



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Instrumentación y Control Automático

Control inteligente como método de ajuste de velocidad en un aerogenerador de eje horizontal

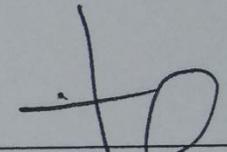
Tesis

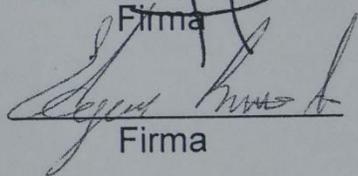
Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:
Hugo Torres Salinas

Dirigido por:
Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

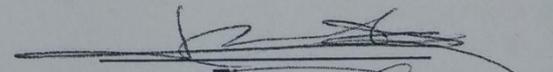
Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Presidente

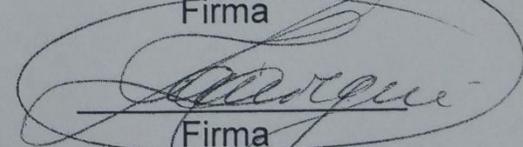

Firma


Firma

Dr. Edgar Rivas Araiza
Secretario

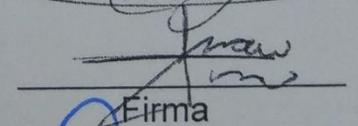
Dr. Marcelino Gutiérrez Villalobos
Vocal

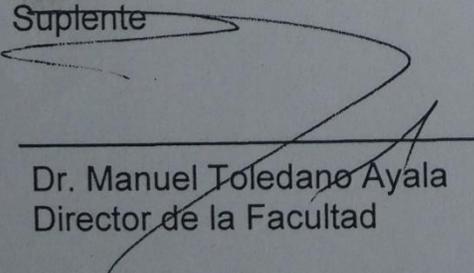

Firma

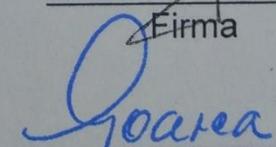

Firma

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Suplente

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín
Suplente


Firma


Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad


Dra. en C. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Resumen

Actualmente, la búsqueda de formas eficientes de generar electricidad a través de la energía renovable es uno de los objetivos perseguidos en muchas áreas de estudio. El uso de un aerogenerador para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, que a su vez se transformará en energía eléctrica, es una de las formas más populares de lograr este objetivo.

En los aerogeneradores de eje horizontal se usa un método de control llamado pitch control, que consiste en modificar el ángulo en el que el viento afecta las palas de la turbina eólica, pudiendo así controlar la velocidad de rotación en el generador y la potencia de salida cuando está conectado a la red.

En este trabajo comparamos el rendimiento de un control de tono usando un PID convencional y una combinación de PID con redes neuronales. El objetivo de la comparación es saber cuál de los dos controladores ofrece los mejores resultados.

Palabras clave: viento; aerogenerador; energía limpia; PID; red neuronal; control.

Abstract

Currently finding efficient ways to generate electricity through renewable energy is one of the objectives pursued in many areas of study. The use of a wind turbine to transform the kinetic energy of the wind to mechanical energy which in turn will be transformed into electrical energy is one of the most popular ways to achieve this goal.

In horizontal axis wind turbines a control method called pitch control is used, which consists in modifying the angle at which the wind affects the blades of the wind turbine, thus being able to control the speed of rotation in the generator as well as the output power when is connected to the mains.

In this work we compare the performance of a pitch control using a conventional PID and a combination of PID with neural networks. The objective of the comparison is to know which of the two controllers delivers the best results.

Key words: wind; wind turbine; generator; clean energy; PID; neural networks, control.

Agradecimientos

A mis padres por ser mi principal fuente de apoyo, es gracias a ellos que he podido llegar a este punto.

A mis compañeros y amigos por haber compartido grandes experiencias durante el trayecto de esta aventura.

A todos los maestros que han aportado conocimiento y experiencia para tratar de convertirme en una mejor persona tanto profesionalmente como personalmente.

A las personas que han tenido que soportar mi mal carácter en situaciones desagradables.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, gracias a esta gran institución que me ha permitido desarrollar y mejorar.

Finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico que me ha brindado y que sin él concluir los estudios de maestría no habría sido posible.

Índice

Resumen	iii
Abstract	iv
Agradecimientos.....	v
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tablas.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Descripción del problema.....	4
1.2 Justificación	5
2. REVISIÓN LITERARIA.....	5
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 Fundamentación Teórica	10
2.2.1 Tipos de aerogenerador	10
2.2.2 Métodos para identificar sistemas.....	12
2.2.3 Servomotores.....	13
2.2.4 Modelo del aerogenerador	15
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	18
3.1 Hipótesis.....	18
3.2 Objetivos.....	18
4. METODOLOGÍA.....	19
4.1 Diseño del control <i>pitch</i>	19
4.2 Diseño de controladores	21

4.2.1 Controlador PID.....	21
4.2.2 Sintonización del PID convencional	22
4.2.3 PID auto sintonizable por asignación de polos.....	24
4.2.4 PID autoajustable basado en redes neuronales.....	26
4.3 Diagramas de control.....	31
4.3.1 Diagramas de control	31
4.4 Especificaciones y diagrama motor de DC	33
4.5 Especificaciones y diagrama del encoder.....	35
4.6 Dispositivo de Control.....	37
4.6.1 Características Raspberry pi 3	37
4.6.2 Configuración de la comunicación serial	38
4.6.3 Descarga de librerías y programas	43
4.7 Diseño de tarjeta de adquisición.....	45
4.7.1 Controlador de tarjeta de adquisición.....	45
4.7.2 Aislamiento de control.....	47
4.7.3 Diseño esquemático.....	47
4.7.4 Diseño de la tarjeta impresa.....	49
4.8 Etapa de potencia	49
4.9 Implementación	51
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	53
5.1 Resultados.....	53
5.1.1 Control <i>pitch</i>	53
5.1.2 Controlador PID.....	53
5.1.3 Controlador Neuro-PID.....	55
5.1.4 Tarjeta de adquisición	57

5.1.5 Conexión del encoder	58
5.1.6 Etapa de potencia	59
5.1.7 Implementación PID	61
5.1.8 Implementación controlador neuro-PID.....	66
5.2 Conclusiones	71
6. BIBLIOGRAFÍA	73

Índice de Figuras

Figura 1. Capacidad instalada en México.	1
Figura 2. Generación de energías limpias	2
Figura 3. Comparación del comportamiento de la velocidad en generador síncrono con estabilizador difuso, PID y sin estabilización.	7
Figura 4. Controlador difuso vs controlador PID.....	7
Figura 5. Comparación de potencia entregada de un generador eléctrico utilizando IGA y GA.	9
Figura 6. Comparación de un controlador difuso-PID respecto a un PID y un controlador difuso convencional.....	10
Figura 7. División de aerogeneradores.	12
Figura 8. Ejemplo de diagrama de un servomotor	13
Figura 9. Funcionamiento de un servomotor.....	14
Figura 10. Representación del cambio en la velocidad del viento.....	15
Figura 11. Descripción del control <i>pitch</i>	20
Figura 12. Diagrama de bloques del controlador PID.....	22
Figura 13. Red neuronal propuesta.....	27
Figura 14. Primer sistema de control propuesto.....	31
Figura 15. Lazo interno de control.....	32
Figura 16. Diagrama de bloques del sistema a desarrollar.	33
Figura 17. Diagrama del motor Maxon F2260.	35
Figura 18. Dimensiones del encoder.....	36
Figura 19. Distribución de los pines en la Raspberry pi 3.	38
Figura 20. Captura de pantalla 1 de la Raspberry pi.	39
Figura 21. Captura de pantalla 2 de la Raspberry pi.	40
Figura 22. Captura de pantalla 3 de la Raspberry pi.	40
Figura 23. Captura de pantalla 3 de la Raspberry pi.	42
Figura 24. Captura de pantalla 4 de la Raspberry pi.	43
Figura 25. Pines del dsPIC utilizado.....	47
Figura 26. Conexión del optoacoplador 4n25.	47

Figura 27. Diseño esquemático de la tarjeta adquisidora.....	48
Figura 28. Conexión de los optoacopladores y la Raspberry pi.	48
Figura 29. PCB de la tarjeta de adquisición.	49
Figura 30. Diagrama de bloques del medio puente H.....	50
Figura 31. Pines de control en el puente H.	51
Figura 32. Aerogenerador a instalar.....	52
Figura 33. Diagrama de flujo del controlador PID.....	54
Figura 34. Diagrama de flujo del Controlador Neuro-PID.....	56
Figura 35. Vista de la tarjeta sin componentes.....	57
Figura 36. Vista de la tarjeta de adquisición.....	57
Figura 37. Vista de la tarjeta de adquisición desde arriba.....	58
Figura 38. Conexión del encoder a la tarjeta de adquisición.....	58
Figura 39. Conexión de la tarjeta de adquisición al puente H.	59
Figura 40. Conexión del Puente H al motor.....	60
Figura 41. Distribución de pines del puente H.....	61
Figura 42. Resultados obtenidos con la ganancia crítica.	62
Figura 43. Señal de control y error obtenidos con la ganancia crítica.	62
Figura 44. Comportamiento del sistema con las ganancias obtenidas.....	63
Figura 45. Comportamiento del sistema valor deseado vs valor real.	64
Figura 46. Comportamiento del sistema señal de control y error.	64
Figura 47. Comportamiento del sistema a perturbaciones.	65
Figura 48. Comportamiento de la señal de control a perturbaciones.	65
Figura 49. Comportamiento del sistema con red neuronal.	66
Figura 50. Comportamiento de la señal de control con red neuronal.	67
Figura 51. Comportamiento de la red neuronal ante perturbaciones.	68
Figura 52. Comportamiento de la señal de control ante perturbaciones con la red neuronal.	68
Figura 53. Comportamiento del sistema controlado por red neuronal ante distintos <i>setpoints</i>	69
Figura 54. Comportamiento de la señal de control dada por red neuronal ante distintos <i>setpoints</i>	69

Figura 55. Resultados finales del controlador.	70
Figura 56. Señal de control final.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Ventajas de los dos tipos de aerogenerador.</i>	3
Tabla 2. Regla de sintonización basada en el escalón de la planta.	23
Tabla 3. Regla de sintonización basada en la ganancia crítica.	23
Tabla 4. Valores a voltaje nominal del motor.....	34
Tabla 5. Características del motor.....	34
Tabla 6. Datos térmicos del motor.....	34
Tabla 7. Características adicionales del motor.....	34
Tabla 8. Conexión de colores del encoder Yumo B950.	36
Tabla 9. Función de los pines del IBT_2.	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En la actualidad es necesario producir energía eléctrica a través de métodos más ecológicos, es decir, utilizando energías alternativas a la muy utilizada quema de combustibles fósiles. Debido a lo anterior, los países han estado incrementando la implementación de energías alternativas como la energía eólica, la energía hidroeléctrica, la biomasa y la energía nuclear. La Figura 1 muestra los porcentajes de generación de energía eléctrica de diferentes fuentes en México.

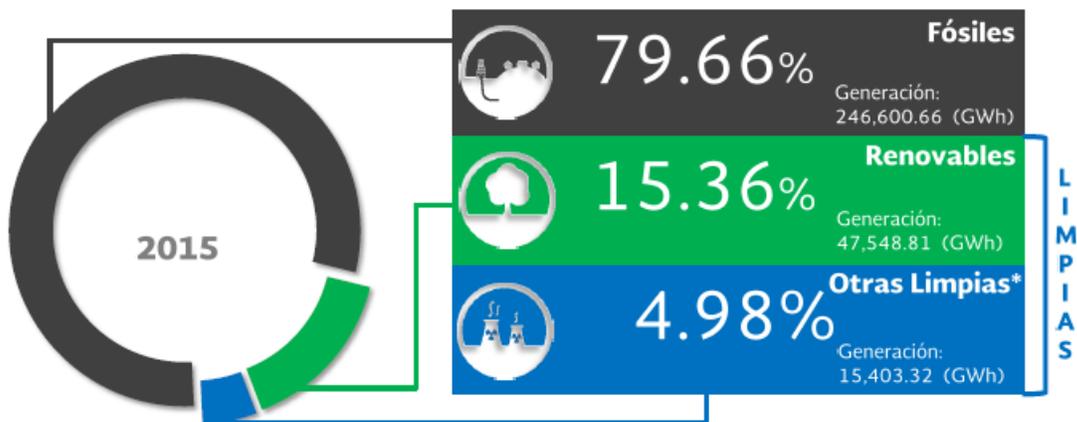


Figura 1. Capacidad instalada en México (Secretaría de Energía, 2016).

El porcentaje de energías renovables que se muestra en la Figura 1 corresponde a energía hidroeléctrica, biogás, eólica, fotovoltaica, geotérmica y bagazo. Para el desarrollo de este trabajo es importante mostrar cómo se encuentra distribuida la generación de energía limpia en México por lo que Figura 2 detalla los porcentajes de generación de cada una de las fuentes renovables mencionadas.

Este trabajo se centra en la implementación de un control inteligente para encontrar una forma eficiente de obtener la máxima producción de energía utilizando la

energía eólica. El uso de esta energía alternativa se ha incrementado en los últimos años. En México, por ejemplo, su uso aumentó en casi un 38%, sin embargo, todavía se están buscando formas de hacer que la producción de electricidad sea más eficiente.

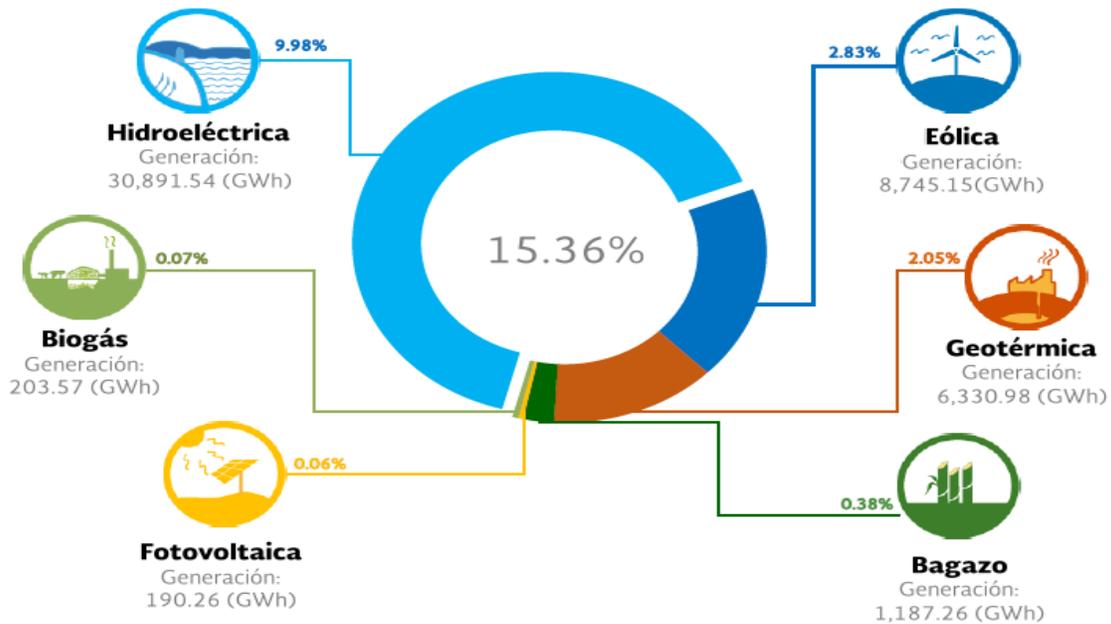


Figura 2. Generación de energías limpias (Secretaría de Energía, 2016).

La conversión de la energía cinética del aire a energía eléctrica se realiza a través de un aerogenerador de los cuales existen dos variaciones principalmente las cuales son los aerogeneradores de eje horizontal y los aerogeneradores de eje vertical.

Los aerogeneradores de eje horizontal son aquellos en los que el eje de rotación del equipo es paralelo al suelo. Esta tecnología tiene ventajas tales como:

- Uso más extendido que los de eje vertical.
- Amplia variedad de modelos.
- Potencias altas.

Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos en los que el eje de rotación es perpendicular al suelo. Presenta ciertas ventajas como:

- Utilizan menos circuitos que los de eje horizontal.
- Se utilizan para potencias más bajas.

En la Tabla 1 se muestran más ventajas de los dos tipos de aerogeneradores.

Aerogenerador de eje vertical (ventajas)	Aerogenerador de eje horizontal (ventajas)
No tiene la necesidad de modificar constantemente su posición con respecto a la dirección del viento.	Mayor eficiencia que los de eje vertical.
Se pueden instalar a bajas alturas.	Capacidad para adaptarse a distintas potencias
Más silenciosos que los de eje horizontal.	No requieren conexión a la red eléctrica para poder arrancar.

Tabla 1. *Ventajas de los dos tipos de aerogenerador.*

Ante la necesidad de aplicar métodos de control a los aerogeneradores de eje horizontal se desarrollaron trabajos, de los cuales el control por regulación por cambio de paso (*pitch controlled*) es uno de los métodos preferidos (Troldborg y Sørensen, 2014).

El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las aspas giren exactamente en el ángulo deseado.

Es por lo anterior que es necesario diseñar un controlador que regule la velocidad del rotor del generador, es decir que disminuya la velocidad del generador al superar el máximo establecido por el fabricante, pero que también mantenga una buena eficiencia de generación de potencia eléctrica. En este caso se propone un sistema para el control *pitch* utilizando una combinación de redes neuronales con controlador PID (Proporcional Integral Derivativo).

1.2 Descripción del problema

Las aspas son elementos fundamentales en el aerogenerador, son las encargadas de recoger la energía del viento, convertir el movimiento lineal de este en un movimiento de rotación, esta energía es transmitida al buje, del buje pasa a un sistema de transmisión mecánica y de ahí al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica (Calvo, 2016) por lo que resulta indispensable asegurar su buen funcionamiento, principalmente evitar que colapsen esto por acción de velocidades superiores a las establecidas en las especificaciones entregadas por el fabricante, es por eso que existe la necesidad de limitar la velocidad de rotación del generador.

Se debe construir un sistema que mida los valores de potencia y voltaje en un aerogenerador, además de medir velocidad del viento que es un factor determinante, pero el parámetro más importante a medir será la velocidad de rotación, es decir la velocidad angular en el rotor del generador. El problema será el disminuir precisamente esta velocidad angular cuando supere el máximo recomendado por el fabricante, pero al mismo tiempo mantenerla estable en un punto cercano a ese máximo para no disminuir la eficiencia; para lograr esto se utilizará un sistema llamado control de *pitch*, que consistirá en el uso de un servomotor acoplado a un mecanismo que permitirá que las aspas del aerogenerador roten sobre su propio eje y así cambiar el ángulo en el que el viento incide en ellas y consecuentemente modificar la velocidad.

El controlador debe de estar diseñado para que, cuando exista velocidad del viento suficiente para superar la máxima velocidad de rotación en el generador, se modifique el ángulo de las aspas del aerogenerador, logrando con esto mantener la velocidad estable en un punto cercano al máximo, nunca superando éste, pero tampoco que debido a la modificación del ángulo se reduzca en demasía la velocidad, pues esto reduciría también la generación de energía.

1.2 Justificación

En la instalación de aerogeneradores es necesario tomar en cuenta distintos factores como la altura, los materiales, la forma, etc., y con base a estos factores se deben de tener en cuenta las limitaciones a las que estará sujeto el aerogenerador en particular.

La estructura mecánica del aerogenerador está diseñada para soportar un esfuerzo máximo ya establecido que depende de la velocidad del rotor del generador y por lo tanto superar la velocidad máxima recomendada por el fabricante implicaría un sobreesfuerzo que ocasionaría el deterioro de las aspas hasta el punto de colapsar y fracturarse.

Es por lo anterior que es necesario diseñar un controlador que regule la velocidad del rotor del generador, es decir que disminuya la velocidad del generador al superar el máximo establecido por el fabricante, pero que también mantenga una buena eficiencia de generación de potencia eléctrica. En este caso se propone un sistema llamado control de ángulo de paso.

2. REVISIÓN LITERARIA

2.1 Antecedentes

Para el control *pitch* existen distintas maneras de realizarlo como por ejemplo hacer el control de todas las aspas en conjunto o cada una de manera individual. El cual ofrece ventajas como la reducción de energía para realizar un frenado único de las tres aspas al realizarlo de manera individual para cada uno. Una de las técnicas usadas ha sido utilizar sensores que puedan medir las cargas asimétricas que actúan sobre el sistema y con base a esto determinar el ángulo óptimo del aspa (Bossanyi, 2003; Control de potencia en aerogeneradores, 2016).

Existen patentes sobre el control individual de las aspas mencionado en el párrafo anterior, como por ejemplo la utilización de medición de flujo en cada una de las aspas esto se realiza por medio de sensores instalados en cada una de las palas los cuales detectarán el flujo del viento y realizarán la corrección necesaria (Larsen *et al.*, 2008; Davis y Fork, 2002).

De igual manera existen distintas maneras para realizar el control *pitch*, es decir nosotros tenemos varias opciones para decidir que método es más conveniente utilizar para mover el ángulo del aspa. Una de ellas es utilizar un controlador PID, sin embargo debido al comportamiento no lineal del aerogenerador no es una opción adecuada ya que aunque es posible utilizar una sintonización de las ganancias del PID para problemas no lineales es necesario un modelo matemático muy preciso del aerogenerador (Bianchi *et al.*, 2007). Por lo que se ha optado por utilizar otros métodos de control como por ejemplo el control difuso que es adecuado para sistemas que requieran control no lineal, y aún más allá de eso, sin la necesidad de un modelo matemático exacto y simplemente conociendo el funcionamiento completo y el comportamiento del sistema, la sintonización de los parámetros puede ser realizada de manera más fácil (Jauch *et al.*, 2007).

En trabajos se ha demostrado que la acción del actuador se puede reducir hasta 50 % utilizando un controlador difuso en lugar de un PID convencional (Scherillo *et al.*, 2012).

En la Figura 3 (Jauch *et al.*, 2007) se puede observar el comportamiento de un aerogenerador analizado en 2007, más específicamente se trata de un generador síncrono. Cabe mencionar que la comparación se realiza en PU(*per unit*) lo que quiere decir que es la relación entre la velocidad obtenida sobre la velocidad deseada(Per-unit System - Open Electrical, 2016).

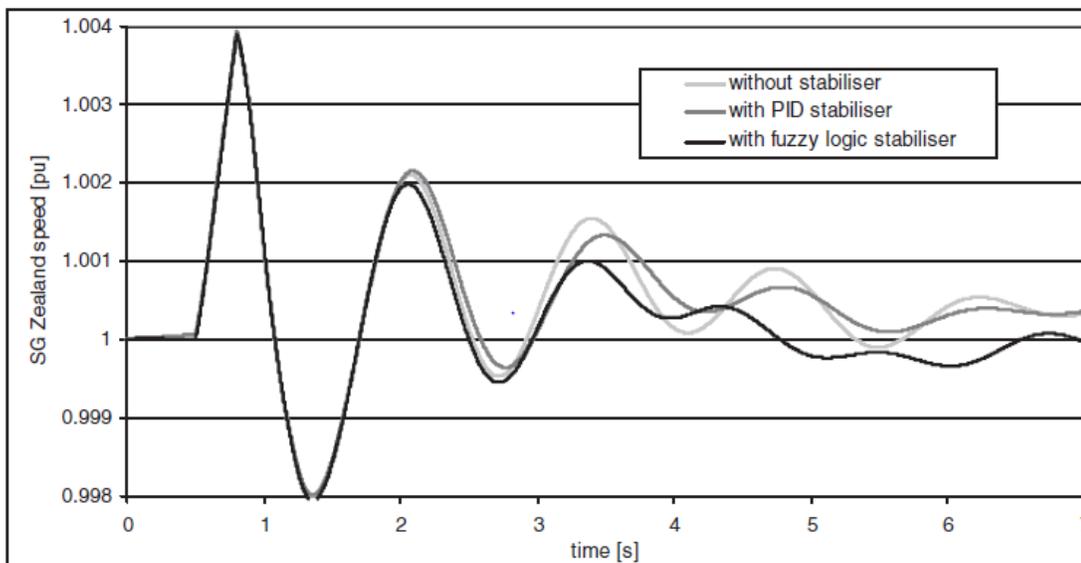


Figura 3. Comparación del comportamiento de la velocidad en generador síncrono con estabilizador difuso, PID y sin estabilización (Jauch *et al.*, 2007).

En la Figura 4 se puede observar la comparación del comportamiento de un generador utilizando un controlador difuso frente a un controlador PID convencional y además se observa una reducción en las oscilaciones que presenta el generador en su velocidad al tratar de alcanzar un *setpoint* de 80 rpm.

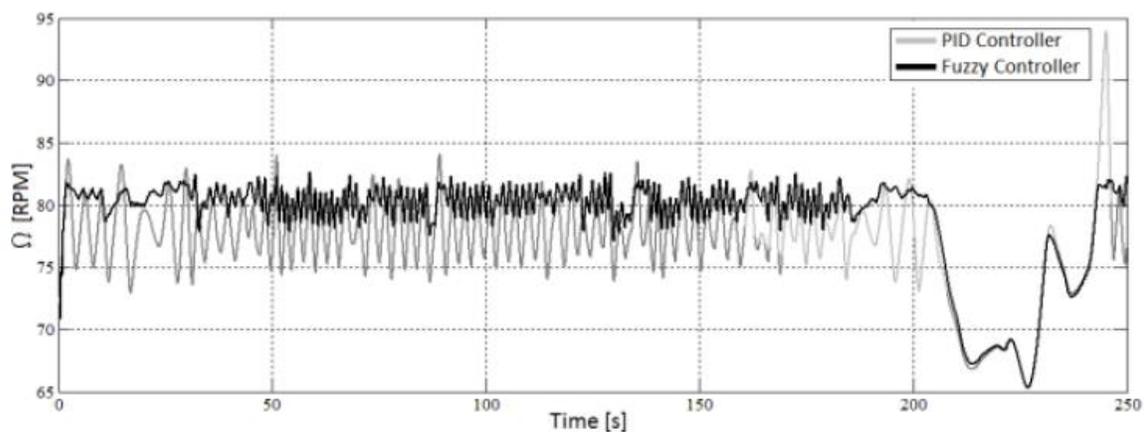


Figura 4. Controlador difuso vs controlador PID. (Scherillo *et al.*, 2012).

Además de la implementación de distintos tipos de control *pitch* se ha buscado también mejorarlo o incluso cambiar este tipo de control, tal es el caso del uso de dispositivos de control de rotor inteligentes, que aunque no han podido sustituir por completo al control *pitch* han demostrado que usándolos como complemento al control *pitch* normal pueden reducir las cargas y el desplazamiento que tiene que realizar el actuador (Plumley *et al.*, 2014). En este tipo de diseño de control complementario se realiza dividiendo el ángulo requerido por el *pitch* con base en la frecuencia; variaciones de altas frecuencias son controladas por el rotor inteligente, el cual es más que capaz para respuesta rápida y las variaciones de baja frecuencia son controladas por el *pitch*.

Y a pesar de que se ha mencionado de que el PID no es una buena opción para problemas no lineales para los que no se cuenta con un modelo matemático preciso del sistema que se desea controlar, se han realizado trabajos en los cuales la combinación de varios métodos de control junto con PID convencional ofrecen una mejor respuesta que utilizando sólo uno de ellos.

Uno de los trabajos más recientes sobre el uso conjunto de métodos de control demuestra que la eficiencia del sistema aumenta utilizando un algoritmo genético inteligente para sintonizar las ganancias del PID convencional y lo compara contra un algoritmo genético convencional. Este estudio demostró que el sistema optimizado por un algoritmo genético inteligente (por sus siglas en inglés, IGA) aumenta su eficiencia en aproximadamente 17% con respecto al algoritmo genético normal (GA). En la Figura 5 (Civelek *et al.*, 2016). Se muestra la comparación obtenida al simular ambas técnicas de sintonización.

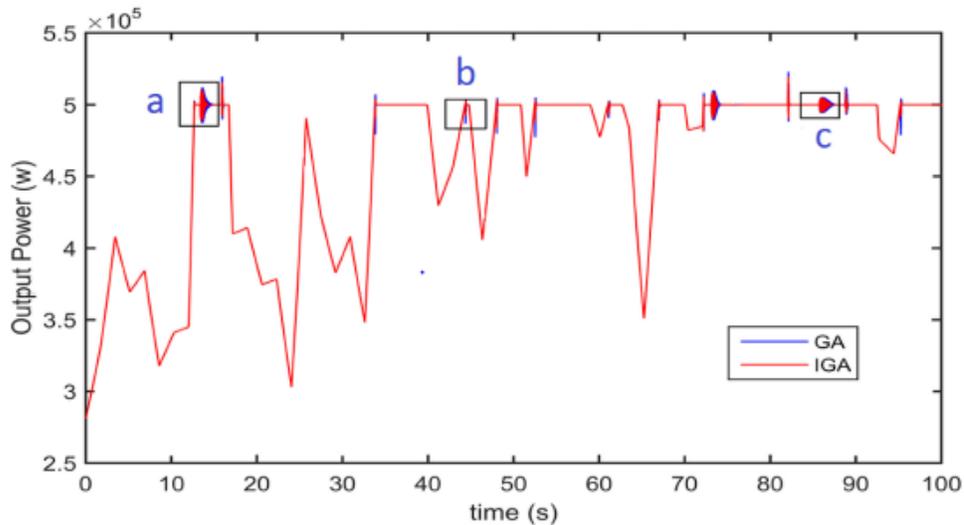


Figura 5. Comparación de potencia entregada de un generador eléctrico utilizando IGA y GA.

En trabajos recientes (Ibrahim y Al Akkad, 2016) también se implementó un control utilizando con una combinación de redes neuronales y un controlador PID entregando mejores resultados, puesto que se reducen las vibraciones y el error en estado estacionario, además de mejorar el tiempo de respuesta que muestran los controladores difusos y los controladores PID tradicionales. En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos en un trabajo realizado en 2016 donde se puede apreciar que la respuesta obtenida, utilizando un controlador difuso para alcanzar un ángulo deseado en las aspas, presenta menores oscilaciones además de una respuesta más rápida frente a la utilización de un PID convencional.

En cuanto a los actuadores se manejan una gran variedad de opciones a escoger como por ejemplo actuadores hidráulicos (Fan *et al.*, 2010). La selección del tipo de actuador dependerá del encargado del comisionamiento.

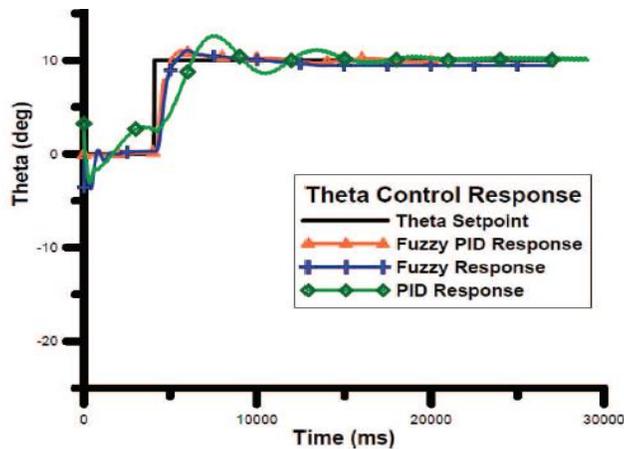


Figura 6. Comparación de un controlador difuso-PID respecto a un PID y un controlador difuso convencional(Ibrahim y Al Akkad, 2016).

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Tipos de aerogenerador

En cuanto a los tipos de aerogenerador destacan principalmente dos diseños: el aerogenerador de eje horizontal y el aerogenerador de eje vertical.

El aerogenerador de eje vertical son aquellos que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. También se denominan VAWT por sus siglas en inglés *Vertical Axis Wind Turbine*. Algunas de las ventajas que estos presentan son las siguientes (Howell *et al.*, 2010):

- No tiene la necesidad de modificar constantemente su posición con respecto a la dirección del viento.
- Debido a la velocidad de rotación relativamente inferior, son típicamente más silenciosos que los aerogeneradores de eje horizontal.

Por otro lado los aerogeneradores de eje horizontal, que es el tipo de generador que se utilizará en el proyecto de tesis, son aquellos en los que el eje de rotación

del equipo se encuentra paralelo al suelo. Esta es la tecnología que se ha impuesto, por sus ventajas como:

- Mayor eficiencia que los VAWT.
- Capacidad para adaptarse a distintas potencias.
- No requieren conexión a la red eléctrica para poder arrancar.

Las partes principales de un aerogenerador de eje horizontal son:

- Rotor
- Góndola.
- Caja de engranajes o multiplicadora.
- Generador
- La torre.
- Sistema de control: se hace cargo del funcionamiento seguro y eficiente del equipo, controla la orientación de la góndola, la posición de las palas y la potencia total entregada por el equipo.

En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo.

En la Figura 7 se muestra el diagrama en el cual se dividen los aerogeneradores.

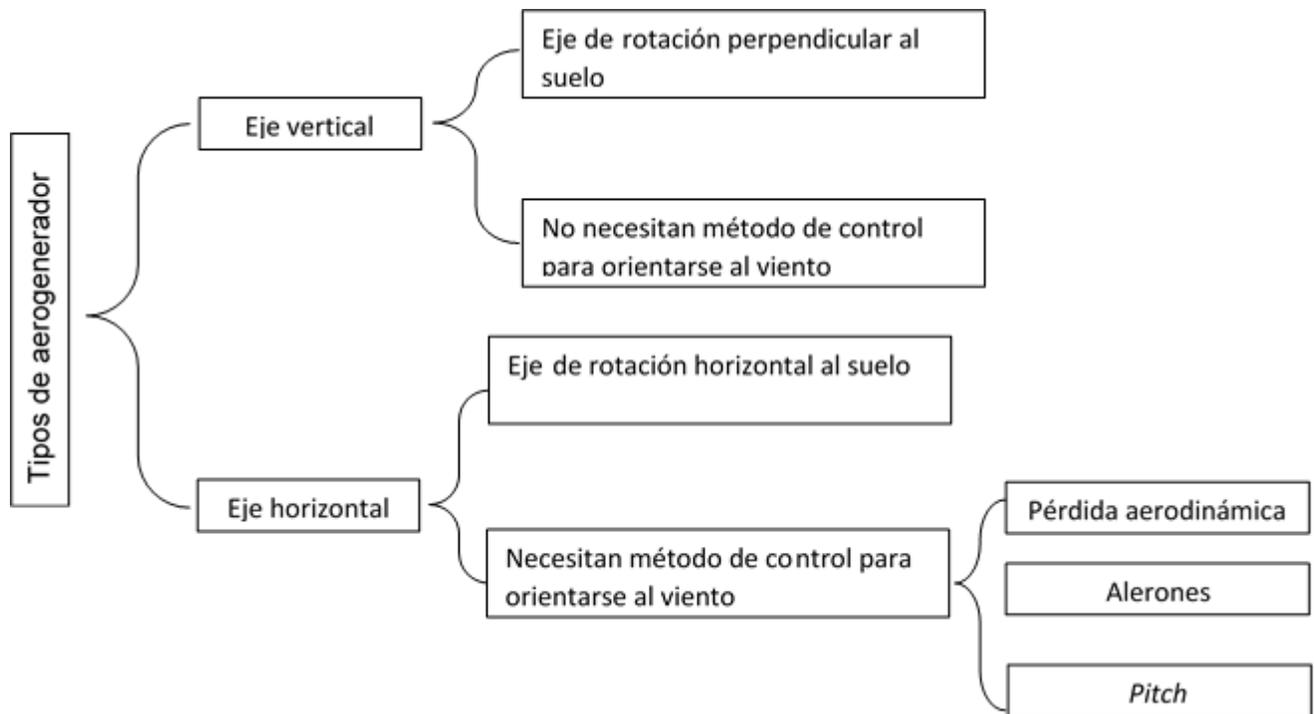


Figura 7. División de aerogeneradores.

2.2.2 Métodos para identificar sistemas

Métodos heurísticos. Un método heurístico es un procedimiento simple, a menudo basado en el sentido común, que se supone que ofrecerá una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido (Zanakis y Evans, 1981).

Una de las heurísticas utilizadas para la identificación de sistemas son las redes neuronales.

Una red neuronal es un nuevo sistema para el tratamiento de la información, cuya unidad básica de procesamiento está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano: la neurona (Matich, 2001).

La red neuronal *Backpropagation* es capaz de generalizar un comportamiento a partir de un conjunto de muestras escogidas como patrones de entrenamiento. Así como el cerebro humano, esta red necesita de una etapa de aprendizaje en la que se presentan algunos ejemplos, la red actualiza sus pesos mediante la presentación

repetida de estos ejemplos por medio de un mecanismo de corrección de error hasta llegar a obtener aciertos con estos patrones. En ese momento se podrá usar la red para encontrar cualquier otro valor diferente. A los patrones de entrenamiento esperando una respuesta apropiada. En otras palabras esta red busca una función de comportamiento que se acople a los valores muestreados y al comportamiento del sistema con un valor mínimo de error. La red *backpropagation* tiene entonces una etapa de entrenamiento y otra etapa de trabajo (Velasquez *et al.*, 2007).

Métodos empíricos. Son aquellos métodos que se basan principalmente en la observación del comportamiento del fenómeno a estudiar. En nuestro caso específico será observar el comportamiento de la respuesta del sistema a controlar, es decir se tendrá que realizar un proceso de experimentación.

2.2.3 Servomotores

Los servomotores son dispositivos electromecánicos que consisten en un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control (Cai *et al.*, 2010).

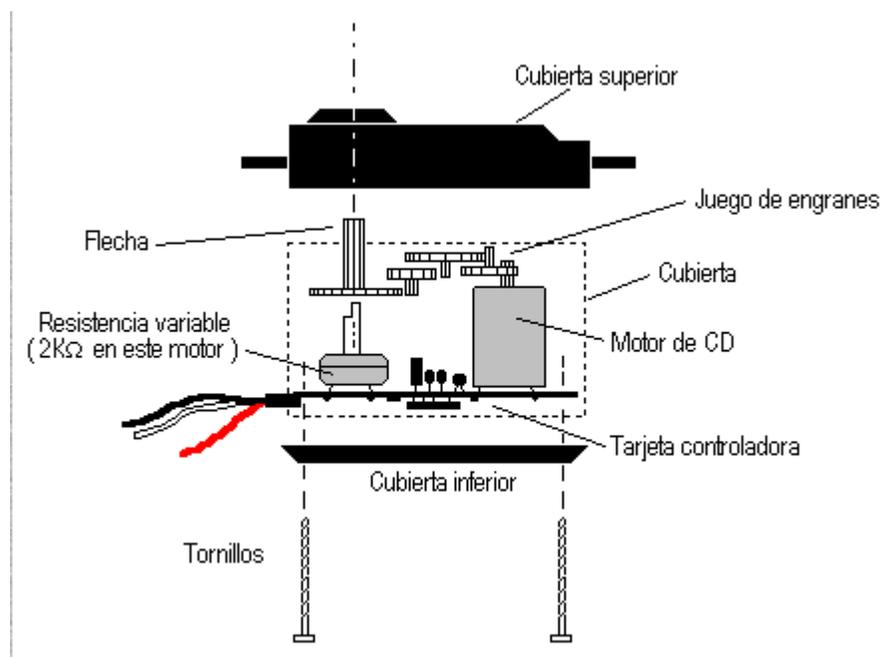


Figura 8. Ejemplo de diagrama de un servomotor (Qué son los servomotores, 2016).

Los servomotores funcionan por medio de modulación de ancho de pulso –*pulse width modulation* (PWM)- Para los servos para modelismo, la frecuencia usada para mandar la secuencia de pulsos al servomotor es de 50 Hz -esto significa que cada ciclo dura 20 ms- Las duraciones de cada pulso se interpretan como comandos de posicionamiento del motor, mientras que los espacios entre cada pulso son despreciados. En la mayoría de los servomotores los anchos de pulso son de 1 ms a 2 ms, que cuando son aplicados al servomotor generan un desplazamiento de -90° a +90° por lo que, de una manera más sencilla, el ángulo de giro está determinado por el ancho de pulso; si el ancho de pulso fuera de 1.5 ms, el motor se posicionará en la parte central del rango a 0°. En la Figura 9 se muestra el proceso anterior.

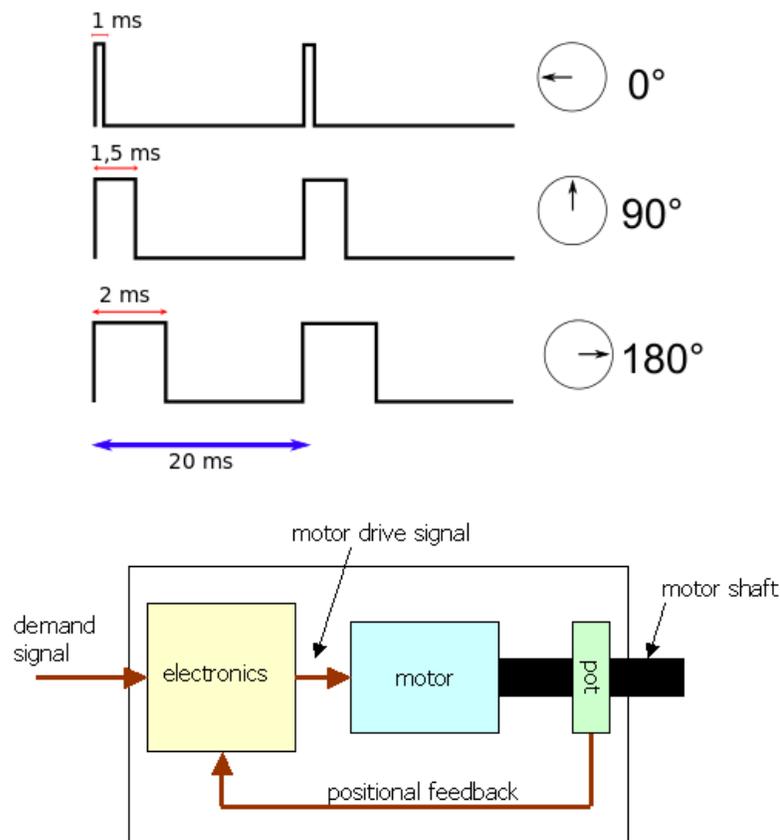


Figura 9. Funcionamiento de un servomotor (¿Qué son los servomotores?, 2016).

2.2.4 Modelo del aerogenerador

Para calcular la potencia extraída por las palas del aerogenerador es necesario conocer las distintas velocidades del viento de acuerdo a su paso a través del aerogenerador. El viento que se aproxima sin perturbaciones V , el viento que atraviesa la turbina V_d y el viento a través del plano del rotor V_b . En la Figura 10 se observa la velocidad del viento en sus diferentes etapas (Masters,2004).

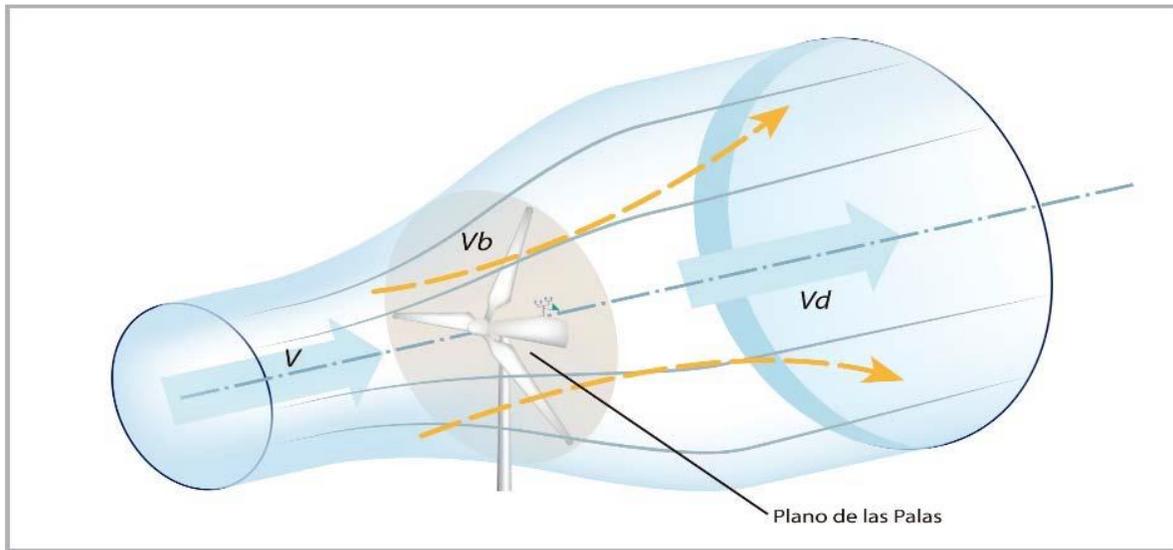


Figura 10. Representación del cambio en la velocidad del viento.

La potencia extraída por las palas P_b es igual a la diferencia de energía cinética entre los caudales de aire ascendente y descendente.

$$P_b = \frac{1}{2} m (V^2 - V_d^2) \quad (1)$$

El caudal másico de aire dentro del tubo de flujo es llamado m . El punto para determinar el caudal másico está en el plano del rotor donde el área de la sección transversal es sólo el área barrida del rotor A y la densidad del viento ρ .

$$m = \rho A V_b \quad (2)$$

Si la velocidad del viento a través del plano del rotor V_b es el promedio de V y V_d obtenemos la ecuación (3).

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V+V_d}{2} \right) (V^2 - V_d^2) \quad (3)$$

Definiendo la relación entre el viento no perturbado V y el viento que atraviesa la turbina V_d como γ obtenemos la ecuación (4).

$$\gamma = \frac{V_d}{V} \quad (4)$$

La potencia del rotor P_T se define en la ecuación (5).

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V^3 * \frac{1}{2} (1 + \gamma)(1 - \gamma^2) \quad (5)$$

El coeficiente de potencia C_p está expresado en la ecuación (6).

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \gamma)(1 - \gamma^2) \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) obtenemos la ecuación (7).

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (7)$$

La condición de máxima potencia se determina a partir de que $dP_b/dv=0$, lo que conduce que la máxima potencia se alcanza para una velocidad $V_d=V/3$. Este valor se sustituye en ecuación (5).

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V + \frac{V}{3}}{2} \right) \left(V^2 - \left(\frac{V}{3} \right)^2 \right) = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{32}{54} V^3 \right) = 0.593 P_T \quad (8)$$

$$TSR = \lambda = \frac{\Omega R}{V} = \frac{2\pi n R}{60V}$$

La curva de potencia para cada aerogenerador es muy similar. Por lo tanto, no es necesario utilizar diferentes aproximaciones, en su lugar, se puede utilizar un método de valores aproximados dependiente de (λ) y también por el ángulo de pitch del álabe (β) , basándose en las características de la turbina, como se muestra en la ecuación (7) (Ackerman, 2012; Rosyadi, 2014).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4\beta^{C_5} - C_6 \right) e^{\frac{C_7}{\lambda_i}} \quad (9)$$

Donde:

$$\lambda_i = \left[\left(\frac{1}{\lambda + C_b\beta} \right) - \left(\frac{C_9}{\beta + 1} \right) \right] \quad (10)$$

Para calcular el torque del motor se tiene la ecuación (11) (Montenau, 2008; Calderano, 2010).

$$T_{rot} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_t \quad (11)$$

Donde:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (12)$$

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

Un controlador digital con base en redes neuronales para el *pitch* de un aerogenerador garantiza un desempeño superior al entregado por un PID convencional reduciendo el error en estado estacionario y el sobrepaso.

3.2 Objetivos

Objetivo general.

Diseñar un sistema de servo control para las aspas de un aerogenerador como método para alcanzar el ángulo requerido de *pitch* y así modificar la velocidad de rotación.

Objetivos particulares.

- Obtener el modelo de la planta utilizando métodos empíricos.
- Sintonizar las ganancias del controlador PID para garantizar la estabilidad y alcanzar el valor deseado con un sobrepaso menor al 20 % utilizando el método de Ziegler y Nichols con la segunda regla.
- Definir la estructura de la red neuronal utilizando el comportamiento observado por el sistema.
- Lograr la estabilidad del sistema en el valor deseado con un sobrepaso menor al 20 % utilizando la red neuronal para actualizar las ganancias del PID.

4. METODOLOGÍA

Para prevenir accidentes al realizar todos los trabajos que requieran subir a la torre del aerogenerador se deberá cumplir con la NORMA Oficial Mexicana NOM-009-STPS-2011 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2011).

La descripción de la metodología se desarrolla en las siguientes páginas de la siguiente manera:

Primeramente se desarrollará la parte del diseño de los controladores donde se explica el modelo matemático de cada uno de ellos.

En la segunda parte se presenta los diagramas de bloques del sistema de control.

En la tercera parte se muestran los dispositivos que se han mostrado en la parte de los diagramas así como sus especificaciones, en esta sección se incluyen de igual manera los pasos para activar los recursos necesarios de cada uno de los dispositivos utilizados para realizar el proyecto.

Finalmente se muestran los pasos para realizar la implementación de los dos controladores.

4.1 Diseño del control *pitch*

Como se ha mencionado anteriormente en este documento el control *pitch*, también conocido como de cambio de ángulo de paso, consiste en modificar la posición de las aspas en el aerogenerador dependiendo de la velocidad del viento.

El funcionamiento del control de pitch propuesto está descrito en la Figura 11.

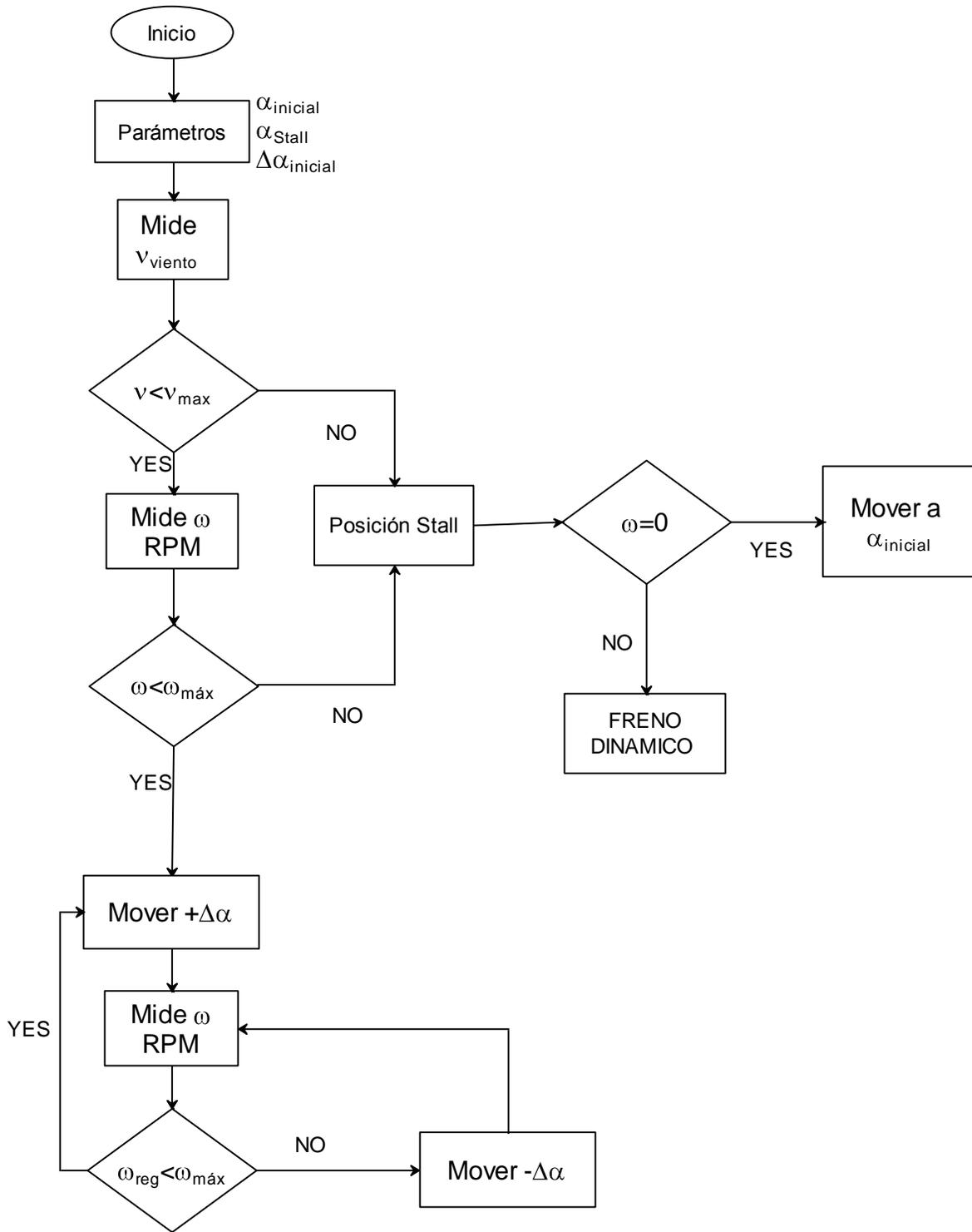


Figura 11.Descripción del control *pitch*.

4.2 Diseño de controladores

4.2.1 Controlador PID

El controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es el tipo de controlador que añade tres acciones de control y se encuentra definido por la Ecuación (13).

$$u(t) = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (13)$$

El controlador PID es un compensador de atraso-adelanto. La acción PD ocurre en frecuencias altas y la acción PI ocurre en la región de frecuencias bajas. Este controlador se usa cuando se necesitan mejoras en el comportamiento transitorio y es estado estacionario (Guerrero, 2012). Además incrementa el número de ceros en dos y el de polos en uno en la trayectoria directa, en consecuencia se incrementa el tipo de sistema en 1 mejorando la estabilidad del sistema.

La función de transferencia del controlador PID está definida en la Ecuación (14):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (14)$$

En la Figura 12 se muestra el diagrama de bloques de un controlador PID donde $R(s)$ es la referencia o *setpoint*, $G_p(s)$ es el modelo de la planta, $C(s)$ es la salida a controlar y K_p , K_i , K_d son las ganancias proporción, integral y derivativa respectivamente (Tobergte y Curtis, 2013).

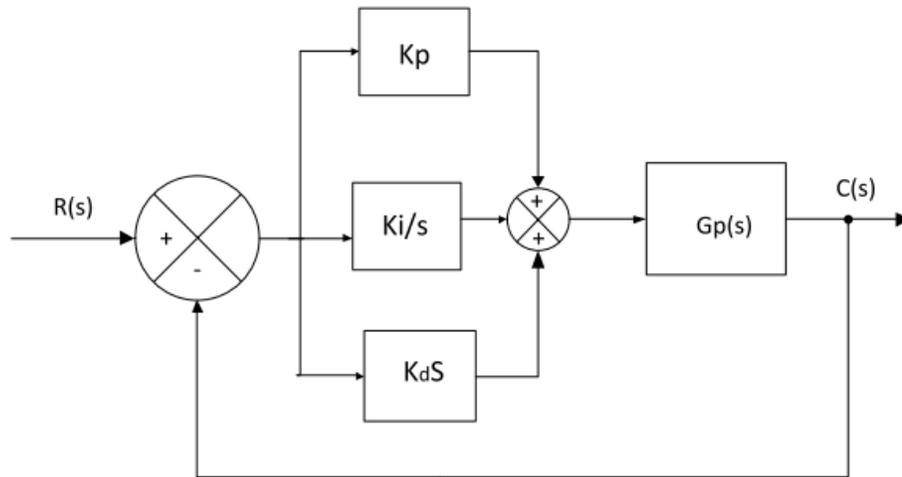


Figura 12. Diagrama de bloques del controlador PID.

Para sintonizar el PID existen varios métodos de los cuales el más indicado sería realizar el diseño utilizando el modelo matemático de la planta que se desea controlar, sin embargo en algunas ocasiones la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

Aunque el controlador PID es ampliamente usado y se ha comprobado su buen funcionamiento, presenta limitaciones en sistemas de naturaleza no lineal, lo cual en se presenta en el aerogenerador debido al comportamiento no lineal del viento, por lo que se deben realizar modificaciones al control convencional para superar estas limitaciones a continuación se presenta el diseño de dos controladores PID auto sintonizables.

4.2.2 Sintonización del PID convencional

Para sintonizar el PID existen varios métodos de los cuales el más indicado sería realizar el diseño utilizando el modelo matemático de la planta que se desea

controlador, sin embargo en algunas ocasiones la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID (Kouro y Musalem, 2002). El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional en ese punto de oscilación sostenida K_p se llama K_{cr} . En la Tabla 2 y 3 (Ogata, 2013) se muestran las reglas de sintonización de ganancias del controlador PID, P y PI.

Tipo controlador	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 2. Regla de sintonización basada en el escalón de la planta.

Tipo controlador	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Tabla 3. Regla de sintonización basada en la ganancia crítica.

En la Tabla 3 se puede observar un valor “Pcr” el cual se define como el periodo de oscilación sostenida que se obtuvo para la estabilidad marginal con la ganancia crítica Kcr.

4.2.3 PID auto sintonizable por asignación de polos

El siguiente es un algoritmo PID autoajutable basado en la asignación de los polos de la función de transferencia de lazo cerrado. Se trabajó en tiempo discreto. El procedimiento inicia con la ecuación (15).

$$G_p(z^{-1}) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (15)$$

El controlador es descrito en la ecuación (16):

$$G_r(z^{-1}) = \frac{r_1 + r_2 z^{-2} + r_3 z^{-3}}{1 - z^{-1}} \quad (16)$$

El polinomio característico en lazo cerrado es calculado haciendo $1 + G_p G_r = 0$ por lo que se obtiene la ecuación (17).

$$z^{-3} + \frac{a_1 - a_2 + b_1 r_2}{b_1 r_3 + a_2} z^{-2} + \frac{b_1 r_1 - a_1 - 1}{b_1 r_3 + a_2} z^{-1} + \frac{1}{b_1 r_3 + a_2} = 0 \quad (17)$$

Ahora se introduce la condición de que el sistema de lazo cerrado tenga un triple polo, que por supuesto debe estar en la zona de estabilidad. Esto es equivalente a suponer que el polinomio característico del sistema tiene la forma descrita en la ecuación (18).

$$(z^{-1} - a)^3 = z^{-3} - 3az^{-2} + 3a^2z^{-1} - a^3 \quad (18)$$

Al igualar los coeficientes de las ecuaciones (17) y (18) y al resolver, se obtienen para los coeficientes del regulador las expresiones que se muestran en las ecuaciones (19), (20) y (21).

$$r_1 = \frac{1}{b_1} \left(1 + a_1 - \frac{3}{a}\right) \quad (19)$$

$$r_2 = \frac{1}{b_1} \left(a_2 - a_1 + \frac{3}{a^2}\right) \quad (20)$$

$$r_3 = -\frac{1}{b_1} \left(a_2 + \frac{1}{a^3}\right) \quad (21)$$

Si se considera la estructura convencional del controlador PID discreto, se tiene la ecuación (22).

$$\Delta u(t) = K_p[(e(t) - e(t-1)) + \frac{T_c}{T_I}e(t) + \frac{T_D}{T_c}(e(t) - 2e(t-1) + e(t-2))] \quad (22)$$

Donde T_c es el periodo y escribiendo las ecuaciones (23) y (24).

$$K_i = \frac{K_p T_c}{T_I} \quad (23)$$

$$K_d = \frac{K_p T_D}{T} \quad (24)$$

Las constantes K_i , K_d y K_p son calculadas fácilmente de r_1 , r_2 y r_3 por las ecuaciones (25), (26) y (27).

$$K_p = -(r_2 + 2r_3) \quad (25)$$

$$K_i = r_1 + r_2 + r_3 \quad (26)$$

$$K_d = r_3 \quad (27)$$

4.2.4 PID autoajustable basado en redes neuronales

La red neuronal propuesta funciona como un PID convencional al comienzo de las iteraciones y modificará sus ganancias dependiendo del error que se obtendrá en cada una de ellas. Este tipo de control se propuso en primer lugar en 2004 por F. Shahrakia (Shahrakia *et al*, 2004) y H. Sue mejoró en 2008 [18] para realizar un control de temperatura y en este documento se implementará en una turbina eólica específicamente para el control del paso.

La red neuronal propuesta contiene tres capas, la capa de entrada que cuenta con dos neuronas, una capa oculta con tres neuronas y la capa de salida con una sola neurona. En las siguientes páginas se especifican los tipos de neuronas utilizadas en cada capa. El diagrama propuesto se muestra en la Figura 13. Se muestra además el desarrollo matemático del modelo a utilizar para la red neuronal propuesta.

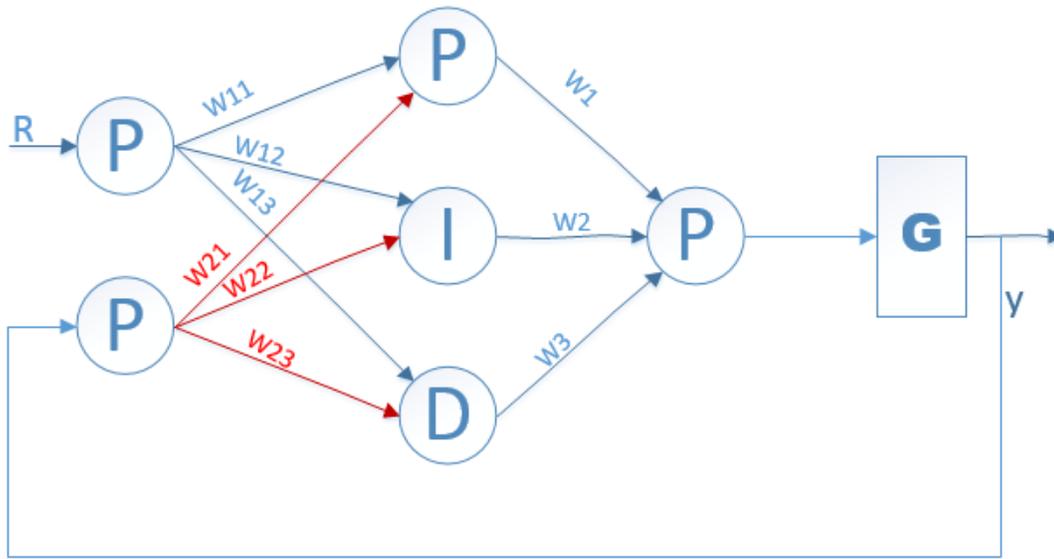


Figura 13. Red neuronal propuesta.

Como se muestra en la Figura 13 se usarán tres clases diferentes de neuronas, las neuronas tipo P, I y D. La función de entrada de las neuronas se describe en la ecuación (28).

$$u_j(k) = \sum_{i=1}^{n-1} w_{ij} x_i(k) \quad (28)$$

La función de salida de la neurona tipo P en tiempo continuo y tiempo discreto se describe en la ecuación (29) y la ecuación (30), respectivamente.

$$x_j(t) = u_j(t) \quad (29)$$

$$x_j(k) = u_j(k) \quad (30)$$

La función de entrada de la neurona tipo I es la misma que la neurona P, entonces, la ecuación (28) también funciona para esta neurona, pero la función de salida se describe en la ecuación (31) y la ecuación (32).

$$x_j(t) = \int_0^t u_j(t) dt \quad (31)$$

$$x_j(k) = x_j(k + 1) + u_j(k) \quad (32)$$

Finalmente, la función de salida de la neurona tipo D se describe en la ecuación (33) y la ecuación (34).

$$x_j = \frac{du_j(t)}{dt} \quad (33)$$

$$x_j(k) = u_j(k) - u_j(k - 1) \quad (34)$$

En el sistema el propósito es minimizar:

$$J = \sum_{h=1}^n E_h = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^n \sum_{k=1}^m [r_h(k) - y_h(k)]^2 \quad (35)$$

Donde $r_h(k)$ son las entradas y $y_h(k)$ las salidas del sistema, $h (=1, 2, \dots, n)$ es el número de pasos de entrenamiento y m es el número de muestras.

La forma de actualizar los pesos desde la capa oculta hasta la capa de salida se describe en la Ecuación 36.

$$w_s(n + 1) = w_s(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial w_s} \quad (36)$$

Donde:

$$\frac{\partial J}{\partial w_s} = -\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \delta'_h(k) x'_s(k) \quad (37)$$

$$\delta'_h = 2[r'_h(k) - y_h] \frac{y(k+1) - y(k)}{u(k) - u(k-1)} \quad (38)$$

La forma de actualizar los pesos de la capa de entrada a la capa oculta se describe en la Ecuación 39.

$$w_{ij}(n + 1) = w_{ij}(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial w_{ij}} \quad (39)$$

Donde:

$$\frac{\partial J}{\partial w_{ij}} = -\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \delta_{sj}(k) x_{sj}(k) \quad (40)$$

$$\delta_{sj} = \sum_{h=1}^n \delta'_h(k) w'_{sjh}(k) \frac{x'_{sj}(k) - x'_{sj}(k-1)}{u'_{sj}(k) - u'_{sj}(k-1)} \quad (41)$$

Para la selección de pesos iniciales usamos la misma técnica propuesta por H. sue y se seleccionan los siguientes valores para la Figura 5.

$$w_{11}, w_{12}, w_{13} = +1 \quad (42)$$

$$w_{21}, w_{22}, w_{23} = -1 \quad (32)$$

Luego, para la ecuación (18) en la capa de entrada se tiene:

$$u_1 = w_{11}x_1 + w_{21}x_2 = R - y = e \quad (33)$$

$$u_2 = w_{12}x_1 + w_{22}x_2 = R - y = e \quad (34)$$

$$u_3 = w_{13}x_1 + w_{23}x_2 = R - y = e \quad (35)$$

Continuando el proceso para la capa oculta usando la misma ecuación (18) se tienen los siguientes valores para las salidas en esta capa:

$$x_3 = u_1 = e \quad (36)$$

$$x_4 = \int_0^t u_2 dt = \int_0^t e dt \quad (37)$$

$$x_5 = \frac{du_3}{dt} = \frac{de}{dt} \quad (38)$$

Para diferenciar la salida en la última capa de las salidas de las capas anteriores, se define como x_0 , y se nombran los siguientes valores para la Figura 13.

$$w_1 = K_p \quad (39)$$

$$w_2 = K_d \quad (40)$$

$$w_3 = K_i \quad (41)$$

Entonces se obtiene la ecuación que será introducida en el controlador:

$$x_0 = w_1 x_3 + w_2 x_4 + w_3 x_5 = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (42)$$

4.3 Diagramas de control

4.3.1 Diagramas de control

En el diagrama de control de la Figura 14 se muestra el diseño original que se implementaría en el aerogenerador, el cual consiste en dos lazos de control, un lazo interno que corresponde al control de posición para el pitch, y el segundo lazo de control correspondería al lazo de velocidad del aerogenerador.

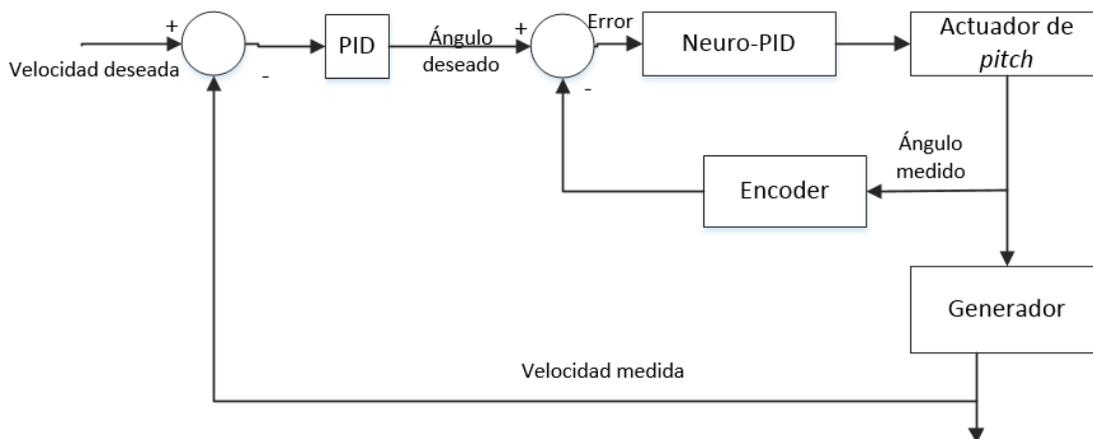


Figura 14. Primer sistema de control propuesto.

Sin embargo y ante la imposibilidad de poder comprobar el lazo externo el trabajo se limitó sólo al lazo interno de control que corresponde a la posición.

El lazo interno está representado en la Figura 15.

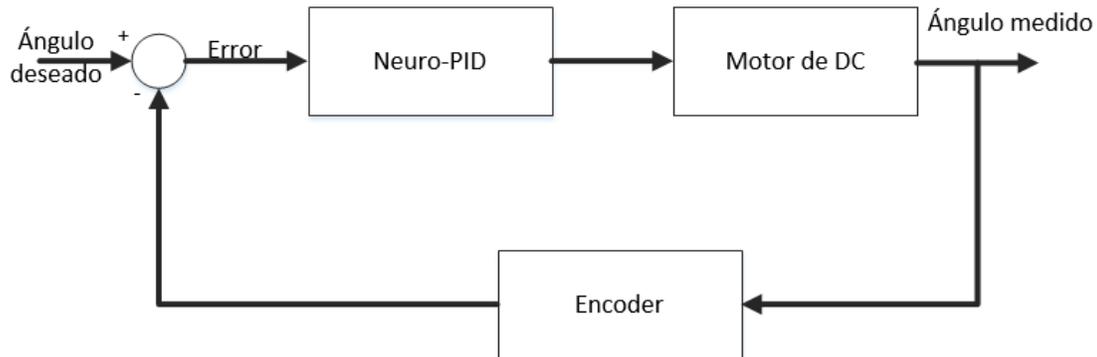


Figura 15. Lazo interno de control.

La Figura 16 es un diseño esquemático del funcionamiento del sistema de control pitch en el cual se muestra que al sistema de adquisición entran la posición del aspa, la velocidad del viento y la velocidad en el rotor del aerogenerador; de igual manera en este esquema se observa como el elemento encargado de la adquisición manda el byte de posición a la etapa de control, así como el dato de velocidad en el rotor y velocidad del viento; en la etapa de control se realizan las operaciones necesarias para la red neuronal y se genera la señal de control que se envía nuevamente a la tarjeta de adquisición en donde es convertida a señal PWM que es enviada a la etapa de potencia que consiste en el puente H; finalmente la señal se adecua a los niveles de voltaje y corriente necesarios para mover al motor.

De igual manera en la Figura 16 se observa que vienen representados cuatro bytes identificados con números del uno al cuatro. El dato número 1 corresponde al valor que envía la posición de las aspas, este dato tiene un tamaño de dos Bytes capaz de enviar valores hasta 65536, el dato número 2 corresponde al valor que envía la velocidad del viento, este dato tiene un tamaño de 1 byte con un valor máximo de

255, el dato número 3 corresponde al valor de velocidad del rotor que de igual manera tiene tamaño de un byte. El dato 4 es el valor de la señal de control con tamaño de 1 byte aunque solo puede tomar valores de 0 a 100.

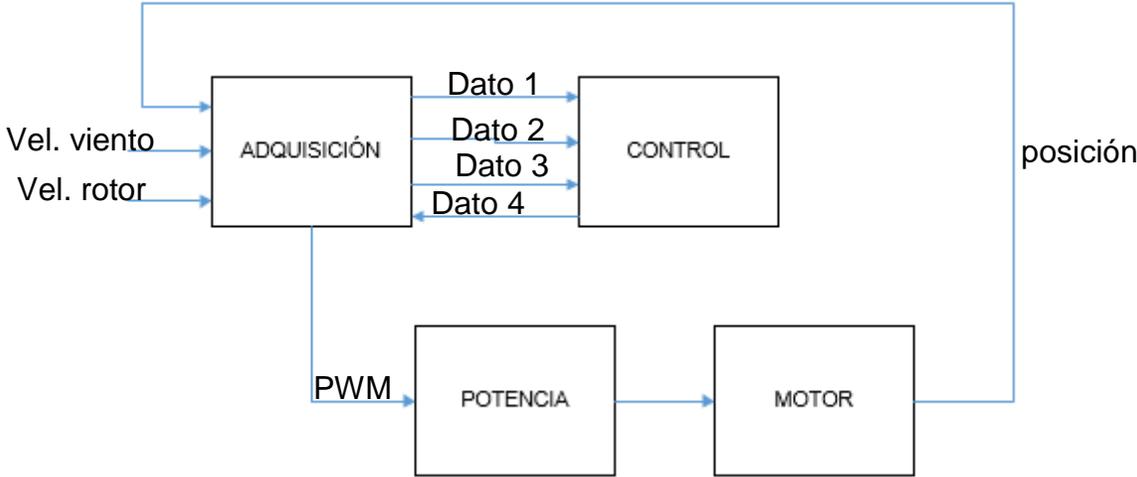


Figura 16. Diagrama de bloques del sistema a desarrollar.

Como semuestra en la Figura 16 el sistema consiste básicamente en cuatro módulos los cuales representan cuatro dispositivos con diferentes características y serán descritos de manera individual en las siguientes secciones.

4.4 Especificaciones y diagrama motor de DC

El motor seleccionado para realizar el proyecto fue un el motor de la compañía Maxon el cual se muestra su diagrama en la Figura 17 y sus especificaciones se muestran en las Tablas 4, 5, 6 y 7.

Modelo: f2260

Serie: 885

Voltaje nominal	24 V
Velocidad sin carga	2220 rpm

Corriente al vacío	200 mA
Velocidad nominal	1810rpm
Torque nominal	276 mNm
Corriente nominal	2.94 A
Corriente inicial	16.6 A
Stall torque	1660 mNm
Max. eficiencia	77%

Tabla 4. Valores a voltaje nominal del motor.

Resistencia en la terminal	1.44 ohms
Inductancia en la terminal	0.56 mH
Constante de torque	100 mNm/A
Constante de velocidad	94.4rpm/V
Gradiente	1.38 rpm/mNm
Constante de tiempo mecánica	19.3 ms
Inercia de rotor	1340 gcm ²

Tabla 5. Características del motor.

Temperatura ambiente	-20 a +100 °C
Max. Temperatura	+125 °
Constante de tiempo térmico	2210 s

Tabla 6. Datos térmicos del motor.

Número de polos	2
Número de segmentos en conmutador	26
Número de ciclos de auto enclavado	0

Tabla 7. Características adicionales del motor.

Además este motor presenta:

Velocidad máxima: 4000 rpm

Peso: 1300 g

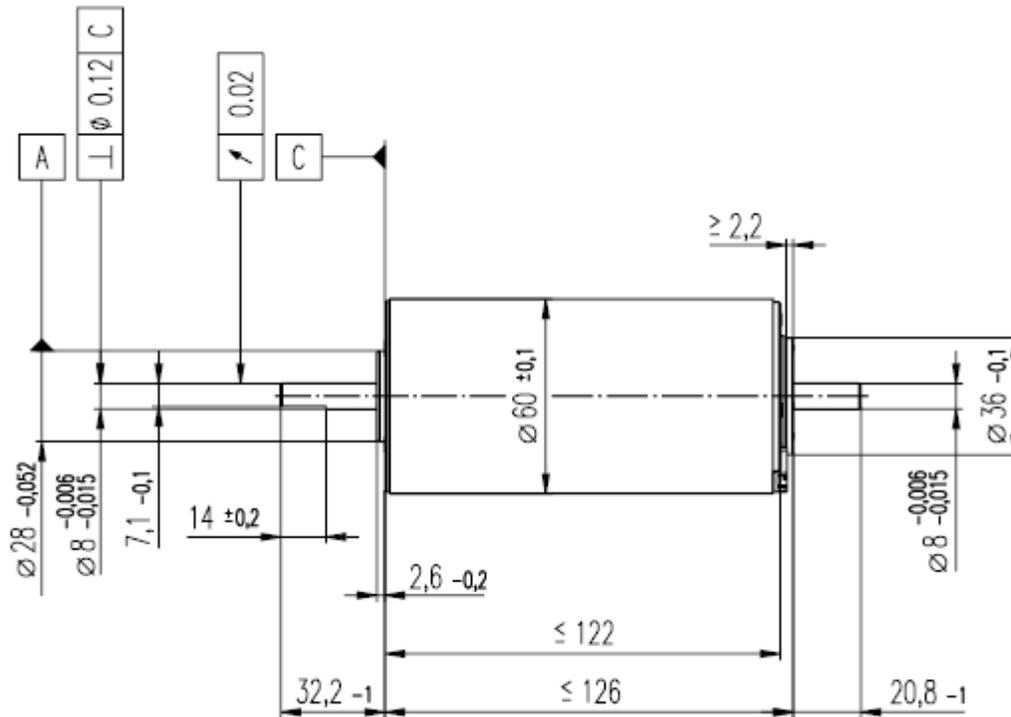


Figura 17. Diagrama del motor Maxon F2260 (Imagen obtenida de hoja de datos del motor).

4.5 Especificaciones y diagrama del encoder

Para obtener la posición del motor se utilizó un encoder de la marca Yumo modelo B950. A continuación se listan sus características.

- Presenta un voltaje de operación que va de 5 a 24 Volts de corriente directa.
- Resolución de 1024 pulsos/revolución.
- Señal Z que puede ser ajustada con facilidad.
- Soporta una carga de 30 N en dirección radial.
- Presenta protección contra cortocircuitos.

Este encoder presenta además las siguientes características.

4.6 Dispositivo de Control

4.6.1 Características Raspberry pi 3

Para realizar el control del sistema se seleccionó la tarjeta de desarrollo Raspberry pi 3 modelo B, ya que presente ventajas respecto a tamaño, potencia de cómputo y precio. A continuación se enlistan las características de esta tarjeta de desarrollo.

- Procesador ARM Cortex A53, un procesador de cuatro núcleos a 1.2GHz de 64 bits.
- Arquitectura RISC de 32 bits.
- 1 Gb de memoria RAM.
- GPU integrada.
- 4 puertos USB 2.0.
- Capacidad para instalar una cámara.
- Salida de audio conector de 3.5 mm.
- Salida de video HDMI.
- Almacenamiento por medio de memoria micro SD.
- Conectividad de red por medio de puerto Ethernet (RJ45).
- Conectividad WiFi 802.11n.
- Opera con un voltaje de 5 V con posibilidad de conectar por USB de manera directa en los pines.
- Consumo energético de 800 mA.
- Presenta 17 pines de uso general como entradas y salidas.

Como se puede observar en las características anteriores la tarjeta es lo suficientemente potente para satisfacer los requisitos de control ya que la Raspberry pi cuenta también con comunicación serial y generación de PWM que son dos de las características principales para realizar el control del sistema.

En la Figura 19 se muestra un diagrama de los pines de la Raspberry pi 3 y la función que puede representar cada uno de ellos.

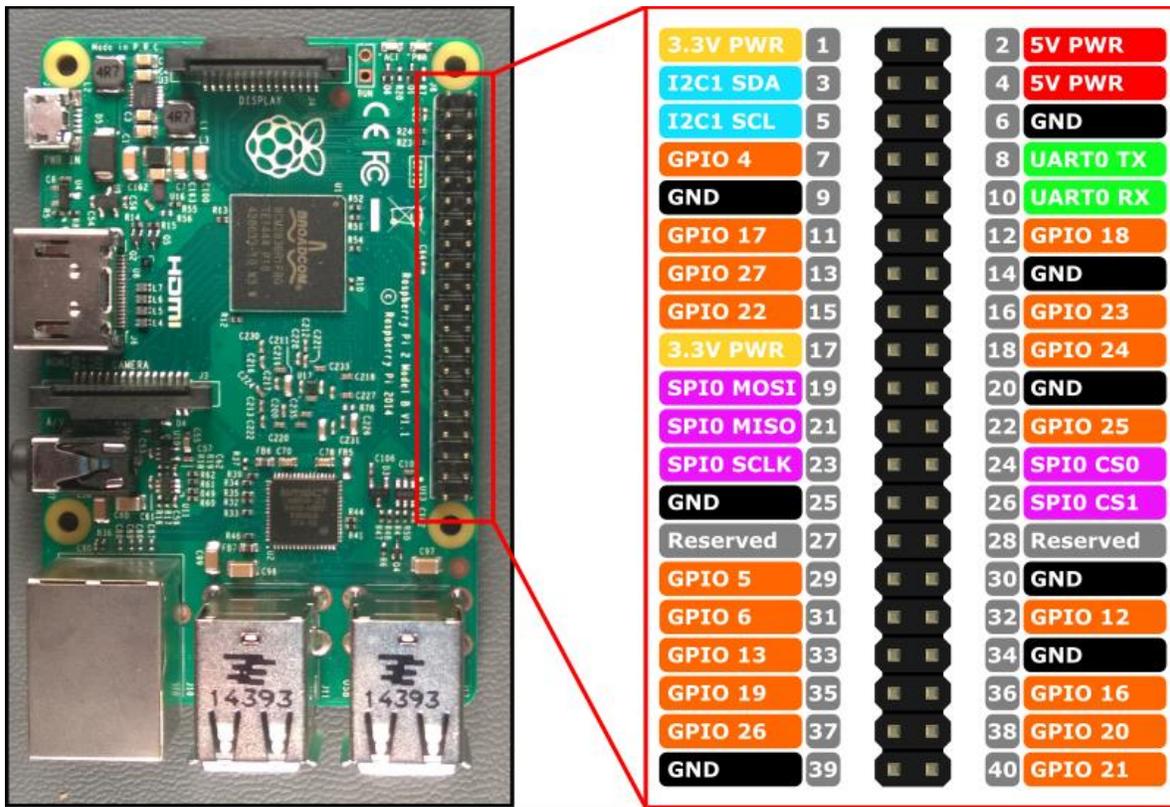


Figura 19. Distribución de los pines en la Raspberry pi 3. (Mulya, 2018).

En la Figura 19 se observa claramente los 17 pines de uso general llamados GPIO (General Purpose Input Output) Entrada-Salida de uso general. De igual manera se observa que los pines 8 y 10 están destinados a la comunicación serial sin embargo se realizarán modificaciones a la configuración de la Raspberry pi para que funcione de acuerdo a las necesidades del sistema de control.

4.6.2 Configuración de la comunicación serial

Como se puede observar en la Figura 19 la Raspberry pi cuenta con comunicación serial en los pines 8 y 10, correspondientes al pin Rx y Tx respectivamente, sin embargo en el modelo específico que se utiliza en el proyecto cuenta con un módulo

Bluetooth que utiliza los pines correspondientes a la comunicación serial por lo que nos vemos obligados a realizar modificaciones a la configuración de la tarjeta. Los cuales se describen a continuación.

Para empezar se abre la terminal en donde se introduce la siguiente instrucción:

```
sudo raspi-config
```

Inmediatamente aparecerá el menú de opciones mostrado en la Figura 20.

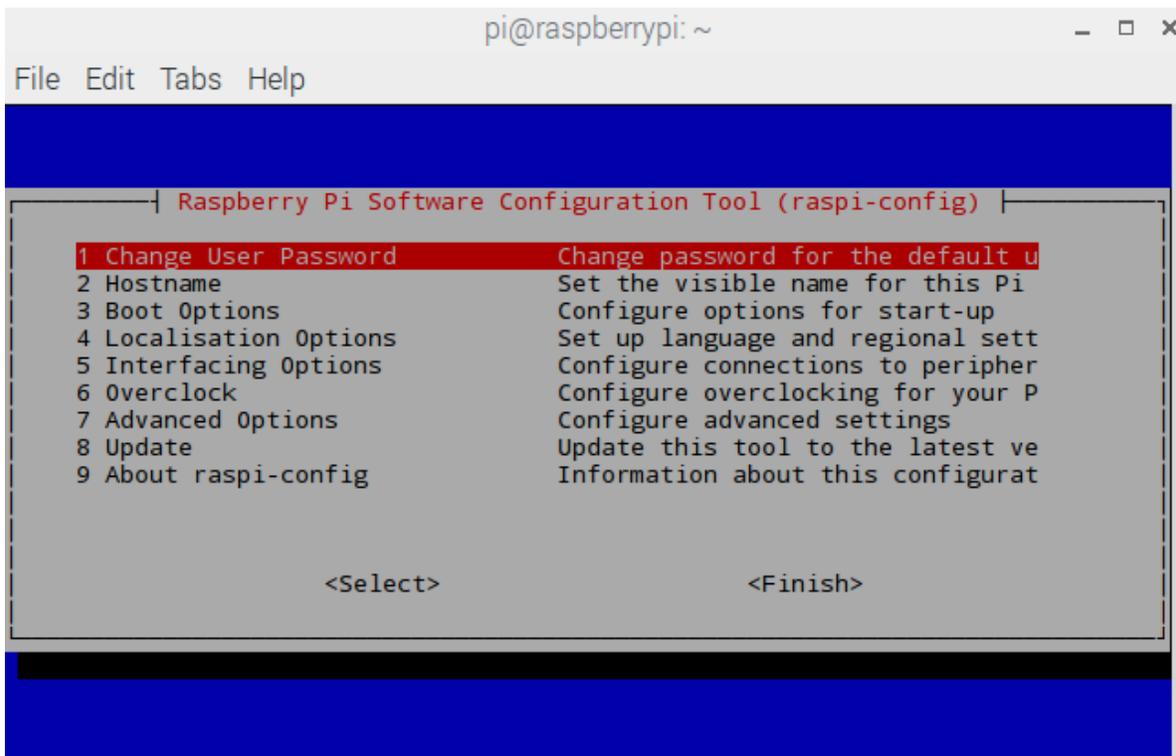


Figura 20. Captura de pantalla 1 de la Raspberry pi.

El propósito es activar la comunicación serial por lo que se accede a la opción número 5 “Interfacing Options”. Al acceder a la opción 5 se mostrará el menú de la Figura 21.

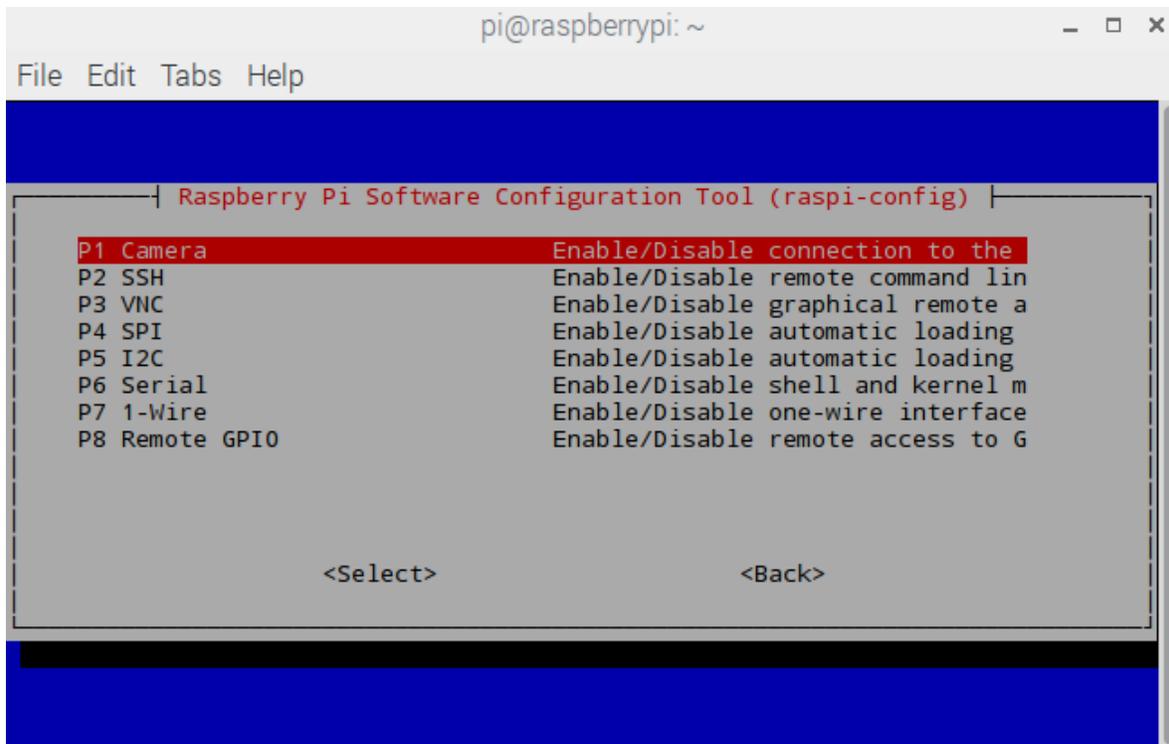


Figura 21. Captura de pantalla 2 de la Raspberry pi.

Continuando con el proceso se selecciona la opción P6 correspondiente a “Serial” obteniendo la opción mostrada en la Figura 22.

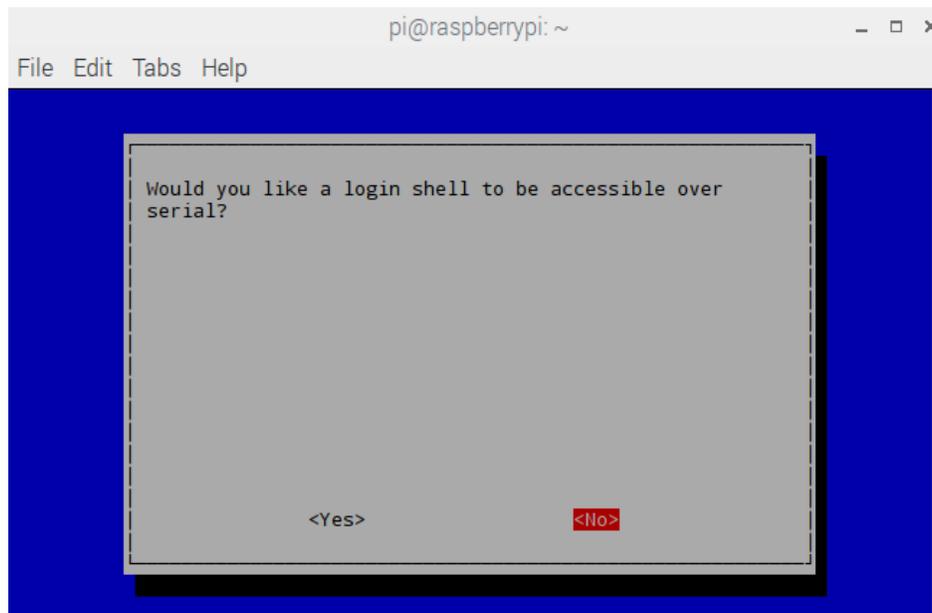


Figura 22. Captura de pantalla 3 de la Raspberry pi.

En la opción que aparece en la Figura 22 se selecciona “Yes”.

Ahora se debe reiniciar la Raspberry pi 3.

Se actualiza el software de la tarjeta con las siguientes instrucciones en una terminal.

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get upgrade
```

Como siguiente paso se deben cambiar los pines destinados al Bluetooth y seleccionarlos para la comunicación serial, para esto se abre una nueva terminal y se procede a editar el archivo de inicio para lo cual en el proceso se utilizó el editor de texto nano, por lo que se escribe la siguiente instrucción.

```
sudo nano /boot/config.txt
```

En el archivo de texto que aparece se pueden realizar dos acciones una es para cambiar el bluetooth a pines diferentes agregando al final del archivo la siguiente instrucción.

```
dtoverlay=pi3-miniuart-bt
```

Sin embargo se considera obtener un mejor desempeño desactivando totalmente el Bluetooth por lo que se prefiere no agregar la instrucción anterior y por el contrario agregar al archivo de texto la siguiente línea.

```
dtoverlay=pi3-disable-bt
```

El archivo de texto quedará como se muestra en la Figura 23.

```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.2.6 File: /boot/config.txt
#dtoverlay=lirc-rpi
# Additional overlays and parameters are documented /boot/overlays/README
# Enable audio (loads snd_bcm2835)
dtparam=audio=on
enable_uart=1
#Added by Hugo
dtoverlay=pi3-disable-bt
^G Get Help ^O WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text ^C Cur Pos
^X Exit ^J Justify ^W Where Is ^V Next Page ^U UnCut Text ^T To Spell
```

Figura 23. Captura de pantalla 3 de la Raspberry pi.

Cerrar el editor guardando los cambios.

Reiniciar nuevamente la Raspberry.

En el siguiente paso se deshabilita la consola serial editando nuevamente un archivo de texto para lo cual nuevamente se usó el editor de texto nano.

Insertar en la terminal la siguiente línea.

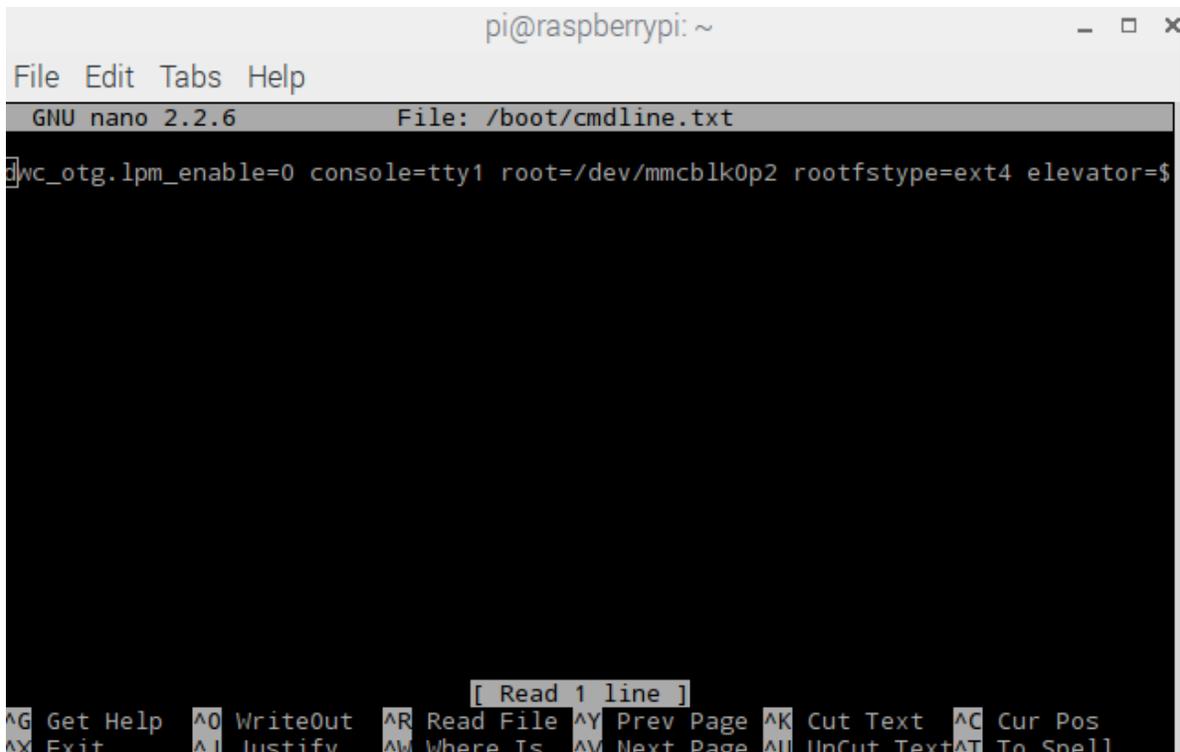
```
Sudo nano /boot/cmdline.txt
```

En el archivo de texto que se muestra en pantalla buscar las siguientes palabras y removerlas.

```
“console=serial0,115200”
```

```
“console=ttyAma0,115200”
```

El archivo quedará como se muestra en la Figura 24.



```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.2.6 File: /boot/cmdline.txt
dwc_otg.lpm_enable=0 console=tty1 root=/dev/mmcblk0p2 rootfstype=ext4 elevator=$
[ Read 1 line ]
^G Get Help ^O WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text ^C Cur Pos
^X Exit ^J Justify ^W Where Is ^V Next Page ^U UnCut Text ^T To Spell
```

Figura 24. Captura de pantalla 4 de la Raspberry pi.

Cerrar el editor y guardar cambios.

Finalmente reiniciar la Raspberry pi.

4.6.3 Descarga de librerías y programas

La Raspberry pi cuenta con salida PWM que pueden ser habilitados en los GPIO's, sin embargo cuentan con una frecuencia de trabajo reducida por lo que se utilizó una librería para poder habilitar PWM por hardware. Esta librería es la librería PIGPIO y el procedimiento para instalarla es el siguiente.

Abrir una terminal y escribir la siguiente línea para descargar el paquete de instalación.

```
wget abyz.co.uk/rpi/pigpio/pigpio.zip
```

Descomprimir el paquete de instalación

unzip pigpio.zip

Siguiendo con el procedimiento se escribe en la terminal.

Make

Finalmente para instalar se escribe en la terminal.

```
sudo make install
```

Para la realización de este proyecto se utilizó un programa llamado “Octave” que consiste en un programa que trabaja como el ampliamente conocido programa Matlab, pero en este caso es gratuito y la manera de instalarlo en la Raspberry pi es la siguiente.

Primero se revisa la versión disponible, por lo que nuevamente desde una terminal se escribe la siguiente línea.

```
apt-cache policy octave
```

```
octave:
```

```
Installed: (none)
```

```
Candidate: 3.6.2-5
```

```
Version table:
```

```
 3.6.2-5 0
```

Para instalar el programa simplemente se introduce la instrucción en la terminal.

```
sudo apt-get install octave
```

Ahora se instalan paquetes de control.

```
apt-cache search octave-
```

```
octave-control - control functions for Octave from Octave-Forge
```

```
sudo apt-get install octave-control
```

4.7 Diseño de tarjeta de adquisición

4.7.1 Controlador de tarjeta de adquisición

Para el proyecto se utilizó una tarjeta de adquisición la cual tiene la función de realizar la lectura de encoder y transformar esta lectura a un número que es enviado a la Raspberry pi por medio de comunicación serial, además también tiene la función de recibir el valor de la señal de control que ha calculado la tarjeta de control y transformarlo en PWM que a su vez es enviado a la etapa de potencia del sistema.

Para realizar la tarjeta de diseño se seleccionaron componentes que cumplieran con los requisitos indispensables, es decir comunicación serial y generación de PWM.

Se seleccionó el dsPIC33FJ12MC, debido a que al tratarse de un dsPIC (*Digital Signal Peripheral Interface Controller*) controlador de interfaz periférico de señal digital, que cuentan con velocidad de procesamiento superior a la de los PIC's convencionales se evita cualquier pérdida en las cuentas del encoder.

A continuación se enlistan características importantes del dsPIC utilizado.

- Voltaje de operación desde 3.0 V a 3.6 V.
- Rango de temperatura de -40 °C a +85 °C.
- Memoria de programa lineal que trata hasta 4M palabras de instrucción.
- Direccionamiento de memoria de datos lineal hasta 64 Kbytes.
- PWM de hasta 16-bits.
- 118 vectores de interrupción.
- Hasta 3 interrupciones externas.

Además cuenta con las siguientes funciones específicas para el control de motores necesario en el proyecto realizado.

- 6 canales para control de motores por PWM.
- 3 generadores de ciclo de trabajo.
- Tiempo muerto programable.

- Disparador para conversiones de ADC.

Para la lectura de encoder se utilizaron las siguientes características del dsPIC.

- Módulo de interface de cuadratura de encoder.
- Fase A, Fase B.
- Contador de posición de 16 bits.
- Filtros de ruido programables en las entradas.

Finalmente para la comunicación serial se utilizó este dsPIC por las siguientes características.

- Interrupción en la detección de bits de dirección.
- Interrupción con error UART.
- Despertar en el bit de inicio desde el modo de Suspensión.
- Buffers TX y RX FIFO de 4 caracteres.
- Codificación y decodificación en hardware.
- Modo Baudio de alta velocidad.
- Control de flujo de hardware con CTS y RTS

En la Figura 25 se muestra el esquema del dsPIC utilizado.

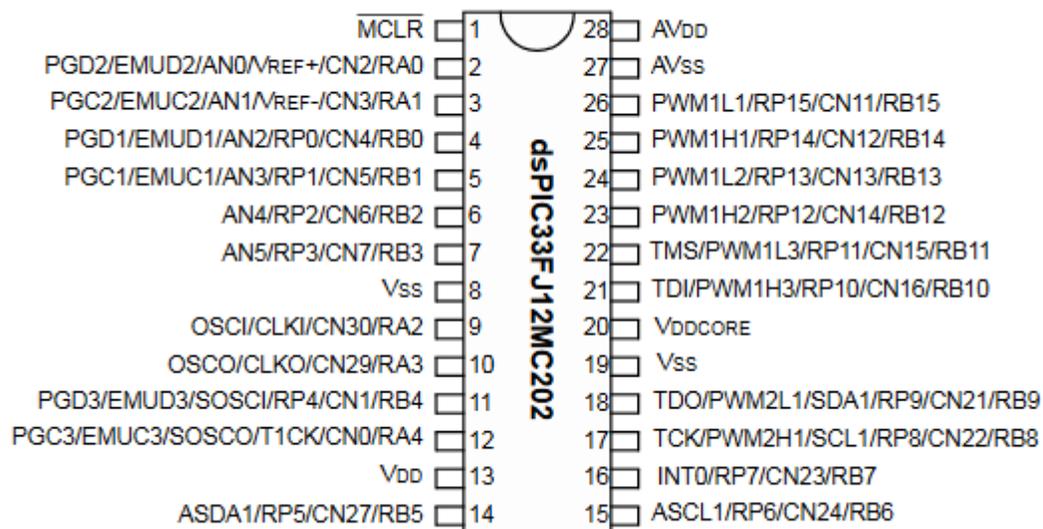


Figura 25. Pines del dsPIC utilizado. (Imagen obtenida de la hoja de datos).

4.7.2 Aislamiento de control

Además del dsPIC a la tarjeta de adquisición se le agregó optoacopladores para aislar la parte de control de la etapa de potencia y evitar que sobre cargas o cortos circuitos dañen nuestra Raspberry pi.

El optoacoplador seleccionado fue el 4n25 del cual se muestra su diagrama de conexión en la Figura 26 en donde el pin 1 es el ánodo, el pin 2 el cátodo, el pin 3 no se conecta, pin 4 emisor, pin 5 colector y el pin 6 es la base .

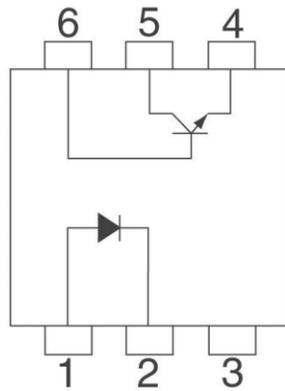


Figura 26. Conexión del optoacoplador 4n25. (Imagen obtenida de hoja de datos).

4.7.3 Diseño esquemático

En la Figura 27 se observa el diseño esquemático de la tarjeta adquisidora así como la conexión de los distintos dispositivos necesarios para su funcionamiento.

Por su parte en la Figura 28 se muestra a que pines se debe conectar los optoacopladores y la Raspberry pi a la tarjeta de adquisición.

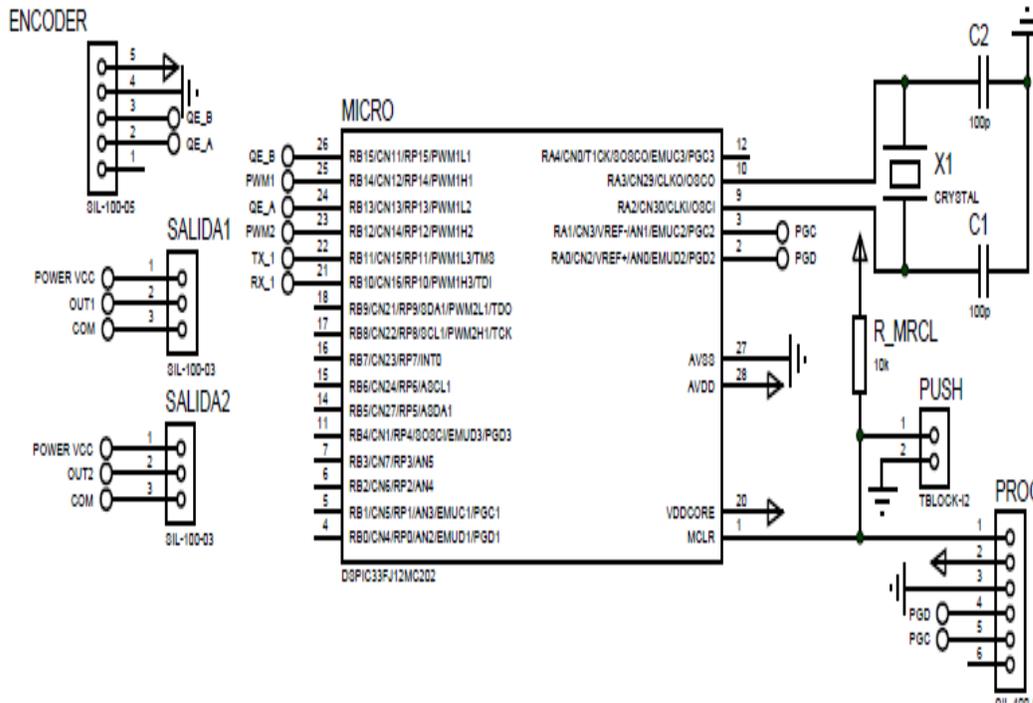


Figura 27. Diseño esquemático de la tarjeta adquirentora.

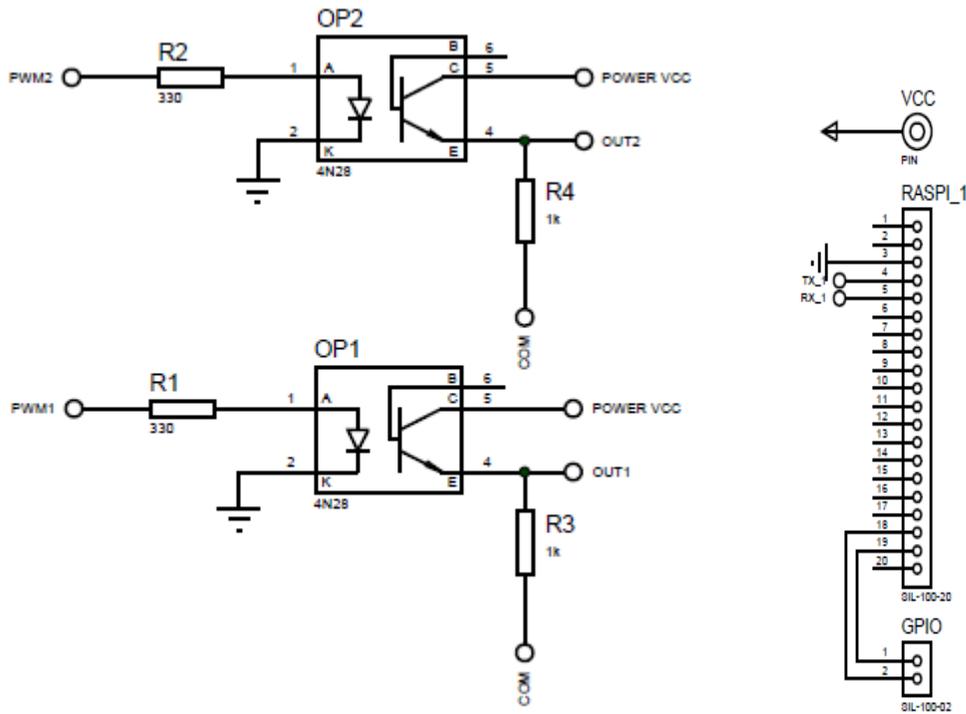


Figura 28. Conexión de los optoacopladores y la Raspberry pi.

Para satisfacer las necesidades de potencia se seleccionó un puente H modelo BTS7960B.

El circuito BTS7960 consta de medio puente H con las siguientes características:

- Voltaje de alimentación de 0 hasta 27 V.
- Voltaje lógico de entrada de 0 hasta 5.3 V.
- Corriente máxima de 43 Amperes.
- Soporta PWM de hasta 25 kHz.
- Circuito controlador con niveles de entrada lógicos.

En la Figura 30 se muestra el diagrama del circuito utilizado.

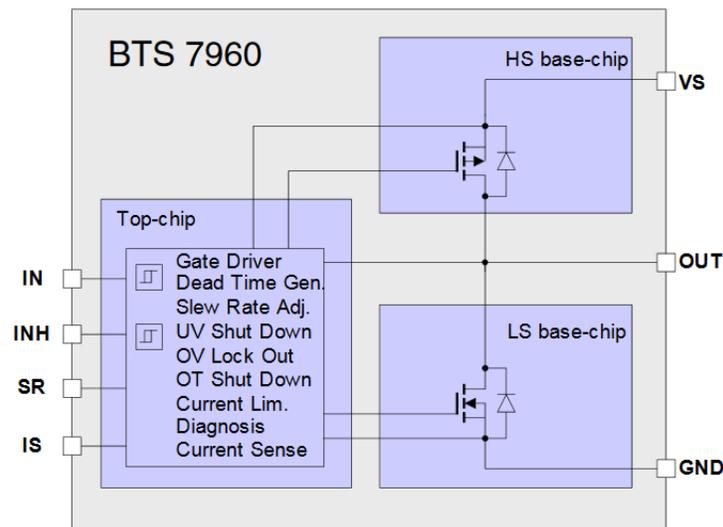


Figura 30. Diagrama de bloques del medio puente H. (Imagen obtenida de hoja de datos).

Al funcionar como medio puente H se requieren de dos de ellos además de un controlador que administre las funciones de éste, por lo que se prefirió utilizar un circuito comercial ya ensamblado el cual es el puente H modelo IBT_2 para la plataforma Arduino el cual con los componentes agregados tiene las siguientes características.

- Voltaje de operación de 5 a 27 V.

- Control de velocidad de motores por medio de PWM frecuencia de hasta 25 kHz.
- Control hacia ambas direcciones del motor.
- Capacidad de soportar corrientes de hasta 30 amperes.
- Peso de 66 gramos.

En la Figura 31 y en la Tabla 4 se muestra los pines de conexión de este puente H a la tarjeta de adquisición.

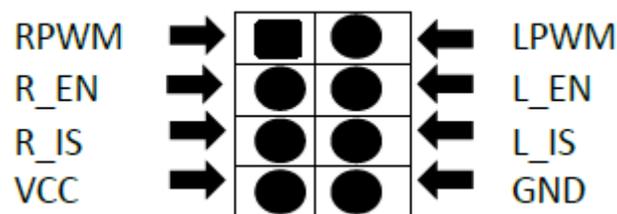


Figura 31. Pines de control en el puente H.

1	RPWM	PWM de entrada para girar a la derecha
2	LPWM	PWM de entrada para girar a la izquierda
3	R_EN	Activar giro a la derecha
4	L_EN	Activar giro a la izquierda
5	R_IS	Alarma de corriente
6	L_IS	Alarma de corriente
7	VCC	Voltaje alimentación
8	GND	Tierra

Tabla 9. Función de los pines del IBT_2.

4.9 Implementación

El aerogenerador se encuentra ubicado en Carretera a Chichimequillas s/n, Ejido Bolaños, Querétaro, Qro. C.P.76140 (Ubicación geográfica 20°37'24.1"Norte y 100°22'06.0"Oeste) y una altitud de 1969msnm. El cual se muestra en la Figura 32 Este aerogenerador cuenta con tres aspas de 6.0m de largo y 1.2m en su punto

más ancho, fabricadas en fibra de vidrio y resina de poliéster, con un peso de 260kg cada una. La altura del eje horizontal es de 18 metros. Se tiene una caja multiplicadora con relación 1:2.1, y un generador de imán permanente con una capacidad de 14kW a 135rpm.

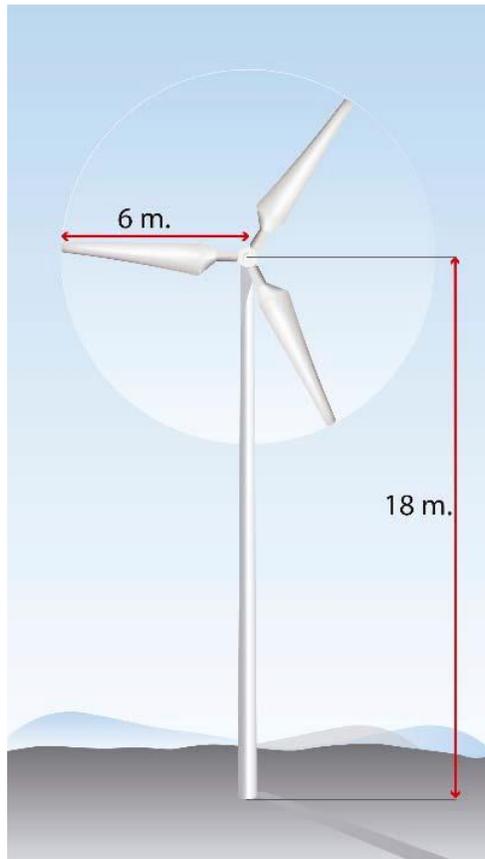


Figura 32. Aerogenerador a instalar.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Resultados

5.1.1 Control *pitch*

Para el programa del control se utilizó el lenguaje de programación *Python*, se seleccionó este programa ya que cuenta con distintas librerías que permiten manejar funciones requeridas en el sistema a controlar.

Fue necesario para realizar el proyecto que el código manejado incluyera la opción de mostrar en pantalla los resultados obtenidos en tiempo real además de poder guardarlos en un archivo de texto para poder manejarlos y procesarlos con programas especializados en este caso se utilizó *Octave* que es un sistema que maneja la misma sintaxis que el software comercial *Matlab*, con la ventaja que es de licencia abierta y que cuenta con una compilación para Linux lo que nos permitió utilizarlo en la Raspberry pi.

5.1.2 Controlador PID

Para el controlador PID se utilizó de igual manera Python para su implementación en Python se utiliza el diagrama de flujo mostrado en la Figura 33, en el cual las ganancias K_p , K_i y K_d del controlador mostradas son ganancias iniciales dadas para comenzar la sintonización y no representan las ganancias finales obtenidas:

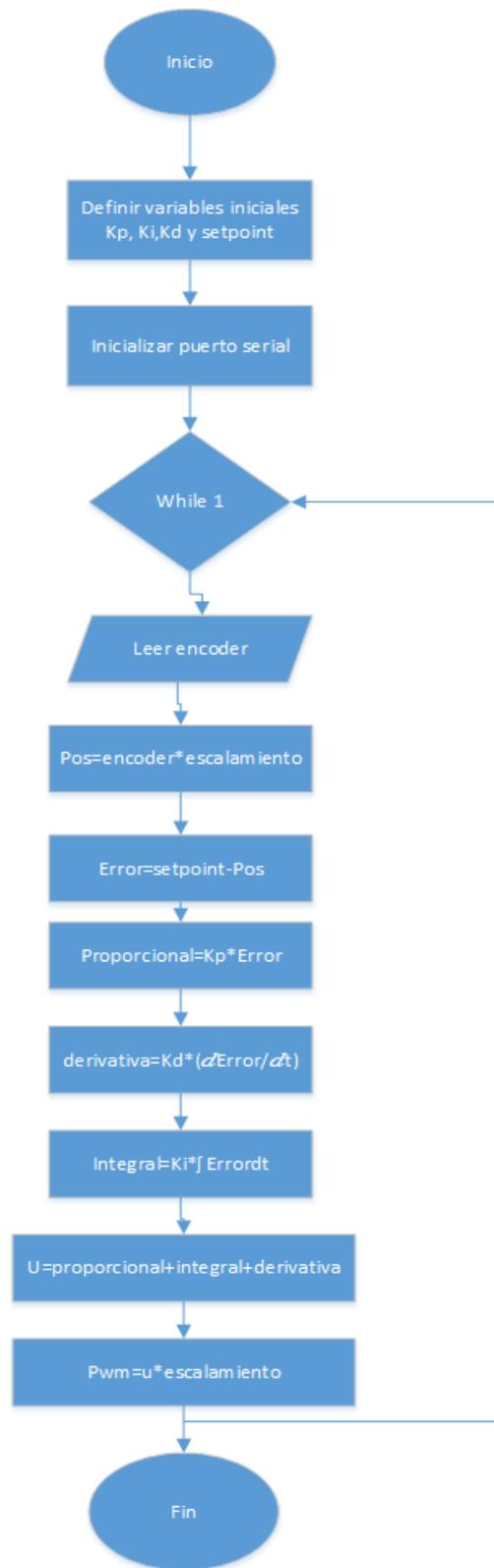
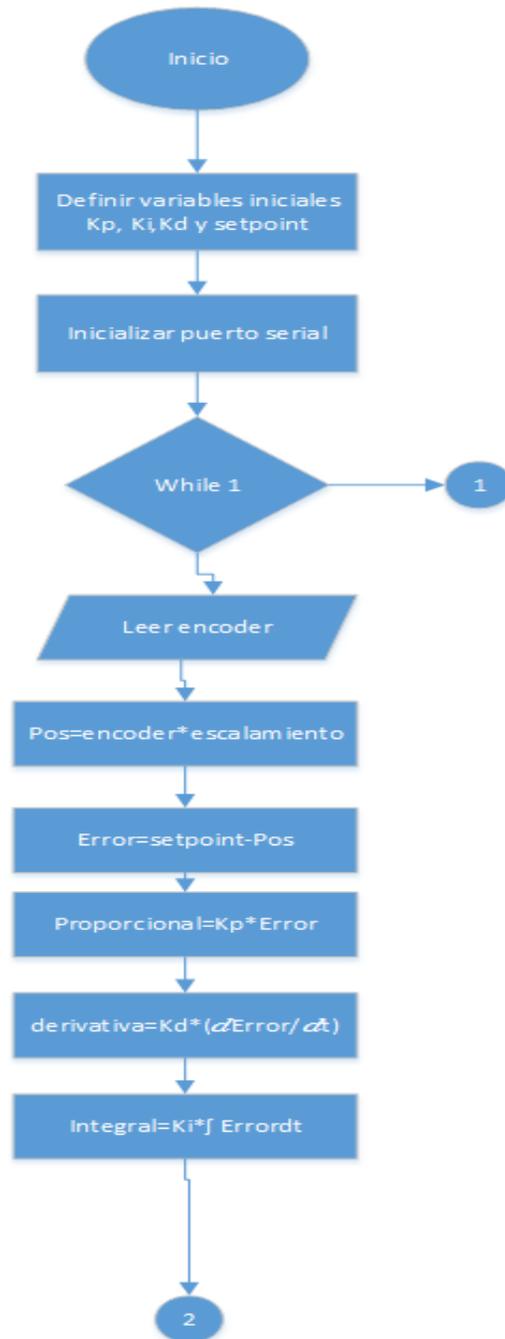


Figura 33. Diagrama de flujo del controlador PID.

5.1.3 Controlador Neuro-PID

La lógica inicial de este controlador es la misma que la del PID convencional pero agregando el algoritmo de aprendizaje al final de este. En La figura 34 se muestra diagrama de flujo.



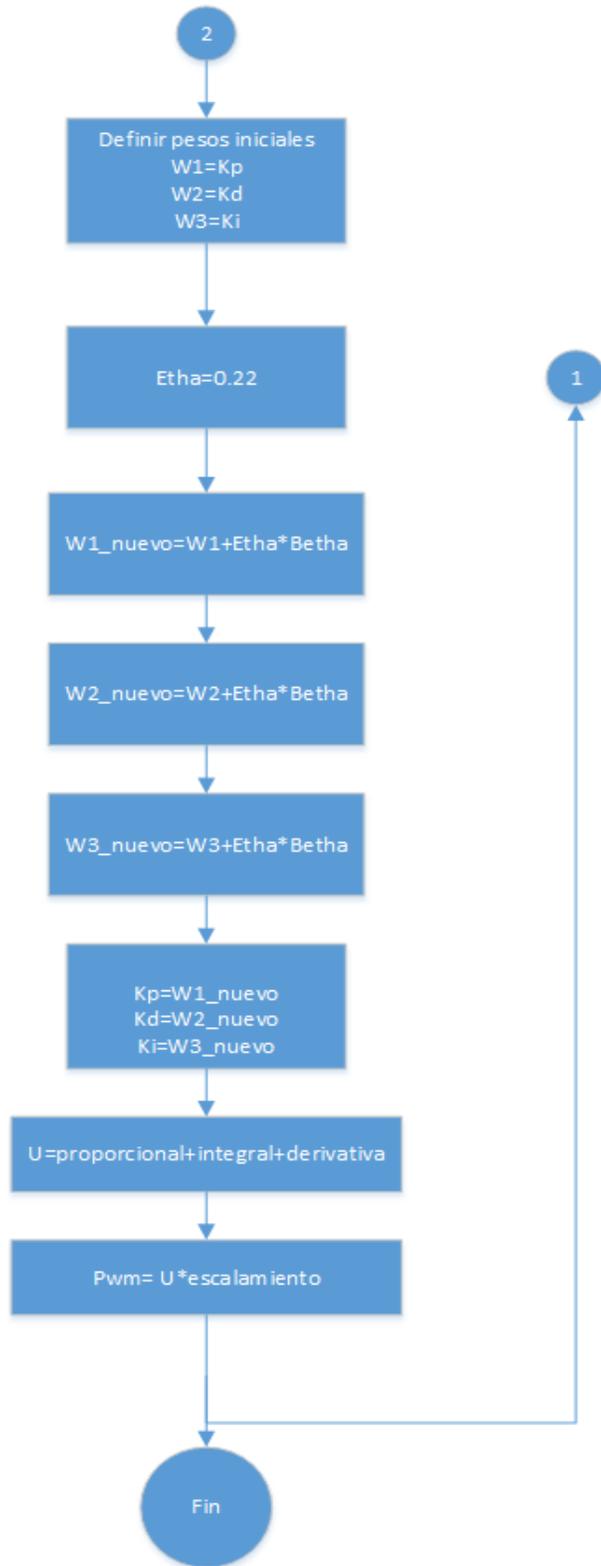


Figura 34. Diagrama de flujo del Controlador Neuro-PID.

5.1.4 Tarjeta de adquisición

La tarjeta de adquisición se maquinó y la distribución se muestra en las Figuras 35, 36 y 37.

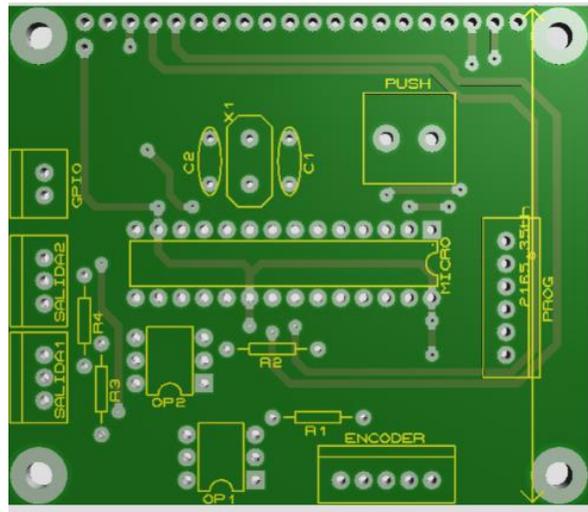


Figura 35. Vista de la tarjeta sin componentes.

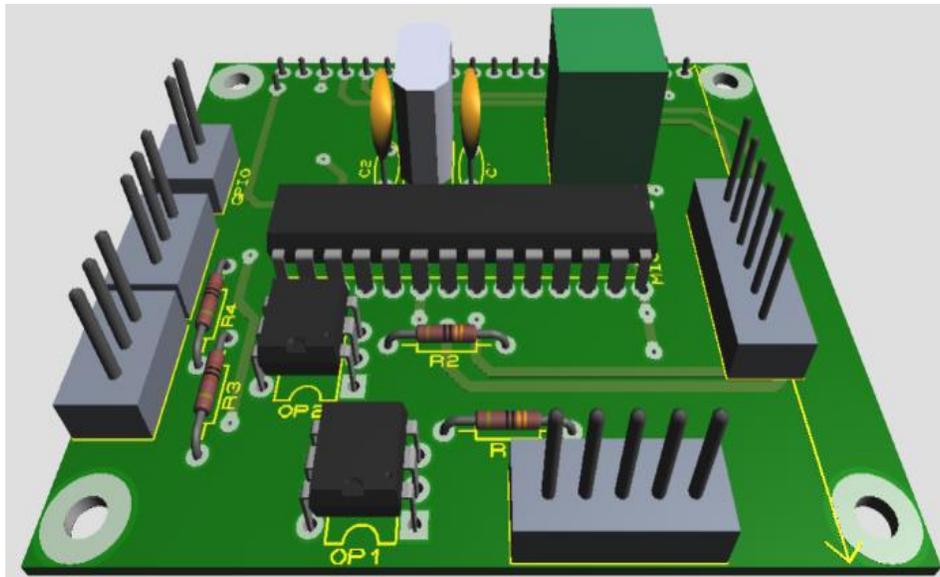


Figura 36. Vista de la tarjeta de adquisición.

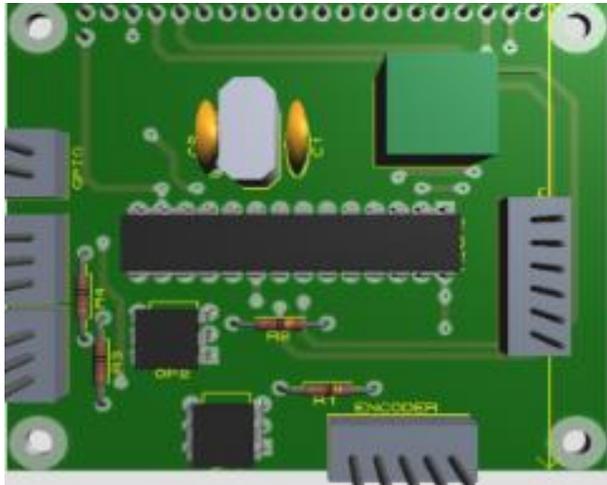


Figura 37. Vista de la tarjeta de adquisición desde arriba.

5.1.5 Conexión del encoder

Para conectar el encoder a la tarjeta de adquisición se utiliza las especificaciones dadas en la Tabla 4 utilizando los colores ahí indicados.

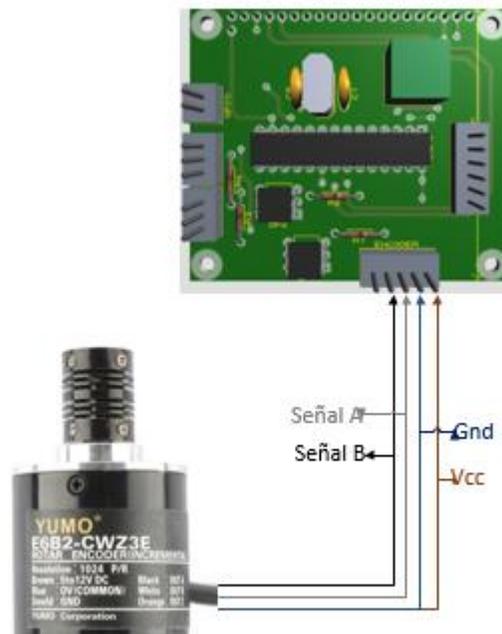


Figura 38. Conexión del encoder a la tarjeta de adquisición.

5.1.6 Etapa de potencia

Para la conexión de la etapa de potencia se muestra el cableado del puente H a la tarjeta de adquisición en la Figura 39.

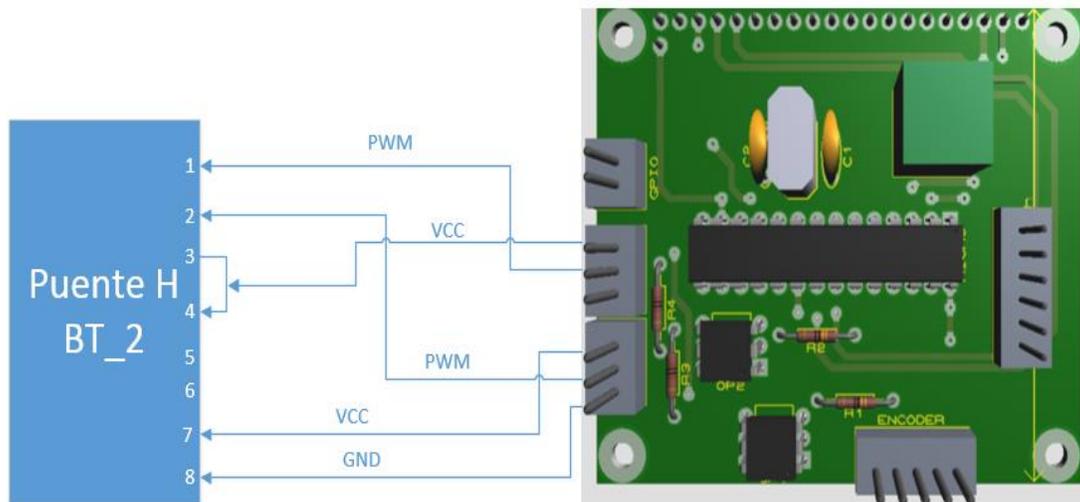


Figura 39. Conexión de la tarjeta de adquisición al puente H.

Como se observa en la Figura 39 se puede observar que los pines 5 y 6 del puente H no se conectan ya que estos son para activar alarmas de corriente y en este proyecto no se contempló ese tipo de alarmas.

En el pin 1 se conecta señal de PWM para activar el giro a la izquierda cuando el control así lo requiera.

El pin 2 corresponde a la señal de PWM para el giro a la derecha.

El pin 3 y 4 se conectan directamente a voltaje para que el giro a la derecha y el giro a la izquierda estén siempre activos, es decir que solo necesitan de la señal de

PWM en los pines 1 o 2 para funcionar y evitar una instrucción más en el programa de control.

El pin 7 y 8 corresponde a la alimentación a la entrada del puente H.

Ahora para la conexión de la salida del puente H se muestra la conexión en la Figura 40.

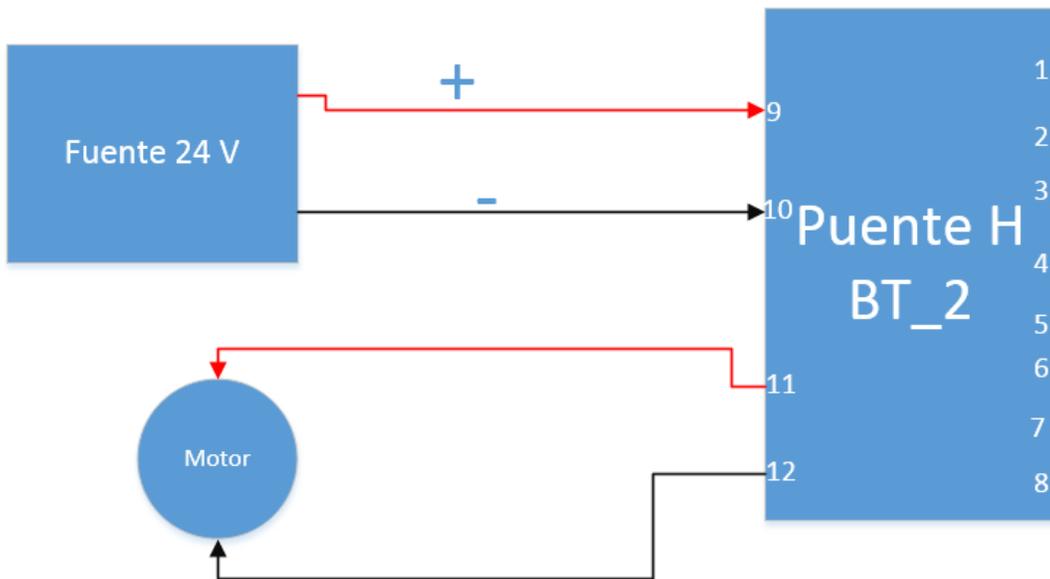


Figura 40. Conexión del Puente H al motor.

Como se observa en la Figura 40 la conexión del motor al puente H es muy sencilla, simplemente se conecta la fuente del sistema en los pines 1 y 2, recordando que este modelo de puente H soporta hasta 24 V y corriente de hasta 30 amperes pero el motor solo necesita de un máximo de 7 amperes por lo que se logra bastante rango de seguridad.

En la Figura 41 se observa en donde se encuentran ubicados los pines del puente H.

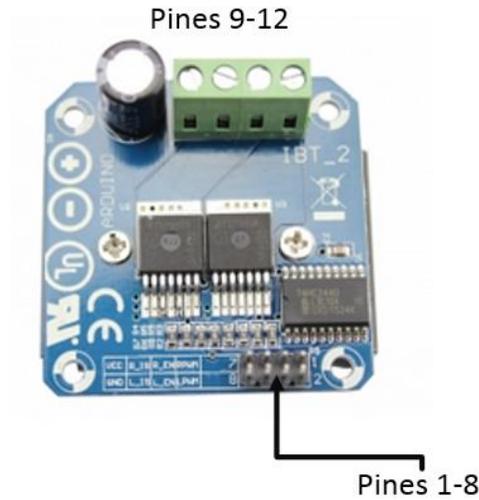


Figura 41. Distribución de pines del puente H.

5.1.7 Implementación PID

Después de conectar y armar el sistema completo se procedió a realizar los experimentos del control comenzando con el controlador PID, los resultados obtenidos para sintonizar el PID de manera experimental utilizando la Tabla 3 de este documento se muestran en la Figura 42.

En todas las gráficas el valor deseado se representa con r , el valor medido con el encoder está representado por θ , el error con la letra e , estos tres están dados en radianes y finalmente la señal de control representada con la letra u y con unidades en volts.

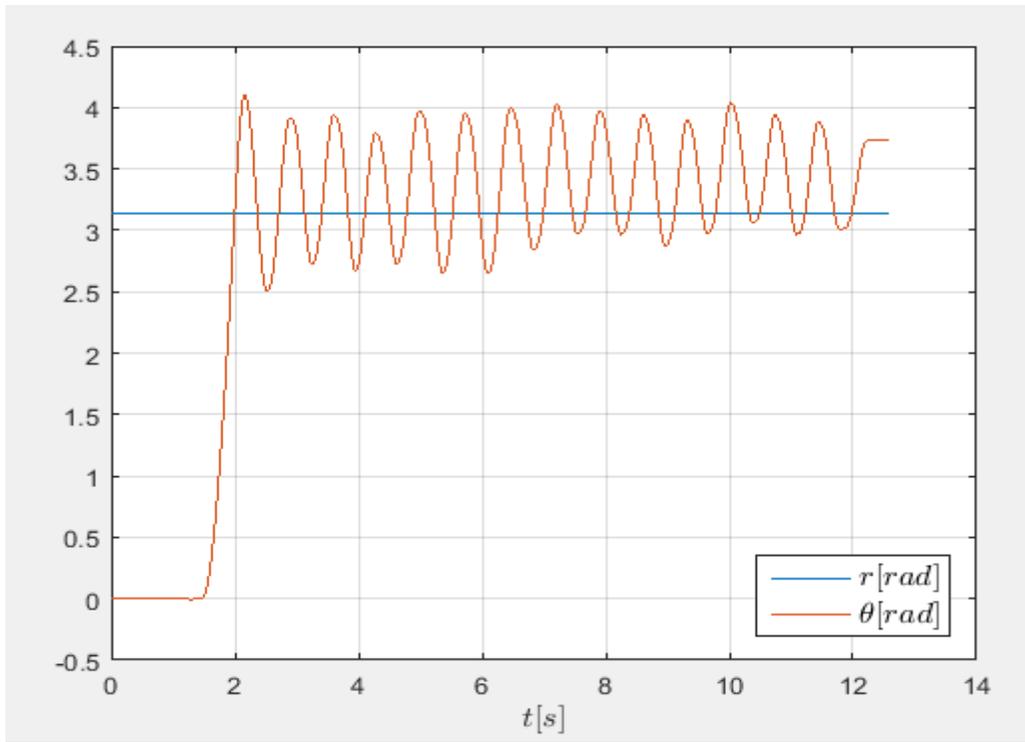


Figura 42. Resultados obtenidos con la ganancia crítica.

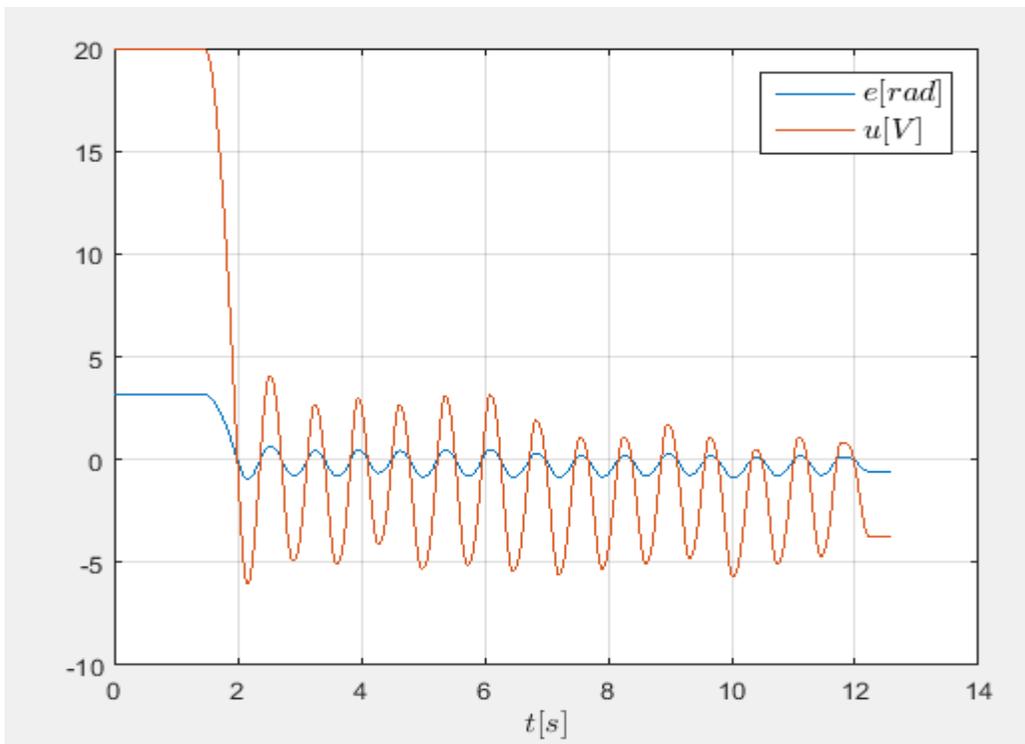


Figura 43. Señal de control y error obtenidos con la ganancia crítica.

De acuerdo a los datos mostrados, la ganancia crítica se obtuvo con un valor de 20 y el periodo fue aproximadamente de 1 segundo, por lo que haciendo los cálculos se tiene que:

$$K_p=10$$

$$K_i=0.5$$

$$K_d=0.125$$

Dando los valores anteriores al programa se lograron buenos resultados cuando no existe carga en el motor los cuales se muestran en la Figura 44.

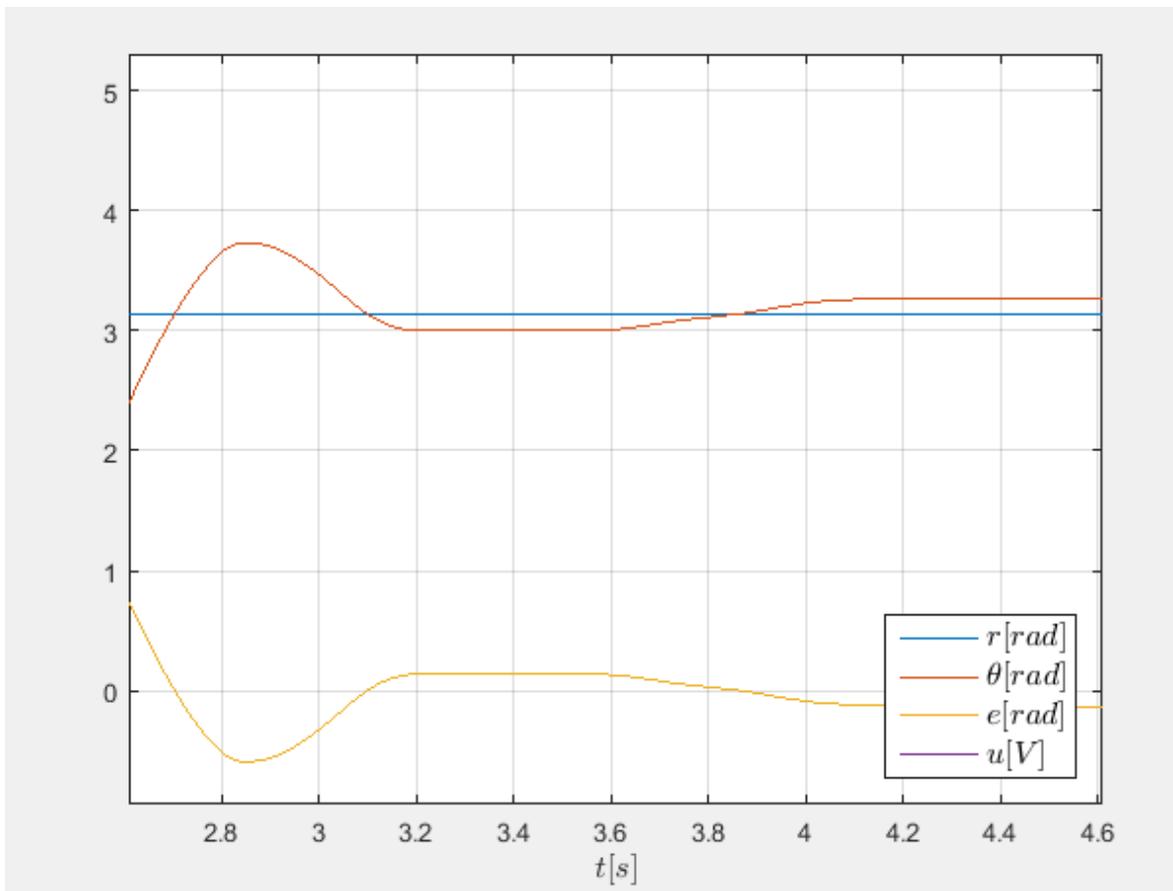


Figura 44. Comportamiento del sistema con las ganancias obtenidas.

Sin embargo se consideró que el comportamiento se podía mejorar aún más, así que se modificaron las ganancias obtenidas anteriormente quedando como $K_p = 15$, $K_i = 1.2$ y $K_d = 0.5$.

Los resultados se muestran en las Figuras 45 y 46.

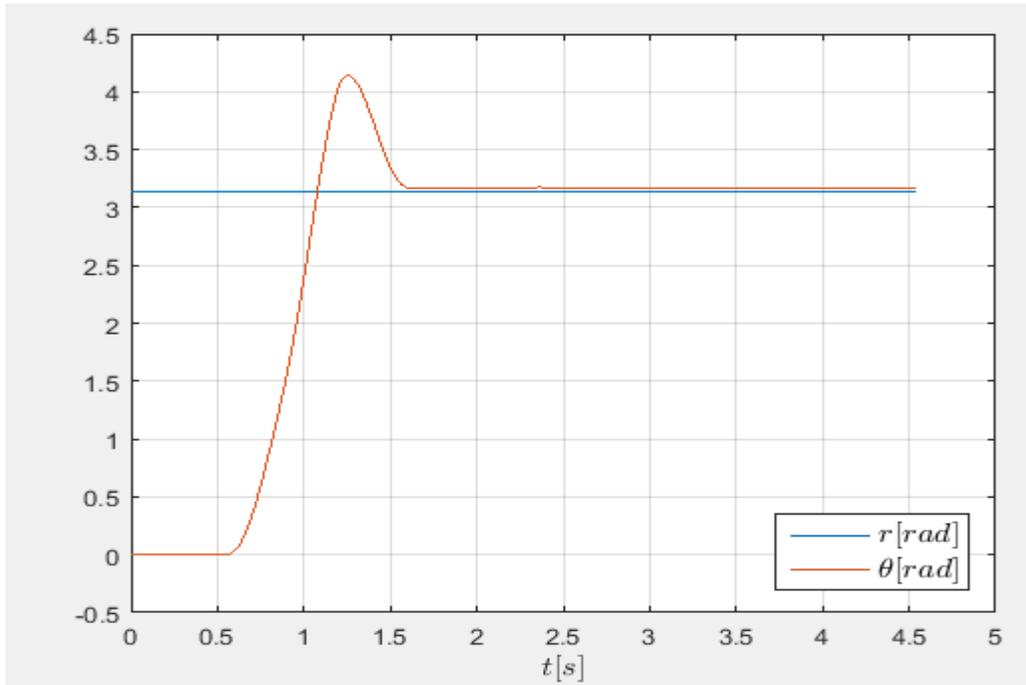


Figura 45. Comportamiento del sistema valor deseado vs valor real.

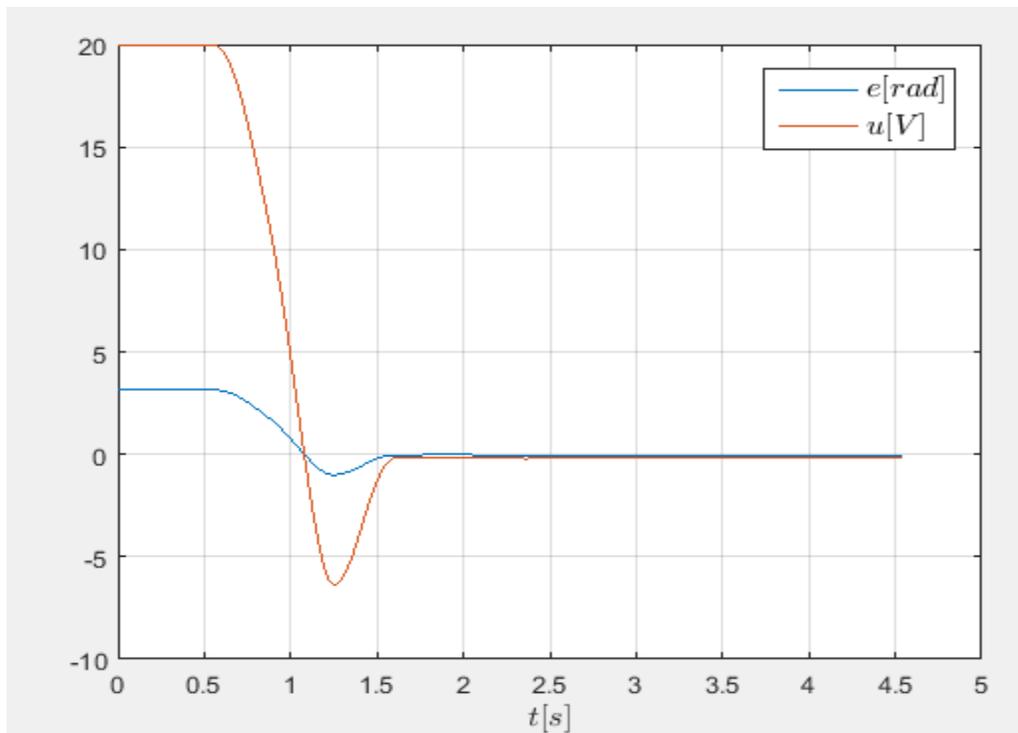


Figura 46. Comportamiento del sistema señal de control y error.

En las Figuras 47 y 48 se observa el comportamiento del sistema cuando se presenten perturbaciones que modifiquen el valor deseado.

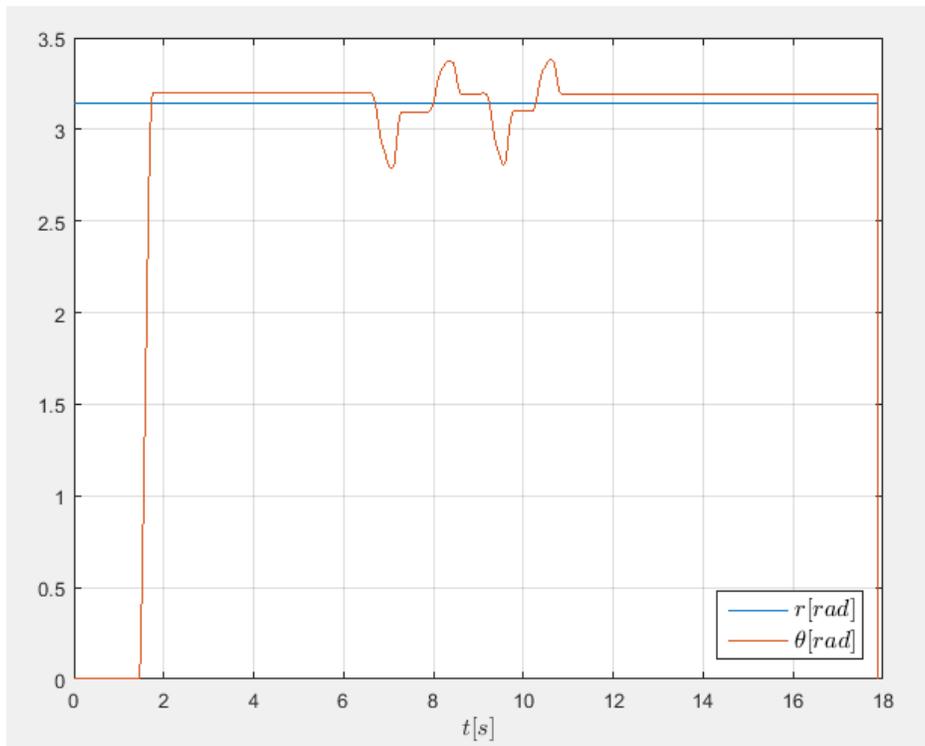


Figura 47. Comportamiento del sistema a perturbaciones.

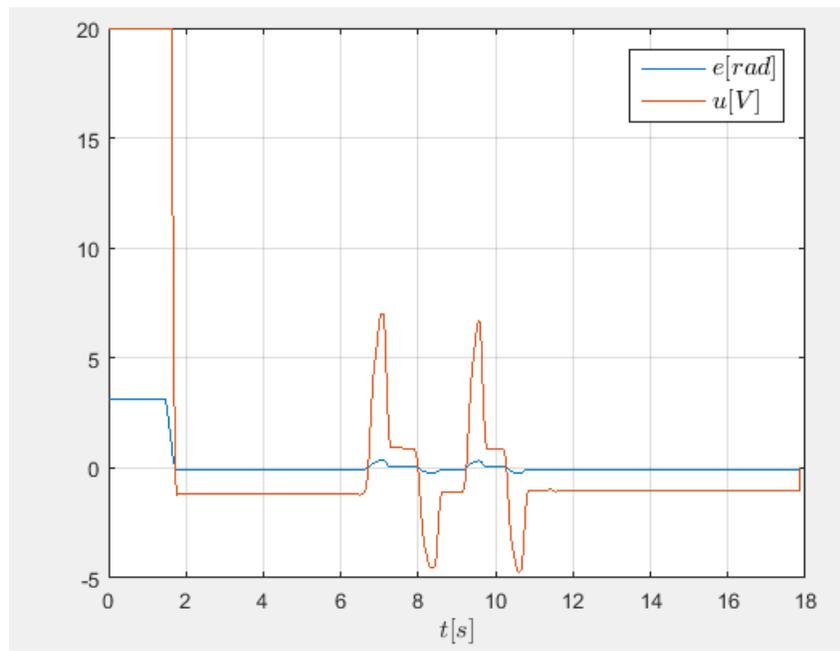


Figura 48. Comportamiento de la señal de control a perturbaciones.

5.1.8 Implementación controlador neuro-PID

Para este controlador los pesos iniciales fueron iguales a las ganancias obtenidas y para comenzar las experimentaciones se utilizó un valor de η , que representa el valor de aprendizaje, de 0.8, sin embargo el sistema mostró inestabilidad, por lo que se siguió experimentando hasta elegir un valor η de 0.22, obteniendo los resultados mostrados en las Figuras 49.

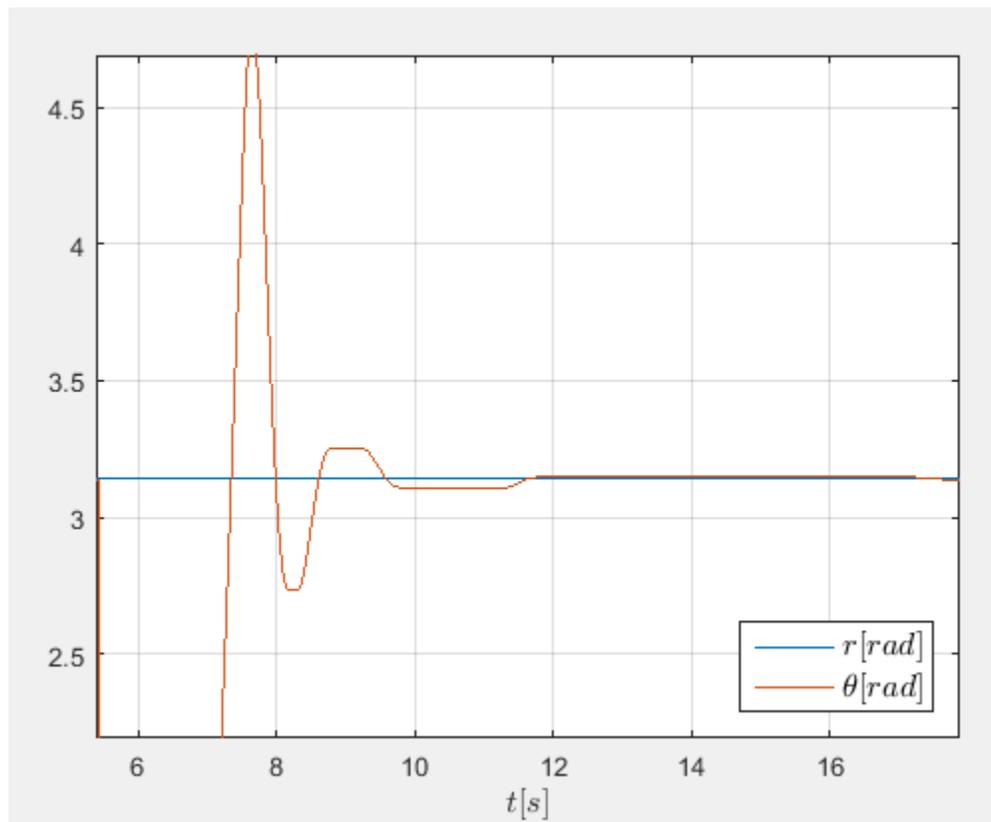


Figura 49. Comportamiento del sistema con red neuronal.

En la Figura 50 se muestra el comportamiento de la señal de control y del error con los valores de la red anterior.

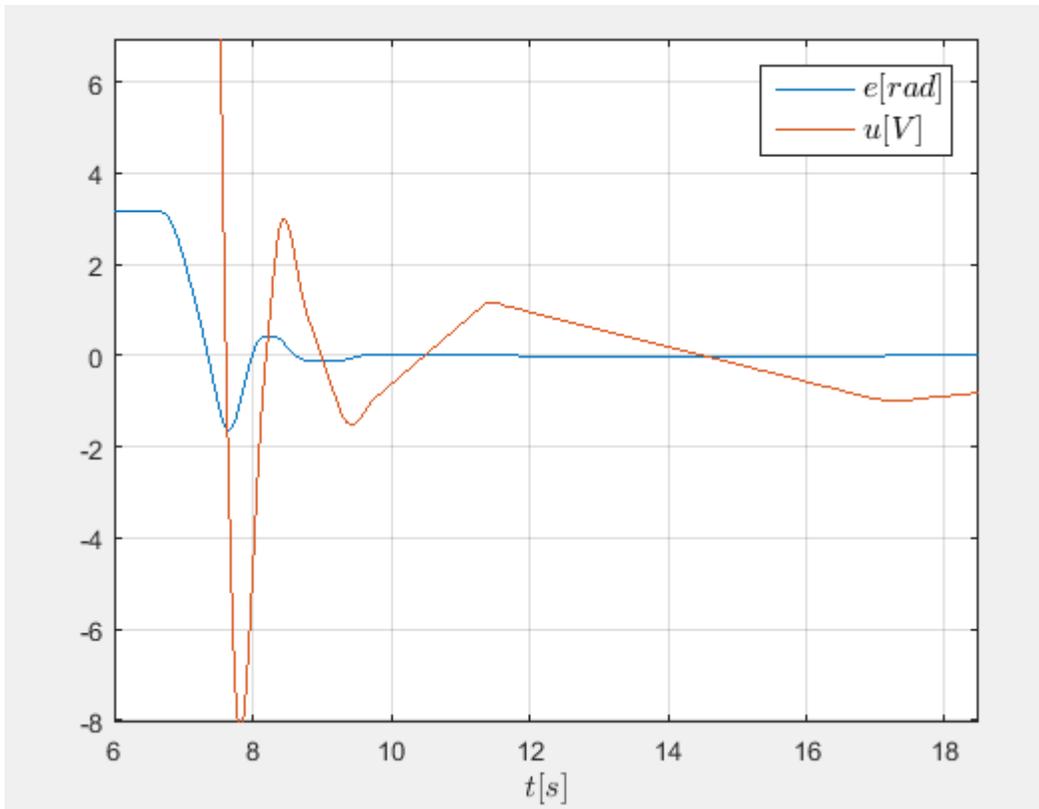


Figura 50. Comportamiento de la señal de control con red neuronal.

Modificando la red neuronal, agregando la restricción de que en los cálculos que se realicen en la red las ganancias K_p , K_i y K_d nunca pueden obtener valores negativos, además de cuestiones de control las ganancias K_i y K_d nunca serán mayores a K_p , gracias a esto se logró eliminar la oscilación que se muestra en la Figura 50, sin embargo el sobrepaso continuó presentándose. Los resultados se muestran en las Figuras 51 y 52.

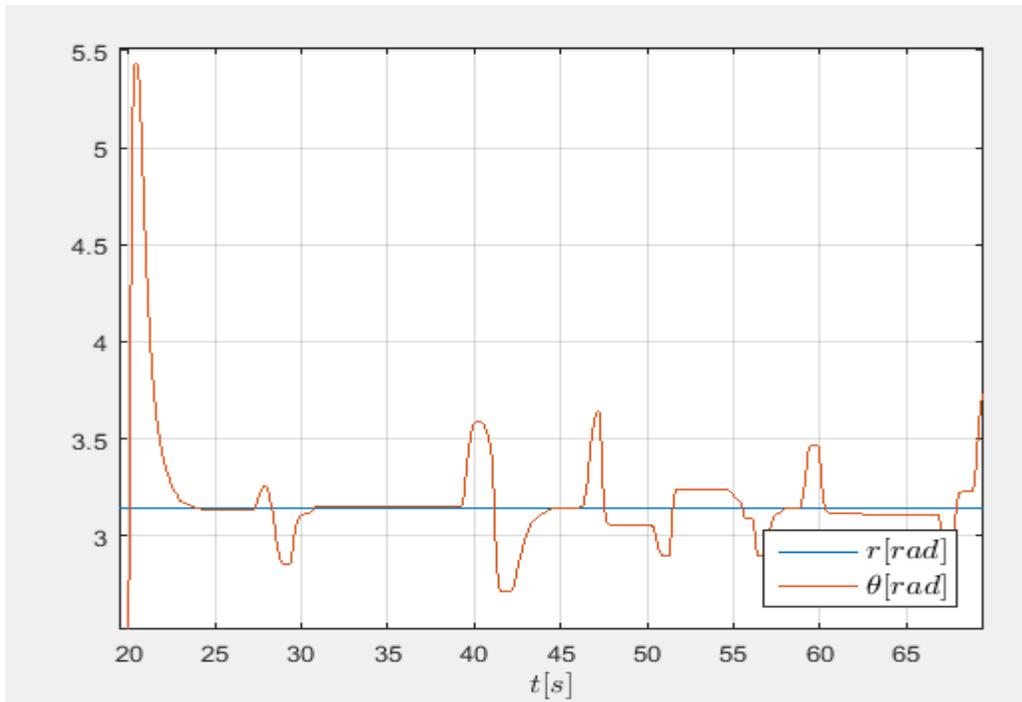


Figura 51. Comportamiento de la red neuronal ante perturbaciones.

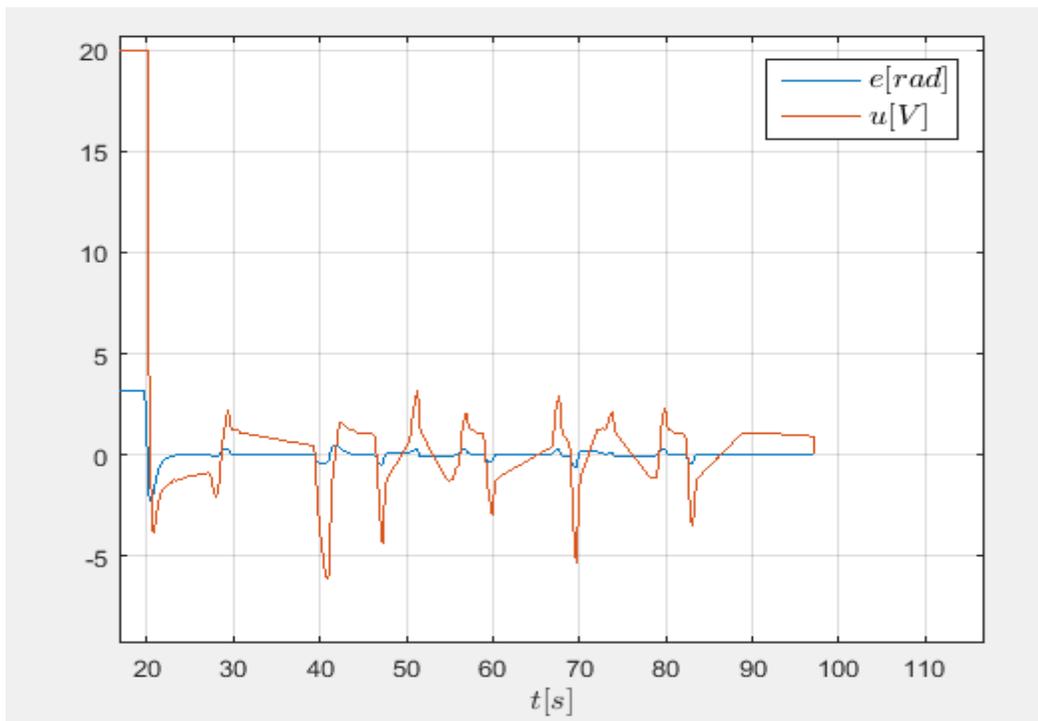


Figura 52. Comportamiento de la señal de control ante perturbaciones con la red neuronal.

En las Figuras 53 y 54 se observa el comportamiento del controlador con red neuronal ante distintos *setpoints*.

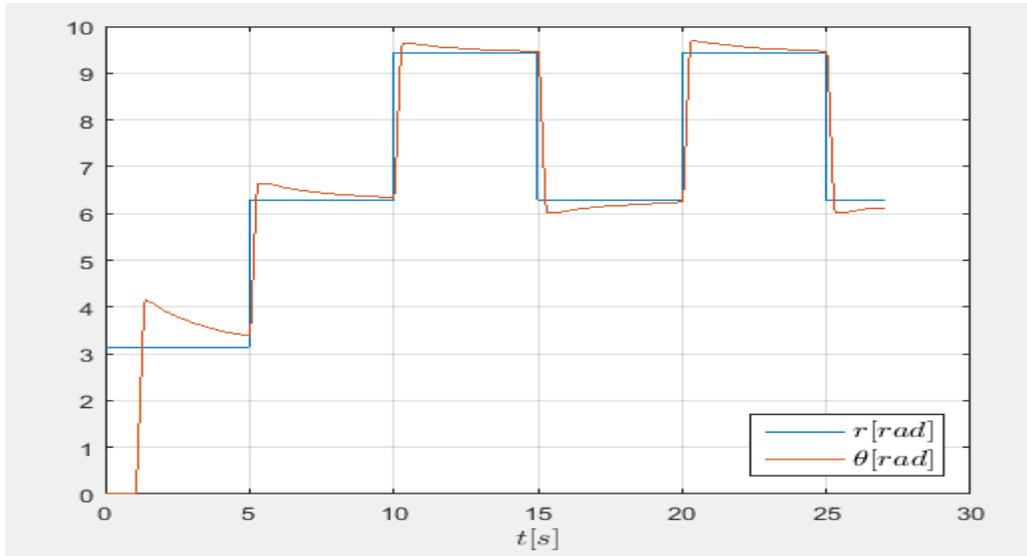


Figura 53. Comportamiento del sistema controlado por red neuronal ante distintos *setpoints*.

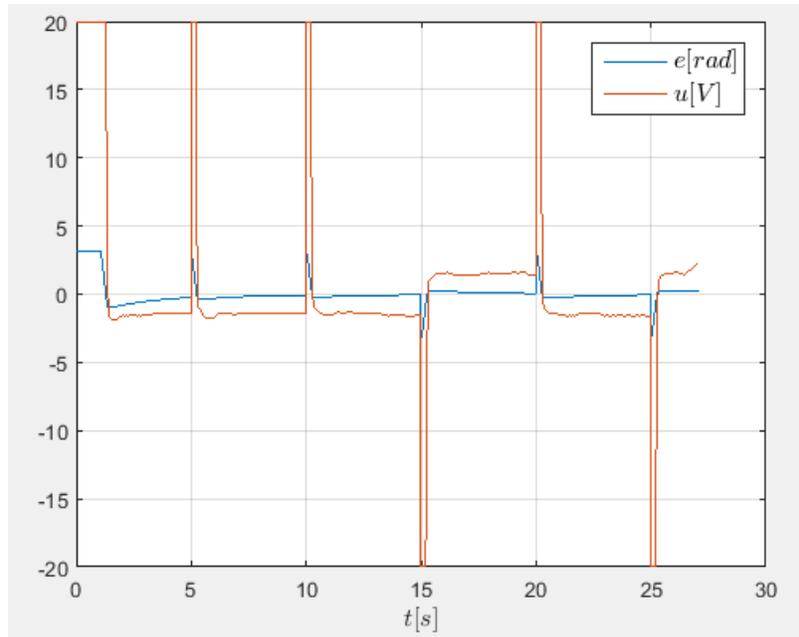


Figura 54. Comportamiento de la señal de control dada por red neuronal ante distintos *setpoints*.

Los resultados finales del controlador se muestran en las Figuras 55 y 56.

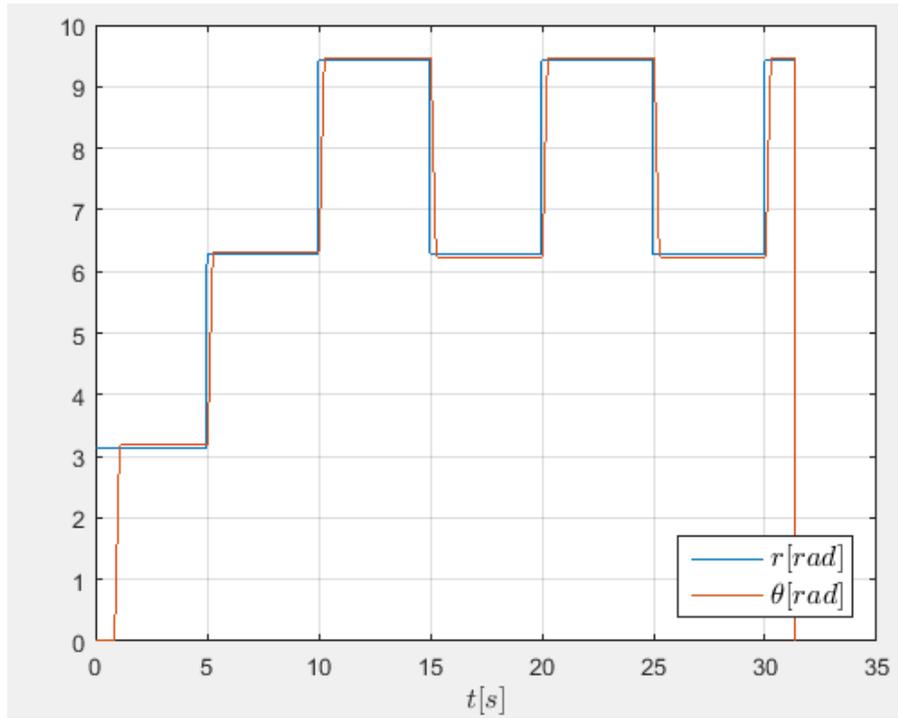


Figura 55. Resultados finales del controlador.

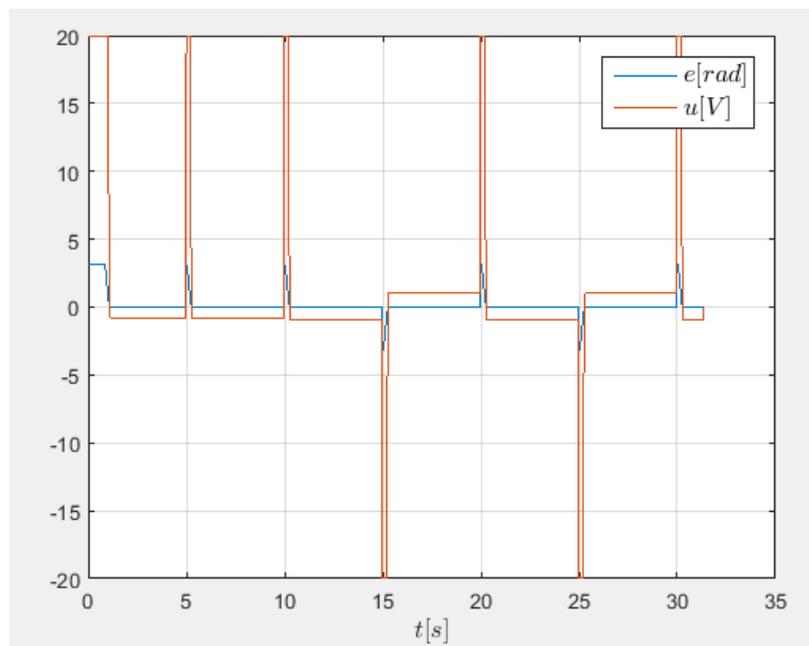


Figura 56. Señal de control final.

5.2 Conclusiones

Al realizar este proyecto se pudo comprobar que la Raspberry Pi 3 tiene la capacidad para poder realizar los cálculos necesarios en la etapa de control del sistema de control *pitch*, pero se necesitó de una tarjeta adquisidora encargada de leer la lectura del encoder, ya que la Raspberry Pi no tenía una función nativa para poderlo hacer, y al realizar esta lectura por medio de los pines se perdían constantemente cuentas en la lectura, lo que ocasionaba que el sistema no convergiera al valor deseado.

El dsPIC en la tarjeta adquisidora desempeñó un trabajo excelente ya que en cada uno de los experimentos realizados obtuvo la lectura del encoder de manera correcta, además este tipo de PIC también ofrece una ventaja al poder manejar PWM a frecuencias mayores, sobre todo superando los 20 Khz que es el umbral que el oído humano puede percibir, por lo que el sistema es menos ruidoso.

En cuanto al comportamiento de la Raspberry Pi respecto al procesamiento de los dos tipos de controlador implementados en el proyecto, el uso de recursos como era de esperarse fue menor en el PID convencional respecto al PID con redes neuronales, y esto es debido a que el PID convencional realiza menos operaciones matemáticas debido a que las redes neuronales agregan el algoritmo de aprendizaje que aumenta hasta tres veces la cantidad de operaciones realizadas, pero en ambos casos la capacidad de procesamiento de la Raspberry Pi fue suficiente para realizar el control. Finalmente aunque presentó inconvenientes como tener que desactivar el módulo Bluetooth para poder activar los pines de comunicación serial presentó la ventaja de disminuir el tamaño del sistema además de la posibilidad de agregar interfaces donde el usuario observe el comportamiento de los valores otorgados por el controlador.

En cuanto al comportamiento mostrado por ambos controladores, el PID convencional demostró ser suficiente para alcanzar el valor deseado en el sistema, además de que al ser un controlador más sencillo requiere de menos operaciones matemáticas y, por lo tanto, de menos capacidad de procedimiento.

El controlador neuro-PID cumplió también con los valores deseados en las pruebas que se realizaron, aunque necesitó de más tiempo para alcanzar la estabilidad.

Al realizar los experimentos finales el neuro-PID otorgó pesos de las ganancias K_p , K_i y K_d que permitieron mejorar la sintonización original del PID convencional.

Finalmente se concluye que la hipótesis planteada en un principio no se cumple ya que el control por PID convencional entrega los mismos resultados que el PID con redes neuronales, mejorando incluso en las pruebas ante distintos valores deseados, lo que no quiere decir que las redes neuronales sean una mala elección para este tipo de control pero por las pruebas realizadas no muestran una mejoría en cuanto controladores convencionales. Los dos tipos de controlador son adecuados para cumplir con el objetivo principal de construir el sistema de servo control para el *pitch* ya que cumplen con los requerimientos planteados en un principio además de cumplir con los objetivos particulares de alcanzar la estabilidad y el valor deseado.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ackermann, T. 2012. Wind Power in Power System (Second ed.). Sweden: John Wiley and Sons, Ltd.

Bianchi F. D., H. De Battista, R. Mantz. 2007. Wind Turbine Control System.

Bossanyi, E. A. 2003. Individual blade pitch control for load reduction. Wind Energy 6:119–128.

Cai, C., H. Zhang, J. Liu, y Y. Gao. 2010. Modeling and Simulation of BLDC motor in Electric Power Steering. 2010 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.:1–4.

Disponibile en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5448517>

Calderano, V., C. Cecati, A. Piccolo and P. Siano. 2010. Adaptive Fuzzy Control for Variable Speed Wind

Systems with Synchronous Generator and Full Scale Converter. In Lingfeng, W., S. Chanan and A. Kusiak.

Wind Power Systems. Applications of Computational Intelligence (First ed., Chapter 11). Berlin: Springer.

Calvo, E. 2016. Parques eólicos, operación y mantenimiento. Opex-energy.com. Disponible en: http://opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html. Fecha de consulta: 10 de Octubre 2016.

Civelek, Z., E. Çam, M. Lüy, y H. Mamur. 2016. Proportional–integral–derivative parameter optimisation of blade pitch controller in wind turbines by a new intelligent genetic algorithm. IET Renew. Power Gener. 10:1220–1228. Disponible en: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2016.0029>

Control de potencia en aerogeneradores. 2016. Motiva.fi. Disponible en: http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/powerreg.htm. Fecha de consulta: 12 de Octubre 2016.

Davis, D. A., y S. Fork. 2002. Us6441507. 1.

Fan, H. C., C. A. Us, y S. R. Quake. 2010. (2) Patent Application Publication (10) Pub . No .: US 2010 / 0138165A1. 1.

Guerrero, M. 2012. Determinación de los parámetros de un controlador pid para una planta con función de transferencia conocida [Licenciatura]. Universidad Veracruzana.

Howell, R., N. Qin, J. Edwards, y N. Durrani. 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renew. Energy* 35:412–422. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>

Ibrahim, I. N., y M. A. Al Akkad. 2016. Exploiting an intelligent fuzzy-PID system in nonlinear aircraft pitch control. 2016 Int. Sib. Conf. Control Commun. SIBCON 2016 - Proc.

Jauch, C., T. Cronin, P. Sørensen, y B. B. Jensen. 2007. A fuzzy logic pitch angle controller for power system stabilization. *Wind Energy* 10:19–30.

Kouro, S., y R. Musalem. 2002. Control mediante lógica difusa. *Técnicas Mod. Autom.:*1–7. Disponible en: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>

Larsen, T. J., H. A. Madsen, y K. Thomsen. 2008. Method of Controlling Aerodynamic Load of a Wind Turbine Based on Local Blade Flow Measurement. 1:0–24.

Masters, G. 2004. *Renewable and Efficient Electric Power Systems* (First ed.). New Jersey: Wiley Interscience.

Matich, D. J. 2001. *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. Historia Santiago.:55.

Montenau, L., A. Bratcu, N. Cutululis and E. Ceanga. 2008. Optimal Control of Wind Energy Systems.

Mulya, I., and V. profile. 2018. Apa Itu GPIO di Raspberry Pi 2 ..?. Dhamsky.blogspot.mx. Disponible en: <http://dhamsky.blogspot.mx/2015/12/apa-itu-gpio-di-raspberry-pi-2.html>. Fecha de consulta 6 de Octubre de 2017.

Towards a Global Approach (First ed.). London: Springer.

Ogata, K. 2013. Ingeniería de Control Moderna.

Pastelletto, I. S. 2012. FUZZY.

Per-unit System - Open Electrical. 2016. Openelectrical.org. Disponible en: http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Per-unit_System. Fecha de consulta 3 de Noviembre 2016.

Plumley, C. E., M. Graham, W. E. Leithead, E. A. Bossanyi, y P. Jamieson. 2014. Supplementing wind turbine pitch control with a trailing edge flap smart rotor. 3rd Renew. Power Gener. Conf. (RPG 2014):8.34-8.34. Disponible en: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2014.0919>

Qué son los servomotores. 2016. 330ohms. Disponible en: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/112837444-que-son-los-servomotores>. Fecha de consulta: 5 de Octubre 2016.

Ramos-gutiérrez, L. D. J. 2012. La generación de energía eléctrica en México. Technol. y ciencias del Agua III:197–211.

Shahraki, F., M. A. y Fanaei, A. R., Arjomandzadeh. 2004. Adaptive system control with PID neural networks. Chemical Engineering Transactions.

Scherillo, F., L. Izzo, D. P. Coiro, y D. Lauria. 2012. Fuzzy logic control for a small pitch controlled wind turbine. Int. Symp. Power Electron. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion:588–593. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6264609>

Secretaría de Energía. 2015. Prospectiva del Sector Eléctrico 2015 - 2029. :237. Disponible en: [www.energia.gob.mx\nhttp://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf)

Secretaria del Trabajo y Previsión Social. 2011. NOM-009-STPS-2011 Condiciones de seguridad para realizar trabajos en altura

Troldborg, N., y J. Sørensen. 2014. A simple atmospheric boundary layer model applied to large eddy simulations of wind turbine wakes. *Wind Energy* 17:657–669. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.1608/full>

Rosyadi M., A. Umemura, R. Takahashi, J. Tamura, N. Uchiyama and K. Ide. 2014. A New Simple Model of Wind Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator for Dynamic Analysis of Grid Connected Large Scale

Wind Farm. 3rd Renewable Power Generation Conference. ISBN: 978-1-84919-917-9.

Velasquez, C. E. C., J. Fernando, P. Orduz, A. Van Schoonhoven, E. Owen, y R. Segovia. La red neuronal backpropagation como interpolador.

Voronin, B., y M. D. Zerquera-izquierdo. 2012. Estudio de las características cualitativas de aerogeneradores mediante un modelo a escala 1. 16:3–9.