

Proyecto Fin de Grado GIA

Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste

Autor: María Paz Luque Alcántara

Tutor: Ignacio Alvarado Aldea

**Dept. de Ingeniería de sistemas y automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Grado
GIA

Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste

Autor:

María Paz Luque Alcántara

Tutor:

Ignacio Alvarado Aldea

Profesor contratado doctor

Dept. de Ingeniería de sistemas y automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste

Autor: María Paz Luque Alcántara

Tutor: Ignacio Alvarado Aldea

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mis profesores y compañeros

A mis amigos

A mis padres

Agradecimientos

En primer lugar, a todos los docentes que he tenido el placer de conocer como alumna, los cuáles han hecho posible que hoy esté aquí, especialmente a Ignacio Alvarado Aldea, por su capacidad de transmitir entusiasmo por el mundo ingenieril y el inestimable apoyo y conocimiento adquirido en el desarrollo de este proyecto.

También, agradecer a mi familia, en especial a mis padres, su constante apoyo y motivación a la hora de desarrollar mis aptitudes académicas.

En último lugar, a mis compañeros que me han acompañado durante estos cuatro años, en especial a Manuel Carreño Ruiz, José Ramos Gálvez y Ángel Calderón Quintero, apoyo incondicional tanto en mi formación académica como personal.

María Paz Luque Alcántara
Sevilla, 2017

Resumen

En esta memoria se recogen una serie de instrucciones detalladas acerca del montaje de un aerogenerador con sistema de paso variable, que, mediante programación en Arduino, tiene como principal objetivo producir corriente a una frecuencia determinada que depende de dos variables:

- La demanda eléctrica.
- El paso de pala óptimo con el que la potencia generada es máxima.

Una parte fundamental del proyecto ha sido el estudio experimental de diversas posibilidades y componentes que constituyesen la estructura del aerogenerador y, a su vez, se han analizado diferentes circuitos electrónicos que generasen la demanda de energía adecuada del aerogenerador.

Posteriormente, se desarrollan una serie de códigos de programación, en lenguaje *C++*, que mediante la conexión del aerogenerador y diversos circuitos electrónicos a una placa de Arduino se logra el control estable del sistema.

Abstract

In this report, there is a series of detailed instructions of the assembly of a wind turbine with a variable pitch system. The main goal of this system, which is programmed in Arduino, is producing electricity at a determinate frequency that depends on two variables:

- The electrical demand.
- The optimal blade pitch. This pitch produces the maximum power.

A fundamental part of this project has been the experimental study to decide what components could create the final structure of the wind turbine. Moreover, a great amount of electronic circuits have been studied to know what of them produce the adequate energy demand of the wind turbine.

Afterwards, a series of programming codes, in C ++ language, have been implemented in 'Arduino'. Finally, the connection between an 'Arduino' board and various electronic circuits achieve a stable control of the system.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice	xi
1 Objetivos y motivación del proyecto	1
2 Introducción	2
2.1 Contexto	3
2.2 Metodología	3
3 Estado del Arte	4
3.1 Evolución histórica	5
3.2 Clasificación de los aerogeneradores	6
3.3 Principales componentes de un aerogenerador	7
3.4 Potencia eólica de un aerogenerador de eje vertical	8
4 Hardware Empleado	11
4.1 Componentes para el montaje del aerogenerador	12
4.1.1 Palas	12
4.1.2 Motor	13
4.1.3 Encoder	15
4.1.4 Servo	17
4.2 Sistema eléctrico	17
5 Software Empleado	20
5.1 Descripción del sistema de control	21
5.1.1 Control de la velocidad del motor	21
5.1.2 Control de la potencia demandada	22
5.1.3 Identificación del sistema	24
5.1.4 Sistema de control de las revoluciones de un motor con paso de pala fijo	26
5.2 Control del paso de pala	27
5.2.1 Sistema de control de las revoluciones de un motor con paso de pala variable	29
6 Presente y Futuro del Proyecto	31
6.1 Desarrollos Futuros	32
6.2 Limitaciones del Proyecto	33
Anexo de Scripts	40
Referencias	41
Índice de Ilustraciones	42

1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El avance de las tecnologías, el aumento en la demanda energética y la escasez de combustibles fósiles son algunos de los tantos motivos por los que, cada vez, las energías renovables cobran más relevancia y se han convertido en objeto de estudio.

Por otro lado, como alumna de Ingeniería en el desarrollo de mi Trabajo de Fin de Grado tenía gran deseo de desarrollar un proyecto en el que los resultados obtenidos fuesen algo físico, no una mera simulación, acercarme al montaje de un equipo y enfrentarme a los problemas que esto conlleva: adquirir conocimientos en áreas diferentes, búsqueda de diversos materiales, ensayos de prueba y error...

De ahí que, este proyecto se basa en el montaje de un equipo de prácticas de sistemas de control automático multivariable, que, debido a la gran relevancia en España de la energía renovable de tipo eólica, el sistema a controlar es un aerogenerador.

Los objetivos fundamentales de este proyecto:

- Estudio de los diversos tipos de aerogeneradores y elección de un modelo a desarrollar.
- Estudio de diversas estructuras y componentes del equipo hasta llegar a la solución más óptima.
- Probar el sistema de control multivariable implantado en el equipo, donde la variable a controlar a través de Arduino es la frecuencia de la corriente generada que depende de:
 - La demanda energética.
 - El paso de pala óptimo con el que producir con el aerogenerador el máximo de potencia

2 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a llevar a cabo una descripción del contexto en el que se encuentra enmarcado el proyecto, así como la metodología empleada para poder lograr los objetivos que se describieron en el capítulo anterior.

5.1 Contexto

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en que no producen gases de efecto invernadero. Además, sus costes han sido reducidos durante la evolución de éstas, mientras que el de los combustibles fósiles tiende a aumentar debido a su escasez.

El hecho de que la demanda energética esté en continuo crecimiento vuelve imprescindible el desarrollo de las energías limpias para combatir el cambio climático. De ahí que las energías renovables hayan recibido un importante respaldo de la comunidad internacional con el ‘Acuerdo de París’ celebrada en diciembre de 2015.

En particular, en España, las energías renovables generan en torno a un 30% de la demanda total. De este 30% la energía eólica proporciona un 12%.

5.2 Metodología

A continuación, se describe la metodología empleada para realizar el proyecto:

- Estudio, búsqueda del Hardware necesario, diseño y montaje de la estructura del aerogenerador.
- Diseño del circuito electrónico a conectar con el aerogenerador.
- Diseño e implementación del Software requerido para el control automático multivariable: el paso de pala y la demanda energética.
- Por último, se describen los resultados obtenidos, presentando las limitaciones encontradas en el desarrollo del proyecto y proponiendo posibles campos de desarrollo.

3 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se va a proceder en primer lugar a realizar una descripción detallada de la evolución histórica de los aerogeneradores, su clasificación y componentes. Por último, se desarrolla el cálculo de la potencia generada por un aerogenerador.

5.3 Evolución Histórica

El molino de viento aprovecha la energía eólica por medio de unas palas acopladas a un eje, las palas giran en círculo al incidir el viento sobre éstas. Este movimiento se transforma en energía mecánica a través del eje que sustenta las palas. Ésta a su vez puede ser transformada en otro tipo de energía según la aplicación para la que esté diseñado.

La referencia mas antigua que se tiene es un molino de viento es del siglo I a. de C. inventado por el griego Herón de Alejandría. Los primeros molinos de uso práctico fueron construidos en Sistan, Afganistán, en el siglo VII. Estos fueron molinos de eje vertical con hojas rectangulares. Mecanismos constituidos por entre 6 y 8 velas de molino forradas con tela que se usaban para moler cereales o extraer agua.



Ilustración 3.1.1- Estructura de los primeros molinos de viento

En Europa, comenzaron a aparecer los primeros molinos en el siglo XII en Francia e Inglaterra y durante la Edad Media se expandieron por todo el continente. Estos molinos eran de eje horizontal, al cual se encontraban unidas varias velas (normalmente entre cuatro y ocho) de entre 3 y 9 metros de longitud. Las velas se construían con madera, y a en algunos, estaban cubiertas con tela. La energía generada por el giro del eje se transmitía, a traves de un sistema de engranajes, a la maquinaria del molino emplazada en la base de éste. De esta forma se lograba moler el trigo. Molinos de este tipo aún se hayan en Castilla-La Mancha o en Holanda.



Ilustración 3.1.2 - Molino de viento común en Castilla-La Mancha

Posteriormente, en Estados Unidos, se desarrollaron molinos para el bombeo de agua que fueron de gran importancia para la agricultura y la ganadería en zonas de Norteamérica de difícil acceso al agua. Este tipo de molinos se caracteriza por sus numerosas velas metálicas.



Ilustración 3.1.3 - Molino multipala de bombeo de agua

La estructura de los aerogeneradores modernos apareció a comienzos de 1980 cuando creció el interés por las energías renovables. La industria de la energía eólica en tiempos modernos comenzó en 1979 con la producción en serie de turbinas de viento por los fabricantes Kuriant, Vestas, Nordtank, y Bonus. De ahí en adelante, el diseño de éstos ha ido evolucionando aumentando las dimensiones de los aerogeneradores han aumentado al igual que la potencia generada por éstos.



Ilustración 3.1.4 -Paisaje de aerogeneradores offshore

Los aerogeneradores modernos generan actualmente una parte importante de la energía eléctrica mundial. Alemania, USA y España son los tres países con más energía eólica instalada del mundo [1].

5.4 Clasificación de los aerogeneradores

La clasificación más habitual se basa en la posición de su eje principal. Existen dos tipos, los de eje horizontal y

los de eje vertical:

- Los aerogeneradores de eje vertical, tienen los ejes principales perpendiculares al suelo. Una ventaja de este uso es que captan el viento en cualquier dirección, por tanto, no necesitan un control de orientación, además el generador eléctrico se puede encontrar situado en el suelo reduciendo así el coste y la complejidad estructural. Su principal desventaja es que la producción energética es menor que la de los de eje horizontal. Existen tres tipos de aerogeneradores verticales como son Savonius, H-rotor y Darrieus.
- Los aerogeneradores de eje horizontal poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Por lo general tienen 3 aspas. Se instalan en lo alto, donde nada obstruye las corrientes de viento. El objetivo es conseguir la mayor velocidad de viento que ayuda a girar las aspas y finalmente generar energía. Este es el tipo de aerogenerador que más se utiliza en la actualidad y es el diseño más común [2].


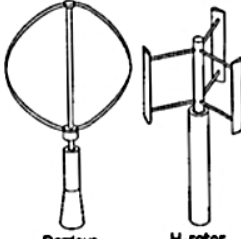
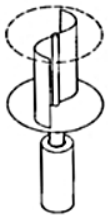
	Eje Horizontal	Eje Vertical Sustentación	Eje Vertical Arrastre
			
Ventajas	Eficiente Ampliamente probado Muy utilizado Más económico Muchos modelos	Eficiencia aceptable Indiferente a la dirección del viento Menos sensibilidad a turbulencia Crea pocas vibraciones	Producto probado Silencioso Robusto y fiable Indiferente a la dirección del viento Puede aprovechar flujos turbulentos Crea pocas vibraciones
Desventajas	No soporta adecuadamente cambios frecuentes en la dirección del viento No tolera bien vientos racheados	No muy probado Más sensible a la turbulencia que el Savonius	Baja eficiencia Económicamente costoso

Ilustración 3.2.1- Clasificación de los aerogeneradores

Otro tipo de clasificación es según la posibilidad de variar el ángulo de sus palas, también según la velocidad, es decir, si son de velocidad fija o variable.

- Los de paso variable pueden modificar su ángulo de pala pudiendo funcionar en un mayor rango de velocidad del viento, frente a los de paso fijo que no pueden variar el ángulo de sus palas.
- En el caso de las variaciones de velocidad se producen variaciones de frecuencia. La frecuencia de la potencia generada tiene que estar sincronizada con la potencia de la red eléctrica (en España 50 Hz), por lo que, los aerogeneradores de velocidad variable requieren rectificadores de frecuencia. En los aerogeneradores de velocidad constante el control de la velocidad en caso de ser excesiva se realiza mediante uno frenos mecánicos actuando sobre el rotor [3].

5.5 Principales componentes de un aerogenerador

A continuación, se explicará de forma breve los elementos más importantes de los aerogeneradores:

1. Palas del rotor: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. Las dimensiones actualmente rondan alrededor de los 30m.

2. Buje: es el elemento que realiza la unión de todas las palas del aerogenerador. Se monta sobre el eje de baja velocidad, desde el que se transmite el par motriz a la transmisión de potencia del aerogenerador.
3. Multiplicadora: permite que el eje de alta velocidad gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad.
4. Ejes de alta y baja velocidad: el eje de baja velocidad (secundario) del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. El eje de alta velocidad (primario) está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. Este freno se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante el proceso de mantenimiento de la turbina.
5. Generador: Está formado por una máquina encargada de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.
6. Controlador: el controlador electrónico tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier anomalía, automáticamente se para el aerogenerador y llama al ordenador del encargado (operario), de la turbina a través de un enlace telefónico o módem.
7. Anemómetro: se utiliza para medir la velocidad del viento. Le manda este dato al controlador, el cual actúa sobre el freno mecánico si es necesario.
8. Veleta: se utiliza para medir la dirección del viento. Manda los datos al controlador para que éste actúe sobre el motor de orientación [4].

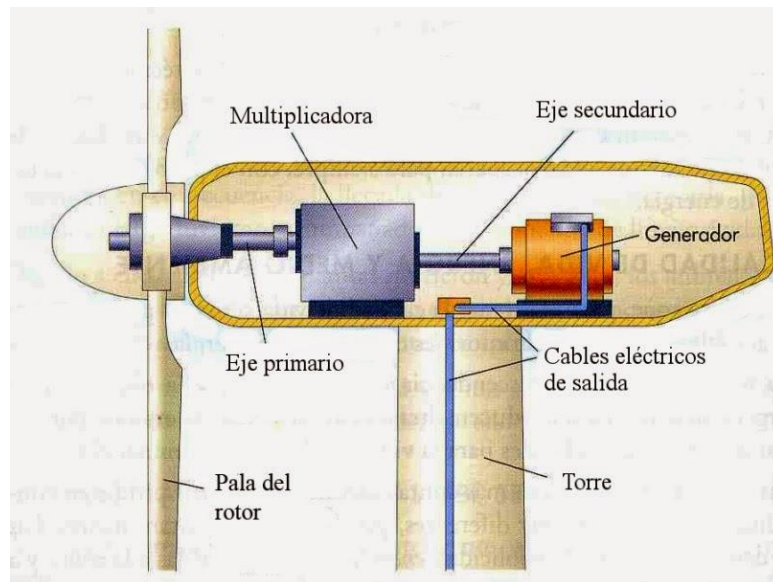


Ilustración 3.3.1 - Componentes de un aerogenerador

5.6 Potencia Eólica de un aerogenerador de eje horizontal

La obtención de la potencia de un aerogenerador se consigue convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor, es decir, éstas absorben la energía cinética del viento. La energía cinética se calcula según:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

Al girar las aspas del aerogenerador forman un círculo, por tanto, la masa de aire (m) que atraviesa el aerogenerador tiene forma de cilindro. Así, para calcular la potencia eléctrica que produce un aerogenerador se supone un periodo de tiempo arbitrario t , en el cuál se asume que la velocidad v permanece constante.

Por tanto, si se supone un cilindro cuya base sea el área barrida que forman las palas y la altura sea la distancia recorrida por el aire en el tiempo t , según la figura:

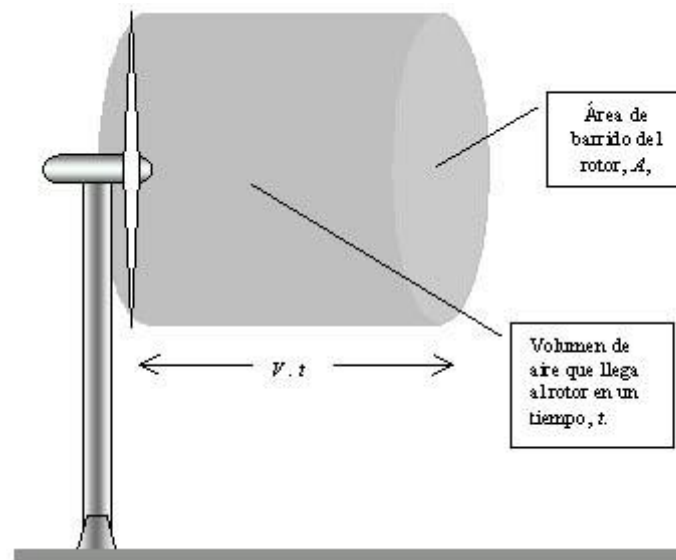


Ilustración 3.4.1 – Volumen de aire que atraviesa un aerogenerador

Así se obtiene la energía cinética del volumen de aire que atraviesa las palas del aerogenerador:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{\pi D^2}{8} \rho v^3$$

ρ : densidad del aire

D : diámetro del área barrida

A partir de la ecuación anterior, se puede calcular la potencia disponible generada en base a:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\pi D^2}{8} \rho v^3$$

Por todo ello, se deduce que la potencia del viento depende de la densidad del aire, del área barrida por las palas y del cubo de la velocidad del viento, por tanto, una pequeña variación en la velocidad del viento implicará una variación importante en la potencia disponible.

La cantidad de potencia eólica aprovechable depende de las características de funcionamiento de la máquina y viene dada por:

$$P_a = C_p \frac{\pi D^2}{8} \rho v^3$$

Donde C_p , es el coeficiente de potencia y expresa la fracción de potencia extraída, siendo función, entre otras, de la velocidad del viento o la velocidad angular de la turbina.

El coeficiente de potencia presenta un valor máximo teórico establecido a partir de la teoría del rotor $C_{p_{max}} = 0,59$ y es conocido como límite de Betz. En la práctica, este límite teórico no se llega a alcanzar, puesto que en el proceso de conversión de la energía eólica a energía eléctrica intervienen diversos elementos que conllevan ciertas pérdidas.

Una manera común de determinar la eficiencia de un aerogenerador es utilizar la relación entre el coeficiente de potencia (C_p) y la velocidad tangencial o Tip Speed Ratio (λ), siendo λ la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala y la velocidad del viento:

$$\lambda = \frac{v_t}{v_{wind}} = \frac{\Omega R}{v_{wind}}$$

Donde:

R es el radio del rotor en [m].

Ω es la velocidad angular de la turbina en [rad/s].

v_{wind} es la velocidad del viento en [m/s].

La forma de la curva de la relación $\lambda - C_p$ depende de cada aerogenerador, si bien, se pueden agrupar según el tipo de aerogenerador [5].

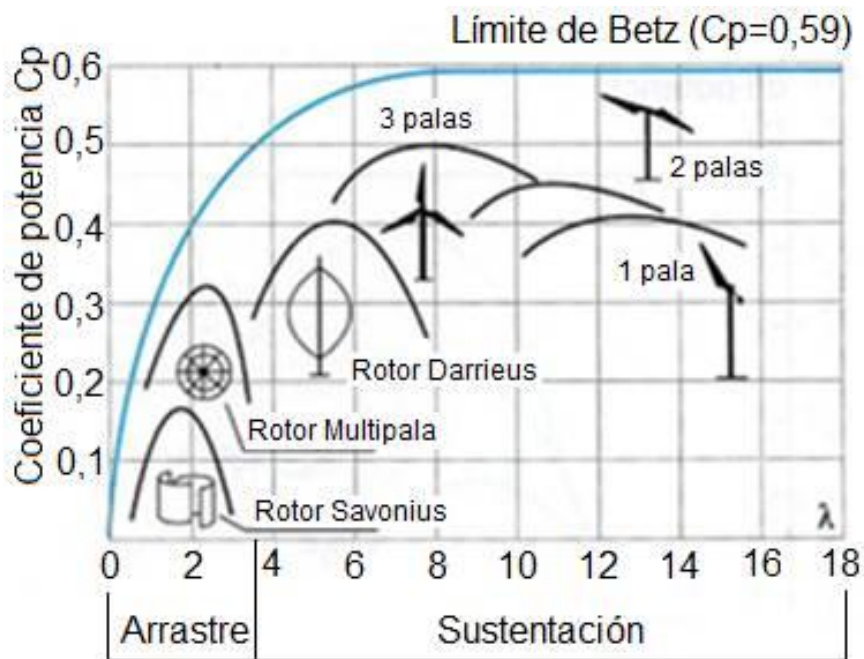


Ilustración 3.4.2 - Curva de la relación $\lambda - C_p$

4 COMPONENTES DEL PROTOTIPO

En el capítulo actual se va a describir de forma detallada, en primer lugar los elementos que lleva embarcado el aerogenerador, así como del proceso que se siguió para el montaje y la puesta a punto del mismo.

4.1 Componentes para el montaje del aerogenerador

A continuación se va a pasar a describir los elementos que se emplearon para poder construir el aerogenerador, así como del hardware extra que se le implementó para poder lograr los objetivos propuestos.

4.1.1 Palas

Con el objetivo de construir un aerogenerador con palas de paso variable, tras encontrar diversas dificultades a la hora de adquirir unas palas de aerogenerador con las dimensiones adecuadas para el prototipo deseado, se consideró la búsqueda de palas de maquetas de aviones de hélice de paso variable. Así, las palas empleadas para el montaje de la maqueta son las mostradas en la siguiente figura:



Ilustración 4.1.1.1-Sistema de palas de paso variable comprado a través de Hobbyking [6]

Las características de este sistema de palas de paso variable son:

- Palas de 9" de diámetro
- Rango de variación de paso de pala de $\pm 15^\circ$

En un principio, debido a que la longitud de las palas adquiridas era pequeña, el par generado por éstas al incidir una corriente de viento (la generada por un ventilador) no era suficiente para girar el eje del motor. Por tanto, se consideró la idea de alargar la longitud de las palas. Éstas son las empleadas en el montaje final, palas de 11" de diámetro en las que se ha fijado un añadido de papel de acetato, como se muestra en la figura.



Ilustración 4.1.1.2 - Palas con añadido de papel de acetato

Por otro lado, se intentó obtener un mejor diseño de palas mediante impresión 3D. El diseño de la pala se tomó ya realizado [7] rediseñando con CATIA la zona que engancha con el sistema de cambio de paso del que se disponía. Tras varias impresiones en 3D se obtuvo una pala que encajaba perfectamente en la estructura. Una vez obtenido el diseño, debido a la baja calidad de la impresora 3D empleada se lijó la superficie de ésta con el objetivo de minimizar su rugosidad.



Ilustración 4.1.1.3 -Pala realizada con impresión 3D



Ilustración 4.1.1.4.-Diseño del enganche al sistema de cambio de paso de pala

Al probar el equipo con estas nuevas palas se observó que los resultados obtenidos eran peores, se alcanzaban menos revoluciones del motor que con las anteriores. El motivo era debido tanto a la baja calidad de la impresión como al diseño de la pala, que depende de la velocidad del viento, y cuya torsión, es función de éste y es de difícil cálculo. Por este motivo se volvió a reemplazar las palas por las anteriores.

4.1.2 Motor

El criterio principal que condiciona la elección del motor es que el voltaje obtenido, empleando el motor como generador sea como mínimo de 3V (para el encendido de un LED son necesarios 2 V además de la caída de tensión que pudiese haber en el resto del circuito) debido a los requisitos exigidos por el circuito electrónico al que se conecta, es decir la demanda de energía a la que éste es sometido.

En principio, por simplicidad se utilizó un motor de corriente continua, ya que, a diferencia de los motores de alterna, no requiere el uso de un circuito rectificador de tensión (circuito que transforma la tensión de alterna en continua). Pero, éste no generaba la corriente suficiente (0,3V) debido a que las palas no generaban el par

requerido. Por otro lado, se sabe que los motores paso a paso utilizados como generador generan mucha tensión y muy poca intensidad, lo que los hacía firmes candidatos ya que permiten disponer de tensión suficiente para alimentar una carga y al circuito de control de ésta.

Así el motor paso a paso empleado es MITSUMI M35SP-11NK, un motor que funciona a un voltaje de trabajo de 24V.

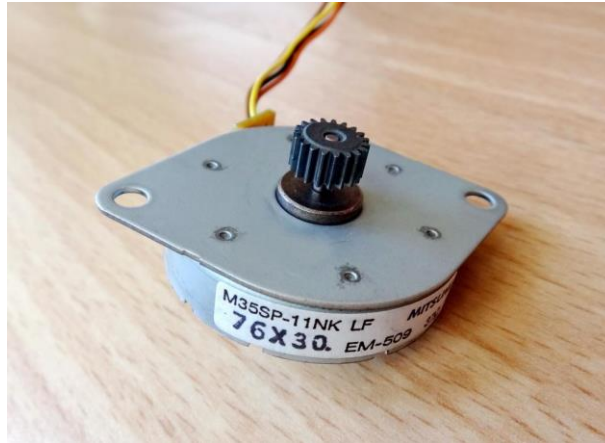


Ilustración 4.1.2.1 -Motor MITSUMI M35SP-11NK

Para poder encajar el sistema de cambio de pala y el encoder con el motor, se extrajo el engranaje que aparece en la figura y se le cambió el eje por otro más largo, de forma que, el eje sobresaliese por ambos lados del motor y se pueda colocar a un lado el sistema de cambio de paso de pala y al otro el encoder.

Éste es un motor de dos fases, es decir, cuenta con dos bobinas independientes, tiene cuatro cables de salida donde cada par corresponde a las terminales de cada bobina, por lo que, dos corresponden a los polos positivos y dos a los negativos dependiendo del sentido de giro del rotor.

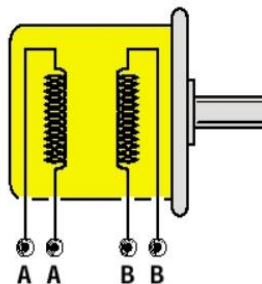


Ilustración 4.1.2.2 -Motor de dos fases.

Previamente, como se ha comentado, se habían considerado un motor de continua cuyo voltaje de trabajo son 6V.



Ilustración 4.1.2.3 – Motor DC de voltaje de trabajo 6V

Se probó también con un motor del mismo tipo con una reductora implementada de 24:1, pero las palas no eran capaces de generar suficiente par para hacerlo girar debido a la alta fricción ofrecida por los engranajes de la reductora, obteniendo así sólo 1,5V.

4.1.3 Encoder

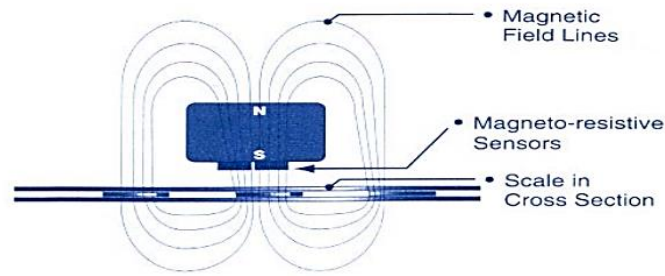
Los Encoders son interruptores dispuestos de forma que se cierra y abre a una frecuencia proporcional a la de giro de un motor. Según el tipo de tecnología empleada los encoders se pueden clasificar en:

- Ópticos: utilizan un disco de vidrio con un patrón de líneas depositadas en él, un disco metálico o plástico con ranuras (en un encoder rotatorio), o una tira de vidrio o metal (en un encoder lineal). La luz de un LED brilla a través del disco o tira sobre uno o más fotodetectores, que produce el suministrador del encoder.



Ilustración 4.1.3.1- Tipos de encoder óptico

- Magnéticos: Existen varios tipos de sensores magnéticos. Los sensores de reluctancia variable detectan cambios en el campo magnético causado por la presencia o movimiento de un objeto ferromagnético. El sensor rotatorio de reluctancia variable más sencillo, comúnmente llamado magneto recolector, consiste en un carrete enrollando un imán permanente. Este genera un pulso de voltaje cuando un diente de engrane se mueve ante este.



Principio Inductivo

Ilustración 4.1.3.2 - Encoder magnético

Otro tipo de sensor utiliza un imán permanente y un efecto de Hall o dispositivo magneto resistivo para producir un cambio en cualquier voltaje o resistencia eléctrica en presencia de material ferromagnético, el cual puede tener forma de diente de engrane (para un encoder rotatorio) o banda metálica con ranuras (para un encoder lineal). Este tipo de sensor trabajará abajo a una velocidad 0, y está disponible tanto en la forma rotatoria como en la lineal. Otro tipo de sensor magnético usa un dispositivo magneto resistivo para detectar la presencia o ausencia de “tiras” magnetizadas, ya sea sobre el borde de un tambor o sobre una tira no magnética.

El encoder empleado en este aerogenerador es un encoder magnético que consiste en un disco situado en el eje del motor que gira unido a éste con varios imanes dispuestos a la misma distancia en el disco y un imán situado frente a éste que mide los pulsos, a una distancia próxima pero sin estar en contacto, de manera que, cada vez que los dos imanes se enfrentan (el del disco y el que mide los pulsos) se genera un pulso.

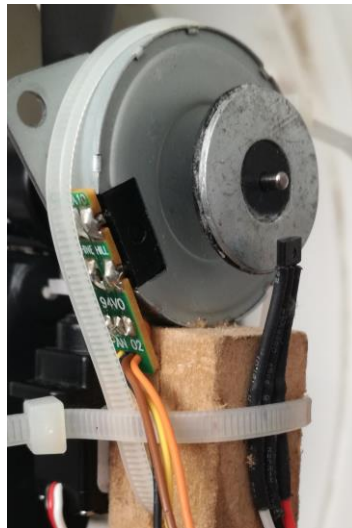


Ilustración 4.1.3.3 – Encoder empleado en el montaje

4.1.4 Servo

El modelo utilizado es SM S2309S con un ángulo de rotación de $\pm 60^\circ$. A éste se le ha atornillado un único brazo de forma que al girar éste actúa sobre el mecanismo de cambio de pala como se muestra en la figura.



Ilustración 4.1.4.1 -Servo SM S2309S



Ilustración 4.1.4.2 – Montaje del servo en el equipo

4.2 Sistema Eléctrico

Tras estudiar diversas posibilidades el circuito eléctrico considerado como demanda de carga para el motor está constituido de:

- Dos circuitos rectificadores de tensión (uno por cada fase del motor): este circuito permite convertir la corriente alterna de salida del motor en corriente continua.

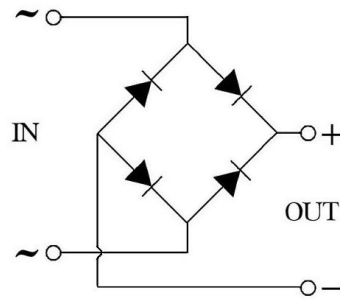


Ilustración 4.2.1- Estructura de un circuito rectificador

- Circuito de demanda de carga: Las salidas de los circuitos rectificadores se conectan a un condensador cada una para filtrar y reducir el rizado de la corriente. Los nodos de los condensadores se conectan en paralelo al circuito de demanda de carga. Éste está constituido por tres ramas iguales formadas por 2 leds rojos en serie y un MOSFET cada una. Cuando se cierra el MOSFET el circuito de potencia alimenta los diodos, generando una corriente que a su vez genera un par resistente en el motor. Por lo tanto, si se es capaz de controlar la corriente, se puede controlar la velocidad de giro del motor.

Los MOSFET son controlados por señales PWM desde el Arduino, de esta forma se pueden encender los leds con 255 niveles de potencia cada par, como se explicará posteriormente.

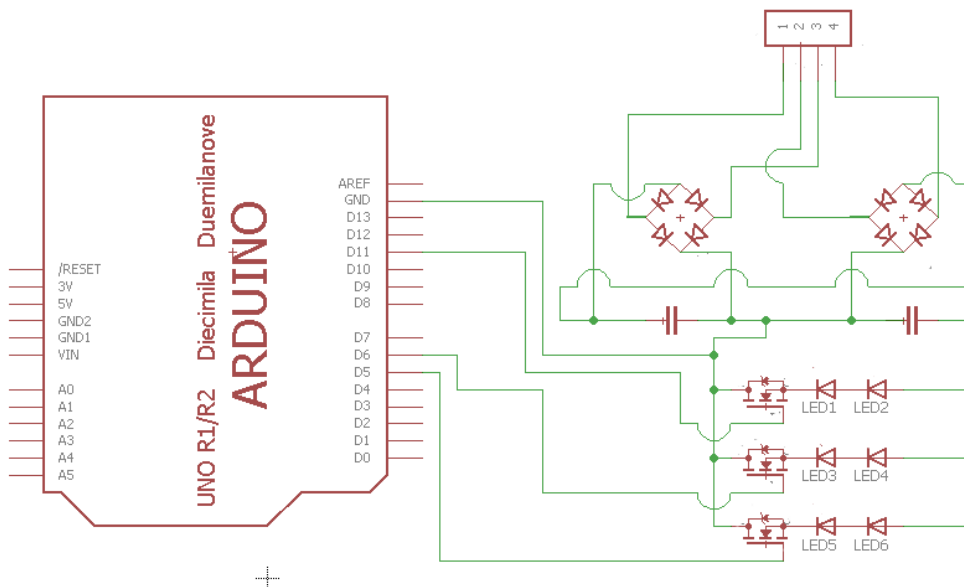


Ilustración 4.2.2 – Esquema del circuito

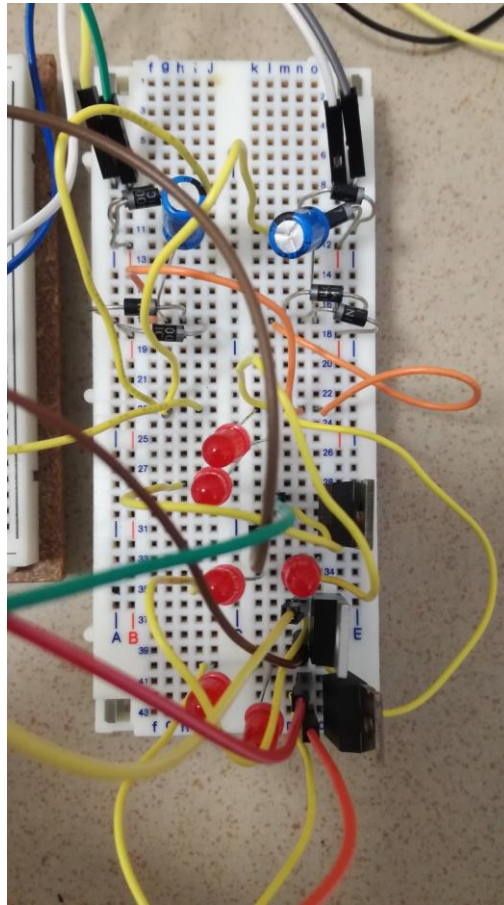


Ilustración 4.2.2 -Montaje del circuito en una protoboard

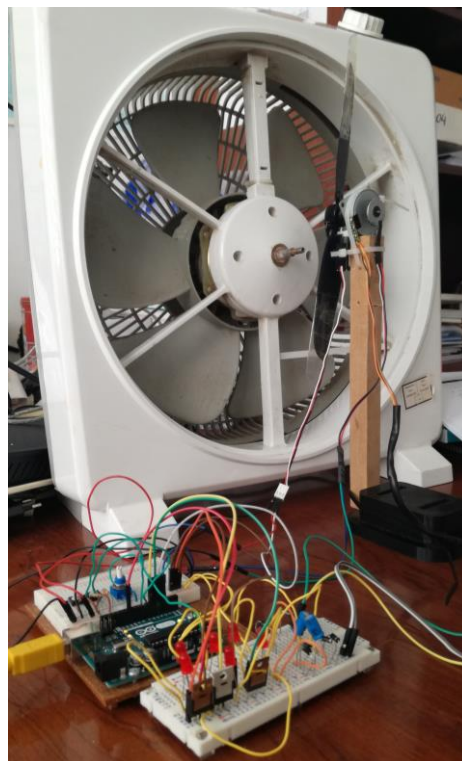


Ilustración 4.2.3 -Montaje completo del equipo

5 SOFTWARE EMPLEADO

Este capítulo desarrolla el sistema de control empleado con un *modelo de caja negra*. Recalcar que en este capítulo se encuentran explicaciones acerca de los distintos scripts realizados [8], mientras que dichos scripts se encuentran en el apartado llamado *Anexo de Scripts*.

5.7 Descripción del sistema de control

Se ha desarrollado este proyecto mediante un *sistema de caja negra*, es decir, ha sido estudiado desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce, sin tener en cuenta su funcionamiento interno, donde los resultados conseguidos a continuación se han obtenido de forma experimental.

5.1.1 Control de la velocidad del motor

En primer lugar, se explica como obtener la medida de las revoluciones del motor con un encoder. Mediante el encoder se obtiene el número pulsos por revolución del motor para posteriormente poder controlar esta señal. El encoder tiene 3 cables de salida:

1. Cable negro, GND, que debe ir conectado a la tierra del Arduino.
2. Cable rojo que debe ir conectado a los 5V del Arduino.
3. Cable blanco. Para poder cablear esta señal al Arduino, se tiene que añadir una resistencia entre este cable y 5V, de forma que cuando el interruptor se cierre el cable verde se pondrá a 0V y cuando se abra, gracias a la resistencia añadida, se pondrá a 5V. En este montaje, a la resistencia, se le llama una resistencia de PULL UP. Arduino posee este tipo de resistencia de forma interna y se puede conectarlas mediante software (programación). Para ello declararemos el pin al que conectemos dicha entrada con la instrucción `pinMode(pin, INPUT PULLUP)` y Arduino conectará una resistencia de 20K entre dicho pin y 5V. De esta forma se puede conectar directamente el cable verde al pin del Arduino. Por último, como esta entrada se utiliza como una interrupción externa, ha de estar conectada al pin 2 o al pin 3 del Arduino, en este caso, el pin 3.

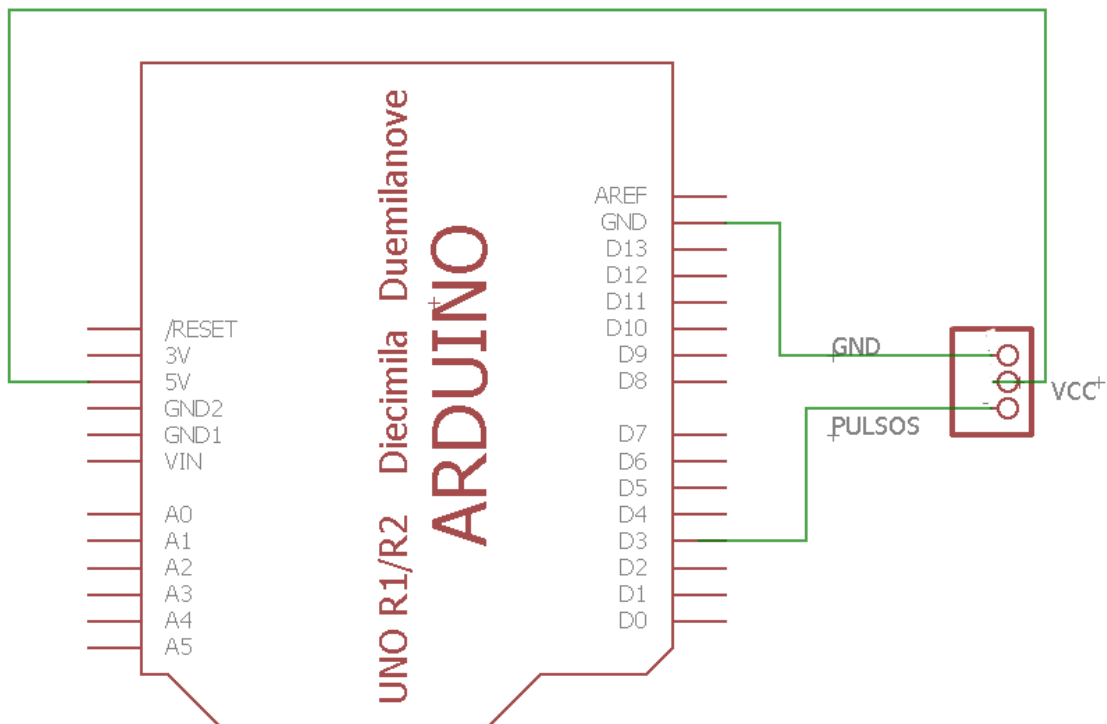


Ilustración 5.1.1.1 Esquema del conexionado del encoder

La forma más precisa de obtener los pulsos es mediante una interrupción que se ejecute cuando un pin cambia de valor. Así, la interrupción se ejecutará cada vez que el encoder mida un pulso.

Se le añade a *setup()* la instrucción que activa la interrupción externa *attachInterrupt(INT 1, pulsos, CHANGE)*.

La función *pulsos* lo único que hará será incrementar un contador.

Cada 100ms restaremos el valor del contador al valor que el contador tenía en la interrupción temporal previa. Para garantizar el tiempo de muestreo se utilizan interrupciones temporales, en cada interrupción se cuentan el número del pulsos entre esta vez y la anterior. Sabiendo cada cuanto se ejecuta la interrupción temporal, podemos saber la velocidad solo contando los pulsos. Así, mediante una interrupción temporal que se ejecuta cada 100ms se obtienen los pulsos por décima de segundo (*pds*). Para ello, previamente, se añade la librería *TimerOne*. Por lo que, se añade de nuevo a *setup()*:

```
Timer1.initialize(100000)  
Timer1.attachInterrupt(func_ISR)
```

Donde la función *func_ISR* se ejecutará así cada 100ms restando al contador el valor que tomó éste en los 100ms anteriores. Si se usa dentro de la función *func_ISR* una variable volátil bandera *flag* que al entrar en la interrupción toma el valor 1 y posteriormente vuelve a tomar el valor 0, se puede trabajar sobre el código principal metiendo la condición *if (flag==1)*.

Tras implementar este código, primero se han medido las revoluciones del motor con paso de pala fijo con el ángulo en el punto que tiene mayor par de arranque. El rango de velocidades que se puede medir es muy pequeño, entre 14 y 16 pulsos cada 100ms (pulsos por décima de segundo, *pds*). Es decir, solo podemos medir 3 velocidades diferentes. Además, se presenta el inconveniente de que los *pds* oscilan mucho. Para solucionarlo se usa un filtro que proporciona los *ps* (pulsos por segundo), cada 100 ms, como suma de las 10 medidas anteriores.

Para obtener los *ps* se programa una pila LIFO (*Last In First Out*) que almacene las 10 últimas medidas de velocidad (*pds*), de forma que en cada periodo de muestreo se almacena una muestra nueva (*Last In*, la última medida obtenida entra en la pila) y sale la medida más antigua la primera que se tomó (*First Out*). No es más que un vector de dimensión 10, que almacena las 10 últimas medidas de velocidad como se ha descrito. En cada periodo de muestreo se añade la medida nueva, se elimina la más antigua, se suman todas las medidas de velocidad contenidas en el vector, y esa es la medida de *ps* deseada.

De esta manera se obtienen velocidades que oscilan entre 140 y 155 pero cada 100ms teniendo un mayor rango para controlar. Si el paso de pala se varia, se observa cómo este rango de *ps* varía entre 0 y 250. Quedando por tanto demostrada la utilidad del paso variable en los aerogeneradores y el motivo de su implementación en este proyecto.

5.2.1 Control de la potencia demandada

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sofisticado sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la de la red (En el caso de España 50 Hz). Por ello, el objetivo es decidir a qué velocidad debe girar el motor y que la acción de control se ajuste de forma automática para que se alcance esa velocidad.

El motor elegido tiene 4 cables de salida que serían dos correspondientes a los polos positivos y dos a los negativos. La salida se conecta a los dos circuitos rectificadores, como se explicó en el capítulo 4. La salida de los circuitos rectificadores se conecta en paralelo a la carga demandada (en este caso leds).

El control de las revoluciones del motor se basa en la fuerza contraelectromotriz inducida por los leds al motor. Este fenómeno es la causa de que al aplicar una demanda de energía (la energía consumida por los leds) al motor (actuando como generador) las revoluciones del motor disminuyan, es decir, frene el motor. De forma que, a medida que aumenta la intensidad que llega a los leds, la fuerza electromotriz inducida sobre el motor será mayor y lo frenará en mayor medida. Así, la acción de control es una señal que regula la intensidad que llega a los leds del circuito.

La señal que regula la intensidad es una señal PWM (Modulación de ancho de pulso) de 8 bits que, en lugar de emitir una señal continua en nuestra salida, emite una serie de pulsos cuya duración se puede modificar, pero con una frecuencia constante, de 490 Hz aproximadamente, de manera que la tensión promedio resultante es directamente proporcional a la duración de estos pulsos dentro el intervalo de nuestro período (determinado por la frecuencia de 490 Hz). Como la señal es de 8 bits se puede tomar valores de 0 a 255, es decir, se tienen un rango de 256 niveles a los que ajustar la señal. La instrucción `analogWrite(pin, value)` permite ajustar el porcentaje de tiempo en la que la señal está en nivel alto.

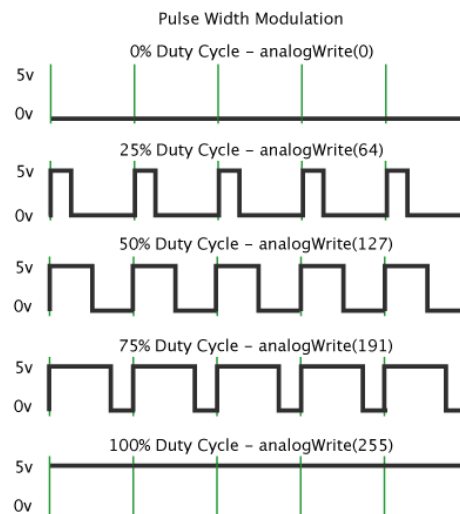


Ilustración 5.2.1.1 -Señal PWM

Por tanto, el objetivo es ajustar la señal PWM, que conectada al *Gate* del MOSFET, le permite actuar como un interruptor, de forma que, en el porcentaje de tiempo que la señal esté en nivel alto el MOSFET permitirá el paso de corriente a los leds. En el que esté en nivel bajo el MOSFET actuará como un circuito abierto y no llegará corriente a los leds. Este proceso se realiza en un intervalo de tiempo muy pequeño (entorno a 2ms) y se repite de forma continua para los diferentes valores que toma la señal PWM. Así, cuanto mayor sea el valor que tome, mayor será el voltaje que llegue a los leds y mayor la caída de revoluciones del motor.

Así, esta señal es la que regula el intervalo de tiempo que el MOSFET actúa como circuito abierto o cerrado. Si hubiese sólo un MOSFET esta señal, como se ha explicado, tendría un rango de control de 0 a 255. Pero, el circuito empleado consta de 3 MOSFET, cada uno de ellos conectado a 2 leds en serie. El emplear 3 circuitos iguales en paralelo permite aumentar el rango de demanda de energía de 0 a 766, o lo que es lo mismo, el rango de revoluciones del motor a controlar. De forma que, cuando sobre los 3 MOSFET la señal PWM tomé el máximo valor (255) la demanda de energía será la máxima (se encenderán todos los leds y serán mínimas las revoluciones del motor) y cuando sobre los 3 MOSFET la señal tomé el valor mínimo (0) ocurrirá o contrario.

Con una única señal PWM, a la que se denomina u_k , se pueden controlar los 3 MOSFET estableciendo tres rangos:

- Si $u_k \in [0, 255]$ se controla la primera serie de leds conectados al MOSFET 1, estando los MOSFET 2 y 3 al mínimo (0).
- Si $u_k \in [256, 511]$ se controla la segunda serie de leds conectados al MOSFET 2, el MOSFET 1 se ajusta al nivel máximo (255) y el MOSFET 3 continúa en el mínimo.

- Si $u_k \in [512, 766]$ se controla la tercera serie de leds conectados al MOSFET 3 y los MOSFET 1 y 2 se ajustan al nivel máximo.
-

Por tanto, la señal u_k varía entre 0 y 766 y en función de su valor se encenderán 2, 4 o 6 leds y la intensidad de estos será mayor o menor. Por ejemplo, si la señal vale 200 sólo se encenderán los dos primeros leds, pero no al máximo de su intensidad.

Así, con tres instrucciones *analogWrite(pin, value)*, una por cada MOSFET conectado a un pin diferente (5,6,11) teniendo en cuenta que sean aquellos que en la placa de Arduino usen el Timer 1, debido a que las interrupciones que se desarrollan posteriormente usan este Timer.

5.7.3 Identificación del sistema

En primer lugar, en un sistema de control de caja negra para determinar el orden del sistema de control, el retardo, la constante de tiempo y la ganancia se realiza un ensayo con entrada escalón unitario y se procede a estudiar la salida. Gráficamente se pueden obtener las características descritas del sistema:

- El orden del sistema viene determinado por la suavidad de la curva de la salida en el momento que se produce la variación en la salida. Si ésta presenta un cambio brusco el sistema es de primer orden, por el contrario, si presenta un cambio suave el sistema es de orden superior.
- El retardo es la cantidad de tiempo desde que se produce una variación en la señal de entrada hasta que se produce una variación en la salida.
- La constante de tiempo es la cantidad de tiempo requerido para que la variable llegue a un 63.2% de su valor en estado estacionario desde que se produce una variación en la entrada.
- La ganancia es la diferencia entre el valor de la salida cuando alcanza el régimen estacionario y el valor inicial, es decir, el incremento que se produce en la señal de salida. En el caso de un ensayo ante escalón no unitario la ganancia k_p viene dada por:

$$k_p = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0}$$

Donde y_1 e y_0 , son el valor de la salida en régimen estacionario después del escalón y antes del escalón respectivamente y u_1 y u_0 son el valor de la entrada antes y después del escalón.

Así en el ensayo ante escalón se obtienen las siguientes gráficas, donde el escalón va de 0 a 600.

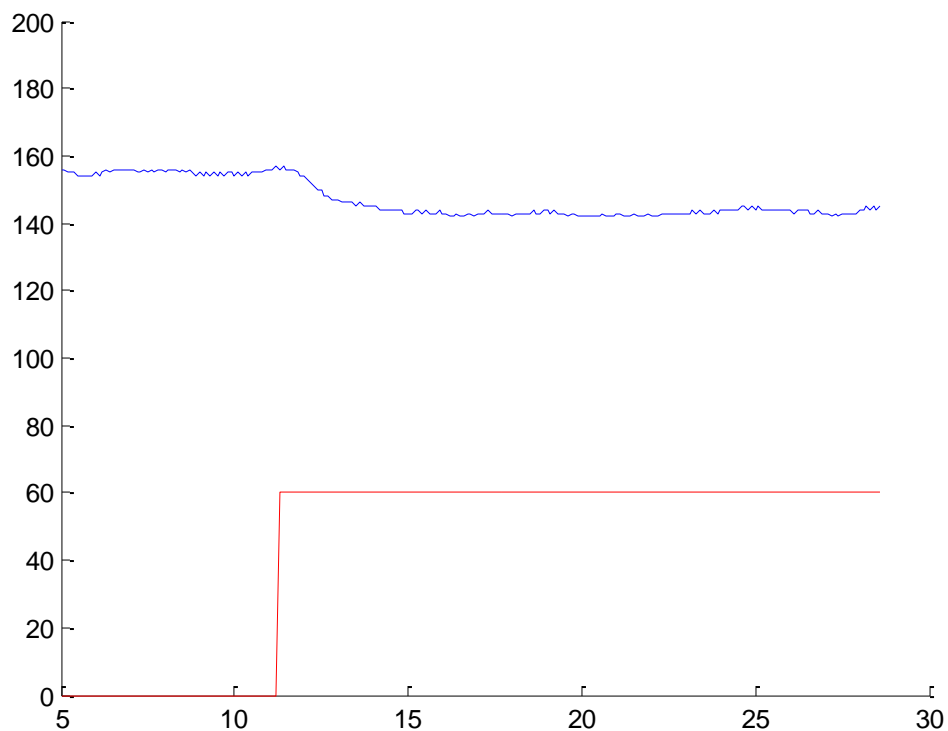


Ilustración 5.3.1.1 - Ensayo ante escalón

En la gráfica anterior la línea roja representa el escalón dividido entre 10 y la línea azul los ps . A continuación, se muestra la gráfica de ps ampliada.

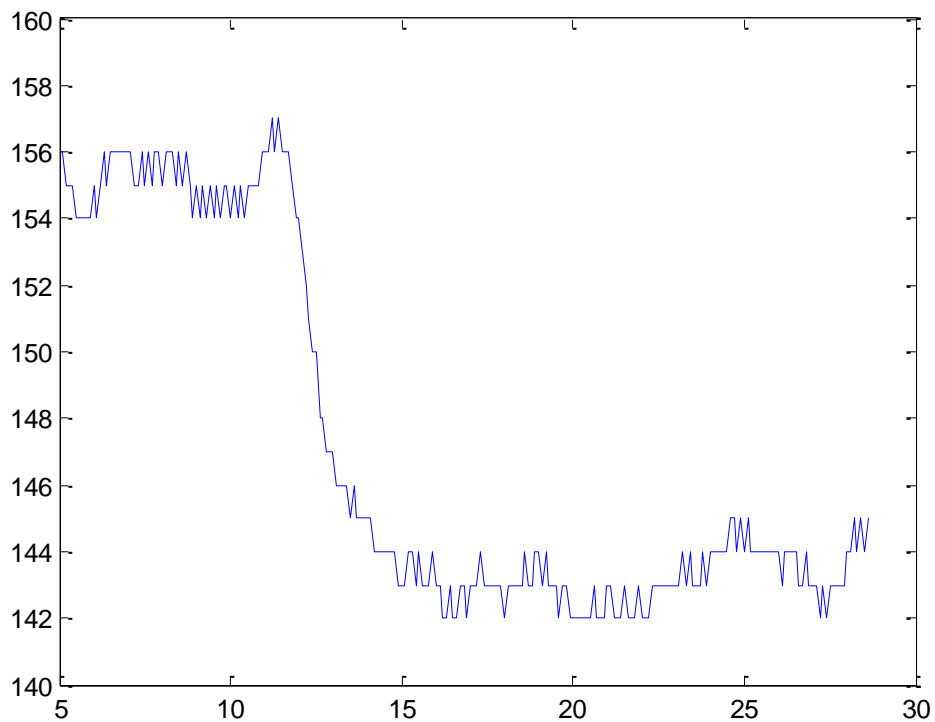


Ilustración 5.3.1.2 – Gráfica de ps ampliada

Por lo que se puede concluir que el sistema de control es de primer orden, la ganancia $k_p = 0.02$ y la constante de tiempo $\tau = 1s$. El tiempo de muestreo considerado previamente (100ms) es válido puesto que es 10 veces menor que la constante de tiempo.

5.1.4 Sistema de control de revoluciones de un motor con paso de pala fijo

Para controlar las revoluciones del motor mediante un sistema de control PI se define una variable *error en el instante k*, e_k , según:

$$e_k = ps_k - ref_k$$

Donde ref_k es la velocidad deseada o de referencia y ps_k es la velocidad real definidos en un instante k. La velocidad de referencia se introduce con un potenciómetro. Esta referencia debe ser un valor del rango de velocidades que se pueden alcanzar (se utiliza *map* para adaptar el valor medido del potenciómetro a al rango de velocidades ps posible). *map* es una función que permite cambiar de escala una variable.

```
int x=analogRead(A1);
int ref=map(x,0,1023,110,195)
```

Donde x es el valor obtenido con lectura analógica del potenciómetro comprendido entre 0 y 1023. El resultado es una ref_k comprendida entre 140 y 155.

La señal de control PWM que regula el voltaje (o intensidad) que llega a los leds definida previamente en la descripción del sistema se calcula de la siguiente manera:

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{i=0} e_i$$

El primer término es el proporcional y el segundo el integrador.

Se visualizan la gráfica con la evolución de dichas magnitudes con Serial Plotter para poder obtener de forma experimental los valores de K_p y K_i .

De esta forma cuanto más grande sea el error, más grande la señal PWM. A medida que se reduce el error se reduce la señal PWM hasta q se alcanza un equilibrio en el que, normalmente, la velocidad está cerca pero no es exactamente la deseada.

K_p y K_i se ajustan por ensayo y error, mientras más grande sea K_p más pequeño es el error respecto a la referencia, más rápido será la evolución de la velocidad, pero, más oscilante. Se busca un valor de K_p en el que el sistema oscile, pero muy poco, con objeto de que sea rápido, con error pequeño, pero sin oscilaciones. Para eliminar el error en régimen permanente se introduce el término integral, donde K_i se ajusta de la misma manera permitiendo reducir el tiempo en el que la velocidad alcanza la referencia. El término integral ha de ser saaturado puesto que sino cuando la señal no sea capaz de alcanzar la referencia en un periodo de tiempo el término integral irá aumentando de forma indefinida y cuando se varíe la referencia aparecerá el *efecto wind-up* por el que la señal presenta un retraso a la hora de alcanzar la nueva referencia.

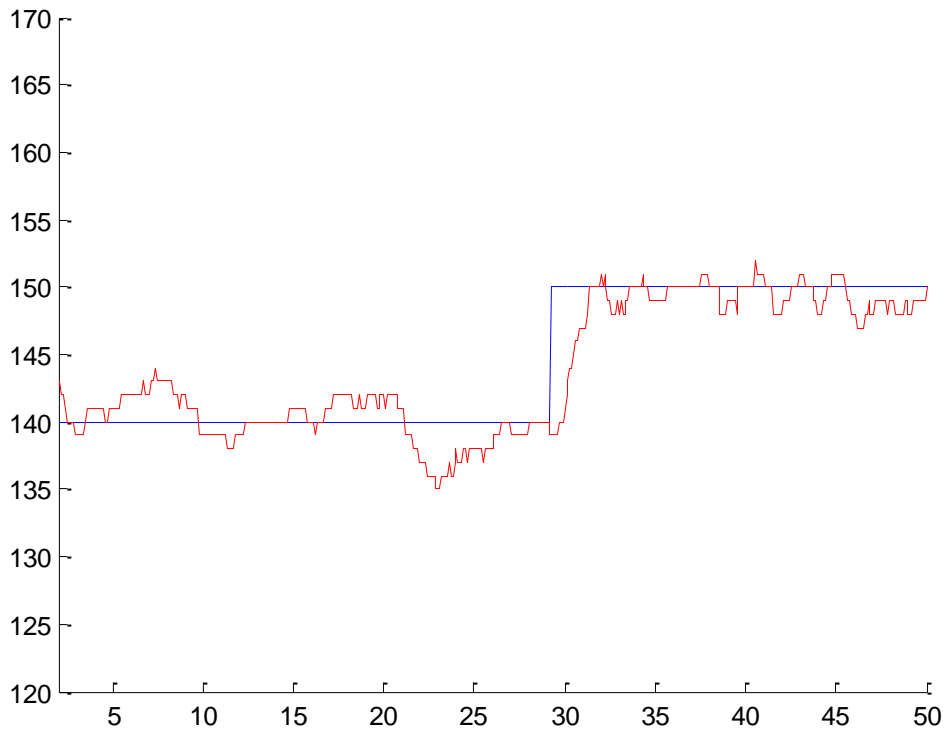


Ilustración 5.1.4.1 -Ensayo ante escalón de sistema de control PI

5.2 Control del paso de pala

La siguiente imagen muestra el conexionado del servo en el equipo.

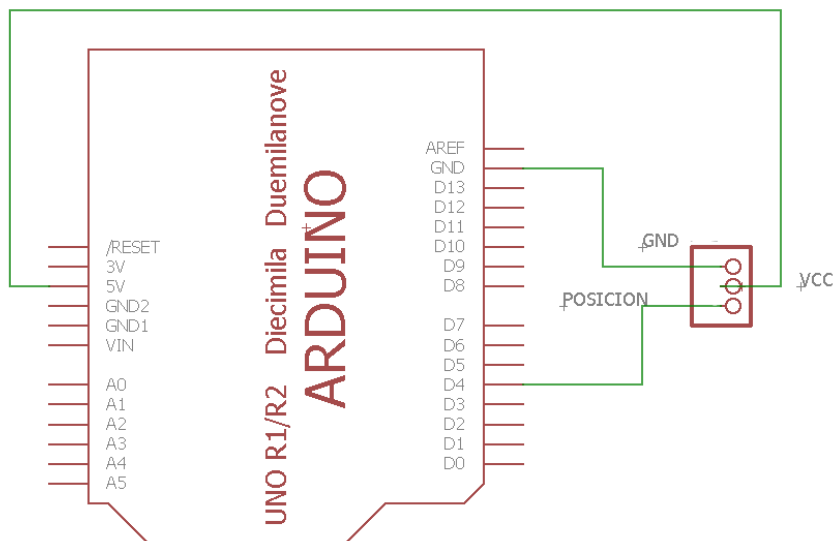


Ilustración 5.2.1 – Esquema del conexionado del servo

El rango de paso de pala que permite el sistema es de $\pm 15^\circ$. Se busca controlar el paso con el objetivo de que para una velocidad de referencia dada (la que se ajusta con el control de revoluciones del motor) el aerogenerador sea capaz de obtener la máxima potencia posible (máximas revoluciones).

El sistema de control de paso de pala se hace mediante un *Look-up table*, es decir, la posición del servo (o lo que es lo mismo, el paso de la pala) viene dada por una interpolación de los 5 datos obtenidos de forma experimental que maximizan la potencia extraída (a una velocidad determinada, controlada por el control PI del apartado anterior).

Para controlar el paso de pala se usa la librería ServoTimer2 debido a la necesidad de utilizar una librería con interrupciones en el Timer2, puesto que el Timer1 se utilizó ya para las interrupciones temporales.

Esta librería permite mediante la instrucción *servoYaw.write(value)* ajustar el valor deseado en el servo. La instrucción debe ser previamente inicializada en el *setup()* mediante *servoYaw.attach(yawPin)* donde el valor del pin *yawPin* debe haber sido declarado previamente *#define yawPin pin*, en este caso el pin 4.

Al igual que en el apartado anterior el valor que toma el servo tiene un rango que viene determinado por el rango de paso de pala del sistema. Este rango ha sido obtenido manualmente y va de 1000 a 1600 con el objetivo de no invertir el paso de la pala puesto que frenaría el aerogenerador.

En primer lugar, para obtener los datos necesarios para el *Lookup table* se han usado dos pulsadores, de manera que, al pulsar uno de ellos el valor del paso aumente y al pulsar el otro disminuya. La variable que controle el paso será *static* (conserva el valor anterior dentro del *loop()*). Se introduce un valor inicial, obtenido experimentalmente como valor óptimo de arranque del aerogenerador de 1260. Posteriormente, se usan los dos pulsadores para variar este valor en ± 20 unidades, ya que, el rango sobre el que se está actuando es grande.

Para poder variar el valor del paso se declaran dos variables *p1* y *p2*, asociadas a los estados del pulsador 1 y 2 respectivamente, y se usan dos instrucciones *digitalRead(pin)* para obtener el estado de cada pulsador. Se declaran dos variables *static*, una para cada pulsador, *p1a* y *p2a*, de forma que éstas toman el valor del pulsador en el anterior ciclo de *loop()*, es decir, el valor anterior de *p1* y *p2*. Se pueden considerar dos condiciones que hacen cambiar el valor del paso:

- Si $p1 = 0$ y $P1a = 1$ quiere decir que el pulsador uno se ha pulsado, por tanto, si incrementa el valor del paso (en el código la variable que define el paso se llama *val*), $val = val + 20$
- Si $p2 = 0$ y $P2a = 1$ quiere decir que el pulsador uno se ha pulsado, por tanto, si incrementa el valor del paso: $val = val - 20$

Teniendo en cuenta que el valor de *val* tiene un rango de 1000 a 1600.

La tabla obtenida es la siguiente:

ps (pulsos por segundo)	val (posición del servo)
140	1260
183	1360
200	1420
220	1440
252	1460

Este sistema de control no actúa de forma ideal, ya que el sistema de variación del paso de pala ofrece una resistencia mecánica muy elevada y altas vibraciones. Pero, se comprueba como al variar el paso de la pala las revoluciones del motor aumentan de forma considerable.

Las palas debido al empuje generado por el aire tienden a cambiar el paso aumentando el ángulo de ataque el sistema de regulación del paso de pala busca mantener el paso en el ángulo óptimo, la fricción aparece al actuar este.

5.3 Sistema de control de revoluciones de un motor con paso de pala variable

Por último, se añade el efecto de cambio de paso de pala mediante el sistema de *Lookup table* explicado previamente.

Se observa como las velocidades alcanzadas son mayores, pero el sistema no actúa de la forma adecuada. Es un sistema muy inestable debido a que a medida que aumenta la velocidad aumentan las vibraciones y, a su vez, la fricción tiene un papel muy importante. Gran parte de la energía generada se pierde en la fricción, no satisfaciendo la demanda energética esperada para mayores velocidades.

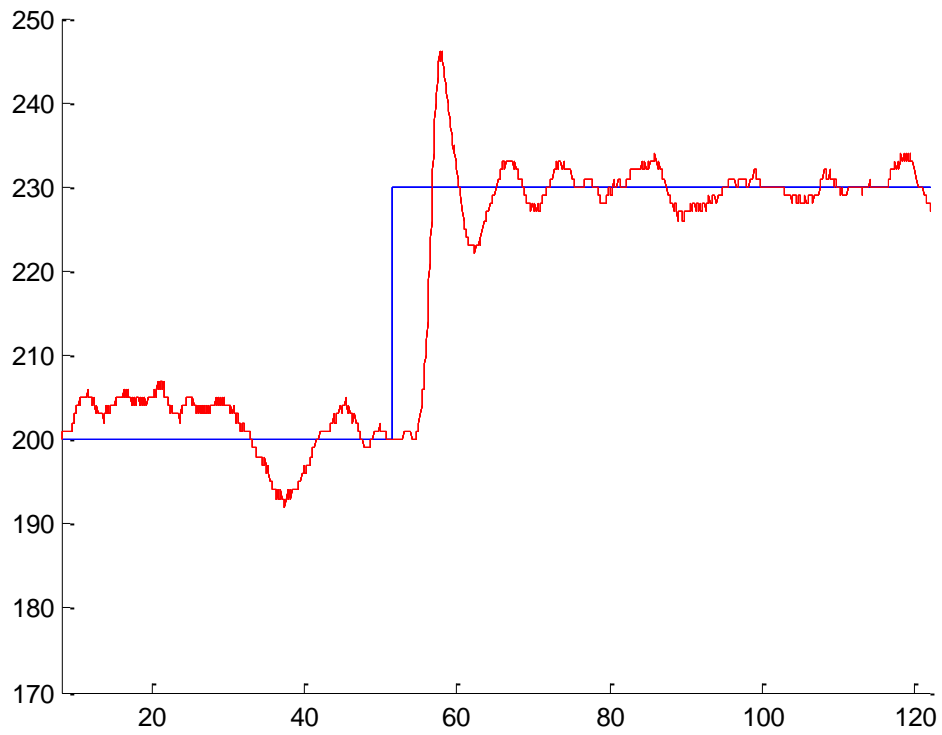


Ilustración 5.2.1.1 – Ensayo ante escalón en el sistema con control PI y Lookup table

6 PRESENTE Y FUTURO DEL PROYECTO

Una vez se ha terminado de exponer los resultados de la aplicación, se va a proceder, por un lado a explicar en detalle los posibles desarrollos futuros, es decir aplicaciones que se podrían realizar a partir de este proyecto. Por otro lado, en la parte final de este capítulo se definen las limitaciones que se han encontrado a la hora de llevar a cabo el proyecto.

6.1 Desarrollos Futuros

En el desarrollo del proyecto se ha podido observar como la estructura del equipo no es todo lo estable que se desearía produciendo muchas vibraciones y ruido. Ésto, como se refleja en esta memoria, provoca que la respuesta del sistema de control sea muy oscilante y ruidosa.

Por otro lado, como se ha explicado, queda demostrado que, con el sistema de paso variable se alcanzan mayores revoluciones del motor, pero debido a la alta fricción que este produce el resultado final es negativo.

A su vez, el rango a controlar de frecuencia de la corriente podría ser mayor, para ello habría que introducir más circuitos de leds en paralelo que generasen mayor caída de potencial en el motor. En este proyecto no se han introducido más porque no se disponía de más pines en la placa de Arduino Uno, si se usase una Arduino Mega se tendrían más.

Por tanto, se puede concluir, con diversas posibilidades de continuación en este proyecto, tanto de mejorar la calidad de la estructura y su estabilidad, como implementar un sistema de cambio de paso de pala eficiente, además de, aumentar la demanda de carga eléctrica.

6.2 Limitaciones del Proyecto

En el montaje de un equipo siempre hay que enfrentarse a diversas limitaciones y buscar la estructura más óptima para el objetivo del proyecto. En este proyecto se han encontrado, como se ha explicado a lo largo de la memoria, diversas limitaciones a la hora de la búsqueda y diseño de los componentes. Las principales limitaciones de este proyecto son:

- El coste del equipo, ya que, se busca construir un aerogenerador con materiales reciclados.
- En el diseño de este equipo la fuente de viento a la que se somete el aerogenerador es un ventilador, por lo que la velocidad es siempre constante. Además, no se disponía de un tubo de Pitot para medirla.
- La obtención de palas de aerogenerador de paso variable no es fácil y su diseño tampoco lo es pues depende de las condiciones del viento para las que el aerogenerador esté diseñado.

ANEXO DE SCRIPTS

A continuación, se muestran los distintos códigos de los que se hace referencia en el Capítulo 5:

- Identificación del sistema:

```
#include <TimerOne.h>
#include <ServoTimer2.h>
#define yawPin 4
volatile long int contador=0;
volatile int vector[]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
volatile int ps=0;
volatile int flag=0;
ServoTimer2 servoYaw;
int potpin=0;
const int led1=5; //pin del transistor
int intensidad;
const int led2=6; //pin del transistor
const int led3=11; //pin del transistor
int i1;
int i2;
int i3;
int pulsador1=7; //
int pulsador2=8;
int p1;
int p2;
volatile int i;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  servoYaw.attach(yawPin);
  Timer1.initialize(100000);
  Timer1.attachInterrupt(func_ISR);
  pinMode(3,INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(1, pulsos ,CHANGE);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(led1,OUTPUT);
  pinMode(led2,OUTPUT);
  pinMode(led3,OUTPUT);
  pinMode(pulsador1,INPUT);
  pinMode(pulsador2,INPUT);
}
```

```
void loop() {

    static int p1a=0;
    static int p2a=0;
    static float ei=0;
    float kp=40;
    float ki=3;
    float e;
    int u;
    static int val=1260;
    static float t=0;
    static int intensidad=0;

    p2=digitalRead(pulsador2);
    if(flag==1)
    {
        t=t+0.1;
        p1=digitalRead(pulsador1);
        if(p1==0 && p1a==1)
        {
            intensidad=600;
        }
        p1a=p1;
        i1=0;
        i2=0;
        i3=0;
        if (intensidad<=255)
        {
            i1=intensidad;
        }
        if (intensidad>255 && intensidad<=511)
        {
            i1=255;
            i2=intensidad-255;
        }
        if(intensidad>511)
        {
            i1=255;
            i2=255;
        }
    }
}
```

```

i3=intensidad-511;

}
analogWrite(led1,i1);
analogWrite(led2,i2);
analogWrite(led3,i3);
Serial.print(t);
Serial.print(",");
Serial.print(ps);
Serial.print(",");
Serial.println(intensidad);
servoYaw.write(val);
flag=0;
}
}

```

- Sistema de control de revoluciones de un motor con paso de pala fijo

```

#include <TimerOne.h>

#include <ServoTimer2.h>

#define yawPin 4

volatile long int contador=0;

volatile int vector[]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};

volatile int ps=0;

volatile int flag=0;

ServoTimer2 servoYaw;

int potpin=0;

int val;

int y;

const int led1=5; //pin del transistor

int z;

int intensidad;

const int led2=6; //pin del transistor

const int led3=11; //pin del transistor

int i1;

```

```
int i2;

int i3;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  servoYaw.attach(yawPin);
  Timer1.initialize(100000);
  Timer1.attachInterrupt(func_ISR);
  pinMode(3,INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(1, pulsos ,CHANGE);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(led1,OUTPUT);
  pinMode(led2,OUTPUT);
  pinMode(led3,OUTPUT);
}

void loop() {
  if(flag==1)
  {
    z = analogRead(1);
    intensidad = map(z, 0, 1023, 0, 766);
    i1=0;
    i2=0;
    i3=0;
    if (intensidad<=255)
    {
      i1=intensidad;
    }
    if (intensidad>255 && intensidad<=511)
    {
```



```
i1=255;
i2=intensidad-255;
}
if(intensidad>511)
{
i1=255;
i2=255;
i3=intensidad-511;
}
analogWrite(led1,i1);
analogWrite(led2,i2);
analogWrite(led3,i3);
y = analogRead(potpin);
val=1000;
Serial.print(ps);
servoYaw.write(val);
flag=0;
}
}
```

- Sistema de control de revoluciones de un motor con paso variable: se le añade al código anterior

```
if(ps<140)
{
val=1260;
}
if(ps>140)
{
val=interp(ps);
}
```

- Los códigos de las funciones incluidas en los scripts previos son:

1. **func_ISR:**

```
void func_ISR()
{
    static long int conta=0;

    for(int p = 9; p >= 1; p --)
    {
        vector[p]=vector[p-1];
    }

    vector[0]=contador-conta;

    conta=contador;

    ps=0;

    for(int i = 0; i <= 9; i += 1)
    {
        ps=ps+vector[i];
    }

    flag=1;
}
```

2. **interp:**

```
int interp (int ps)
{
    int yr[5]={1260,1360,1420,1440,1460};
    int pr[5]={140,183,200,220,252};

    int y;

    i=0;

    float m;

    int val;

    if(ps>=252)
        ps=251;
```

```
else
{
while(ps>=pr[i])
{
i++;
}
i--;
m=(float)(yr[i+1]-yr[i])/(pr[i+1]-pr[i]);
val=m*(ps-pr[i])+yr[i];
return(val);
}
}
```

3. pulsos:

```
void pulsos()
{
contador++;
}
```

REFERENCIAS

- [1] http://opex-energy.com/eolica/historia_aerogeneradores.html
- [2] Proyecto fin de carrera “Control de un aerogenerador”, Jesús Salinas Martínez
- [3] Proyecto fin de carrera “Análisis, Modelado y Simulación de un Aerogenerador de Velocidad variable basado en Máquina Doblemente Alimentada”, Miguel Antonio Jiménez Romero
- [4] <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/index.htm>
- [5] Proyecto fin de carrera “Suministro eléctrico de una masía mediante sistemas renovables”, Javier Morillo López
- [6] https://hobbyking.com/es_es/8-9-inch-variable-pitch-propeller-setup-w-linkage-assembly-and-mount.html
- [7] <https://grabcad.com/>
- [8] “Uso de interrupciones en Arduino. Control de la velocidad de un ventilador de una cpu.” Curso de Arduino. Dpto. de Ingeniería de sistemas y automática, Universidad de Sevilla

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

- Ilustración 3.1.1- Estructura de los primeros molinos de viento
- Ilustración 3.1.2 - Molino de viento común en Castilla-La Mancha
- Ilustración 3.1.3 - Molino multipala de bombeo de agua
- Ilustración 3.1.4 -Paisaje de aerogeneradores offshore
- Ilustración 3.2.1- Clasificación de los aerogeneradores
- Ilustración 3.3.1 - Componentes de un aerogenerador
- Ilustración 3.4.1 – Volumen de aire que atraviesa un aerogenerador
- Ilustración 3.4.2 - Curva de la relación $\lambda - C_p$
- Ilustración 4.1.1.1-Sistema de palas de paso variable comprado a través de Hobbyking [6]
- Ilustración 4.1.1.2 - Palas con añadido de papel de acetato
- Ilustración 4.1.1.3 -Pala realizada con impresión 3D
- Ilustración 4.1.1.4.-Diseño del enganche al sistema de cambio de paso de pala
- Ilustración 4.1.2.1 -Motor MITSUMI M35SP-11NK
- Ilustración 4.1.2.2 -Motor de dos fases.
- Ilustración 4.1.2.3 – Motor DC de voltaje de trabajo 6V
- Ilustración 4.1.3.1- Tipos de encoder óptico
- Ilustración 4.1.3.2 - Encoder magnético
- Ilustración 4.1.3.3 – Encoder empleado en el montaje
- Ilustración 4.1.4.1 -Servo SM S2309S
- Ilustración 4.1.4.2 – Montaje del servo en el equipo
- Ilustración 4.2.1- Estructura de un circuito rectificador
- Ilustración 4.2.2 – Esquema del circuito
- Ilustración 4.2.2 -Montaje del circuito en una protoboard
- Ilustración 4.2.3 -Montaje completo del equipo
- Ilustración 5.1.1.1 Esquema del conexionado del encoder
- Ilustración 5.2.1.1 -Señal PWM
- Ilustración 5.3.1.1 - Ensayo ante escalón
- Ilustración 5.3.1.2 – Gráfica de ps ampliada
- Ilustración 5.1.4.1 -Ensayo ante escalón de sistema de control PI
- Ilustración 5.2.1 – Esquema del conexionado del servo
- Ilustración 5.2.1.1 – Ensayo ante escalón en el sistema con control PI y Lookup table