



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR ELECTRÓNICO PARA  
MOTORES BLDC**



**Memoria**

**Autor/a:** Marc Sola García  
**Director/a:** Alejandro Rolán Blanco  
**Co-Director/a:** Joaquim Blesa Izquierdo  
**Convocatoria:** junio 2022





## Resumen

En los últimos años los motores de corriente continua con escobillas han comenzado a estar obsoletos debido a sus bajas prestaciones y a la necesidad de mantenimiento de los mismos, siendo destinados a utilidades muy concretas y de poca exigencia, por el contrario, los motores sin escobillas de corriente continua (BLDC), han pasado de estar presentes únicamente en el ámbito industrial a formar parte cada vez más del día a día del usuario común, naciendo así la necesidad de poder controlarlos de una manera sencilla y económica.

Este hecho motiva el desarrollo del presente documento que tiene como objetivo la comprensión y el desarrollo de la electrónica de control para gobernar un motor BLDC con sensores de posición, el control de la misma para lograr un desempeño óptimo y la adquisición de los principales datos necesarios para modelizar su comportamiento en carga.

Para ello se dispone de una bancada de pruebas que incorpora un motor BLDC que, mediante una reductora con relación de transmisión 7:1 transmite el movimiento a un freno magnético variable, el cual será también controlado electrónicamente.

## Resum

En els últims anys els motors de corrent continu amb escombretes han començat a estar obsolets a causa de les seves baixes prestacions i la necessitat de manteniment, sent destinats a utilitats molt concretes i de poca exigència, per contra els motors sense escombretes de corrent continu (BLDC), han passat de ser presents únicament a l'àmbit industrial a formar part cada vegada més del dia a dia de l'usuari comú, i així, ha nascut la necessitat de poder controlar-los d'una manera senzilla i econòmica.

Aquest fet motiva el desenvolupament del present document que té com a objectiu la comprensió i el desenvolupament de l'electrònica de control per governar un motor BLDC amb sensors de posició, el control de la mateixa per aconseguir un desenvolupament òptim i l'adquisició de les principals dades necessàries per modelitzar el seu comportament en càrrega.

Es disposa d'una bancada de proves que incorpora un motor BLDC que, mitjançant una reductora amb relació de transmissió 7:1, transmet el moviment a un fre magnètic variable, el qual serà també controlat electrònicament.

## **Abstract**

Recently, brushed DC motors have become obsolete due to their low performance and their need for maintenance, being intended for very specific and low-demand uses. On the contrary, brushless DC motors (BLDC) have gone from being present only in the industrial field to becoming an increasingly part of the common user's daily life by giving rise to the need to be able to control them in a simple and economical way.

This fact motivates the development of this document that aims to understand and develop the control electronics to govern a BLDC motor with position sensors, its control to achieve optimal performance and the acquisition of the main necessary data to model its behavior under load.

For this, a test bench is available that incorporates a BLDC motor that, through a reducer with a 7:1 transmission ratio, transmits the movement to a variable magnetic brake, which will be controlled electronically too.



## **Agradecimientos**

Agradezco a mi director Alejandro Rolán Blanco y a mi co-director Joaquim Blesa Izquierdo la confianza depositada en mí durante la realización de este trabajo, donde todas las propuestas han sido bienvenidas y las complicaciones resueltas, siempre de forma cercana y eficaz.

Llegar hasta aquí no habría sido posible sin la suerte de haber topado por el camino con profesores apasionados por sus materias, a los que las horas lectivas no les son suficientes: Jordi, Julio y José Luis, entre otros. Gracias a todos por haber formado parte de este camino y por haberme contagiado una pequeña parte de vuestra pasión.

Esta aventura no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mis amigos, que siempre han estado ahí cuando les he necesitado, aportando ese granito de arena que me ha permitido siempre decantar la balanza hacia el esfuerzo y el trabajo en los momentos de desánimo.

La realización del presente trabajo ha sido una experiencia en la que se ha invertido mucho cariño, tiempo, esfuerzo y constancia. El resultado de la pasión que siento por la ingeniería y sus aplicaciones, pasión que he podido desarrollar desde siempre gracias al esfuerzo llevado a cabo por mi familia para proporcionarme los medios que me han permitido formarme, sintiéndome siempre acompañado de un sentimiento de apoyo y confianza ciega que me ha dado el impulso necesario para superar las dificultades que he encontrado en el camino hasta este punto, por todo ello, les agradezco de corazón la oportunidad que me han brindado.





## Glosario

*BLDC*: Brushless DC motor o motor de corriente continua sin escobillas.

*CAD*: Diseño asistido por ordenador.

*Dinamo tacométrica*: Sensor generador que proporciona una tensión DC proporcional a la velocidad del giro de su eje.

*Drivers*: Circuito que controla a otro elemento, normalmente amplifica una señal.

*LED*: Light-emitting diode o diodo emisor de luz, componente empleado para señalización.

*Microcontrolador*: Componente digital cuyas entradas y salidas pueden ser programadas.

*Open source*: Accesible y manipulable por el público.

*Optoacoplador*: Componente que separa dos señales y puede emplearse como amplificador.

*Pad térmico*: Elemento que proporciona aislamiento eléctrico y conducción térmica simultáneamente.

*PCB*: Printed circuit board o placa de circuito impreso.

*Protoboard*: Placa de pruebas para realizar circuitos electrónicos de manera rápida.

*Pulldown*: Forzado a negativo o valor lógico bajo.

*Pullup*: Forzado a positivo o valor lógico alto.

*Sensored*: Sistema que emplea sensores de posición

*Sensorless*: Sistema que no emplea sensores de posición.

*Shunt*: Sensor empleado para medir corriente.

*String*: Variable de secuencia de caracteres.

*THT*: Through-Hole Technology o tecnología de agujero pasante.

*TTL*: Lógica transistor a transistor.



# Índice

RESUMEN .....	1
RESUM.....	2
ABSTRACT.....	3
AGRADECIMIENTOS .....	5
GLOSARIO.....	7
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1. NECESIDAD .....	2
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	3
1.3. ALCANCE DEL TRABAJO .....	4
<b>2. EL MOTOR DE C.C CON ESCOBILLAS.....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	5
2.3. CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR DE C.C.....	6
2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MOTORES DC CON ESCOBILLAS.....	8
<b>3. LOS MOTORES BLDC .....</b>	<b>9</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	9
3.2. CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR BLDC.....	9
3.3. CONTROL DE LOS MOTORES BLDC .....	12
3.3.1. <i>Interacción de las bobinas estáticas con el rotor de imanes permanentes.....</i>	<i>12</i>
3.3.2. <i>Determinación de la posición del rotor de imanes permanentes .....</i>	<i>14</i>
3.3.2.1. Sensorless.....	14
3.3.2.2. Sensored .....	17
3.3.3. <i>Conmutación en 6 pasos.....</i>	<i>19</i>
3.3.3.1. Circuito ondulator o inversor .....	19
3.3.3.2. Técnicas de regulación de la velocidad de giro.....	21
<b>4. DESARROLLO PRÁCTICO .....</b>	<b>24</b>
4.1. HARDWARE SUMINISTRADO .....	24
4.1.1. <i>El motor .....</i>	<i>25</i>
4.1.2. <i>La reductora.....</i>	<i>25</i>
4.1.3. <i>El freno magnético.....</i>	<i>27</i>
4.2. HARDWARE DESARROLLADO.....	30
4.2.1. <i>PCB de potencia .....</i>	<i>30</i>
4.2.1.1. Diagrama de bloques .....	31
4.2.1.2. Esquema principal de la placa de potencia.....	31
4.2.1.3. Los transistores MOSFET y su control.....	32

4.2.1.4.	Diseño electrónico .....	36
4.2.1.5.	Pruebas electrónicas parciales.....	37
4.2.1.6.	Cálculo y diseño del disipador de calor.....	38
4.2.1.7.	Diseño de la PCB en programa CAD.....	42
4.2.1.8.	Fabricación de la PCB .....	46
4.2.2.	<i>PCB de acondicionamiento de sensores hall</i> .....	51
4.2.2.1.	Diseño de la PCB .....	51
4.2.2.2.	Fabricación de la PCB.....	53
4.2.3.	<i>PCB controladora del freno magnético</i> .....	54
4.2.3.1.	Diagrama de bloques .....	54
4.2.3.2.	Diseño de la PCB .....	54
4.2.3.3.	Fabricación de la PCB.....	55
4.3.	SISTEMA.....	56
4.3.1.	<i>Magnitudes a monitorizar</i> .....	56
4.3.2.	<i>Selección y explicación de dispositivos y elementos</i> .....	56
4.3.2.1.	Microcontrolador y tarjeta de adquisición de datos .....	56
4.3.2.2.	Sensores .....	57
4.3.3.	<i>Diagrama de bloques</i> .....	59
4.3.3.1.	Microcontrolador .....	63
4.3.3.2.	PCB de potencia .....	63
4.3.3.3.	Sensor de temperatura.....	63
4.3.3.4.	Shunt .....	63
4.3.3.5.	Amperímetros.....	63
4.3.3.6.	Osciloscopio .....	63
4.3.3.7.	Motor BLDC.....	63
4.3.3.8.	PCB acondicionado de los sensores de efecto hall.....	64
4.3.3.9.	Dinamo tacométrica .....	64
4.3.3.10.	PCB Freno.....	64
4.3.3.11.	Freno magnético .....	64
4.3.3.12.	Fuente DC.....	64
4.3.3.13.	Tarjeta de adquisición de datos .....	64
4.3.3.14.	Carga .....	64
4.3.3.15.	Ordenador.....	64
4.3.3.16.	Base de datos .....	64
4.3.4.	<i>Programación del microcontrolador</i> .....	65
4.3.5.	<i>Programación en Labview</i> .....	69
4.3.5.1.	La interfaz de usuario.....	69
4.3.5.2.	Consideraciones previas sobre el programa principal.....	72
4.3.5.3.	Programa principal.....	74
4.3.6.	<i>Datos obtenidos durante un ensayo</i> .....	81
4.3.7.	<i>Resultados experimentales</i> .....	82
4.3.8.	<i>Componentes empleados</i> .....	84
4.4.	MEDICIONES DEL SISTEMA EN FUNCIONAMIENTO .....	85
<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL.....</b>		<b>89</b>

<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>91</b>
<b>PLANIFICACIÓN .....</b>	<b>94</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>97</b>







# 1. Introducción

A continuación, se detallarán los diferentes aspectos generales del trabajo.

## 1.1. Necesidad

Hasta hace pocos años los motores BLDC eran muy costosos económicamente, de modo que su uso quedaba comprendido a determinados usuarios profesionales donde, en conjunto con otros elementos, se emplean comúnmente a modo de servo electromecánico, brindando una gran variedad de aplicaciones gracias a poder ser controlado de forma precisa, entre ellas destacan los posicionadores y brazos robóticos.

Por lo tanto, en sectores más básicos, donde los requerimientos son inferiores, se empleaban motores de corriente continua para realizar pequeños procesos, normalmente en equipos de baja potencia alimentados mediante baterías como por ejemplo las herramientas manuales.

Los motores con escobillas presentan diversos problemas, entre ellos, y dejando de lado el rendimiento, quizá el más relevante sea el hecho de que necesitan mantenimiento periódico, debido a que las escobillas se desgastan con el uso, llegando al punto de tener que sustituirlas, más adelante se tratará este tema en detalle.

Los motores BLDC han sufrido una importante demanda ya que son extensamente empleados en muchos sectores como por ejemplo el de las herramientas portátiles o el modelismo.

Este hecho ha comportado la necesidad de desarrollar electrónicas de control básicas y de bajo coste, las cuales son desarrolladas de forma privada y usualmente no comparte sus estudios de forma abierta, es por ello que surge la necesidad de este trabajo, donde se parte de cero, comenzando únicamente con un motor el cual se tratará de controlar.

## 1.2. Objetivos del trabajo

En general este trabajo plantea en su inicio un objetivo claro: conseguir controlar un motor BLDC con hardware propio.

Adicionalmente, a lo largo del desarrollo del trabajo los objetivos se adaptarán de acorde a los progresos realizados.

A continuación, se listan los distintos objetivos planteados inicialmente para este trabajo:

- Comprensión de los equipos proporcionados
- Investigación acerca de la electrónica de potencia tras los drivers para motores BLDC
- Selección de componentes
- Pruebas sobre *proto-board* de la electrónica de potencia
- Diseño de la PCB de potencia
- Construcción de la PCB de potencia
- Programación del control de una PCB de potencia en lazo abierto
- Análisis térmico de la disipación energética
- Diseño y construcción de un disipador de calor
- Pruebas en *proto-board* del circuito acondicionador de los sensores de posición
- Diseño de una PCB de acondicionamiento para los sensores de posición
- Construcción de una PCB de acondicionamiento para los sensores de posición
- Programación del control del motor en lazo cerrado
- Pruebas sobre *proto-board* de la electrónica para el control del freno magnético
- Diseño de una PCB de control del freno magnético
- Construcción de la PCB de control del freno magnético
- Adquisición de datos de funcionamiento del motor en carga
- Interfaz de control en tiempo real

### 1.3. Alcance del trabajo

Como se ha comentado anteriormente, el alcance de este trabajo es el disponer de una bancada de pruebas completa para un motor BLDC con carga de trabajo variable, pudiendo así realizar ensayos, modelos y demás aspectos propios de este tipo de motores de corriente continua, con objetivo de promover la investigación y el flujo de conocimiento acerca de estas máquinas eléctricas.

Facilitando así el desarrollo de nuevos hardwares de carácter *open source* que, en definitiva, enriquezcan a la comunidad.

## 2. El motor de C.C con escobillas

En este apartado se expondrá la alternativa al tipo de motores que trata el trabajo y se mencionarán de manera resumida sus inconvenientes, de modo que en próximos apartados queden justificados estos aspectos en el motor *BLDC*.

### 2.1. Introducción

Los motores de corriente continua con escobillas, nacen de la necesidad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica de un modo sencillo, donde el control de los mismos radica en conectar o no la fuente de alimentación y variar el nivel de tensión para conseguir así controlar la velocidad del eje de la máquina.

### 2.2. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un motor de corriente continua tradicional radica en el magnetismo, según la ley de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \cdot \vec{B} \quad (\text{Ec. 1})$$

Si un conductor, sometido a un campo magnético, es atravesado por una corriente eléctrica éste experimenta una fuerza.

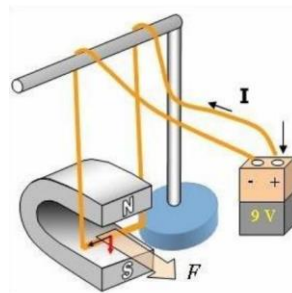


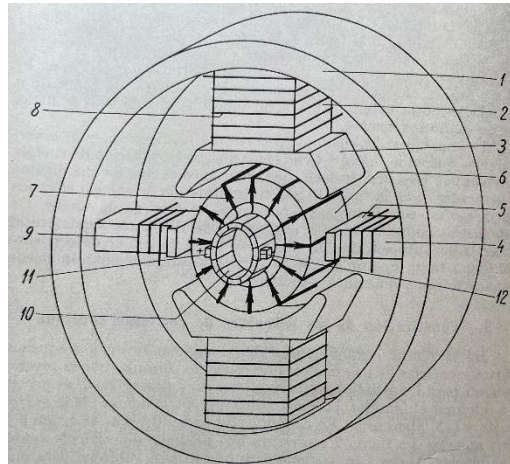
Figura 1. Péndulo de Lorentz. Fuente:[38]

En la figura anterior podemos observar el efecto descrito anteriormente.

De modo que, partiendo de este fenómeno, es posible construir una máquina que lo aproveche para desarrollar trabajo mecánico, pudiendo así finalmente convertir la energía eléctrica en energía mecánica, con sus consiguientes pérdidas energéticas en el proceso.

## 2.3. Construcción de un motor de C.C

Generalmente los motores CC siguen un mismo patrón de construcción similar entre los distintos tipos. A continuación, se muestra una figura en la que están representadas esquemáticamente las partes esenciales de una máquina de corriente continua:



*Figura 2. Ilustración de las partes de una máquina de corriente continua. Fuente: [1]*

(1 a 5) El inductor o estator: es la parte que se mantiene estática y en la que se crea el campo magnético de excitación por medio de imanes permanentes o electroimanes (8).

(6) El rotor: se encuentra unido al eje y está ubicado en el interior del estator, es la parte que rota dentro de él. Contiene las bobinas (7) por las que circula la corriente y que experimentan una fuerza al interactuar con el campo magnético del estator, desarrollando finalmente un par en el eje del motor.

(10) El colector de delgas: puesto que en el momento de la rotación en el que la bobina alimentada se encuentra a  $90^\circ$  de las líneas de campo de excitación, esta no experimenta fuerza, es necesario incluir más de una bobina, las cuales se agrupan en pares de polos y están desfasadas  $90^\circ$  entre ellas. Los extremos de estas bobinas están conectados a las delgas, las cuales friccionan con las escobillas para alimentar el devanado.

(11 y 12) Las escobillas: son las encargadas de transferir la energía eléctrica a las bobinas del rotor, de modo que friccionan sobre el colector de delgas, alimentando así en cada momento la bobina adecuada.

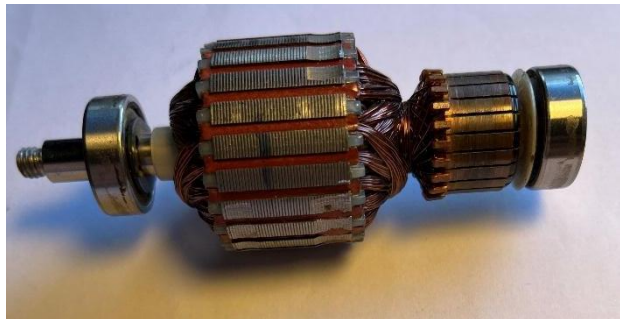
(Entre 3 y 6) El entrehierro: para permitir la rotación, el estator y el rotor no pueden estar unidos, el espacio libre entre estas dos partes es el entrehierro y supone una pérdida ya que el campo magnético tiene que pasar de un medio ferroso, donde la permeabilidad magnética es alta, al aire donde la

permeabilidad es baja, es por ello que el entrehierro siempre ha de ser lo más pequeño posible dentro de los límites mecánicos del motor.

En la figura siguiente podemos observar un motor de corriente continua industrial de la casa ABB, cabe destacar el calentamiento de este tipo de motores es elevado, debido a los arcos eléctricos que se producen en el colector de delgas durante las sucesivas conmutaciones, llegando al punto de que al sobrepasar determinadas potencias es necesario incorporar ventilación forzada auxiliar como en el modelo de la figura.



*Figura 3. Motor corriente continua industrial con refrigeración externa forzada. Fuente:[2]*



*Figura 4. Rotor de un motor eléctrico con escobillas. Fuente [Propia]*

En la figura anterior podemos ver el rotor de una batidora eléctrica, observando en detalle el colector de delgas podemos ver el desgaste sufrido durante su vida útil debido al continuo rozamiento de las escobillas y los arcos eléctricos.

---

## 2.4. Ventajas y desventajas de los motores DC con escobillas

A continuación, se tratará de hacer un pequeño resumen de las principales características de este tipo de motores, comenzando con sus ventajas.

Ventajas:

- Facilidad de construcción.
- Económicos.
- Fácil control.
- Disponible en una gran variedad de tamaños.

Desventajas:

- Necesitan mantenimiento.
- Bajo rendimiento provocado por la fricción de las escobillas.
- Elevado calentamiento, necesitan refrigeración forzada auxiliar.
- No aptos para aplicaciones de posicionamiento.
- Producen interferencias electromagnéticas (EMIS) debido a los arcos eléctricos resultantes de la conmutación.

## 3. Los motores BLDC

### 3.1. Introducción

Los motores BLDC o motores sin escobillas de corriente continua nacen de la necesidad de disponer de motores más eficientes, con mayor control y, en general, mejores características que sus predecesores, los motores DC con escobillas.

Se trata de motores síncronos con rotor de imanes permanentes, por lo que, a diferencia de los motores trifásicos habituales, estos no sufren deslizamiento.

Para ello, este tipo de motores requieren de una electrónica de control o ESC (electronic speed controller) la cual convierte la fuente de energía DC a la requerida por el motor.

### 3.2. Construcción de un motor BLDC

Los motores BLDC constan de varias partes, pero en esencia dos de ellas cobran protagonismo, estas son el rotor y el estator.

En el caso del motor que aplica a este trabajo, el rotor se encuentra ubicado en el interior del estator (inrunner), pero existen motores en los que es al contrario (outrunner).

Sin embargo, en ambos tipos de motores, el rotor está formado por imanes permanentes de alta potencia, comúnmente de neodimio cómo se puede observar en la siguiente imagen.

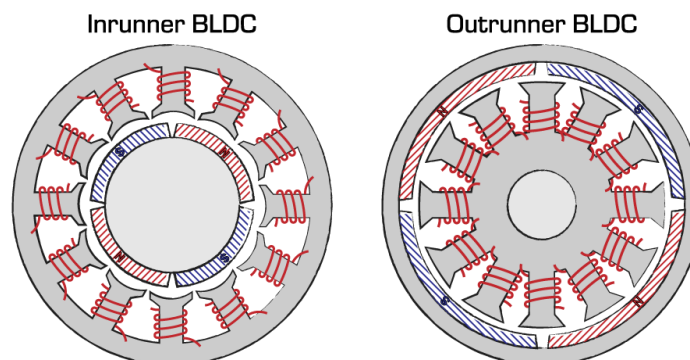
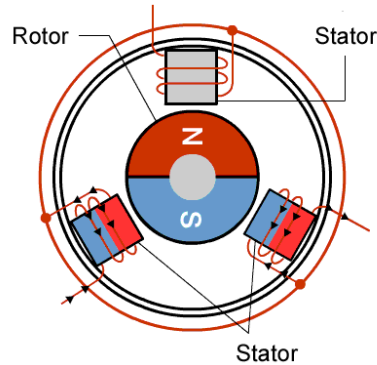


Figura 5. Diferencia entre motores Inrunner y Outrunner. Fuente:[3]



En general los motores de tipo outrunner están destinados a aplicaciones de baja potencia, donde se premia positivamente un comportamiento dinámico y se valora el bajo peso, como por ejemplo drones y cuadricópteros. Por otra parte, los motores inrunner se destinan a aplicaciones donde se demanda alta potencia y robustez.

Los motores BLDC disponen de tres bobinas desfasadas físicamente  $120^\circ$  entre ellas de modo que cubren por completo los  $360^\circ$  de giro, y al ser alimentadas en una secuencia y polaridad concretas orientan el rotor de imanes permanentes hasta completar la revolución completa.



**Figura 6.** Esquema de un motor BLDC conectado en estrella. Fuente:[4]

En la figura anterior se indica la disposición de las bobinas estatóricas de forma esquemática.

Como se puede apreciar en la imagen, el campo magnético generado por las bobinas interactúa con el rotor de imanes permanentes desplazando el mismo de forma angular, ahora bien, es necesario conocer la posición del rotor para poder energizar las bobinas estatóricas en el momento correcto y poder lograr así un giro suave y constante.

Existen dos métodos para conocer la posición del rotor los cuales serán detallados más adelante, a grandes rasgos, son:

**Sensored:** Es el utilizado en este trabajo y emplea sensores magnéticos de efecto hall para conocer la posición del rotor en todo momento, proporciona a la electrónica de control señales discretas.

**Sensorless:** No dispone de sensores, sino que emplea el fenómeno de fuerza contra electromotriz inducida (BACK EMF) en la bobina estatórica al pasar el imán del rotor por delante de la misma cuando esta no está alimentada.

A continuación, se puede observar la disposición física de los sensores en el motor en cuestión:

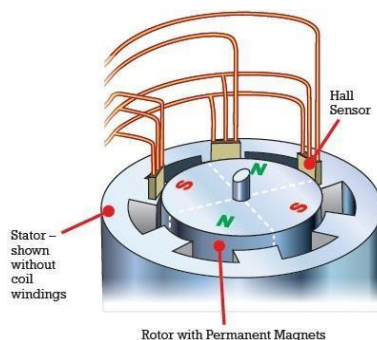


Figura 7. Ubicación de los sensores de efecto Hall en un motor BLDC. Fuente:[5]

Para finalizar el apartado de construcción del motor, se muestra una figura en la que se aprecian todas las partes explicadas anteriormente:

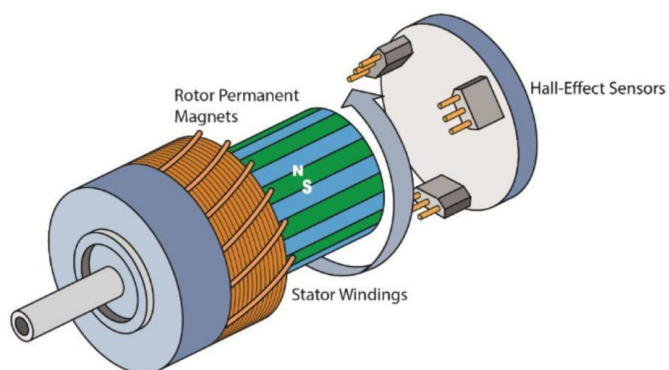


Figura 8. Partes de un motor BLDC. Fuente:[6]

### 3.3. Control de los motores BLDC

Los motores BLDC también se conocen como motores conmutados electrónicamente, ya que en función de la posición del rotor es necesario energizar determinadas bobinas para lograr el giro del mismo.

#### 3.3.1. Interacción de las bobinas estáticas con el rotor de imanes permanentes

Al alimentar una bobina en corriente continua, se genera un campo magnético a través de la misma en el que los polos magnéticos se encuentran en una posición determinada en función de la polaridad con la que se encuentre alimentada la bobina.

En la siguiente imagen podemos observar este fenómeno:

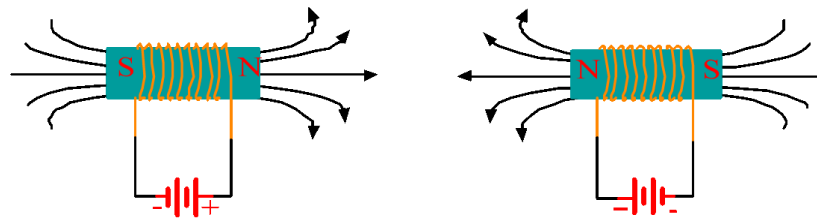


Figura 9. Polaridad de un electroimán según es la polaridad de alimentación. Fuente:[7]

Al disponer de un rotor de imanes permanentes encerrado en el estator, este se ve afectado por el campo magnético producido al alimentar las bobinas estáticas, al estar fijado por un eje el cual impide la traslación, el rotor se ve obligado a desplazarse angularmente y la dirección de este movimiento viene determinada por la polaridad de los campos magnéticos que interactúan entre sí, siguiendo el siguiente patrón:

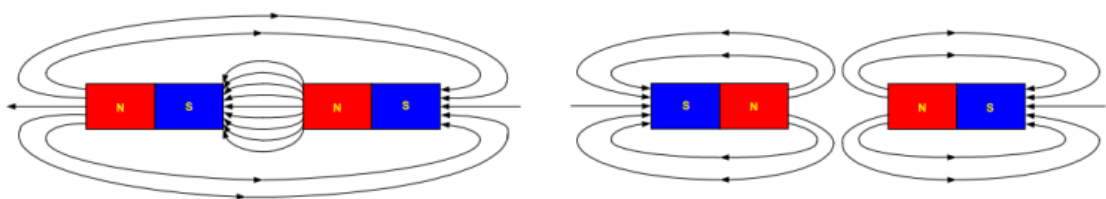


Figura 10. Interacción de dos campos magnéticos. Fuente:[8]

Como se puede observar en la anterior figura, al interactuar dos campos magnéticos de diferente polaridad se produce una atracción entre ellos y, por el contrario, si estos tienen igual polaridad, se produce una repulsión entre ellos.

A continuación, se muestra este fenómeno de atracción y repulsión en el propio motor:

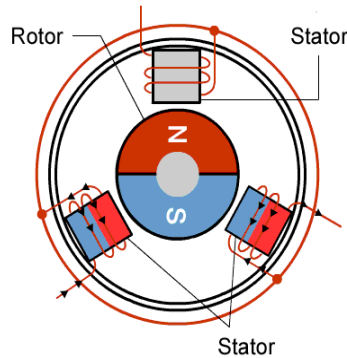


Figura 11. Esquema de un motor BLDC conectado en estrella. Fuente:[4]

Aplicando el concepto anterior, podemos determinar que en este caso el rotor girará a derechas, cabe destacar que, para producir el giro, puede alimentarse una o dos bobinas, esto dependerá de la conexión de las bobinas del motor:

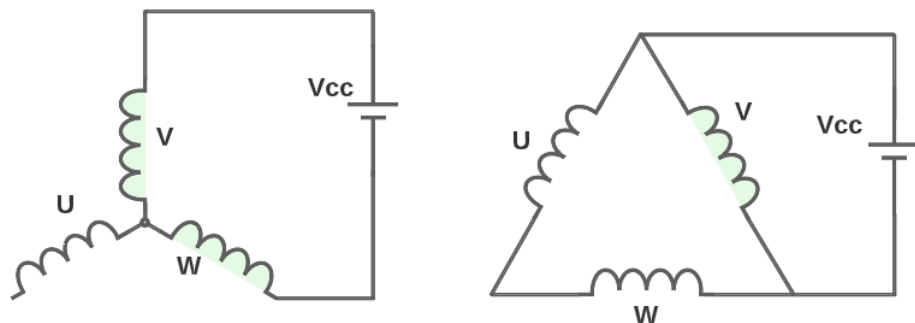


Figura 12. Conexión de las bobinas estatóricas de un motor BLDC. Fuente [Propia]

En la figura anterior, se muestran las opciones de conexión de las bobinas estatóricas, estrella (izquierda) y triángulo (derecha).

Como se muestra en la figura, en la conexión estrella, la fuente de alimentación somete las dos bobinas a tensión =  $V_{cc}/2$ , internamente, debido al sentido del bobinado, una de ellas atraerá al rotor y la otra lo repelerá[5].

Por el contrario, en la conexión triángulo, únicamente es alimentada una bobina a tensión de fuente, atrayendo al rotor y produciendo el giro del mismo.

### 3.3.2. Determinación de la posición del rotor de imanes permanentes

Con objeto de realizar las conmutaciones de alimentación de las bobinas estáticas en el preciso momento requerido para lograr una rotación suave y constante es necesario conocer la posición del rotor ya que al girar este ciertos grados, pasa de verse afectado por unas bobinas u otras.

Para conseguir conocer la posición se emplean dos métodos distintos, los cuales se detallan a continuación

#### 3.3.2.1. Sensorless

El método *sensorless* (sin sensores) emplea el fenómeno de la inducción magnética para conocer la posición del rotor, es comúnmente empleado en aplicaciones poco exigentes y de baja potencia, donde únicamente se requiere el giro continuo del motor a diferentes velocidades, dejando de lado labores de posicionamiento.

Como se ha visto anteriormente, para conseguir el desplazamiento angular del rotor, se alimentan únicamente dos de las tres bobinas del motor, quedando la restante “al aire”, dicha bobina que no está alimentada se emplea a modo de sensor, ya que, al pasar el rotor por delante de la misma, se induce una corriente en ella (BACK EMF) la cual se procesa mediante un circuito acondicionador y se consigue discretizar.

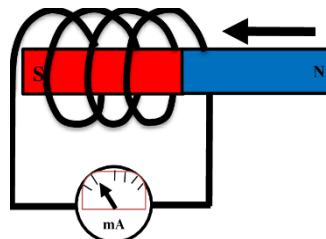


Figura 13. Fenómeno de la inducción magnética. Fuente:[9]

Puesto que el objetivo es determinar el momento en que los imanes del rotor cambian de posición desde el punto de vista de las bobinas, estas verán una corriente alterna inducida en ellas, correspondiéndose ese instante con el cruce por el 0 de la onda alterna inducida[10].

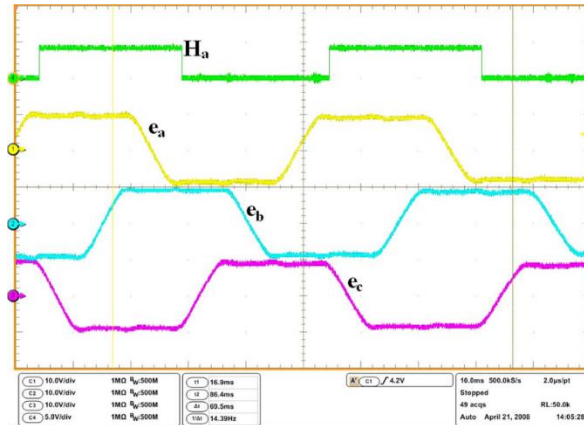


Figura 14. Medición de las señales Back EMF de un motor BLDC. Fuente:[11]

Los extremos de las bobinas estáticas se pueden conectar de dos configuraciones distintas, estrella o triángulo:

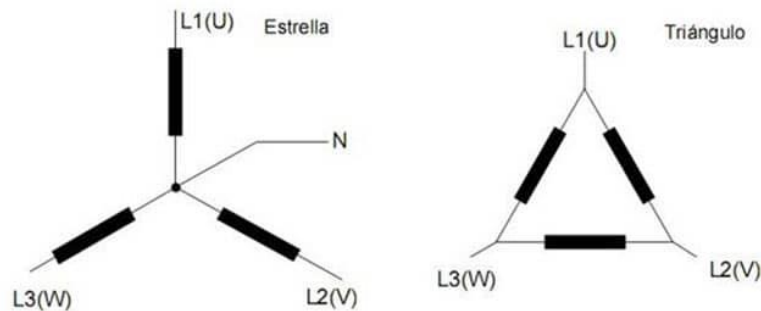


Figura 15. Conexión de las bobinas de un motor. Fuente:[12]

Puesto que el instante de interés es en el de cruce por el cero, es necesario tener una referencia del nivel de 0 V de la onda.

En el caso de un motor conectado en estrella en el que se nos dé acceso físico al punto central, este punto (neutro virtual) será la referencia para la comparación.

Sin embargo, no es común tener acceso físico al punto central ya que la conexión se realiza de manera interna en el motor, por ello en ambos casos, estrella y triángulo se emplea una red de externa resistencias a modo de divisores de tensión que crean la referencia del nivel 0 con la que comparar las tensiones inducidas en las bobinas.

Para realizar las comparaciones es común emplear amplificadores operaciones en la configuración de comparador, llevando a sus terminales de comparación la referencia de 0 V y el extremo de la bobina del motor, cuando este detecte que el nivel de tensión de la onda es superior a 0 V conmutará su salida a nivel lógico positivo y a al resultar una comparación negativa, conmutará a negativo, discretizando así la señal de BACK EMF inducida en las bobinas.

A continuación, se muestra el esquema típico del acondicionamiento de señal empleado en este método:

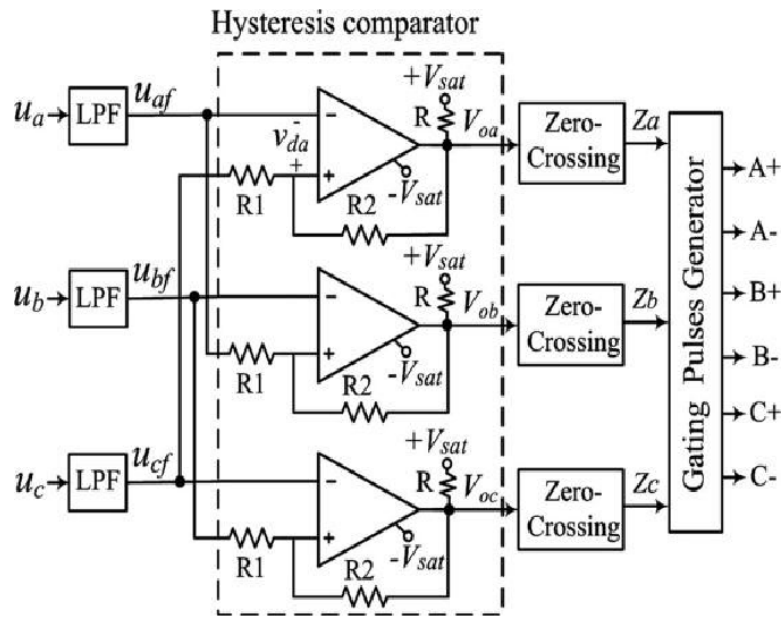


Figura 16. Circuito acondicionador de las señales de back EMF de un motor BLDC. Fuente:[13]

### 3.3.2.2. Sensored

El método *sensored* emplea 3 sensores de efecto hall, los cuales se encuentran ubicados en el interior del motor, enfrentados a los imanes permanentes del rotor, como se puede apreciar en la siguiente figura:

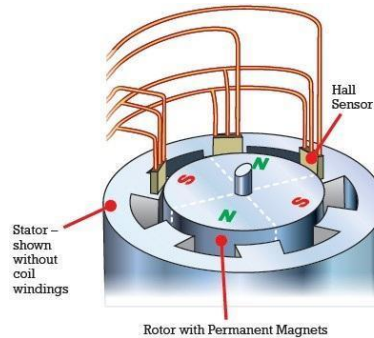


Figura 17. Ubicación de los sensores de efecto Hall en un motor BLDC. Fuente:[3]

El efecto hall produce una variación de tensión en los extremos de un conductor cuando este es sometido a un campo magnético, puesto que esta tensión generada es muy débil, los fabricantes acondicionan la señal de efecto hall de modo que se pueda trabajar de una manera más práctica con ellos.

Existen dos tipos de sensor de efecto hall, los analógicos y los digitales.

En el caso de los sensores analógicos, la señal de salida es proporcional a la intensidad del campo magnético que atraviesa el mismo, a continuación, se muestra una gráfica de un determinado fabricante:

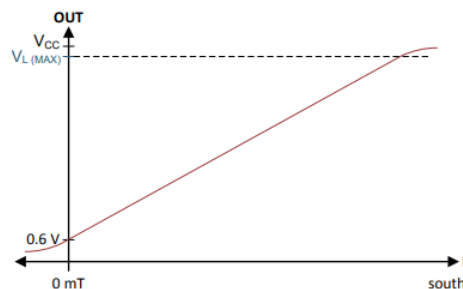


Figura 18. Señal de salida de un sensor de efecto Hall analógico. Fuente:[14]

Este tipo de sensores normalmente son empleados para mediciones de corriente, por ejemplo, en pinzas amperimétricas.



El segundo tipo, los digitales, parten de la misma base, una variación de tensión proporcional a la intensidad del campo magnético, pero en este caso los fabricantes incorporan la electrónica necesaria para discretizar esta señal, de modo que el usuario disponga de una señal digital.

En el caso de los motores BLDC se emplean sensores digitales, ya que el objetivo es conocer la posición del rotor.

De este modo, disponiendo de 3 sensores de efecto hall, el fabricante proporciona una tabla de posicionado en la que se recogen todos los estados posibles de los sensores para una revolución completa del rotor, a continuación, se muestra la tabla proporcionada para el motor que se emplea en este trabajo y unas figuras ilustrativas:

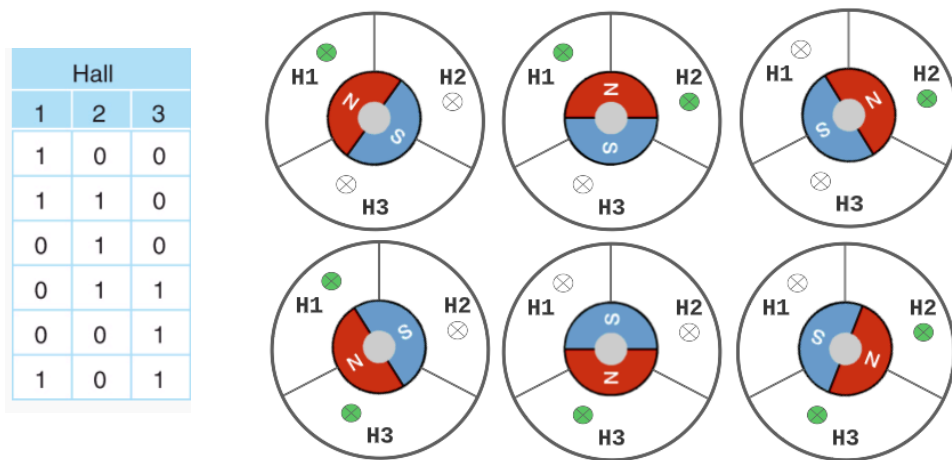


Figura 19. Estado de los sensores de efecto Hall según la posición del rotor. Fuente [Propia]

Como se puede apreciar en la tabla anterior, para una revolución completa, el fabricante diferencia 6 posiciones distintas a través de los sensores, más adelante se detallará que sucede en cada una de estas posiciones.

### 3.3.3. Conmutación en 6 pasos

Teniendo en cuenta la construcción interna del motor y la interacción entre las bobinas estáticas y el rotor, se justifica la necesidad de alimentar las bobinas estáticas en una secuencia y polaridad concretas.

#### 3.3.3.1. Circuito ondulator o inversor

Para conseguir alimentar las bobinas de forma independiente y poder invertir la polaridad de las mismas se emplea un circuito inversor típico trifásico, el cual tiene la siguiente apariencia:

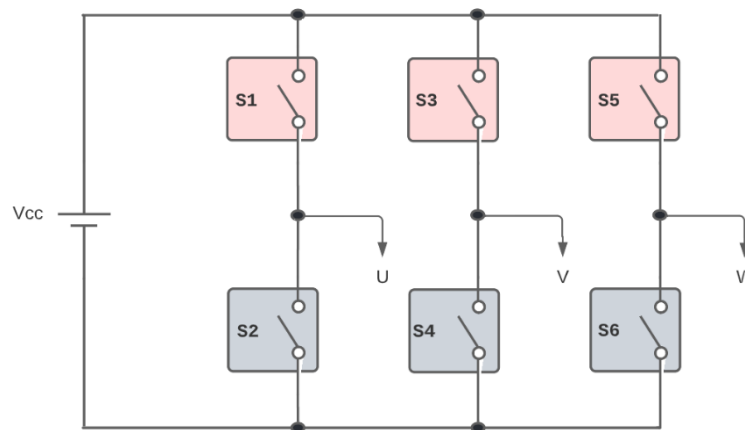


Figura 20. Esquema principal de un ondulator trifásico. Fuente [Propia]

Como se puede observar en la figura anterior, el circuito inversor dispone de 6 interruptores electrónicos, normalmente se trata de MOSFETS o IGBTs, los cuales son gobernados mediante un circuito de control que se explicará más adelante.

A la estructura completa se le designa como puente inversor y a cada rama formada por dos interruptores se nombra semipunto.

Se dispone de una fuente de C.C la cual alimenta al ondulator, las ramas que lo alimentan se conocen como BUS DC.

También se observa que el puente dispone de 3 salidas, en este caso U, V y W, pero también es común llamarlas R, S y T por convenio con una red trifásica o A, B y C ya que habitualmente las bobinas de un motor trifásico se nombran así, estas 3 salidas serán conectadas a la carga, la cual en este trabajo será el motor BLDC.

Por ejemplo, al activar S1 y S4, la carga conectada entre U y V dispondrá de una polaridad concreta, pero al activar únicamente los interruptores complementarios, S2 y S3 la carga observará la polaridad

inversa, de este modo, a efectos prácticos la carga será alimentada en A.C consiguiendo el propósito inicial de un ondulator, convertir C.C en A.C.

Cabe destacar que el control de los dos interruptores de un semipunto debe de ser complementario, ya que si se activan ambos a la vez se producirá un cortocircuito produciendo una avería[15].

A continuación, se muestra la tabla de conmutación en 6 pasos típica para un circuito inversor en la que cada estado se corresponde a cada una de las 6 posibles combinaciones proporcionadas por el circuito detector de posición formado por los sensores de efecto hall:

PASO	HALLS	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	001	1	0	0	1	0	0
2	101	1	0	0	0	0	1
3	100	0	0	1	0	0	1
4	110	0	1	1	0	0	0
5	010	0	1	0	0	1	0
6	011	0	0	0	1	1	0

Tabla 1 Secuencia de control del inversor según la posición de los sensores de efecto Hall, sentido horario. Fuente [Propia]

Para invertir el giro, se han de activar los interruptores complementarios a los de la tabla inicial:

PASO	HALLS	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	001	0	1	1	0	0	0
2	101	0	1	0	0	1	0
3	100	0	0	0	1	1	0
4	110	1	0	0	1	0	0
5	010	1	0	0	1	0	1
6	011	0	0	1	0	0	1

Tabla 2 Secuencia de control del inversor según la posición de los sensores de efecto Hall, sentido antihorario. Fuente [Propia]

### 3.3.3.2. Técnicas de regulación de la velocidad de giro

La velocidad de giro del motor está directamente relacionada con la tensión de alimentación de las bobinas, ya que esto influye en la corriente que circula por ellas y en consecuencia, a la intensidad del campo magnético generado[16].

De este modo, al aumentar la potencia del campo magnético, la interacción entre las bobinas estáticas y el rotor es más fuerte, orientándose este de manera más rápida.

Para conseguir regular la tensión de alimentación existen varios métodos los cuales son explicados a continuación.

#### 2.3.3.2.1. Técnica PWM

La técnica PWM (pulse width modulation) o modulación por ancho de pulso, establece una señal cuadrada de frecuencia fija en la que se alteran los tiempos a nivel alto y bajo, estableciendo así una relación entre ellos llamada duty cycle la cual se define del siguiente modo:

$$Duty\ cycle\ [\%] = (T_{on}/T) \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

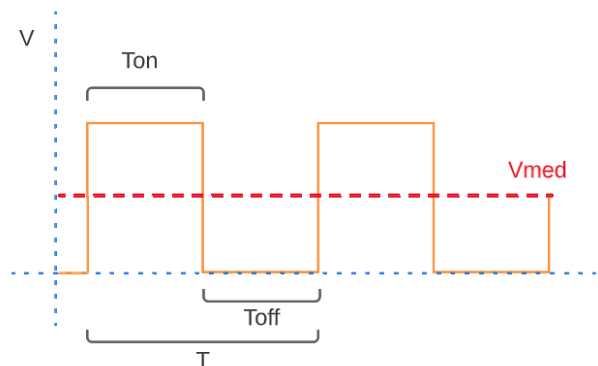


Figura 21. Parámetros principales de una señal PWM. Fuente [Propia]

Variando el duty cycle de la onda, se consigue regular el valor medio de la tensión generada siguiendo la siguiente expresión:

$$V_{med} [V] = amplitud \cdot duty\ cycle \quad (\text{Ec. 3})$$

Para aplicar esta técnica al control del motor, se aplica la onda PWM a uno de los interruptores del ondulator que están activos en cada intervalo de conmutación, de modo que las bobinas del motor experimentarían el valor medio de tensión correspondiente[15].

A continuación, se muestran los interruptores del puente que se emplean para realizar esta técnica:

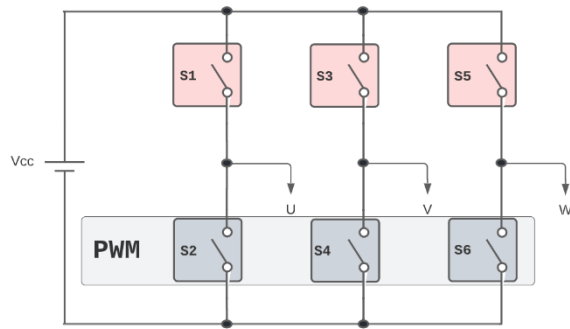


Figura 22. Interruptores que realizan la conmutación PWM en el inversor. Fuente [Propia]

#### 2.3.3.2.2. Técnica SPWM

En la técnica anterior, PWM, la onda recibida por el motor, aunque es alterna, es de naturaleza cuadrada, sin embargo, al tratarse de una maquina rotativa, la corriente ideal para su funcionamiento debería ser de naturaleza senoidal. Para confirmar esto, no hay mejor manera que hacer funcionar el motor como generador y medir la onda producida, para ello se hace girar el eje de salida de la reductora con un taladro a batería y una polea:



Figura 23. Giro del eje del motor BLDC mediante un taladro. Fuente [Propia]

A continuación, se mide la onda generada en el osciloscopio:

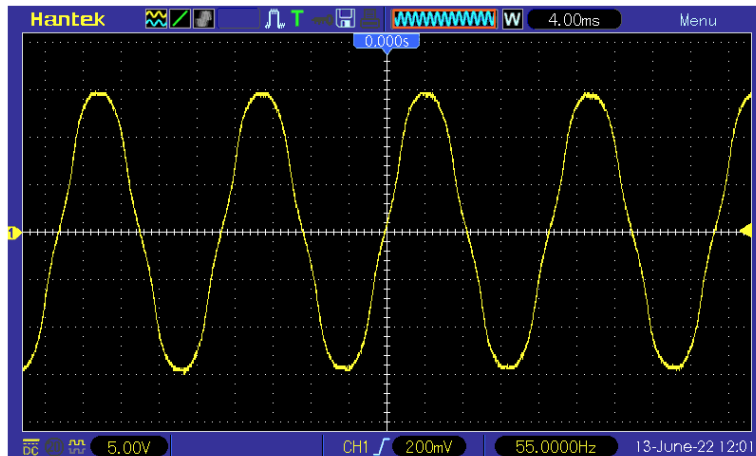


Figura 24. Onda de salida del motor BLDC trabajando como generador.  
Escala vertical CH1: 5 V/Div. Base de tiempo: 4 ms/Div. Fuente [Propia]

De este modo, al tratarse de una onda senoidal, se confirma la suposición anterior.

La técnica SPWM (sine pulse width modulation) o modulación por anchura de pulso senoidal, es una variación de la PWM, donde el ancho del pulso, varía de acuerdo a la amplitud de una onda senoidal a lo largo del periodo, de modo que la salida, en voltaje medio, se asemeja bastante a una onda senoidal[15].

Para realizar esta modulación es usual emplear una señal portadora (onda triangular) y una onda de referencia (onda senoidal), ambas son conectadas a las entradas de un amplificador operacional configurado como comparador, de modo que, al producirse los cortes entre ellas, la salida del mismo conmuta alternando entre nivel alto y bajo.

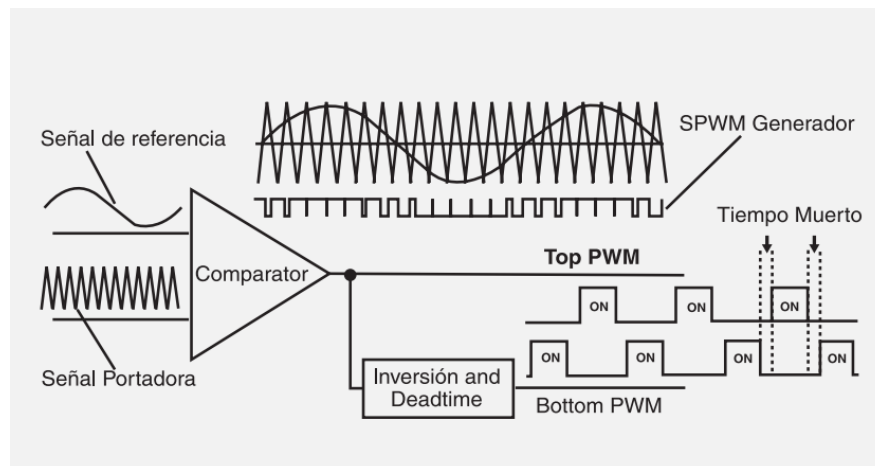


Figura 25. Circuito generador de una señal SPWM. Fuente:[17]

---

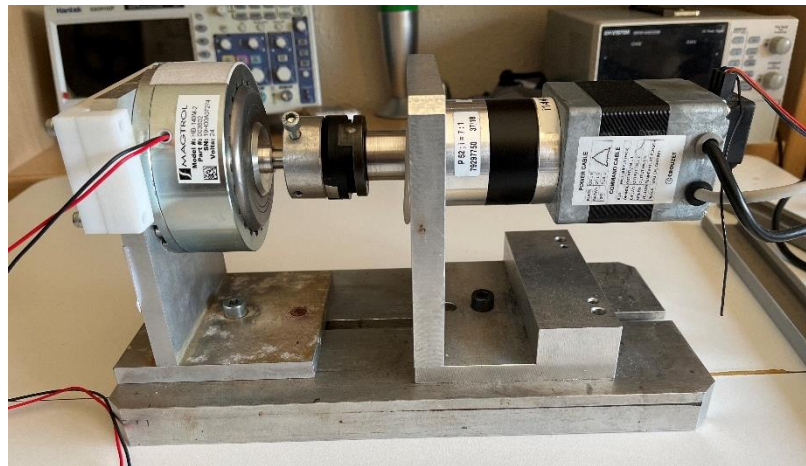
## 4. Desarrollo práctico

En este apartado se tratará los diferentes procesos que ha seguido este trabajo de manera práctica para desarrollar la bancada de pruebas.

### 4.1. Hardware suministrado

En primer lugar, se detallará todo el material que fue suministrado por el grupo de investigación SAC (Sistemas Avanzados de Control) para la realización de este trabajo.

A continuación, se muestra una imagen del hardware suministrado:



*Figura 26. Bancada motor BLDC y freno magnético. Fuente [Propia]*

A la derecha de la imagen se encuentra el motor BLDC, el cual es acoplado a una reductora con relación de transmisión 7:1, el eje de salida de la misma es acoplado a un freno magnético.

#### 4.1.1. El motor

Se trata de un motor BLDC del tipo inrunner sensored, lo cual indica que el rotor de imanes permanentes se encuentra confinado en el interior del estator y posee 3 sensores de efecto hall para detectar la posición del mismo.

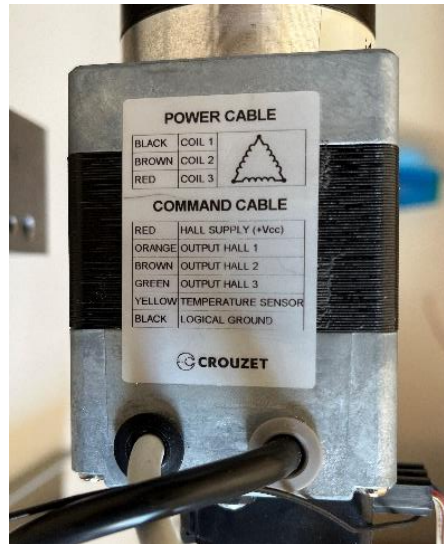


Figura 27. Características del motor BLDC. Fuente [Propia]

Como se puede observar en las características del motor, sus bobinas están conectadas en triángulo internamente, de modo que en cada paso de conmutación se alimentará únicamente una bobina y esta recibirá el total de tensión del bus DC.

Además, se identifica el conexionado de los sensores de efecto hall junto a un sensor de temperatura interno del motor.

#### 4.1.2. La reductora

Para adaptar la alta velocidad del motor, es usual disponer de una transmisión la cual, en este caso, reduce las mismas en un factor de 7:1, lo que quiere decir que cada 7 revoluciones del motor, el eje de salida dará 1 revolución.

Esta reducción de r.p.m trae consigo un aumento significativo del par ya que según la definición de potencia mecánica:

$$Potencia\ mecánica = \omega \left[ \frac{rad}{s} \right] \cdot par [Nm] \quad (Ec. 4)$$

Para una determinada potencia, al reducir la velocidad angular, se incrementará el par disponible.



En este caso se emplea una transmisión de tipo planetaria, la cual realiza la conversión de revoluciones en varias fases y brinda una excelente robustez y fiabilidad.

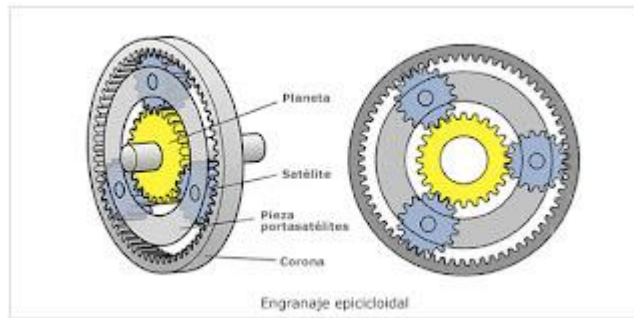


Figura 28. Transmisión de engranajes planetarios. Fuente:[18]



Figura 29. Transmisión reductora de engranajes planetarios. Fuente [Propia]

### 4.1.3. El freno magnético

Con objeto de poder introducir un par resistente al motor, se dispone de un freno magnético el cual es capaz de proporcionar dicho par de una forma controlada.

A continuación, se muestra el freno magnético suministrado:



Figura 30. Freno magnético. Fuente [Propia]

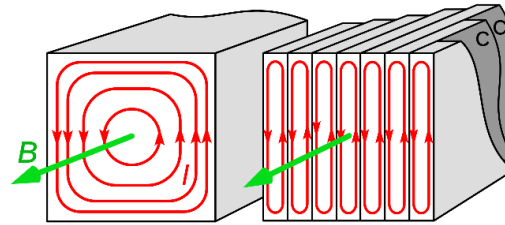
Este tipo de frenos son denominados frenos magnéticos de histéresis controlados por corriente o tensión, como se ha comentado anteriormente, el fenómeno de inducción magnética se basa en que, al producir una variación de flujo magnético cerca de un conductor, se induce una corriente en este.

Ahora bien, al producirse esta tensión en el propio material se producen cortocircuitos internos debido a las corrientes parasitas de Foucault creando nuevamente un campo magnético en el material que es de signo opuesto al inicial, de modo que se produce una atracción entre el campo magnético principal inductor y el inducido, creándose así una resistencia al movimiento.

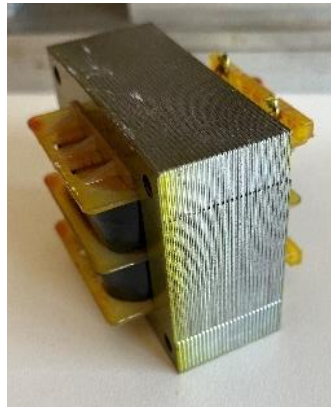
En términos generales este efecto es indeseado ya que al inducirse corrientes parásitas en los materiales próximos a campos magnéticos variables se producen cortocircuitos internos que finalmente derivan en pérdidas energéticas debidas al efecto Joule.

Para minimizar estas pérdidas usualmente se suelen seccionar estos materiales en láminas delgadas y aisladas eléctricamente entre sí mediante resinas, de este modo, el volumen en el que se pueden producir cortocircuitos es menor y con ello las pérdidas disminuyen.

Sin embargo, en el caso de un freno, este es un fenómeno deseado, por lo que se intenta maximizar este volumen de material, a continuación, se muestra una figura representativa de las corrientes parásitas de Foucault en un material con y sin seccionamientos, asimismo también se muestra el uso de esta técnica en máquinas eléctricas:

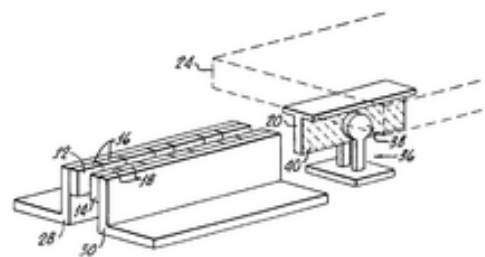


**Figura 31.** Circulación de las corrientes parásitas de Foucault en un material macizo y en un material seccionado y aislado eléctricamente. Fuente:[19]



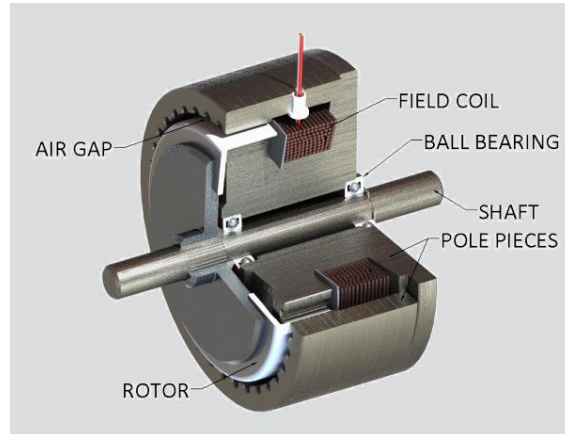
**Figura 32.** Aplicación del seccionamiento del núcleo magnético de un transformador. Fuente [Propia]

Un ejemplo de utilización de este fenómeno se puede observar en el sistema de frenada de las montañas rusas, donde los electroimanes se encuentran estáticos en los raíles y los vagones pasan unas pletinas ferrosas entre ellos.



**Figura 33.** Freno magnético empleado en una montaña rusa. Fuentes:[20][21]

En el caso de las montañas rusas se trata de frenos lineales, sin embargo, en el caso de este trabajo se emplea un freno rotativo el cual realizará el proceso de forma rotativa, a continuación, se muestra una sección de este tipo de frenos:



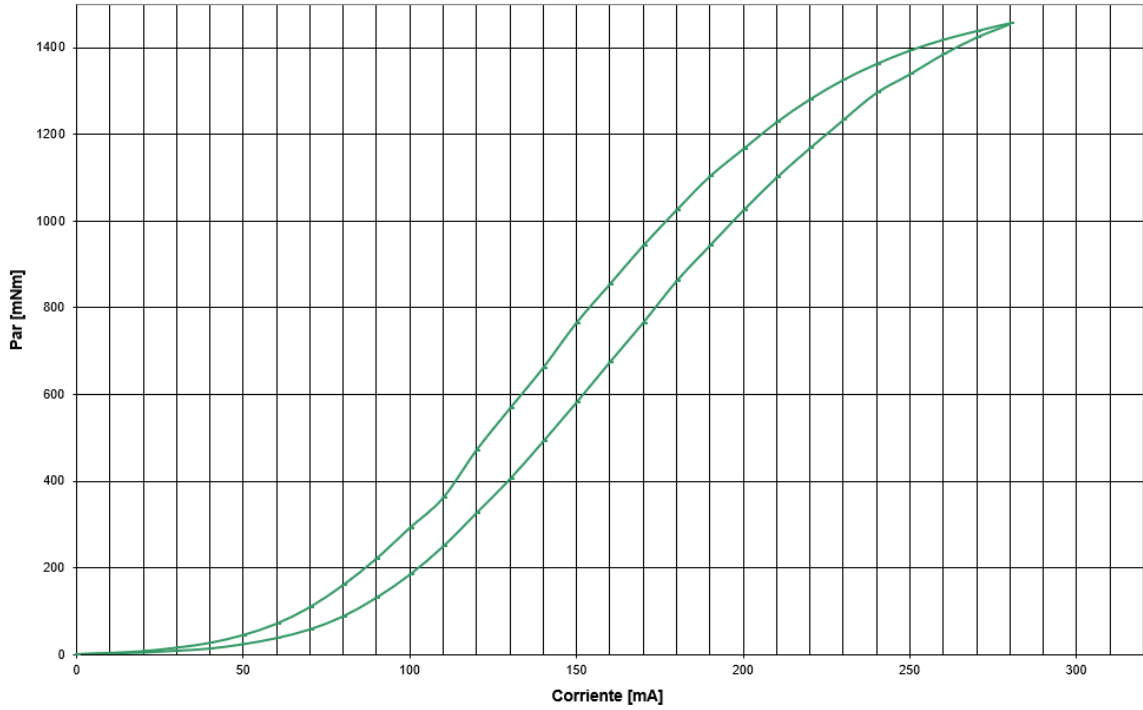
*Figura 34. Sección de un freno magnético. Fuente:[22]*

Distinguiendo las partes de la figura anterior, es posible observar que, a ambas caras de la bobina, donde se ubican los polos magnéticos, se proporciona a estos un camino “fácil” de seguir mediante un material ferroso de alta permeabilidad magnética terminando este camino en una serie de dientes que se encuentran desfasados entre si generando un patrón de polos magnéticos opuestos a lo largo de la revolución, en el que se desplazará el rotor.

Al desplazarse el rotor entre este patrón de polos, se inducen una multitud de corrientes parásitas, las cuales como se ha explicado anteriormente, acaban generando un par resistente en el eje.

Otro factor que genera más pérdidas, en este caso deseadas, al sistema son las pérdidas por histéresis, que resultan de magnetizar un material y seguidamente desmagnetizarlo para volver a hacerlo en dirección contraria, esto es debido a que el material en si posee cierto remanente magnético una vez es magnetizado.

La curva de histéresis es empleada por el fabricante para graficar la relación entre corriente y par resistente, a continuación, se muestra la curva suministrada por el fabricante para el modelo de freno adquirido:



*Figura 35. Curva característica del freno magnético empleado. Fuente:[23]*

En un primer inicio, cuando el freno no tiene remanente magnético, la curva Par vs. Corriente que se ha de tener en cuenta es la inferior, una vez alcanzado el nivel de par máximo, si la corriente disminuye progresivamente, el par seguirá la curva superior, la cual a igualdad de corriente ofrece más par debido a la remanencia magnética del material.

## 4.2. Hardware desarrollado

En este apartado se documentará la creación del hardware propio desarrollado para gobernar el hardware suministrado.

### 4.2.1. PCB de potencia

La PCB de potencia hace referencia al corazón del proyecto, donde se procesa la lógica del microcontrolador y finalmente se convierte de corriente continua a corriente alterna para alimentar la carga, debido a que esta placa es la que controla el mayor flujo energético, toma el nombre de placa de potencia.

#### 4.2.1.1. Diagrama de bloques

Seguidamente se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la PCB de potencia:

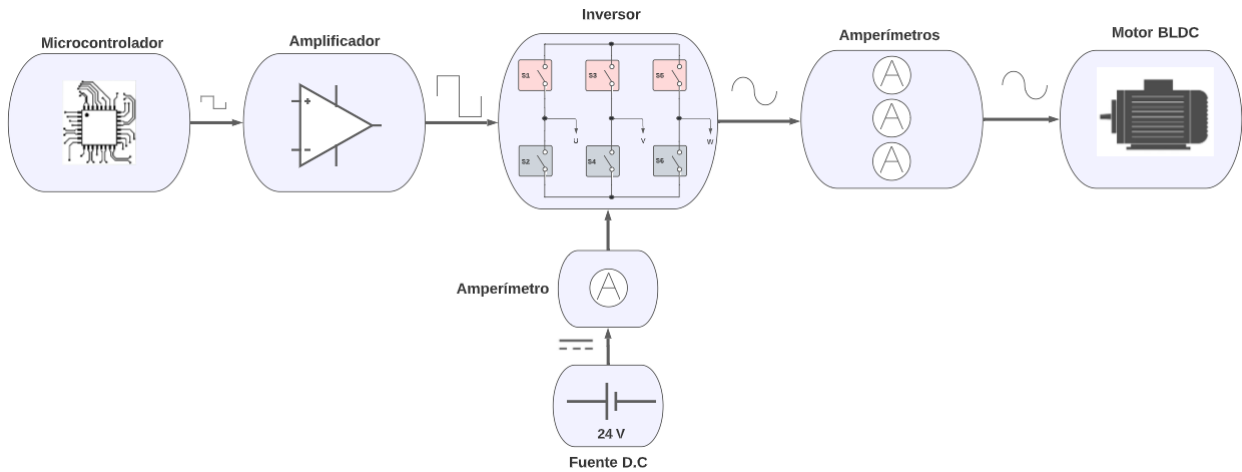


Figura 36. Diagrama de bloques de la placa de potencia. Fuente [Propia]

A grandes rasgos, se toman las señales de control del microcontrolador y se amplifican para gobernar el inversor, el cual convierte la corriente continua suministrada por la fuente a corriente alterna que se entregará al motor.

#### 4.2.1.2. Esquema principal de la placa de potencia

Como se ha comentado anteriormente, el circuito ondulatorio para realizar las conmutaciones y generar la onda que requiere el motor consta básicamente de 6 interruptores conectados a un bus de continua, los cuales son controlados por las señales digitales procedentes de un microcontrolador

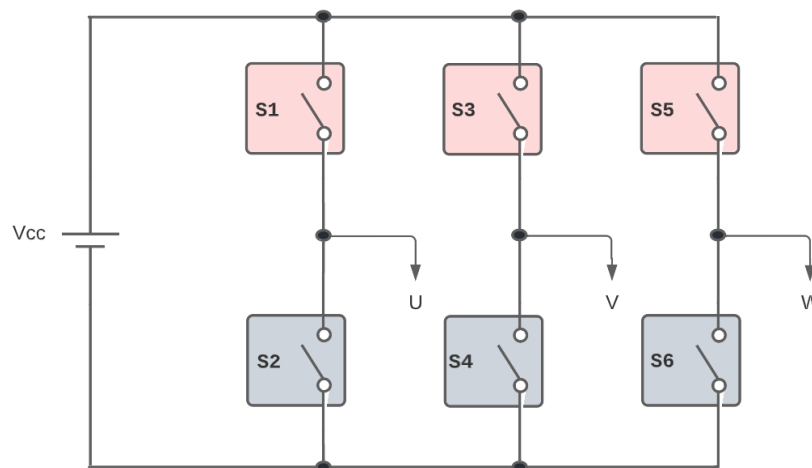


Figura 37. Circuito principal de un inversor trifásico. Fuente [Propia]

#### 4.2.1.3. Los transistores MOSFET y su control

Puesto que el motor a controlar es de baja potencia, 45 W, se decide emplear MOSFETs para su conmutación, este tipo de transistores de efecto campo se caracterizan por poder trabajar a frecuencias de conmutación elevadas, manejar potencias bajas-medias y una baja resistencia interna.

Puesto que se trata del elemento que más estrés sufre de todo el montaje y se prevé que durante la fase de pruebas es probable que se estropee, se decide emplear el modelo IRFZ44N, ya que se dispone de bastantes unidades y sus prestaciones son superiores a las demandadas por el motor.

A continuación, se muestra el esquema de un transistor MOSFET:



Figura 38. Apariencia y símbolo de un transistor MOSFET. Fuente:[24]

Podemos entender un MOSFET de forma genérica como un interruptor al que cuando se le aplica una tensión por encima de cierto umbral en el terminal de control, puerta, cierra su contacto entre drenador y fuente.

Este tipo de transistores de efecto campo son activados en tensión en su terminal de puerta (gate) ya que necesitan crear un campo eléctrico en su interior para establecer el canal drenador-fuente (drain-source).

Por defectos en la fabricación, los transistores MOSFET, poseen ciertas capacidades parásitas tal y como se muestra en la siguiente imagen:

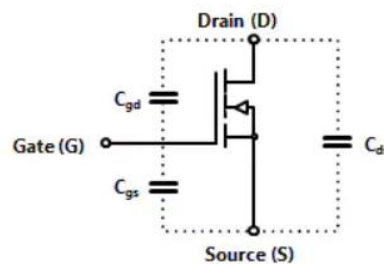


Figura 39. Capacidades parásitas presentes en un transistor MOSFET. Fuente:[25]

Estas capacidades del orden de unos pocos pF necesitan ser cargadas o descargadas para activar o desactivar el interruptor, de modo que se produce un retraso en el encendido y apagado del interruptor.

Este fenómeno demanda cierta corriente de la lógica de control para cargar o descargar la capacidad, sumando a ello un retraso desde que se da la orden hasta que la conmutación se produce.

A frecuencias bajas o en aplicaciones donde la coordinación entre varios de estos interruptores no es necesario tener en cuenta los retrasos producidos por las capacidades parásitas, sin embargo, en aplicaciones de la naturaleza de este trabajo donde las conmutaciones requieren de un tiempo de subida lo más bajo posible para garantizar la correcta conmutación se necesita interponer un tercer elemento entre la lógica de control y el interruptor.

Este tercer elemento es un amplificador, el cual, recibirá la orden de control y la amplificará en tensión y corriente para controlar el interruptor, de este modo, además de garantizar el tiempo mínimo para la conmutación, se consigue cierto aislamiento entre la lógica de control y la etapa de potencia ganando así un extra en seguridad frente a una posible avería.

Existen varios componentes capaces de realizar esta labor de amplificación, pero usualmente se emplean transistores bipolares, *optoacopladores* y *drivers* específicos.

En el caso de los convertidores donde es común tener que manejar dos interruptores complementarios entre ellos, por esta razón los fabricantes desarrollan drivers capaces de gobernar semipuentes, en este trabajo se emplea el driver IR2101, el cual se explica a continuación:

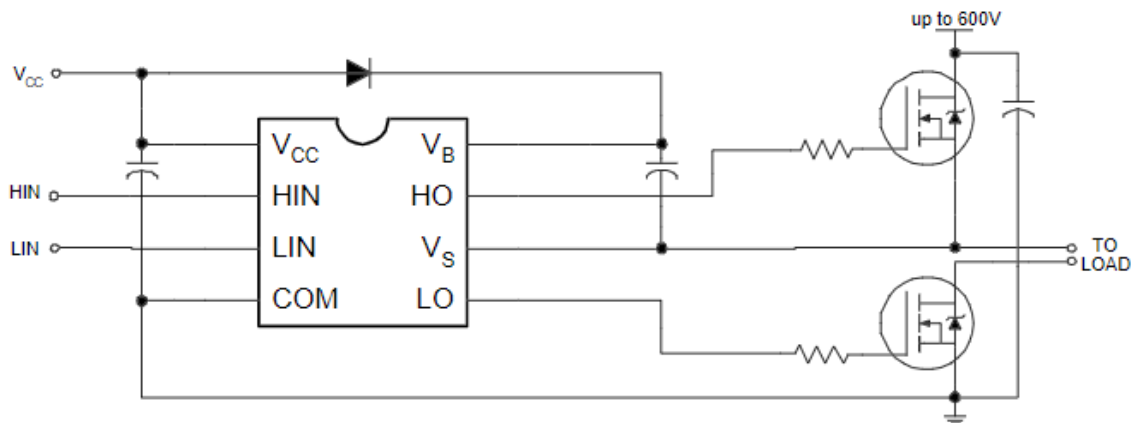


Figura 40. Circuito recomendado por el fabricante del driver dual IR2101. Fuente:[26]



En la figura anterior se muestra el driver IR2101 y el circuito de conexión típico para controlar un semipunto suministrado por el fabricante.

Puesto que el fabricante no determina los valores para los condensadores ni el modelo de diodo, se procede a realizar una investigación y determinar que componentes emplean el resto de diseñadores para este cometido.

Tras realizar pruebas con distintos valores y componentes, se determina que el siguiente circuito proporciona unas prestaciones superiores al resto de circuitos probados.

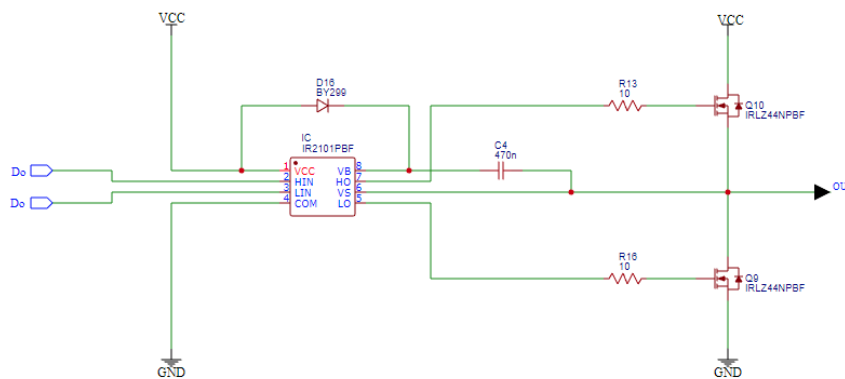


Figura 41. Esquema electrónico del circuito de control básico de un semipunto. Fuente [Propia]

De este modo, al aplicar señales digitales de valores TTL a los terminales de control del driver (HIN y LIN) es posible controlar los interruptores de manera independiente.

Asimismo, se implementan ciertas protecciones para el control de los interruptores, las cuales se verán a continuación:

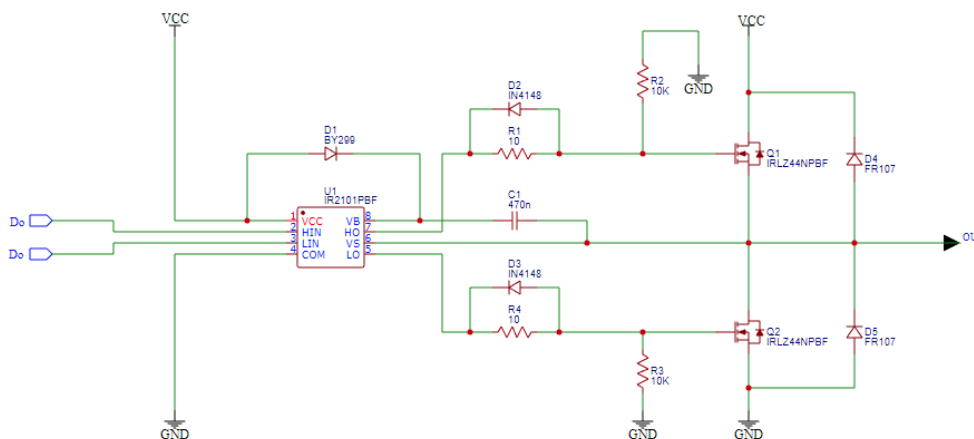


Figura 42. Esquema electrónico del circuito de control de un semipunto incluyendo protecciones. Fuente [Propia]

Las resistencias de puerta R1 y R4 pueden parecer contradictorias según lo explicado anteriormente acerca de las capacidades de puerta, sin embargo, un cambio excesivamente brusco en la corriente que circula por la puerta durante la carga del condensador parásito podría repercutir en inestabilidades a en los terminales de D y S pudiendo provocar conmutaciones inesperadas, es por ello que es una buena práctica interponer resistencias de bajo valor en entre la lógica y el terminal de puerta.

Los diodos de conmutación rápida 1N4148 colocados en antiparalelo a las resistencias de puerta, obligan a la corriente de carga a pasar por la resistencia de puerta, por el contrario, cuando se ordena la orden de apagado, la capacidad parásita necesita encontrar un camino por el que drenarse rápidamente y es entonces cuando los diodos D2 y D3 ofrecen vía libre para la descarga[25].

De no descargarse rápidamente, el interruptor podría no pasar directamente de la zona de saturación a corte, provocando un elevado estrés en el mismo.

Por otro lado, las resistencias R2 y R3 realizan una función de *pull-down* para que tan pronto se anule la orden de encendido (esto no implica que se produzca la orden de apagado) la puerta quede sometida a un nivel de 0 V, obligando al transistor a cambiar a la región de corte.

Finalmente al trabajar con cargas inductivas, las cuales al dejar de ser alimentadas, intentan mantener el régimen de corriente constante a través de las mismas y con ello generan un pico de elevada tensión inversa, es necesario implementar un diodo de recuperación externo para el interruptor ya que, a pesar de que el mismo interruptor posee un diodo interno que cumple la misma función, los picos producidos son de elevada tensión y corriente, provocando que el diodo interno no sea capaz de disipar esta energía, calentándose y produciéndose su ruptura por efecto avalancha.

Colocando este diodo externo, los picos de tensión negativa repetitivos son compartidos por ambos diodos conmutando en los momentos que el interruptor está abierto y disipando la energía contra electromotriz en las propias bobinas del motor en forma de calor.

El diodo escogido para este fin es el modelo FR107 ya que se trata de un diodo de recuperación rápida que cumple los requerimientos.

#### 4.2.1.4. Diseño electrónico

Una vez se ha detallado el funcionamiento de un semipunto, el diseño final se constituye de la unión de tres de ellos, integrándolos todos ellos en una misma PCB.

A continuación, se muestra el conjunto de los 3 semipuntos unidos.

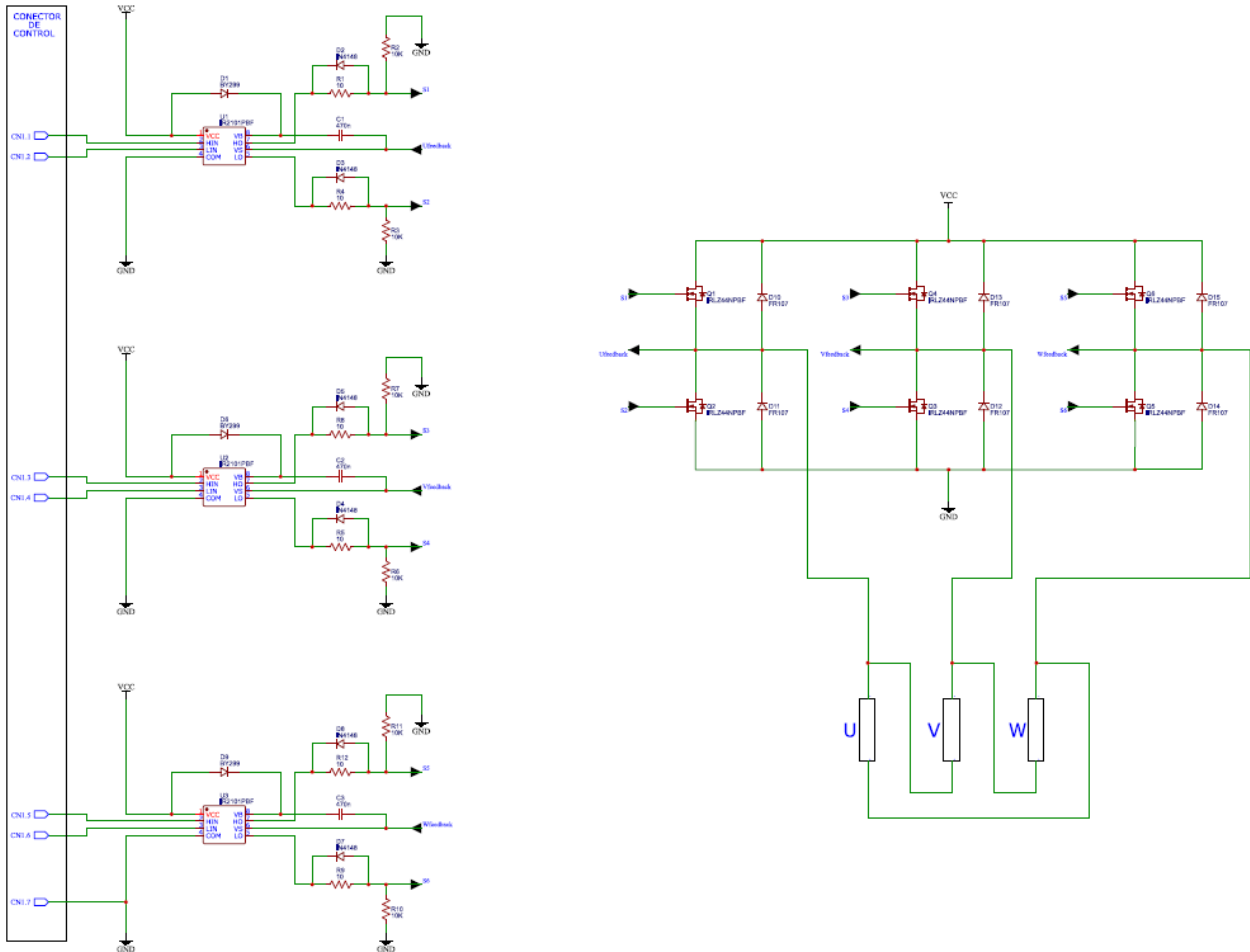


Figura 43. Esquema electrónico completo de la placa de potencia. Fuente [Propia]

#### 4.2.1.5. Pruebas electrónicas parciales

Antes de validar el diseño final, se procede a una prueba parcial en protoboard, de modo que se montan dos semipuentes con objeto de realizar un puente en H sobre el secundario de un transformador reductor 230 V a 9 V.

A continuación, se muestra el esquema del circuito:

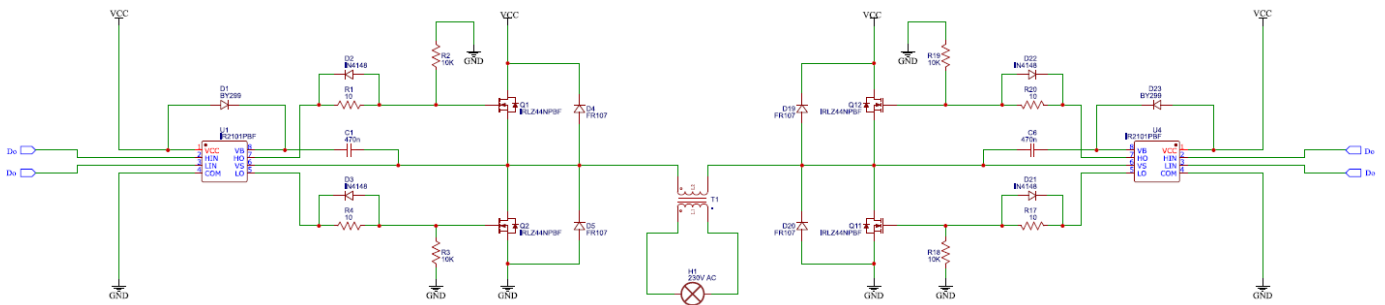


Figura 44. Esquema electrónico de un inversor monofásico. Fuente [Propia]

También se muestra imágenes del montaje en funcionamiento:

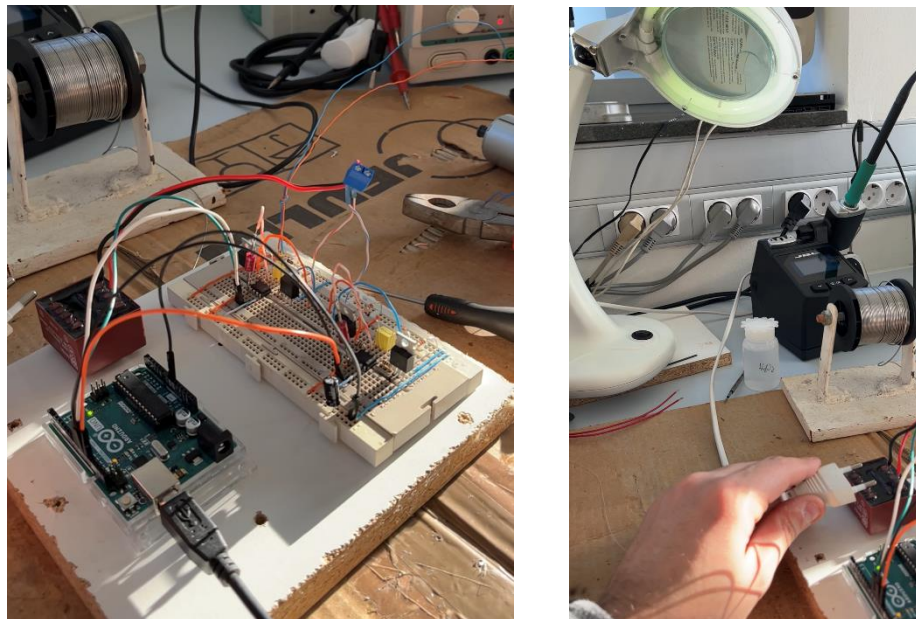


Figura 45. Pruebas de un inversor monofásico. Fuente [Propia]

El resultado de las pruebas fué exitoso, logrando realizar un inversor monofásico funcional de unos pocos vatios debido al transformador de baja potencia empleado.

#### 4.2.1.6. Cálculo y diseño del disipador de calor

Todo componente electrónico disipa cierta energía durante su funcionamiento, dicha energía disipada se traduce en una elevación de la temperatura del componente.

Los componentes tienen una temperatura máxima de trabajo que, al ser sobrepasada, se corre riesgo de fallo del propio componente.

Es por ello que surge la necesidad de evacuar el calor del componente de una forma eficiente, para ello se emplean disipadores de calor.

Dichos disipadores se tienen que calcular para garantizar que bajo unas determinadas condiciones de funcionamiento el calor se evacue de los componentes evitando así su destrucción.

A continuación, se calculará el disipador de calor necesario para los transistores de potencia.

La fuente de calor surge en la unión semiconductor siendo este el punto desde el que el calor debe viajar hasta el ambiente, para ello se calcula el circuito térmico correspondiente.

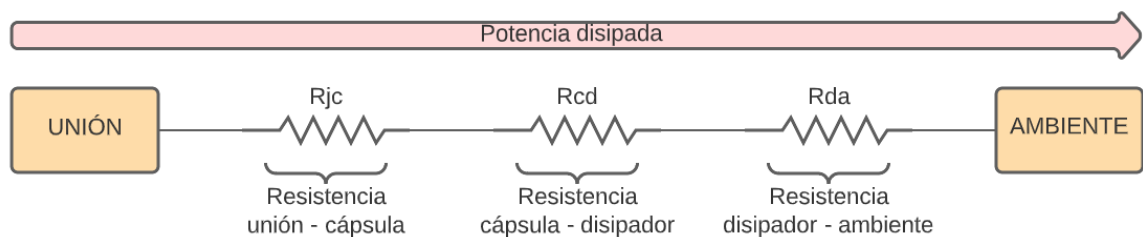


Figura 46. Circuito térmico de la instalación de un transistor en un disipador de calor. Fuente [Propia]

Puesto que los 6 transistores serán montados en una misma PCB de manera lineal, se prevé emplear un único disipador para todos ellos, esto es un problema ya que el disipador al ser de aluminio es conductor eléctrico y el drenador de los MOSFETS está unido eléctricamente al encapsulado del mismo, de este modo, si se colocan directamente sobre el disipador, el mismo cortocircuitaría los transistores.

Es por ello que es necesario aislarlos eléctricamente repercutiendo lo menos posible en la transferencia de calor, para conseguir este objetivo se plantea hacer uso de un *pad térmico* o almohadilla térmica que se coloca entre el transistor y el disipador, aislándolos eléctricamente, pero conectándolos térmicamente sin necesidad de emplear pasta térmica.

Para calcular el circuito térmico es necesario disponer de ciertos datos, unos los da el fabricante de los componentes y otros dependen de las condiciones de trabajo.

Entre ellos el fabricante de los transistores nos proporciona:

$$R_{th_{unión\ capsula}} = R_{th_{jc}} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$R_{th_{capsula\ ambiente}} = R_{th_{ca}} = 62 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Máxima temp. de la unión} = 175 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\text{Máxima Resistencia interna} = \max. R_{ds_{on}} = 17,5 \text{ m}\Omega \quad (\text{Ec. 8})$$

El fabricante del pad térmico nos indica:

$$R_{pad\ termico} = R_{capsula\ disipador} = R_{th_{cd}} = 3 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (\text{Ec. 9})$$

Consideramos:

$$\text{Temp. seguridad de la unión} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\text{Temp. ambiente} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 11})$$

Cálculo de la potencia disipada en el transistor:

$$\text{Intensidad que atraviesa el transistor} = I_{DS} = \frac{P_{motor}}{V} = \frac{45 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 1,87 \text{ A} \sim 2,00 \text{ A} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\text{Caída de tensión en el transistor} = V_{DS} = I_{DS} \cdot R_{ds_{on}} = 2 \text{ A} \cdot 17,5 \text{ m}\Omega = 0,035 \text{ V} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\text{Pot. disipada en el transistor} = V_{DS} \cdot I_{DS} = 2 \text{ A} \cdot 0,035 \text{ V} = 0,07 \text{ W} = 70 \text{ mW} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$\text{Resistencia térmica necesaria del disipador para Temp. Max. De la Unión} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$T_j - T_{amb} = R_{ja} \cdot P_{disipada} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\frac{T_j - T_{amb}}{P_{disipada}} = R_{ja} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{cd} + R_{da} \quad (\text{Ec. 18})$$

Sustituyendo:

$$\frac{T_j - T_{amb}}{P_{disipada}} = R_{jc} + R_{cd} + R_{da} \quad (\text{Ec. 19})$$

---

Aislado:

$$\frac{T_j - T_{amb}}{P_{disipada}} - (R_{jc} + R_{cd}) = R_{da} \quad (\text{Ec. 20})$$

Sustituyendo valores:

$$\frac{50\text{ }^\circ\text{C} - 25\text{ }^\circ\text{C}}{0,07\text{ W}} - (1,5\text{ }^\circ\text{C/W} + 3\text{ }^\circ\text{C/W}) = R_{da} = 352,64\text{ }^\circ\text{C/W} \quad (\text{Ec. 21})$$

El valor anterior sería solo para un transistor, sin embargo, como solo 2 de los 6 transistores trabajarán simultáneamente se puede realizar el mismo cálculo aproximando las resistencias térmicas a la de un único transistor, pero doblando la potencia disipada, resultando:

$$\frac{50\text{ }^\circ\text{C} - 25\text{ }^\circ\text{C}}{0,14\text{ W}} - (1,5\text{ }^\circ\text{C/W} + 3\text{ }^\circ\text{C/W}) = R_{da} = 174,1\text{ }^\circ\text{C/W} \quad (\text{Ec. 22})$$

Podemos interpretar que una  $R_{da}$  o resistencia disipador – ambiente más elevada que la propia  $R_{ca}$  o capsula ambiente del transistor nos indica que no es necesario disponer de disipador de calor[27].

Aun así, se procede a diseñar y mecanizar un disipador de calor de aluminio puesto que, durante las pruebas, pueden surgir complicaciones que sometan al componente a una temperatura elevada.

A continuación, se muestra el diseño del disipador de calor diseñado:

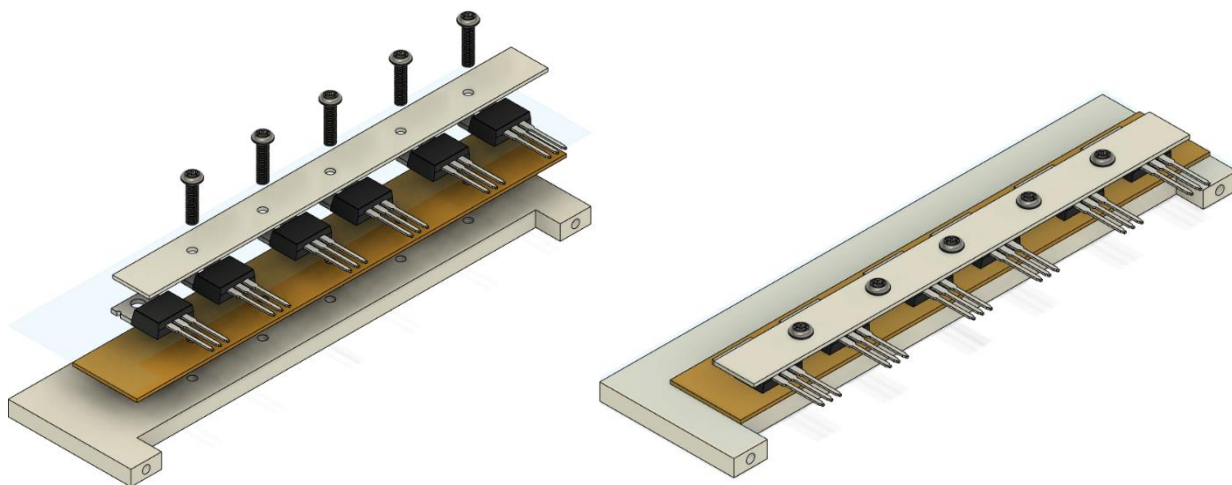


Figura 47. Diseño del disipador de calor y su ensamblaje mediante software CAD. Fuente [Propia]

A continuación, se muestra el disipador fabricado y ensamblado:



Figura 48. Disipador de calor realizado con los transistores instalados. Fuente [Propia]



#### 4.2.1.7. Diseño de la PCB en programa CAD

Una vez testeado que el circuito funciona correctamente, se procede a diseñar el mismo en un programa de dibujo asistido por ordenador.

Se decide realizar la placa a una sola cara debido a que no se pretende realizar un diseño en el que se priorice la agrupación de componentes en el menor espacio posible, al contrario, el objetivo es tener acceso fácilmente a todos los componentes para poder realizar medidas y reparaciones de forma rápida.

Durante la etapa de diseño, es necesario considerar una serie de buenas prácticas para evitar futuros problemas:

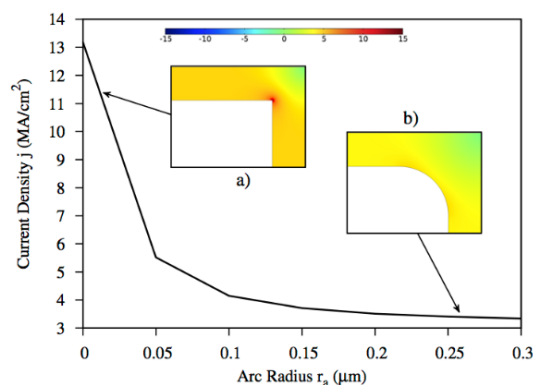
Disposición de los componentes:

Es útil disponer los componentes de la manera más simétrica posible de cara a mantener un orden lógico en el circuito para que sea sencillo ubicar los componentes una vez la PCB esté realizada.

Ángulos rectos:

En la medida de lo posible, se han de evitar los ángulos rectos en el trazado de las pistas ya que estos pueden presentar problemas durante la etapa de revelado de la placa, disolviendo el ácido demasiado rápido los mismos y creando interrupciones de la pista inesperados.

En los ángulos rectos se produce un aumento considerable de la densidad de corriente, lo que puede causar problemas de carácter electromagnético y aumento de la temperatura.



*Figura 49. Densidad de corriente en las pistas de una PCB en función del radio de arco de una esquina. Fuente:[28]*

Ajuste de la rejilla:

Los componentes THT tienen un paso entre sus patillas de 1/10 de pulgada, es por ello que, para el correcto ajuste de los componentes, es necesario tener bien parametrizada la rejilla.

Anchura de las pistas:

Del mismo modo que ocurre con un cable donde su sección limita la corriente máxima que puede circular por el mismo, en una pista se traduce en términos de anchura de la pista.

Siguiendo la guía de Proteus[29], un reconocido software de diseño de PCBs, se emplea una calculadora online que, al insertar los datos, nos devuelve el ancho de la pista mínimo:

Inputs:

Current	6	Amps
Thickness	35	um

Optional Inputs:

Temperature Rise	10	Deg C
Ambient Temperature	25	Deg C
Trace Length	1	inch

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	9.25	mm
Resistance	0.00139	Ohms
Voltage Drop	0.00831	Volts
Power Loss	0.0499	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	3.56	mm
Resistance	0.00360	Ohms
Voltage Drop	0.0216	Volts
Power Loss	0.130	Watts

Figura 50. Cálculo del grosor de pista de una PCB para soportar 6 Amperios. Fuente:[30]

En este caso, se toma una corriente máxima de 6 A, los cuales si todo funciona correctamente nunca se alcanzarán, el resultado teniendo un espesor de cobre de 35 um y para no superar un incremento de temperatura de 10 °C en la pista, es de un ancho de 3,56 mm.

En este caso las pistas de potencia tendrán un ancho de 2 mm a las que, se aplicará soldadura para poder soportar la corriente de funcionamiento.

A continuación, se muestra el diseño generado para la PCB:

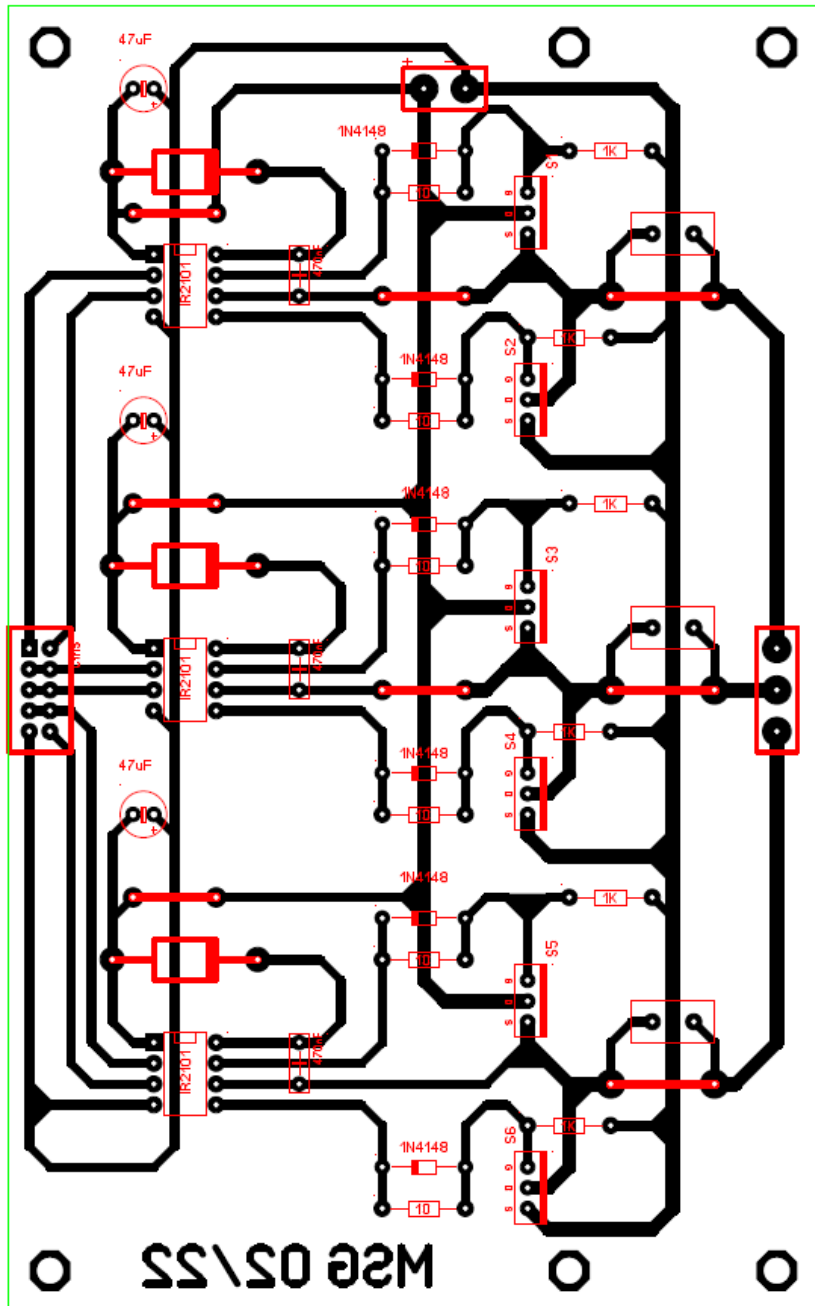


Figura 51. Diseño CAD de la PCB de potencia. Fuente [Propia]

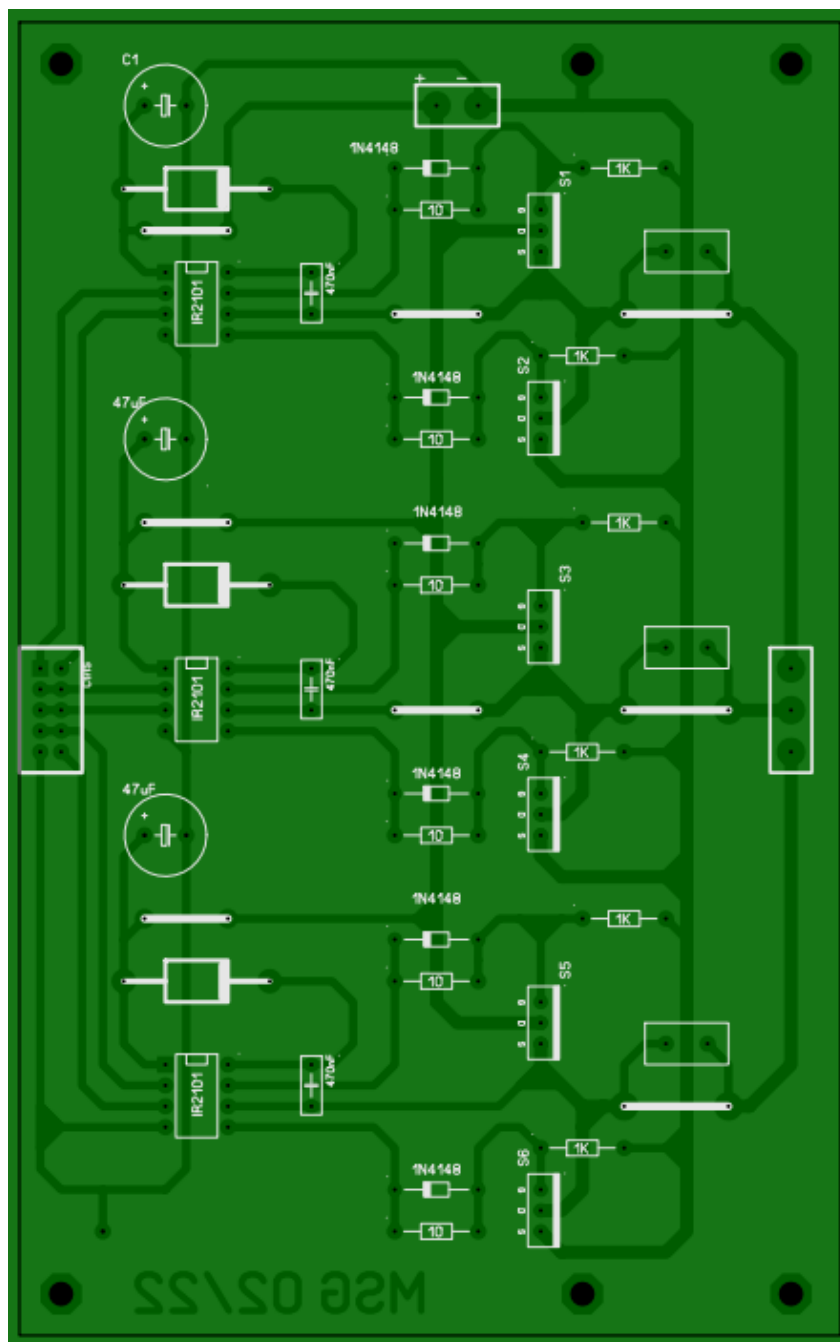


Figura 52. Vista de componentes del diseño de la PCB de potencia. Fuente [Propia]

---

#### 4.2.1.8. Fabricación de la PCB

Puesto que se dispone de los medios, se opta por el método de fabricación por insolado con luz ultravioleta, en el que se parte de una PCB virgen que tiene sobre el cobre una resina fotosensible.



*Figura 53. PCB fotosensible de una cara. Fuente:[31]*

Dicha resina al ser insolada con luz UV durante unos 3 minutos aproximadamente, se debilita.



*Figura 54. Insoladora UV empleada para la fabricación de las PCB. Fuente:[31]*

Interponiendo un papel de transparencia en el que se imprimen las pistas del diseño (cliché), se consigue insolar únicamente las partes de la resina que no se requieren.

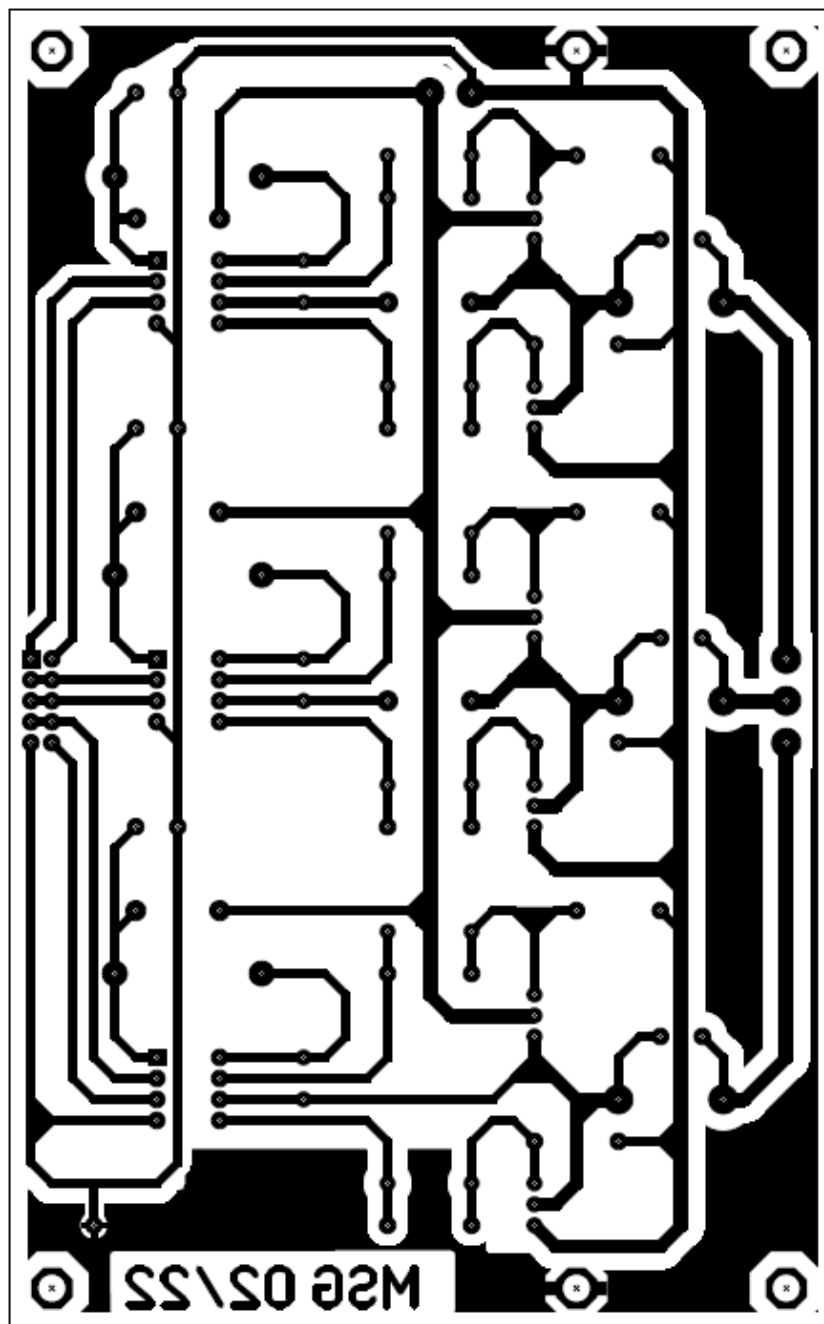
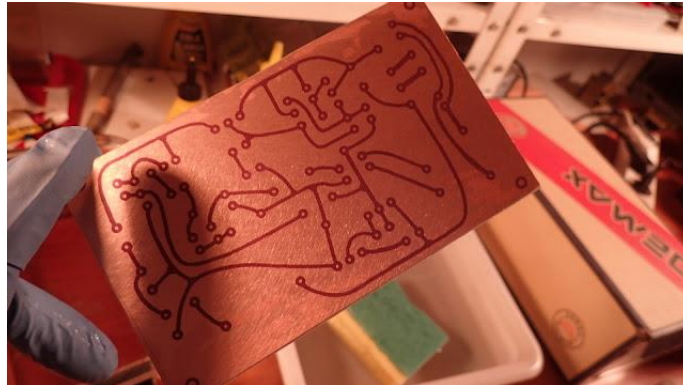


Figura 55. Cliché del diseño realizado para la PCB de potencia. Fuente [Propia]

A continuación, mediante una disolución de 4 g de sosa cáustica en ¼ l de agua, se retira la resina debilitada en el proceso de insolación.



*Figura 56. PCB tras el revelado de la resina fotosensible. Fuente:[32]*

Posteriormente, se procede a la fase de atacado, donde una disolución de 25% de agua oxigenada de 110 volúmenes, 25% de agua fuerte o sulfamán y un 50% de agua destilada, ataca al cobre expuesto y lo elimina, la resina que sigue en la PCB protege las pistas.

Una vez completado el proceso de atacado, con acetona se elimina la resina protectora y se dispone de la PCB.



*Figura 57. PCB tras el proceso de atacado con ácido. Fuente [Propia]*



El siguiente proceso es el taladrado de la PCB para poder insertar los componentes, mediante brocas de 0,6 mm a 1,2 mm de diámetro.

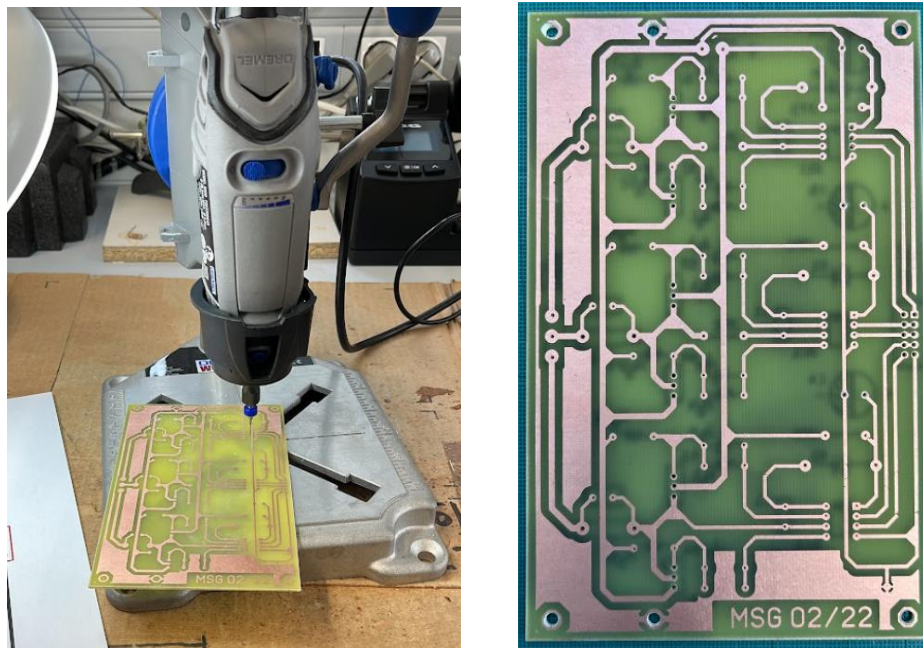


Figura 58. Taladrado de la PCB mediante miniherramienta. Fuente [Propia]

Puesto que se trata de una placa con un número de componentes considerable, se decide serigrafiar y barnizar la misma a modo de precaución para un futuro, donde pueden surgir complicaciones.

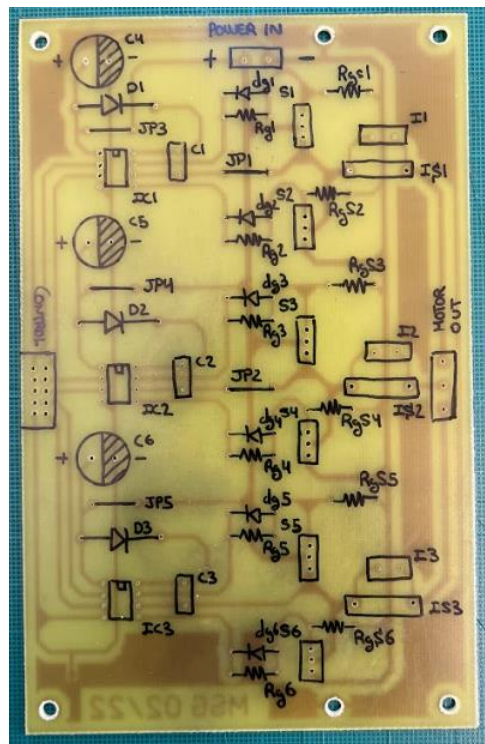
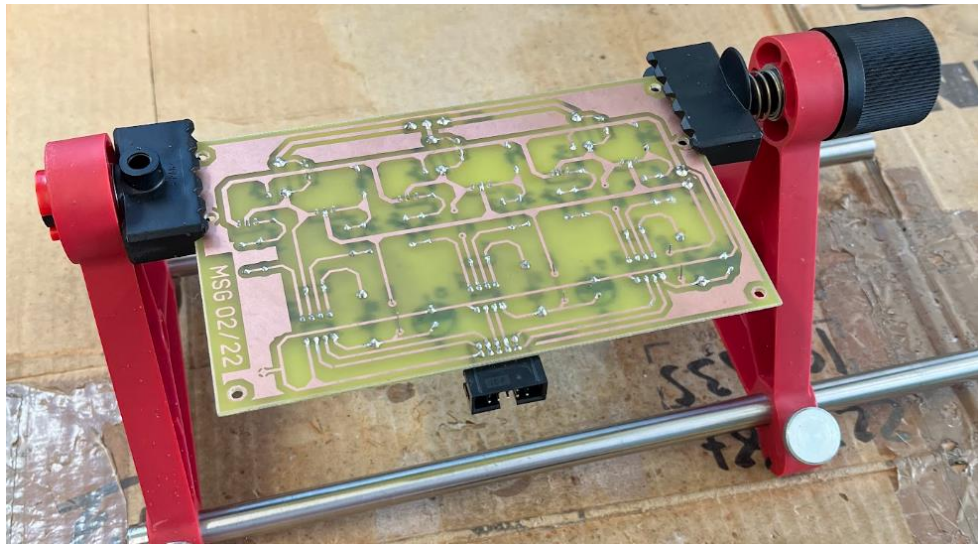


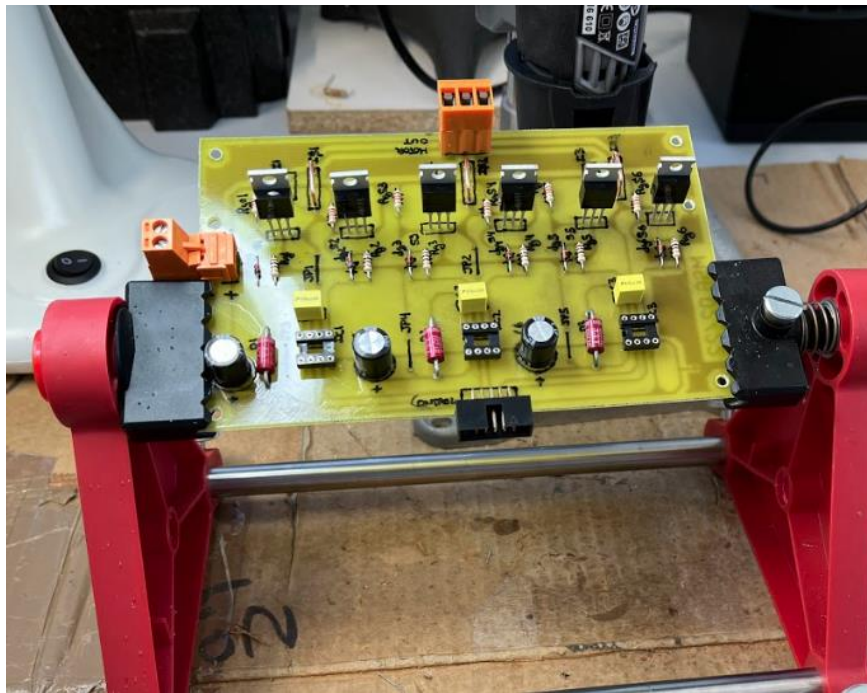
Figura 59. Serigrafía de la PCB de potencia. Fuente [Propia]



Finalmente se realiza la soldadura de los componentes:



*Figura 60. Proceso de soldadura de la PCB de potencia. Fuente [Propia]*



*Figura 61. PCB de potencia finalizada. Fuente [Propia]*

## 4.2.2. PCB de acondicionamiento de sensores hall

Los sensores de efecto hall ubicados en el interior del motor, no producen por si mismos la señal requerida por el microcontrolador, es por ello que surge la necesidad de acondicionar esta señal de modo que sea adapte a los niveles lógicos estándares para circuitos TTL.

### 4.2.2.1. Diseño de la PCB

Según indica el fabricante la salida de los sensores de efecto hall es del tipo NPN de colector abierto con una corriente máxima de 20 mA sin protección frente a errores de conexionado, pudiendo trabajar en un rango de 4,5 a 24 Vdc.

Puesto que se va a trabajar con niveles lógicos convencionales de 0 y 5 Vdc, se alimenta el módulo a 5 V.

La salida a colector abierto indica que internamente, tras la electrónica interna de acondicionamiento del sensor de efecto hall, la última etapa es un transistor NPN cuyo emisor está conectado a negativo y se da acceso al colector.

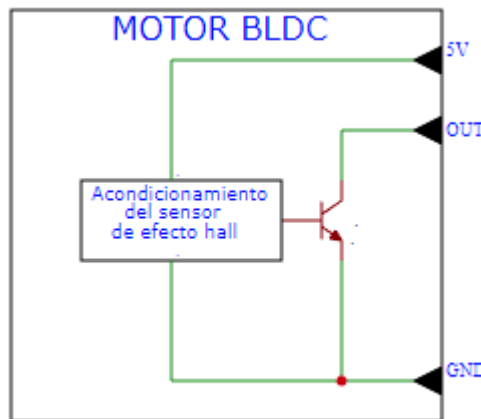


Figura 62. Salida a colector abierto de un sensor de efecto Hall. Fuente [Propia]

Además de conseguir una señal cuadrada de niveles 0 y 5 V, se pretende visualizar la activación de los sensores mediante LEDs de modo que el usuario pueda comprobar el correcto funcionamiento de los sensores simplemente girando manualmente el eje del motor.

Para ello se diseña el siguiente circuito:

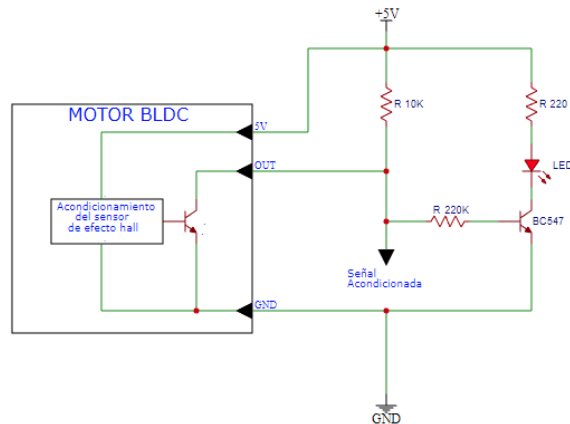


Figura 63. Circuito acondicionador de una salida a colector abierto. Fuente [Propia]

La resistencia de 10 K $\Omega$  además de limitar la corriente de colector, realiza la función de *pullup* de modo que cuando el transistor interno se encuentra en corte, se obtiene en el colector un nivel lógico alto de 5 V, sin embargo, cuando el transistor interno está en saturación, la salida acondicionada se encuentra conectada a 0 V (despreciando la caída de tensión colector-emisor del transistor) se calcula que la corriente de colector será de 0,5 mA.

$$I_c = V/R = 5 V / 10 k\Omega = 0,5 mA$$

De este modo confirmamos que la etapa de salida del sensor de efecto hall no sufrirá ningún daño.

Para poder activar el LED, y puesto que la corriente que consume el mismo es próxima al límite que aguanta la etapa de salida interna, se implementa un amplificador mediante un transistor NPN muy común, el BC547.

La resistencia de 220 k $\Omega$  cumple la función de desacoplo, haciendo circular la corriente necesaria para que el transistor pase de corte a saturación y sea este quien soporte la corriente del LED, sin forzar así a la etapa de salida interna.

Finalmente, al tratarse de 3 sensores, el circuito se triplica para acondicionar las 3 señales.

#### 4.2.2.2. Fabricación de la PCB

Siguiendo el mismo proceso de fabricación que la placa anterior, a continuación, se muestran las imágenes correspondientes al proceso:

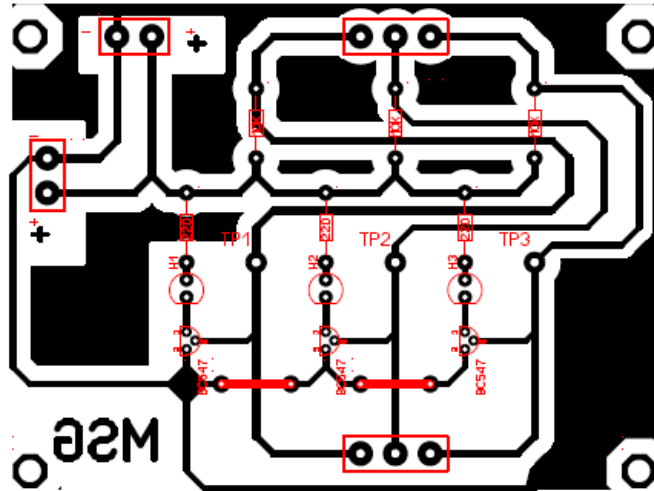


Figura 64. Diseño de la PCB de acondicionamiento de los sensores de efecto Hall. Fuente [Propia]

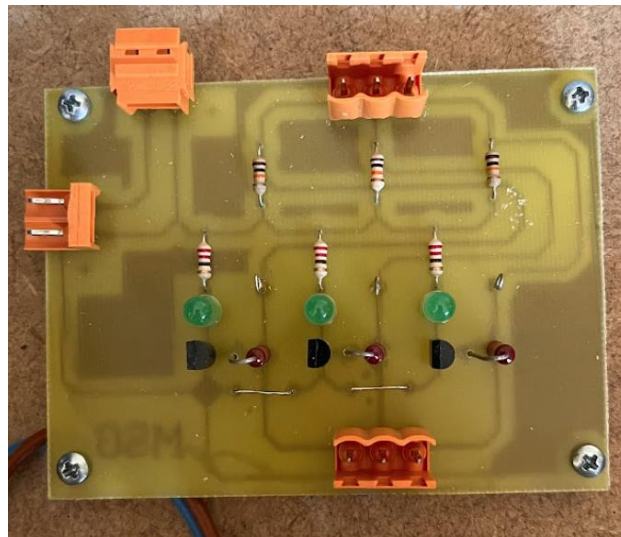


Figura 65. PCB de acondicionamiento de los sensores de efecto Hall. Fuente [Propia]

### 4.2.3. PCB controladora del freno magnético

Como se ha comentado anteriormente, el freno magnético consta de una bobina la cual al ser alimentada consigue ofrecer un par resistente en el eje.

Dicho par se corresponde con la intensidad que circula a través de la bobina, para poder controlar el paso de corriente se empleará la técnica de modulación por ancho de pulso o PWM comentada anteriormente.

#### 4.2.3.1. Diagrama de bloques

El freno magnético a máxima potencia consume aproximadamente unos 300 mA, un nivel de corriente que no es capaz de suministrar un pin digital de un microcontrolador.

Por ello, es necesario interponer un amplificador entre la salida digital del microcontrolador y la carga final, esto se muestra en el siguiente diagrama de bloques

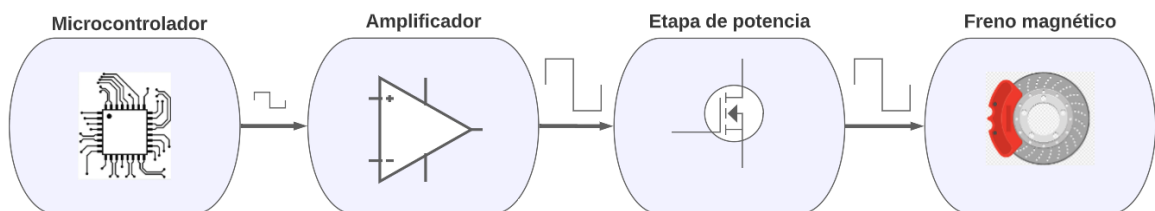


Figura 66. Diagrama de bloques de la PCB del freno magnético. Fuente [Propia]

Como se puede apreciar en el diagrama anterior, la señal del microcontrolador es aplicada a un amplificador el cual actuará como driver para el MOSFET, el cual finalmente alimentará al freno.

#### 4.2.3.2. Diseño de la PCB

Puesto que las exigencias de conmutación de esta placa son muy bajas, se emplea como controlador del MOSFET un optoacoplador, el cual, además de controlar el interruptor, ofrece aislamiento galvánico entre el control y la potencia.

Cabe destacar que, al tratarse de una carga puramente inductiva, se producirán picos de tensión inversa elevada durante las sucesivas conmutaciones, por ello y con fin de quitar ese trabajo al diodo interno del MOSFET, se coloca un diodo de recuperación en antiparalelo a la carga de modo que, al producirse los estos picos de tensión inversa, el diodo conducirá, disipando esta energía en la propia bobina.

A continuación, se muestra el diseño electrónico:

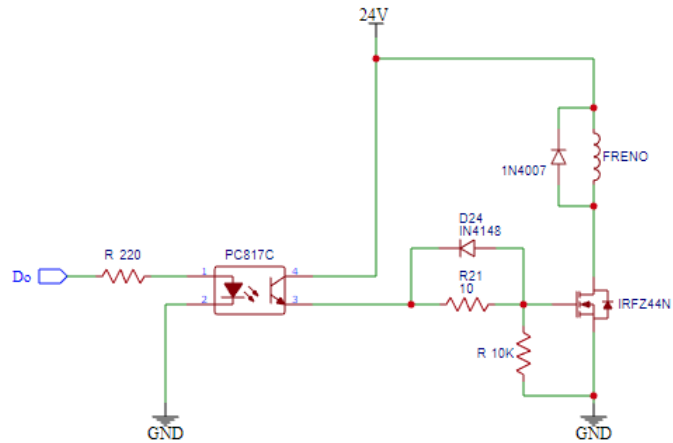


Figura 67. Diseño electrónico de la PCB del freno magnético. Fuente [Propia]

#### 4.2.3.3. Fabricación de la PCB

Siguiendo el mismo método de fabricación que en las placas anteriores, se incluyen las imágenes:

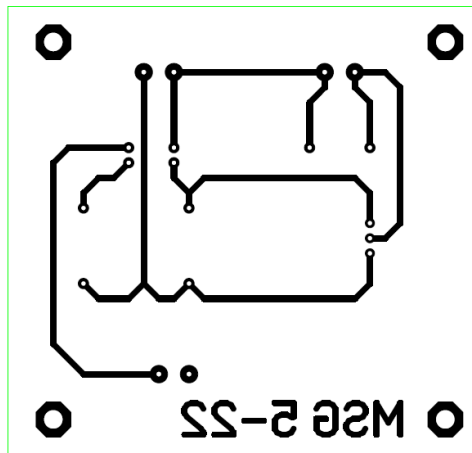


Figura 68. Fotelito de la PCB del freno magnético. Fuente [Propia]



Figura 69. PCB del freno magnético finalizada. Fuente [Propia]

---

## 4.3. Sistema

Una vez presentado todo el hardware, es el momento de hacerlo trabajar en conjunto, en este apartado se detallará la interconexión entre componentes, montajes y demás aspectos técnicos.

### 4.3.1. Magnitudes a monitorizar

El sistema correspondiente al diagrama de bloques del apartado anterior tiene como objetivo someter al motor BLDC a ensayos, donde, a través del hardware desarrollado se puedan controlar sus condiciones de trabajo.

Para ello se ha decidido monitorizar las siguientes magnitudes:

- Corriente consumida por el motor.
- Revoluciones por minuto en el eje de salida de la reductora.
- Par resistente ofrecido por el freno magnético.
- Temperatura del disipador de calor de la placa inversora.

### 4.3.2. Selección y explicación de dispositivos y elementos

En este apartado se justificará el motivo de elección de ciertos dispositivos.

#### 4.3.2.1. Microcontrolador y tarjeta de adquisición de datos

Para poder alcanzar los objetivos propuestos en el apartado anterior, se decide encomendar la parte de control de la PCB de potencia y el freno magnético a un microcontrolador el cual solo se dedicará a esta tarea, ya que la velocidad en este proceso es esencial para que el giro del motor sea lo más suave posible. En este caso, para el control del motor y el freno magnético se emplea un Arduino Mega, el cual durante las pruebas ha demostrado ser capaz de soportar la carga de trabajo que implica esta tarea.



Figura 70. Arduino Mega. Fuente:[33]



Por otro lado, para el proceso de monitoreo, se decide emplear la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments NI6001, la cual trabaja con el entorno Labview y permite realizar una interfaz de usuario.



Figura 71. Tarjeta de adquisición de datos NI6001. Fuente:[34]

#### 4.3.2.2. Sensores

Para medir la temperatura del disipador de calor de la PCB de potencia, se decide emplear el popular sensor LM35, el cual proporciona una tensión proporcional a la temperatura medida, se elige este sensor debido a su facilidad de uso, disponer de una salida analógica, baja necesidad de precisión y su bajo coste.

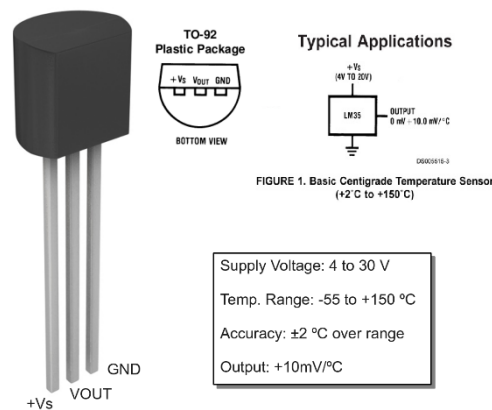
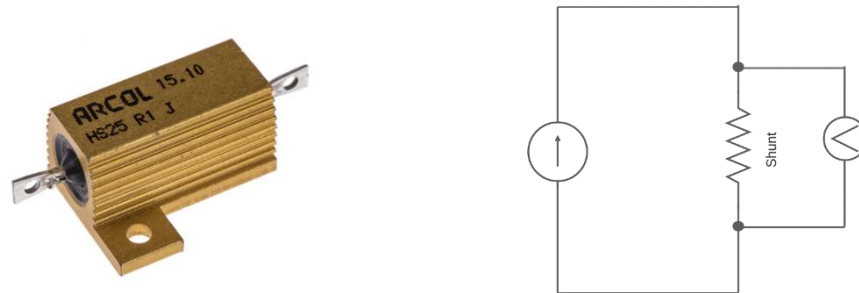


Figura 72. Sensor de temperatura LM35. Fuente:[35]

La medición de corriente se realiza con una resistencia *Shunt* de 0,1  $\Omega$ , esta resistencia se instala interrumpiendo la corriente que se quiere medir, la cual al atravesar la resistencia provocará una caída de tensión en sus extremos proporcional a la corriente medida, se emplea este método debido a su sencillez de uso, proporcionar una señal optima y su bajo coste.



Para este propósito se emplea una resistencia de potencia, capaz de disipar la energía a la que se somete sin comprometer al componente.



**Figura 73.** Resistencia Shunt y su circuito de medida. Fuentes:[36] [Propia]

Finalmente, para monitorizar las revoluciones del motor, se intenta en un principio leer pulsos de uno de los sensores de efecto hall del motor, lamentablemente la frecuencia es tan elevada que la tarjeta de adquisición de datos, no es capaz de leerlos correctamente.

Se opta por implementar una dinamo tacométrica, de modo que se obtiene una señal analógica proporcional a las revoluciones del motor y la tarjeta de adquisición puede leer el valor de la misma cuando lo requiera.

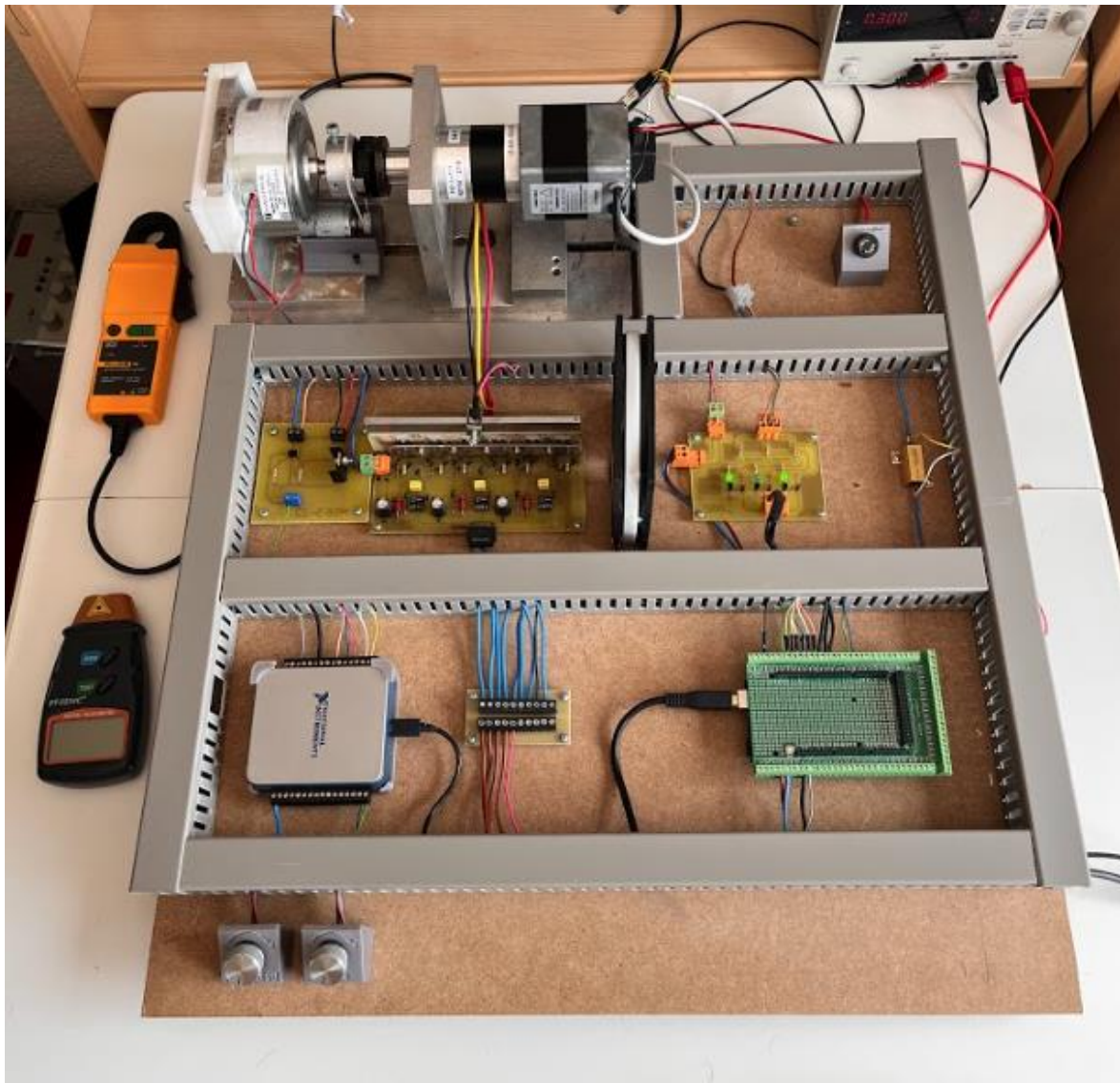
La dinamo se acopla al eje de salida empleando una polea, de modo que la rotación del motor se transmite al eje de la dinamo, generando así la señal deseada.



**Figura 74.** Montaje de la dinamo tacométrica. Fuente [Propia]



A continuación, se muestran distintas imágenes del montaje real:



*Figura 76. Vista superior del montaje realizado. Fuente [Propia]*



*Figura 77. Vista global del montaje realizado. Fuente [Propia]*



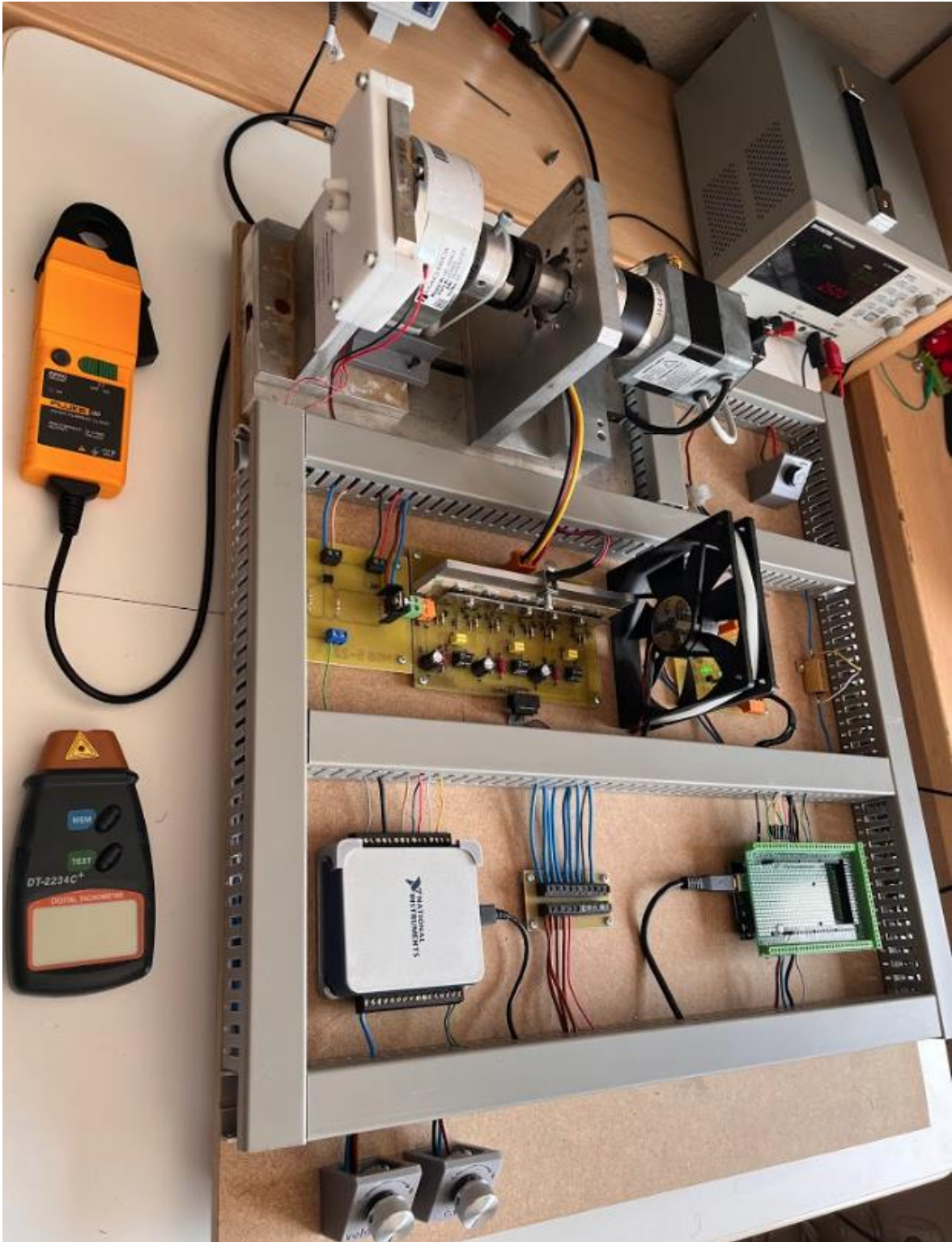


Figura 78. Detalle del montaje realizado. Fuente [Propia]

#### 4.3.3.1. **Microcontrolador**

Es programado para generar las señales de activación de los interruptores de la PCB de potencia en el orden específico según la posición registrada por los sensores de efecto hall, también se encarga de controlar la consigna de la PCB de freno en función de la entrada analógica (A.I) procedente de la tarjeta de adquisición de datos.

Mediante dos entradas digitales, se especifica si el motor debe girar o no y el sentido de giro.

#### 4.3.3.2. **PCB de potencia**

Se encarga de realizar la conmutación de los interruptores del convertidor continua-alterna de su interior, generando tres ondas alternas a su salida que alimentarán al motor, estas órdenes son recibidas del microcontrolador.

#### 4.3.3.3. **Sensor de temperatura**

Se ubica en el disipador de calor de la PCB de potencia y registra la temperatura del mismo a modo de supervisión para ordenar el paro de emergencia en caso de que esta aumente por encima de un límite de seguridad prefijado y exista riesgo de avería.

#### 4.3.3.4. **Shunt**

Resistencia de sensado de corriente, la cual experimenta en sus extremos una caída de tensión proporcional a la corriente que circula por ella, la cual es monitorizada por la tarjeta de adquisición de datos.

#### 4.3.3.5. **Amperímetros**

Se trata de pinzas amperimétricas externas las cuales permiten visualizar la corriente de línea del motor.

#### 4.3.3.6. **Osciloscopio**

Se emplea para visualizar la forma de onda captada por los amperímetros.

#### 4.3.3.7. **Motor BLDC**

Motor sin escobillas de corriente continua, la conexión de alimentación se produce por los terminales U, V y W y las señales de posicionado del rotor se envían a través de H1, H2 y H3.

---

#### 4.3.3.8. **PCB acondicionado de los sensores de efecto hall**

Acondiciona la señal de los sensores de efecto hall a niveles comprensibles por el microcontrolador.

#### 4.3.3.9. **Dinamo tacométrica**

Se trata de una dinamo cuyo eje está conectado por una polea al eje del motor, generando una tensión DC proporcional a las r.p.m del motor BLDC, dicha tensión es monitorizada por la tarjeta de adquisición de datos.

#### 4.3.3.10. **PCB Freno**

Se trata de una placa electrónica que amplifica la señal de control proporcionada por el microcontrolador y le permite a este controlar la corriente que circula por el freno magnético.

#### 4.3.3.11. **Freno magnético**

Se trata de un freno que opone un par resistente al motor proporcional a la corriente que circula por el mismo, se monitoriza el nivel de par resistente producido.

#### 4.3.3.12. **Fuente DC**

Proporciona la energía necesaria para operar el motor, mediante comunicación serie, se puede modificar los parámetros de salida, regulando así la tensión y en consecuencia la velocidad angular del eje del motor

#### 4.3.3.13. **Tarjeta de adquisición de datos**

Permite a la interfaz de usuario adquirir, escribir y visualizar los datos captados.

#### 4.3.3.14. **Carga**

Potenciómetro que permite ajustar la carga del motor en modo manual.

#### 4.3.3.15. **Ordenador**

Visualiza y procesa la interfaz de usuario.

#### 4.3.3.16. **Base de datos**

Permite almacenar los datos adquiridos durante el estudio del motor para su posterior análisis.

#### 4.3.4. Programación del microcontrolador

En este apartado se explicará de manera resumida la programación realizada para controlar el motor.

A continuación, se muestra el microcontrolador y sus entradas y salidas de forma esquemática:

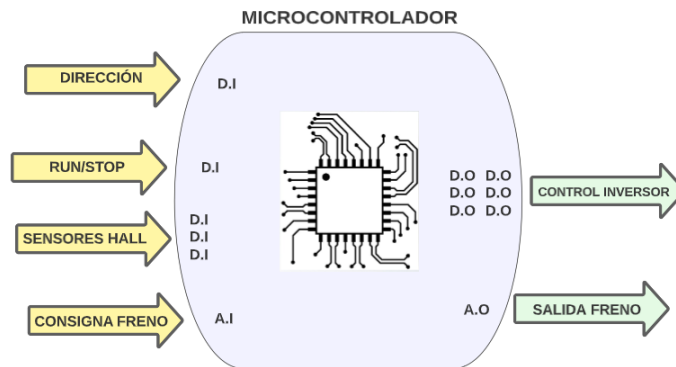


Figura 79. Diagrama de bloques de entradas y salidas del microcontrolador. Fuente [Propia]

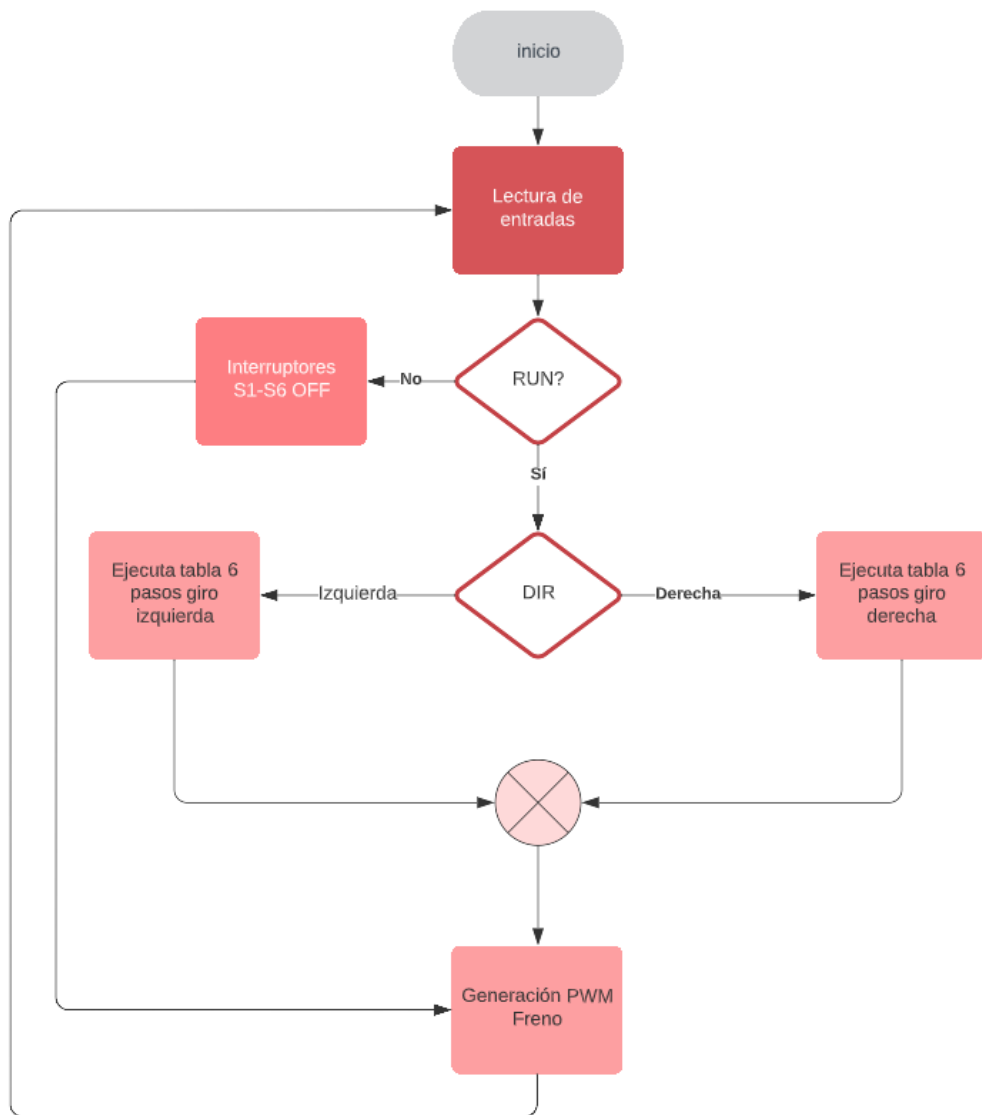
El grueso del programa radicará en ejecutar la secuencia de 6 pasos, comentada durante este documento, según la lectura de los sensores de efecto hall.

Asimismo, se establecen dos entradas digitales para habilitar o no el giro y seleccionar el sentido.

Adicionalmente, el microcontrolador gestionará la señal PWM correspondiente al freno magnético, dicha gestión consiste en captar la consigna de frenada mediante una entrada analógica para, posteriormente, traspasarla a la salida en formato PWM.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo de la programación del microcontrolador y capturas de pantalla de los segmentos de código más relevantes:





**Figura 80.** Diagrama de flujo del programa del microcontrolador. Fuente [Propia]

```
// Declaración e inicialización de variables globales
int  ConsignaFrenoNI = 0;
int  ConsignaFrenoBancada = 0;
bool RUN = 0; //Variable que activa o no el giro del motor
bool DIR = 0; //Variable que indica el sentido de giro del motor

//Variables correspondientes a la asignacion de pines

//Control
int pinDIR = 14;
int pinRUN = 15;

//Halls
int A = 4;
int B = 2;
int C = 3;

//Interruptores
int S1 = 5;
int S2 = 6;
int S3 = 7;
int S4 = 8;
int S5 = 9;
int S6 = 10;

//Freno magnetico
int Freno = 11;

void setup(){
  //Configuración de los pines

  //Interruptores inversor
  pinMode(S1, OUTPUT);
  pinMode(S2, OUTPUT);
  pinMode(S3, OUTPUT);
  pinMode(S4, OUTPUT);
  pinMode(S5, OUTPUT);
  pinMode(S6, OUTPUT);

  //Freno magnetico
  pinMode(Freno, OUTPUT);

  //Halls
  pinMode(A, INPUT);
  pinMode(B, INPUT);
  pinMode(C, INPUT);

  //Control
  pinMode(pinDIR, INPUT);
  pinMode(pinRUN, INPUT);
}

void loop(){

  // lectura consigna freno proporcionada por la tarjeta de adquisicion de datos
  ConsignaFrenoNI = analogRead(A1);
  // lectura consigna freno proporcionada por el potenciómetro de carga
  ConsignaFrenoBancada = analogRead(A0);

  //Se prioriza el potenciómetro de la bancada
  if (ConsignaFrenoBancada >= 5){
    ConsignaFrenoBancada = map(ConsignaFrenoBancada, 0, 1023, 0, 255);
    analogWrite(Freno,ConsignaFrenoBancada);
  }else{
    ConsignaFrenoNI = map(ConsignaFrenoNI, 0, 1023, 0, 255);
    analogWrite(Freno,ConsignaFrenoNI);
  }
}
```

```

//Lectura de las señales de control
RUN = digitalRead(pinRUN);
DIR = digitalRead(pinDIR);

// Si RUN está activo, se procede a distinguir el sentido de giro
if (RUN == 1){

    //Lectura del sentido de giro deseado
    if(DIR == 1){
        // señal leida de los halls = 001
        if (digitalRead(A)==0){
            if (digitalRead(B)==0){
                if (digitalRead(C)==1){
                    //Se activan los interruptores correspondientes
                    digitalWrite(S1,1);digitalWrite(S2,0);digitalWrite(S3,0);
                    digitalWrite(S4,1);digitalWrite(S5,0);digitalWrite(S6,0);}}}
    }
    else{
        //Inversión de giro

        //señal leida de los halls = 001
        if (digitalRead(A)==0){
            if (digitalRead(B)==0){
                if (digitalRead(C)==1){
                    //Se activan los interruptores correspondientes
                    digitalWrite(S1,0);digitalWrite(S2,1);digitalWrite(S3,1);
                    digitalWrite(S4,0);digitalWrite(S5,0);digitalWrite(S6,0);}}}

        // si RUN no esta activo, interruptores en apagados
        else{
            digitalWrite(S1,0);digitalWrite(S2,0);digitalWrite(S3,0);
            digitalWrite(S4,0);digitalWrite(S5,0);digitalWrite(S6,0);
        }
    }
}

```

### 4.3.5. Programación en Labview

La tarjeta de adquisición de datos está conectada físicamente a las variables a medir y se comunica con el ordenador, donde se ejecuta el programa de la interfaz de usuario.

Labview es un entorno de programación gráfico ampliamente utilizado en investigación, que permite de una forma relativamente sencilla trabajar con los datos adquiridos y realizar interfaces de usuario con instrumentación virtual entre otras muchas funcionalidades.

#### 4.3.5.1. La interfaz de usuario

Para este trabajo, se diseña una interfaz básica la cual se muestra y explica a continuación:

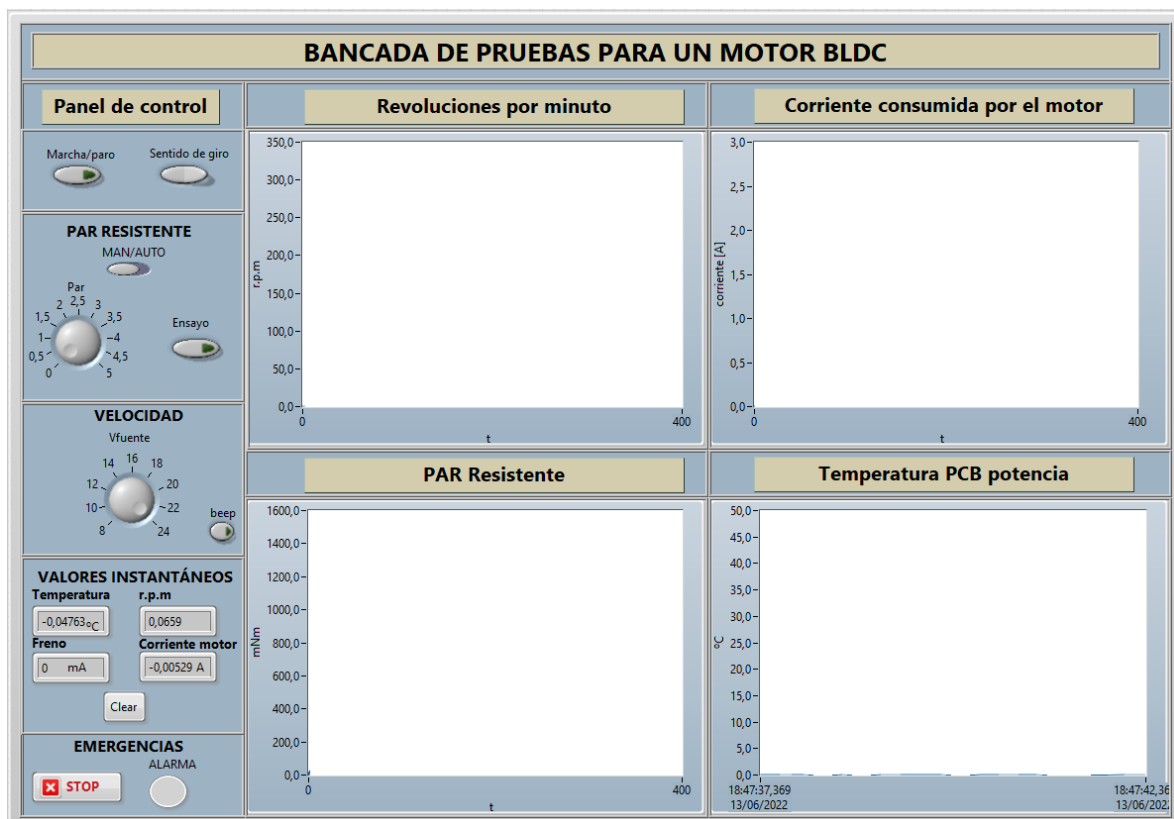


Figura 81. Interfaz de usuario realizada en Labview. Fuente [Propia]

Seguidamente se explica la funcionalidad de los distintos elementos:



Figura 82. Controles de marcha y sentido de giro de la interfaz. Fuente [Propia]

Mediante el interruptor de (Marcha/paro) se habilita el giro o no del motor y mediante el conmutador (Sentido de giro) se establece la dirección de rotación del motor.



Figura 83. Control del par resistente. Fuente [Propia]

En la sección de par resistente se controla el nivel de actuación del freno magnético, para ello se ha de seleccionar si se quiere emplear en modo automático o manual.

El modo manual permite ajustar el freno mediante el dial (Par) a gusto del usuario.

El modo automático habilita el interruptor (Ensayo) con el cual la actuación del freno se aumenta progresivamente de manera autónoma.



Figura 84. Control de la velocidad del motor. Fuente [Propia]

El apartado de velocidad permite al usuario emplear en todo momento el dial (Vfuelle) con el que se controla la tensión de la fuente de alimentación externa mediante comunicación serie.



Figura 85. Visualización de valores instantáneos. Fuente [Propia]

Los valores instantáneos mostrados en esta sección permiten al usuario observar los valores leídos, estos valores son de carácter orientativo debido a las fluctuaciones en la medida.

El pulsador (Clear) permite borrar el contenido de las gráficas.



Figura 86. Parada de emergencia. Fuente [Propia]

Las emergencias comprenden, el pulsador (STOP) que implica una parada de emergencia del sistema y el piloto (Alarma), que se activa al sobrepasar una temperatura de seguridad del disipador de calor de la placa de potencia, la cual es fijada con anterioridad, este hecho comporta, de igual modo, la detención del sistema, parando el motor.

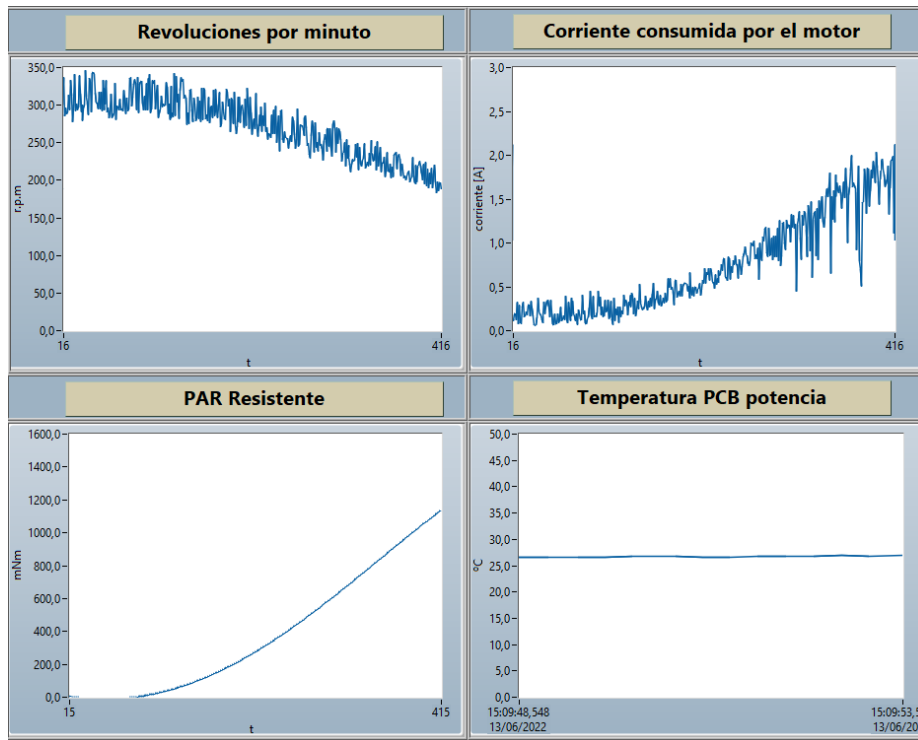


Figura 87. Graficas de las variables medidas. Fuente [Propia]

El apartado de graficas de la interfaz está destinado a observar en tiempo real el progreso de las variables monitorizadas.

#### 4.3.5.2. Consideraciones previas sobre el programa principal

Antes de explicar la programación de Labview se necesitan aclarar un par de aspectos, lo cual se hace a continuación.

##### 3.3.5.2.1. Control de la fuente de alimentación

Como se ha comentado anteriormente en el documento, uno de los métodos para conseguir variar la velocidad de giro del motor, radica en esencia, en ajustar el nivel de tensión proporcionado a las bobinas estáticas.

Lo cual comúnmente se realiza empleando la técnica PWM ya explicada, sin embargo, esta técnica aun consiguiendo variar el nivel de tensión, lo realiza empleando conmutaciones provocando ruido eléctrico.

Puesto que el objetivo es realizar una bancada de pruebas, se realiza el ajuste de tensión directamente desde la fuente de alimentación que alimenta al motor, de modo que se evitan las conmutaciones sucesivas de los interruptores de la placa de potencia, resultando así en un ensayo con resultados más fieles al verdadero comportamiento del motor.

Para realizar esta función de manera virtual, sin tener que manipular la fuente e integrando todo en un mismo entorno, se emplea una fuente de alimentación programable, la cual puede ser ajustada mediante comunicación serie y, por lo tanto, mediante Labview.

Para ajustar el nivel de tensión de la fuente se envía un string con el siguiente formato: VSET1:XX.XXXX. [37]

Donde las X representan el nivel de tensión en V, en la interfaz solo se ajustará la tensión en incrementos de 1 V por cuestiones prácticas.



Figura 88. Fuente de alimentación programable empleada. Fuente:[37]

### 3.3.5.2.2. Monitorización del freno magnético

Puesto que no se dispone de un sensor capaz de medir el par, se toma como referencia la curva característica del freno facilitada por el fabricante, la cual relaciona corriente en mA y par en mNm.

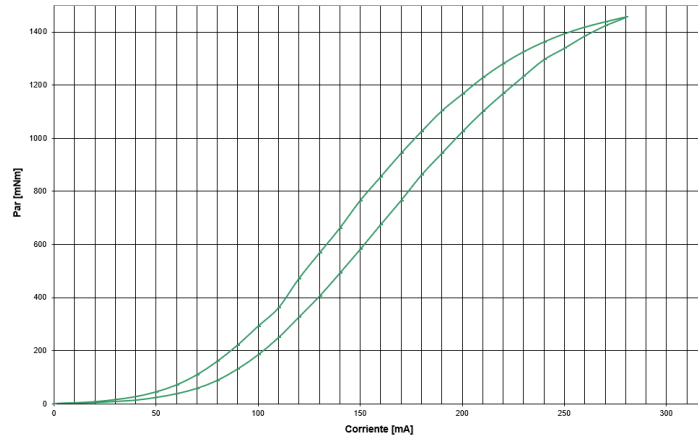


Figura 89. Caracterización del freno magnético empleado. Fuente:[23]

Simplificando el freno a una resistencia y conociendo el duty cycle de la onda aplicada, es posible calcular fácilmente la corriente entregada al freno mediante la ley de Ohm.

Para ello, se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Valor medido de la resistencia interna del freno} = R_{freno} = 95,7 \Omega \quad (\text{Ec. 23})$$

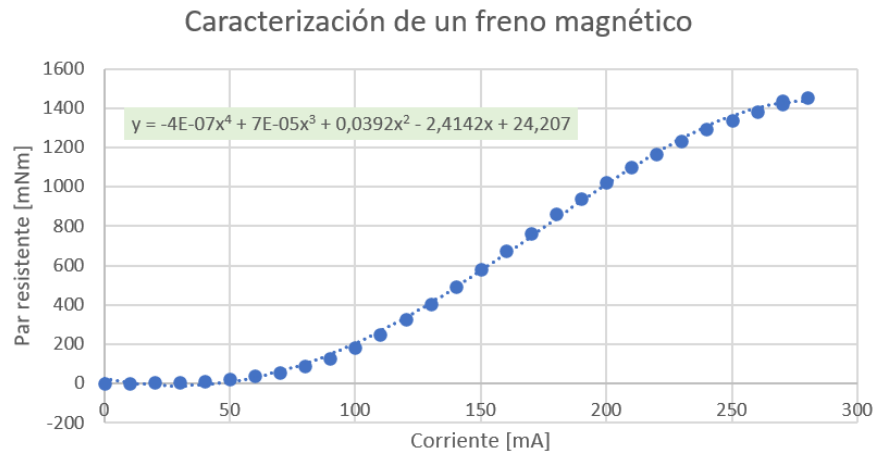
$$\text{Tensión de la fuente de alimentación} = \text{amplitud} = 24 \text{ Vdc} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\text{Tensión media aplicada al freno [V]} = V_{freno} = \text{duty cycle [\%]} \cdot \text{amplitud} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\text{Corriente Freno [mA]} = I_{freno} = \frac{V_{freno}}{R_{freno}} \cdot 1000 \quad (\text{Ec. 26})$$



Una vez se dispone de la corriente en mA que circula por el freno, se emplean las correlaciones proporcionadas por el fabricante en mA vs. mNm (solo las de magnetización) y se realiza un gráfico empleando la herramienta Excel, en la que se añade una línea de tendencia polinómica de grado 4 que se adapta al recorrido original con exactitud, empleando este polinomio es posible calcular el par aplicado al motor sin necesidad de un sensor específico, aunque se corre el riesgo de confiar ciegamente en el fabricante.

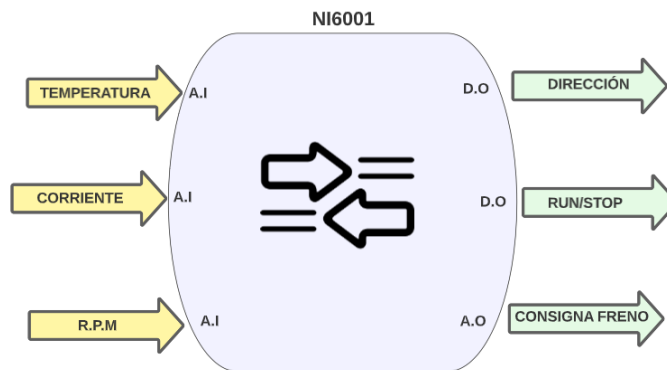


*Figura 90. Aproximación de la curva de caracterización del freno magnético mediante un polinomio de grado 4. Fuente [Propia]*

#### 4.3.5.3. Programa principal

En este apartado se tratará de explicar los principales aspectos del programa principal de la interfaz gráfica.

En primer lugar, se muestra un esquema de las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos NI6001:



*Figura 91. Diagrama de bloques de las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos. Fuente [Propia]*

A continuación, se muestra una imagen global del programa:

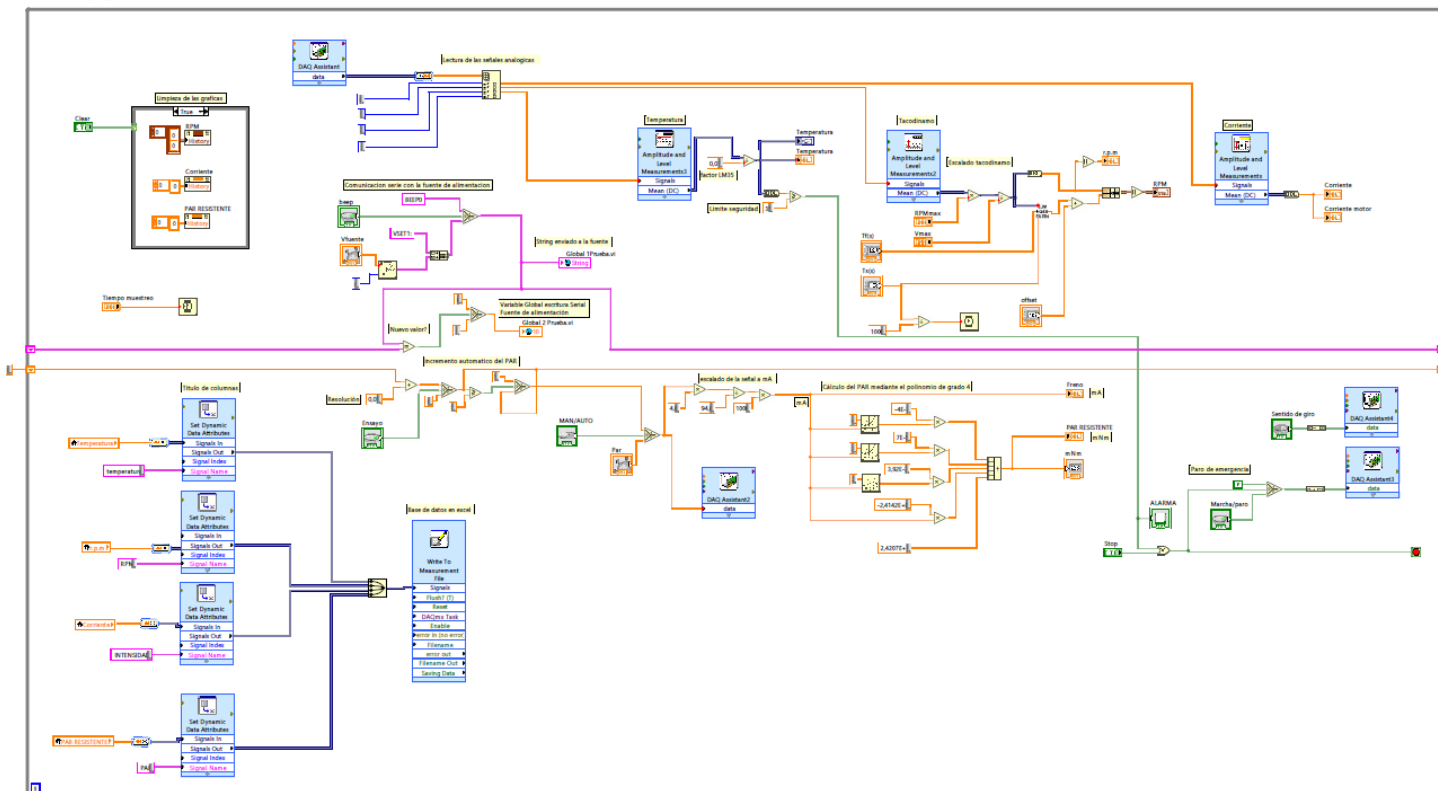


Figura 92. Vista global del programa de la interfaz de usuario. Fuente [Propia]

Seguidamente se procede a explicar las partes más relevantes:

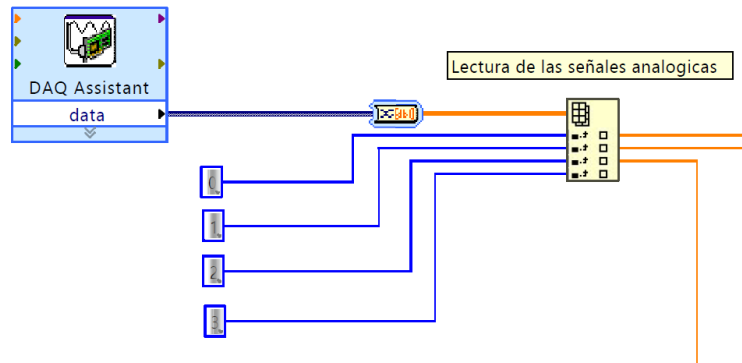


Figura 93. Lectura de señales analógicas. Fuente [Propia]

Mediante el DAQ Assistant se configura la adquisición de 4 entradas analógicas, las cuales se vuelcan de una en una, por lo que se indexan en 4 arrays, los cuales pueden ser leídos de forma independiente.

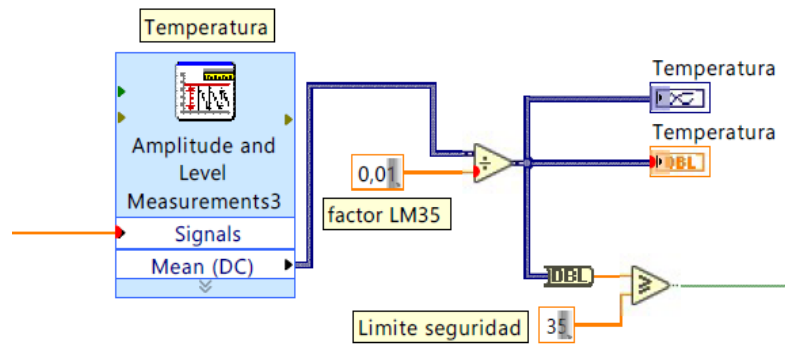


Figura 94. Procesado de la señal de temperatura adquirida. Fuente [Propia]

La señal analógica correspondiente a la temperatura se envía al módulo (Amplitude and level measurements) el cual se ha configurado para devolver la media DC de las señales, este paso se realiza para intentar estabilizar la señal lo máximo posible antes de ser procesada.

A continuación, el valor medio se divide por 0,01 para obtener grados centígrados, ya que el sensor devuelve 10 mV/°C, luego de esto, el valor se envía a la gráfica del panel y a la base de datos.

Finalmente se establece un límite de temperatura, en este caso, 35°C que, al ser alcanzado o sobrepasado, detendrá el motor y el programa.

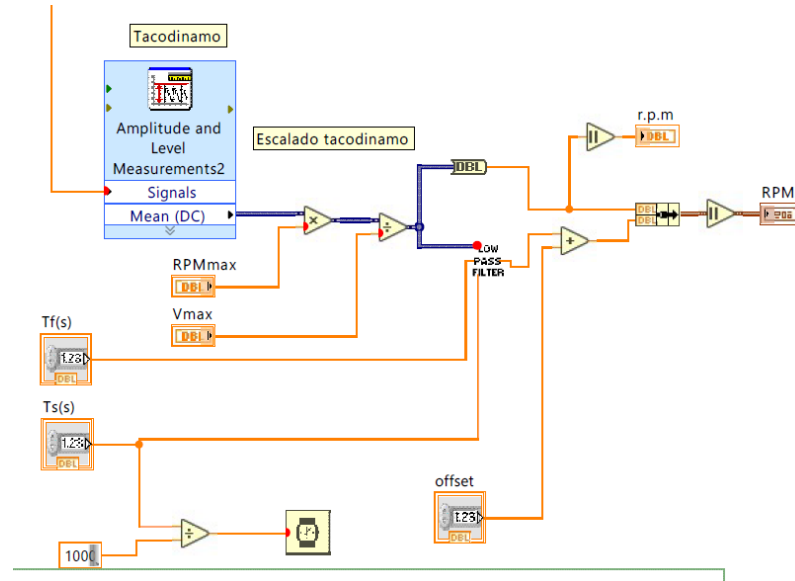


Figura 95. Procesado de la señal generada por la tacodinamo. Fuente [Propia]

La señal procedente de la tacodinamo se procesa de igual manera para obtener la media, seguidamente se escala, aplicando el factor de revoluciones por minuto máximas (obtenido con un tacómetro digital) y la tensión máxima (medida).

Puesto que la señal de la tacodinamo presenta muchas oscilaciones bruscas, se implementa un filtro pasa bajos para suavizarlas, finalmente a la señal se le aplica la función de valor absoluto ya que al invertir el giro se invierte la polaridad y se procede a graficar y enviar a la base de datos.

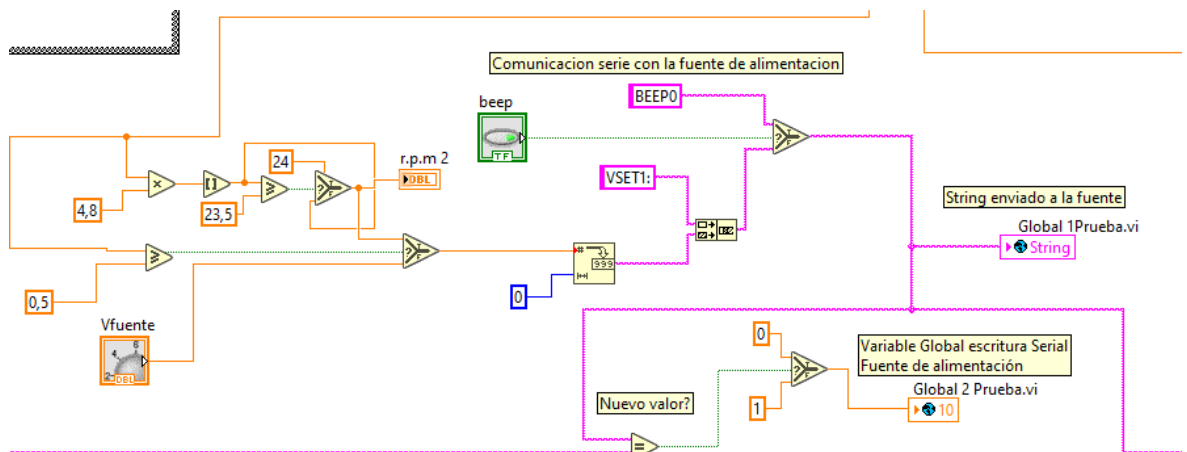


Figura 96. Control de la comunicación serie de la fuente de alimentación programable. Fuente [Propia]

En la figura anterior se realiza la creación de la cadena de caracteres a enviar por puerto serie a la fuente de alimentación, para ello, se toma la lectura del dial virtual y del potenciómetro de la bancada, y se truncan a la unidad, de modo que los incrementos serán de 1 V y limitado a 24 V.

Entre ambos controles, se prioriza el potenciómetro de la bancada sobre el dial virtual y se realiza una concatenación de strings en la que se incluye el valor deseado, el string final, solo se envía si es diferente al string de la iteración anterior.

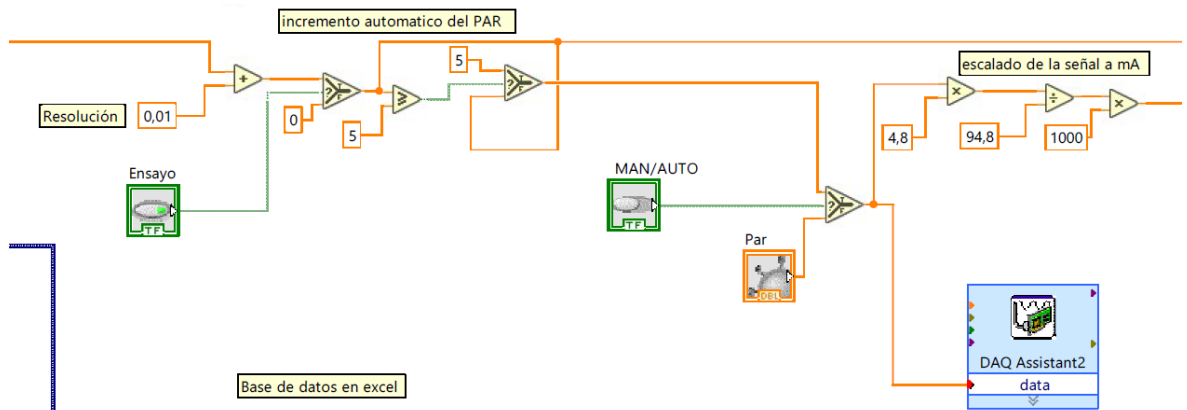


Figura 97. Programación del incremento automático del par resistente y su conversión a corriente. Fuente [Propia]

En el fragmento de programa anterior se tiene en cuenta el estado del selector manual/automático el cual dará paso al dial virtual o al incremento automático de 0 a 5 en intervalos de 0,01 generado en el ensayo.

Dicho número entre 0 y 5 es aplicado al DAQ Assistant, que está configurado como salida analógica y proporciona al Arduino la consigna de freno.

Asimismo, la variable correspondiente al incremento del par es escalada a un rango de 0 – 24 V, para ello se multiplica por un factor de 4,8.

Seguidamente para convertir calcular la corriente que circula por el freno en mA a partir de la tensión aplicada, se divide por la resistencia interna medida del freno para obtener amperios y se multiplica por 1000 para obtener finalmente mA.

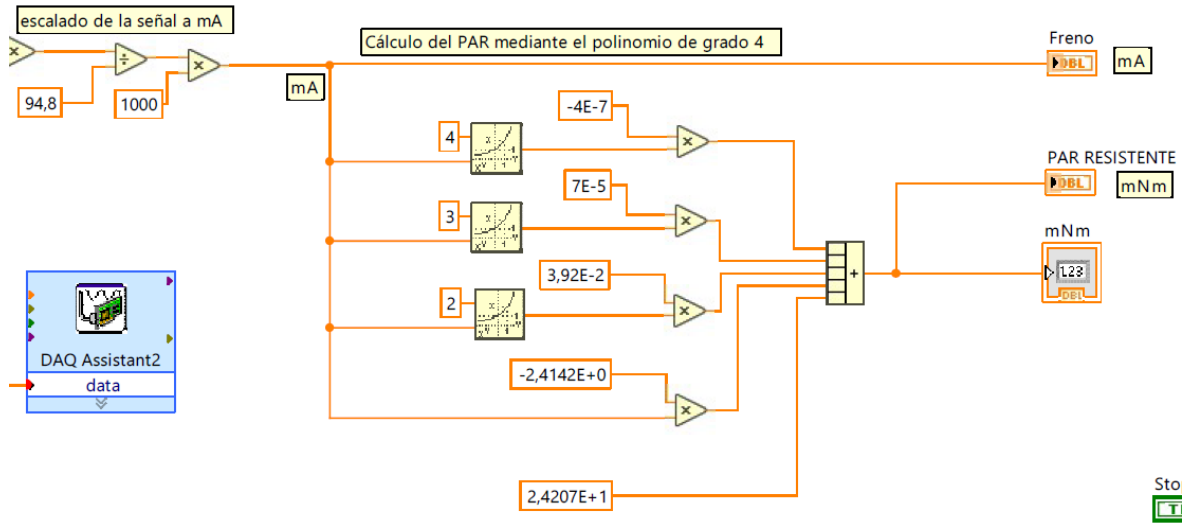


Figura 98. Cálculo del par resistente generado empleando el polinomio de grado 4. Fuente [Propia]

Una vez la corriente es calculada en mA, se puede aplicar el polinomio de grado 4 calculado con Excel, para ello, en primer lugar, se calculan los términos de forma independiente, elevando la corriente a la potencia correspondiente y multiplicándola por el factor que corresponda, finalmente se suman todos los términos y se obtiene el resultado en mNm, este resultado es graficado y enviado a la base de datos.

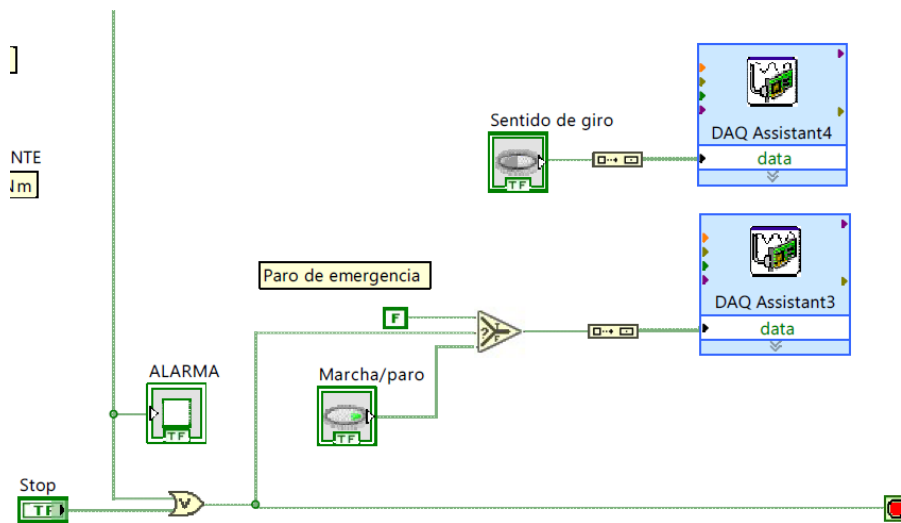


Figura 99. Parada de emergencia. Fuente [Propia]

El paro de emergencia y la señal de alarma son aplicados a una puerta lógica OR que cuando su salida está activa ordena prioriza el paro del motor al estado del interruptor de marcha y finalmente detiene el programa.

El DAQ Assistant 3 se corresponde con la señal digital de salida RUN y el DAQ Assistant 4 con la señal DIR.

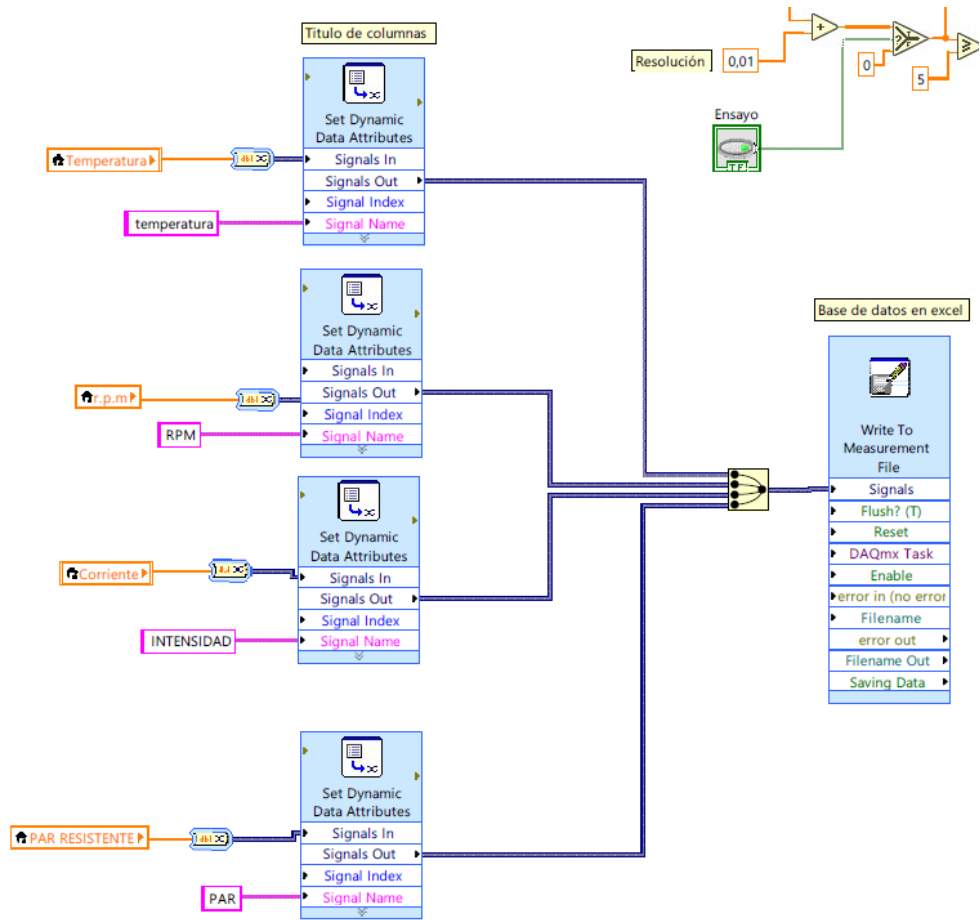


Figura 100. Volcado en la base de datos. Fuente [Propia]

Finalmente, los datos adquiridos son asignados a columnas de Excel con los nombres especificados y son guardados en un documento con extensión .xlsx en la carpeta especificada.

#### 4.3.6. Datos obtenidos durante un ensayo

Una vez realizado el ensayo, se obtiene un documento compatible con Excel, donde aparecen todos los datos recopilados de la siguiente forma:

	A	B	C	D	E
1	Time	temperatura	RPM	INTENSIDAD	PAR
2	#####	24,186103	248,281132	1,298059	22,994679
3	#####	26,506353	0,065882	-0,005292	22,994679
4	#####	26,506353	270,748891	0,266836	21,802511
5	#####	26,506353	316,219357	0,080643	20,630551
6	#####	26,37745	342,253428	0,352772	19,478851
7	#####	26,37745	328,166499	0,195224	18,347462
8	#####	26,37745	334,94249	0,080643	17,236438
9	#####	26,248547	297,67454	0,180901	16,145829
10	#####	26,248547	318,002513	0,223869	15,075686
11	#####	26,37745	299,992642	0,109289	14,026057
12	#####	26,248547	291,076864	0,238191	12,996993
13	#####	26,37745	291,611811	0,252514	11,988542
14	#####	26,37745	289,472024	0,223869	11,000752
15	#####	26,248547	295,891384	0,467352	10,03367
16	#####	26,248547	330,484601	0,209546	9,087343
17	#####	26,248547	297,852855	0,123611	8,161816
18	#####	26,37745	276,81878	0,180901	7,1727

Figura 101. Porción de datos recopilados durante un ensayo. Fuente [Propia]

Estos datos son tomados en función de la frecuencia de ejecución del bucle, la cual es determinada por un retraso establecido manualmente.



#### 4.3.7. Resultados experimentales

Finalmente, procesando los datos adquiridos, se pueden generar las curvas correspondientes al ensayo realizado.

A continuación, se muestran las curvas obtenidas para un ensayo en el que se incrementa el par de manera automática cuando el motor está girando a máximas r.p.m, añadiendo una línea de tendencia polinómica que consigue solventar el problema de las oscilaciones, asimismo, se presenta la ecuación de la línea de tendencia:

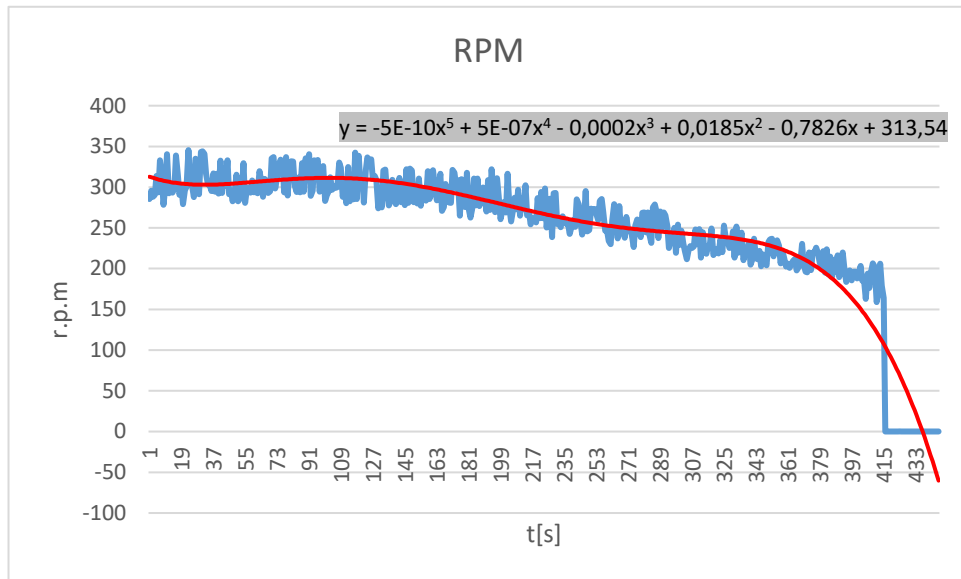


Figura 102. Curva de las r.p.m generada a partir de los datos recopilados. Fuente [Propia]

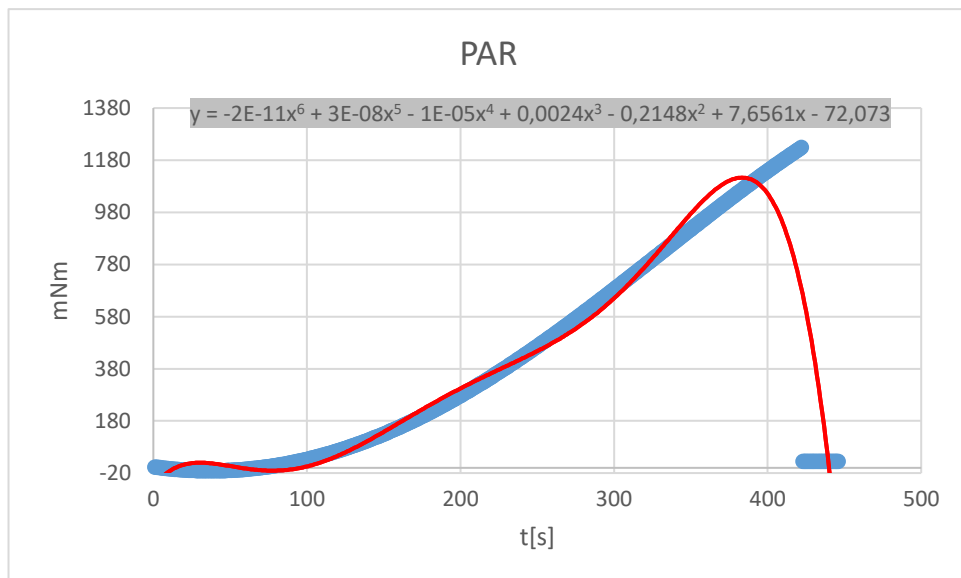


Figura 103. Curva de par generada a partir de los datos recopilados. Fuente [Propia]

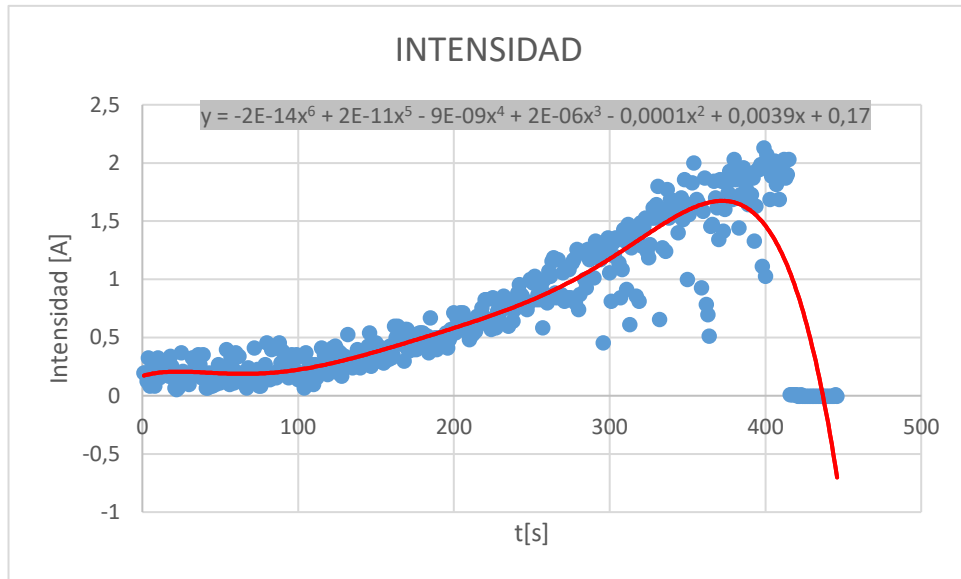


Figura 104. Curva de corriente generada a partir de los datos recopilados. Fuente [Propia]

Se puede observar que, en un inicio, cuando el par resistente aplicado es bajo, las revoluciones presentan su máximo y la corriente consumida el mínimo, seguidamente, a medida que el par aumenta la corriente también lo hace, llegando a un punto donde las r.p.m se ven afectadas y empiezan a caer progresivamente hasta que se alcanza el límite de potencia por la fuente, finalizando el ensayo.

Paralelamente podemos observar que la temperatura solo ha subido unos pocos grados, lo cual no es preocupante.

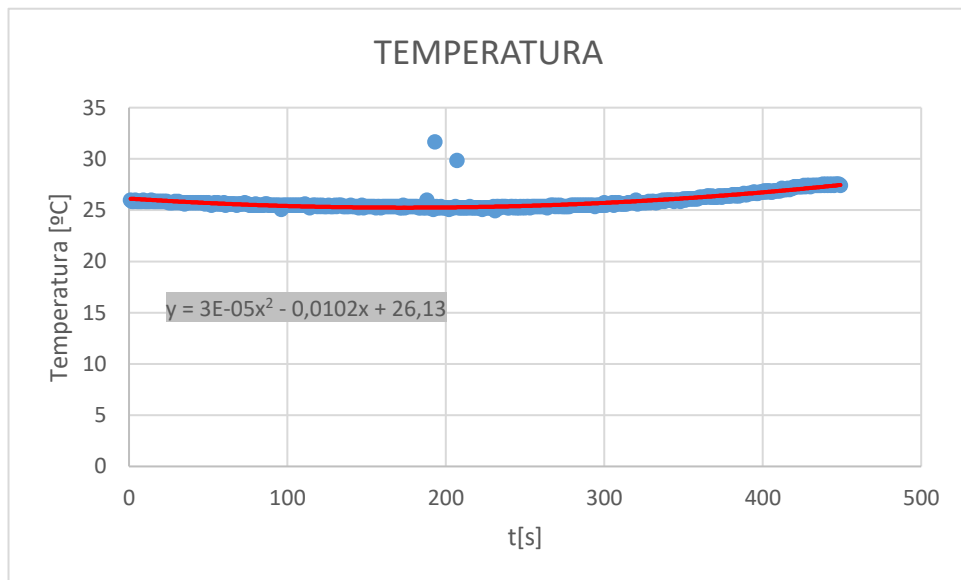


Figura 105. Curva de temperatura generada a partir de los datos recopilados. Fuente [Propia]

#### 4.3.8. Componentes empleados

A Continuación, se muestran todos los componentes empleados:

Material - Descripción - Partida PCB placa de potencia	fabricante	referencia	cantidad
PCB fotosensible 1 cara 100x160mm	REPROCIRCUIT	PD100X160	3
Drivers para MOSFET IR2101	International rectifiers	IR2101	6
Zocalo DIP 8 pack de 5	TE connectivity	110-87-308-41-001101	5
Diodo BY299	Diotec semiconductors	BY299	3
Diodo conmutacion rapida 1N4148	Onsemi	1N4148	6
Condensador de poliester de 470 nF	WIMA	FKP2/470/100/5	10
Diodo de recuperación rápida FR107	Taiwan Semiconductor	FR107G R0	10
MOSFET canal N IRFZ44N	Infineon	IRFZ44NPBF	7
Conector macho potencia 2 pin	Weidmuller	BL5.08/2	3
Conector hembra potencia 2 pin	Weidmuller	SL 5.08/2	3
Conector macho potencia 3 pin	Weidmuller	BL5.08/2	4
Conector hembra potencia 3 pin	Weidmuller	SL5.08/03/180B	4
Pad térmico disipación de calor	RS-PRO	707-4749	1
Pletina de aluminio para el disipador de calor	RS-PRO	682-185	1
Conector hembra 10 pin señal	TE connectivity	1658621-1	1
Resistencia 220R	TE connectivity	CFR100J200R	10
Resistencia 10K 1/4W	RS-PRO	707-7745	10
Resistencia 220K	TE connectivity	149-060	10
LED verde 5mm	Kingbright	L-53GD	5
Transistor NPN BC547	Onsemi	BC547BTA	10
Diodo rectificador 1N4007	VISHAY	1N4007G P-E/54	5
Optoacoplador PC817C	KingBright	KB817	5
Borna a tornillo 2 pin	IMO PRECISION Controls	20,501M/6	13
Arduino Mega	Arduimp	A000067	1
Shield conexión a tornillo para arduino Mega	null	TO339	1
Cable USB tipo B	StarTech.com	USB2HAB5M	1
Tarjeta adquisición de datos NI6001	National Instruments	782604-01	1
Sensor de temperatura LM35	Texas Instruments	LM35DZ/NOPB	1
Resistencia de potencia R1 25W	ArcoI	HS25R1J	1
Motor electrico CC (dinamo tacometrica)	null	196	1
Ventilador de refrigeración 120 mm	ebm-papst	4410FGM	1
Potenciómetro lineal 10K	Alps Alpine	RK1631110TWA	2
Cabezal potenciómetro	RS PRO	259-6913	5
Fuente de alimentación DC programable GPD-2303S	GWINSTEK	GPD-2303S	1
Osciloscopio digital 100MHz 2 canales Hantek DSO55102P	HANTEK	DSO55102P	1
Pinza amperimetrica AC/DC 100mV/A Fluke i30	FLUKE	FLUKE i30	2
Multímetro digital Promax	PROMAX	PD-350	1
Tacómetro digital DT-2234C+	null	DT-2234C+	1
HUB USB 4 tomas DigiLink	DigiLink	HUB4PortUSB	1
PC portatil MSI GF72 8RE	MSI	GF72 8RE	1

Tabla 3 Materiales empleados en el proyecto. Fuente [Propia]

## 4.4. Mediciones del sistema en funcionamiento

En este apartado se mostrarán las medidas más relevantes realizadas sobre la bancada.

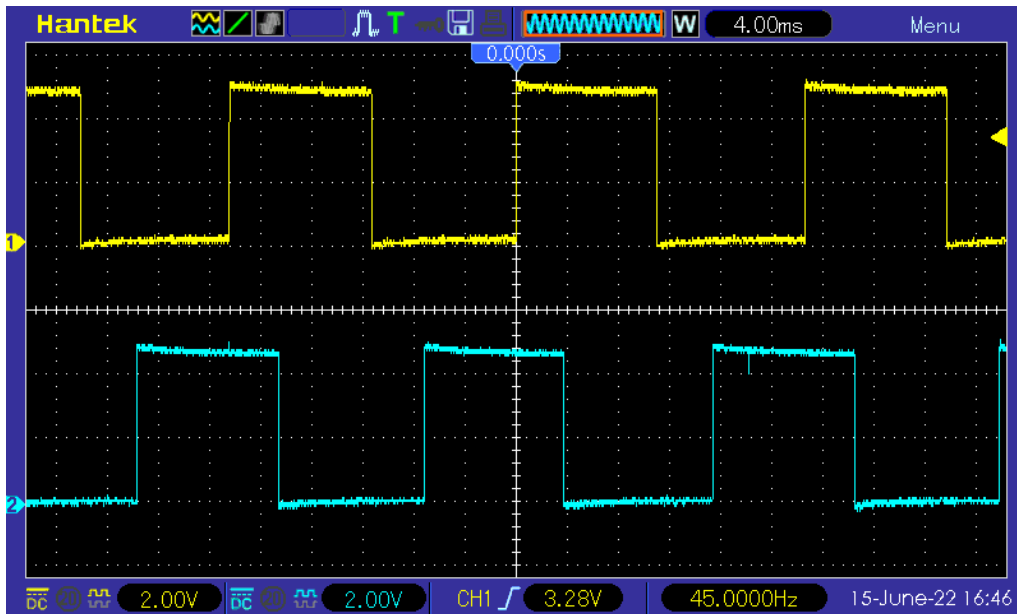


Figura 106. Señal de salida de los sensores de efecto Hall mientras el eje de salida gira a 198 r.p.m.  
Escala vertical CH1: 2 V/Div. Escala vertical CH2: 2 V/Div. Base de tiempo: 4 ms/Div. Fuente [Propia]

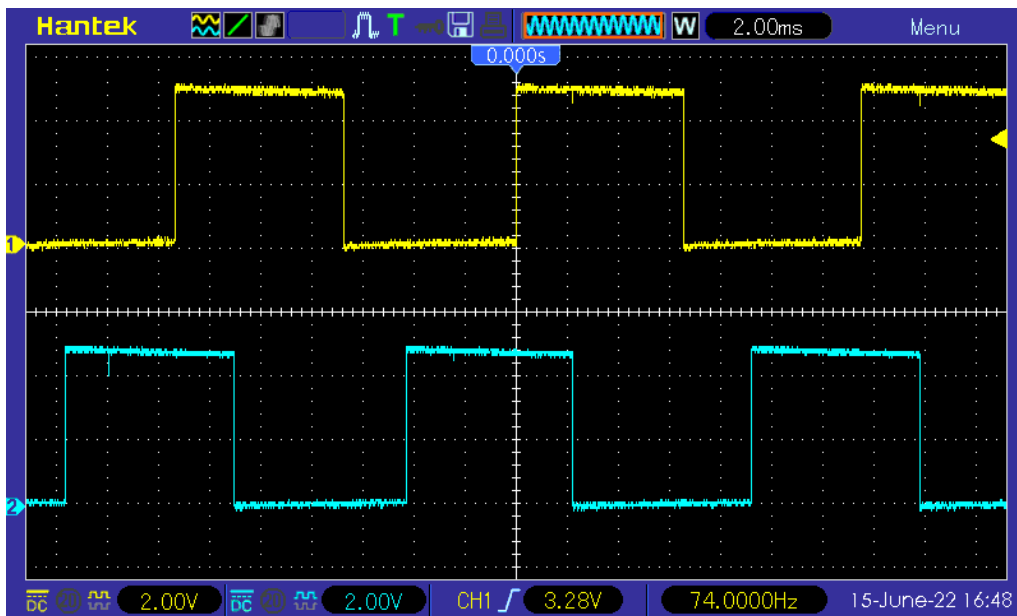
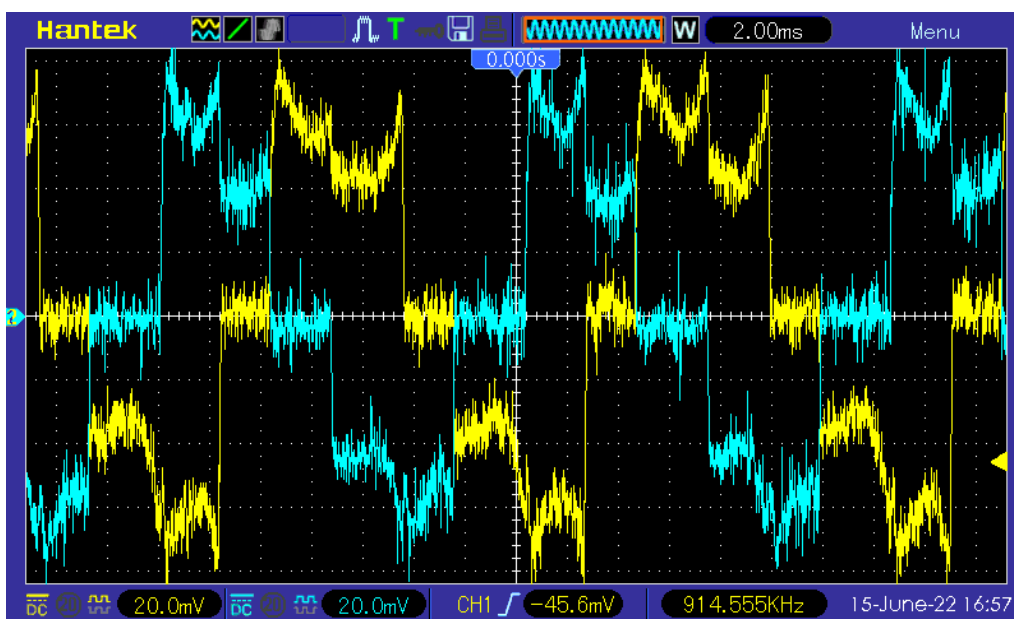
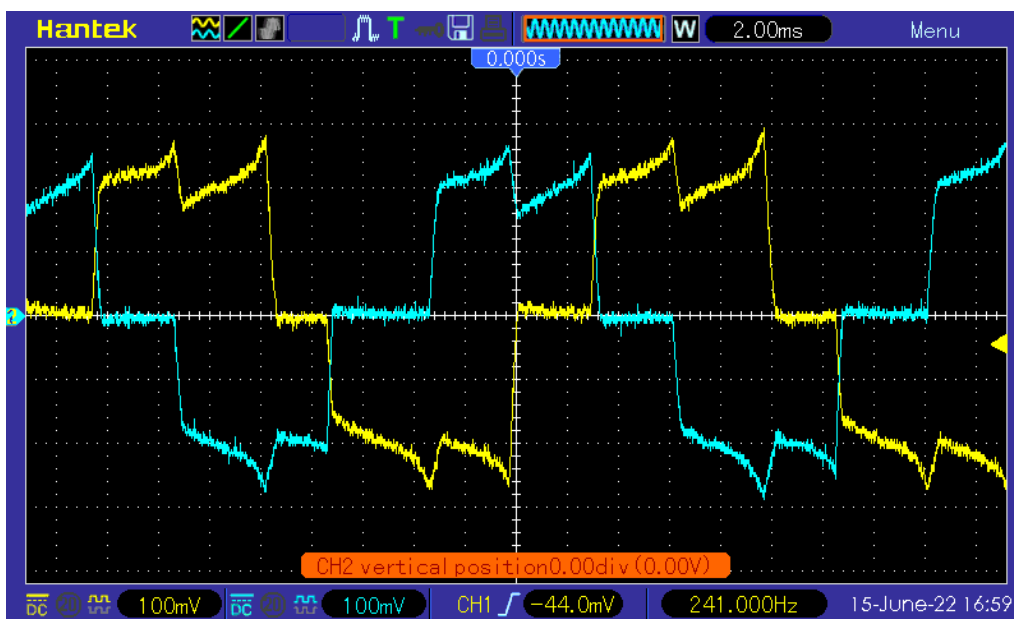


Figura 107. Señal de salida de los sensores de efecto Hall mientras el eje de salida gira a 332 r.p.m.  
Escala vertical CH1: 2 V/Div. Escala vertical CH2: 2 V/Div. Base de tiempo: 2 ms/Div. Fuente [Propia]



**Figura 108.** Corrientes de línea alimentando el motor a 24 V y con par resistente = 125 mNm  
 Escala vertical CH1: 20 mV/Div. Escala vertical CH2: 20 V/Div. Base de tiempo: 2 ms/Div. Fuente [Propia]



**Figura 109.** Corrientes de línea alimentando el motor a 24 V y con par resistente = 765 mNm  
 Escala vertical CH1: 100 mV/Div. Escala vertical CH2: 100 mV/Div. Base de tiempo: 2 ms/Div. Fuente [Propia]

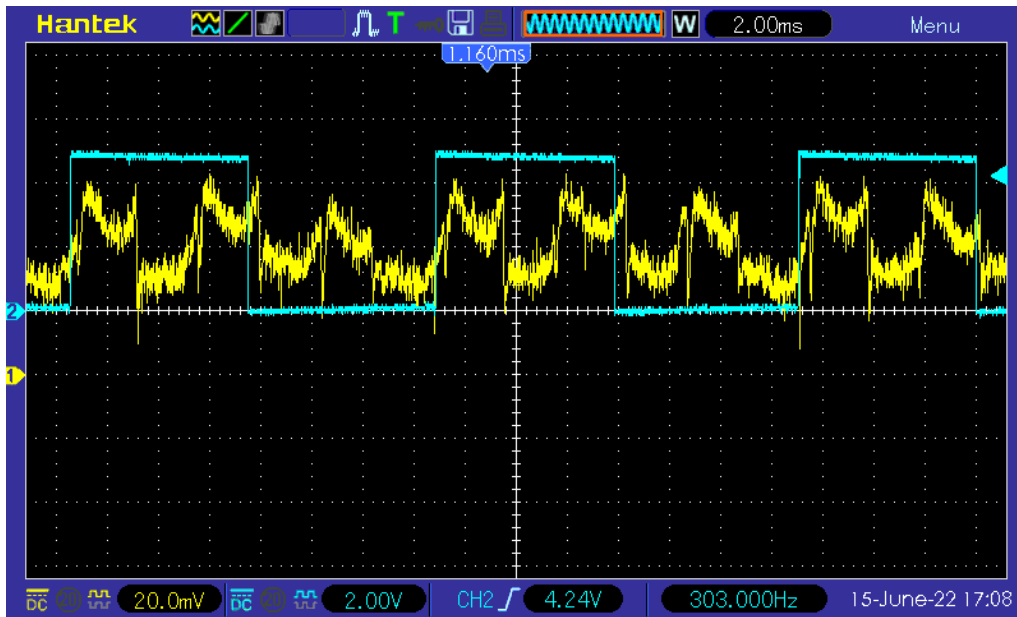


Figura 110. Corriente de Bus DC alimentando el motor a 24 V y con par resistente = 125 mNm  
Escala vertical CH1: 20 mV/Div. Escala vertical CH2: 2 V/Div. Base de tiempo: 2 ms/Div. Fuente [Propia]

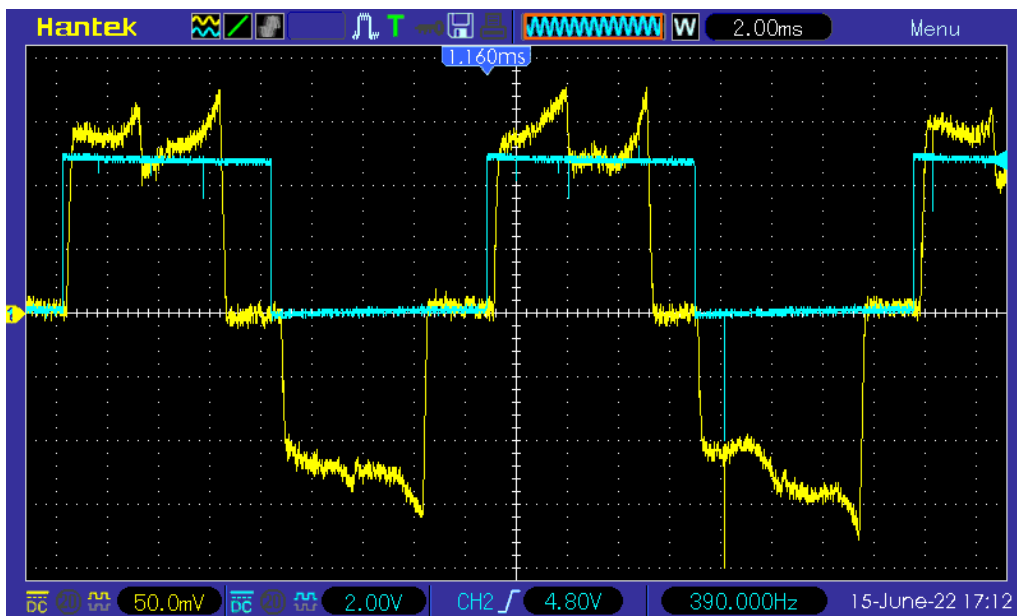
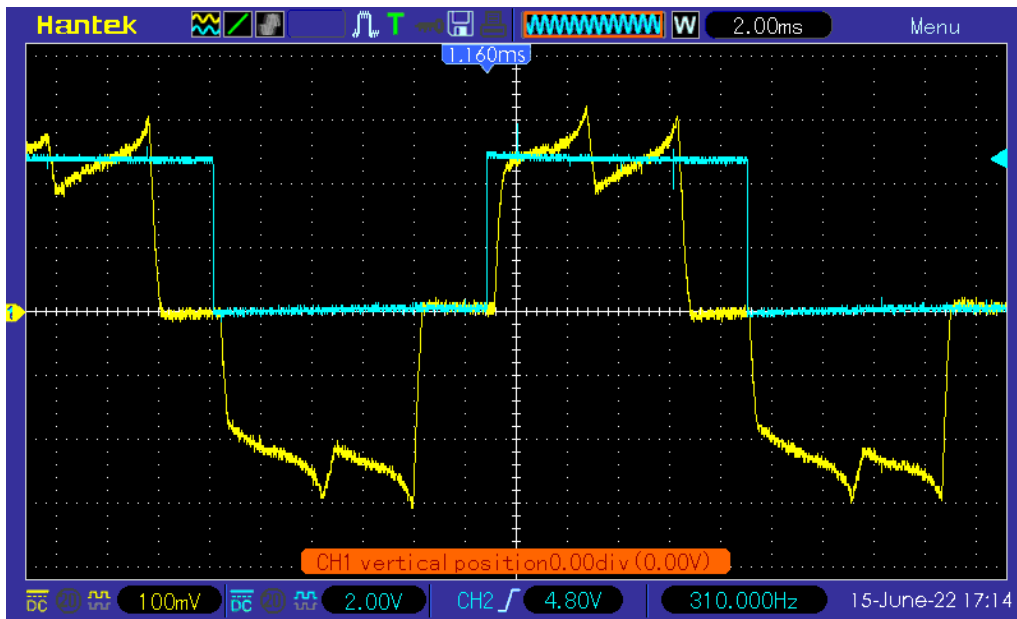


Figura 111. Corriente de línea vs sensor Hall, alimentando el motor a 24 V y con par resistente = 500 mNm  
Escala vertical CH1: 50 mV/Div. Escala vertical CH2: 2 V/Div. Base de tiempo: 2 ms/Div. Fuente [Propia]



**Figura 112.** Corriente de línea vs sensor Hall, alimentando el motor a 24 V y con par resistente = 1 Nm  
 Escala vertical CH1: 100 mV/Div. Escala vertical CH2: 2 V/Div. Base de tiempo: 2 ms/Div. Fuente [Propia]

En las mediciones anteriores se puede observar el correcto funcionamiento del sistema cuando es sometido a diferentes consignas de carga, ya que las formas de onda registradas concuerdan con las esperadas según la bibliografía consultada para el tipo de control empleado en este trabajo.

## **Análisis del impacto ambiental**

El tipo de motor eléctrico tratado durante este trabajo tiene como principal característica el requerir un bajo o nulo mantenimiento, además de ofrecer un alto rendimiento, lo que permite desplazar tecnologías antiguas donde la vida útil de la máquina se ve altamente comprometida, provocando la adquisición de nuevos equipos y produciéndose así un gasto de recursos que podría ser evitado.

Reducir el consumo energético, alargar la vida útil de los equipos y generar menos residuos, son entre otros, efectos consecuentes de la investigación en el desarrollo de nuevos equipos lo cual es la funcionalidad de este trabajo.

En general, durante la fabricación de la bancada no se han empleado materiales de naturaleza contaminante, sin embargo, el proceso de transporte de los mismos que, en ocasiones provienen de países lejanos conlleva una huella de carbono considerable.

Asimismo, los componentes electrónicos suelen embalarse empleando blísteres que garantizan la ausencia de electricidad estática para prevenir el fallo del componente, el propósito de estos embalajes, una vez empleado el componente, llega a su fin, generando una importante cantidad de residuos que requieren ser reciclados.

Al finalizar la vida útil de la bancada, resulta sencillo reutilizar los componentes y materiales empleados, ya que se trata de fabricación artesanal y existe una documentación extensa. En el peor de los casos, no reutilizando componentes y materiales, se puede despiezar fácilmente para su posterior reciclaje.



---

## Conclusiones

Las aplicaciones de los motores eléctricos de cualquier tipo, son extremadamente diversas, desde el cabrestante de una grúa, un atornillador a batería, un ascensor o incluso una bomba peristáltica de una máquina de diálisis.

Por ello, debido al gran uso de estas bellas máquinas eléctricas de las que, en muchas ocasiones, depende la vida de las personas, es de vital importancia disponer de los medios necesarios para que sean testeadas y sometidas a ensayos en los que poder comprobar si las características esperadas durante su diseño se corresponden con los requerimientos finales.

Durante la realización de este trabajo se ha comprendido el principio de funcionamiento de un motor BLDC y su control, se ha adquirido experiencia en el diseño y fabricación de placas electrónicas y se ha puesto en práctica parte del conocimiento adquirido durante el grado.

Se considera que el objetivo principal del trabajo se ha alcanzado con éxito pero que aun así sigue existiendo mucho margen de mejora, lo cual, siempre es positivo ya que permite plantear nuevas metas y retos.

La bancada realizada se cederá al grupo de investigación SAC, permitiendo así, disponer del equipo necesario para fines docentes e investigativos, lo cual, finalmente acaba repercutiendo en la sociedad de manera positiva.

A modo de mejoras y trabajos futuros, se propone la implementación de los controles PWM y SPWM correspondientes a la regulación de velocidad del eje de la máquina.

*“No hay duda de que todo nuestro conocimiento comienza con la experiencia.”*

*Kant, I., Crítica de la Razón Pura, introducción, B1-2.*

## Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto asociado al desarrollo de este trabajo, dividido en las partidas correspondientes:

Material - Descripción - Partida PCB placa de potencia	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
PCB fotosensible 1 cara 100x160mm	REPROCIRCUIT	PD100X160	Diotronic	7,37 €	1	7,37 €
Drivers para MOSFET IR2101	International rectifiers	IR2101	Diotronic	2,32 €	6	13,92 €
Zocalo DIP 8 pack de 5	TE connectivity	110-87-308-41-001101	RS components	0,49 €	5	2,46 €
Diodo BY299	Diotec semiconductors	BY299	Diotronic	0,02 €	3	0,06 €
Diodo conmutacion rapida 1N4148	Onsemi	1N4148	RS components	0,02 €	6	0,12 €
Resistencia 10R 1/4W	TE connectivity	CFR25J330R	RS components	0,03 €	10	0,32 €
Resistencia 10K 1/4W	RS-PRO	707-7745	RS components	0,20 €	10	1,95 €
Condensador de poliester de 470 nF	WIMA	FKP2/470/100/5	RS components	0,55 €	10	5,54 €
Diodo de recuperación rápida FR107	Taiwan Semiconductor	FR107G R0	RS components	0,17 €	10	1,73 €
MOSFET canal N IRFZ44N	Infineon	IRFZ44NPBF	RS components	1,62 €	15	24,30 €
Conector macho potencia 2 pin	Weidmuller	BL5.08/2	Farnell	1,49 €	1	1,49 €
Conector hembra potencia 2 pin	Weidmuller	SL 5.08/2	Farnell	0,89 €	1	0,89 €
Conector macho potencia 3 pin	Weidmuller	BL5.08/2	Farnell	1,62 €	1	1,62 €
Conector hembra potencia 3 pin	Weidmuller	SL5.08/03/180B	Farnell	1,29 €	1	1,29 €
Pad térmico disipación de calor	RS-PRO	707-4749	RS components	29,02 €	1	29,02 €
Pletina de aluminio para el disipador de calor	RS-PRO	682-185	RS components	39,65 €	1	39,65 €
Conector hembra 10 pin señal	TE connectivity	1658621-1	RS components	1,38 €	1	1,38 €
<b>TOTAL PARTIDA PCB POTENCIA:</b>						<b>133,11 €</b>

Material - Descripción - Partida PCB acondicionadores HALL	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
PCB fotosensible 1 cara 100x160mm	REPROCIRCUIT	PD100X160	Diotronic	7,37 €	1	7,37 €
Resistencia 220R	TE connectivity	CFR100J200R	RS components	0,12 €	10	1,23 €
Resistencia 10K 1/4W	RS-PRO	707-7745	RS components	0,20 €	10	1,95 €
Resistencia 220K	TE connectivity	149-060	RS components	0,09 €	10	0,94 €
LED verde 5mm	Kingbright	L-53GD	RS components	0,52 €	5	2,62 €
Transistor NPN BC547	Onsemi	BC547BTA	RS components	0,28 €	10	2,80 €
Conector macho potencia 2 pin	Weidmuller	BL5.08/2	Farnell	1,49 €	2	2,98 €
Conector hembra potencia 2 pin	Weidmuller	SL 5.08/2	Farnell	0,89 €	2	1,78 €
Conector macho potencia 3 pin	Weidmuller	BL5.08/2	Farnell	1,62 €	3	4,86 €
Conector hembra potencia 3 pin	Weidmuller	SL5.08/03/180B	Farnell	1,29 €	3	3,87 €
<b>TOTAL PARTIDA PCB ACONDICIONADORES HALL:</b>						<b>30,40 €</b>

Material - Descripción - Partida PCB Freno magnético	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
PCB fotosensible 1 cara 100x160mm	REPROCIRCUIT	PD100X160	Diotronic	7,37 €	1	7,37 €
Resistencia 220R	TE connectivity	CFR100J200R	RS components	0,12 €	10	1,23 €
Resistencia 10K 1/4W	RS-PRO	707-7745	RS components	0,20 €	10	1,95 €
Diodo rectificador 1N4007	VISHAY	1N4007G P-E/54	Farnell	0,63 €	5	3,15 €
Optoacoplador PC817C	KingBright	KB817	Farnell	0,94 €	5	4,69 €
Borna a tornillo 2 pin	IMO PRECISION Controls	20,501M/6	Farnell	0,79 €	13	10,24 €
MOSFET canal N IRFZ44N	Infineon	IRFZ44NPBF	RS components	1,62 €	15	24,30 €
<b>TOTAL PARTIDA FRENO MAGNÉTICO:</b>						<b>52,93 €</b>

Material - Descripción - Partida Microcontrolador y tarjeta de adquisición	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
Arduino Mega	Arduimp	A000067	Farnell	45,00 €	1	45,00 €
Shield conexión a tornillo para arduino Mega	null	TO339	Diotronic	26,30 €	1	26,30 €
Cable USB tipo B	StarTech.com	USB2HAB5M	RS components	6,04 €	1	6,04 €
Tarjeta adquisición de datos NI6001	National Instruments	782604-01	National Instruments	270,00 €	1	270,00 €

**TOTAL PARTIDA MICROCONTROLADOR Y TARJETA DE ADQUISICIÓN: 347,34 €**

Material - Descripción - Partida Sensores y actuadores	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
Sensor de temperatura LM35	Texas Instruments	LM35DZ/NOPB	Farnell	3,91 €	1	3,91 €
Resistencia de potencia R1 25W	Arcol	HS25R1J	RS components	4,30 €	1	4,30 €
Motor electrico CC (dinamo tacometrica)	null	196	Diotronic	6,50 €	1	6,50 €
Ventilador de refrigeración 120 mm	ebm-papst	4410FGM	RS components	37,53 €	1	37,53 €
Potenciómetro lineal 10K	Alps Alpine	RK1631110TWA	RS components	4,00 €	2	8,00 €

**TOTAL PARTIDA SENSORES Y ACTUADORES: 60,24 €**

Material - Descripción - Partida pequeño material y fungibles	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
---	------------	------------	-----------	-------	------	-------

PCB fotosensible 1 cara 100x160mm	REPROCIRCUIT	PD100X160	Diotronic	7,37 €	1	7,37 €
Borna a tornillo 2 pin	IMO PRECISION Controls	20,501M/6	Farnell	0,79 €	13	10,24 €
Tornillería	Bauhaus	2016 2476	Bauhaus	3,51 €	1	3,51 €
Filamento 3D PLA gris	RS PRO	832-0245	RS components	36,68 €	1	36,68 €
Fusible 6,3 A	Eaton Bussmann Series	5506-6,3-R	RS components	0,21 €	10	2,13 €
Portafusible montaje en panel	SCHURTER	313.901	Farnell	6,10 €	1	6,10 €
Cabezal potenciómetro	RS PRO	259-6913	RS components	2,26 €	5	11,32 €
Tablero MDF 10mm	Leroy Merlin	11034310	Leroy Merlin	10,79 €	1	10,79 €
Canal ranurada 30x40mm	UNEX	403077	Prodelec	5,94 €	4	23,76 €
Bobina cable 1mm <sup>2</sup> azul	LappKabel	H05V-K N/H 1x1 BU	Prodelec	12,20 €	1	12,20 €
Bobina cable 1mm <sup>2</sup> marron	LappKabel	H05V-K N/H 1x1 BR	Prodelec	12,20 €	1	12,20 €
Banana macho 4 mm roja	Schutzinger	1701122-04/RS	RS components	2,41 €	5	12,04 €
Banana macho 4mm negra	Schutzinger	1701123-04/RS	RS components	2,41 €	5	12,04 €
Estaño soldadura	Felder Lottechnik	5,51894E+11	RS components	47,22 €	1	47,22 €
Spray limpia soldaduras	RS PRO	180-803	RS components	12,17 €	1	12,17 €
Sosa caustica	null	1517QD	Químics Dalmau	3,30 €	1	3,30 €
Sulfumán	null	1070	Químics Dalmau	10,30 €	1	10,30 €
Agua Oxigenada 110 vol.	null	7505	Químics Dalmau	6,84 €	1	6,84 €
Juego de mini brocas para taladros en PCB	CK	104-8485	RS components	12,37 €	1	12,37 €
Juego de brocas para metal 1-13mm	RS PRO	216-690	RS components	90,35 €	1	90,35 €

**TOTAL PARTIDA PEQUEÑO MATERIAL Y FUNGIBLES: 342,93 €**

Material - Descripción - Partida Instrumentación de laboratorio y herramientas	fabricante	referencia	proveedor	coste	cant	total
Fuente de alimentación DC programable GPD-2303S	GWINSTEK	GPD-2303S	Distron	680,00 €	1	680,00 €
Osciloscopio digital 100MHz 2 canales Hantek DSO55102P	HANTEK	DSO55102P	OndaRadio	253,87 €	1	253,87 €
Pinza amperimétrica AC/DC 100mV/A Fluke i30	FLUKE	FLUKE i30	RS components	654,00 €	2	1.308,00 €
Multímetro digital Promax	PROMAX	PD-350	OndaRadio	93,50 €	1	93,50 €
Tacómetro digital DT-2234C+	null	DT-2234C+	OndaRadio	18,99 €	1	18,99 €
HUB USB 4 tomas DigiLink	DigiLink	HUB4PortUSB	OndaRadio	24,50 €	1	24,50 €
Impresora 3D FDM	Prusa i3 mks3+	Prusa Research		849,00 €	1	849,00 €
Estación de soldadura JCB	JBC	CD-2BQF	RS components	495,79 €	1	495,79 €
Insoladora UV para placas electrónicas	ReproCircuit	IR4	ReproCircuit	430,87 €	1	430,87 €
Mini herramienta dremel	Dremel	4000-1/45	RS components	151,08 €	1	151,08 €
Soporte columna mini herramienta dremel	RS PRO	162-5355	RS components	78,26 €	1	78,26 €
PC portátil MSI GF72 8RE	MSI	GF72 8RE	Pc Componentes	1.584,54 €	1	1.584,54 €
Atornillador a batería Makita	Makita	HP333DSAE	Bauhaus	139,00 €	1	139,00 €
Juego de machos para roscar	RS PRO	668-1138	RS components	85,56 €	1	85,56 €
<b>TOTAL PARTIDA INSTRUMENTACIÓN DE LABORATORIO Y HERRAMIENTAS:</b>						<b>6.192,96 €</b>

Descripción - Partida Mano de obra	referencia	proveedor	coste	cant	total
Mano de obra ingeniero junior	MOIJ	UPC	15,65 €	736	11.518,40 €
<b>TOTAL PARTIDA MANO DE OBRA:</b>					<b>11.518,40 €</b>

PARTIDAS	referencia	proveedor	coste	cant	total
PCB potencia	Pot	UPC	133,11 €	1	133,11 €
PCB acondicionadores hall	Hall	UPC	30,40 €	1	30,40 €
Freno magnético	MagBrake	UPC	52,93 €	1	52,93 €
Microcontrolador y tarjeta de adquisición	uC/DAQ	UPC	347,34 €	1	347,34 €
Sensores y actuadores	SensAct	UPC	60,24 €	1	60,24 €
Pequeño material y fungibles	Fung	UPC	342,93 €	1	342,93 €
Instrumentación de laboratorio y herramientas	Instru	UPC	6.192,96 €	1	6.192,96 €
Mano de obra ingeniero junior	MOIJ	UPC	11.518,40 €	1	11.518,40 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO sin IVA:</b>					<b>18.678,31 €</b>
<b>IVA [21%]:</b>					<b>3.922,45 €</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO con IVA:</b>					<b>22.600,76 €</b>

---

## Planificación

Con objeto de gestionar la planificación de este proyecto se ha decidido desarrollar un diagrama de PERT el cual parte de la elaboración de una tabla en la que se recogen todas las tareas del proyecto y se identifica cuáles son predecesoras de otras.

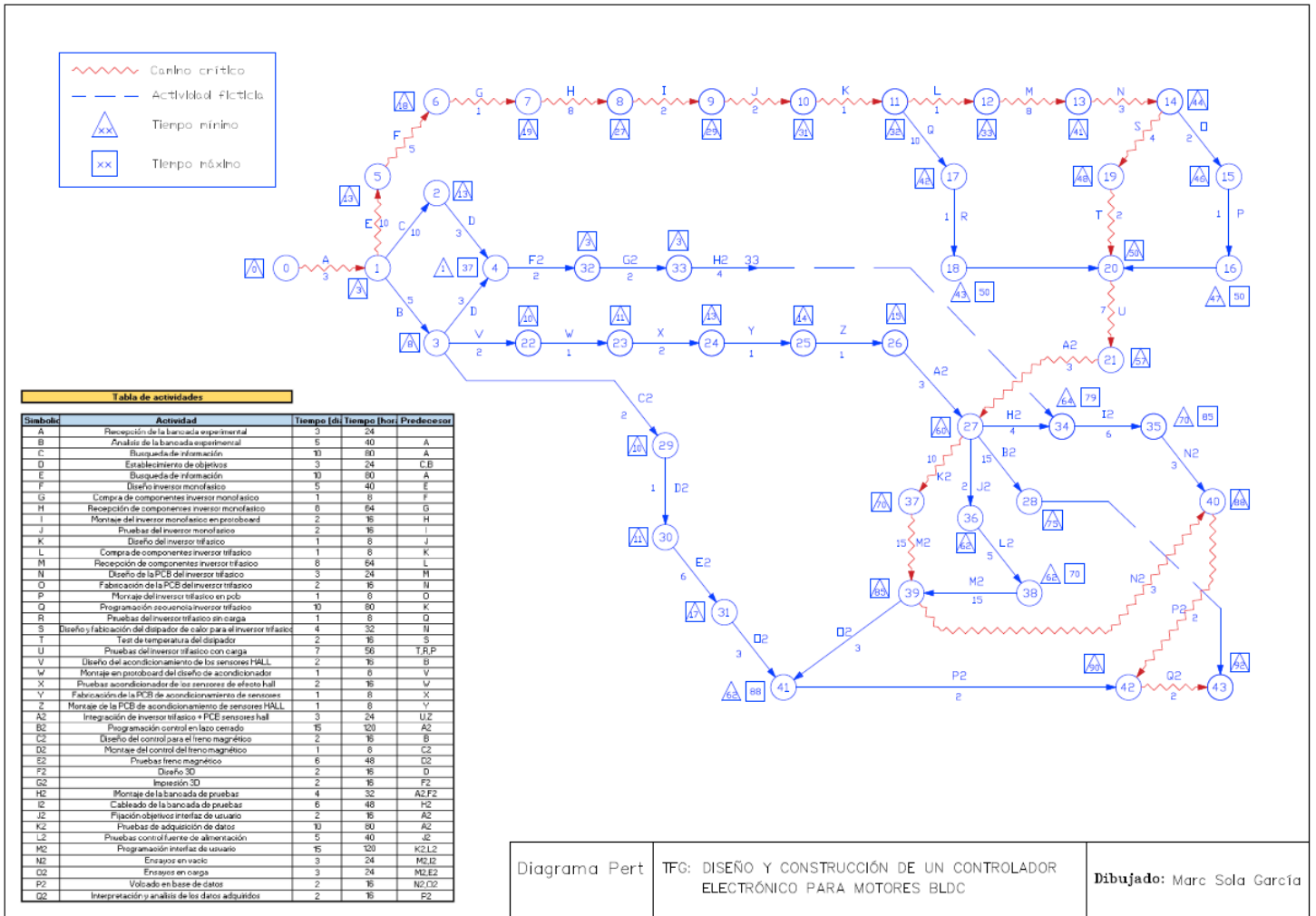
Generando el diagrama correspondiente a la tabla de tareas, se identifican de manera rápida y sencilla aquellas tareas que, por su importancia, necesitan realizarse en tiempo concreto, formando un camino crítico que indica, finalmente, la duración mínima del proyecto.

A continuación, se muestra la tabla de actividades:

**Tabla de actividades**

Simbólico	Actividad	Tiempo [días]	Tiempo [horas]	Predecesor
A	Recepción de la bancada experimental	3	24	
B	Análisis de la bancada experimental	5	40	A
C	Busqueda de información	10	80	A
D	Establecimiento de objetivos	3	24	C,B
E	Busqueda de información	10	80	A
F	Diseño inversor monofásico	5	40	E
G	Compra de componentes inversor monofásico	1	8	F
H	Recepción de componentes inversor monofásico	8	64	G
I	Montaje del inversor monofásico en protoboard	2	16	H
J	Pruebas del inversor monofásico	2	16	I
K	Diseño del inversor trifásico	1	8	J
L	Compra de componentes inversor trifásico	1	8	K
M	Recepción de componentes inversor trifásico	8	64	L
N	Diseño de la PCB del inversor trifásico	3	24	M
O	Fabricación de la PCB del inversor trifásico	2	16	N
P	Montaje del inversor trifásico en pcb	1	8	O
Q	Programación secuencia inversor trifásico	10	80	K
R	Pruebas del inversor trifásico sin carga	1	8	Q
S	Diseño y fabricación del disipador de calor para el inversor trifásico	4	32	N
T	Test de temperatura del disipador	2	16	S
U	Pruebas del inversor trifásico con carga	7	56	T,R,P
V	Diseño del acondicionamiento de los sensores HALL	2	16	B
W	Montaje en protoboard del diseño de acondicionador	1	8	V
X	Pruebas acondicionador de los sensores de efecto hall	2	16	W
Y	Fabricación de la PCB de acondicionamiento de sensores HALL	1	8	X
Z	Montaje de la PCB de acondicionamiento de sensores HALL	1	8	Y
A2	Integración de inversor trifásico + PCB sensores hall	3	24	U,Z
B2	Programación control en lazo cerrado	15	120	A2
C2	Diseño del control para el freno magnético	2	16	B
D2	Montaje del control del freno magnético	1	8	C2
E2	Pruebas freno magnético	6	48	D2
F2	Diseño 3D	2	16	D
G2	Impresión 3D	2	16	F2
H2	Montaje de la bancada de pruebas	4	32	A2,F2
I2	Cableado de la bancada de pruebas	6	48	H2
J2	Fijación objetivos interfaz de usuario	2	16	A2
K2	Pruebas de adquisición de datos	10	80	A2
L2	Pruebas control fuente de alimentación	5	40	J2
M2	Programación interfaz de usuario	15	120	K2,L2
N2	Ensayos en vacío	3	24	M2,I2
O2	Ensayos en carga	3	24	M2,E2
P2	Volcado en base de datos	2	16	N2,O2
Q2	Interpretación y análisis de los datos adquiridos	2	16	P2

A continuación, se muestra el diagrama de PERT realizado:



Analizando el diagrama, se observa el camino crítico, el cual obliga a cumplir la duración de todas sus tareas para evitar retrasos en el proyecto, de modo que, en el mejor escenario posible, el proyecto finalizará en 92 días suponiendo jornadas de trabajo de 8 horas, lo que, en total, conlleva 736 horas de trabajo.

## Bibliografía

- [1] Ing. H. Trenkmann, *La escuela del técnico electricista, Teoría, Cálculo y Construcción de las máquinas de corriente continua*, 3rd ed., vol. IV. 1956.
- [2] “Motores DMI motores de corriente continua (CC).”
- [3] “How Brushless Motor and ESC Work.” <https://futurelab3d.com/how-brushless-motor-and-esc-work/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [4] “Los fundamentos de motores BLDC – ElettroAmici.” <https://www.elettroamici.org/es/nozioni-di-base-sui-motori-blcd/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [5] “How to connect brushless DC motors to an electronic controller.” <https://www.haydonkerkittman.com/learningzone/whitepapers/connecting-brushless-dc-motors-to-electronic-controllers> (accessed Jun. 15, 2022).
- [6] “FAQ: What are Hall effect sensors and what is their role in DC motors?” <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-hall-effect-sensors-and-what-is-their-role-in-dc-motors/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [7] “Web de Guillermo Herrero González.” [http://www.guillehg.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=28&Itemid=652](http://www.guillehg.com/index.php?option=com_content&view=article&id=28&Itemid=652) (accessed Jun. 15, 2022).
- [8] S. C. Gregorio and F. Rodríguez Ballester, “Control FOC de motores BLDC”.
- [9] G. Burke, *UNIVERSIDAD SANTA MARÍA LA ANTIGUA DE PANAMÁ EXPERIENCIAS DE FÍSICA I Edición 2018*. 2018.
- [10] Y. Wu, Z. Deng, X. Wang, X. Ling, and X. Cao, “Position Sensorless Control Based on Coordinate Transformation for Brushless DC Motor Drives,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, pp. 2365–2371, 2010.
- [11] A. Halvaei, A. Vahedi, and H. Moghbelli, “A Novel Position Sensorless Control of a Four-Switch, Brushless DC Motor Drive Without Phase Shifter,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 3079–3087, Dec. 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.2002084.
- [12] “Las conexiones estrella y triángulo en motores y sus diferencias | Subir.cc.” <https://subir.cc/conexiones-estrella-y-triangulo/> (accessed Jun. 15, 2022).



- 
- [13] S. Meivel, A. Vennila, and A. Govindarasu, "Sensorless Control of BLDC Motor Drive Using a Hysteresis Comparator and back emf technique," 2015.
- [14] "DRV5056-Q1 Automotive Unipolar Ratiometric Linear Hall Effect Sensor Typical Schematic Magnetic Response," 2018. [Online]. Available: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [15] E. Ballester and R. Piqué, "Electrónica de Potencia Principios Fundamentales y Estructuras Básicas."
- [16] J. Fang, X. Zhou, and G. Liu, "Precise Accelerated Torque Control for Small Inductance Brushless DC Motor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 1400–1412, 2013.
- [17] U. Autónoma De Occidente, "Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación." [Online]. Available: <http://redalyc.uaemex.mx>
- [18] "UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR: 6. Tren de Engranajes Planetarios." <http://ciclo4to.blogspot.com/2012/05/tren-de-engranaje-planetario-1.html> (accessed Jun. 15, 2022).
- [19] "File: Laminated core eddy currents 2.svg - Wikimedia Commons." [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminated\\_core\\_eddy\\_currents\\_2.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminated_core_eddy_currents_2.svg) (accessed Jun. 15, 2022).
- [20] "Physics of Roller Coasters | Magnetic Roller Coasters." <https://jessicagarratt.wordpress.com/2012/03/15/physics-of-roller-coasters/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [21] P. Dandavate, "An Empirical Review of Electromagnetic Braking Systems," 2016. [Online]. Available: [www.ijres.org](http://www.ijres.org)
- [22] "Current Controlled Hysteresis Brakes Electrically controlled No wearing parts Infinitely adjustable for precise torque/ tension control TRANSMITTING TORQUE THROUGH AIR." [Online]. Available: [www.magnetictech.com](http://www.magnetictech.com)
- [23] "Hysteresis Brake and Clutch Accessories | Magtrol." <https://www.magtrol.com/product/hysteresis-brake-clutch-accessories/> (accessed Jun. 15, 2022).

- [24] “Datasheets of MOSFET: Capacitance and Switching Characteristics | Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation | Asia-English.” <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/chap3/chap3-25.html> (accessed Jun. 15, 2022).
- [25] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, “Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device”.
- [26] International Rectifiers, “Datasheet IR2101.”
- [27] F. D. ; P. A. T. A. (2011) E. de Potencia. Trujillo, “Cálculo de disipadores de calor,” 2011. [Online]. Available: <http://ocw.uma.es>
- [28] “5.3.2 Current Crowding.” <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/rovitto/node86.html> (accessed Jun. 15, 2022).
- [29] “Algoritmo para calcular el ancho de una pista de una PCB.” <https://www.hubor-proteus.com/recursos/trucos-sobre-proteus/218-algoritmo-para-calcular-el-ancho-de-una-pista-de-una-pcbd.html> (accessed Jun. 15, 2022).
- [30] “The CircuitCalculator.com Blog » PCB Trace Width Calculator.” <http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [31] P. Y. Soldadura, “P L A C A S T A N D A R D D E P I S T A S”, Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: [www.shop-reprocircuit.com](http://www.shop-reprocircuit.com)
- [32] “Ciencia, inventos y experimentos en casa: abril 2017.” <https://100ciaencasa.blogspot.com/2017/04/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [33] “Arduino Mega 2560 Rev3 — Arduino Official Store.” <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?queryID=undefined> (accessed Jun. 15, 2022).
- [34] “NI USB-6001.”
- [35] “LM35 LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors,” 1999. [Online]. Available: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [36] “HS Aluminium Housed Resistors Electrical Specifications.”

- 
- [37] “MULTIPLE OUTPUT PROGRAMMABLE LINEAR D.C. POWER SUPPLY FUNCTION FEATURES FEATURES APPLICATIONS Laboratories and Educational Facilities Product Testing and Quality Assurance Service Operation and Post-Sales Support Product Development and Debugging.”
- [38] “Magnetismo y fuerza magnética.” <https://docplayer.es/61321646-Magnetismo-y-fuerza-magnetica.html> (accessed Jun. 15, 2022).