento pueden soportar condiciones climáticas adversas, debido a su construcción. El sensor de dirección de viento tiene una aleación de metal, que le protege contra la oxidación en el aire, evitando así que se oxide. Las partes más sensibles del sensor de dirección de viento están protegidas por sellados frente al agua y otras partículas, como, por ejemplo, micropartículas de polvo.

- Aleaciones metálicas
- Protección mediante varios sellados
- Montaje sencillo

- Gran resistencia
- Medición directa de la dirección de viento
- Medición desde velocidad del viento mínima

Especificaciones técnicas	Valor
Alimentación operativa	12-36 VDC
Rango de medición	0-360°
Precisión	±3°
Señal de salida	0-5V

Tabla 13. Características del sensor de dirección del viento

**1.13.2 Encoder Incremental:** Al tener un alto coste y difícil acceso en Colombia los sensores medidores de la velocidad con salida analógica, se propone utilizar un Encoder incremental, que envíe sus pulsos al PLC y por medio de programación en este, se convierta y escale la señal a los valores requeridos. [19]



Figura 12. Encoder incremental NPN

### **1.14 Definición de los objetivos del control**

El objetivo principal del controlador de bucle cerrado generalmente se puede establecer de manera bastante simple. Por ejemplo, el objetivo principal del controlador de inclinación puede ser limitar la potencia o la velocidad del rotor en vientos fuertes. Puede haber más de un objetivo "primario", como en el caso de que el controlador de tono o par también se use para optimizar la captura de energía en vientos bajos. Sin embargo, dado que el controlador también puede tener un efecto importante en las cargas estructurales y las vibraciones, es vital tenerlas en cuenta al diseñar el algoritmo de control. Por lo tanto, una descripción más completa de los objetivos del controlador de tono podría ser:

- Regular el par aerodinámico en velocidades de viento superiores a las nominales;
- Minimizar los picos en el par de la caja de engranajes;
- Evitar la actividad excesiva del tono;
- Minimizar las cargas de la base de la torre en la medida de lo posible mediante el control de la vibración de la torre, y
- Evitar exacerbar las cargas del cubo y de la raíz de la pala.

Claramente, algunos de estos objetivos entran en conflicto con otros, por lo que el proceso de diseño de control implicará inevitablemente cierto grado de compensación u optimización. Para hacer esto, es necesario poder cuantificar los diferentes objetivos. Por lo general, es casi imposible hacer esto con precisión, ya que las diferentes cargas pueden afectar no solo los costos de los diferentes componentes (a veces de formas complejas) sino también su confiabilidad. Incluso la compensación entre la captura de energía y el costo de los componentes no es sencilla, ya que dependerá del régimen de viento, la tasa de descuento y el conocimiento de los precios futuros para la venta de electricidad. Por lo tanto, siempre se requerirá cierto grado de juicio para llegar a un diseño de controlador aceptable.

### **1.15 Control en lazo cerrado: métodos de diseño analítico**

Claramente, la elección de las ganancias del controlador es crucial para el rendimiento del controlador. Con una ganancia general muy pequeña, la turbina vagará alrededor del punto de ajuste, mientras que demasiada ganancia puede hacer que el sistema sea completamente inestable. Las combinaciones inadecuadas de ganancias pueden provocar que las respuestas estructurales se exciten.

En la figura 13 se expresa el esquema general de control por medio de diagrama de bloques, esta representación es muy importante para entender el sistema, el viento entra al bloque de derivadas parciales aerodinámicas que básicamente es el modelo dinámico del sistema de las aspas y el rotor, éste viene controlado por el bloque del actuador de pitch, a su parte derecha está su conexión con el tren motriz que a su vez lleva su movimiento rotacional al generador.

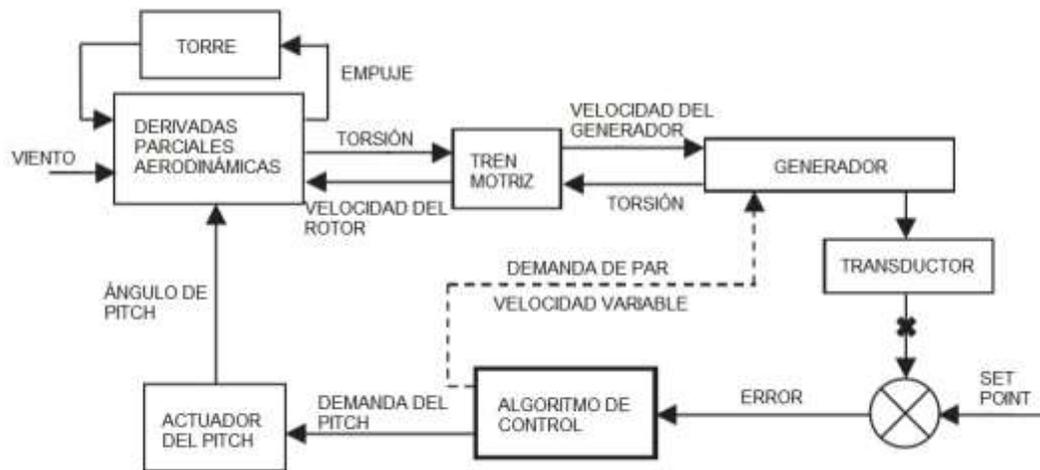


Figura 13. Esquema general de control [Burton].

## 2. DESARROLLO DEL AEROGENERADOR

Para el diseño de las palas, es necesario tener en cuenta la normativa de la IEC (International Electrotechnical Commission) que expresa los requerimientos de diseño de un aerogenerador de eje horizontal. El modo de funcionamiento fue a barlovento, ósea que el aire llegará de frente, ya que con esto se consigue una mayor eficiencia en la transformación de energía. El control activo de yaw, no es necesario implementar en aerogeneradores con potencias inferiores a los 3KW, ya que, con la veleta en la cola del mismo, se puede seguir la dirección del viento, pero para potencias mayores, la fuerza ejercida por la veleta no es suficiente para mover toda la góndola y las aspas, por lo tanto “es necesario implementar un sistema de control, al que se le puede agregar el pitch, logrando así optimizar el funcionamiento” (hipótesis del autor)

### 2.1 Descripción de los sistemas de control y seguridad.

Una función principal del sistema de control es mantener los parámetros operativos de la máquina dentro de sus límites normales. El propósito del sistema de seguridad (denominado "sistema de protección" en IEC 61400-1) es garantizar que, en caso de que un parámetro de operación crítico exceda su límite normal como resultado de una falla o falla en la turbina eólica o el sistema de control, la máquina se mantiene en condiciones seguras. Normalmente los parámetros críticos de funcionamiento son:

- Velocidad de rotación de la turbina
- Potencia de salida
- Nivel de vibración
- Giro de los cables colgantes que se extienden hacia la góndola.

Para cada parámetro es necesario establecer un nivel de activación en el que se activa el sistema de seguridad. Esto debe establecerse en un margen adecuado por encima del límite de operación normal para permitir que el sistema de control lo supere, pero suficientemente por debajo del valor de seguridad máximo del parámetro para permitir que el sistema de seguridad lo reinicie. La velocidad del rotor en el sistema de seguridad que se activa es una entrada clave para el caso de carga de diseño que involucra exceso de velocidad del rotor.

<b>Material de las palas</b>	Fibra de vidrio
<b>Altura de la torre</b>	Entre 90 y 120 metros
<b>Velocidad de arranque del viento</b>	5 m/s
<b>Velocidad nominal del viento</b>	10 m/s
<b>Velocidad máxima del viento</b>	20 m/s

Tabla 1. Parámetros de diseño

## 2.2 Diseño aerodinámico con Flow simulation

Para determinar las características generales del modelo, se desarrolló un modelo simplificado en SolidWorks que permita conocer el comportamiento del aerogenerador ante determinadas corrientes de viento y cargas mecánicas. Se trabaja con un modelo tripala de eje horizontal puesto que este es el de mayor eficiencia energética y no presenta momentos de inercia que puedan afectar la durabilidad de la estructura mecánica, como si lo hacen los modelos monopala y bipala.

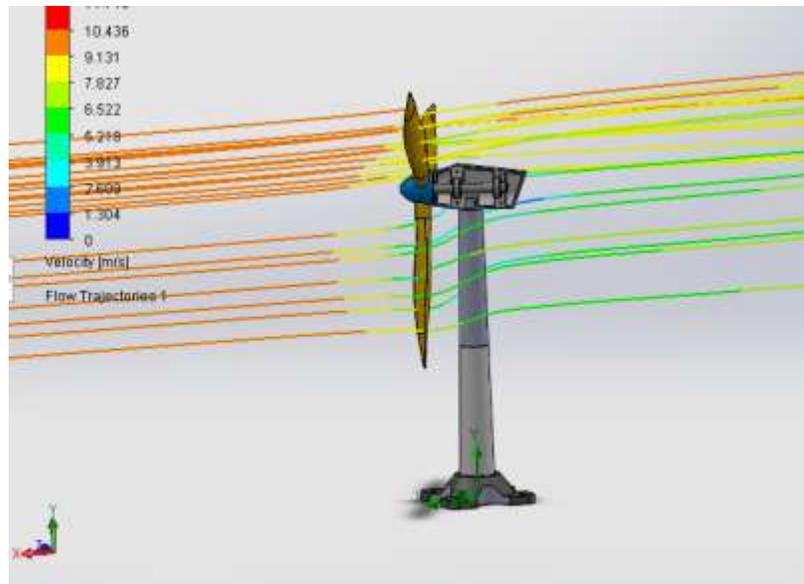


Figura 14. Modelo en SolidWorks [Autor]

Al analizar las cargas por fatiga, se concluye que es necesario implementar un diseño de la pala de tal forma que la carga se distribuya en toda el área de la pala sin que haya punto con esfuerzos considerables que puedan producir una posible fractura o fluencia del material. Adicionalmente, se debe estar presente un control de pitch para cada pala, de modo que, al haber demasiada carga sobre las palas debido al exceso de velocidad del viento, las palas se orienten permitiendo disminuir las presiones provocadas por el principio de Bernoulli.

El par generado por una fuerza en un tramo de la pala es proporcional al radio de la sección al eje de giro, de esto se puede afirmar que, en los extremos de las palas es donde se crearan los mayores pares, y, por ende, los mayores esfuerzos. (Hipótesis del autor)

Un problema de operatividad de los aerogeneradores, es que, al presentarse tormentas, con vientos demasiado fuertes, la estructura puede ir deteriorándose o inclusive fracturarse momentáneamente.

Para saber las características apropiadas que deben tener las palas para cumplir con los 2MW de energía eléctrica a producir en condiciones nominales, se hará uso del Principio de Bernoulli, aplicado para el cálculo de la fuerza y potencia producida según las características físicas del sistema:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A_D V^2 \quad (18)$$

$F_D$  es la fuerza con la que se hace girar cada pala,  $\rho$  representa la densidad del aire,  $A_D$  es el área de cada aspa y  $V$  es la velocidad del viento.

$$P_D = F_D V_D = \frac{1}{2} \rho A_D V^3 \quad (19)$$

Teniendo en cuenta, que la potencia máxima que se desea obtener es de 2MW, a una velocidad del viento de 20m/s, es posible calcular el área que debe tener cada pala.

Partiendo de (19), se despeja el área

$$A_D = \frac{2P_D}{\rho V^3} = \frac{2(2MW)}{\left(1,225 \frac{kg}{m^3}\right) \left(20 \frac{m}{s}\right)^3} = 408,163m^2 \quad (20)$$

El área obtenida, se divide en tres, puesto que se utilizará un modelo tripala

$$A_P = \frac{408,163m^2}{3} = 136,054 \quad (21)$$

El ancho de las aspas estará dado por:

$$a = \sqrt{\frac{136,054m^2}{30}} = 2,13m \quad (22)$$

Se puede afirmar que el largo de las aspas debe ser de:

$$L = 30a = 63,887m \quad (23)$$

Como material de las aspas se selecciona la fibra de vidrio gracias a su resistencia a la erosión, baja densidad, bajo mantenimiento, aislamiento eléctrico y bajo coeficiente de expansión térmica. Al ser un material plástico, no van a haber deformaciones parciales, al aumentar la fuerza del viento, por eso es mejor que utilizar materiales metálicos en este caso. Es necesario tener en cuenta que este material no posee límite elástico, al ser plástico, solo presenta límite de fractura de 170Mpa y un coeficiente de poisson de 0,32.

Con base en (24), se calcula la fuerza producida por el viento a 20m/s

$$F_D = 2 \left( 1,225 \frac{kg}{m^3} \right) (816,326m^2) \left( 20 \frac{m}{s} \right)^2 (0,5)(1 - 0,5) = 200kN \quad (24)$$

En la figura 15, se presentan los resultados del análisis de esfuerzos ,al aplicar un par de fuerzas (representadas por los vectores morados), se puede concluir que la base de la pala es la que mayores tensiones debe soportar, por lo tanto, debe tener mayor área en esta sección, lo cual fue tenido en cuenta en este diseño ya que esta parte tiene una sección cilíndrica, haciéndola más compacta, mientras que en el resto del aspa se le da prioridad a la aerodinámica.

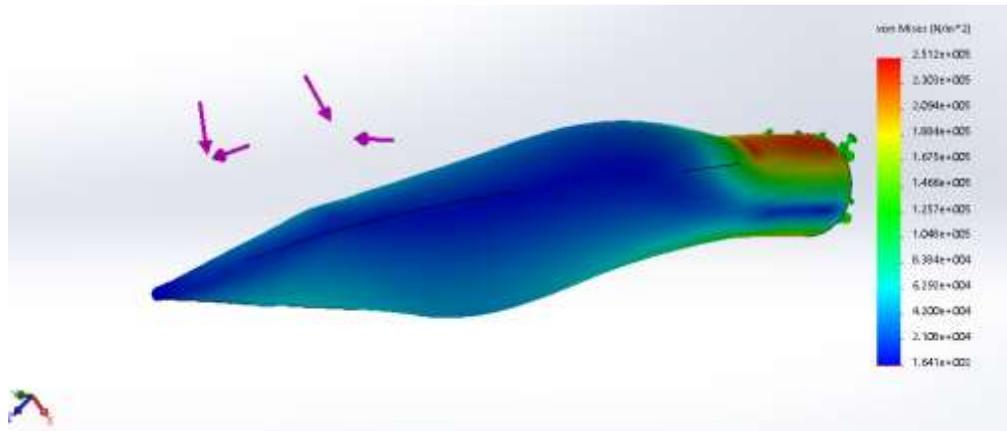


Figura 15. Análisis de esfuerzos a 20m/s [Autor]

En la figura 16, se presentan los resultados del análisis de deformaciones, la máxima deformación (en rojo) es de 5mm, lo cual considerando el enorme tamaño del aspa es insignificante, por lo tanto, si resiste a vientos de 20 m/s sin complicaciones, pero por seguridad no es aconsejable que se le permita resistir cargas superiores. A continuación, se muestran las simulaciones para un viento de 30 m/s.

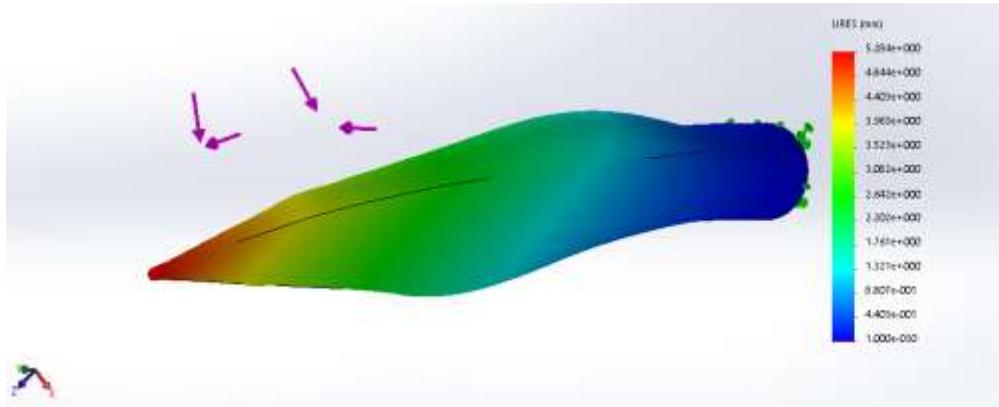
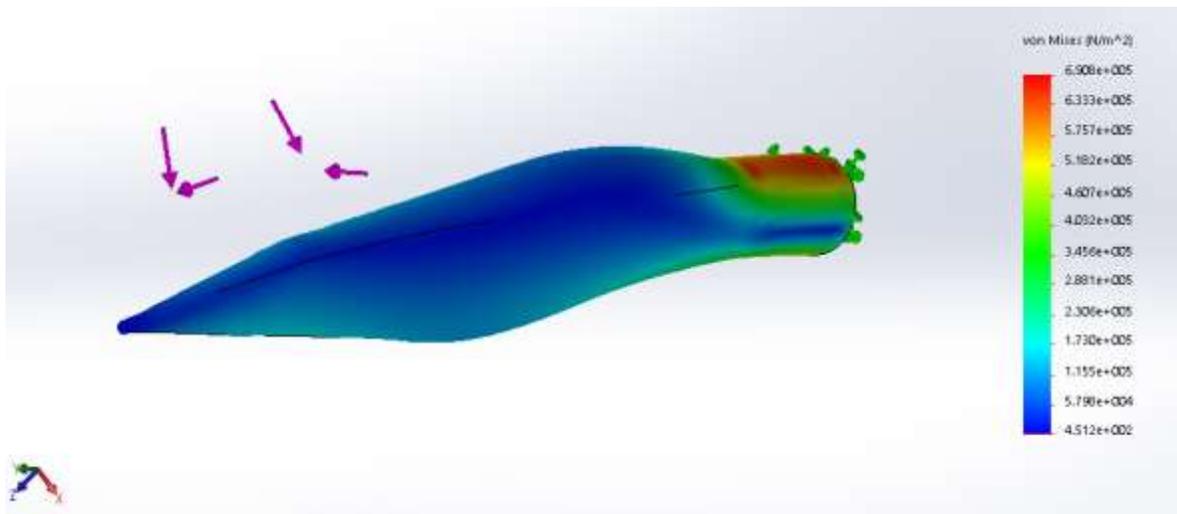


Figura 16. Análisis de deformaciones a 20m/s [Autor]

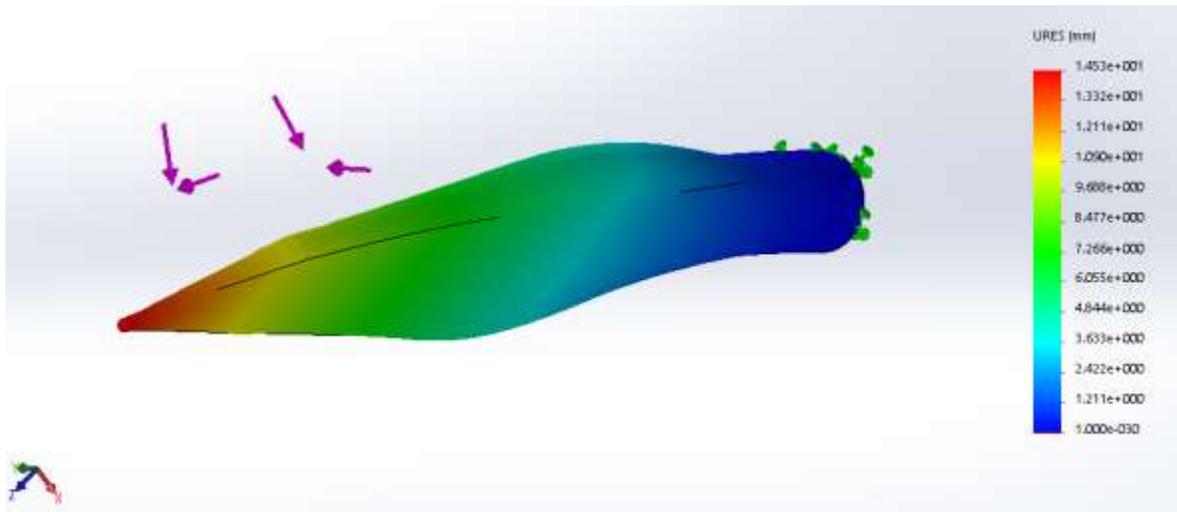
La fórmula 25, presenta el hallazgo de la fuerza sobre cada aspa, al tener la velocidad del viento una magnitud de 30m/s

$$F_D = 2 \left( 1,225 \frac{kg}{m^3} \right) (816,326m^2) \left( 30 \frac{m}{s} \right)^2 (0,5)(1 - 0,5) = 550kN \quad (25)$$



*Figura 17. Análisis de esfuerzos a 30m/s [Autor]*

En la figura 18 se puede apreciar que el máximo desplazamiento es de 1.5cm, lo cual ya es una deformación que afectará la vida útil, ya que aumentará las probabilidades de fatiga en el material, por lo tanto, el sistema de control no puede permitir que las aspas estén girando a velocidades mayores de 20m/s.



*Figura 18. Análisis de deformaciones a 30m/s [Autor]*

Un aerogenerador típico está sujeto a un régimen de carga por fatiga severa. El rotor de una máquina de 2000 kW girará unas  $666 \times 10^6$  veces durante una vida útil de 20 años, y cada revolución provocará una inversión completa de la tensión gravitatoria en el eje de baja velocidad y en cada pala, junto con un ciclo de cuchillas fuera de plano carga debido a los efectos combinados de cizalladura del viento, error de giro, inclinación del eje, sombra de la torre y turbulencia. Por lo tanto, el

diseño de los componentes del aerogenerador se rige por la fatiga en lugar de por la carga final. El espectro de carga de fatiga de diseño debe ser representativo de los ciclos de carga experimentados durante la producción de energía en todo el rango de velocidad de viento operacional, con los números de ciclos ponderados de acuerdo con la proporción de tiempo empleado en generar cada velocidad de viento. Para completar, los ciclos de carga que se producen en el inicio y el apagado también deben incluirse. En general, se supone que los casos de carga extrema ocurren tan raramente que no tendrán un efecto significativo en la vida de fatiga.

#### **2.4 Modelamiento y simulación por medio de la herramienta para análisis de elementos mecatrónicos “Simscape” a través de Simulink**

Al querer conocer un modelo matemático que describa el comportamiento de una máquina, elemento mecánico o en general la planta a controlar, ya sea por medio de una función de transferencia o un modelo de espacio de estados, habitualmente se realiza un modelamiento matemático utilizando la teoría de las ecuaciones diferenciales, física clásica, teoría de circuitos eléctricos y demás, o se realizan pruebas de campo excitando la planta para conocer su salida y así poder hacer uso de la identificación de sistemas. En este trabajo de investigación se propone utilizar las herramientas de modelos físicos Simscape que permite simular el comportamiento de gran variedad de elementos, a estos se les puede configurar sus parámetros, como resistencia, masa, inercia, amortiguamiento, longitud y demás, para luego colocarles una serie de entradas y obtener las salidas y así, simular el controlador directamente o hallar la función de transferencia y simular con esta los diferentes métodos de control que se quieran hacer. Esto es muy útil para este trabajo, ya que, al no contar con tales elementos de alto costo, se puede hacer una estimación de cómo debería ser su control.

La figura 19 muestra como la energía cinética de la masa de aire se convierte en energía de rotación (del rotor), y, por tanto, en energía mecánica del tren de potencia. Normalmente, las turbinas eólicas disponen de una caja multiplicadora de engranajes con el propósito de incrementar el número de revoluciones por minuto y así poder convertir esta energía en electricidad por medio del generador.

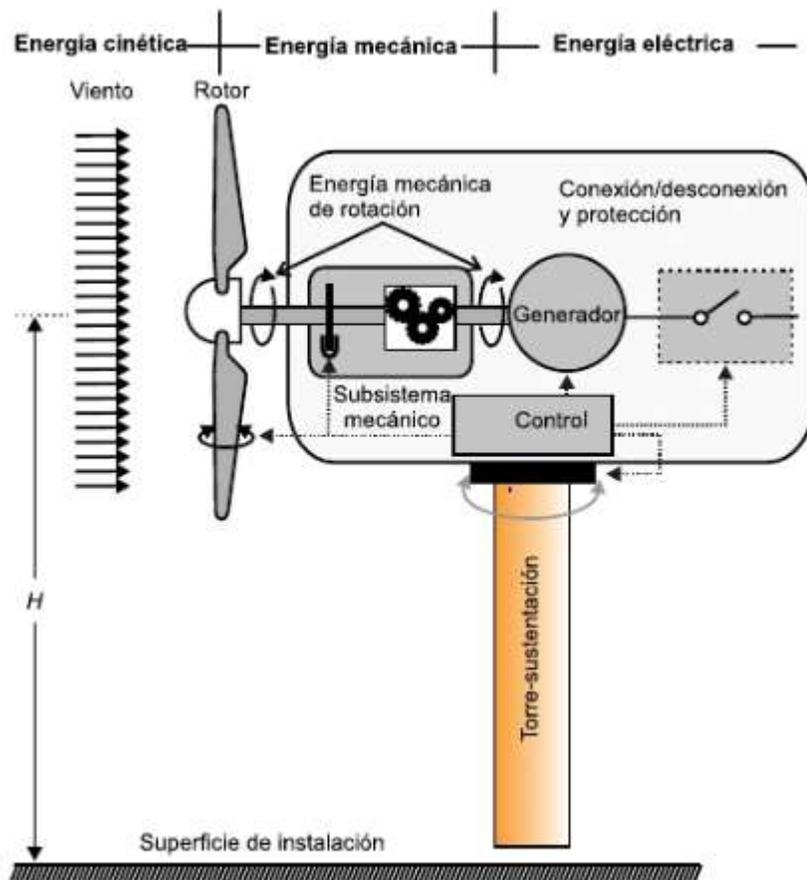


Figura 19. Transformaciones de energía de un aerogenerador [12]

La figura 20 presenta el esquema realizado en simulink de todo el sistema del aerogenerador, siendo la transformación de la figura 10 a un modelo computarizado. Se aprecia las entradas del sistema, los controladores, los modelos para las aspas, la góndola en la que se encuentran los actuadores, el tren de engranajes planetarios y el generador jaula de ardilla, y por último la torre.

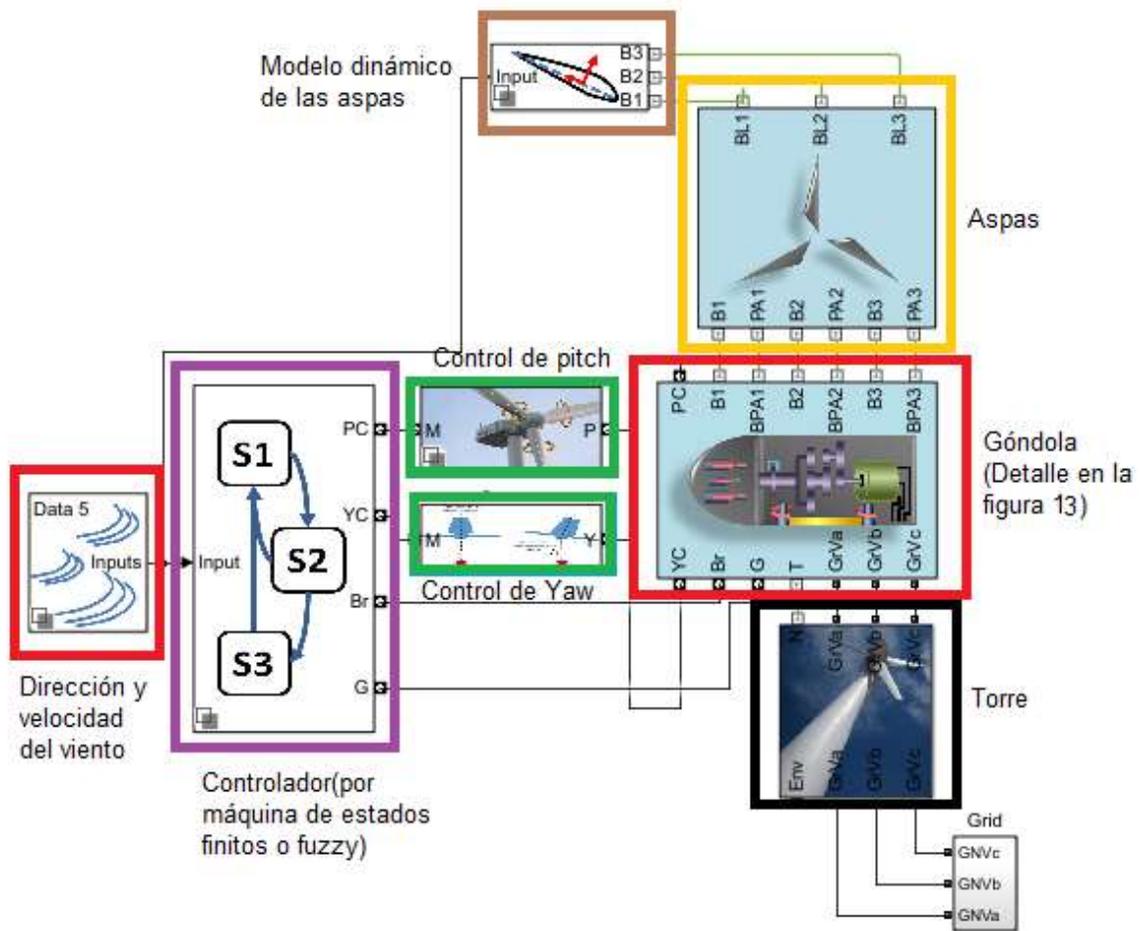
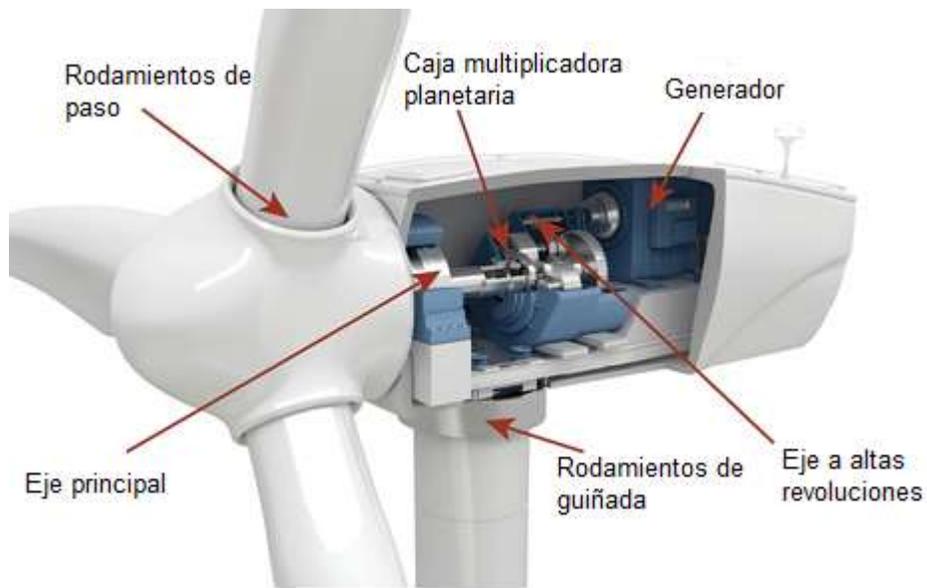


Figura 20. Esquema general de simulación [Autor]

La figura 21 muestra físicamente un modelo común en el que se basa el autor para agregar los componentes de la góndola, se aprecia el actuador por medio de cilindros de pitch, en la base los actuadores del yaw, el tren de engranajes y el generador en la parte posterior.



*Figura 21. Esquema con los componentes de la góndola [13]*

La figura 22 muestra el modelo interior de la góndola, el control de pitch recibe las señales de posición de cada una de las aspas, el control de yaw recibe el comando de control a seguir, el bloque de góndola representa el modelo dinámico de la caja como tal, el tren de engranajes multiplicador recibe el movimiento del rotor y lo manda al generador, el cual produce la respectiva energía eléctrica.

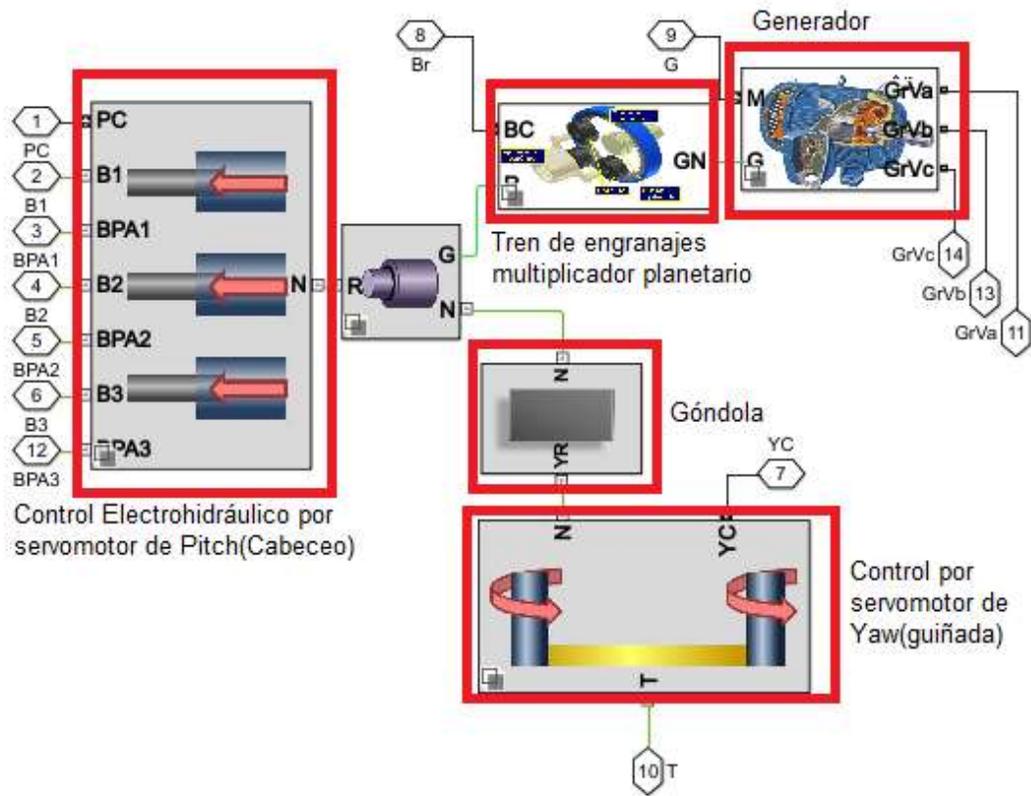


Figura 22. Esquema de la góndola en simulink [Autor]

#### 2.4.1 Componentes y parámetros físicos a utilizar:

Basándose en los datos de un aerogenerador comercial de la marca alemana “Aerodyn Engineering GmbH” se configuraron los elementos del aerogenerador, intentando acercarse lo más posibles a la realidad.

##### 2.4.1.1 Rotor

En la tabla 2 se presentan las propiedades aerodinámicas a tener en cuenta, que afectan la forma en que el aire pasa por el rotor y su tendencia a generar movimiento sobre él en la forma deseada.

<b>Característica Aerodinámica</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor empleado en la simulación</b>
Coeficiente de elevación máxima	Es un coeficiente adimensional que relaciona la elevación generada por un cuerpo de elevación con la densidad del fluido alrededor del cuerpo, la velocidad del fluido y un área de referencia asociada.	1.4
Coeficiente de arrastre	Cantidad adimensional que se utiliza para cuantificar el arrastre o la resistencia de un objeto en un entorno fluido, como el aire o el agua.	0.007
Factor de arrastre inducido	Es la resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire o el agua. Depende de la superficie del objeto.	0.004
Coeficiente de arrastre máximo	Resistencia máximo del objeto al medio fluido.	1.8

Tabla 2. Características aerodinámicas del rotor.

La tabla 3 presenta los parámetros físicos más importantes como lo son la masa, la inercia y el radio para la dinámica, y las RPM nominales, mínimas y máximas para el control.

<b>Parámetro físico</b>	<b>Valor en el Sistema Internacional</b>
Masa	8500kg
Inercia	$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Radio	2 m
Velocidad angular nominal	14.3 rpm
Velocidad angular mínima	13.58 rpm
Velocidad angular máxima	20 rpm

Tabla 3. Parámetros físicos del rotor

En la figura 23 se ilustra el modelo en Simscape para el rotor, el numeral 1 (G) es la conexión a la caja multiplicadora planetaria, el 2 a las aspas y el 3 a la góndola dirigida por los servomotores de control de guiñada. El bloque de junta revoluta representa una articulación con un grado de libertad. Las variables del bloque de detección q y w, son la posición y velocidad angular respectivamente.

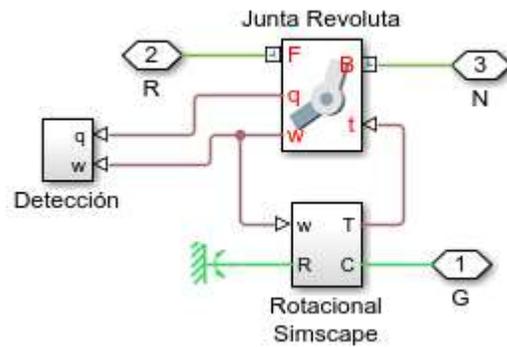


Figura 23. Modelo del rotor utilizando Simscape [Autor]

### 2.4.1.2 Torre

La figura 24 muestra la altura que se usan para las diferentes potencias utilizadas, se puede notar que para los de 2MW, se utilizan alturas entre 120 y 160 metros.

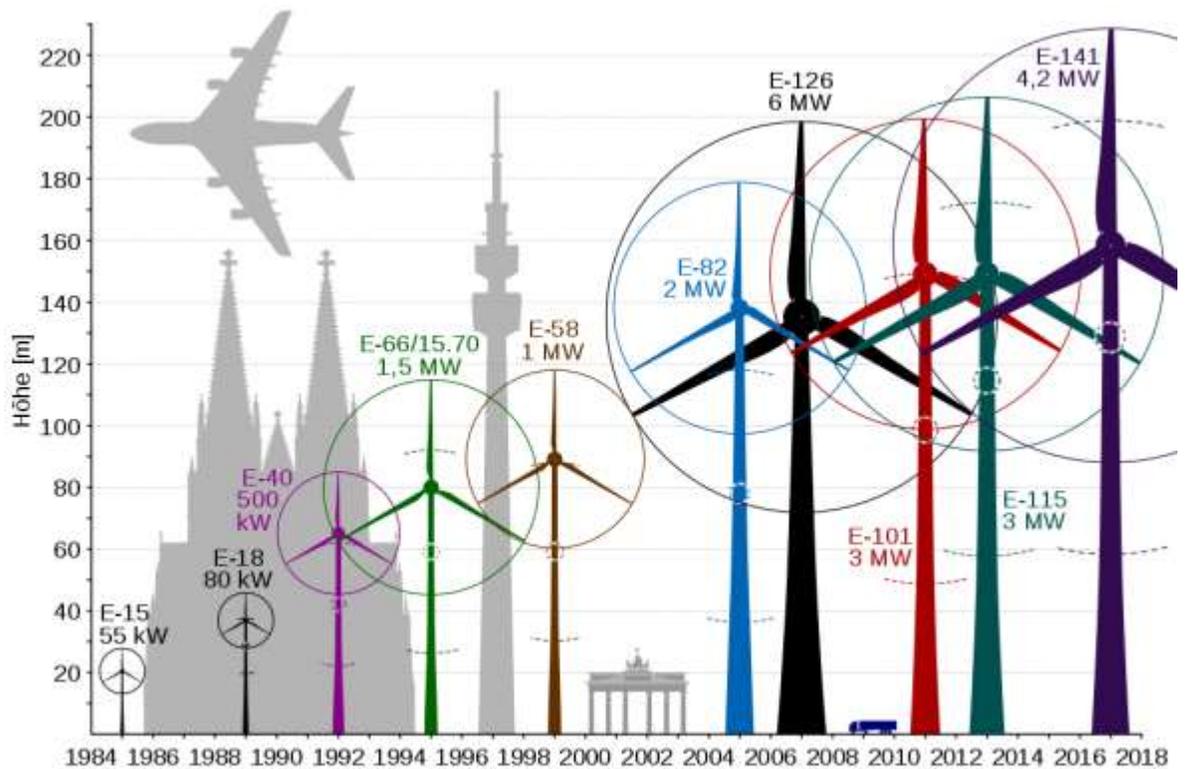


Figura 24. Rango de alturas de las torres según su potencia [16]

Parámetro físico	Valor en el Sistema Internacional
Masa	100000kg
Inercia	[100000 0 0;0 1000 0;0 0 100000]
altura	140 m

Tabla 4. Parámetros de la torre

El bloque de sólido representa la torre que combina una geometría, una inercia y masa, un componente de gráficos y marcos rígidamente unidos en una sola unidad. Un sólido es el bloque de construcción común de cuerpos rígidos. El bloque Sólido obtiene la inercia de la geometría y la densidad, de la geometría y la masa, o de un tensor de inercia que se especifique.

**2.4.1.3 Aspas:** Para la representación de las aspas, el modelo se divide en dos partes, un bloque con toda la dinámica, es decir tomando la velocidad y dirección del viento, el aspa responderá con cierto torque en favor de su movimiento angular, mientras que la geometría revela su velocidad y posición angular.

El efecto de una baja presión en la parte anterior del aspa y de una zona de mayor presión en la parte posterior da como resultado una fuerza de sustentación y otra no deseable de resistencia, como se muestra en la figura 25.

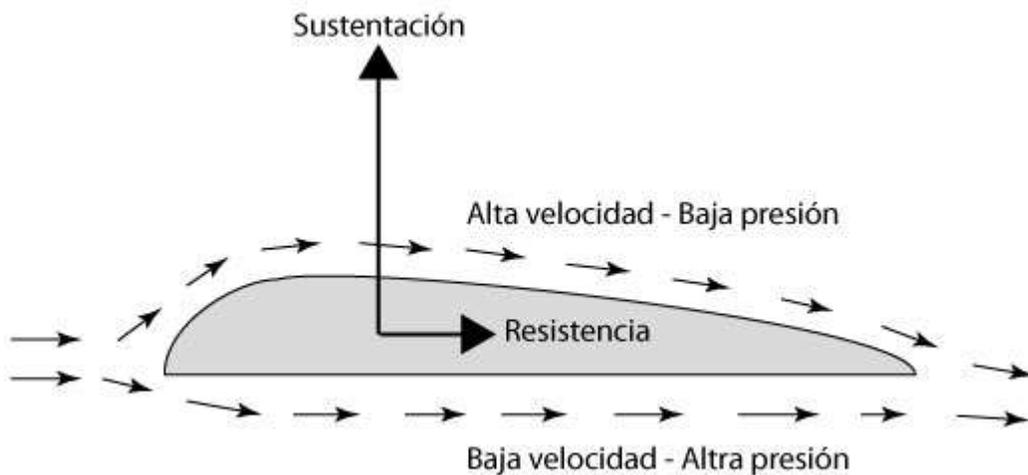


Figura 25. Fuerzas en las aspas [23]

La sustentación de un avión se explica fundamentalmente por dos razones: la primera, relacionada con el perfil del ala, es la denominada Ecuación de Bernoulli.

Básicamente, esta teoría nos dice que, si la velocidad de un fluido aumenta, su presión disminuye, y viceversa. Así, si observamos el típico perfil de ala de avión, veremos que cuando el aire incide en el vértice del ala, se separa en dos capas: la que circula por la parte superior debe recorrer un camino más largo, ya que la curvatura en esta zona es mayor, y por consiguiente viajará a mayor velocidad. Al tener más velocidad, Bernoulli nos dice que la presión en esta zona será menor

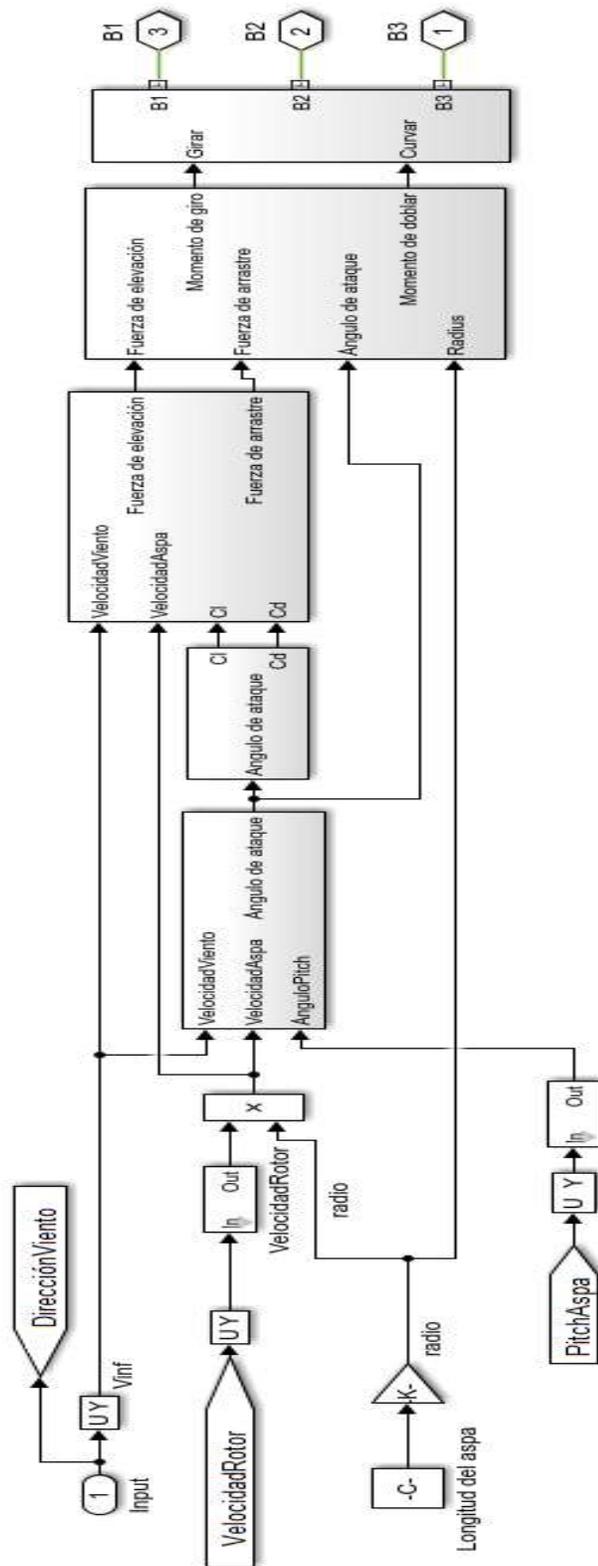


Figura 26. Modelo dinámico de las aspas [Autor]

Parámetro físico	Valor en el Sistema Internacional
Masa	6600 kg
Inercia	[2.746100000000000e+04 0 0;0 921 0;0 0 26840]
Longitud	63m
Anchura	2,17m

Tabla 5. Parámetros de las aspas

La figura 27 representa el modelo geométrico de cada aspa, las entradas 6,8 y 9 son el torque ejercido sobre cada aspa, proveniente de su modelo dinámico. Las salidas 1,2,3,4,5 y 7 son el ángulo y la velocidad angular.

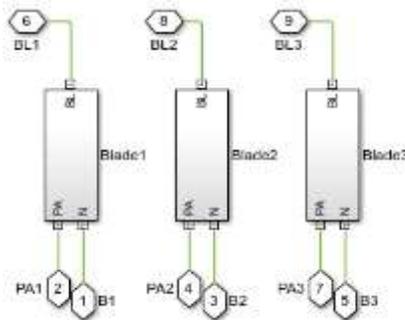


Figura 27. Modelo geométrico de las tres aspas [Autor]

La razón principal para el uso de tres palas se debe al momento de inercia que es constante en el rotor para todo el ángulo circunferencial del azimut (direcciones circunferenciales) medido respecto de los movimientos de operación alrededor del eje longitudinal de la torre de la turbina, lo cual lo hace una propiedad bastante favorable.

Las aspas de turbinas comerciales tienen un diseño aerodinámico, para de esta manera funcionar bajo el principio del mismo nombre. Este permite representar las aspas de manera similar a la de un ala de avión, lo que se puede explicar por el principio de Bernoulli. Dada la forma curva del aspa, se genera una diferencia de velocidades y presiones en la parte superior e inferior, lo que resulta en una fuerza de elevación en la pala, como se puede apreciar en la figura 28. Una fuerza aplicada a una cierta distancia de un pivote produce torque, lo que crea el movimiento de rotación de cada aspa de la turbina. El ángulo de ataque,  $\alpha$ , es un parámetro importante para controlar la fuerza de elevación y para que la turbina sea eficiente y segura, es decir que las aspas resistan la fuerza del viento y no se rompan. Este

se define como el ángulo entre la dirección de la velocidad del viento y el eje del aspa. El ángulo usualmente eficiente es de 20 a 25°.

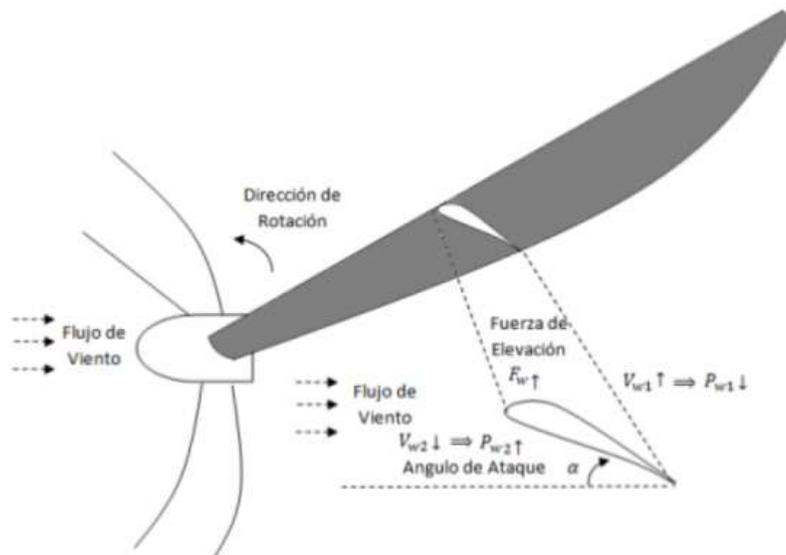


Figura 28. Fuerza de elevación y ángulo de ataque [18]

#### 2.4.1.4 Tren de engranajes

La industria del viento ha alcanzado un punto donde las prácticas de diseño para las cajas multiplicadoras de engranajes no ofrecen una vida suficiente, y las barreras institucionales están obstaculizando el progreso futuro. Se necesita una nueva tendencia para superar estas barreras y acelerar el desarrollo de un diseño de una caja de engranajes más robusta y más fiable.



Figura 29. Fallo por deformación plástica [17]

A pesar de la madurez del proceso de diseño de la caja multiplicadora, sin embargo, la mayor parte del tiempo de parada de los aerogeneradores se atribuye a los temas relacionados con fallos de la misma. Además, el reemplazo de la caja de cambios y los aspectos relacionados con su lubricación constituyen el 38% del costo de las partes de toda la turbina. [17]

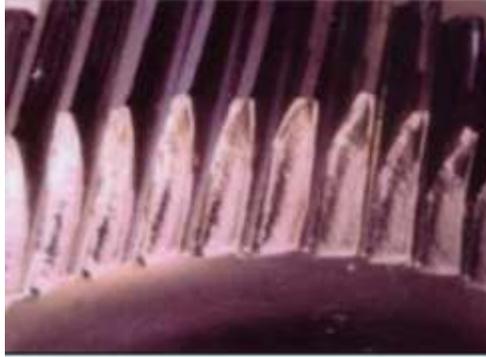


Figura 30. Fractura en los dientes [17]

Parámetro físico	Valor en el Sistema Internacional
masa	23000 kg
Relación de transmisión del engranaje de primer paso	4
Relación de transmisión del engranaje planetario	5
Relación de transmisión del segundo paso generador primario	3.51

Tabla 6. Parámetros del tren de engranajes multiplicador

La figura 31 ilustra el modelo en Simscape para el tren de engranajes, donde se observa un bloque para la inercia del sol que el que recibe el movimiento, luego sigue el eje portador que es el que rodea todo el sistema y por últimos la inercia de los ejes de paso o planetas son los que toman la energía y en este caso multiplican

la velocidad rotacional, disminuyendo a cambio el torque, cumpliéndose el principio de conservación de la energía.

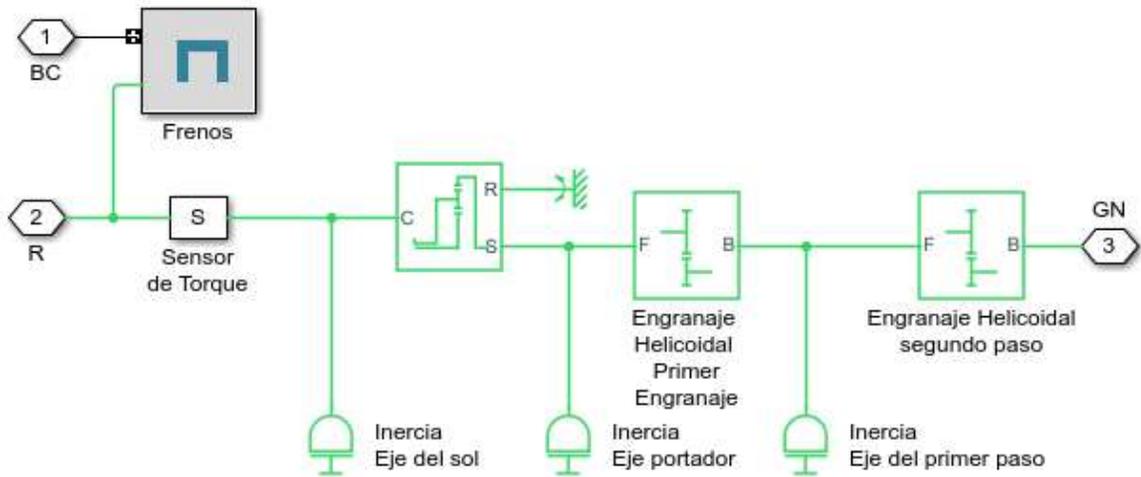


Figura 31. Modelo del tren de engranajes [Autor]

#### 2.4.1.5 Actuador hidráulico del pitch

La figura 32 representa el sistema electrohidráulico para el control del pitch en simulink, por medio de una válvula servopilotada se regula la salida de presión de la válvula de 4 vías y tres posiciones, para su implementación es necesario utilizar un sensor de posición para saber a cada momento el estado del cilindro, una válvula acumuladora, una válvula de retorno y por supuesto la entrada de presión del sistema que viene de una bomba hidráulica. Se utiliza actuadores de este tipo puesto que las aspas son de gran tamaño y de gran peso, por lo que la hidráulica es ideal para este caso.

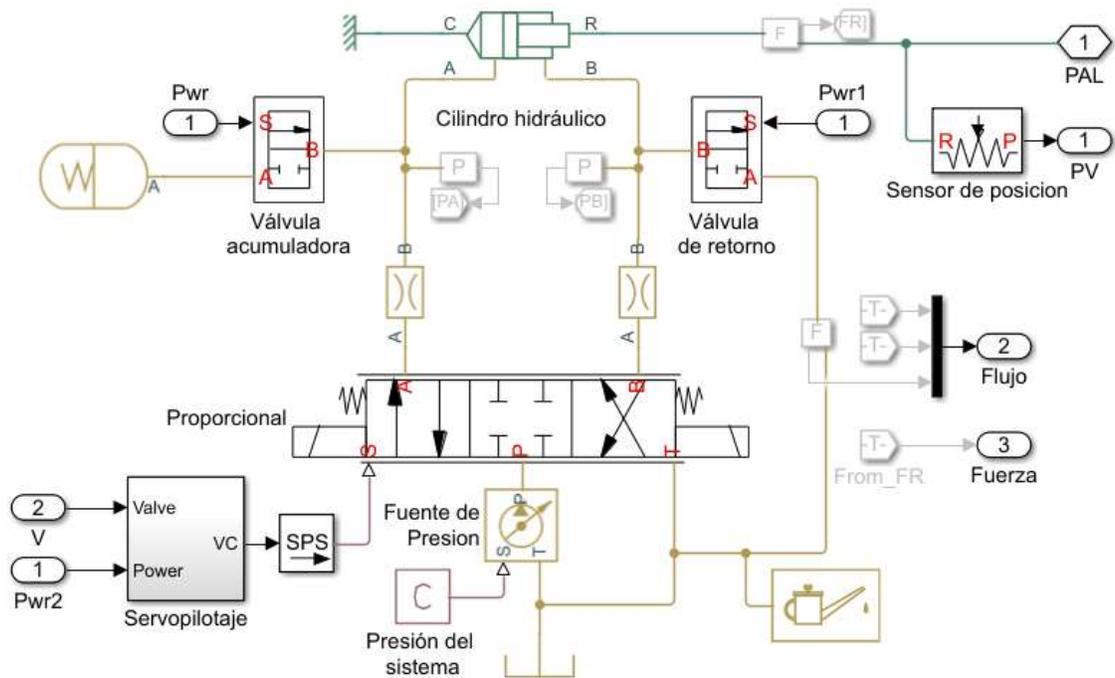


Figura 32. Control de pitch utilizando actuador electrohidráulico [Autor]

Parámetro físico	Valor en el Sistema Internacional
Presión hidráulica	20 MPa
Ganancia del servo que controla la válvula	20
Amortiguamiento del cilindro	500 kg/s
Área del pistón	0.005 m <sup>2</sup>
Carrera del cilindro	1.5m

Tabla 7. Parámetros del actuador de pitch

#### 2.4.1.6 Generador

Se hace uso de las herramientas de Simscape para hacer el modelo, para posteriormente hacer identificación de los datos, linealización y obtener la función de transferencia que represente el modelo. El bloque de máquina asíncrona se configura como generador jaula de ardilla, donde la entrada va a depender de la velocidad angular y el marco de referencia el rotor. Se selecciona este tipo de generador gracias a su bajo mantenimiento, alta eficiencia y larga durabilidad.

La figura 33 muestra el modelo del generador, donde M es el estado de activación o desactivación del controlador, por la entrada G se obtiene la velocidad angular proveniente del rotor luego de su paso por el mecanismo planetario, las salidas 3,4 y 5 son las tierras eléctricicas del circuito. La bobina del estator es en forma de estrella.

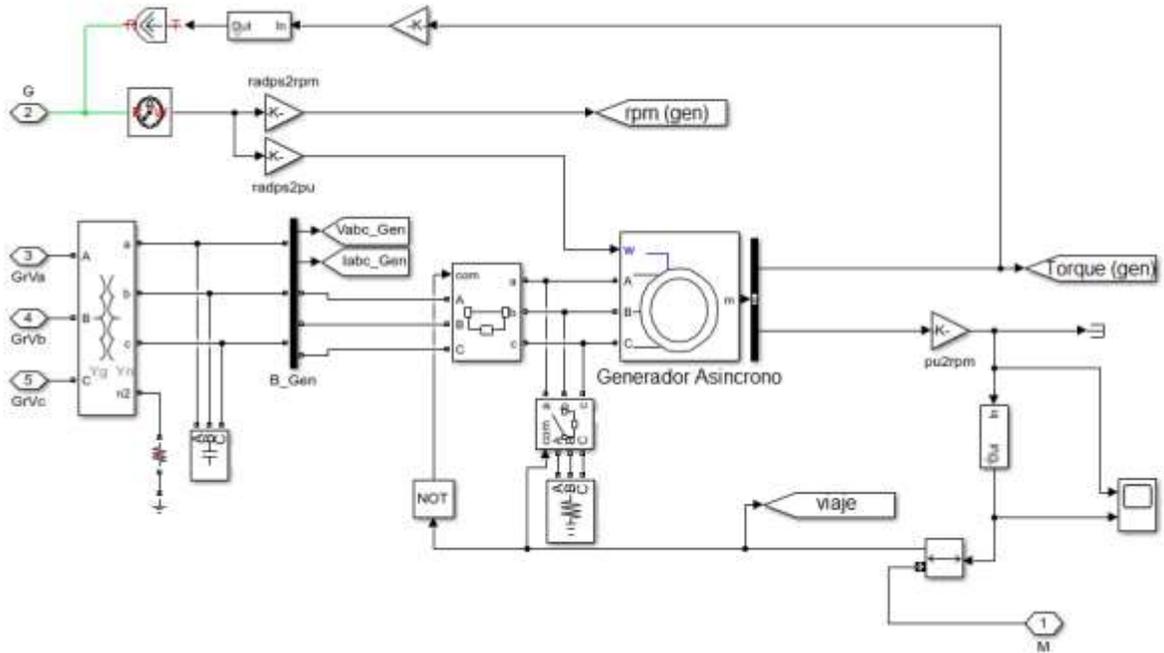


Figura 33. Modelo del generador eléctrico [Autor]

Se utilizaron los valores mostrados en la tabla

Parámetro físico	Valor en el Sistema Internacional
Masa	8500 kg
Potencia nominal	1.8 MW
Voltaje	600 V
Frecuencia	60 Hz
Resistencia del estator	0.0048 $\Omega$
Inductancia del estator	0.1248 H
Resistencia del rotor	0.0044 $\Omega$
Inductancia del rotor	0.1791 H
Inductancia mutua	6.77
Número de polos	6
Amortiguamiento	20 kg/s
Inercia	250

Tabla 8. Parámetros del generador

Al excitar el generador asíncrono con diferentes RPM en forma de una función en rampa, se consiguen las siguientes potencias.

RPM (Después de la caja multiplicadora)	Potencia (W)
0	0
252.9	500.3
505.9	502.100
758.7	1.002.340
1011.6	1.704.061
1264.5	1.901.030
1517.4	2.220.008
1770.3	2.700.920

Tabla 9. Datos entrada-salida del generador

Haciendo uso de la herramienta para la identificación de sistemas, se obtuvo la siguiente función de transferencia.

$$FT(\text{Generador}) = \frac{3.401e05}{s^2 + 1.855s + 199.3} \quad (26)$$

#### 2.4.1.7 Actuador del control de Yaw

El actuador yaw será controlado por medio de cuatro servomotores ubicados entre la parte superior de la torre y la parte inferior de la góndola, por medio de estos se seguirá la dirección en guiñada del viento. En este caso al realizarse una fuerza de movimiento sobre la base, no se crean momentos que hagan requerir a los actuadores realizar grandes fuerzas, por tal motivo no es necesario utilizar accionamientos hidráulicos, lo eléctrico, es suficiente, teniendo en cuenta que es mucho más fácil el control usando motores eléctricos que dispositivos con hidráulica.

Parámetros físicos	Valor en el Sistema Internacional
Eje del motor de inercia	0.01m
Vector de máximo torque del motor	[900 800 700 0]
Vector de velocidad máxima del motor	[0 600 1200 1410]
Resistencia devanado del rotor	3.5
Amortiguamiento	10
Voltaje	480V

Tabla 10. Parámetros del actuador de yaw

Dentro de la figura 34, la entrada T es la conexión con la torre que es donde están sujetos los actuadores, N representa la conexión a la góndola, YC es la acción de control. El bloque de corona de orientación se refiere a como los servomotores van girando en torno a una corona rígida sobre la cuál ellos van tomando como guía para unir sus fuerzas y así mover la pesada góndola.

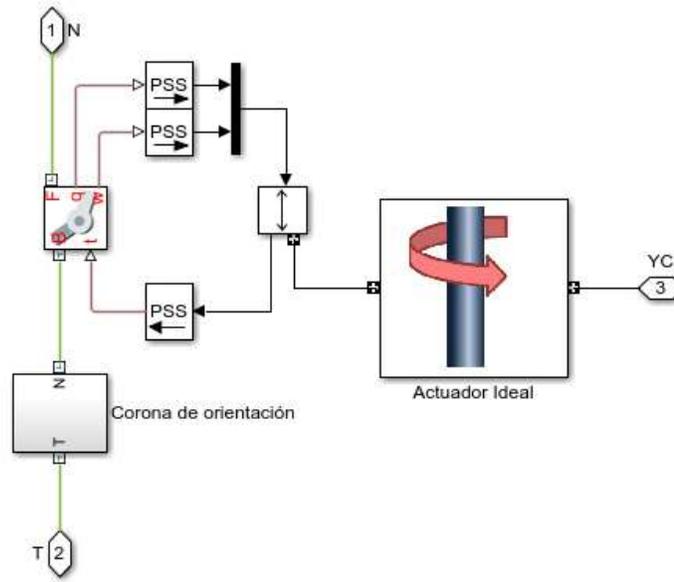


Figura 34. Modelo del actuador de control de yaw [Autor]

La caja de engranajes de la unidad de giro es un componente muy importante ya que se requiere para manejar momentos muy grandes, al mismo tiempo que requiere un mantenimiento mínimo y un rendimiento confiable durante toda la vida útil de la turbina eólica (aproximadamente 20 años). La mayoría de las cajas de engranajes de accionamiento de guiñada tienen relaciones de entrada a salida en el rango de 2000: 1 para producir los enormes momentos de giro necesarios para la rotación de la góndola de la turbina eólica. La llanta dentada y los piñones de los accionamientos de giro son los componentes que finalmente transmiten el momento de giro desde los accionamientos de giro hacia la torre para girar la góndola de la turbina eólica alrededor del eje de la torre (eje z). Las principales características de la corona dentada son su gran diámetro (a menudo mayor de 2 m) y la orientación de sus dientes. [10]

### 2.4.1.8 Góndola

El bloque de góndola fue representado por un sólido en el que están contenidos los actuadores, el tren de engranajes planetario, el rotor y el generador.

Parámetro físico	Valor en el Sistema Internacional
Masa	90500kg
Inercia	[1000 0 0;0 100 0;0 0 1000]
Longitud	13m
Amortiguamiento	1000000 kg/s

Tabla 11. Parámetros de la góndola

### 2.5 Diseño e impresión de partes del prototipo didáctico

En la figura 35 se observa el diseño en SolidWorks de la góndola, fue necesario hacer el acople con el rotor, el espacio donde va soportado el rodamiento y el encoder.

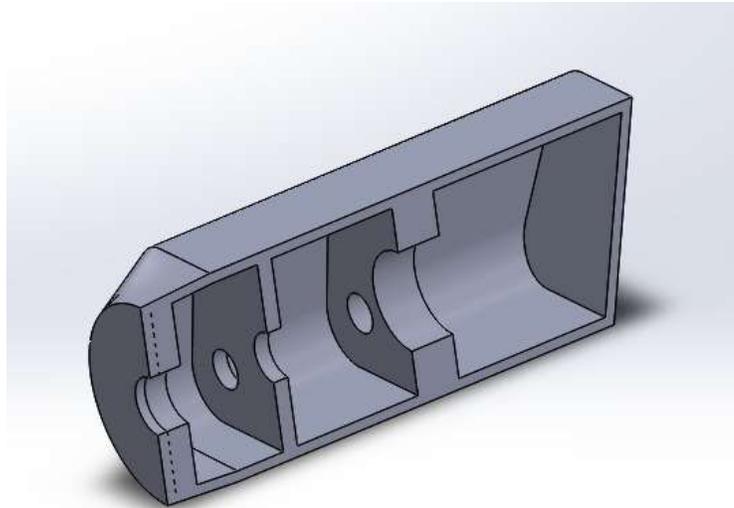


Figura 35. Modelo CAD (Diseño Asistido por Computador) de la góndola [Autor]

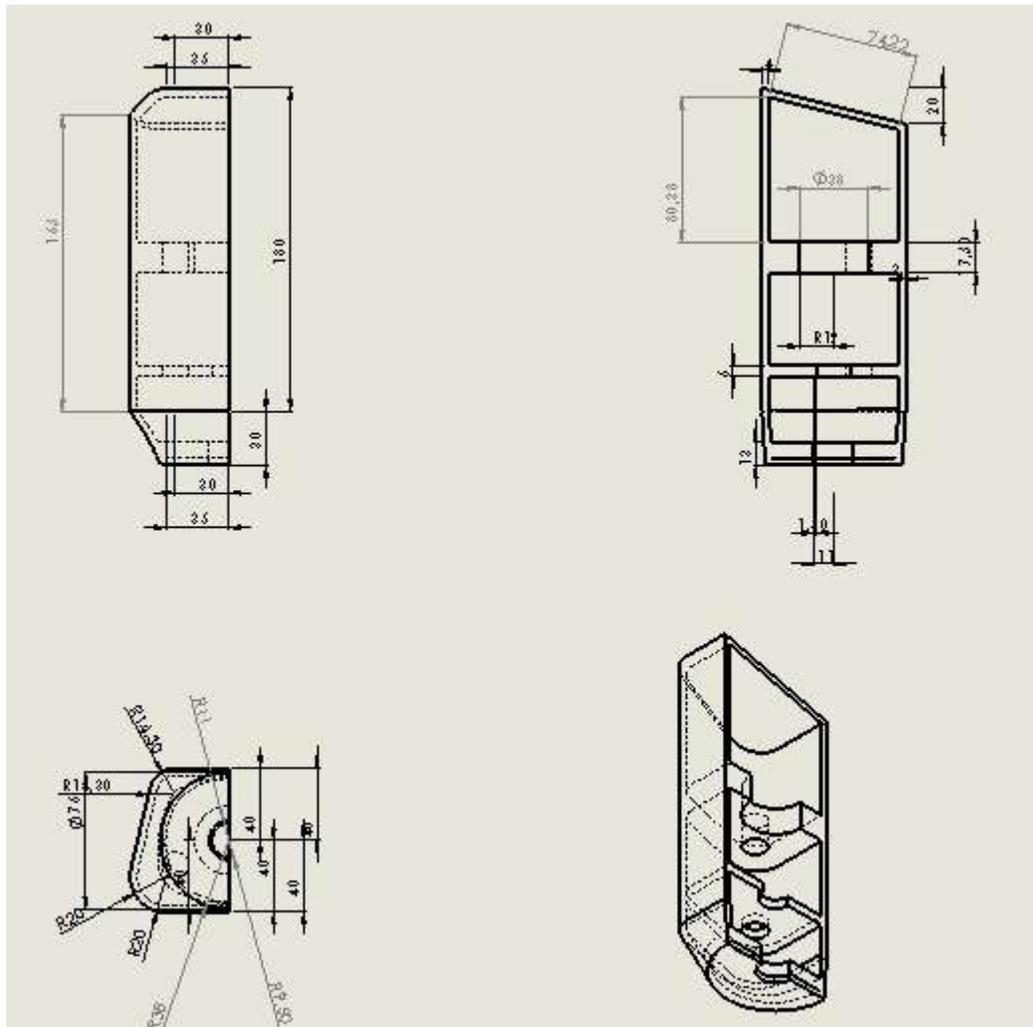


Figura 36. Medidas de la góndola en milímetros

En la figura 37 se aprecia el diseño del rotor, en el exterior están los espacios donde son soportados los servomotores para mover las aspas, la zona verde es una cámara interna dónde van los cables que vienen de los servomotores que se conectan con los cables de la parte móvil del anillo deslizante, y por el que pasa el eje de rotación.

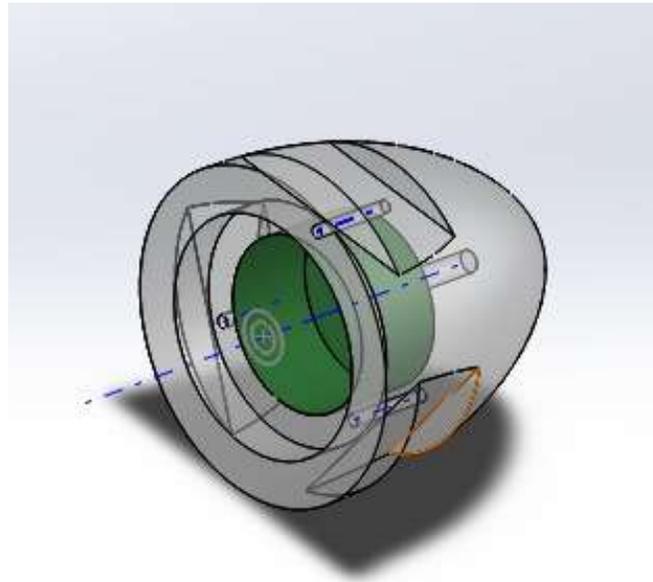


Figura 37. Modelo CAD del rotor [Autor]

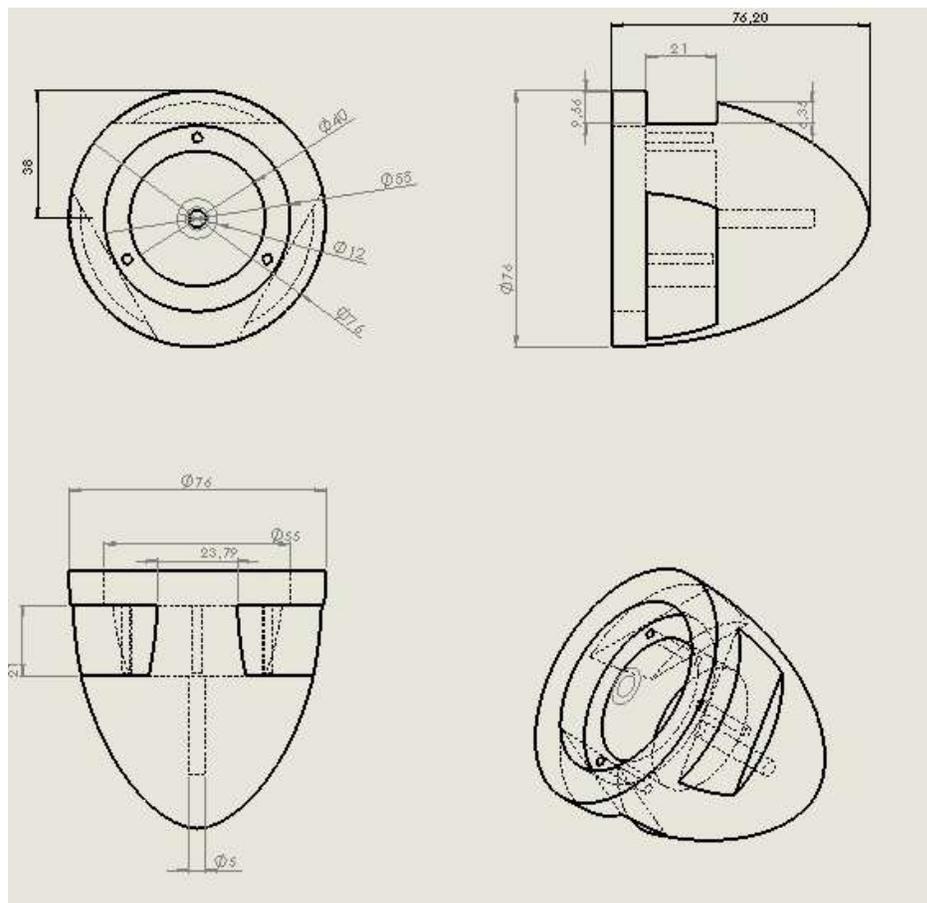


Figura 38. Medidas del rotor en milímetros

La figura 39 presenta la tapa del rotor, con su respectivo espacio para que encaje el mecanismo de anillos deslizantes y sus roscas de sujeción.

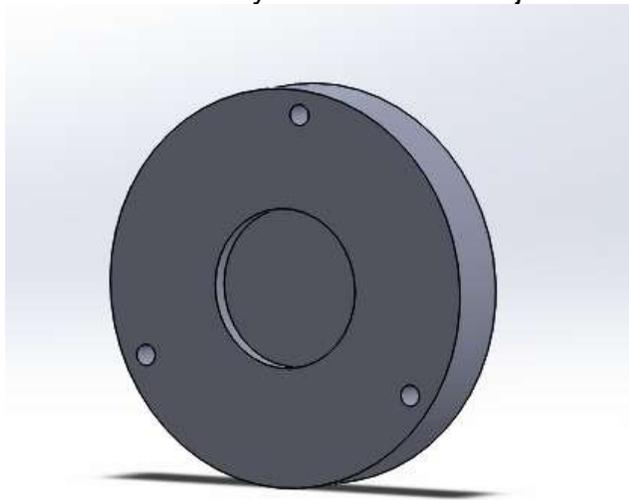


Figura 39. Modelo CAD de la tapa del rotor [Autor]

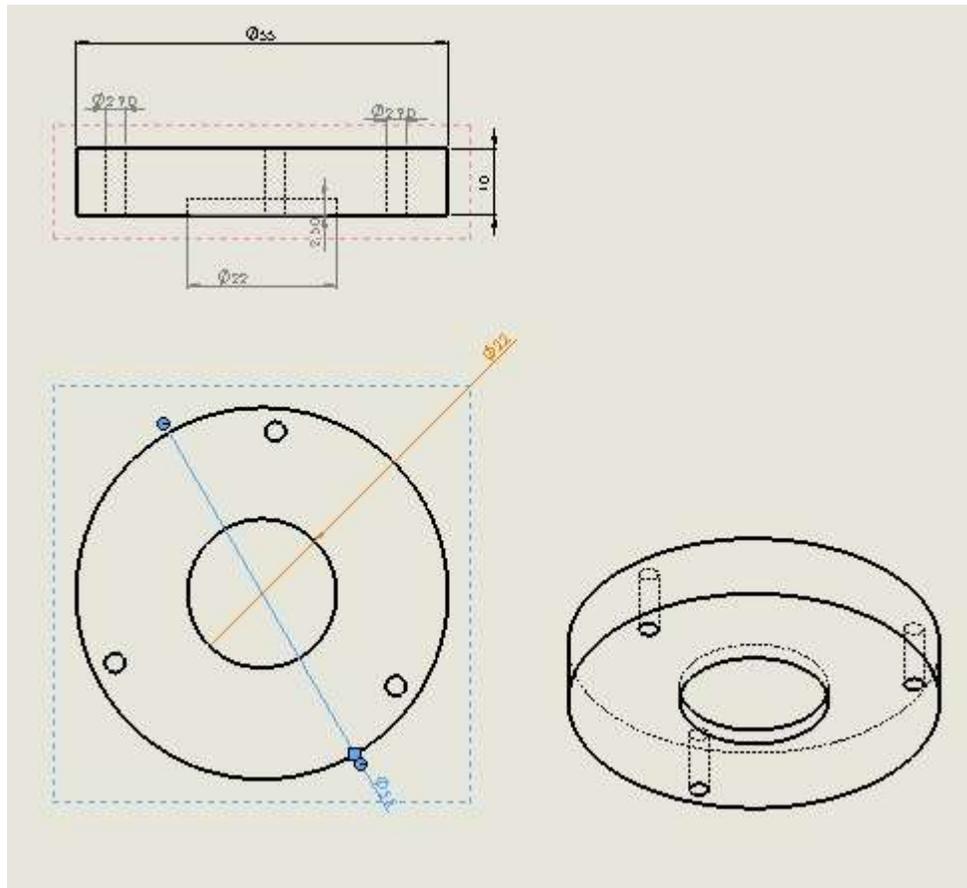


Figura 40. Medidas de la tapa del rotor en milímetros

Las piezas fueron construidas utilizando impresión 3D, para esto se exportó el diseño CAD a formato STL, se pasó a un programa que transformará el diseño en Código G como Cura, para luego ser formado por la impresora, así como se aprecia en la figura 41, por medio de este método, se puede hacer un prototipo de bajo coste y con el que se puedan probar diferentes diseños.



Figura 41. Impresión de las piezas en 3D [Autor]

### 2.5.1 Mecanismo de anillos deslizantes

Un mecanismo de anillos deslizantes fue necesario para mover los cables rotacionalmente y hacer que los cables no se muevan, habiendo por supuesto una permanente conexión eléctrica de buena calidad (ver figura 42), logrando así poder controlar los servomotores que permanentemente estarán girando con el rotor.



Figura 42. Anillos deslizantes

### 2.5.2 Rodamiento

Para disminuir la fricción y darle mayor soporte y estabilidad mecánica al movimiento axial del eje, es necesario utilizar un rodamiento de 3/16 in, así como el mostrado en la figura 43.



Figura 43. Rodamiento [Autor]

### 3. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de la turbina eólica consta de varios sensores, actuadores y un sistema que consiste en hardware y software donde este último procesa las señales de entrada de los sensores y genera señales de salida para los actuadores. Los sensores pueden incluir, por ejemplo:

- Un anemómetro
- Una veleta
- Un sensor de velocidad del rotor
- Un sensor de potencia eléctrica
- Un sensor de posición de paso
- Finales de carrera
- Sensores de vibración
- Indicadores de temperatura y nivel de aceite
- Sensores de presión hidráulica
- Interruptores de operador, pulsadores, etc.

Los actuadores pueden incluir un actuador de paso hidráulico o eléctrico, a veces un controlador de par de generador, contactores de generador, interruptores para activar frenos de eje, motores de guiñada, etc. El sistema que procesa las entradas para generar salidas generalmente consiste en una computadora o un controlador basado en microprocesador que realiza las funciones de control normales necesarias para operar la turbina, complementada con un sistema de seguridad cableado altamente confiable. El sistema de seguridad debe ser capaz de anular el controlador normal para llevar la turbina a un estado seguro si ocurre un problema grave.

Además de regular la potencia de la turbina en vientos fuertes, y tal vez de optimizarla en vientos bajos, está claro que la acción del sistema de control puede tener un gran impacto en las cargas que experimenta la turbina. El diseño del controlador debe tener en cuenta el efecto sobre las cargas y, al menos, garantizar que las acciones de control no generen cargas excesivas. Es posible ir más allá de esto, y diseñar explícitamente el controlador con la reducción de ciertas cargas como un objetivo adicional. La reducción de ciertas cargas es claramente compatible con el objetivo principal de limitar la potencia en vientos fuertes. Por ejemplo, la limitación de la potencia de salida es claramente compatible con la reducción del par de la caja de engranajes.

### 3.3.1 Sistema de control del pitch



*Figura 44. Control de pitch [www.wtindustries.com]*

Un sistema de accionamiento de paso colectivo también conocido como regulación activa por pérdida aerodinámica comúnmente consiste en un actuador eléctrico o hidráulico en la góndola, que impulsa una varilla de empuje que pasa a través del centro de la caja de cambios y el eje principal hueco. La barra de empuje está unida a las raíces de las cuchillas que se pueden lanzar a través de enlaces mecánicos en el cubo. El actuador en la góndola es a menudo un simple cilindro hidráulico y pistón. Un acumulador hidráulico cargado garantiza que las cuchillas siempre puedan ser emplumadas, incluso si la bomba hidráulica pierde potencia. Una disposición alternativa es utilizar un servomotor eléctrico para impulsar una tuerca de bola que se engancha con un tornillo de bola en la varilla de empuje. Dado que la varilla de empuje gira con el rotor, la pérdida de potencia del motor hace que el tornillo de bola enrolle la inclinación, lo que proporciona una acción de inclinación a prueba de fallas. Esto requiere un freno a prueba de fallas en el servomotor para garantizar que la tuerca de bola deje de girar si se pierde la energía.

El control de paso individual requiere actuadores separados en el cubo para cada pala. Por lo tanto, debe haber algún medio de transmisión de energía al centro giratorio para accionar los actuadores. Esto se puede lograr por medio de anillos deslizantes en el caso de actuadores eléctricos, o una junta hidráulica rotativa para actuadores hidráulicos. También se puede utilizar un transformador rotativo para transmitir energía eléctrica al concentrador sin el inconveniente de los anillos deslizantes, que requieren mantenimiento. La necesidad de garantizar una fuente de alimentación de respaldo en el concentrador para permitir que las hojas se desplacen incluso en caso de pérdida de energía puede ser una fuente de problemas. Un sistema hidráulico necesita un acumulador para cada cuchilla, mientras que los actuadores eléctricos generalmente tienen paquetes de baterías en el concentrador para este propósito.

Un actuador hidráulico normalmente se controlaría por medio de una válvula proporcional que controla el flujo de aceite al cilindro del actuador. La apertura de la válvula, y por lo tanto la tasa de flujo de aceite, se establecería en proporción a la tasa de paso requerida. La velocidad de paso exigida puede provenir directamente del controlador de la turbina, o puede provenir de un bucle de realimentación de posición de paso. En el caso de un actuador eléctrico, el controlador del motor generalmente requiere una señal de demanda de par. Esto se puede derivar de un controlador de velocidad, que utiliza un controlador rápido de PI o PID que actúa sobre un error de velocidad para generar una demanda de par. Una vez más, la demanda de velocidad puede provenir directamente del controlador de la turbina o de un circuito de retroalimentación de posición.

Los controladores que contienen términos integrales, como los controladores PI o PID, experimentan un problema particular conocido como integración del enrollador cuando la acción de control se satura a un valor límite. Un ejemplo común es el control de inclinación, donde el ángulo de inclinación está limitado a la posición de inclinación fina cuando el viento está por debajo de su valor nominal. En la siguiente figura se observa el diseño del control PI para una turbina, el cuál es parte de la propuesta de esta tesis.

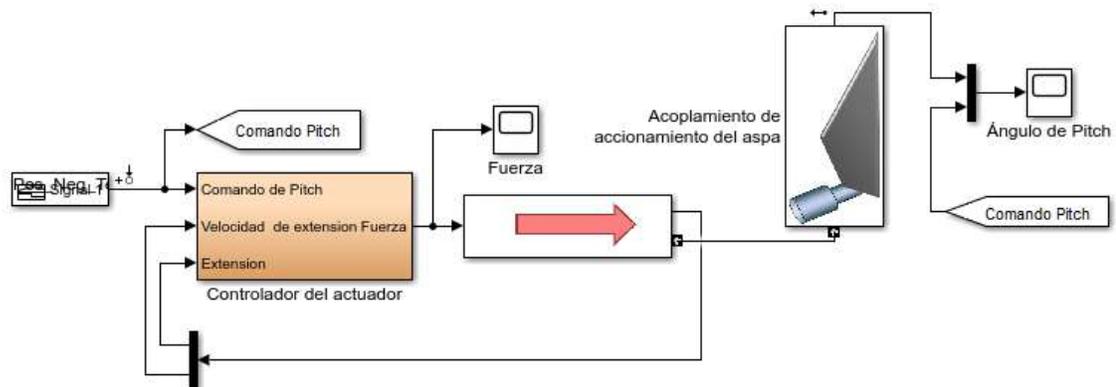


Figura 45. Sistema de control de pitch con las aspas como carga mecánica [Autor]

Para conocer el modelo matemático del actuador electrohidráulico, se procede a hacer un análisis lineal con la caja de herramientas de Matlab, la entrada es la referencia a la que deben llegar el sistema de control, mientras que la salida es la lectura del ángulo ya en las aspas.

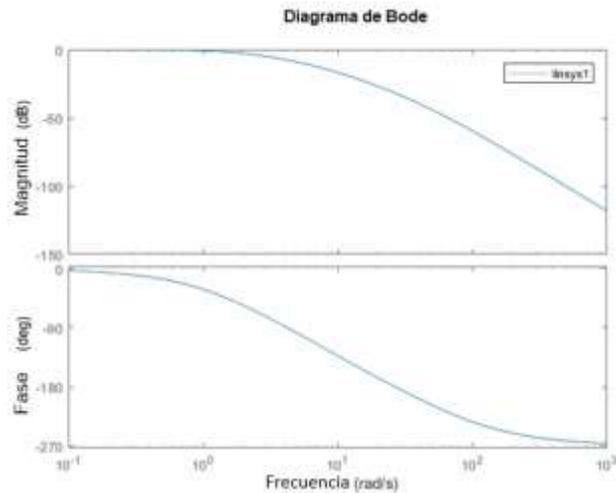


Figura 46. Diagrama de bode del actuador electrohidráulico [Autor]

Del diagrama de bode producto de la linealización se halla el Modelo en espacio de estados:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -58.9 & -0.00514 \\ 4.7 & 2.35e + 5 & 2.35e + 4 & -10 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.08726 \\ 0 \\ 0 \\ -4101 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 57.3 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Con el comando de Matlab *tf* se convierte el modelo en espacio de estados a una función de transferencia

$$F.T. = \frac{1208s + 0.1208}{s^4 + 68.9s^3 + 709.8s^2 + 1208s + 0.1208} \quad (27)$$

Se exporta a Control System Designer. Manipulando el diagrama de bode y el plano s con las raíces del sistema, se halla el compensador más adecuado, que permita filtrar las señales correctamente y alcanzar los puntos de operación deseados.

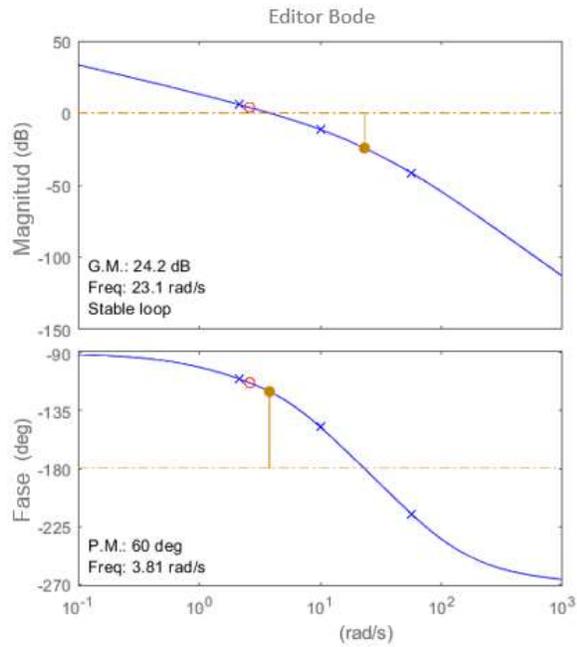


Figura 47. Diagrama de bode editado [Autor]

La figura 48 muestra el diseño del controlador por medio del lugar de las raíces, se puede ver que el sistema tiene una raíz muy cerca del eje vertical, lo que hace que sea necesario utilizar un control proporcional para aumentar la rapidez de la respuesta, se agrega un polo que haga de acción derivativa para eliminar el error en estado estacionario.

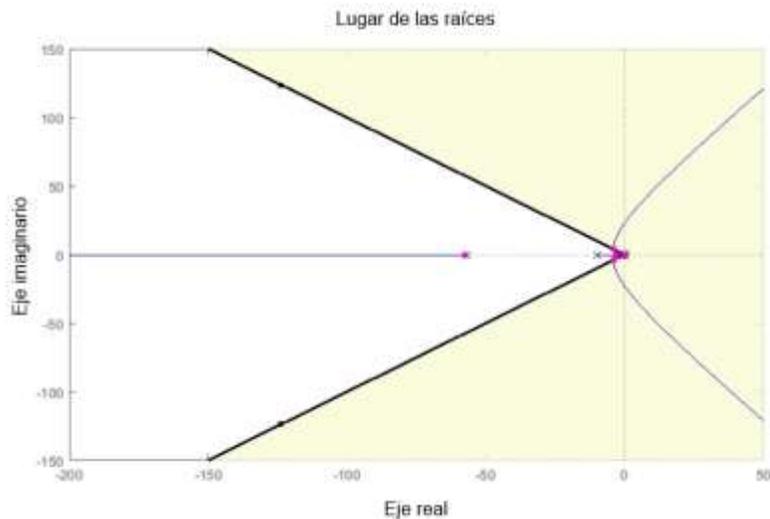


Figura 48. Plano s con lugar de las raíces [Autor]

Los requerimientos de diseño son que el tiempo de subida sea menor a 0.6s, que la sobreelongación sea menor al 10% y que el tiempo de asentamiento no supere los 1.2s, como se aprecia en la figura 49.

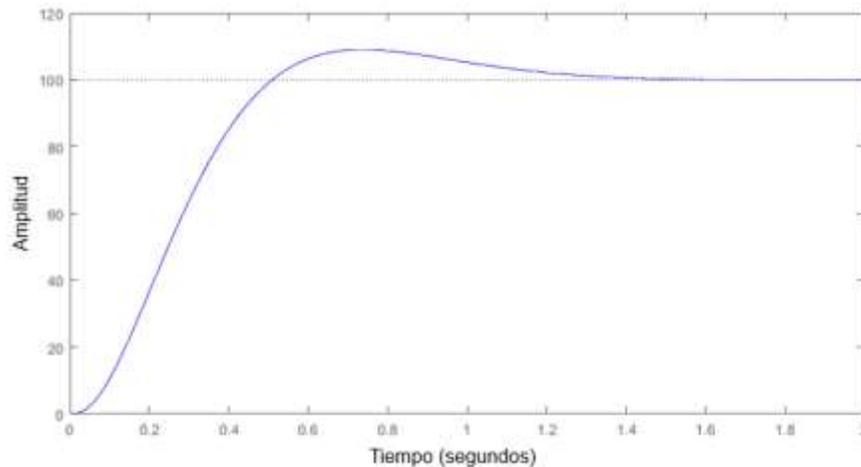


Figura 49. Respuesta al escalón del controlador [Autor]

$$C = \frac{1.8111(s + 2.619)}{s} \quad (28)$$

Utilizando el comando PID, se establecen las constantes proporcional e integral

$$K_p=1.81 \quad K_i=4.74$$

Hasta este punto se ha desarrollado el control en tiempo continuo, para aplicarlo a un PLC se realiza el mismo procedimiento, pero discretizando la función de transferencia.

Para la conversión se hace uso de la función c2d, se selecciona un tiempo de muestreo de 0.01s debido a que con este trabajan muchos PLC y el método de discretización Tustin.

$$\begin{aligned} &F.T.D \quad (29) \\ &= \frac{0.0001108z^4 + 0.0002216z^3 + 3.324e - 10z^2 - 0.0002216z - 0.0001108}{z^4 - 3.442z^3 + 4.378z^2 - 2.431z + 0.4941} \end{aligned}$$

Se exporta a Control System Designer, por medio de esta herramienta se puede crear un controlador usando el diagrama de bode y el lugar de las raíces.

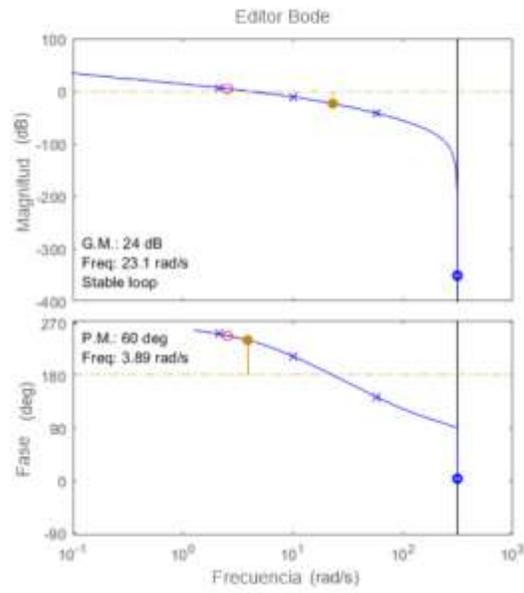


Figura 50. Diagrama de bode para sistema discreto [Autor]

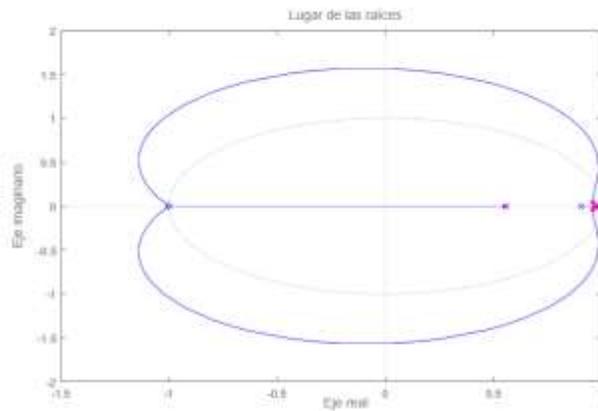


Figura 51. Lugar de las raíces para sistema discreto [Autor]

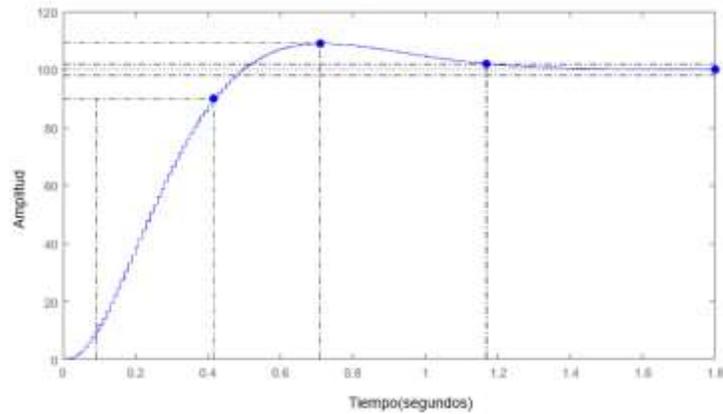


Figura 52. Respuesta al paso [Autor]

$$C = \frac{1.896(z - 0.9746)}{(z - 1)} \quad (30)$$

Se obtiene un  $K_p=1.9$ ,  $K_i=4.82$  y  $T_s=0.01s$ .

### 3.3.2 Sistema de control de yaw

En la figura 53 se observa el ángulo de incidencia cambiante del viento respecto al rotor, según (1), entre la superficie de las aspas sean más perpendiculares a la dirección del viento, mayor fuerza se podrá ejercer en las aspas.

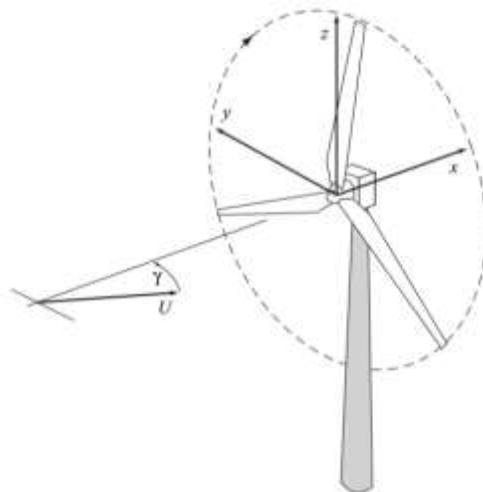
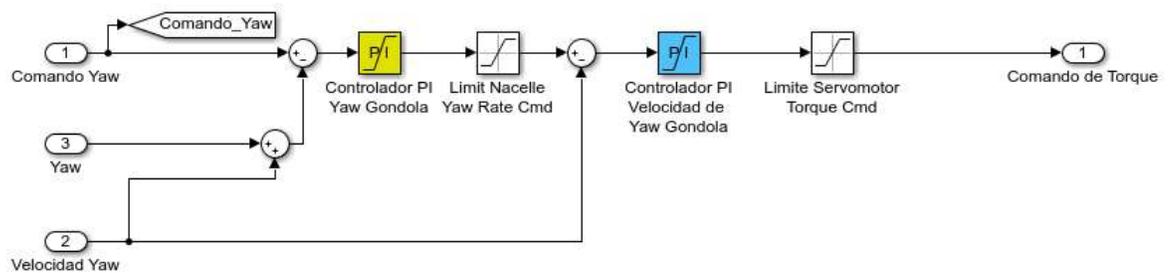


Figura 53. Orientación hacia la dirección del viento [Handbook of wind turbines]

Cada servomotor (son cuatro) debe tener una potencia de 480kw para mover correctamente la góndola, debe tener un sensor de corriente que permita saber cuánto torque se está ejerciendo a cada momento, incluyendo su respectivo encoder y potenciómetro para medir la velocidad angular y posición.

La figura 51 muestra el sistema de control propuesto, con doble realimentación, esto permite hacer que los motores sigan la dirección del viento, y a su vez se pueda aumentar la velocidad de accionamiento. Se agregan saturadores que permitan proteger los actuadores frente a fuertes torques que puedan hacer fallar la caja de engranajes de los servomotores.



*Figura 54. Lazo de control de yaw [Autor]*

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Control de referencia de control por medio de máquina de estados finitos

Por medio de lógica secuencial, utilizando condiciones si, entonces, and y or simples es posible determinar las condiciones de operación y referencias que deben seguir las variables dependiendo de las diferentes velocidades y direcciones que el viento pueda tomar.

En la figura 55, se aprecia que hay un problema con este tipo de control, este es que, a velocidades bajas, el generador no produce potencia, se necesita de varios segundos para poder vencer la inercia, esto no solo se produce al arrancar la máquina por primera vez, sino cada vez que el viento baje demasiado y luego de un tiempo vuelva a aumentar su velocidad, lo cual significa un desperdicio de energía a utilizar.



Figura 55. Potencia generada con máquina de estados finitos [Autor]

### 4.2 Control difuso

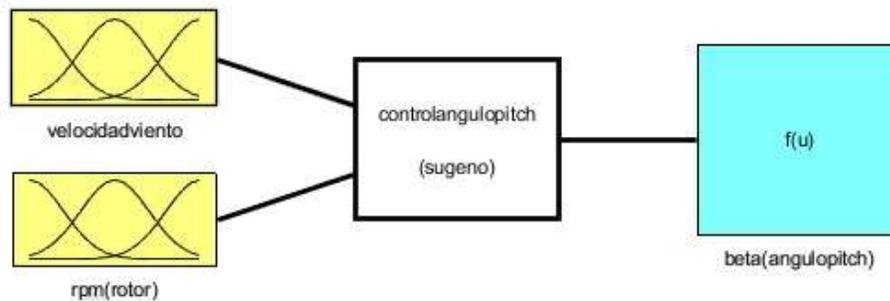
Una gran turbina moderna es una estructura compleja. Se requieren métodos relativamente sofisticados para predecir el rendimiento detallado y la carga de un aerogenerador. Estos métodos deben tener en cuenta:

- La aerodinámica de la pala giratoria, incluidos los flujos inducidos (es decir, la modificación del campo de flujo causado por la propia turbina), los efectos de flujo tridimensionales y los efectos de bloqueo dinámico cuando sea apropiado
- Análisis dinámico de las cuchillas, el tren de transmisión, el generador y la torre, incluida la modificación de las fuerzas aerodinámicas debidas a las velocidades de vibración de la estructura
- Respuesta dinámica de subsistemas como el sistema de guiñada y el sistema de control de inclinación de la pala

- Algoritmos de control utilizados durante el funcionamiento normal, el arranque y el apagado de la turbina
- Variaciones temporales y espaciales del campo de viento que inciden en la turbina, incluida la estructura tridimensional de la turbulencia en sí.

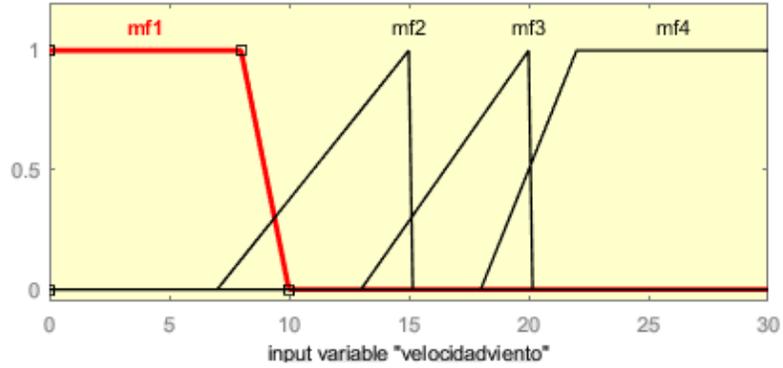
A partir de un espectro de turbulencia eólica, es posible desarrollar técnicas en el dominio de la frecuencia que tengan en cuenta muchos de estos aspectos, incluido el muestreo rotativo de la turbulencia por las palas, la respuesta de la estructura y el sistema de control

En la figura 56 se desarrolla un controlador difuso con dos entradas: la velocidad del viento y la velocidad del rotor y el ángulo de control de pitch ( $\beta$ ) como salida. Se elige el método de relaciones difusas takagi-sugeno puesto que tiene menor carga computacional que el mamdani, por lo tanto, es mucho más usado en controladores electrónicos, inclusive el SCL (lenguaje de control estructurado) solo permite implementar este método.



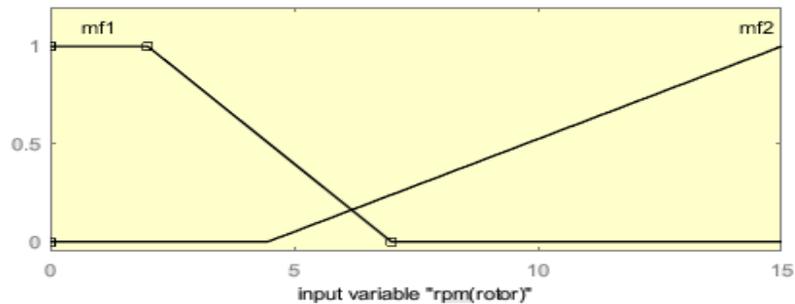
*Figura 56. Esquema del control difuso [Autor]*

En la figura 57, la primera función de membresía llamada mf1 es para velocidad bajas (inferiores a 10m/s), la segunda mf2 se especifica para trabajar entre 7m/s y 15m/s, la tercera mf3 para velocidades intermedias de 13m/s a 20m/s y la última mf4 para cuando las velocidades sean altas, superiores a los 20m/s.



*Figura 57. Funciones de pertenencia para la velocidad del viento [Autor]*

En la figura 58, la primera función de membresía se utiliza para especificar cuando el rpm del rotor son bajas, por lo tanto, el aerogenerador tendrá una tendencia a permanecer en reposo que debe ser superada modificando el ángulo de pitch de las aspas, mientras que la segunda función de membresía es para cuando ya tenga el suficiente momento angular que le permita producir electricidad en condiciones nominales.



*Figura 58. Funciones de pertenencia para las RPM del rotor [Autor]*

Como son 4 entradas para la velocidad y 2 de las RPM, se requieren de 8 reglas para relacionar todos los casos posibles.

1. If (velocidadviento is mf1) and (rpm(rotor) is mf1) then (beta(angulopitch) is mf4) (1)
2. If (velocidadviento is mf1) and (rpm(rotor) is mf2) then (beta(angulopitch) is mf1) (1)
3. If (velocidadviento is mf2) and (rpm(rotor) is mf1) then (beta(angulopitch) is mf4) (1)
4. If (velocidadviento is mf2) and (rpm(rotor) is mf2) then (beta(angulopitch) is mf2) (1)
5. If (velocidadviento is mf3) and (rpm(rotor) is mf1) then (beta(angulopitch) is mf3) (1)
6. If (velocidadviento is mf3) and (rpm(rotor) is mf2) then (beta(angulopitch) is mf3) (1)
7. If (velocidadviento is mf4) and (rpm(rotor) is mf1) then (beta(angulopitch) is mf5) (1)
8. If (velocidadviento is mf4) and (rpm(rotor) is mf2) then (beta(angulopitch) is mf5) (1)

La figura 59 representa de forma tridimensional el control difuso resultante, al estar el aerogenerador a muy bajas rpm en el rotor, la velocidad del viento no será capaz de vencer la inercia del mismo y hacer que se mueva al estar las cuchillas con la mayor parte de la superficie de contacto perpendicular a la dirección del viento, por lo tanto es necesario hacer que este ángulo aumente a 30° para así lograr una mayor carga torsional sobre el eje y lograr vencer la inercia, luego de esto es importante disminuir este ángulo ya que se estaría perdiendo eficiencia energética, es como darle un impulso para que arranque a moverse, este puede pasar muchas veces a lo largo del día, puesto que constantemente el viento va a tener lapsos con velocidades muy bajas que harán que casi de detenga el aerogenerador.

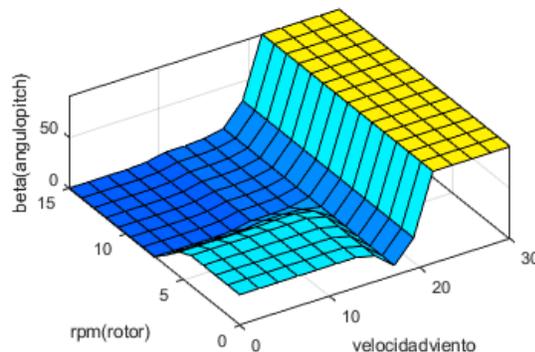


Figura 59. Superficie de control resultante [Autor]

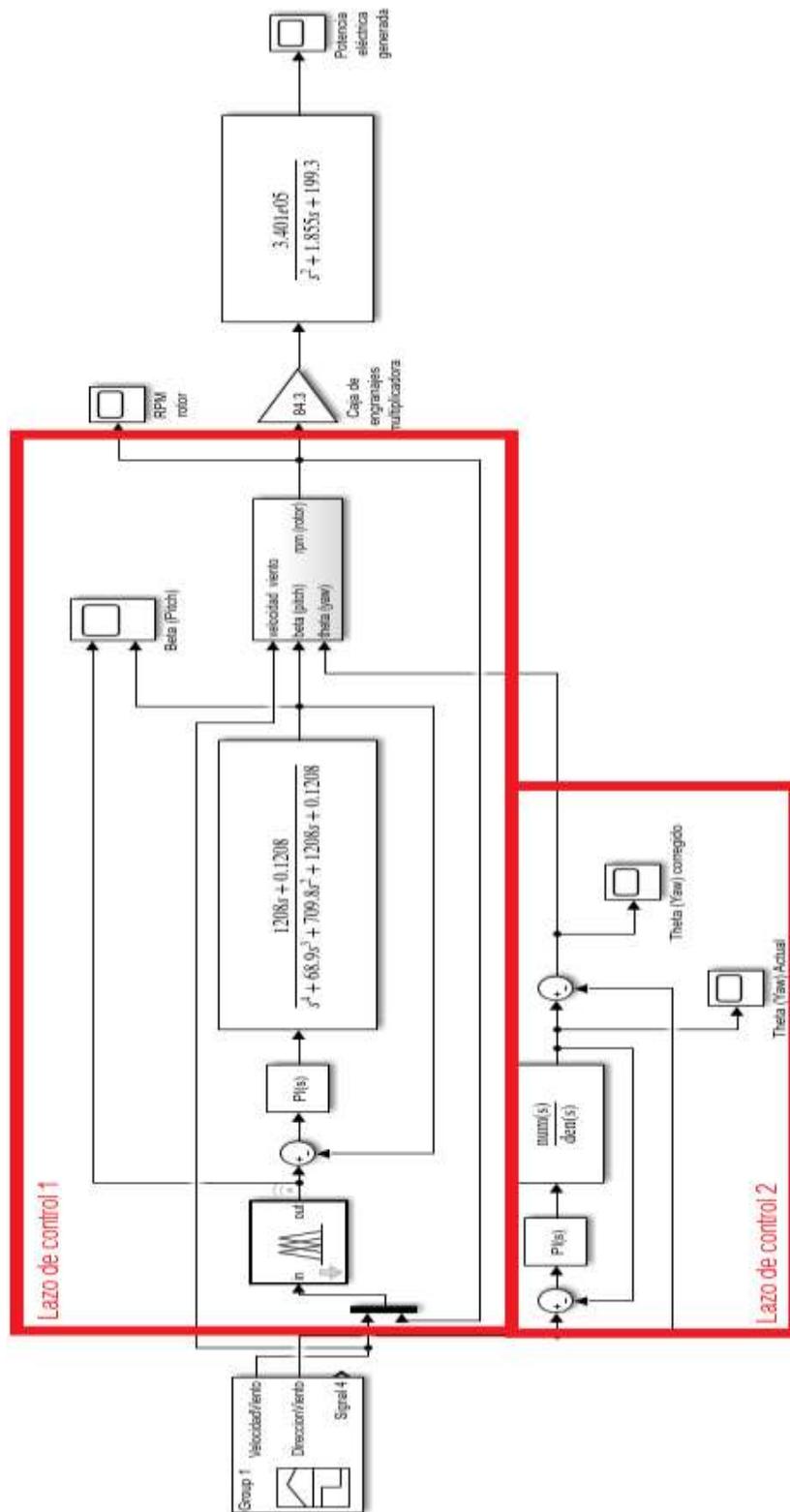
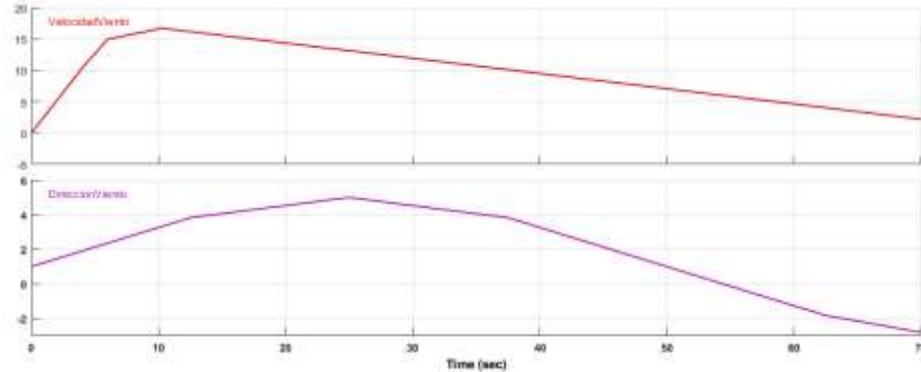


Figura 60. Esquema de control simplificado [Autor]

En la figura 61 se ilustra en primera instancia el bloque generador de señales, la primera señal de entrada es la velocidad del viento y la segunda su dirección. La velocidad del viento y las RPM del rotor por medio de un multiplexor son las entradas al bloque de control difuso, que ya está configurado para que trabaje con las funciones de membresía y reglas antes descritas. A continuación, se halla un controlador PI que toma como set point el ángulo de pitch y genera una señal de salida para el actuador electrohidráulico, representado por la función de transferencia de cuarto orden. El lazo de control 2 es el encargado del control del Yaw, el cual tiene como misión hacer que la orientación de la góndola sea siempre igual al ángulo de incidencia del viento, esto se puede lograr con solo un control PI.

La figura 59 representa las entradas del sistema en el bloque generador de señal, para hacer la simulación, como son datos estocásticos, podrían tener cualquier valor, estas son la velocidad (m/s) y dirección (grados).



*Figura 61. Entradas del sistema [Autor]*

En la figura 62 se observa que el control PI dirigido por lógica difusa logra hacer que el error sea mínimo y aceptable para esta aplicación. Las sobreelongaciones no superan el 10%.

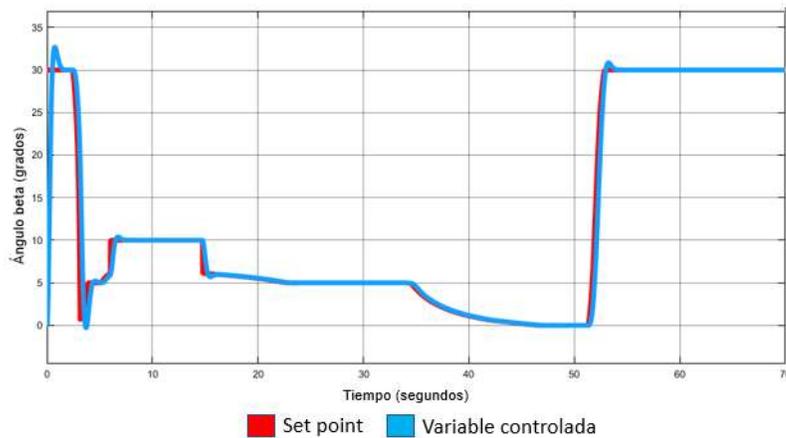


Figura 62. Comportamiento del ángulo de pitch controlado [Autor]

En la figura 63 se aprecia que es mayor la energía producida añadiendo un controlador difuso en el sistema de control, puesto que, al trabajar la máquina a bajas velocidades del viento, aun así se logra captar energía, mientras que, al utilizar una máquina de estados finitos como interruptor de operación, no se capta energía al arranca la máquina hasta que pasa un considerable tiempo, ni se aprovecha el momento angular producido por las altas velocidades para volver a arrancar el movimiento del rotor.

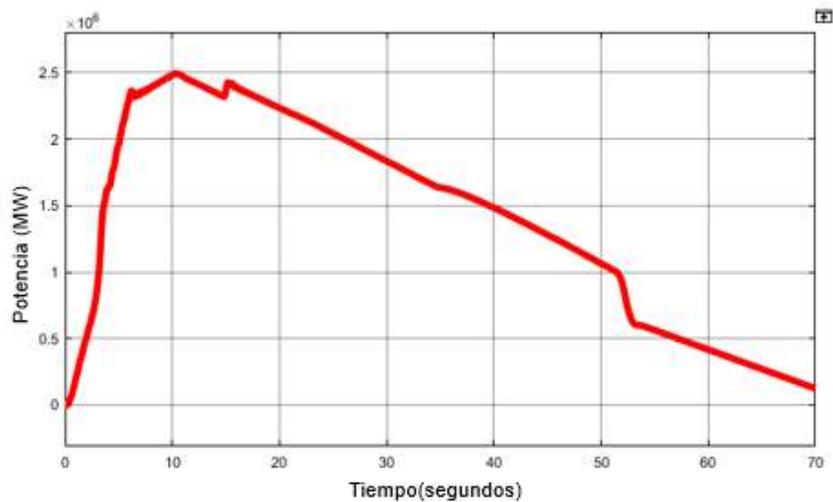


Figura 63. Energía generada con control difuso [Autor]

Se hace una segunda prueba con valores de entrada diferentes, que se muestran en la figura 64.

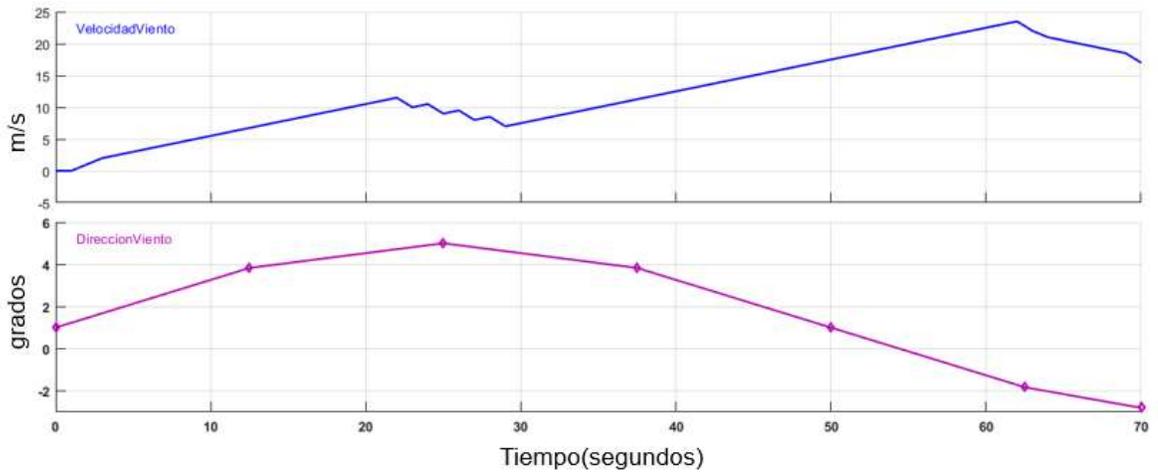


Figura 64. Entradas al sistema segunda prueba [Autor]

En la figura 65 se aprecia que, al llegar a cierto límite de velocidad, el rotor deja de moverse hasta que la velocidad vuelve al rango permitido.

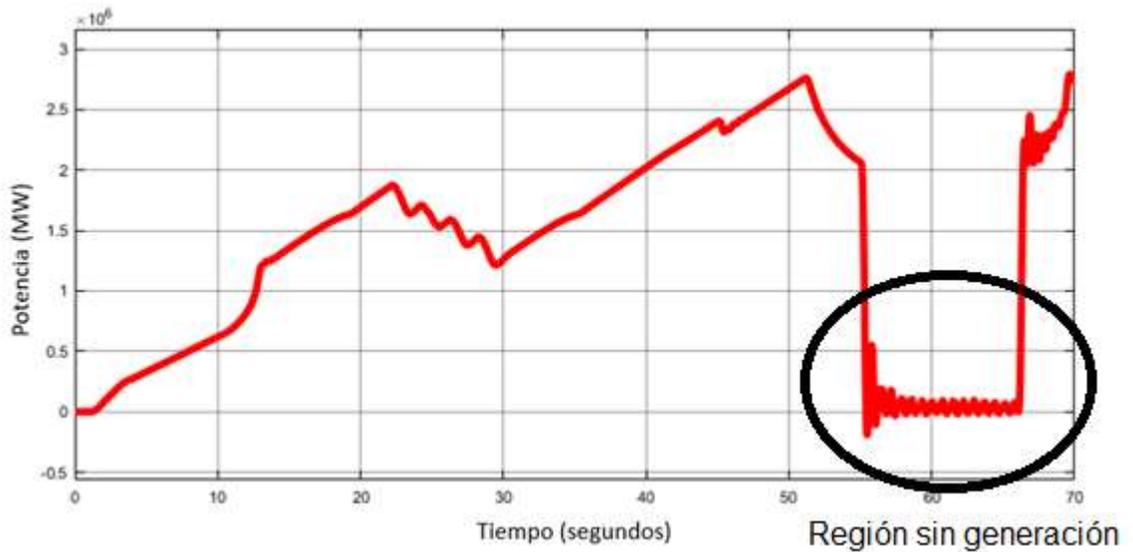


Figura 65. Energía generada [Autor]

### 4.3 Prototipo aerogenerador eólico

Se implementó en un aerogenerador a escala, con el fin de analizar el funcionamiento de los algoritmos de control y de los fenómenos físicos tratados.

#### **Arquitectura de control:**

Para controlar el ángulo de inclinación y la potencia de salida para los modelos de aerogeneradores no lineales, se implementa un esquema de programación de ganancia, que dependía del bloque de la caja del interruptor. El bloque de la caja del interruptor recibe la velocidad del viento como una sola entrada. Utiliza su valor de entrada para seleccionar una condición de caso que determina qué subsistema ejecutar para dar el valor de  $K_p$  como salida como se muestra en la figura 9.[23]

Por encima de la velocidad del viento nominal, la potencia del rotor debe mantenerse por debajo de los límites de diseño mediante el uso del controlador de ángulo de paso PI. [23]

**¿Por qué usar un PLC?** Los autómatas están diseñados para trabajar en ambientes industriales que pueden generar condiciones adversas para el equipo tales como vibraciones, impactos, humedad elevada, temperaturas extremas, gases corrosivos, polvo metálico o mineral y perturbaciones eléctricas. Los de mayor calidad, destinados a estar expuestos a las condiciones más exigentes, se fabrican con técnicas especiales, como el barnizado de circuitos, para garantizar su fiabilidad y resistencia. Hay pocas investigaciones que consideren la generación de energía y las cargas mecánicas al mismo tiempo. [24]. A pesar de que [3] modelos de flexión de torre, no se abordan las tensiones de la cuchilla

El control de tono es la forma más rentable y famosa de controlar el poder. El control del ángulo de inclinación es tan importante para regular el par aerodinámico de la turbina eólica cuando la velocidad del viento es más alta que la velocidad nominal, también se pueden elegir muchos valores, como la velocidad del viento, la velocidad del generador y la potencia del generador. Muchos métodos de control del ángulo de inclinación se encuentran y aprueban con resultados de simulación en Matlab \ Simulink. [25]

En vez de utilizar como en múltiples proyectos la función para control PID, se quiere dar un nuevo enfoque con este proyecto al utilizar SCL (lenguaje de control estructurado).

Se seleccionó el S7-1200 de la empresa Siemens, debido a que soporta la programación en SCL y escalera, tiene gran variedad de bloques para operaciones matemáticas, está disponible en el laboratorio de control, capacidad de procesamiento de 64 bits, entradas de alta velocidad para el encoder, entradas y salidas analógicas. La limitante de utilizar este PLC, es que su velocidad de procesamiento y capacidad de memoria no son tan altas como para un control por SCL complejo, por lo que hay que tener en cuenta el gasto computacional.



Figura 66. PLC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC de Siemens. [20]

**Conexión del encoder.** Como el encoder es NPN, se hace necesario que el común de las entradas sea 24V en vez de 0V, que sería en el caso de que fuera del tipo PNP.

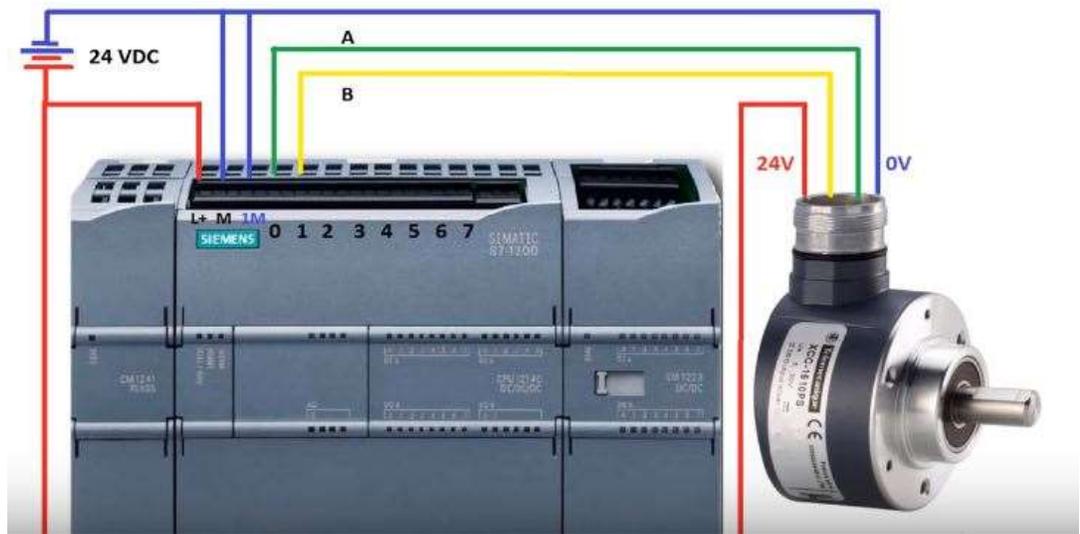


Figura 67. Conexión del encoder al PLC [20]

En las propiedades del PLC, es necesario activar el contador rápido, filtrar las entradas, en modo se selecciona frecuencia, puesto que lo que se quiere es conocer la velocidad angular y no contaje por ejemplo que sería conocer la posición y configurar las entradas. Como fase de servicio se seleccionó monofásica puesto que no es necesario conocer el sentido de giro, el periodo de medición de frecuencia es de 0.1s. Para terminar, como generador de impulsos se utilizó la I0.0 y la dirección inicial es 1000.

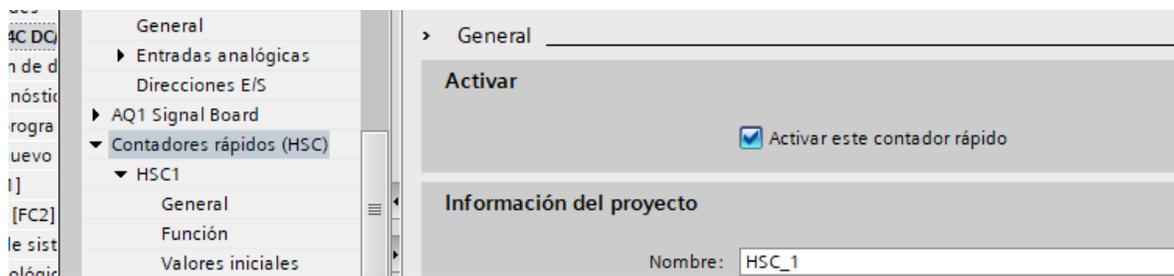


Figura 68. Activación de contador rápido [Autor]

$$rpm = \frac{frecuencia(Hz)}{360ppr} * 60$$

En la siguiente figura se muestra la configuración para contar velocidad angular del encoder, se parecía que es en frecuencia y la fase de servicio es monofásica.

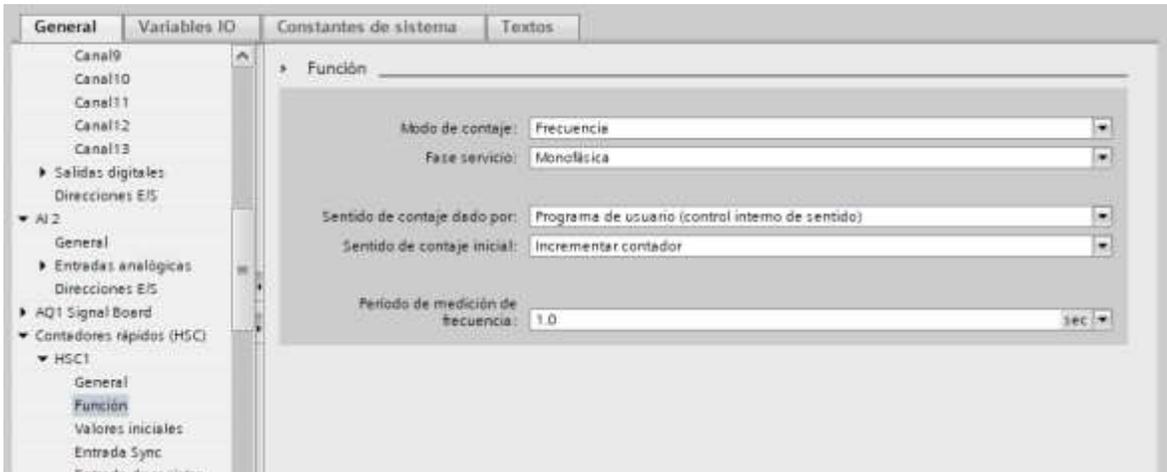


Figura 69. Configuración para entrada del encoder [Autor]

La señal digital se toma con un filtro de 0.1 microsegundos, para este encoder es el único valor con que mide correctamente.

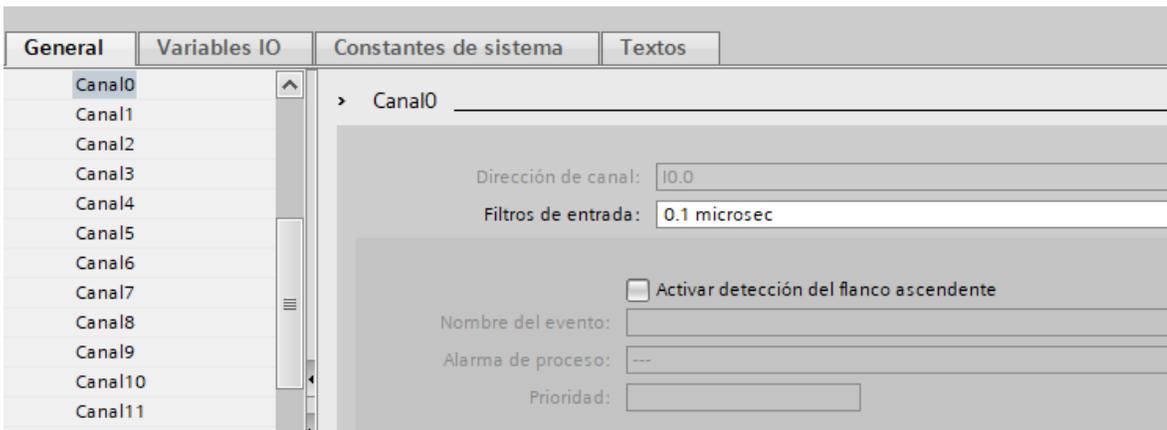


Figura 70. Filtro de la entrada digital [Autor]

La veleta está conectada a la primera entrada analógica disponible en el módulo, que es identificada por el software como %IW64, que posteriormente se escala en grados de acuerdo a una parametrización de los datos recibidos.

En la siguiente lista se nombran las partes correspondientes a los números de la figura 71 que muestra la planta

1. Aspas: con una longitud de 23 cm, son las encargadas de transferir el empuje producido por el viento debido a la diferencia de velocidades del aire entre cada uno de sus bordes al rotor.
2. Rotor. Este elemento es de primordial importancia, puesto que sobre este giran las aspas, y van soportados los anillos deslizantes.
3. Góndola: en su interior se encuentra el eje de rotación, el rodamiento y el encoder incremental tipo NPN.
4. Torre: se hizo cilíndrica, como las utilizadas en la industria eólica.
5. Base: donde se soporta toda la estructura.
6. Ventilador

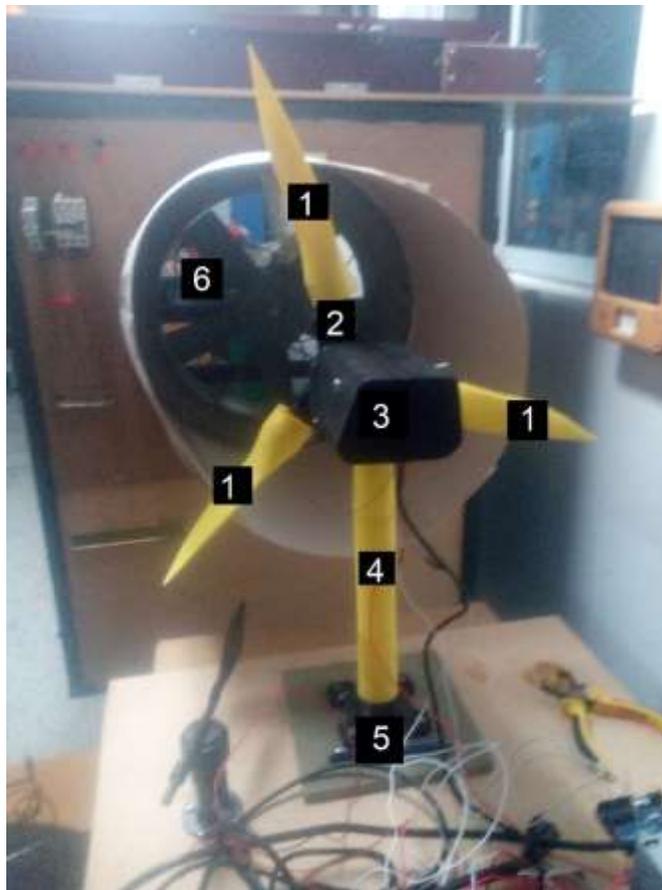


Figura 71. Prototipo de aerogenerador [Autor]

A continuación, se muestra los elementos que corresponden a la figura 72.

1. Aspas: su diseño es recto, con un perfil inclinado, con el fin de que el viento pase con más rapidez por un lado que por el otro y así se genera el empuje de sustentación.
2. Servomotores: se utilizaron servos con engranes de plástico y controlados por PWM.
3. Rotor: es el que transmite el movimiento rotacional y donde se soportan los servomotores para controlar el ángulo de las aspas.

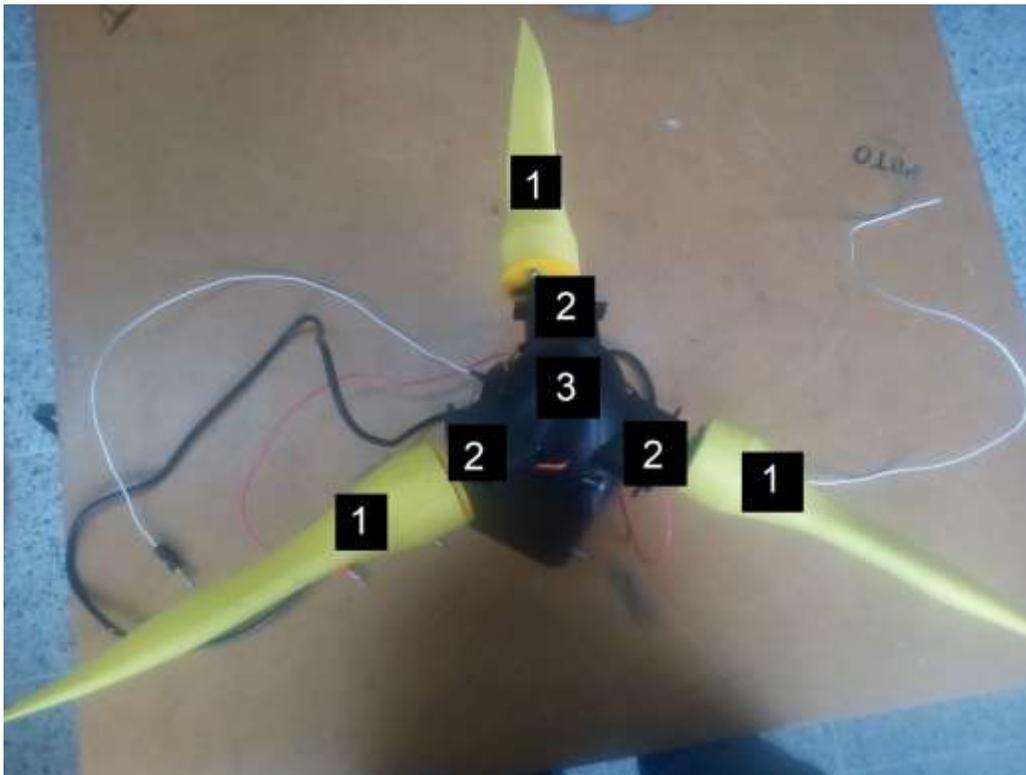


Figura 72. Vista frontal de la parte superior del aerogenerador. [Autor]

El set point del sistema de control será la velocidad angular deseada en el rotor medida por el encoder, para velocidades menores a este valor, no habrá acción alguna de los actuadores, pero al aumentar este valor, se utilizarán los servos como un freno aerodinámico, este hecho se justifica en el marco teórico previo. SCL está basado en el lenguaje de programación PASCAL.

Como se implementó un control difuso, no es necesario conocer la función de transferencia o demás posibles modelos de la planta, lo que es necesario es conocer cómo funcionan las variables de acuerdo a la experimentación, teniendo

en cuenta que esta planta es altamente no línea, lo más acorde sería basarse en la experimentación.

Para crear una función SCL (lenguaje de control estructurado), se hace de la siguiente forma:

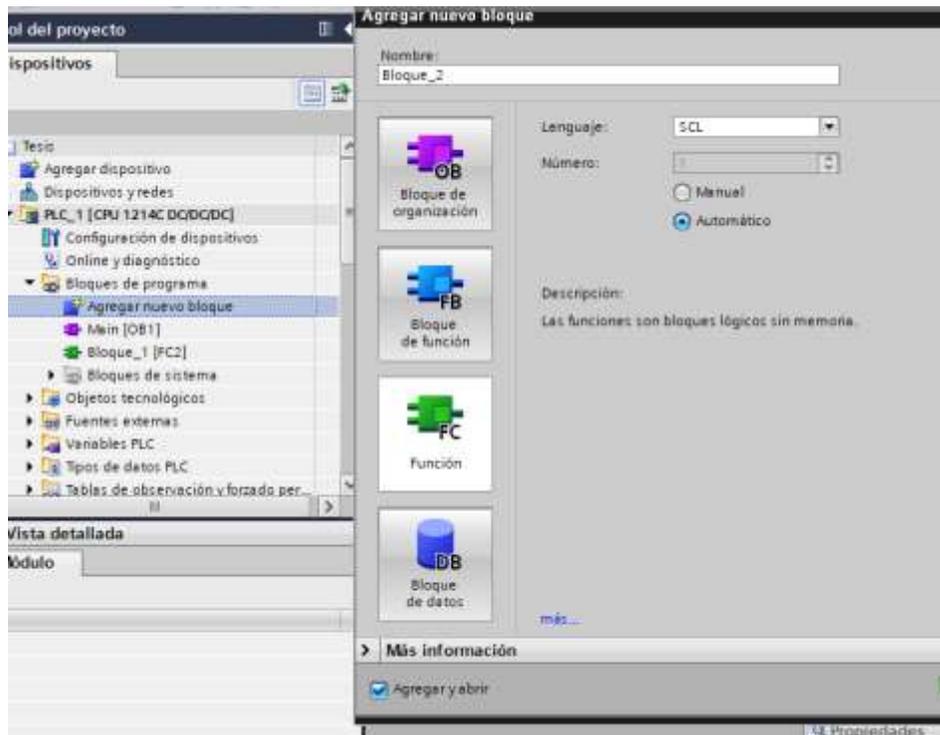


Figura 73. Creación de función SCL [Autor]

La programación se hace utilizando lenguaje estructurado, como en la siguiente imagen:

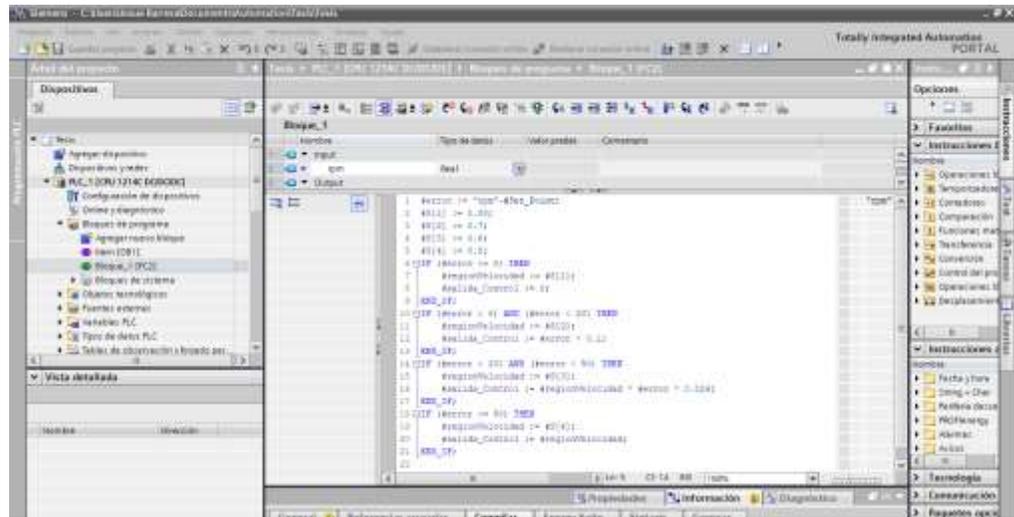


Figura 74. Programación en TIA Portal [Autor].

A continuación, se muestra, el bloque SCL con su salida de control y escalado para la salida analógica.

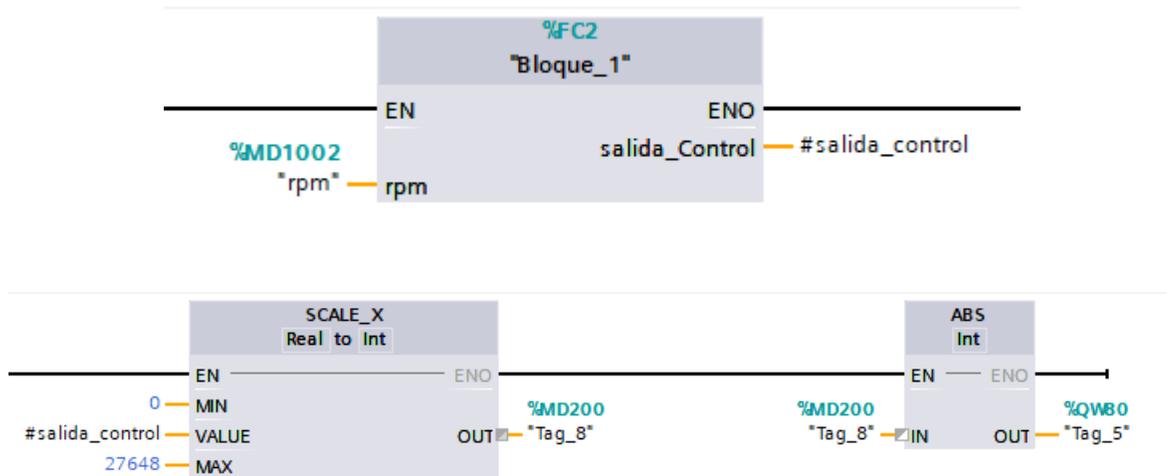


Figura 75. Función SCL con control difuso y escalado para salida analógica [Autor]

Para utilizar el generador de impulsos, se configura la salida a transistor, para esto primero se activa la salida, luego en parametrización se le dice la base de tiempo en milisegundos, el formato de duración de pulso en diezmilésimas, el tiempo de ciclo en 20ms y la duración del impulso inicial en 10 diezmilésimas.

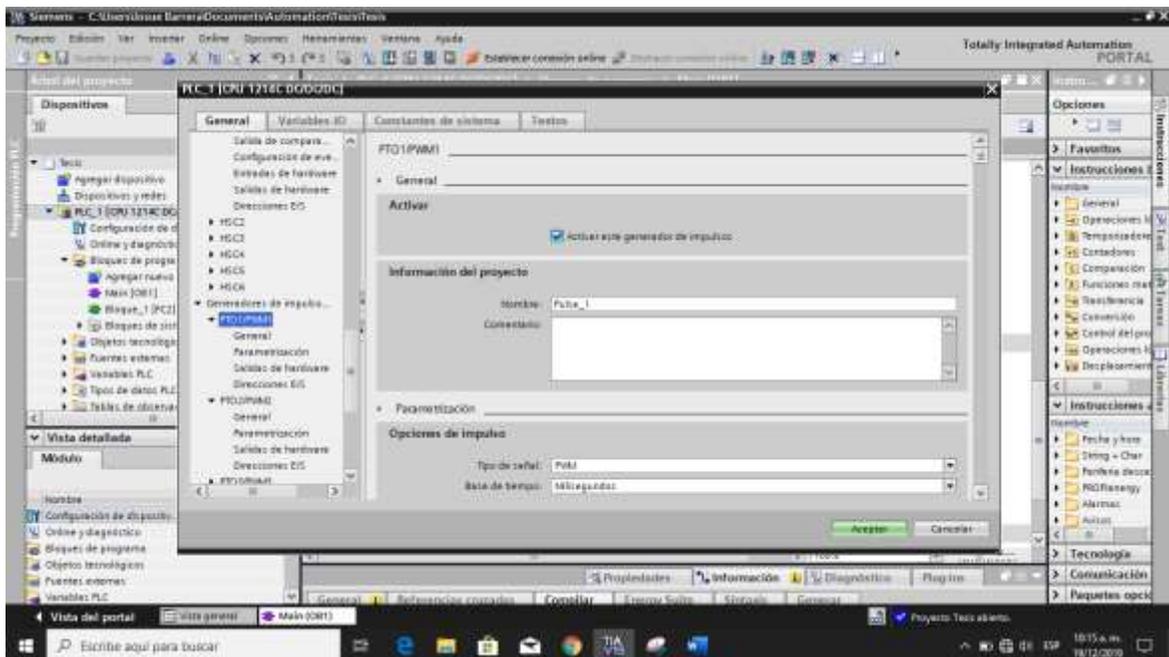


Figura 76. Propiedades de hardware del PLC para configurar la modulación por ancho de pulso [Autor].

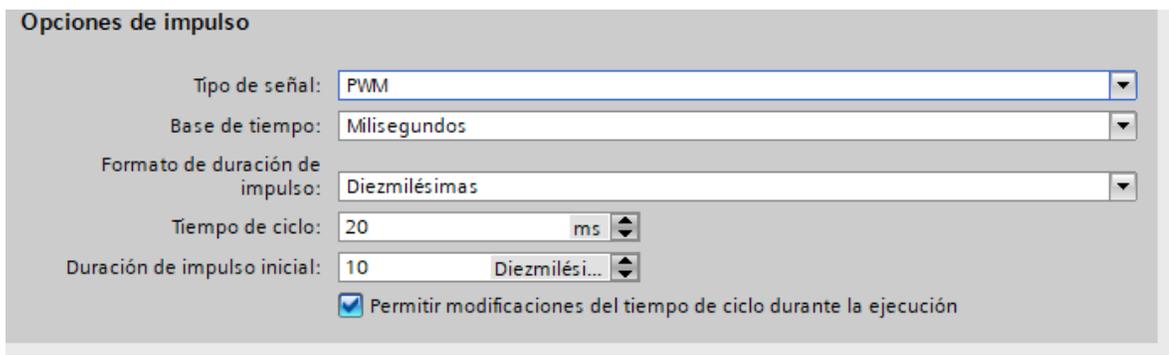


Figura 77. Parametrización del periodo y el ciclo de trabajo [Autor].

La salida del impulso se hará con la %Q0.0 y la dirección es una palabra, como 1008 por ejemplo.

Para la modulación por ancho de pulso, se toma la salida de control y se escala con valores de uno a diez, este parámetro le dice al generador de pulsos que ciclo de trabajo utilizar. Con la función move se transfieren estos datos a la salida a transistor de la salida digital que toma valores con su palabra nombrada en este caso como %QW1008.

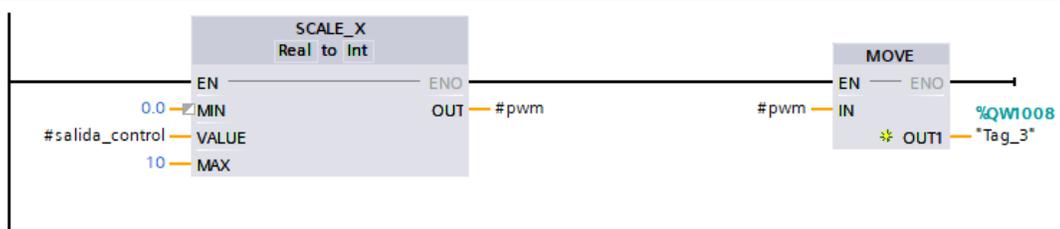


Figura 78. Transferencia de los datos del control a la palabra del PWM [Autor].

Para las pruebas se utilizó un ventilador conectado a 220V ubicado en el laboratorio de control de la universidad, se realizó un túnel de viento con el objetivo de enfocar el flujo de aire hacia las aspas y no que se valla por los lados. Haciendo uso del PLC S7-1200 como se muestra en la siguiente figura. Las pruebas permitieron caracterizar la planta, dando un buen desempeño. Se realizó un tablero de control para facilitar las conexiones, este dispone de espacio para los sensores, actuadores y fuentes de alimentación.



Figura 79. Realización de pruebas con ventilador del laboratorio de control. [Autor]

Como resultado en cuanto al movimiento del rotor, se puede decir que la velocidad nominal de arranque que da el ventilador con una buena configuración del ángulo de cabeceo de las aspas es de 30rpm, si se quiere que las rpm bajen se cambia el ángulo de 80 grados que es el valor para que arranque, a valores menores, haciendo así de la velocidad angular disminuya.

Los resultados de la caracterización fueron los siguientes, demostrando que el sistema es altamente no lineal:

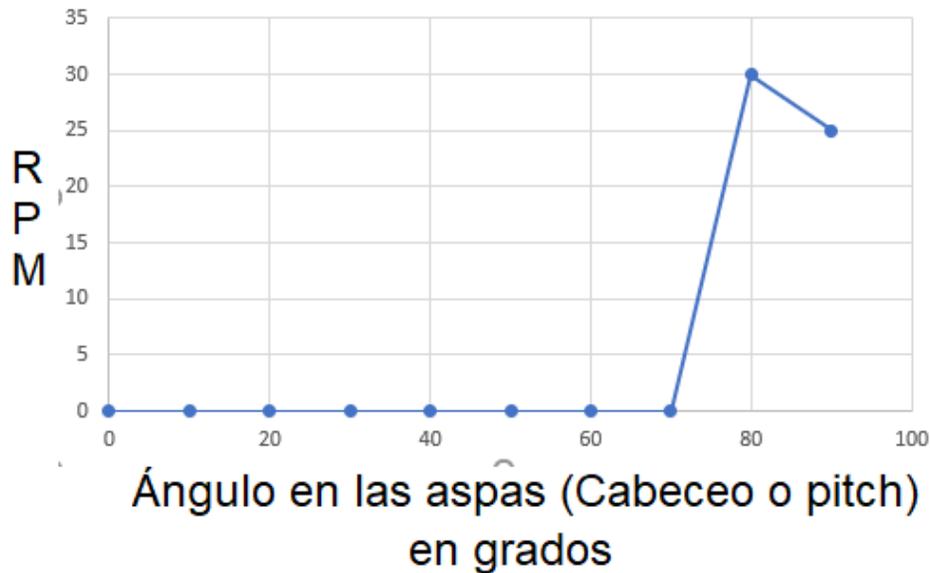


Figura 80. Caracterización de la velocidad angular respecto a los ángulos en las aspas. [Autor]

En la siguiente figura se muestra la lectura del encoder de la velocidad angular del rotor ante un aumento de la velocidad nominal debido al incremento de la velocidad del viento, donde el objetivo es mantener las lecturas en 30rpm.

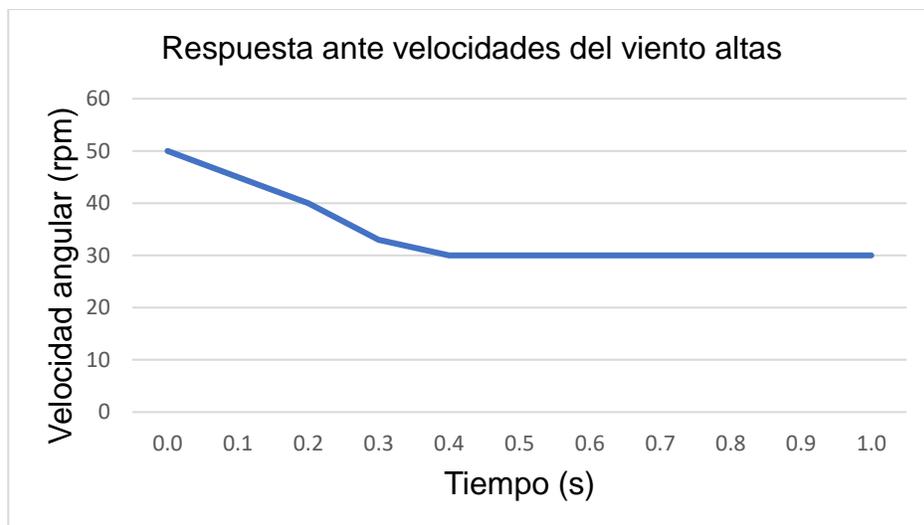


Figura 81. Grafica velocidad angular en relación a su respuesta en el tiempo [Autor]

### 4.3.1 Interfaz HMI

Se implementó una interfaz gráfica en la pantalla HMI para poder observar en tiempo real y de manera intuitiva los valores del proceso.



Figura 82. Imagen raíz HMI [Autor]

## 5. CONCLUSIONES

- El autor se da cuenta que la caracterización es muy diferente a lo que se esperaba, pero al momento de hacer pruebas es evidente para esta planta que el rango de ángulos que generan movimiento en las aspas está entre 70 y 90 grados, antes de estos valores no se produce la suficiente sustentación, por lo que las aspas no se mueven. Esto nos permite identificar que para querer hacer detener la planta ante ráfagas muy fuertes de viento es suficiente con usar ángulos inferiores a 70 grados.
- Se utilizó lenguaje de control estructurado siendo así una opción para futuros trabajos de investigación, este tipo de programación la utilizan muchos programadores de países desarrollados, puesto que podemos programar para las características físicas de la planta.
- Mecánicamente, el prototipo tiene un diseño aceptable, se podrían hacer mejoras con mayor presupuesto y con la experiencia obtenida en este proyecto.
- Por medio del freno aerodinámico de control activo en las aspas se disminuyeron las cargas y se aumenta la vida útil.
- La relación eficiencia-vida útil del aerogenerador es mejor que sin ningún tipo de control
- Al utilizar programación en SCL, es posible cambiar las opciones de control de forma tal que el programador pueda ajustar desde otro enfoque la forma en que funciona el controlador, por ejemplo, es posible colocar condiciones y rangos de operación específicos por si la planta tiene regiones no lineales. En este caso en el bloque de programación de SCL se hizo un función entre control difuso y control PI
- El S7-1200 tiene una baja capacidad de procesamiento para métodos de control más avanzados como el Fuzzy, por lo cual solo es posible utilizarlo para controladores sencillos, si se quiere un control más complejo es necesario utilizar PLC con mayor capacidad, como el S7-1500 por ejemplo.
- Por supuesto que no es lo mismo un aerogenerador de la vida real que un prototipo, la forma en que funciona la aerodinámica, la mecánica y el control

varía bastante, pero de esta forma es posible investigar sobre este tema, introducirse en este importante campo del control automático y educarse al respecto de forma económica. Sería muy bueno que la universidad invirtiera recursos tanto académicos, de recursos humanos y monetarios para así tener mayor prestigio en este campo que empieza a entrar en Colombia.

- Las investigaciones sistemáticas de casos validan la efectividad del enfoque.
- Es posible automatizar un aerogenerador utilizando un PLC, para un control más óptimo, completo y robusto es necesario utilizar más sensores y versiones de PLC más avanzadas como por ejemplo el S7-1500 o intentar con tarjetas de adquisición de datos, por ejemplo.
- La herramienta para análisis mecatrónico Simscape de Simulink es muy útil para aprender el funcionamiento de planta con múltiples sistemas de control como el tratado en este trabajo, los resultados de sus simulaciones son similares a los de la vida real según se ha investigado, lo cual quiere decir que estos tienen coherencia con el mundo real.
- Es necesario seguir investigando sobre este tema tan importante, las posibilidades de nuevos enfoques, diseños y ampliaciones a lo desarrollado son variadas.

## REFERENCIAS

- [1] SAIDUR, Rahman. Environmental impact of wind energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.15, No.5, 2423-2430, 2011.
- [2] TAVNER, Peter. Wind power as a clean-energy contributor, Energy Policy Vol.36, No.12, 4397-4400, 2008.
- [3] DENNY Eleanor y O'MALLEY Mark, Wind generation, power system operation, and emissions reduction, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No.1, 341-347, 2006.
- [4] LING Sun, YONGJUN Gong, y ZUWEN Wang. Design of large scale wind power yawing bearing test-bed control system, IEEE International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), 319-323, 2011.
- [5] GONZÁLES, Alexander. Estado del arte del control de la potencia en generadores eólicos. Empresas públicas de Medellín. Medellín, Colombia. 2008.
- [6] SHEN Xiaojun, DU Wanli, Expectation and Review of Control Strategy of Large Wind Turbines Yaw System, Transactions of China Electrotechnical Society, Vol.30, No.10, 196-203, 2015.
- [7] GUO Feng, JIANG Wenyu, SHAO Hongjung, DU Ying y SHE Jianshu. Research on the wind Turbine Yaw System Based on PLC. IEEE [2017 29ª Conferencia de Control y Decisión de China \(CCDC\)](#). 2017
- [8] BURTON Tony, SHARPE David, N. Jenkins, and E. Bossanyi. Wind Energy Handbook. Wiley, 2001.
- [9] FIERRO, Tony. Prolongación de vida del rodamiento en ejes de turbinas eólicas. Power Engineering. 2007.
- [10] GASH R, TWELE J. Plantas de energía eólica. 2002.
- [11] CARTA José, CALERO, Roque. Centrales de energía renovables. Peason Prentice Hall.
- [12] GUARNIZO, Cristian. Metodología para la implementación del controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC S7-300. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín. 2011.
- [13] MALAGÓN, Johan Andrés. Diseño e implementación de un sistema de supervisión basado en control difuso para planta de temperatura t5553 ubicada en

el laboratorio de control en la facultad tecnológica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2018

[14] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 1131 Programmable Controllers. Part 7: Fuzzy Control Programming. IEC 1131-7, Jan. 1997.

[15] DURÁN Christian y GARCÍA Héctor. Desarrollo de un sistema inalámbrico para la supervisión y control de un aerogenerador. Universidad de Pamplona. 2013

[16] MOLLY, J.P. Status der Windenergientzung in Deutschland. 31 de febrero de 2011.

[17] MOYA Jorge, CHAGOYÉN, César. Diseño de caja multiplicadora para turbinas eólica. VII Conferencia internacional de ingeniería mecánica. Santa maría, Cuba.

[18] YAOYIE Yin, The Dynamic stability analysis of wind turbines under different control strategies

[19] KENNEL Ralph. Why Do Incremental Encoders Do a Reasonably Good Job in Electrical Drives with Digital Control?. Wuppertal University. 2005.

[20] WANG Lihua, YUE Dawei. Study of Anemometer for Wind Power Generation. International Conference on Mechatronics and Control. 2014. Jinzhou, China.

[21] BETZ A. Introduction to the Theory of Flow Machines. Oxford: Permagon Press; 1966.

[22] JACKSON G, DIRK S. State of the art in wind turbine control: Trends and challenges. Universidad de Duisburg-Essen, Alemania. 2016.

[23] HAWS Abdulhamed, KATEBI Reza. Wind Turbine Control using PI Pitch Angle Controller. Industrial Control Centre, University of Strathclyde, Glasgow, UK.

[24] MOODI Hoda, BUSTAN Danyal. Wind Turbine Control Using T-S Systems with Nonlinear Consequent Parts. Quchan University of Technology, Quchan, Khorasan Razavi, Iran.

[25] ABIR Afdhal, MEHDI Dhaoui, LASSAAD Sbita. Pitch Angle control of the variable speed wind turbine. 17th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering - STA'2016, Sousse, Tunisia, December 19-21, 2016

[26] MUHAMMAD Jabir, SAFDAR Raza, HAZLIE Mokhlis. Intermittent Smoothing Approaches for Wind Power Output: A Review. Revista Energies. 12 de octubre de 2017

## ANEXOS

En la figura 73 se lee la variable analógica que contiene la dirección del viento, se escala de tal forma que la lectura de 0-5V corresponda a valores de 0-360 grados.

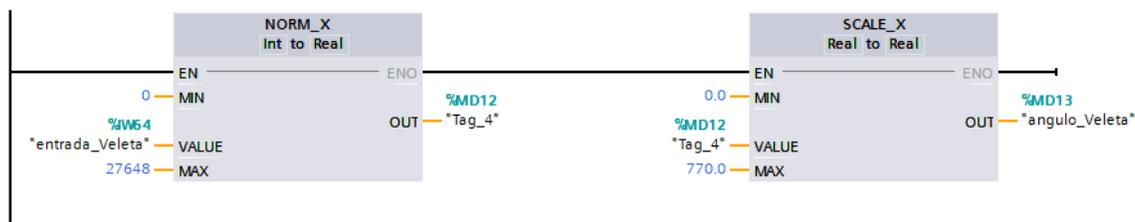


Figura 83. Configuración lectura analógica de la dirección del viento. [Autor]

Para medir la RPM del rotor, se hace uso de un encoder, el bloque mostrado en la figura 74 permite leer los pulsos y saber la velocidad.



Figura 84. Lectura y conversión de los pulsos del encoder en rpm [Autor]

### Implementación del control difuso en SCL

La metodología de programación se basa en lenguaje estructurado definido en el estándar IEC 61131-3, por tal razón, cualquier PLC que cumpla con este estándar, puede realizar la metodología anteriormente propuesta. En este mismo estándar en la sección 7, se define un lenguaje de programación de lógica difusa, llamado FCL (*Fuzzy control language*).

En las versiones anteriores del STEP7, para programar en SCL era necesario declarar las variables, así como en los lenguajes de alto nivel como C, pero en la

versión 15 de TIA Portal ya no es necesario, se configuran las entradas y salidas fácilmente por medio de bloques.

AFP: vector función de pertenencia

EFP: valor de pertenencia

	Nombre	Tipo de datos	Valor predet.
▼	Input		
■	rpm	Real	
▼	Output		
■	salida	Real	
▼	InOut		
■	<Agregar>		
▼	Temp		
▶	AFP	Array[1..1, 1..3] of ...	
▶	EFP	Array[1..1, 1..3] of ...	
▶	WS	Array[1..3] of Real	
▶	S	Array[1..3] of Real	
■	temp	Real	
■	n	Int	
■	num	Real	
■	den	Real	
■	error	Real	
▼	Constant		
■	Set_Point	Real	25.0
▼	Return		
■	Control_difuso	Void	

Figura 85. Lista de variables usadas en el bloque de función SCL. [Autor]

```
#error:=#Set_Point-"rpm"-;
#S[1]:=0.2;
#S[2] := 0.5;
#S[3] := 0.9;
///Definicion de las funciones de pertenencia
IF (#error > 0) AND (#error < -20) THEN
  #AFP[1, 1] := True;
```

```

IF #error <= 10 THEN
  #EFP[1, 1] := (#error - 0) / 10;
ELSE
  #EFP[1, 1] := - (#error - 20) / 10;
END_IF;
END_IF;

IF (#error > -20) AND (#error < -40) THEN
  #AFP[1, 2] := True;
  IF #error <= 20 THEN
    #EFP[1, 2] := ("rpm" - 20) / 10;
  ELSE
    #EFP[1, 2] := - ("rpm" - 40) / 10;
  END_IF;
END_IF;

IF (#error > -40) AND (#error < -60) THEN
  #AFP[1, 3] := True;
  IF #error <= 40 THEN
    #EFP[1, 3] := (#error - 40) / 10;
  ELSE
    #EFP[1, 3] := - (#error - 60) / 10;
  END_IF;
END_IF;

```

Las dimensiones de los vectores EFP y AFP dependen de la cantidad de entradas (filas) y el número de funciones de pertenencia (columnas). El vector EFP almacena los valores de la evaluación de las funciones de pertenencia, mientras que AFP almacena qué funciones de pertenencia se activaron (valor lógico verdadero sí se activó y falso de lo contrario). A continuación, se definen las reglas.

```

IF #AFP[1, 1] AND #AFP[1, 2] THEN
  IF #EFP[1, 1] > #EFP[1, 2] THEN
    #temp := #EFP[1, 2];
  ELSE
    #temp := #EFP[1, 1];
  END_IF;
  IF #WS[1] < #temp THEN
    #WS[1] := #temp;
  END_IF;
END_IF;

IF #AFP[1, 1] AND #AFP[1, 3] THEN
  IF #EFP[1, 1] > #EFP[1, 3] THEN

```

```

    #temp := #EFP[1, 3];
ELSE
    #temp := #EFP[1, 1];
END_IF;
IF #WS[2] < #temp THEN
    #WS[2] := #temp;
END_IF;
END_IF;

IF #AFP[1, 2] AND #AFP[1, 3] THEN
    IF #EFP[1, 2] > #EFP[1, 3] THEN
        #temp := #EFP[1, 3];
    ELSE
        #temp := #EFP[1, 2];
    END_IF;
    IF #WS[3] < #temp THEN
        #WS[3] := #temp;
    END_IF;
END_IF;

```

El vector WS contiene los pesos de cada una de las salidas. La variable temp almacena valores intermedios en la asignación de los valores de WS. Cada vez que se evalúa una regla, inicialmente se almacena el mínimo entre los valores de las funciones de pertenencia que hacen parte de la regla. Posteriormente, si existen varias reglas asociadas a una misma salida, entonces se compara el valor obtenido en la regla con el valor del peso almacenado previamente a la salida de dicha regla. Se asigna como peso el mayor entre los dos.

$$Salida = \frac{\sum_{i=1}^n WS[n]S[n]}{\sum_{i=1}^n WS[n]} \quad (31)$$

Donde n es el número de funciones de pertenencia de la salida, WS[n] contiene el máximo entre las reglas que comparten la salida S[n]. El programa en SCL de la Ec. (31) para 3 funciones de salida, es:

```

FOR n:=1 TO 3 DO
    num:=WS[n]*S[n]+num;
    den:=WS[n]+den;
END_FOR

ANGULO:=num/den;

```

La figura 76 muestra el bloque de función que contiene el código de la programación con lógica difusa, se aprecia que las entradas son la velocidad y rpm del rotor, mientras que la salida es el ángulo de pitch que debería tener cada pala.



Figura 86. Armado de la góndola con los actuadores y sensores [Autor]



Figura 87. Cableado del rotor y los anillos deslizantes [Autor]



Figura 88. Colocación de las bananas tipo hembra en el panel de conexiones  
[Autor]

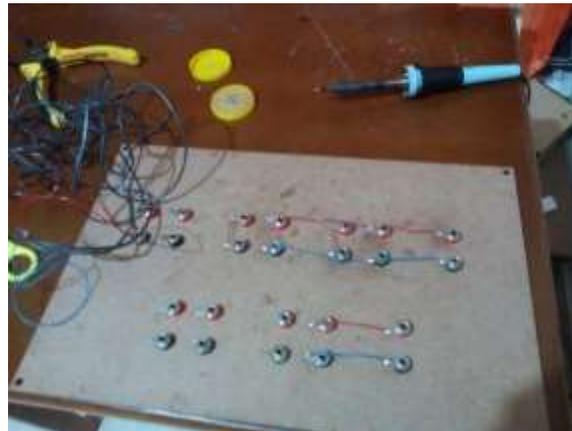


Figura 89. Soldadura de los puentes eléctricos que comunican las bananas.  
[Autor]