

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE FRENADO DE MOTORES DC

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA

Luis Miguel Banchón Mosquera

luis.banchon@epn.edu.ec

Marcos Alexander García Naranjo

marcos.garcia@epn.edu.ec

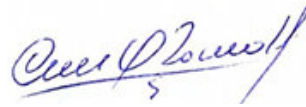
DIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO HERRERA, MSC.

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Luis Miguel Banchón Mosquera y el Sr. Marcos Alexander García Naranjo como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA, bajo mi supervisión:



**Carlos Orlando Romo
Herrera**

DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros Luis Miguel Banchón Mosquera con CI: 1726714338 y Marcos Alexander García Naranjo con CI: 1720887007 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



**Luis Miguel Banchón
Mosquera**

CI: 1726714338
Teléfono: 0998020162
Correo: luis.banchon@epn.edu.ec



**Marcos Alexander García
Naranjo**

CI: 1720887007
Teléfono: 0996311706
Correo: marcos.garcia@epn.edu.ec

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mi madre, quien siempre me ha brindado la fortaleza necesaria en los momentos más complicados a través de su cariño y ternura, a mi tía quien siempre confió en mis capacidades y me otorgó la confianza para continuar, y a mi padre quien pese a cualquier dificultad me ha mostrado como salir adelante.

Luis Banchón

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres quienes me han dado la posibilidad de estudiar la carrera que me apasiona, y mi tía, quien se ha erguido como una figura materna para mí. Su apoyo incondicional me ha permitido llegar a esta etapa de mi formación, tanto académica como personal. Gracias por otorgarme las herramientas necesarias y la ambición por seguir avanzando.

Igualmente agradezco a todos los maestros que he tenido a lo largo de la carrera, su profesionalidad y pasión me ha motivado para seguir avanzando en este proceso, en especial a mi director Alex Oña, pues no solo ha sido importante en la elaboración del presente trabajo, sino que el conocimiento adquirido gracias a él ha sido una herramienta imprescindible para conseguirlo.

Luis Banchón

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico principalmente a mis padres, quienes, con amor, trabajo y sacrificio a lo largo de estos años, me han inspirado y dado fuerza para continuar en el proceso de cumplir uno de tantos anhelos que he tenido en mi vida. Ha sido todo un orgullo y privilegio ser su hijo, son los mejores.

A mi hermano, con quien en ocasiones he contado, tanto con apoyo moral como personal a lo largo de esta carrera. Anhele en un futuro, tus metas también se cumplan y logren superar las mías. ¡Suerte!

Al resto de familiares que supieron ayudarme en momentos donde no supe comprender el cómo y porque de las cosas. Y a todas las personas, tanto dentro como fuera de la institución, que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que supieron compartir sus conocimientos.

Marcos García

AGRADECIMIENTO

Quiero utilizar este espacio para agradecer, en primer lugar, a Dios por todas las bendiciones que derrama sobre mi familia. Gracias por darme un hogar lleno de amor.

Doy gracias a mis padres, Ángel y Livia, quienes supieron corregir mi camino, para que el día de hoy pueda decir que soy una gran persona gracias a ellos. Gracias a su apoyo pude culminar esta carrera sin problemas. De igual forma a mi hermano Ricardo, con quien eh contado en innumerables ocasiones, gracias por ser un buen hermano y mano derecha.

Agradezco de manera especial al ing. Alex Oña, director del proyecto, que gracias a sus consejos y correcciones hoy pude culminar con este trabajo. También a todos los profesores que tuve a lo largo de esta carrera, quienes me han visto crecer como persona y gracias a sus conocimiento hoy puedo sentirme un profesional dichoso y contento.

Marcos García

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo general.....	1
1.2	Objetivos específicos.....	1
1.3	Fundamentos.....	2
	Motor de corriente continua.....	2
	Tipos de motores de corriente continua.....	2
	Frenado en motores de corriente continua	5
2	METODOLOGÍA.....	9
2.1	Descripción de la metodología usada.....	9
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
3.1	Requerimientos para el módulo didáctico.....	12
	Motor principal.....	13
	Motor secundario.....	13
	Fuente de alimentación	15
	Microcontrolador.....	16
	Regulador de voltaje	17
	Módulo relé.....	18
	Sensor de corriente	19
	Pantalla lcd.....	20
	Encoder rotatorio.....	20
	Fusible.....	21
3.2	Diseño de la estructura del módulo didáctico	22
	Estructura	22
	Bases de los motores.....	23
	Estructura final del módulo.....	24
3.3	Diseño de los circuitos de medición, control y potencia para el módulo	25

Diseño del circuito de potencia	26
Diseño del circuito de medición del voltaje	29
Configuración de los pines del microcontrolador	30
Desarrollo del algoritmo de control.....	32
Desarrollo de la placa de circuito impreso	34
3.4 Pruebas de funcionamiento del módulo didáctico	34
Prueba de continuidad eléctrica	35
Pruebas de alimentación eléctrica	35
Pruebas del sistema de medición	37
Pruebas de elementos de protección eléctrica	40
Pruebas de funcionamiento del módulo en los tipos de frenado posible	41
3.5 Manual de uso y mantenimiento del módulo y hoja guía para prácticas	45
Manual de uso del módulo	45
Manual de mantenimiento del módulo	45
Hoja guía para prácticas	45
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
4.1 Conclusiones	46
4.2 Recomendaciones	47
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
5.1 Anexos.....	51
Anexo 1: Certificado de funcionamiento.....	52
Anexo 2: Hoja guía para prácticas	54
Anexo 3: Diagrama eléctrico	57
Anexo 4: Elementos del módulo didáctico	60
Anexo 5: Plano de la estructura base del módulo.....	62
Anexo 6: Planos de las bases de los motores	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Motor de corriente continua.....	2
Figura 1.2 Circuito equivalente del motor de imanes permanentes	3
Figura 1.3 Circuito equivalente del motor paralelo	3
Figura 1.4 Circuito equivalente del motor serie	4
Figura 1.5 Circuito equivalente del motor compuesto	4
Figura 1.6 Freno mecánico con zapata y bomba hidráulica	5
Figura 1.7 Circuito freno por contracorriente en motor paralelo	6
Figura 1.8 Circuito freno dinámico en motor paralelo.....	7
Figura 1.9 Esquema de funcionamiento del freno regenerativo	8
Figura 3.1 Diagrama de bloques general del módulo.....	12
Figura 3.2 Motor principal de corriente continua	13
Figura 3.3 Motor secundario de corriente continua	14
Figura 3.4 Fuente de alimentación	15
Figura 3.5 Microcontrolador (Arduino Nano)	16
Figura 3.6 Regulador de voltaje LM2596.....	17
Figura 3.7 Módulos relés, (a) de 4 canales y (b) de un canal.....	18
Figura 3.8 Sensor de corriente ACS 712.....	19
Figura 3.9 (a) Pantalla lcd 20x4 y (b) módulo I2C	20
Figura 3.10 (a) Encoder rotatorio y (b) menú de navegación	21
Figura 3.11 Corriente de alimentación al frenar manualmente el eje del motor	21
Figura 3.12 Fusible de 2 (A) y porta fusible del módulo	22
Figura 3.13 Diseño de la estructura.....	22
Figura 3.14 Vista frontal de la estructura.....	23
Figura 3.15 Diseño de bases de motores, (a) principal y (b) secundario	23
Figura 3.16 Bases de motores, (a) principal y (b) secundario	24
Figura 3.17 (a) Diseño de la estructura y (b) implementación de la estructura	24
Figura 3.18 (a) Vista frontal y (b) vista diagonal del módulo	25
Figura 3.19 Circuito de conmutación entre métodos de frenado.....	26
Figura 3.20 Puente H en freno por contracorriente	27
Figura 3.21 Circuito de potencia en freno dinámico	27
Figura 3.22 Circuito de alimentación en freno regenerativo	28
Figura 3.23 Circuito de control de velocidad del motor secundario.....	29
Figura 3.24 Divisor de voltaje para el sensor de tensión.....	30
Figura 3.25 Configuración de pines del microcontrolador	30

Figura 3.26	Diagrama de flujo del algoritmo de control	33
Figura 3.27	(a) Método de planchado y (b) ataque químico a baquelita	34
Figura 3.28	Elementos soldados en la placa	34
Figura 3.29	Prueba de continuidad con el multímetro	35
Figura 3.30	Medición del voltaje de alimentación de la fuente	36
Figura 3.31	Voltaje de salida de la fuente	36
Figura 3.32	Voltaje a la salida del regulador de tensión.....	36
Figura 3.33	Voltaje de alimentación del motor principal	37
Figura 3.34	Voltaje del motor secundario cuando este trabaja a velocidad nominal... 37	
Figura 3.35	Voltaje en la fuente (sensor vs voltímetro)	38
Figura 3.36	Voltaje del motor principal (sensor vs voltímetro).....	38
Figura 3.37	Sensor de corriente vs amperímetro cuando la corriente es positiva.....	39
Figura 3.38	Sensor de corriente vs amperímetro cuando la corriente es negativa	40
Figura 3.39	(a) Primer led encendido y (b) datos del freno por contracorriente	41
Figura 3.40	(a) Segundo y tercer led encendidos y (b) datos del freno dinámico	41
Figura 3.41	Foco conectado como carga al motor principal.....	42
Figura 3.42	(a) Datos del freno dinámico y (b) resistencia de 10(Ω) como carga.....	42
Figura 3.43	(a) Primer led encendido y (b) datos del freno regenerativo	43
Figura 3.44	Funcionamiento de la máquina (a) como motor y (b) como generador....	44
Figura 3.45	Manual de uso del módulo didáctico	45
Figura 3.46	Manual de mantenimiento del módulo.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características del motor principal.....	13
Tabla 3.2 Características del motor secundario.....	14
Tabla 3.3 Características del encoder de velocidad	14
Tabla 3.4 Características de la fuente de alimentación	16
Tabla 3.5 Características del microcontrolador Arduino Nano.....	17
Tabla 3.6 Características del regulador de voltaje LM2596.....	18
Tabla 3.7 Características del módulo relé.....	19
Tabla 3.8 Características del sensor de corriente.....	19
Tabla 3.9 Características de la pantalla lcd 20x4	20
Tabla 3.10 Características del encoder rotatorio	21
Tabla 3.11 Pines utilizados del microcontrolador Arduino Nano.....	31
Tabla 3.12 Voltaje medido en fuente y motor, con sensor y multímetro	39
Tabla 3.13 Valores del sensor de corriente y del amperímetro	40
Tabla 3.14 Valores de corriente máxima en métodos de frenado	40
Tabla 3.15 Valores de magnitudes del motor principal con carga	43
Tabla 3.16 Valores de magnitudes del motor principal a distintas velocidades.....	44
Tabla A1.1 Valores de las magnitudes del freno dinámico.....	56
Tabla A1.2 Valores de magnitudes medidas del freno dinámico.....	56

RESUMEN

En el presente proyecto, enfocado al desarrollo de un módulo didáctico para el control del frenado eléctrico de un motor de corriente continua, se exponen las características relacionadas a los algoritmos y circuitos que fueron necesarios para la integración de los procesos eléctricos y mecánicos bajo el dominio de un microcontrolador, en este caso se opta por una placa Arduino Nano, encargada de controlar todo el proceso.

Esta idea surge como una respuesta a la falta de equipos necesarios para la realización de prácticas de laboratorio dentro en la Escuela de Formación de Tecnólogos, debido a que, en la actualidad, materias como “Fundamentos de máquinas eléctricas” necesitan reforzar de manera práctica los conocimientos teóricos sobre el tema de motores de corriente continua.

Para una mejor comprensión de este proyecto, cada uno de los siguientes capítulos detallan etapas fundamentales dentro del proceso de desarrollo del módulo, donde:

En la sección uno se muestra la introducción, donde se definen características como el contexto del problema a resolver, el objetivo general y específicos propuestos para el desarrollo del módulo y algunos fundamentos teóricos que fueron necesarios para una mejor interpretación del tema.

En la sección dos se describe la metodología utilizada para la implementación del módulo, así como los parámetros y procedimientos llevados a cabo para cumplir con cada uno de los objetivos.

En la sección tres se detallan cada uno de los resultados obtenidos en base a los requerimientos generales del módulo, su diseño de estructura, circuitos de medición, control y potencia, manual de uso, mantenimiento y hojas guía.

En la sección cuatro se detallan las conclusiones y recomendaciones que surgieron como resultado de la elaboración del proyecto.

Finalmente, en la sección cinco se presentan las referencias bibliográficas que fueron necesarias para el desarrollo de este proyecto.

PALABRAS CLAVE: Motor DC, Freno Dinámico, Freno Regenerativo, Freno Contracorriente.

ABSTRACT

In this project, focused on the development of a didactic module for the control of electric braking of a direct current motor, the characteristics related to the algorithms and circuits that were necessary for the integration of electrical and mechanical processes under the domain are exposed. of a microcontroller, in this case an Arduino Nano board is chosen, which oversees controlling the entire process.

This idea arises as a response to the lack of necessary equipment to carry out laboratory practices within the Technologists Training Collage, because, at present, subjects such as "Fundamentals of electrical machines" need to reinforce in a practical way the theoretical knowledge about direct current motors.

For a better understanding of this project, each of the following chapters detail fundamental stages within the module development process, where:

In section one the introduction is shown, where characteristics such as the context of the problem to be solved, the general and specific objectives proposed for the development of the module and some theoretical foundations that were necessary for a better interpretation of the subject are defined.

Section two describes the methodology used to implement the module, as well brake as the parameters and procedures carried out to meet each of the objectives.

In section three are detailed each of the results obtained based on the general requirements of the module, the structure design, measurement, control and power circuits, user manual, maintenance and guide sheets are detailed.

Section four details the conclusions and recommendations that emerged because of the development of the project.

Finally, section five presents the bibliographic references that were necessary for the development of this project.

KEYWORDS: DC Motor, Dynamic Brake, Regenerative Brake, Countercurrent Brake.

1 INTRODUCCIÓN

La Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) oferta carreras de formación técnica, entre las cuales se encuentra la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica; donde uno de sus resultados de aprendizaje del programa de estudios por asignatura (PEA) especifica la correcta manipulación de máquinas eléctricas estáticas y rotativas. Sin embargo, la ESFOT no cuenta con el equipo necesario para la realización de prácticas referentes al tema de máquinas eléctricas.

Por estos factores se ha implementado un módulo didáctico enfocado al control eléctrico del frenado en un motor de corriente continua, el cual posibilita la realización de prácticas de laboratorio que permitirán comprobar de forma práctica los temas estudiados en la materia Fundamentos de Máquinas Eléctricas.

Para facilitar la interacción entre los estudiantes y el módulo, este opera de forma automática, en donde por medio de un menú se puede seleccionar el tipo de frenado a realizarse, además, como complemento, se incorporaron distintos sensores que ayudan a obtener datos característicos de cada uno de los tipos de frenados, como el voltaje y corriente de operación, el signo de la corriente para determinar cuando el motor empiece a trabajar como un generador y un sensor de velocidad el cual permite presentar valores correspondientes a dicha magnitud.

El módulo se encuentra funcionando de acuerdo con los alcances establecidos, el certificado que avala lo mencionado se encuentra en el Anexo 1.

1.1 Objetivo general

Implementar un módulo didáctico para el control de frenado de motores DC

1.2 Objetivos específicos

Establecer los requerimientos para el módulo didáctico

Implementar la estructura del módulo didáctico

Implementar los circuitos de medición, control y potencia para el módulo

Probar el funcionamiento del módulo didáctico

Redactar el manual de uso y mantenimiento, así como las hojas guía de prácticas

1.3 Fundamentos

Motor de corriente continua

Es una máquina eléctrica rotativa, capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. Trabaja con una fuente de alimentación de corriente continua, la cual puede ser encontrada en pilas, baterías, fuentes regulables, etc. (ver Figura 1.1)

Son una de las máquinas más versátiles, ya que tienen un fácil control de posición, paro y velocidad. Dicha versatilidad lo han llevado a ser una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. [1]

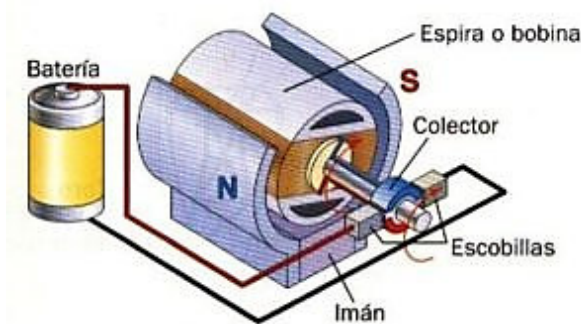


Figura 1.1 Motor de corriente continua [2]

Tipos de motores de corriente continua

Existen diferentes tipos de motores de corriente continua, los cuales se clasifican de acuerdo con la forma en la que se encuentran constituidos los campos magnéticos del estator.

Motor de imán permanente

En este tipo de motores, el campo magnético del estator es generado por imanes permanentes, los cuales no requieren una fuente de alimentación externa (ver Figura 1.2). El torque de arranque es una de las principales ventajas de este motor, ya que, debido a la baja resistencia en los devanados, la corriente que circula por estos es alta, lo cual produce el alto par. [3]

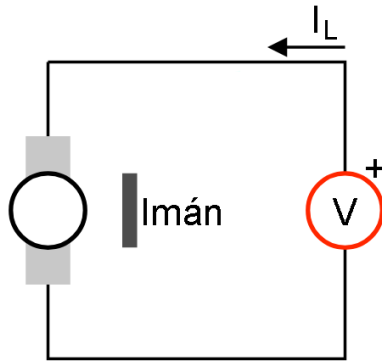


Figura 1.2 Circuito equivalente del motor de imanes permanentes [4]

Al trabajar con estos motores, el cambio del sentido de giro del eje se produce por la conmutación de la dirección del voltaje aplicado, ya que la corriente y el campo varían solo en el rotor. [4]

Motor paralelo

Este tipo de motor tiene los circuitos de armadura y devanado de campo conectados en paralelo (ver Figura 1.3). Cuenta con un torque de arranque de aproximadamente 1.5 veces el torque de operación nominal y la corriente de carga total es la suma de las corrientes de la armadura y el campo. [3]

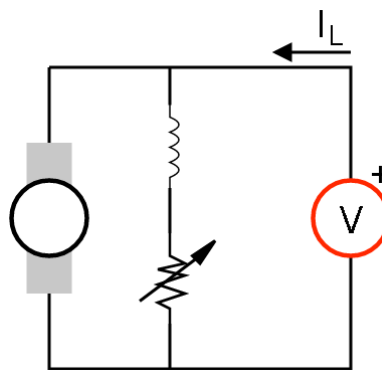


Figura 1.3 Circuito equivalente del motor paralelo [4]

La velocidad de estos motores varia poco con respecto a variación de la carga, por lo que resulta una buena opción al momento de requerir velocidad constante y bajo par de arranque. [3]

Motor serie

El motor serie cuenta con sus devanados (armadura y campo) conectados en serie (ver Figura 1.4), por lo que la corriente que circula por estos es la misma. Este tipo de motor produce altos torques de arranque y velocidad variable dependiendo de la carga. [3]

Una gran limitante, en este tipo de motores, es que pueden fallar cuando estos se descargan súbitamente debido a la fuerza dinámica a altas velocidades. [3]

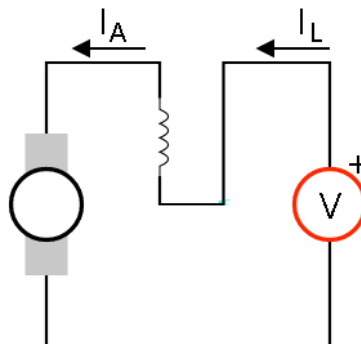


Figura 1.4 Circuito equivalente del motor serie [4]

El motor serie antiguamente poseía múltiples aplicaciones, por ejemplo en aviones se utilizaba para arrancar motores, movimiento del tren de aterrizaje, etc. [3]

Motor compuesto

Este motor cuenta con las características combinadas de los motores paralelo y serie, ya que los devanados de campo se encuentran conectados tanto en derivación como en serie. (ver Figura 1.5). Gran parte de la corriente de carga pasa a través de los devanados de armadura y serie, mientras que la corriente de carga restante circula por los devanados de derivación. [3]

Cuentan con una velocidad máxima limitada y con un torque de arranque menor al de un motor en serie, pero mayor al de un motor en derivación de similar tamaño.

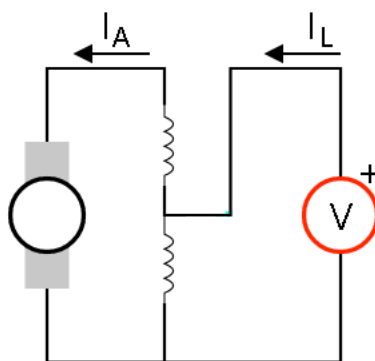


Figura 1.5 Circuito equivalente del motor compuesto [4]

Este motor es adecuado para aplicaciones donde se desee una velocidad constante y un alto par de arranque.

Frenado en motores de corriente continua

Al trabajar con motores de corriente continua, aparte de arrancar y regular la velocidad con suavidad y precisión, existen aplicaciones en las cuales se requiere desacelerar o detener el eje del motor, por lo que este procedimiento puede ser mecánico o eléctrico.

En cuanto al método mecánico para detener un motor de corriente continua, se utiliza la fuerza de rozamiento entre una llanta rotórica y unas zapatas que ayudarán mediante aprisionamiento detener la máquina en el momento requerido (ver Figura 1.6). [5]

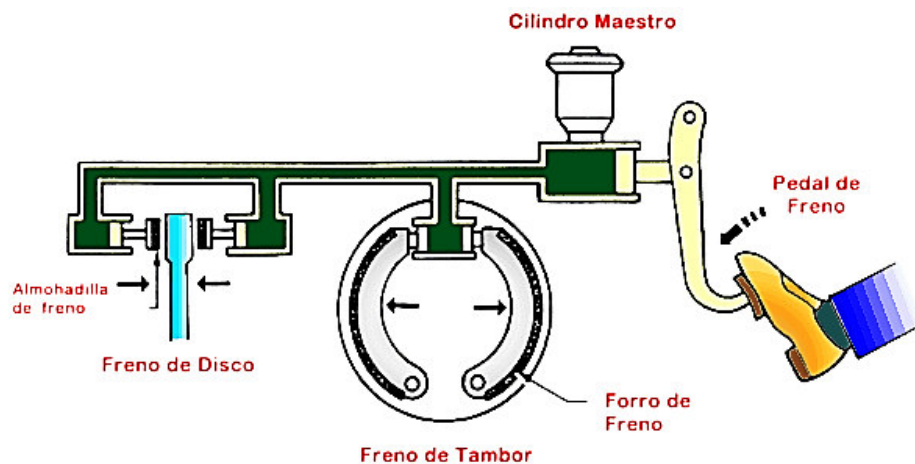


Figura 1.6 Freno mecánico con zapata y bomba hidráulica [6]

Este método de freno mecánico por si solo cuenta con algunas desventajas: [7]

- Es difícil de controlar
- Es dependiente de la superficie en contacto al momento del frenado
- Es un método brusco
- Desgaste de los materiales mecánicos en contacto

Respecto al método de frenado eléctrico, este se produce cuando el motor empieza a trabajar como un generador convirtiendo la energía cinética que tienen todas las masas giratorias acopladas al rotor. [5]

Como particularidad del método de frenado eléctrico, es sabido que este desaparece cuando la máquina se detiene, por lo que es recomendable combinar ambos métodos (mecánico y eléctrico) para así lograr un paro total del rotor. [5]

El frenado eléctrico generalmente cuenta con tres métodos existentes: freno por contracorriente, freno dinámico y freno regenerativo. [7]

Debido a la disponibilidad en el mercado, en este proyecto se ha considerado el uso de motores de imanes permanentes, cuyo funcionamiento es similar al del motor paralelo, por lo tanto, en el desarrollo y explicación de los tipos de frenado se considerará como referencia el modelo circuital de dicho motor.

Freno por contracorriente

Este método de frenado es muy empleado cuando es necesario detener el motor repentinamente para poder invertir su marcha, aunque en algunas aplicaciones el motor es desconectado del suministro antes de que empiece a girar en sentido contrario. [5]

Como se observa en la Figura 1.7, para detener o invertir la dirección del eje se necesita variar la posición del conmutador DPDT. Cuando este se encuentre en la posición N, el motor estará polarizado de manera directa y girará en un sentido, pero al momento de variar su posición de N a P, el motor se polarizará de manera inversa, ocasionando que este pueda girar en sentido contrario generando un torque de frenado.

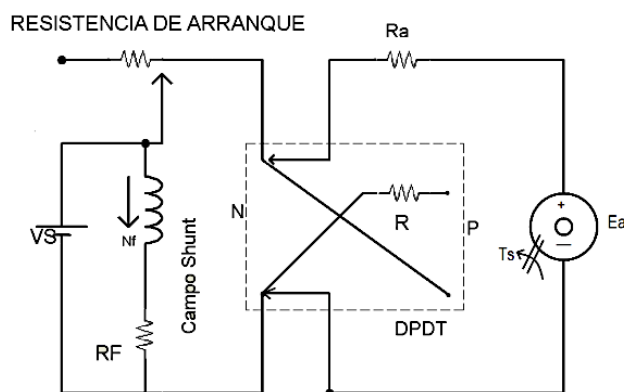


Figura 1.7 Circuito freno por contracorriente en motor paralelo [7]

Durante el proceso de frenado, la fuerza contraelectromotriz del motor y el voltaje de alimentación de la fuente se encuentran en el mismo sentido, por lo que en ocasiones es necesario conectar una resistencia externa en serie con el circuito de armadura, para proteger al motor de un aumento excesivo de corriente en dicho circuito. Cuando la corriente cambie de sentido, dicha fuerza provocará el movimiento del eje del motor en sentido contrario. [7]

Freno dinámico

Este método es utilizado cuando el motor tiende a continuar su movimiento cinético una vez que es desconectado de la fuente de alimentación.

Su principio consiste en hacer trabajar a la máquina como un generador, de tal manera que, al momento de ser desconectada de la fuente se acople una carga.

En la Figura 1.8, cuando el selector DPDT se encuentre en la posición N, el motor estará consumiendo energía de la fuente, al momento de variar la posición del selector de N a P, los terminales del motor se conectarán a una resistencia de carga y este empezará a trabajar como un generador, dicha energía será disipada en forma de calor por la resistencia y provocará que el motor reduzca su velocidad hasta el punto de detenerse por completo.

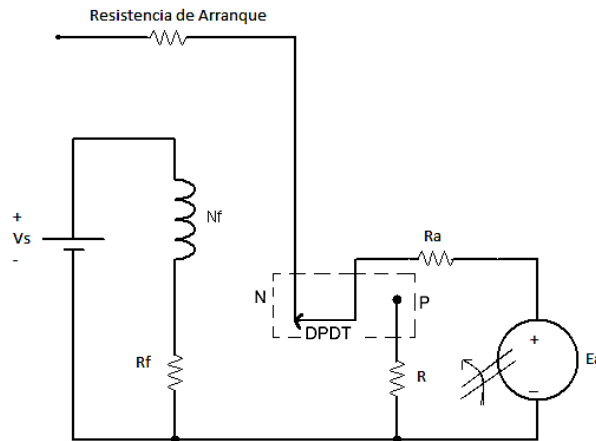


Figura 1.8 Circuito freno dinámico en motor paralelo [7]

El tiempo en que se frena la máquina dependerá del valor de resistencia acoplada, así se deduce que cuanto menor sea dicho valor, el motor se frena en un lapso más corto, esto por ley de Ohm. [7]

Freno regenerativo

También conocido como sistema de recuperación de energía, es un método de frenado que se obtiene como efecto del motor cuando este se logra acelerar mediante cualquier impulso mecánico externo, dicho impulso debe superar el valor de la velocidad nominal del motor en vacío para producir una f.e.m. superior al voltaje de alimentación, provocando así un cambio en el sentido de la corriente y devolución de energía a la fuente, trabajando como generador. La fuente a su vez actúa como receptor de dicha energía lo cual representa una carga, frenando así la máquina. [7]

Su implementación se ha popularizado en los recientes años con la creciente demanda de coches eléctricos, dado que con este método se consigue frenar el motor y aprovechar dicha energía para cargar las baterías de alto voltaje (ver Figura 1.9). Sin embargo, se tiene la limitante de que este reduce su eficiencia a baja velocidad pues su acción está limitada a la capacidad de absorción de energía del sistema, en este caso las baterías. [8]

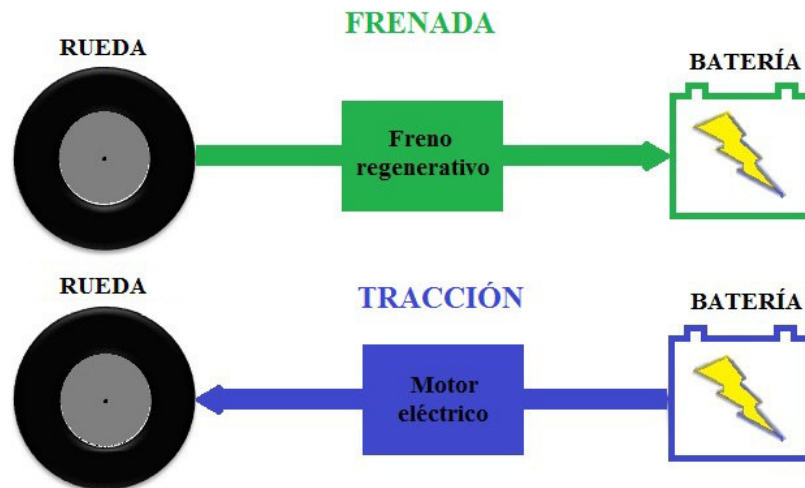


Figura 1.9 Esquema de funcionamiento del freno regenerativo [9]

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología usada

La metodología empleada en el desarrollo del proyecto se basa en la ciencia del diseño, la cual defiende la generación de conocimientos mediante la resolución de un problema de diseño, pues el desarrollo de una solución abarca criterios propios del método científico.

Se realizó una revisión bibliográfica de todo lo referente a frenado de motores de corriente continua, para luego proceder a seleccionar un motor comercial con el cual se establecieron los valores de voltaje y corriente de la fuente. Además, en base al motor seleccionado se definieron los tipos de frenado a realizarse, esto con el fin de establecer las protecciones eléctricas, las conexiones eléctricas y demás elementos. Además, se ha considerado un motor secundario para que acelere al motor principal y lograr simular el efecto del freno dinámico y regenerativo.

En base a las dimensiones del motor y de todos los implementos utilizados en el módulo didáctico se estableció la geometría y dimensiones de la estructura, así como el material para que el módulo sea robusto, en este caso se utilizó madera para dicha estructura. Se utilizó un software comercial CAD para el diseño de los planos de la estructura, los cuales fueron empleados para la construcción de este y el posterior montaje de los implementos seleccionados.

Se seleccionó el microcontrolador y los sensores de acuerdo con las magnitudes que se requieren medir tales como voltaje, corriente, velocidad y potencia. En este caso se utilizó una placa Arduino Nano para controlar la automatización del sistema y el procesamiento de la información.

Se realizó el dimensionamiento de los elementos para cada uno de los circuitos de medición, control y potencia. Se desarrolló el respectivo algoritmo de control para poder interactuar con el módulo didáctico.

Con el fin de evaluar el buen estado, así como el funcionamiento del módulo, se realizaron las siguientes pruebas:

- Pruebas de continuidad eléctrica.
- Pruebas de alimentación eléctrica.
- Pruebas del sistema de medición.

- Pruebas de elementos de protección eléctrica.
- Pruebas de funcionamiento del módulo en los tipos de frenado posible.

Finalmente se realizó un video que indica el correcto uso del módulo, así como la definición de un plan de mantenimiento. Además, para el uso del módulo por parte de los estudiantes, se realizó una hoja guía de laboratorio, en la cual se incluyó información sobre el tópico correspondiente, procedimiento de la práctica y resultados a obtenerse.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este proyecto se ha implementado un módulo, con el cual se puede probar los tres métodos de frenado eléctrico en un motor de corriente continua, el sistema es comandado por un microcontrolador Arduino Nano, el cual facilitó la automatización de todo el proceso.

El diseño del circuito se basó en la conmutación de relés, para la variación de conexiones de los terminales del motor, que requiere cada método.

El módulo cuenta con dos motores de corriente continua, en donde, el primero de estos es en el cual se van a realizar las pruebas, mientras que el segundo es utilizado para recrear situaciones físicas en las que el freno dinámico y regenerativo logran operar.

La selección de cada uno de estos métodos de frenado se realiza mediante la incorporación de un encoder rotatorio, con el cual, al girarlo, se puede interactuar con un menú presente en la pantalla lcd. Luego, mediante la pulsación de los distintos botones se puede arrancar el motor, frenar según el método seleccionado y resetear todo el sistema para iniciar una nueva selección de tipo de frenado.

Además, el módulo cuenta con sensores de velocidad, corriente y voltaje, los cuales presentarán sus valores en una pantalla lcd. El sensor de corriente cuenta con la característica de detectar el sentido de esta, por lo que, por medio de leds indicadores, se puede observar cuando el motor principal trabaja como motor o generador al momento de simular el método de freno dinámico y regenerativo.

Para el caso del freno dinámico, el módulo cuenta con un selector, el cual conectará los terminales del motor a unas borneras o a un foco (con una resistencia en serie). Esto con la intención de que el usuario pueda seleccionar de manera manual que tipo de carga desea utilizar para efectuar el método de frenado.

En la Figura 3.1 se encuentra un diagrama de bloques que detalla de manera general la composición de todo el sistema que conforma el módulo.

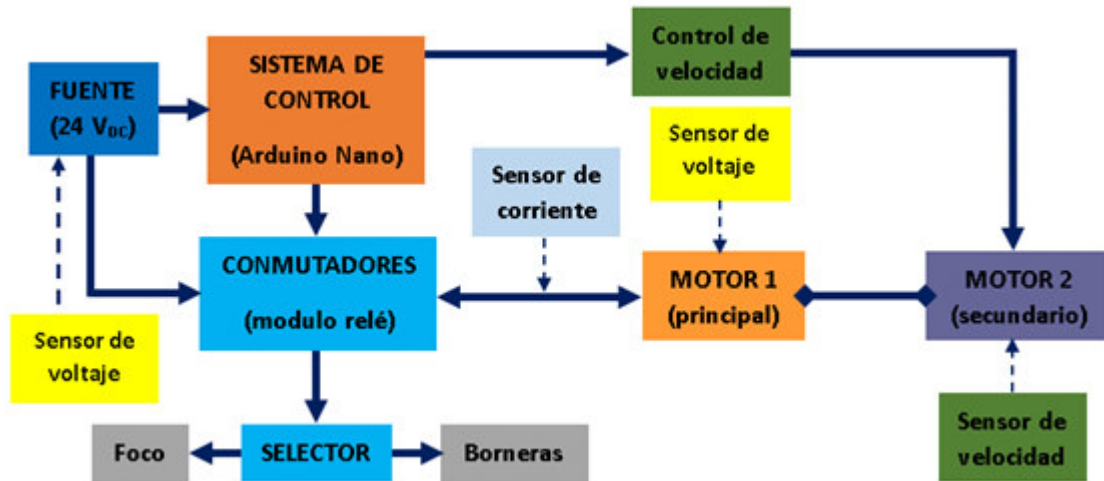


Figura 3.1 Diagrama de bloques general del módulo

3.1 Requerimientos para el módulo didáctico

El módulo que se desea implementar debe ser capaz de simular los tres métodos de frenado eléctrico que se pueden realizar en un motor de corriente continua. Se determinó que este trabajaría de manera automática para así facilitar la interacción con los usuarios.

De manera específica se establecieron los siguientes requerimientos:

- Ser compacto y transportable.
- Ser interactivo.
- Utilizar elementos de medición y protección.
- Utilizar un sensor que detecte el sentido de la corriente del motor principal.
- Contar con un motor secundario para acelerar al motor principal.
- Tener borneras para conectar manualmente resistencias (freno dinámico).
- Tener borneras para alimentar el motor con baterías recargables (freno regenerativo).
- Contar con leds indicadores del estado de funcionamiento de los motores.

A continuación, en base a los requerimientos antes expuestos, se detallan cada uno de los elementos que fueron necesarios para el desarrollo del proyecto.

Motor principal

Se ha considerado un motor de imanes permanentes (ver Figura 3.2) que sea de un tamaño considerablemente pequeño y que contase con una velocidad nominal relativamente baja.



Figura 3.2 Motor principal de corriente continua

En la Tabla 3.1 se describen las características del motor principal, las cuales fueron necesarias para el dimensionamiento de la fuente de la alimentación.

Tabla 3.1 Características del motor principal

Características	
Marca	ZD MOTOR
Modelo	Z2D30—24A
Potencia	30 (W)
Voltaje de alimentación	24 (V _{DC})
Corriente de alimentación	2 (A)
Velocidad	2000 (rpm)

Motor secundario

El motor secundario debía contar con características físicas similares a las del motor principal (para acoplar sus ejes) y tener una velocidad nominal superior.

El motor seleccionado cuenta con velocidad nominal y potencia superior a la del motor principal y tiene incorporado un encoder, el cual será útil para determinar la velocidad de giro de ambos motores pues se encuentran acoplados por el eje. (ver Figura 3.3).



Figura 3.3 Motor secundario de corriente continua

En la Tabla 3.2 se describen las características del motor secundario.

Tabla 3.2 Características del motor secundario

Características	
Marca	NISCA CORPORATION
Modelo	NF5475E
Potencia	45(W)
Voltaje de alimentación	24 (V _{DC})
Corriente de alimentación	1.8 (A)
Velocidad	3175 (rpm)

En la Tabla 3.3 se detallan las características del encoder de velocidad con que cuenta el motor secundario.

Tabla 3.3 Características del encoder de velocidad

Características	
Modelo	B3015600B
Tipo	Óptico
Formato de la señal	Incremental
Voltaje de alimentación	5 (V _{DC})
Corriente de alimentación	50 (mA)
Pulsos por revolución	200
Fases de salida	2

La incorporación de este motor nace a partir de la necesidad de mantener inercia en el eje del motor principal para el método de freno dinámico y la de acelerar al motor principal cuando se simule el método de freno regenerativo.

En el método de freno dinámico, al desconectar al motor principal de la fuente, existía un problema, el cual era que dicho motor se detenía de manera casi instantánea y no se podía notar el efecto de freno al acoplar resistencias, para ello, al desconectar el motor principal de la fuente, de forma instantánea, entra en funcionamiento el motor secundario a una velocidad similar a la nominal del motor principal, para así simular que dicho motor mantiene su inercia y poder conectar resistencias de diferente valor y notar el efecto de freno.

En el caso del freno regenerativo, el motor secundario es utilizado para acelerar al motor principal y sobrepasar su velocidad nominal cuando este es alimentado por una fuente externa recargable.

Fuente de alimentación

Se requería de una fuente de alimentación que logre transformar la señal alterna de la red a una señal continua. Dicha señal de voltaje debería ser de un valor similar al del voltaje nominal de los motores.

Se optó por adquirir una fuente comercial cuyo voltaje de alimentación sea 110 (V_{AC}) y en su salida entregue un voltaje continuo de 24 (V_{DC}). (ver Figura 3.4)

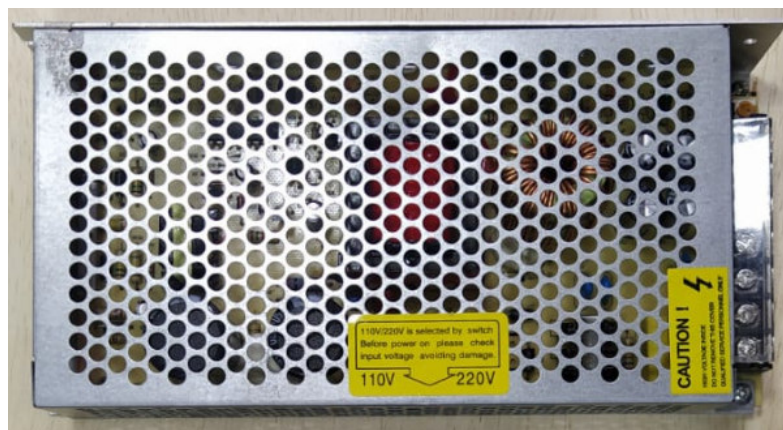


Figura 3.4 Fuente de alimentación

En la Tabla 3.4 se detallan todas las características eléctricas de la fuente de alimentación que provee suministro eléctrico a todos los elementos que conforman el módulo.

Tabla 3.4 Características de la fuente de alimentación

Características	
Modelo	S-145-24
Tipo de convertidor	Conmutado
Voltaje de alimentación	110/220 (V _{AC})
Frecuencia	50/60 (Hz)
Voltaje de salida	22 (V _{DC}) – 32 (V _{DC})
Corriente máxima de salida	6 (A)

Microcontrolador

De acuerdo con el diseño del circuito se determinó que se necesitan:

- 7 pines para controlar los relés.
- 3 pines para conectar los pulsadores que corresponden al arranque, freno y reseteo.
- 2 pines para conectar los leds indicadores del estado de funcionamiento del motor principal.
- 2 pines de interrupción para el sensor de velocidad y encoder rotatorio.
- 3 pines analógicos para los dos sensores de voltaje y sensor de corriente.
- 1 pin analógico para el potenciómetro que controla velocidad del motor secundario.
- 1 pin de salida PWM para controlar la velocidad del motor secundario.
- 2 pines para la comunicación I2C entre el lcd y el microcontrolador.

Luego de un estudio de los microcontroladores que existen en el mercado y que cumplan con lo antes expuesto, se optó por trabajar con el microcontrolador Arduino Nano, el cual cuenta con suficiente memoria, cantidad de pines exactos y reducido tamaño, lo cual facilitó el montaje en el módulo. (ver Figura 3.5)

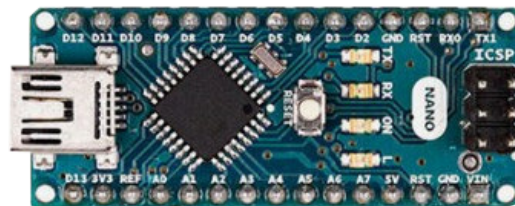


Figura 3.5 Microcontrolador (Arduino Nano) [10]

En la Tabla 3.5 se detallan las características del microcontrolador utilizado.

Tabla 3.5 Características del microcontrolador Arduino Nano [11]

Características	
Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5 (V _{DC})
Memoria flash	32 (kB)
SRAM	2 (kB)
Velocidad de reloj	16 (MHz)
Pines de E/S analógicas	8
EEPROM	1 (kB)
Corriente continua por pin E/S	40 (mA)
Voltaje de entrada	7(V _{DC}) -12(V _{DC})
Pines de E/S digitales	22
Salida PWM	6
Consumo de corriente	19 (mA)
Dimensiones de la placa	18 (mm) x 45 (mm)
Peso	7 (g)

Regulador de voltaje

Al trabajar con un microcontrolador que opera con 5 (V_{DC}), se incorporó un regulador de voltaje que lograra reducir los 24 (V_{DC}) de la fuente a 5 (V_{DC}), los cuales son suficientes para alimentar el microcontrolador y los diferentes elementos electrónicos utilizados (pantalla lcd, sensores, módulos relés, etc.)

Se ha considerado el regulador de voltaje LM2596, el cual maneja una corriente máxima de 3 (A) y puede trabajar hasta con 40 (V_{DC}) de entrada. (ver Figura 3.6)

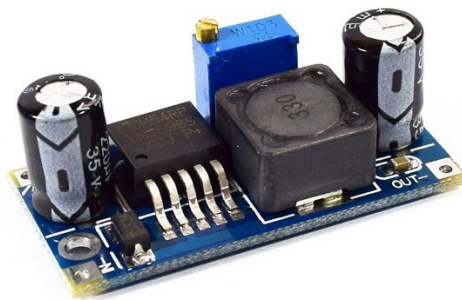


Figura 3.6 Regulador de voltaje LM2596 [12]

En la Tabla 3.6 se encuentran detalladas las características del regulador de voltaje utilizado para el circuito de control.

Tabla 3.6 Características del regulador de voltaje LM2596 [12]

Características	
Valores de voltaje de entrada	4.5 (V _{DC}) – 40 (V _{DC})
Valores de voltaje de salida	1.23 (V _{DC}) – 37 (V _{DC})
Salida de corriente	3 (A)
Tipo de convertidor	Conmutado
Potencia de salida	25 (W)
Eficiencia de conversión	92%
Frecuencia de trabajo	150 (kHz)

Módulo relé

De acuerdo con el diseño realizado se requerían 5 relés para conmutar las conexiones entre los 3 métodos de frenado, por lo que, para reducir la incorporación de elementos en la placa, se optó por trabajar con módulos relés comerciales, ya que estos tienen incorporado optoacopladores y resistencias en la misma placa.

En la Figura 3.7 se encuentran los módulos relés con los que cuenta el módulo, se utilizaron los dos modelos, ya que, comercialmente no existían módulos de 5 canales.

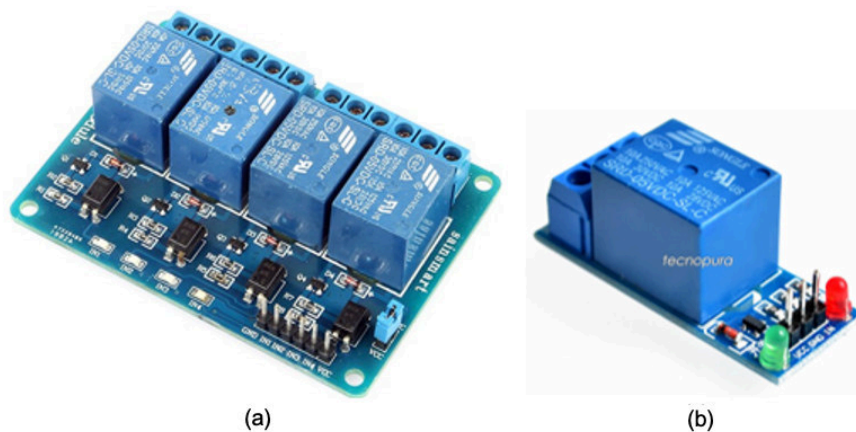


Figura 3.7 Módulos relés, (a) de 4 canales [13] y (b) de un canal [14]

En la Tabla 3.7 se detallan las características de los módulos relés utilizados para la conmutación de los distintos circuitos.

Tabla 3.7 Características del módulo relé [15]

Características	
Voltaje de operación	5 (V _{DC})
Corriente máxima del relé	10 (A)
Voltaje máximo del relé	30 (V _{DC})
Consumo de corriente por relé	90 (mA)

Sensor de corriente

Al requerir un sensor que mida la corriente y el sentido de esta que circula por el motor principal, se optó por trabajar con el sensor ACS712, el cual al medir corriente positiva entrega un voltaje superior a 2.5 V_{DC} y al medir corriente negativa entrega un voltaje inferior a 2.5 (V_{DC}). (ver Figura 3.8)

Con esas características se puede, mediante programación, encender o apagar un led que indica cuando la máquina trabaja como motor o como generador. Aparte que en la pantalla lcd se podrá verificar el sentido de la corriente cuando el motor principal cambie de estado (generador o motor).

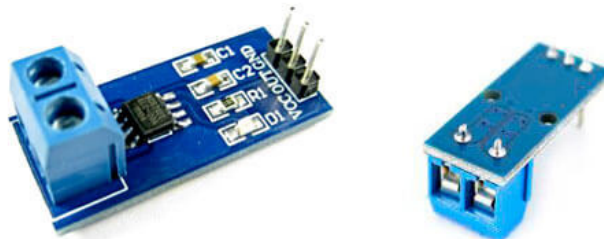


Figura 3.8 Sensor de corriente ACS 712 [16]

En la Tabla 3.8 se detallan las características del sensor de corriente.

Tabla 3.8 Características del sensor de corriente [17]

Características	
Voltaje de salida	3.42 (V _{DC}) – 5 (V _{DC})
Voltaje de operación	4.5 (V _{DC}) – 5.5 (V _{DC})
Salida de voltaje sin corriente	2.5 (V _{DC})
Error total salida	1.5% a 25 (°C)
Resistencia Interna	1.2 (Ω)
Sensibilidad de salida	185 (mV/A)

Pantalla lcd

Con el fin de facilitar la obtención de datos por parte de los sensores, se requería presentar toda la información en una pantalla, por lo que se ha considerado la incorporación de una pantalla lcd 20x4 con módulo I2C, la cual es una de las pantallas lcd más grandes que existe en el mercado y puede trabajar con solo 2 pines del microcontrolador, mediante el protocolo de comunicación I2C. (ver Figura 3.9)



Figura 3.9 (a) Pantalla lcd 20x4 [18] y (b) módulo I2C [18]

En la Tabla 3.9 se presentan las características físicas y eléctricas de la pantalla lcd

Tabla 3.9 Características de la pantalla lcd 20x4 [18]

Características	
Voltaje de alimentación	5 (V _{DC})
Controlador	Hitachi HD44780
Tamaño de carácter	5.23 (mm) x 3 (mm)
Comunicación	I2C
Tamaño de filas por columnas	20x4

Encoder rotatorio

Para mejorar la interacción entre el usuario y el módulo, se incorporó un encoder rotatorio, con el cual se puede navegar en un menú de opciones, presente en la pantalla lcd, mediante la rotación de una perilla. Además, cuenta con un pulsador que también se utiliza en el módulo (ver Figura 3.10).



Figura 3.10 (a) Encoder rotatorio [19] y (b) menú de navegación

En la Tabla 3.10 se encuentran detalladas las características del enconder rotatorio.

Tabla 3.10 Características del enconder rotatorio [19]

Características	
Modelo	KY-040
Voltaje de alimentación	5 (V _{DC})
Corriente	10 (mA)
Posiciones	12 posiciones (cada 30°)
Pulsos por revolución	20
Dimensiones de placa	20 (mm) x 30 (mm)

Fusible

Para proteger al módulo frente a sobre corrientes, se añadió un portafusibles en uno de sus laterales, en el cual se encuentra el fusible de protección. Para determinar el valor nominal del fusible, se midió la corriente que consume todo el sistema al momento de recrear condiciones donde el consumo sea máximo.

En la Figura 3.11 se muestra la corriente que marca el multímetro DT9201A al conectarlo a la alimentación del motor principal.

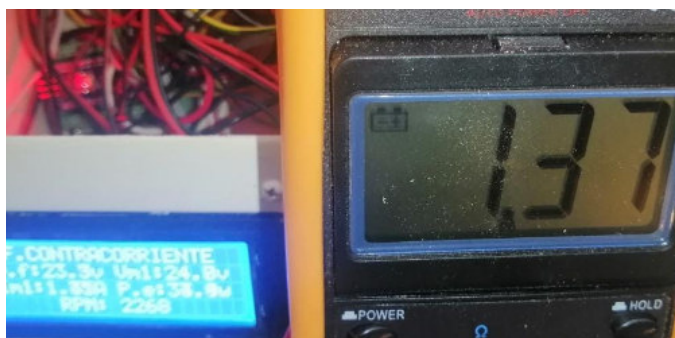


Figura 3.11 Corriente de alimentación al frenar manualmente el eje del motor

Dado que la corriente que manejaría el módulo en sus condiciones máximas de consumo es de 1.37 (A), se utiliza dicho valor para el dimensionamiento del fusible de protección. Utilizando un factor de seguridad de 1.25.

$$I_{\text{fusible}} = I_{\text{nominal}} \cdot \text{factor de seguridad}$$

Ecuación 3.1 Dimensionamiento del fusible

$$I_{\text{fusible}} = 1.71 \text{ (A)}$$

El valor ideal del fusible obtenido mediante la Ecuación 3.1 es de 1.71 (A), sin embargo, comercialmente no se cuenta con dicho valor, por lo que, se aproxima este al valor inmediato superior, es decir un fusible de 2 (A). (ver Figura 3.12)



Figura 3.12 Fusible de 2 (A) y porta fusible del módulo

3.2 Diseño de la estructura del módulo didáctico

El diseño de la estructura fue realizado en SolidWorks 2018, el cual es un programa con el que se puede realizar diseños y simulaciones en 3D.

Estructura

Para su diseño se tuvieron en consideración las dimensiones de la fuente, los motores acoplados, la placa PCB, los módulos externos (módulo relés) y demás elementos de control utilizados (encoder, potenciómetro, pulsadores, etc.) (ver Figura 3.13)

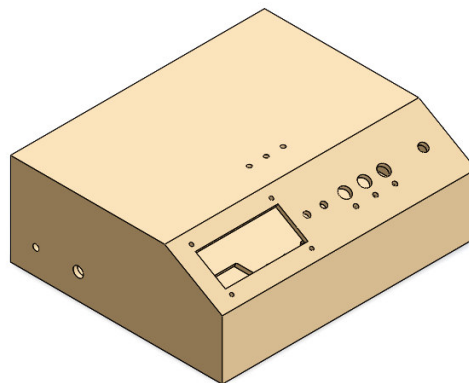


Figura 3.13 Diseño de la estructura

Para la elaboración se consideró la robustez del material, para que este soportara el peso y vibraciones de los motores, por lo que se decidió trabajar con madera trípex, la cual tiene un espesor de 9 (mm) (para los laterales y base) y de (6 mm) (para el tablero y tapa superior donde reposan los motores). (ver Figura 3.14)

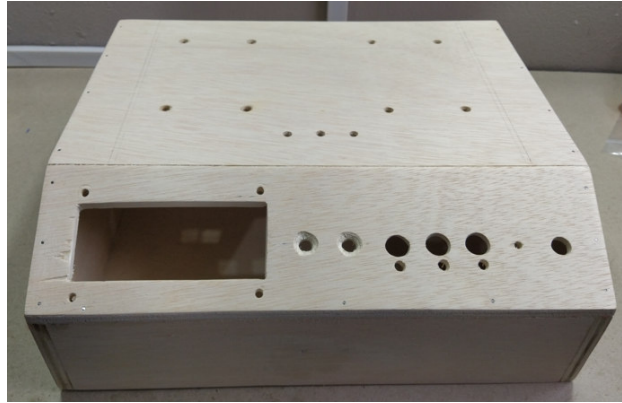


Figura 3.14 Vista frontal de la estructura

Bases de los motores

Con el fin de fijar los motores a la estructura y hacer que el eje de estos coincida en altura para poder acoplarlos, se diseñaron dos estructuras para su posterior impresión en 3D, se consideró que se utilice solo la cantidad de material necesario, sin comprometer su solidez. (ver Figura 3.15)

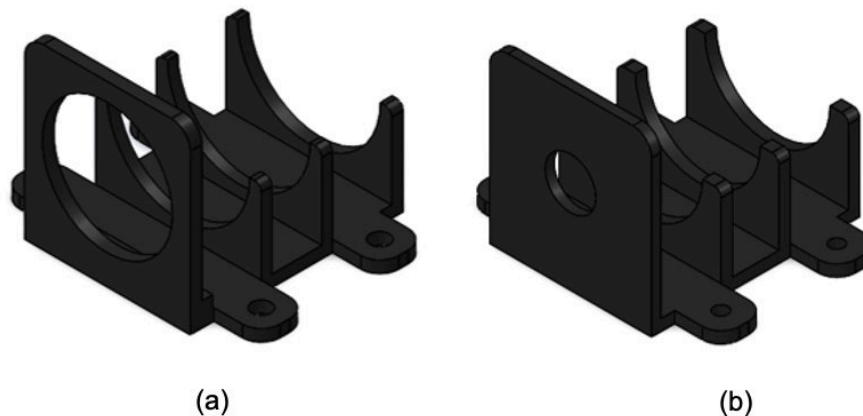


Figura 3.15 Diseño de bases de motores, (a) principal y (b) secundario

Dichas bases fueron impresas en 3D con material PLA (ácido poli láctico) con densidad de relleno al 70% con un patrón de relleno triangular. (ver Figura 3.16)

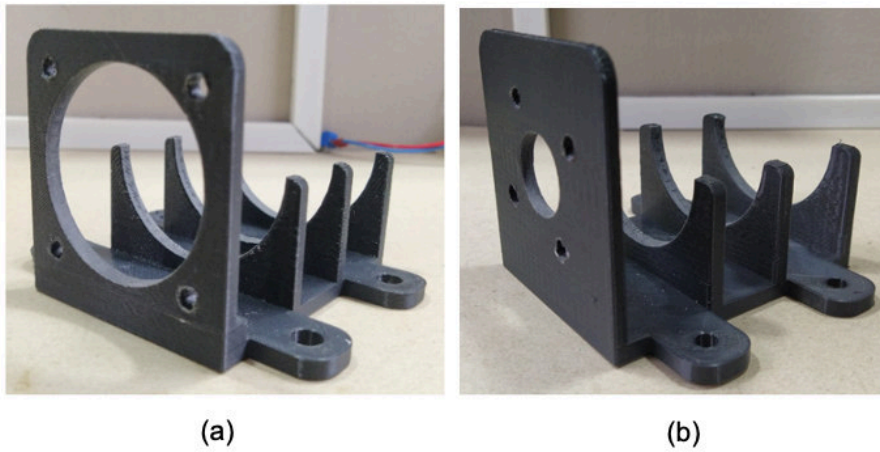


Figura 3.16 Bases de motores, (a) principal y (b) secundario

Estructura final del módulo

A continuación, en la Figura 3.17 se presenta un diseño del módulo con todas sus piezas en 3D, y la estructura real incorporando todos los elementos antes desarrollados.

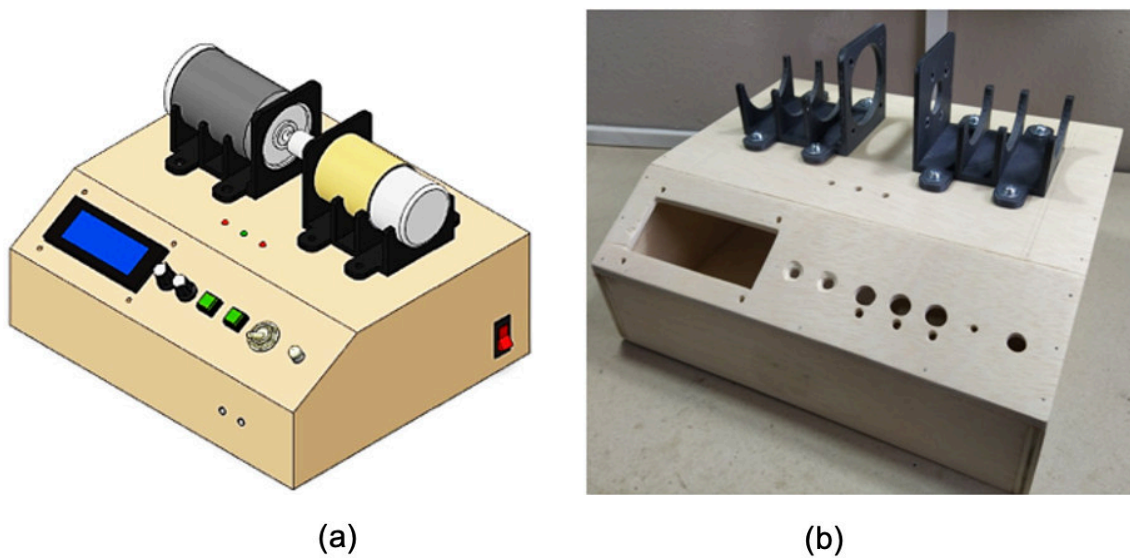


Figura 3.17 (a) Diseño de la estructura y (b) implementación de la estructura

Finalmente, en la Figura 3.18, se presenta una visualización real del módulo en su versión final, ya con todos los acabados y correcciones realizadas.



(a)

(b)

Figura 3.18 (a) Vista frontal y (b) vista diagonal del módulo

3.3 Diseño de los circuitos de medición, control y potencia para el módulo

De acuerdo con los requerimientos, se necesita desarrollar un sistema que logre recrear los tres tipos de freno eléctrico de forma automática. Por lo que se optó por diseñar un circuito de relés comandado por el microcontrolador Arduino Nano.

Además, para el control de velocidad del motor secundario, fue necesario diseñar un circuito que mediante una señal PWM, proporcionada por el microcontrolador, se alimente a dicho motor, la señal se amplifica con un Mosfet.

Para la lectura del voltaje, fue necesario implementar un divisor de tensión en los terminales del motor principal y en la fuente de alimentación, para así obtener una señal adecuada a los niveles de tensión que maneja el microcontrolador.

Para la medición de corriente y velocidad, no fue necesario diseñar un circuito, ya que, en el caso del sensor de corriente, se incorporó un módulo comercial, el cual se conecta en serie al motor principal, mientras que el sensor de velocidad ya se encuentra acoplado al motor secundario.

Con todos los detalles antes mencionados, se desarrollaron las siguientes etapas:

- Diseño del circuito de potencia
- Diseño del circuito de medición de voltaje
- Configuración de los pines del microcontrolador
- Desarrollo del algoritmo de control
- Desarrollo de la placa de circuito impreso

Diseño del circuito de potencia

Inicialmente se diseñó una configuración de relés que logren conmutar los terminales del motor principal para cada método de frenado que se vaya a simular.

En la Figura 3.19 se encuentra la conexión realizada con 3 relés que conmutan los terminales del motor principal, en donde:

- Cuando RL1 y RL2 están en estado normalmente cerrados, conectan al motor principal al puente H que se utiliza en el método de freno por contracorriente.
- Cuando RL1, RL2 y RL3 están en estado normalmente abiertos, conectan al motor principal al conmutador manual que se utiliza en el método de freno dinámico.
- Al RL1 y RL2 estar en estado normalmente abiertos y RL3 estar normalmente cerrado, conectan los terminales del motor principal a las borneras utilizadas en el método de freno regenerativo.

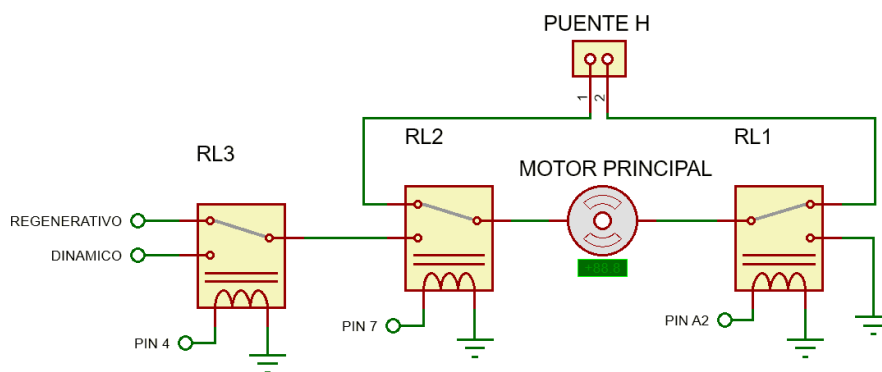


Figura 3.19 Circuito de conmutación entre métodos de frenado

Circuito del método por contracorriente

Este método consiste en conmutar la conexión de los terminales del motor de manera inversa para producir el giro en sentido contrario.

En la Figura 3.20 se muestra la conexión entre el puente H y el motor principal, donde:

- Cuando RL1 y RL2 se encuentran en estado normalmente cerrado, conectan los terminales del motor de forma directa.
- Cuando RL1 y RL2 se encuentran en estado normalmente abierto, conectan los terminales del motor de forma inversa.

Además, se muestra como RL1 es controlado por el pin 12 y RL2 es controlado por el pin 13 del microcontrolador.

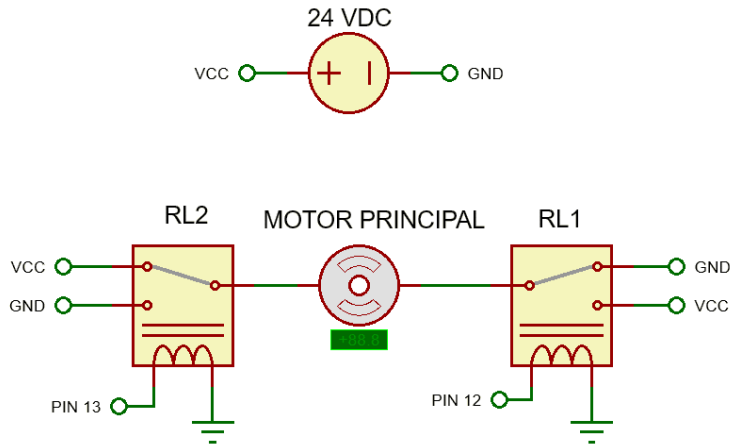


Figura 3.20 Puente H en freno por contracorriente

Circuito del método dinámico

Este método desconecta al motor principal de la fuente de alimentación y conecta los terminales del motor principal a unas borneras, en donde se podrán conectar resistencias de carga para ir frenando el motor.

En la Figura 3.21 se muestra el circuito diseñado para la simulación del freno dinámico, en donde:

- Cuando RL1 está en estado normalmente cerrado, conecta los terminales del motor a la fuente de alimentación, por lo tanto, aquí aún no se produce el freno
- Cuando RL1 está en estado normalmente abierto, los terminales del motor se desconectan de la fuente y se conectan al borne común del selector.

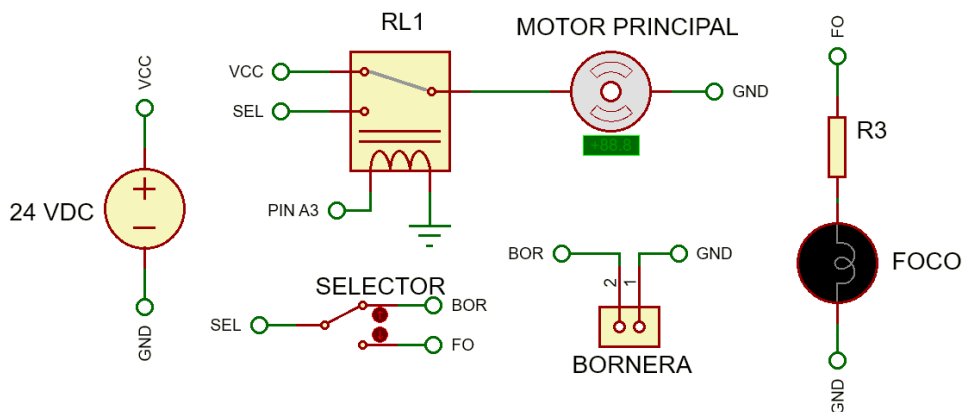


Figura 3.21 Circuito de potencia en freno dinámico

El diseño de este circuito se hizo de tal forma que, al frenar el motor por este método, el usuario pueda escoger, por acción del selector, donde quiere disipar la energía del motor principal.

En donde la posición del selector conectará:

- Una resistencia interna conectada en serie con un foco.
- Las borneras para ir colocando de manera manual resistencias de diferente valor para visualizar la variación de velocidad.

Circuito del método regenerativo

Este método consiste en devolver energía a la fuente cuando el motor, por medio de una fuerza externa, supera la velocidad nominal.

En la Figura 3.22 se muestra como las borneras ahora están conectadas de manera directa al motor, por lo que, para simular este método, es necesario conectar una batería recargable.

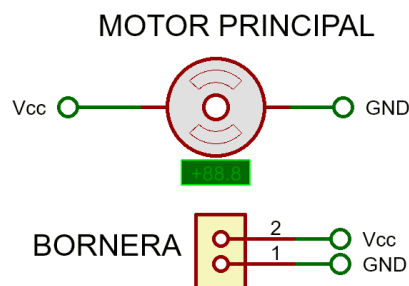


Figura 3.22 Circuito de alimentación en freno regenerativo

Circuito de control de velocidad del motor secundario

Para que los métodos de freno dinámico y regenerativo se puedan simular, necesitan la energía mecánica que otorga el motor secundario al motor principal y se transmite por acción del acople en los ejes. Por lo que se diseñó un circuito capaz de controlar la velocidad gracias a la señal PWM que entrega el microcontrolador.

En la Figura 3.23, en la entrada (PIN 5) ingresa la señal PWM, la cual mediante el optoacoplador 4N35 logra variar el voltaje en la puerta del transistor IRFZ44N, a la vez que se aísla al controlador del transistor, produciendo el control en la velocidad del motor secundario.

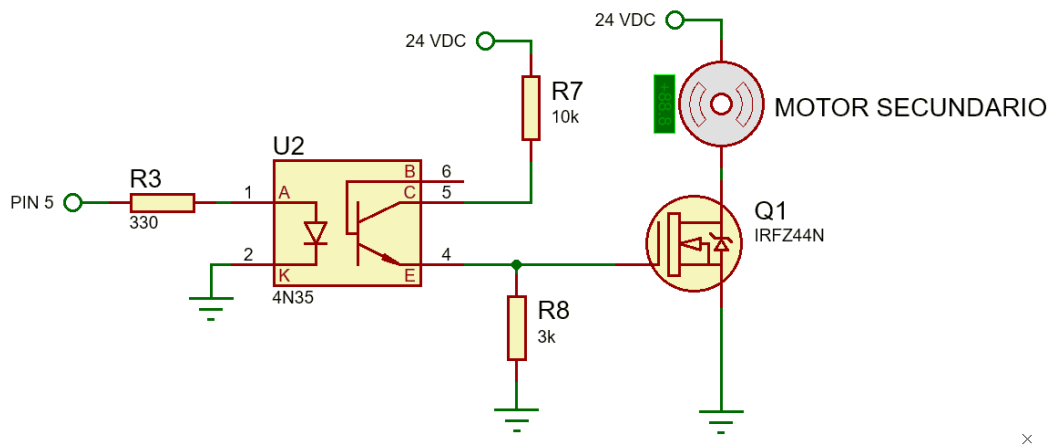


Figura 3.23 Circuito de control de velocidad del motor secundario

Diseño del circuito de medición del voltaje

Para que el microcontrolador logre interpretar los valores de voltaje por medio de sus pines analógicos, se diseñaron divisores de voltaje que a la salida produzcan una tensión de entre 0 a 5 (V_{DC}).

El dimensionamiento del circuito se realizó en base a la Ecuación 3.2.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

Ecuación 3.2 Divisor de voltaje [20]

En donde:

- V_{out} corresponde al voltaje de salida máximo que se requiere en el divisor, el cual es igual a 5 (V_{DC}).
- V_{in} corresponde al voltaje máximo que va a medir el divisor, el cual es igual a 30 (V_{DC}).
- R_1 y R_2 son los valores de las resistencias, para el cálculo se asumió que $R_1=10(k\Omega)$.

A partir de la Ecuación 3.2 se despejó la variable R_2 y se resolvió para determinar el valor de dicha resistencia.

$$R_2 = 2 (k\Omega)$$

En la Figura 3.24, se tiene el circuito completo de los divisores de voltaje, los cuales se encuentra conectados en paralelo a la fuente y al motor principal.

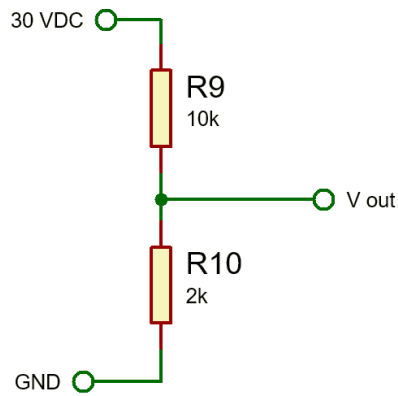


Figura 3.24 Divisor de voltaje para el sensor de tensión

Configuración de los pines del microcontrolador

En la Figura 3.25 se muestran cada uno de los pines con su respectivo nombre, los cuales en la Tabla 3.11 detallan a que parte del sistema se conectan y la función que desempeñan.

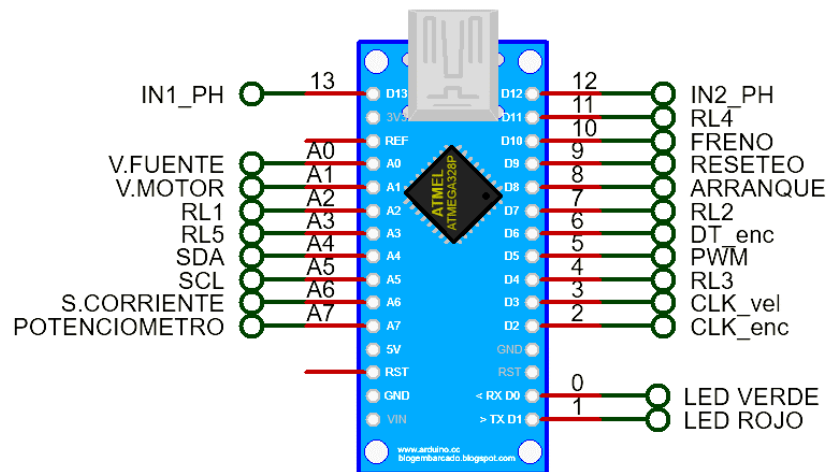


Figura 3.25 Configuración de pines del microcontrolador

Tabla 3.11 Pines utilizados del microcontrolador Arduino Nano

Pin	Nombre	Conexión y función
0	LED VERDE	Pin de salida que controla el primer led indicador
1	LED ROJO	Pin de salida que controla el primer segundo indicador
2	CLK_enc	Pin de entrada del encoder rotatorio
3	CLK_vel	Pin de entrada del sensor de velocidad
4	RL3	Pin de salida que controla el estado del relé 3
5	PWM	Pin de salida PWM para controlar la velocidad del motor secundario
6	DT_enc	Pin de entrada auxiliar del encoder rotatorio
7	RL2	Pin de salida que controla el estado del relé 2
8	ARRANQUE	Pin de entrada del pulsador ARRANQUE
9	RESETEO	Pin de entrada del pulsador RESETEO
10	FRENO	Pin de entrada del pulsador FRENO
11	RL4	Pin de salida que controla el estado del relé 4
12	IN2_PH	Pin de salida que controla el puente H
13	IN1_PH	Pin de salida auxiliar que controla el puente H
A0	V.FUENTE	Pin de entrada analógica que lee la señal del divisor de voltaje de la fuente
A1	V.MOTOR	Pin de entrada analógica que lee la señal del divisor de voltaje del motor principal
A2	RL1	Pin de salida que controla el estado del relé 1
A3	RL5	Pin de salida que controla el estado del relé 5
A4	SDA	Pin de entrada de señal "SDA" para el módulo I2C del LCD
A5	SCL	Pin de entrada de señal "CLK" para el módulo I2C del LCD
A6	S.CORRIENTE	Pin de entrada analógica que lee la señal del sensor de corriente
A7	POTENCIOMETRO	Pin de entrada analógica que lee la señal del potenciómetro

Desarrollo del algoritmo de control

Para la programación del microcontrolador, en primer lugar, se plantearon cada una de las actividades que este realizaría, las cuales son:

- Inicialmente, en el lcd, se presentará información respecto al módulo.
- Pasada la presentación, se deberá desplegar un menú de opciones, el cual deberá contener los tres métodos de frenado.
- La navegación entre estos tres métodos de frenado se deberá realizar con el giro de la perilla del encoder.
- Para arrancar el motor en determinado método de frenado, el microcontrolador deberá realizar la conmutación de relés de acuerdo con el método seleccionado y mediante la lectura del pulsador incorporado en el encoder rotatorio, este arrancará el motor principal.
- Una vez que el motor arranca en determinado método de frenado, se deberán presentar en el lcd, los valores recopilados por los sensores de voltaje, corriente y velocidad.
- Para aplicar el freno en el motor, el microcontrolador deberá leer el estado del pulsador "FRENO".
- Si se acciona el freno por contracorriente, el microcontrolador deberá, mediante el puente H, variar de posición los terminales del motor para luego desconectarlo automáticamente cuando este se detenga, el motor no debe girar en sentido contrario.
- Al accionar el freno dinámico, el microcontrolador deberá desconectar al motor principal de la fuente y conectarlo al borne común del selector. También, deberá arrancar al motor secundario con una velocidad similar a la nominal del motor principal.
- Al accionar el freno regenerativo, el microcontrolador deberá desconectar al motor principal de la fuente y conectarlo en paralelo a la bornera. También, deberá, mediante la lectura del estado de un potenciómetro, controlar la velocidad del motor secundario.
- Cuando sea presionado el pulsador RESET, el microcontrolador deberá detener todo el proceso y regresar al menú de selección.
- Finalmente, el microcontrolador debe controlar el encendido y apagado de dos leds indicadores. Cuando la corriente que detecte el sensor sea positiva, se debe encender solo el led verde, pero si la corriente detectada es negativa, solo se debe encender el led rojo.

A continuación, en la Figura 3.26, se muestra un diagrama de flujo que detalla cada una de las etapas que tiene el algoritmo de control.

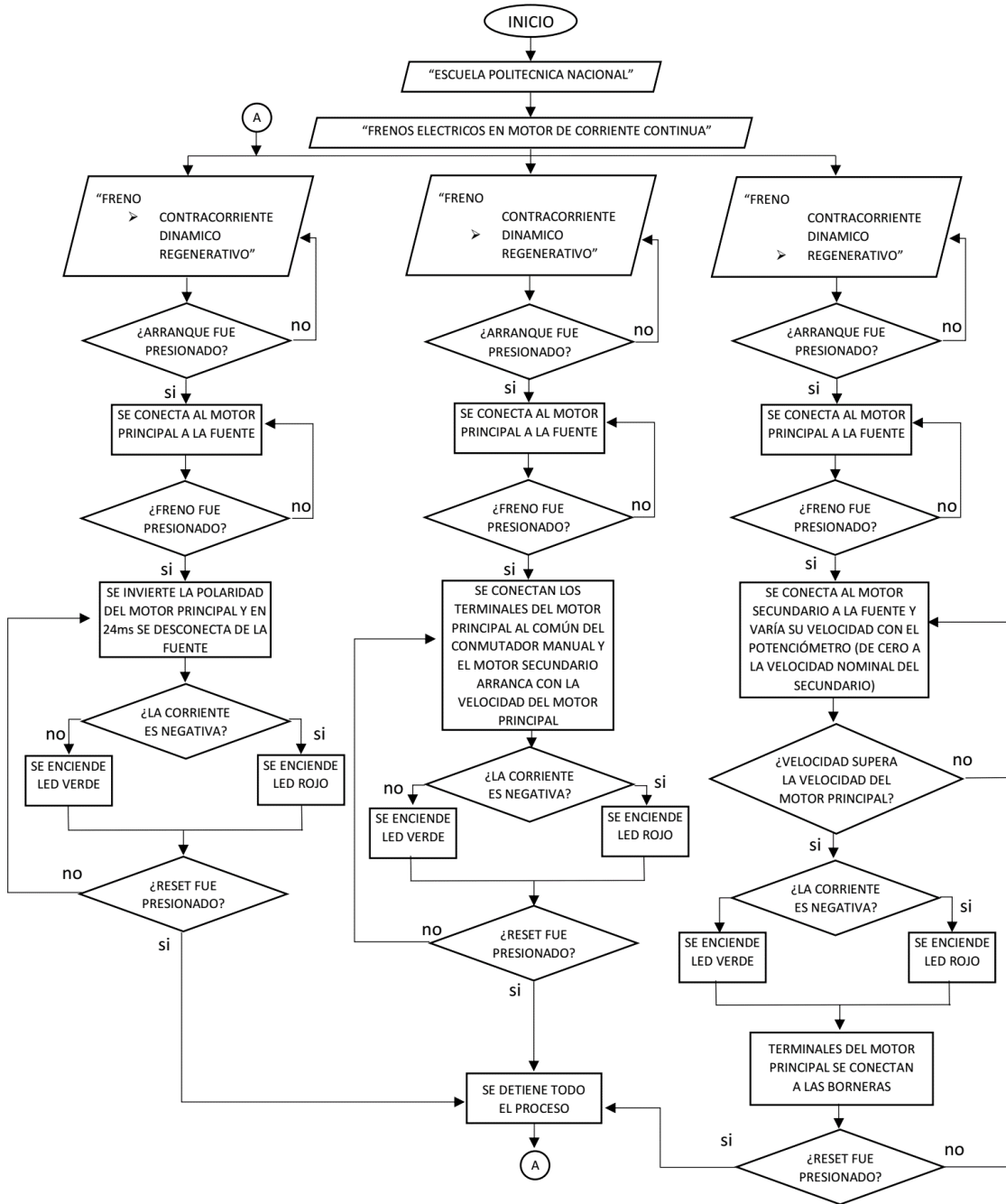


Figura 3.26 Diagrama de flujo del algoritmo de control

Desarrollo de la placa de circuito impreso

El circuito de control debe ir instalado dentro del módulo, por lo que se decidió por realizar una placa de circuito impreso (PCB). Se utilizó el método de planchado para lograr adherir el circuito diseñado a una baquelita, para luego, mediante el método de atacado químico, conseguir las pistas del circuito y poder soldar los elementos. (ver Figura 3.27)

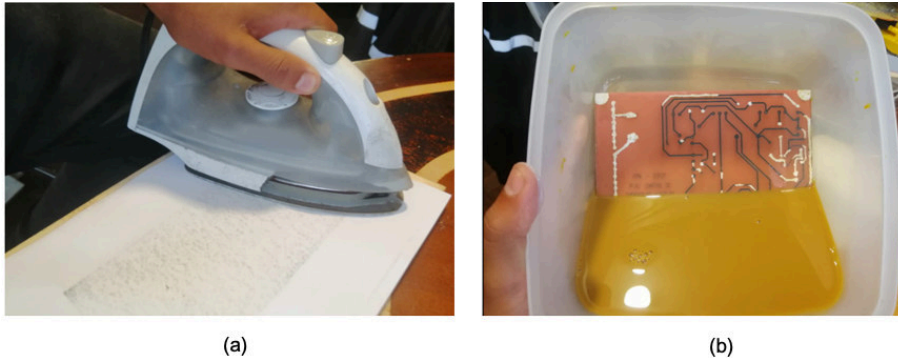


Figura 3.27 (a) Método de planchado y (b) ataque químico a baquelita

Finalmente, en la Figura 3.28 se muestra el circuito impreso ya con todos sus elementos soldados.



Figura 3.28 Elementos soldados en la placa

3.4 Pruebas de funcionamiento del módulo didáctico

Para comprobar el correcto funcionamiento del módulo se plantearon una serie de pruebas, las cuales son:

- Pruebas de continuidad eléctrica
- Pruebas de alimentación eléctrica
- Pruebas del sistema de medición
- Pruebas de elementos de protección eléctrica
- Pruebas de funcionamiento del módulo en los tipos de frenado posible.

Prueba de continuidad eléctrica

La prueba se realiza a fin de comprobar el correcto funcionamiento del circuito impreso y para comprobar que las conexiones realizadas con los cables se encuentren en buen estado.

Con la función de “Continuidad” del multímetro DT9201A se comprueba que exista conexión eléctrica entre todos los puntos requeridos y que no exista continuidad en las pistas que se encuentran relativamente cerca una de otra.

Este proceso inicialmente se desarrolló al momento de soldar los componentes a la placa, pero finalmente al momento de armar todo el sistema fue necesario esta prueba para comprobar el correcto funcionamiento de la conmutación de los relés. (ver Figura 3.29)



Figura 3.29 Prueba de continuidad con el multímetro

Pruebas de alimentación eléctrica

Se requería comprobar que los niveles de voltaje adecuados lleguen a las siguientes zonas: fuente de voltaje, alimentación del microcontrolador y bornes de los motores.

Por lo que se utilizó el multímetro DT9201A para dichas mediciones.

Voltaje de alimentación de la fuente

Como se detalló en la Tabla 3.4, la fuente trabaja con un voltaje de alimentación de 110 (V_{AC}) al momento de realizar la medición en dichos bornes se determinó que, si estaba llegando la alimentación monofásica de la red. (ver Figura 3.30)

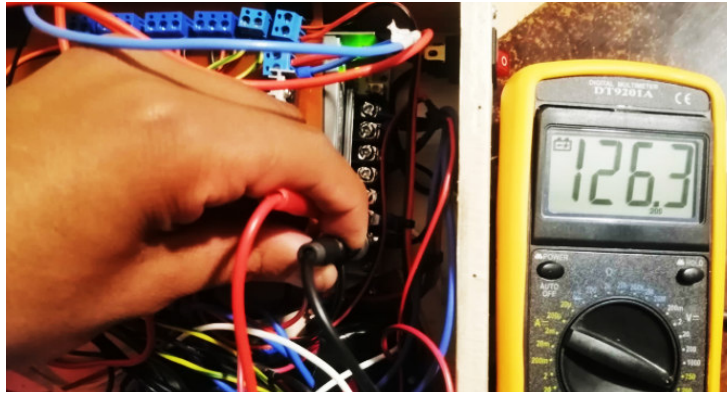


Figura 3.30 Medición del voltaje de alimentación de la fuente

Voltaje de salida de la fuente

Ya que en los requerimientos generales del módulo se estableció que se iba a trabajar con un motor de 24 (V_{DC}), se reguló un pequeño potenciómetro ubicado en la fuente, para que a la salida exista un valor lo más cercano dicho voltaje. (ver Figura 3.31)

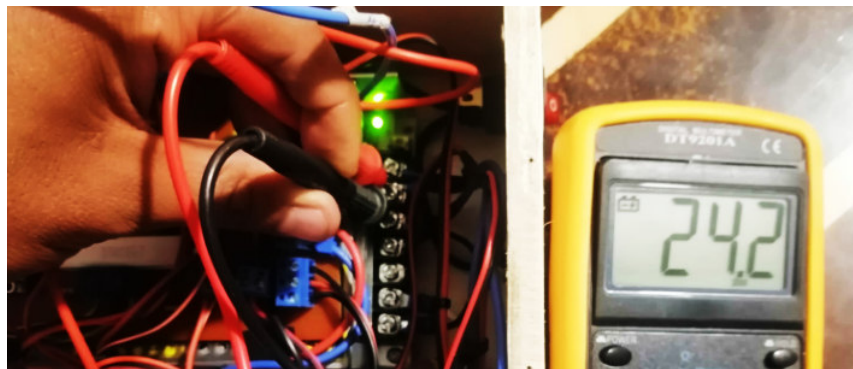


Figura 3.31 Voltaje de salida de la fuente

Voltaje de salida del regulador de voltaje

Mediante la regulación de un potenciómetro ubicado en el regulador, se logró establecer un valor de voltaje de aproximadamente 5 (V_{DC}). (ver Figura 3.32)

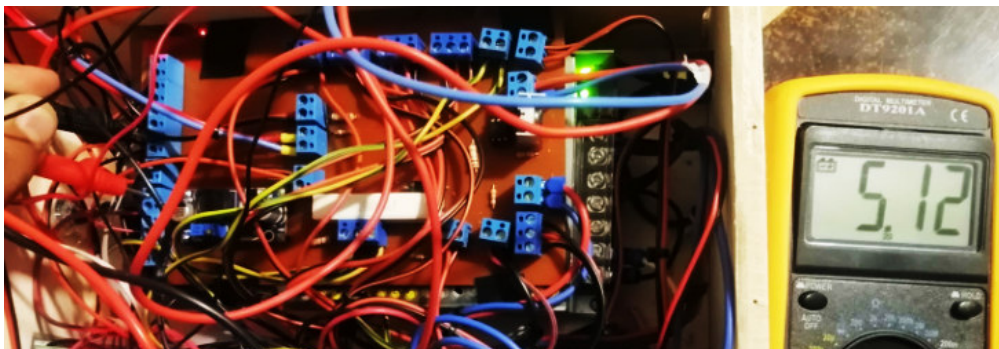


Figura 3.32 Voltaje a la salida del regulador de tensión

Voltaje en terminales del motor principal

En la Figura 3.33 se puede apreciar el voltaje con el que trabaja el motor principal al estar trabajando a su velocidad nominal.

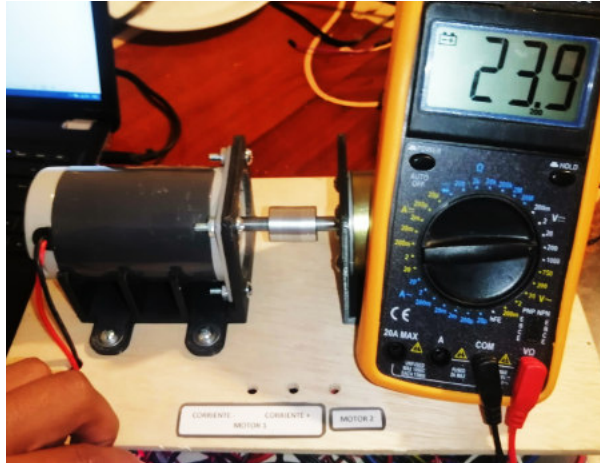


Figura 3.33 Voltaje de alimentación del motor principal

Voltaje en terminales del motor secundario

En la Figura 3.34 se indica el voltaje que tiene el motor secundario al momento de estar trabajando a su velocidad nominal, cabe recalcar que dicha velocidad solo podrá ser apreciada cuando se trabaje en el método de freno regenerativo, ya que aquí se puede variar la velocidad de este motor y se puede llegar a dicho valor nominal de velocidad.

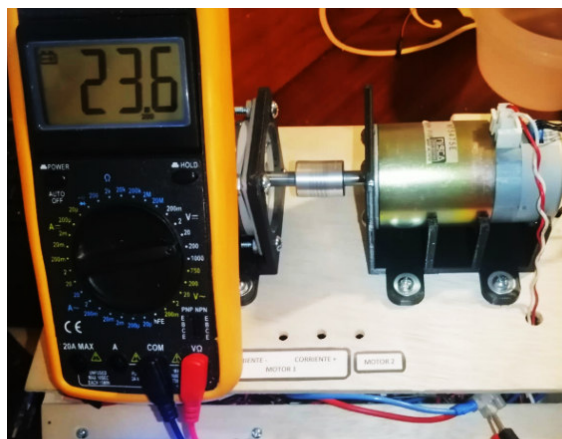


Figura 3.34 Voltaje del motor secundario cuando este trabaja a velocidad nominal

Pruebas del sistema de medición

Para asegurar el correcto funcionamiento de los distintos sensores se compara la medición obtenida con la medición de un instrumento patrón (multímetro DT9201A), para que, en base a ambas lecturas obtenidas calibrar el sensor según sea posible o determinar el error que el sensor posea.

Sensor de voltaje

Se utiliza un multímetro para medir el voltaje exactamente entre los puntos en que se encuentran los sensores implementados.

A partir de distintas mediciones se comparan los valores obtenidos y se utilizan para encontrar el error relativo.

- **Voltaje de la fuente**

En la Figura 3.35, el sensor mide un voltaje de aproximadamente 23.9 (V_{DC}), con diferencia al multímetro que indica un valor de voltaje de 24.1 (V_{DC}).

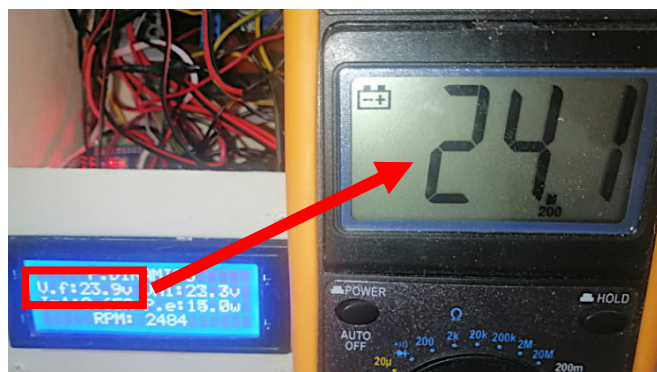


Figura 3.35 Voltaje en la fuente (sensor vs voltímetro)

- **Voltaje en el motor principal**

En la Figura 3.36 se puede apreciar cómo el voltaje del motor principal tiene un valor de 23.1 (V_{DC}) por parte del multímetro, y 23 (V_{DC}) por parte del sensor de voltaje ubicado en paralelo al motor principal.

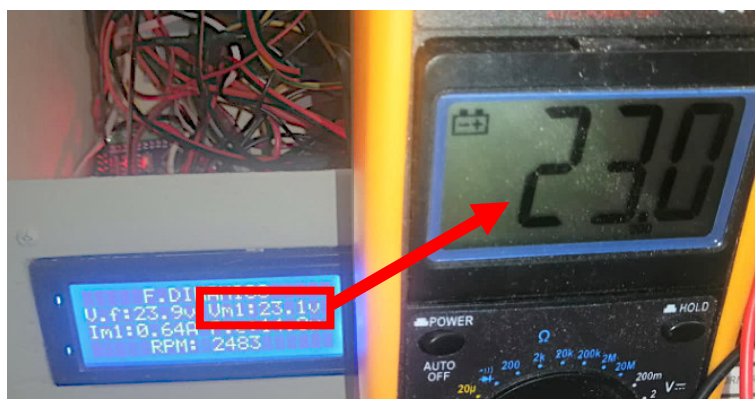


Figura 3.36 Voltaje del motor principal (sensor vs voltímetro)

En la Tabla 3.12 se encuentran tabulados los valores de tensión obtenidos en la fuente y el motor principal por parte del sensor diseñado y el multímetro.

Tabla 3.12 Voltaje medido en fuente y motor, con sensor y multímetro

	Sensor	Multímetro	Error
Fuente	23.9 (V _{DC})	24.1 (V _{DC})	0.83%
Motor	23.1 (V _{DC})	23 (V _{DC})	0.43%

Sensor de corriente

Para determinar la corriente con la que trabaja el motor principal se utilizó el sensor ACS712, y para comparar dicho valor se utilizó el multímetro DT9201A en su función de amperímetro.

- **Corriente en el motor principal cuando trabaja como motor**

En la Figura 3.37 se pueden observar los valores de corriente por parte del sensor y del amperímetro, los cuales tienen un valor positivo, porque el motor se encuentra consumiendo energía de la fuente.

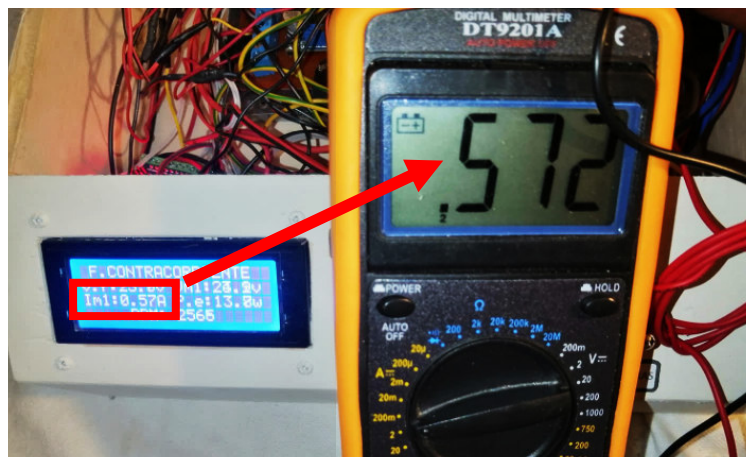


Figura 3.37 Sensor de corriente vs amperímetro cuando la corriente es positiva

- **Corriente en el motor principal cuando trabaja como generador**

Cuando el motor principal empieza a trabajar como generador, la corriente cambia de dirección, por lo que en la Figura 3.38 se puede apreciar, tanto en el amperímetro como en el sensor, que el signo de la corriente es negativo.

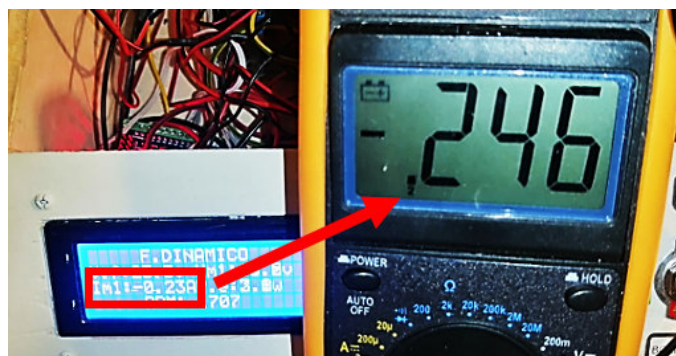


Figura 3.38 Sensor de corriente vs amperímetro cuando la corriente es negativa

En la Tabla 3.13 se presentan los valores obtenidos tanto por el amperímetro, como por el sensor ACS712 al momento de hacer trabajar a la máquina principal como un motor y un generador.

Tabla 3.13 Valores del sensor de corriente y del amperímetro

Sentido	Sensor	Amperímetro	Error
Positivo	0.57 (A)	0.572 (A)	0.35%
Negativo	-0.23 (A)	-0.246 (A)	6.5%

Pruebas de elementos de protección eléctrica

Al trabajar con un fusible de 2 (A) de corriente nominal y recrear cada uno de los métodos de frenado, no existieron problemas.

Se decidió recrear la condición de freno manual del eje del motor principal, para evitar que los usuarios frenen el eje con las manos. Si un usuario detiene de manera manual el eje, para evitar averías en el motor, el fusible cortará el suministro.

Por lo que, a continuación, en la Tabla 3.14 se indican los valores de corriente máxima que maneja cada método de frenado.

Tabla 3.14 Valores de corriente máxima en métodos de frenado

Método de freno	Corriente máx. (A)
Manual	1.37
Contracorriente	0.5
Dinámico	0.73
Regenerativo	1.23

Pruebas de funcionamiento del módulo en los tipos de frenado posible

Freno por contracorriente

Al presionar el botón arranque solo el primer led se enciende, lo cual significa que el motor principal está en funcionamiento. En la pantalla lcd se logran apreciar los valores de voltaje, corriente, potencia eléctrica y velocidad del motor principal. (ver Figura 3.39)

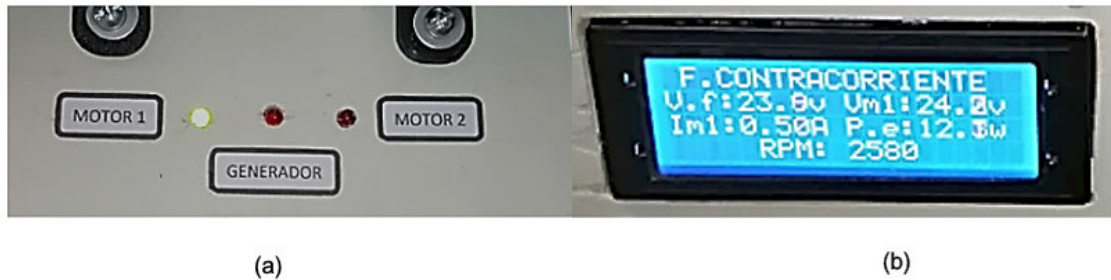


Figura 3.39 (a) Primer led encendido y (b) datos del freno por contracorriente

Luego, al momento de presionar el botón freno, se observa como el led verde se apaga y la pantalla lcd, congela la lectura de los sensores. En ese momento se podrá observar el efecto del paro por contracorriente.

Freno dinámico

Al momento de presionar el botón de freno, el motor principal es desconectado de la fuente y el motor secundario entra en funcionamiento a una velocidad de 2163 (RPM). También se encienden dos leds indicadores, en donde: (ver Figura 3.40)

- El segundo led indica que el motor principal está trabajando como generador.
- El tercer led indica que el motor secundario se encuentra en funcionamiento.



Figura 3.40 (a) Segundo y tercer led encendidos y (b) datos del freno dinámico

Para ir incorporando resistencias de carga al motor principal, el módulo cuenta con un selector, el cual conectará los terminales del motor a un foco o a unas borneras.

➤ **Foco conectado al motor principal como carga**

Para esta prueba se consideró incorporar al módulo una carga interna, la cual consta de un foco conectado en serie con una resistencia de 10 (Ω).

Al poner el selector en la posición FOCO, los terminales del motor principal se conectarán a dicha carga. Al momento de realizar la conexión se logró determinar la disminución en la velocidad y el aumento de la corriente con signo negativo, lo cual significa que el motor principal se encuentra funcionando como un generador (Figura 3.41).



Figura 3.41 Foco conectado como carga al motor principal

➤ **Resistencias externas conectadas al motor principal como carga**

Para poder variar el valor de carga acoplada al motor principal, se incorporaron unas borneras. Las cuales pueden ser seleccionadas al colocar el selector en la posición BORNERAS.

Realizada dicha conexión, en la Figura 3.42 se puede apreciar cómo, al conectar una resistencia de 10 (Ω), la velocidad disminuye y la corriente aumenta con signo negativo, esto porque el motor principal se encuentra trabajando como un generador.

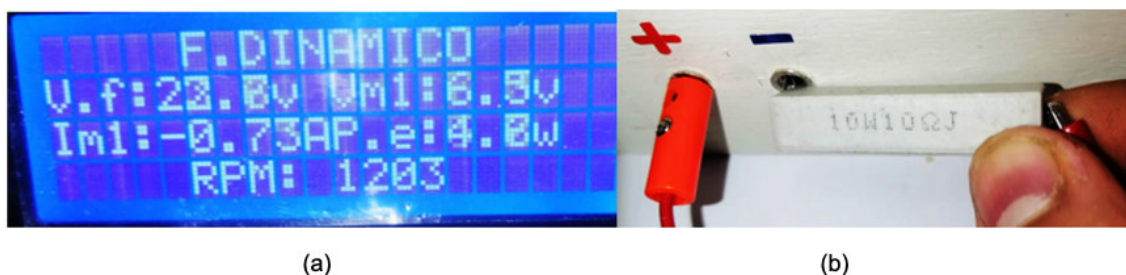


Figura 3.42 (a) Datos del freno dinámico y (b) resistencia de 10(Ω) como carga

En la Tabla 3.15 se indican los valores de velocidad y corriente que tiene el motor principal al momento de conectar diferentes condiciones de carga.

Tabla 3.15 Valores de magnitudes del motor principal con carga

Carga	Corriente (A)	Velocidad (RPM)
Vacío	0	2163
Foco	-0.3	1714
Resistencia 10 (Ω)	-0.73	1203
Resistencia 560 (Ω)	-0.08	2136
Resistencia 1.2 (k Ω)	-0.06	2162

En base a los datos obtenidos se logra determinar que, mientras menor sea el valor de la resistencia acoplada, más alta será la corriente disipada, esto por la ley de ohm, donde a menor resistencia la corriente aumenta.

En el caso de la condición de vacío, la corriente es nula, pues no se disipa de manera alguna la energía del motor principal.

Freno regenerativo

Para arrancar el motor principal dentro de este método, se debe conectar una batería recargable a las borneras del módulo, en este caso se conectó una batería de aproximadamente 9 (V_{DC}).

El primer led indica que la máquina está funcionando como motor alimentada por la batería. En la pantalla lcd se visualiza el voltaje del motor principal (el cual es igual al voltaje de la batería), la corriente que consume, la potencia eléctrica y la velocidad con la que gira el sistema. (ver Figura 3.43)



(a)

(b)

Figura 3.43 (a) Primer led encendido y (b) datos del freno regenerativo

Al momento de presionar el botón freno, entra en funcionamiento el motor secundario, el cual puede variar su velocidad según el ángulo de giro del potenciómetro.

Al ir incrementando, poco a poco, la velocidad del motor secundario se logró apreciar como la corriente disminuye su valor hasta llegar a un valor cercano a cero, a medida que esta velocidad sigue incrementando, la corriente cambia de signo e incrementa su

valor negativamente. Esto se sucede debido a que la f_{cem} del motor principal aumenta con el incremento de la velocidad, y cuando es mayor que el voltaje de la batería, empieza a suministrar energía a la misma, por lo que estaría trabajando como motor.

En la Figura 3.44 se logra visualizar el cambio de modo de funcionamiento del motor principal (motor y generador) al momento de variar la velocidad del motor secundario.

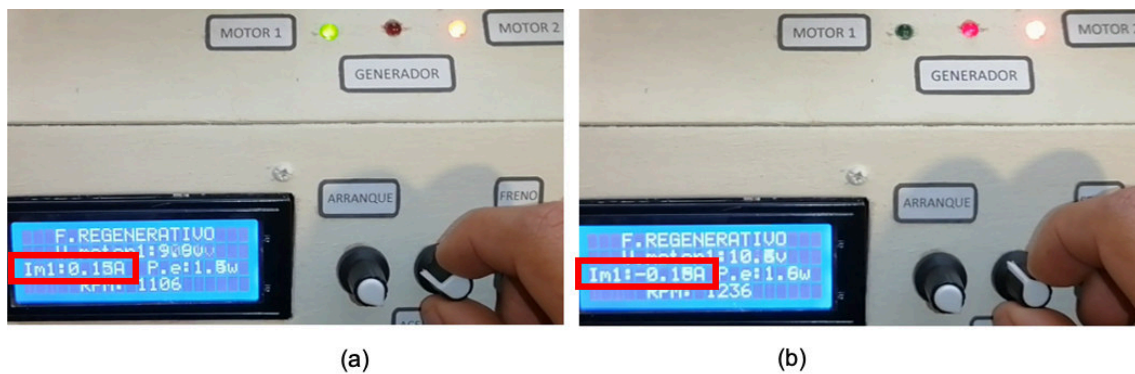


Figura 3.44 Funcionamiento de la máquina (a) como motor y (b) como generador

En la Tabla 3.16 se encuentran tabulados distintos valores de corriente y tensión que tiene el motor principal al momento de variar la velocidad del motor secundario, además se indica el régimen de trabajo que tiene el motor principal.

Tabla 3.16 Valores de magnitudes del motor principal a distintas velocidades

Velocidad (RPM)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Régimen de trabajo
997	0.3	9.7	MOTOR
1106	0.15	9.8	MOTOR
1134	0	9.9	NEUTRO
1122	-0.05	10.1	GENERADOR
1186	-0.16	10.2	GENERADOR
1759	-1.23	12	GENERADOR

3.5 Manual de uso y mantenimiento del módulo y hoja guía para prácticas

Manual de uso del módulo

En la Figura 3.45 se muestra el código QR con el cual se podrá acceder al video del uso correcto del módulo por parte de los usuarios.



Figura 3.45 Manual de uso del módulo didáctico

Manual de mantenimiento del módulo

En la Figura 3.46 se muestra el código QR con el cual se podrá acceder a un video donde se detallan características del mantenimiento que debe tener el módulo.



Figura 3.46 Manual de mantenimiento del módulo

Hoja guía para prácticas

En la sección anexos podrán encontrar la correspondiente hoja guía con la cual los estudiantes lograrán realizar una práctica en donde se logren simular y entender los tres métodos de frenado con los que cuenta el módulo. (véase anexo 2)

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El uso de la plataforma Arduino en este tipo de proyectos es importante ya que es libre y brinda múltiples herramientas que facilitan su uso y su programación.
- El control de motores de corriente continua es relativamente sencillo, por ejemplo, para variar el valor de velocidad de estos basta con variar el voltaje aplicado a la máquina, en este caso se realiza mediante una señal PWM, la cual es generada a través del microcontrolador.
- El freno por contracorriente es un método que logra detener el motor de manera casi instantánea, sin embargo, al momento de realizarse la inversión del sentido de giro se produce la sumatoria instantánea del voltaje de la fuente con la f.c.e.m. del motor, ocasionando una sobre corriente, pues la única carga aplicada a dicha tensión es la resistencia de armadura del motor, este efecto puede causar una reducción de la vida útil de máquina.
- Cuando se invierte la polaridad del motor para el freno por contracorriente, la corriente se incrementa de manera significativa, por lo que, se debería conectar una resistencia en serie para proteger el devanado, sin embargo, en el presente proyecto no se implementó dado que dichos valores no superan los valores nominales del motor, por lo que el devanado es capaz de soportar dicho valor de sobre corriente.
- El sistema de medición implementado posee un error respecto a las mediciones efectuadas con el multímetro DT9201A, sin embargo, se da por válido pues el máximo error es del 6.5% y las lecturas presentadas en la pantalla lcd son valores referenciales para apreciar el comportamiento del motor principal en los distintos métodos de freno.
- En el caso del freno regenerativo, se verificó que, este método devuelve energía a la fuente, por lo que se debe contar con una fuente de tensión que pueda almacenar energía, como es el caso de las baterías. Este principio es utilizado para aumentar la autonomía de los motores eléctricos de los vehículos, cuando por cualquier factor externo la velocidad del eje supera la velocidad nominal del motor.
- El módulo permite apreciar el comportamiento y los principales parámetros del motor principal al momento de probar cualquiera de los métodos de frenado, esto

permite generar criterios para la selección del método más conveniente y su aplicabilidad según la situación en que se requiera.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda revisar los manuales de uso y mantenimiento, pues todo el material se realizó con el fin de familiarizar al usuario con el módulo.
- Para la selección de la placa Arduino primero se requiere tener en cuenta la aplicación para conocer los distintos dispositivos que se van a conectar y en base a esto considerar los pines y recursos necesarios.
- Cuando se trabaje con módulos electrónicos comerciales, realizar una revisión de las hojas técnicas, esto a fin de conocer e identificar de manera correcta todas sus características y funciones.
- Procurar aislar la parte del circuito de control de la etapa de potencia, pues al trabajar con motores por su naturaleza de funcionamiento sus componentes generan ruido eléctrico, mismo que puede ocasionar distorsiones en las señales que recibe el microcontrolador.
- Cuando se utilicen sistemas microprocesados considerar que las señales de entrada y salida pueden verse afectadas por el ruido eléctrico, en ese caso implementar los filtros eléctricos pertinentes para evitar problemas de funcionamiento.
- Luego de realizado el respectivo mantenimiento de la placa del módulo y en caso de que hayan sido desconectados los terminales de los motores, verificar la polaridad correcta de la alimentación, pues los motores acoplados deben tener el mismo sentido de giro.
- En caso de realizarse un proyecto similar con motores de mayor potencia, se debe considerar que, en los distintos elementos de conmutación pueden existir chispas, en ese caso implementar relés de mayor potencia o de ser necesario contactores.
- Para repotenciar el módulo se recomienda desarrollar un sistema de carga controlada de baterías que se utilizan en el freno regenerativo.
- Para futuros proyectos se recomienda simular de manera más real la aplicación del frenado regenerativo en vehículos eléctricos, utilizando una rueda que sea impulsada por algún agente externo para superar la velocidad nominal.
- Para futuras mejoras se podría complementar al módulo con un sistema que permita la comunicación con otros dispositivos a fin de controlarlo remotamente.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. G. Naranjo, «Google sites,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/alvarogarcianaranjo/mootor-de-corriente-continua>. [Último acceso: 1 OCTUBRE 2021].
- [2] «Motorex,» 7 OCTUBRE 2019. [En línea]. Available: <https://www.motorex.com.pe/blog/cual-es-la-diferencia-entre-los-motores-electricos-ca-y-cc/>. [Último acceso: 1 OCTUBRE 2021].
- [3] «Sapiensman,» [En línea]. Available: http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/motores_de_corriente_continua_tipos.php. [Último acceso: 1 OCTUBRE 2021].
- [4] «MecatronicaLatam,» 23 ABRIL 2021. [En línea]. Available: <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/>. [Último acceso: 1 OCTUBRE 2021].
- [5] J. F. Mora, «MOTOR DE C.C: MÉTODOS DE FRENADO,» de *Máquinas eléctricas*, Madrid, Concepción Fernández Madrid, 2003, p. 769.
- [6] «ResearchGate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-121-Freno-Hidraulico-tomado-de-8_fig12_27557892. [Último acceso: 1 OCTUBRE 2021].
- [7] Bhag S. Guru , Huseyin R. Hiziloglu, «Frenado o inversión de marcha en motores de cc,» de *MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y TRANSFORMADORES*, México D.F, Grupo Alfaomega, 2006, p. 721.
- [8] D. Plaza, «motor.es,» [En línea]. Available: <https://www.motor.es/que-es/ker-freno-regenerativo>. [Último acceso: 25 Septiembre 2021].
- [9] «CNTA,» 2020 AGOSTO 25. [En línea]. Available: <https://cnta.ec/sistema-de-freno-regenerativo-conversion-de-energia-parte-3/>. [Último acceso: 1 OCTUBRE 2021].
- [10] «Arduino.cl,» [En línea]. Available: <https://arduino.cl/arduino-nano/>. [Último acceso: 16 SEPTIEMBRE 2021].

- [11] J. Damián, «Electrogeek,» 4 MARZO 2020. [En línea]. Available: <https://www.electrogeekshop.com/arduino-nano-pinout-y-caracteristicas/>. [Último acceso: 16 SEPTIEMBRE 2021].
- [12] «Naylamp Mechatronics,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>. [Último acceso: 25 Septiembre 2021].
- [13] «Electronilab,» [En línea]. Available: <https://electronilab.co/tienda/modulo-rele-4-canales-salidas-optoacopladas-5v/>. [Último acceso: 25 Septiembre 2021].
- [14] «Tecnopura,» [En línea]. Available: <https://www.tecnopura.com/producto/modulo-rele-de-1-canal-5v-para-arduino-raspberry-microcontrolador/>. [Último acceso: 25 Septiembre 2021].
- [15] Tolocka y Ernesto, «profe Tolocka,» [En línea]. Available: <https://www.profetolocka.com.ar/2015/05/09/modulo-de-4-reles-para-arduino/>. [Último acceso: 25 Septiembre 2021].
- [16] L. Llamas, «Luis Llamas ingeniería, informática y diseño,» 18 ENERO 2017. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-intensidad-consumo-electrico-ac712/>. [Último acceso: 16 SEPTIEMBRE 2021].
- [17] «Mercado Libre Ecuador,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-431972425-modulo-sensor-de-corriente-ac712-30a-ideal-arduino-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=e3e4a776-2aa8-48b0-b25d-d32aeaabf0d2. [Último acceso: 16 SEPTIEMBRE 2021].
- [18] «Mercado Libre Ecuador,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-432597976-mgssystem-lcd-2004-20x4-lcd2004-hd44780-azul-arduino-avr-pic-_JM#position=10&search_layout=stack&type=item&tracking_id=950eaff3-2488-4550-aebf-01692e0d8c7c. [Último acceso: 16 SEPTIEMBRE 2021].
- [19] «ElectroStore,» [En línea]. Available: <https://grupoelectrostore.com/shop/sensores/encoders/modulo-encoder-rotatorio-ky-040/>. [Último acceso: 19 SEPTIEMBRE 2021].

[20] «HETPRO,» [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/divisor-de-voltaje/>. [Último acceso: 22 SEPTIEMBRE 2021].

5.1 Anexos

Anexo 1: Certificado de funcionamiento



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R

Quito, 18 de octubre de 2021

CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Orlando Romo Herrera, docente a tiempo completo de la Escuela Politécnica Nacional y como director de este trabajo de titulación, certifico que he constatado el correcto funcionamiento del módulo didáctico para el control de frenado de motores DC, el cual fue implementado por los estudiantes Banchón Luis y García Marcos.

El proyecto cumple con los requerimientos de diseño y parámetros necesarios para que los usuarios de la ESFOT puedan realizar prácticas enfocadas al frenado eléctrico de motores DC.

DIRECTOR

Ing. Carlos Orlando Romo Herrera, Msc.

Anexo 2: Hoja guía para prácticas

LABORATORIO DE FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

HOJA GUÍA

PRÁCTICA x

Tema: Frenado de motores de corriente continua

1. Objetivos

- Conocer los principales métodos de frenado eléctrico existentes para motores DC.
- Identificar las principales magnitudes de los motores eléctricos y su comportamiento en cada uno de los tipos de frenados.
- Adquirir criterios para la selección de un tipo de frenado según la aplicación.

2. Trabajo preparatorio (individual)

- Leer el manual de uso y mantenimiento del módulo didáctico de frenado de motores DC.
- Consultar el principio de funcionamiento de los motores DC.
- Consultar acerca del principio de reversibilidad que rige a las máquinas eléctricas rotativas.
- Consultar las características de los principales métodos de frenado eléctrico en motores DC.
- Consultar 2 aplicaciones prácticas para cada uno de los métodos de frenado eléctrico en motores DC.
- Elaborar el circuito eléctrico con el cual se puede realizar cada tipo de frenado (con los elementos que se disponen en el laboratorio). Incluir ilustraciones y una breve explicación.
- Comparar cada uno de los tipos de frenos eléctricos en una tabla remarcando ventajas y desventajas.

3. Procedimiento práctico

- Reconocer cada uno de los elementos presentes en el módulo y su función dentro de este.
- Arrancar el módulo con el freno por contracorriente, recopilar los valores de las magnitudes allí presentadas.
- Realizar el arranque y frenado por contracorriente unas 5 veces y comparar los valores de corriente que llega a alcanzar en el momento del frenado.
- Seleccionar el freno dinámico y realizar una tabla comparativa como la presente (ver Tabla A1.1). Seleccionar distintos valores de resistencias de potencia y conectarlas en paralelo con las borneras del módulo, comprobar el freno, y realizar distintas configuraciones según se desee. Presentar la información con 5 valores de resistencias diferentes.

Tabla A1.1 Valores de las magnitudes del freno dinámico

Velocidad (rpm)	Voltaje (v)	Valor de resistencia (Ω)	Corriente (A)	Potencia disipada (W)

- Medir el voltaje en los terminales de la resistencia de carga, la corriente que circula y el valor de resistencia. Calcular y llenar la siguiente tabla con los mismos valores de resistencia del punto anterior.

Tabla A1.2 Valores de magnitudes medidas del freno dinámico

Voltaje (v)	Valor de resistencia (Ω)	Corriente (A)	Potencia disipada (W)

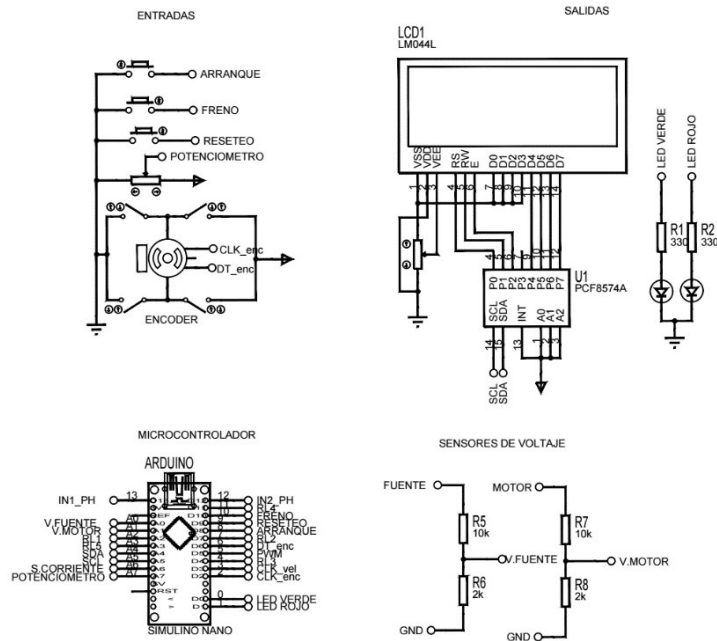
- Calcular el error de cada una de las magnitudes obtenidas en los puntos anteriores de un solo valor de resistencia.
- Al accionar el freno regenerativo recopilar la información presentada al momento del arranque y al aplicar el freno colocando el potenciómetro en su posición máxima. Comparar dicha información.

4. Informe

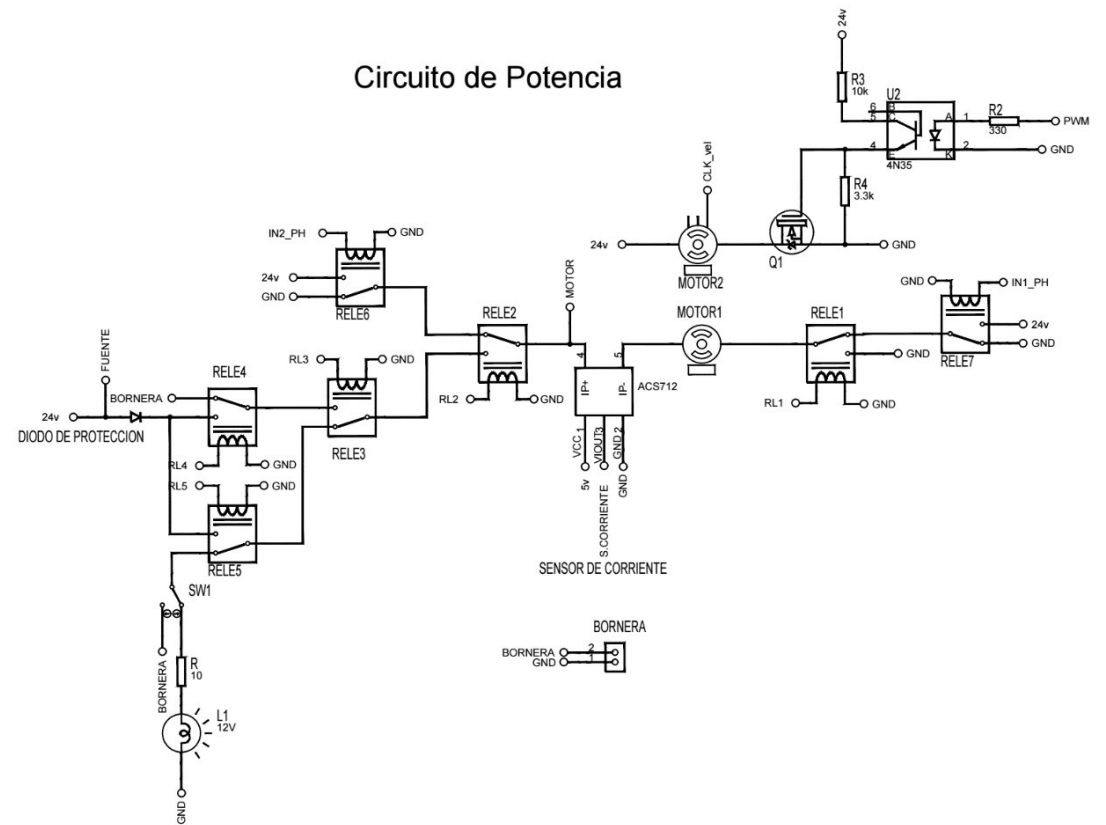
- Dar una breve explicación a cerca de por qué el freno por contracorriente es de un lapso tan corto y qué se puede cambiar para que el efecto sea más visible.
- ¿El motor se llega a frenar por completo en el frenado regenerativo? Justifique su respuesta dando una breve explicación de por qué ocurre dicho fenómeno con el presente módulo.
- ¿En qué instante de cualquiera de los tipos de frenado considera usted que el consumo de corriente es mayor?
- ¿Por qué el voltaje generado en el freno regenerativo llega a ser superior al de la fuente de alimentación?
- ¿Qué pérdidas nomás se abarcan en el momento en que el motor 2 actúa como fuente de energía para el motor 1? Ilustre el sistema desde los bornes de alimentación del motor 2 hasta los bornes del motor 1.
- ¿Qué consideraciones se debe tener para poder implementar el freno regenerativo como una fuente de carga para una batería externa?
- Desarrollar el informe en base a lo establecido.

Anexo 3: Diagrama eléctrico

Circuito de Control



Circuito de Potencia



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT

Diagrama de conexiones simplificado

UNIDAD:
N/A

MATERIAL:
N/A

ESCALA:
N/A

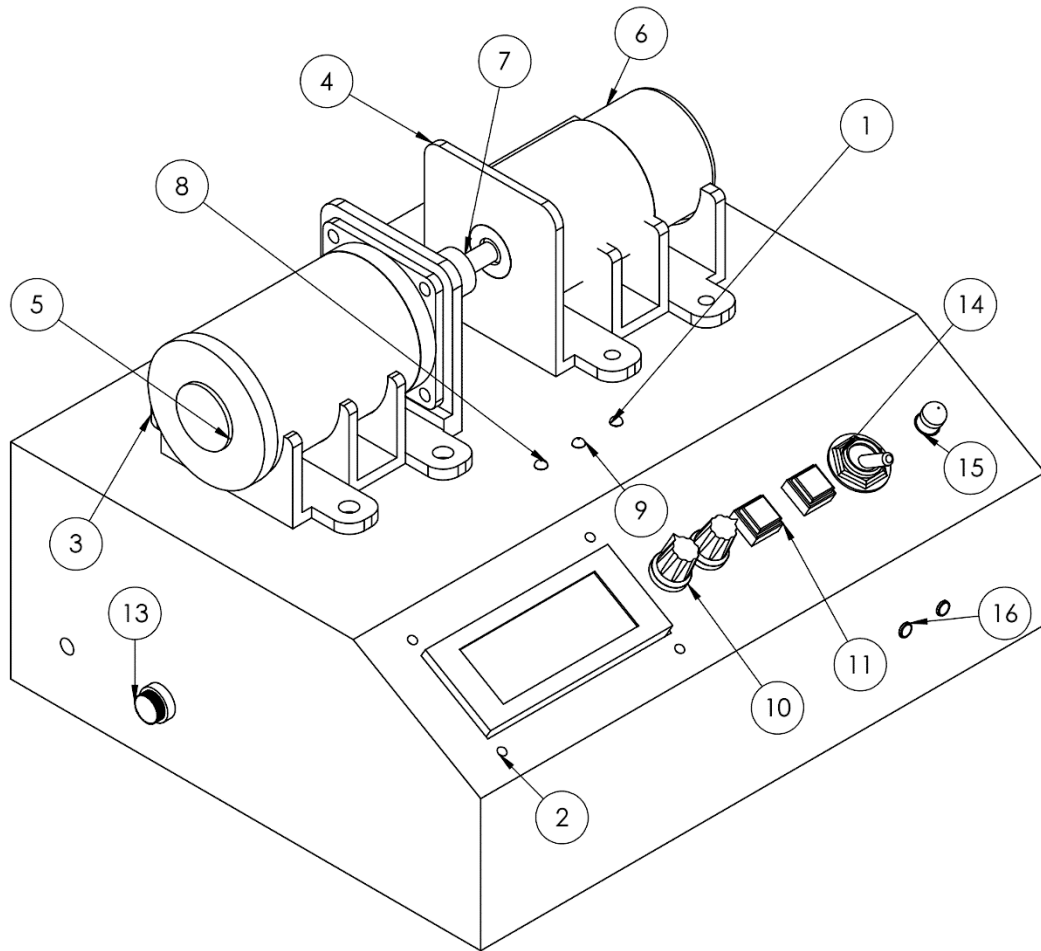
FORMATO:
A3

DISEÑADO POR:
Luis Miguel Banchón Mosquera
Marcos Alexander García Naranjo

FECHA:
22-09-2021

LÁMINA:
N°1

Anexo 4: Elementos del módulo didáctico



Vista diagonal del módulo

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Estructura de madera	1
2	Pantalla lcd	1
3	Soporte del motor 1	1
4	Soporte del motor 2	1
5	Motor 1	1
6	Motor 2	1
7	Acople mecánico	1
8	Led de funcionamiento del motor	2
9	Led de funcionamiento como generador	1
10	Perilla de giro	2
11	Pulsador	2
12	Interruptor	1
13	Portafusible	1
14	Conmutador manual	1
15	Foco	1
16	Bornera	1

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT

Elementos del módulo didáctico de frenado de motores DC

UNIDAD:
N/A

MATERIAL:
N/A

ESCALA:
1:2

FORMATO:
A3

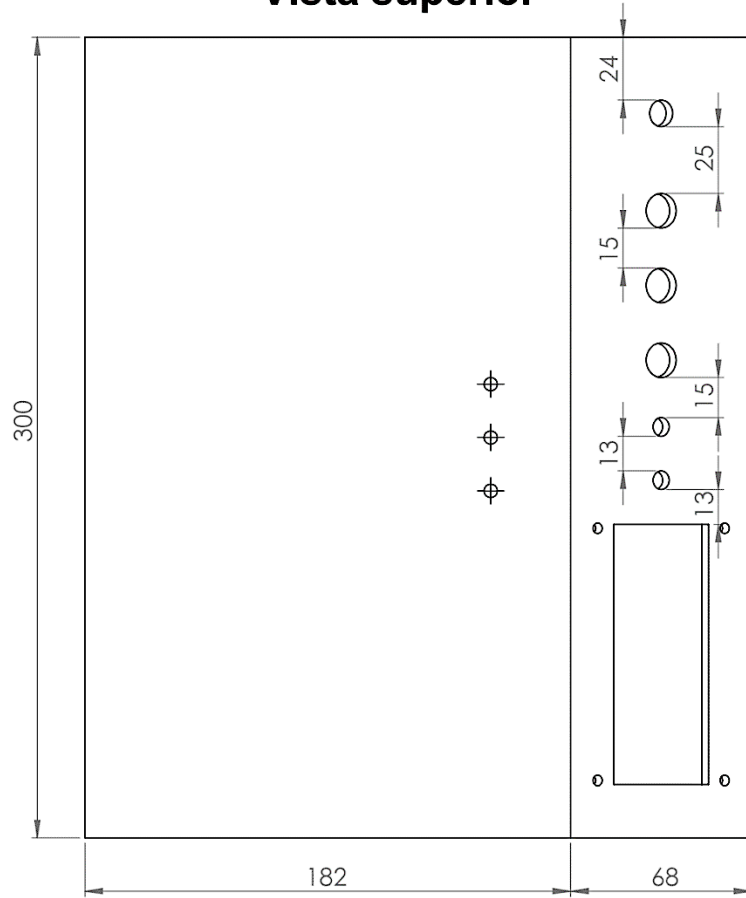
DISEÑADO POR:
Luis Miguel Banchón Mosquera
Marcos Alexander García Naranjo

FECHA:
22-09-2021

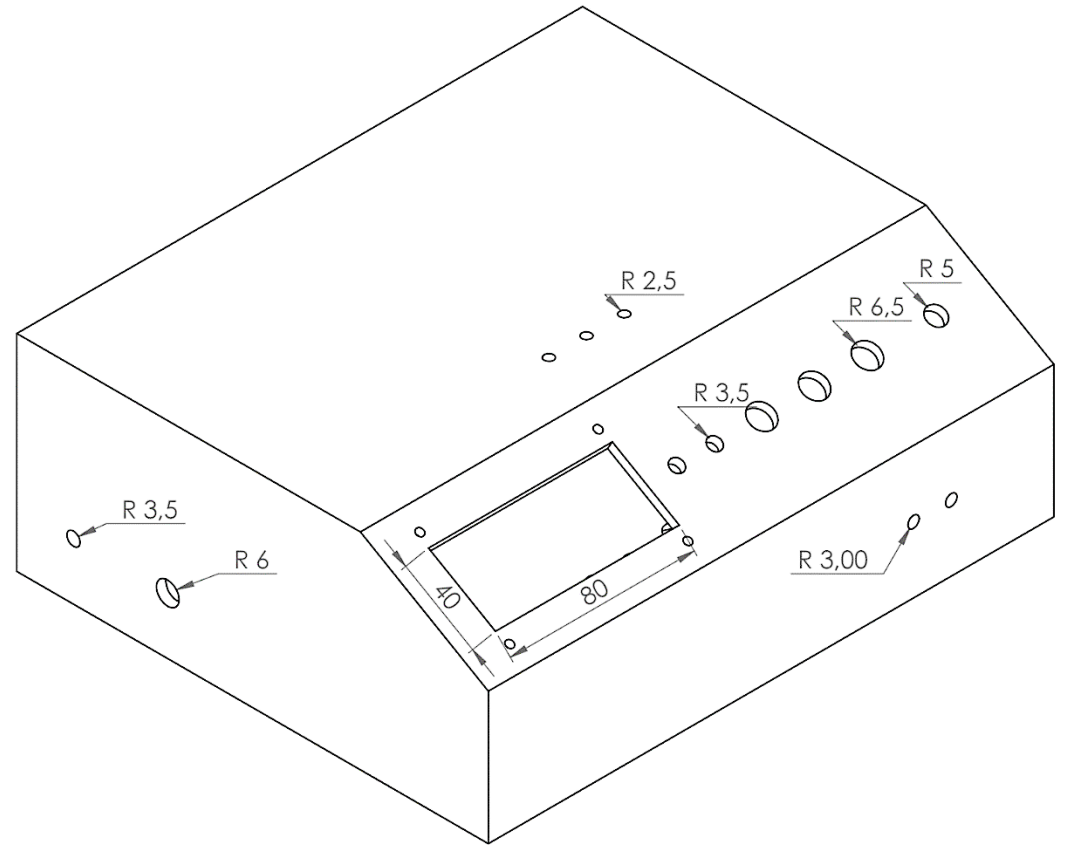
LÁMINA:
Nº2

Anexo 5: Plano de la estructura base del módulo

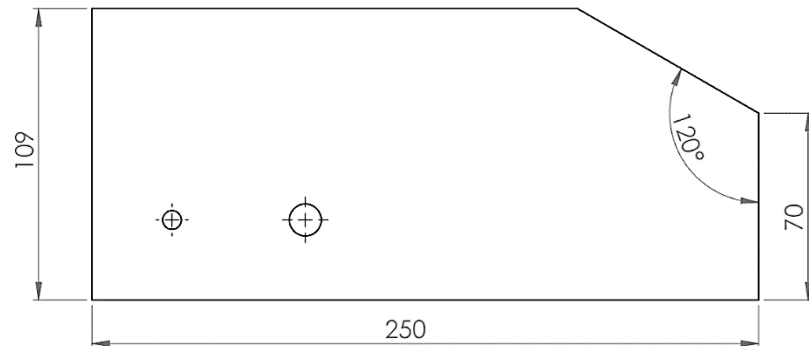
Vista superior



Vista diagonal



Vista lateral



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT

Soporte del módulo didáctico

UNIDAD:
mm

MATERIAL:
Madera Triplex

ESCALA:
1:2

FORMATO:
A4

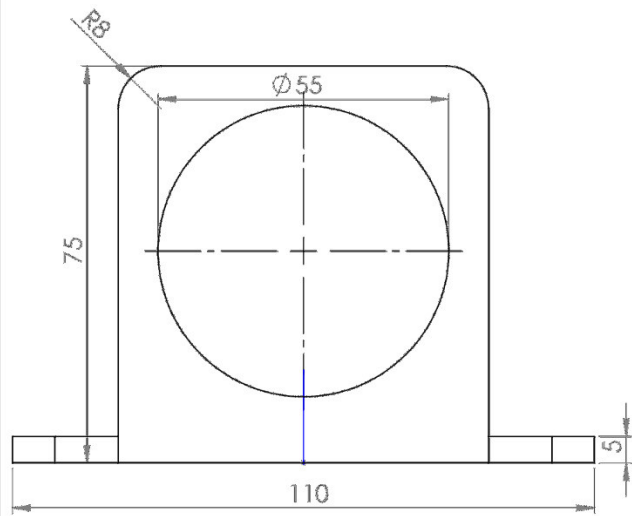
DISEÑADO POR:
Luis Miguel Banchón Mosquera
Marcos Alexander García Naranjo

FECHA:
22-09-2021

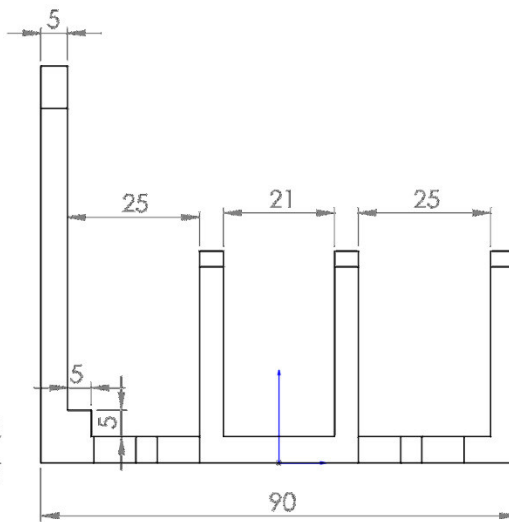
LÁMINA:
N°3

Anexo 6: Planos de las bases de los motores

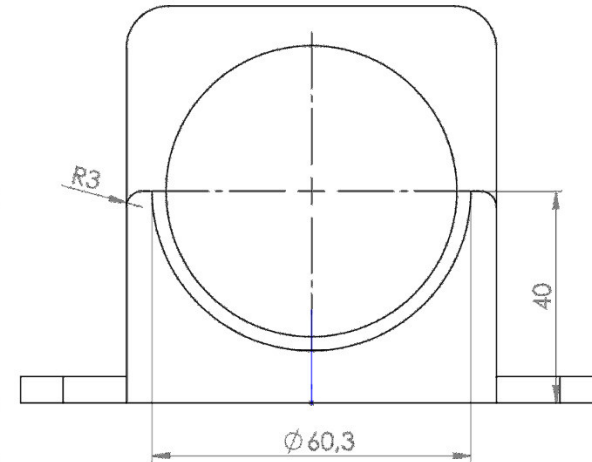
Vista frontal



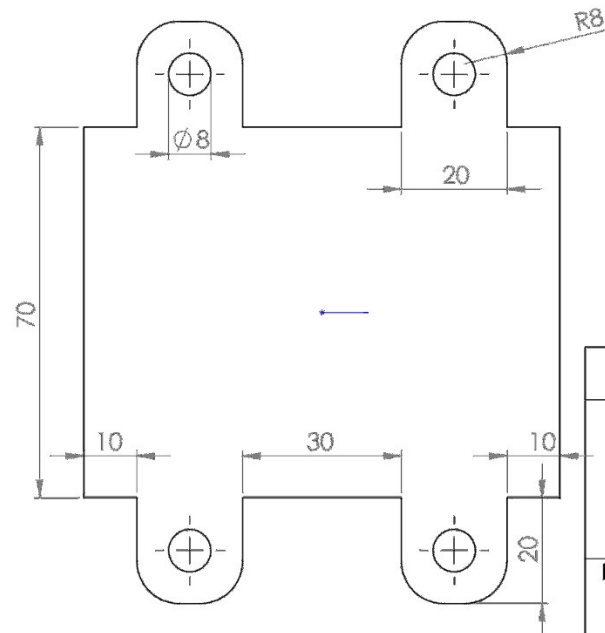
Vista lateral



Vista posterior



Vista inferior



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT

Base del motor principal

UNIDAD:
mm

MATERIAL:
PLC

ESCALA:
1:1

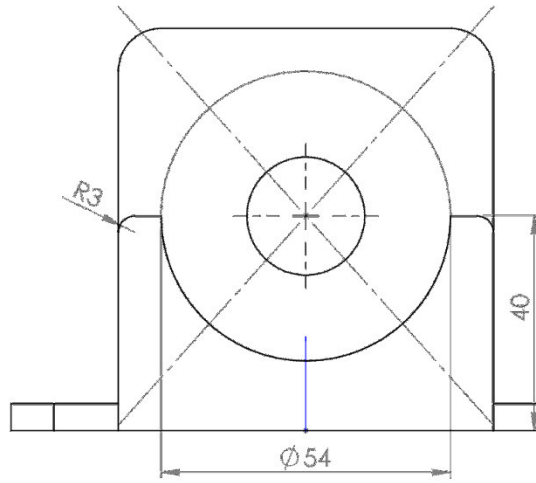
FORMATO:
A4

DISEÑADO POR:
Luis Miguel Banchón Mosquera
Marcos Alexander García Naranjo

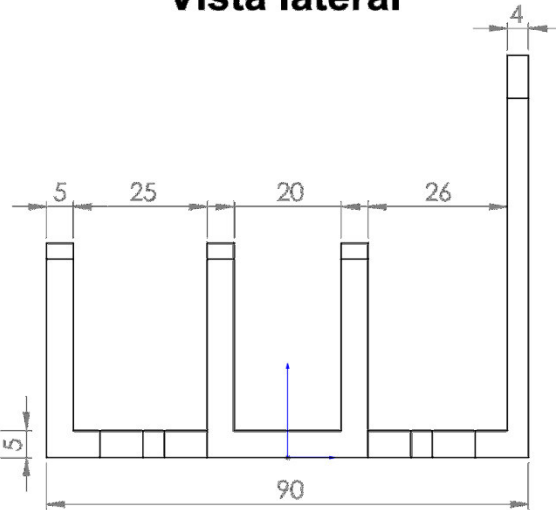
FECHA:
22-09-2021

LÁMINA:
N°4

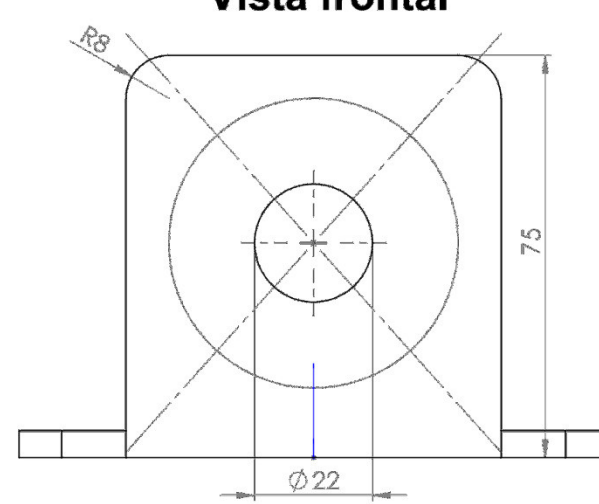
Vista posterior



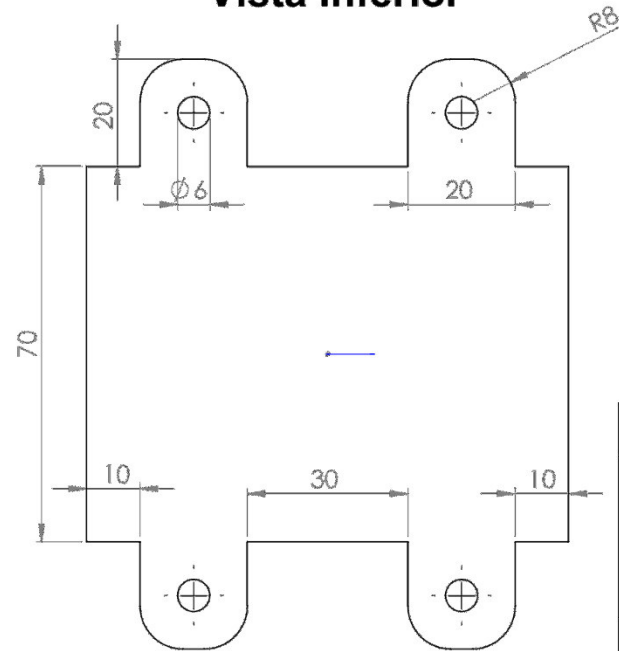
Vista lateral



Vista frontal



Vista inferior



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT

Base del motor secundario	UNIDAD: mm	MATERIAL: PLA
	ESCALA: 1:1	FORMATO: A4
DISEÑADO POR: Luis Miguel Banchón Mosquera Marcos Alexander García Naranjo	FECHA: 22-09-2021	LÁMINA: N°5