



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo de control de frenos  
de corrientes parásitas para  
dinamómetros de banco y chasis**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

Hugo Yosef Aguilar Bastida

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Rubén Carlos Esquivel Hernández



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025**



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DESARROLLO DE CONTROL DE FRENOS DE CORRIENTES PARASITAS PARA DINAMOMETROS DE BANCO Y CHASIS que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

**HUGO YOSEF AGUILAR BASTIDA**  
Número de cuenta: 315339815

## Resumen

En el presente trabajo se realiza el diseño y la validación de un circuito de control, para la operación de los frenos de corrientes parásitas en el Laboratorio de Motores y Vehículos de la UNICE (Unidad de Investigación y Control de Emisiones) permitiendo, con dicho control, obtener datos de la operación de motores y vehículos, para la investigación de emisiones.

El control del freno se basa en modulación por ancho de pulso (PWM). Para ello, primero se toma la señal senoidal de la toma de corriente y se rectifica mediante diodos en una configuración de onda completa. Luego, utilizando un amplificador TL084 como comparador de cruce por cero, se genera una referencia de sincronización. A continuación, mediante un transistor y un capacitor, se obtiene una señal en forma de diente de sierra, la cual es comparada en un circuito adicional para generar la señal PWM.

Las salidas están especificadas según el tipo de freno que se desea controlar. La calibración del voltaje de inicio de la señal PWM se realiza mediante reguladores dentro del circuito de control, lo que permite generar diferentes señales de salida. Estos datos son mostrados en una pantalla LCD e incluyen el nivel de frenado expresado en porcentaje, de 0 % a 100 % de la capacidad del sistema, garantizando la adaptabilidad del circuito de control.

La señal principal de salida se envía a través de un relevador de estado sólido (SSR), el cual ajusta la señal según el ciclo de trabajo proporcionado por el circuito de control y el transformador de potencia. La selección del SSR varía en función de las especificaciones del freno, asegurando su correcto funcionamiento.

Este sistema permite un mayor control del frenado en dinamómetros con frenos por corrientes parásitas, logrando una precisión superior que facilita la obtención de parámetros en los estudios realizados con estos equipos.

Además, se ha implementado un sistema de refrigeración para frenos por corrientes parásitas, el cual emplea un sensor infrarrojo para medir la temperatura. Si la temperatura supera un umbral preestablecido, el microcontrolador Arduino activa los ventiladores, evitando el sobrecalentamiento y mejorando el rendimiento y la seguridad del sistema.

Finalmente, se desarrolló un sistema de paro de emergencia mediante un botón. Al presionarlo, el sistema incrementa automáticamente el porcentaje de frenado a un nivel predefinido, proporcionando una respuesta rápida y eficiente en situaciones críticas, lo que mejora la seguridad operativa.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mis padres, mi padre Olegario Aguilar Del Rosario quien es fomento mi creatividad desde pequeño, a todas sus enseñanzas que me hicieron tener un gusto por la ingeniería, a mi madre María Belén Bastida Pedroza quien me enseñó que todo lo que se quiere lograr es posible con amor y la ayuda de Dios, ambos fueron los pilares que me formaron hoy en día por todo su amor y cariño. ¡Gracias, padres míos!

También quiero agradecer a mis abuelos, tíos y primos, quienes creyeron en mi desde pequeño, y me apoyaron en mis proyectos.

Quiero dar gracias a mis compañeros de trabajo y amigos en especial a Jatziri Lopes Reyes quien estuvo conmigo desde el inicio de este trabajo, apoyándome, alimentándome y motivándome a conseguir y cumplir mis sueños, a Ricardo Vázquez de Diego por apoyarme con su conocimiento durante este proceso, a Iván Adrián Farfán Canales por ser un gran amigo durante este tiempo, a Kevin Merari Hernández Soto por los consejos que me ayudaron a conseguir y cumplir este trabajo.

A mi asesor Rubén Carlos Hernández Esquivel quien me ha brindado su apoyo y conocimiento, a quién admiro y respeto, enseñándome que todo se puede tomar con calma.

Al laboratorio UNICE de la Facultad de Ingeniería y a todos sus miembros que lo componen que me hicieron tener momentos más amenos durante estos años.

Un agradecimiento al Instituto de Ingeniería, a la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, que mediante el proyecto GII “Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual”, y también el proyecto PAPIIT IG 100 222 “Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30's y 40's, así como su impacto en las emisiones de contaminantes atmosféricos criterio y gases de efecto de invernadero”, me apoyaron con la compra de materiales y la beca proporcionada para que esta tesis se concluyera de manera satisfactoria.

## Contenido

Introducción .....	1
1. Capítulo 1 Frenos para dinamómetros .....	9
1.1.1 Freno prony .....	9
1.1.2 Freno hidráulico.....	10
1.1.3 Freno de corriente continua .....	11
1.2 Funcionamiento de unidades de absorción de potencia por corrientes parásitas	11
1.3 Tipos de frenos por corrientes parásitas .....	12
1.3.1 Lineales .....	12
1.3.2 Rotatorios .....	14
1.4 Frenos por corrientes parásitas del Laboratorio de Motores y Vehículos .....	15
1.4.1 Dinamómetro de banco con motor Mercedes-Benz .....	15
1.4.2 Dinamómetro de banco con motor V6.....	18
1.4.3 Dinamómetro de chasis para motocicletas .....	20
1.4.4 Dinamómetro de chasis para vehículos medianos .....	21
2 Capítulo 2 Análisis y control a frenos por corrientes parásitas .....	22
2.1 Modulación por ancho de pulso (PWM) .....	22
2.2 Formas de generar PWM.....	23
2.2.1 Microcontroladores .....	23
2.2.2 Temporizador 556.....	25
2.2.3 TL494 .....	26
2.3 Diseño de circuito (PWM) .....	28
2.3.1 Fabricación del control para frenos de corrientes parásitas del laboratorio de emisiones (UNICE) .....	28
2.3.1.1 Etapa de comparador de cruce por cero .....	29
2.3.1.2 Etapa de rampa lineal .....	35
2.3.1.3 Etapa de comparación .....	38
2.3.1.4 Etapa de visualización .....	41
2.3.1.5 Etapa de potencia .....	42
2.3.2 Diseño en software (Proteus®).....	44
2.3.3 Fabricación de placa de circuito impreso (PCB) .....	45
2.4 Sistema de refrigeración a unidades de absorción de potencia por corrientes parásitas .....	49
2.4.1 Características de operación del sistema de refrigeración .....	50
2.4.2 Componentes del sistema de refrigeración .....	51

3.	Capítulo 3 Actuadores y control de emergencia.....	53
3.1	Análisis de control por computadora.....	53
3.2	Protocolo de comunicación.....	54
3.2.1	Comunicación entre maestro e interfaz.....	55
3.2.2	Comunicación entre actuador y maestro.....	56
3.3	Características de diseño .....	57
3.4	Botón de paro de paro de emergencia.....	61
4.	Capítulo 4 Pruebas y análisis del control del freno de corrientes parásitas.....	64
4.1	Pruebas de las etapas de funcionamiento del circuito .....	64
4.2	Pruebas de intensidad de corriente .....	69
4.3	Pruebas de frenado .....	72
5.	Conclusiones .....	75
5.1	Trabajo a futuro .....	76
6.	Anexos .....	77
7.	bibliografía.....	93

## Figuras

Figura 1 Freno Prony .....	5
Figura 2 Freno hidráulico .....	5
Figura 3 Freno por corriente continua .....	6
Figura 4 Freno por corrientes parásitas y sus componentes internos desde sus discos y bobinas .....	6
Figura 5 Ciclos de trabajo de un PWM .....	7
Figura 6 Freno Prony, donde M es la masa que se encuentra conectada al dinamómetro y F es la fuerza que se ejerce para poder frenar .....	9
Figura 7 Freno hidráulico .....	10
Figura 8 Componentes de un freno de corriente continua.....	11
Figura 9 Diagrama de ensamble de un freno por corrientes parásitas .....	12
Figura 10 Inducción de las corrientes parásitas en un conductor lineal.....	13
Figura 11 Freno de ferrocarril en Alemania “las bobinas se encuentran justo por encima del riel, entre cada rueda del ferrocarril”.....	13
Figura 12 Freno por corrientes parásitas, se puede observar cómo influye el campo magnético en el disco conductor.....	14
Figura 13 Freno circular en montaña rusa japonés .....	14
Figura 14 Laboratorio de la Unidad de Investigación de Control y Emisiones .....	15
Figura 15 Dinamómetro de banco con motor de Mercedes-Benz.....	16
Figura 16 Plano de dimensiones del freno CE 36 de la marca TELMA .....	16
Figura 17 Diagrama de conexión a 12 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector .....	17
Figura 18 Diagrama de conexión a 24 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector .....	17
Figura 19 Dinamómetro de banco con motor V6.....	18
Figura 20 Plano de dimensiones del freno de modelo OC442066 y marca TELMA®.....	18
Figura 21 Diagrama de conexión a 12 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector .....	19
Figura 22 Diagrama de conexión a 24 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector .....	19
Figura 23 Dimensiones de plataforma del dinamómetro de motocicletas.....	20
Figura 24 Dinamómetro para motocicletas.....	20
Figura 25 Dinamómetro de chasis para vehículos medianos .....	21
Figura 26 Comparación de dos señales de PWM con diferente ciclo de trabajo .....	22
Figura 27 Diagrama de conexión de control de velocidad de un motor, con etapa de potencia .....	23
Figura 28 Diagrama de conexión de un LM556 en modo generador PWM .....	26
Figura 29 Diagrama de conexión del circuito de potencia controlado por un MOSFET ....	26
Figura 30 Diagrama interno del encapsulado TL494[35].....	27
Figura 31 Diagrama de conexión de TL494 para generar una señal PWM con frecuencia variable.....	27
Figura 32 Señal de salida de circuito comparador de cruce por cero .....	29
Figura 33 Conexión de referencia para la primera etapa .....	30
Figura 34 Señal de la red eléctrica.....	30
Figura 35 Diagrama de transformador con derivación de derivación central .....	31

Figura 36 Diagrama de señales de voltajes de salida de un transformador con derivación central, donde las señales se encuentran desfasadas 180° .....	31
Figura 37 Diagrama de conexión de diodos al transformador .....	32
Figura 38 Única señal conformada por los dos semiciclos positivos de las señales del transformador .....	32
Figura 39 Diagrama eléctrico de un potenciómetro .....	33
Figura 40 Diagrama de conexión de circuito comparador de cruce por cero .....	33
Figura 41 Pines de conexiones del amplificador TL084 .....	34
Figura 42 Plano de comparación de señales de un comparador.....	34
Figura 43 Circuito integrador con amplificador operacional .....	35
Figura 44 Diagrama de conectores del transistor BC547 .....	36
Figura 45 Diagrama de conexión de etapa de generación de señal de rampa lineal.....	36
Figura 46 Comparación de señales entre la salida del integrador y la de excitación del transistor.....	37
Figura 47 Comparación de señales con pulsos de diferente ciclo de trabajo de la señal de excitación.....	37
Figura 48 Diagrama de conexión de comparador TL084 .....	38
Figura 49 Comparación de señales de voltaje de referencia y la señal del integrador .....	38
Figura 50 PWM con un ciclo de trabajo mayor al 40% .....	39
Figura 51 PWM con un ciclo de trabajo de 30%.....	39
Figura 52 Diagrama de conexión de interruptor, el cual se muestra los tres pines del interruptor con las conexiones a cada una de las señales .....	40
Figura 53 Diagrama de conexión de diodo Zener como regulador de voltaje .....	40
Figura 54 Conexiones del arreglo para el ajuste de accionamiento .....	41
Figura 55 Diagrama de conexión de un relevador de estado sólido .....	43
Figura 56 Conexión de puente de diodos.....	43
Figura 57 Diagrama de conexión de la etapa de potencia .....	44
Figura 58 Diseño de circuito impreso en Proteus® .....	45
Figura 59 Software FlatCAM® mapa de corte para la CNC 3018 .....	46
Figura 60 Mapa de corte, perforación para CNC 3018.....	46
Figura 61 Mapa de alturas en CNC 3018 y software Candle®.....	47
Figura 62 Menú de manipulación del software Candle®, permitiendo manipular la velocidad del motor, guardar coordenadas y crear un mapa de alturas .....	48
Figura 63 CNC 3018-PRO .....	48
Figura 64 Diagrama de canales y aspas de enfriamiento en unidades de absorción de potencia por corrientes parásitas .....	49
Figura 65 Diagrama de conexión de componentes para sistema de refrigeración .....	50
Figura 66 Diagrama de conexión interno del sensor MLX90614 .....	51
Figura 67 Diagrama de conexión para el relevador de estado sólido SSR-40 DD.....	52
Figura 68 Componentes para el sistema de enfriamiento .....	52
Figura 69 Sección de actuadores de la interfaz desarrollada en LabView® .....	54
Figura 70 Comunicación en serie de la primera parte y la comunicación en paralelo la segunda parte.....	55
Figura 71 Diagrama de comunicación entre computadora (interfaz) y el maestro enviando la cadena de datos respectiva para cada actuador por medio de comunicación serial.....	56
Figura 72 Diagrama de conexión entre maestro y esclavos en comunicación I2C .....	56
Figura 73 Diagrama de comunicación en el sistema de esclavo o actuador .....	57



Figura 74 Pines de salida de Arduino Mega 2560 .....	58
Figura 75 Diseño del shield para el Arduino del circuito maestro .....	58
Figura 76 Pinout de arduino Uno R3.....	59
Figura 77 Diagrama de conexión del módulo DAC MCP4725.....	60
Figura 78 Diseño de pistas del circuito del actuador .....	60
Figura 79 Terminales de conexión para el interruptor que intercambia de señal de control .....	62
Figura 80 Diagrama de conexión del botón de paro de emergencia .....	62
Figura 81 Botón de paro de emergencia ensamblado en el gabinete de resguardo de la instrumentación .....	63
Figura 82 Circuito de control ensamblado en una tarjeta protoboard .....	64
Figura 83 Señales sinusoidales de un transformador con derivación central. Siendo v1 una salida del transformador y v2 la otra salida .....	65
Figura 84 Señal rectificada por medio de dos diodos 1N4001 .....	65
Figura 85 A) comparación de la señal rectificada y una señal DC B) señal de pulsos resultado de la comparación de las señales .....	66
Figura 86 Señal generada en la etapa de rampa lineal del circuito de control.....	66
Figura 87 A) comparación de señal de rampa lineal con una de referencia B) comparación de señales entre la rapa lineal y el PWM con un porcentaje de ciclo de trabajo de 50%..	67
Figura 88 A) comparación de señal de rampa lineal con una de referencia B) comparación de señales entre la rapa lineal y el PWM con un porcentaje de ciclo de trabajo de 30%..	67
Figura 89 Pantalla LCD de visualización de porcentaje de freno aplicado .....	68
Figura 90 Placa PCB de circuito de control vista de la parte superior e inferior.....	68
Figura 91 Placa PCB del maestro A) y placa PCB del actuador B) vista de la parte superior .....	69
Figura 92 Prueba de funcionamiento de la etapa de potencia.....	69
Figura 93 Prueba de intensidad de encendido de un foco incandescente controlado por una señal PWM con un porcentaje menor al 20%.....	70
Figura 94 Prueba de corriente por medio de amperímetro de gancho y ciclo de trabajo aplicado a un foco incandescente mostrado en un osciloscopio .....	70
Figura 95 Señal de salida esperada del relevador de estado sólido a diferentes porcentajes de ciclo de trabajo, la cual muestra la señal senoidal cortada por el relevador .....	71
Figura 96 Señal de salida esperada del puente rectificador a diferentes porcentajes de ciclo de trabajo, la cual muestra la señal cortada por el relevador .....	71
Figura 97 Prueba realizada en el dinamómetro de motocicletas del laboratorio UNICE con una moto honda de 125 cc .....	72
Figura 98 Pruebas realizadas en el dinamómetro de banco con moto V6.....	73
Figura 99 Pantallas LCD de visualización de los parámetros de velocidad angular del freno, peso leído por la celda de carga empleada para el cálculo del par motor, y porcentaje de ciclo de trabajo aplicado de las pruebas realizadas a 1500 r.p.m. en el dinamómetro.....	73
Figura 100 Gabinete de resguardo de la instrumentacion para los dinamometros, con pantallas LCD para los parametros de velocidad angular, celda de carga, porcentaje de aceleracion, consumo de combustible y porcentaje de ciclo de trabajo aplicado .....	74
Figura 101 Dimensiones de circuito de control.....	78
Figura 102 Diagrama de componentes del circuito de control.....	79

Figura 103 Pistas del circuito de control.....	80
Figura 104 Barrenos para el circuito de control.....	81
Figura 105 Dimensiones del circuito maestro .....	83
Figura 106 Diagrama de componentes del circuito maestro.....	84
Figura 107 Pistas del circuito maestro .....	85
Figura 108 Barrenos del circuito maestro.....	86
Figura 109 Circuito de DAC .....	87
Figura 110 Diagrama de componentes DAC .....	87
Figura 111 Pistas del circuito DAC .....	88
Figura 112 Barrenos del circuito DAC .....	88
Figura 113 Circuito del sistema de refrigeración .....	89
Figura 114 Diagrama de componentes del circuito de refrigeración .....	90
Figura 115 Pistas del Circuito de refrigeración .....	91
Figura 116 Barrenos del circuito de refrigeración .....	92

## Tablas

Tabla 1 Comparación de consumo de año 2020 con 2021 .....	1
Tabla 2 Características de los contaminantes .....	2
Tabla 3 Consumo de corriente del freno PAU CE 36 dependiendo de la conexión.....	17
Tabla 4 Consumo de corriente del freno PAU CE 36 dependiendo de la conexión.....	17
Tabla 5 Consumo de corriente del freno PAU OC442066 .....	19
Tabla 6 Consumo de corriente del freno PAU OC442066 .....	20
Tabla 7 Comparación de frecuencias de PWM en cada versión de Arduino.....	24
Tabla 8 Modos de operación de un CCP en PIC .....	24
Tabla 9 Datos recopilados en prueba a motocicleta CG125 .....	72
Tabla 10 Listado de componentes utilizados en el circuito de control.....	77
Tabla 11 Componentes para el circuito de potencia .....	82
Tabla 12 Listado de componentes utilizados en el actuador.....	82
Tabla 13 Listado de componentes del sistema de refrigeración .....	89

## Introducción

De acuerdo con el balance de nacional de energía 2021, para el 2020 el consumo mundial fue de 400,819.44 PJ (Petajoules), el consumo de petrolíferos se vio disminuido en un 8.39% en comparación al 2019. (SENER 2021)

Los países que contaron con mayor consumo energético fueron, China con 91,682.55 PJ, Estados Unidos con 61,178.47 PJ, India con 24,973.70 PJ, Rusia con 21,187.31 y Japón con 11,008.80 PJ, para México contando con 4,035.14 PJ. Derivando en diferentes sectores a nivel mundial, el sector transporte tuvo un consumo de 104,951.35 PJ, el sector industrial con 120,269.71 PJ, residencial con 88,519.92 PJ, comercial y público 31,745.16 PJ, agropecuario 8,941.19 PJ entre otras ramas. (SENER 2021)

El consumo total de energía primaria a nivel mundial con un valor de 318,823.68 PJ, estas matrices ya sea a nivel nacional o nivel mundial están principalmente compuestas por los hidrocarburos. Los combustibles con mayor presencia a nivel mundial son el petróleo crudo y petrolíferos con el 48.59%. Para México, debido a su gran capacidad de extracción, el consumo alcanza un 36.30% del total de oferta de petróleo crudo y petrolíferos. (SENER 2021)

En el sector transporte se totalizó con 2,784.64 PJ para el 2021, con un aumento de 63.45% más que el año 2020, con un aumento de 64.84% el autotransporte fue considerado el más representativo con 93.30% en comparación con el año anterior, el transporte aéreo fue el segundo con mayor participación con 4.823%. (SENER 2021)

*Tabla 1 Comparación de consumo de año 2020 con 2021 (SENER 2021)*

	2020	2021	Variación de porcentaje
Transporte	1,703.68	2,784.64	63.45
Autotransporte	1,576.11	2,598.05	64.84
Total, de petrolíferos	1,574.31	2,596.31	64.92
Gasolinas y naftas	1,101.78	60.64	-17.90
Diésel	398.89	1,862.94	69.08
Gas licuado	73.64	672.91	68.70

En la Tabla 1 se puede observar las comparaciones del año 2020 con 2021, un incremento en el consumo, por lo que nos quiere decir que ha estado en aumento cada de los sectores, llevándonos a mayores emisiones de efecto invernadero.

Una de las normas más importantes a nivel mundial es la de Europa, contando con las reglamentaciones más estrictas en cuanto a contaminantes por motores a gasolina y diésel, actualmente se tiene la Euro 6, esta reglamentación internacional donde cuyo objetivo es reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas finas, estas sustancias son

emitidas por los automóviles y altamente contaminantes, así como muy nocivas para la salud. Esta norma establece un ciclo de pruebas que se desarrollan en laboratorios y carreteras por un automóvil que está testeando a altas velocidades para medir las emisiones en aceleraciones y desaceleraciones, basándose en las experiencias y hábitos de conducción. (Muñoz 2023)

Para México entro en vigor el 12 de octubre de 2006 la NOM-044 que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno en motores nuevos que usan diésel. (Diario oficial de la federacion 2018)

Las emisiones por la quema de combustibles fósiles como la gasolina, diésel, gas licuado o biocombustibles comprenden el monóxido y bióxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno y partículas, entre otros. En la Tabla 2 se menciona las emisiones de estos contaminantes dependen de las características de cada vehículo separándolo por las características que lo definen como se observa en la Tabla 2, así como la forma en que se producen, donde y como los impactos que puede llegar a tener en la población. (gobierno de mexico 2005)

*Tabla 2 Características de los contaminantes (gobierno de mexico 2005)*

Contaminante	Características	Proceso de generación	Impactos a la salud
Hidrocarburo	Existen hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles (COV).	Resultado de la combustión incompleta.	Los COV son precursores del ozono y alguno de ellos son altamente tóxicos para el ser humano.
Monóxido de carbono	El CO es un gas incoloro e inodoro	Producto de la combustión incompleta y ocurre cuando el carbono en el combustible se oxida.	EL CO se adhiere con facilidad a la hemoglobina de la sangre y reduce el flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo.
Bióxido de carbono	Gas no tóxico de efecto invernadero	Se forma por la combustión completa en presencia de oxígeno suficiente para oxidar en su totalidad el carbono de los combustibles.	El bióxido de carbono no atenta contra la salud, pero es un gas de efecto invernadero de gran importancia.

Óxido de nitrógeno	Los óxidos de nitrógeno, al igual que los hidrocarburos, son precursores de ozono. Con la presencia de humedad atmosférica se convierte en ácido nítrico.	Cuando la presión y la temperatura en el motor son altas, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar NO, bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).	La exposición aguda al NO <sub>2</sub> puede incrementar las enfermedades respiratorias, especialmente en los niños y personas asmáticas. La exposición crónica a este contaminante puede disminuir las defensas contra infecciones respiratorias.
Bióxido de azufre	El SO <sub>2</sub> es un gas incoloro de fuerte olor. Con la presencia de humedad atmosférica se convierte en un ácido sulfúrico.	Se produce debido a la presencia de azufre en el combustible. Es generado por la oxidación del azufre del combustible durante la combustión.	Es irritante para los ojos, nariz y garganta, y agrava los síntomas del asma y la bronquitis. La exposición prolongada al dióxido de azufre reduce el funcionamiento pulmonar.

Todos estos contaminantes son los que tienen mayor efecto sobre la salud de población, por lo tanto, es necesario implementar normas para su control. Una de las normas que regulan los contaminantes es la NOM-EM-005-CRE-2015, la cual establece la distribución obligatoria de gasolinas y Diesel bajos en azufre en algunas zonas del país. (Comisión Reguladora de Energía 2016) En la norma se menciona que el contenido de la combustión, se obtiene combustibles que impactan de manera negativa en la calidad del aire y la salud de las personas. Por ello es necesario regular la calidad de estos combustibles, estableciendo límites acordes a la situación orográfica de cada región del territorio nacional.

En el caso del diésel, este debe ser de ultra bajo contenido de azufre (UBA), esto implica que debe tener un contenido de 15 partes por millón (ppm) de azufre o menos. Esta medida busca reducir drásticamente la emisión de óxidos de azufre a la atmósfera. (Comisión Reguladora de Energía 2016)

Las gasolinas también deben ser UBA, con 30 ppm en promedio, teniendo un máximo permisible de 80 ppm, y un máximo de aromáticos de 32% en todo el país a excepción de la zona metropolitana del valle de México, ahí se permite un valor máximo de 25%. (Comisión Reguladora de Energía 2016)

En cuanto a olefinas, de las cuáles las más importantes son el etileno y el propileno, el contenido permisible se redujo de 12.5% a 11.9% en las zonas metropolitanas de Guadalajara y Monterrey, para la zona metropolitana del valle de México continua en 10 %. El porcentaje de benceno se fijó en 1% para la zona metropolitana del valle de México, para el resto del país se redujo de 3% a 2% como máximo. (Comision Reguladora de Energia 2016)

Otra de las normas que se necesita para mantener un control de emisiones es la de los equipos para la medición de contaminantes que implementó el gobierno de la ciudad de México. México cuenta con la normativa NOM-047-SEMARNAT-2014, la cual establece las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites máximos permitidos de emisiones de contaminantes provenientes de vehículos automotores en circulación equipados con motores que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural o ya sea otros combustibles alternativos, donde se ven obligados a seguir dicho proceso los responsables de los centros de verificación o unidades de verificación vehicular autorizados, proveedores de equipos de verificación, de insumos y laboratorios de calibración. (Diario oficial de la federacion 2014)

La Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE), es un grupo de la Facultad de ingeniería. Conformado por estudiantes, profesores e investigadores, que tienen como finalidad coadyuvar a la investigación y desarrollo de estrategias de control para las emisiones vehiculares en el país, desarrollando dispositivos y modelos que permiten medir las emisiones contaminantes y así poder encontrar alternativas de control dando pie a nuevas formas de mejorar los vehículos automotores.

Los principales estudios del laboratorio UNICE son sobre los contaminantes que emiten los motores de combustión interna en todas sus variantes de uso de combustibles, utilizando bancos dinamométricos. Para estos estudios es necesario implementar instrumentación para la obtención de datos, como las revoluciones por minuto (RPM), la velocidad de los rodillos de los dinamómetros o la velocidad angular de los motores de combustión interna y la carga que pueden producir las unidades de absorción de potencia de los dinamómetros.

Existen diferentes frenos que ayudan a controlar la carga aplicada a los motores o vehículos de estudio, los frenos más conocidos son por fricción, hidráulicos y eléctricos, el cual este se divide en corriente continua, alterna y corrientes de Foucault.

Los frenos de fricción son los más comunes y el primero que se implementó en los bancos dinamométricos llamado “freno de Prony” como se muestra en la Figura 1, que están constituidos por una zapata y un tambor, aunque a su inestabilidad y a su difícil manejo de regulación, así como el enfriamiento ya no es usual ocupar este tipo de freno. (Departamentgo de maquinas y motores termicos 2001)

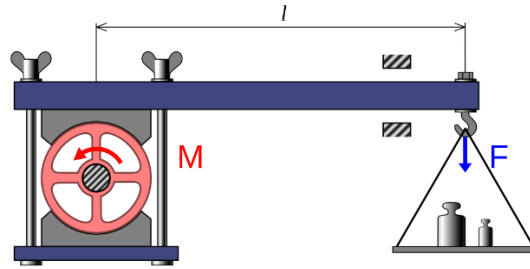
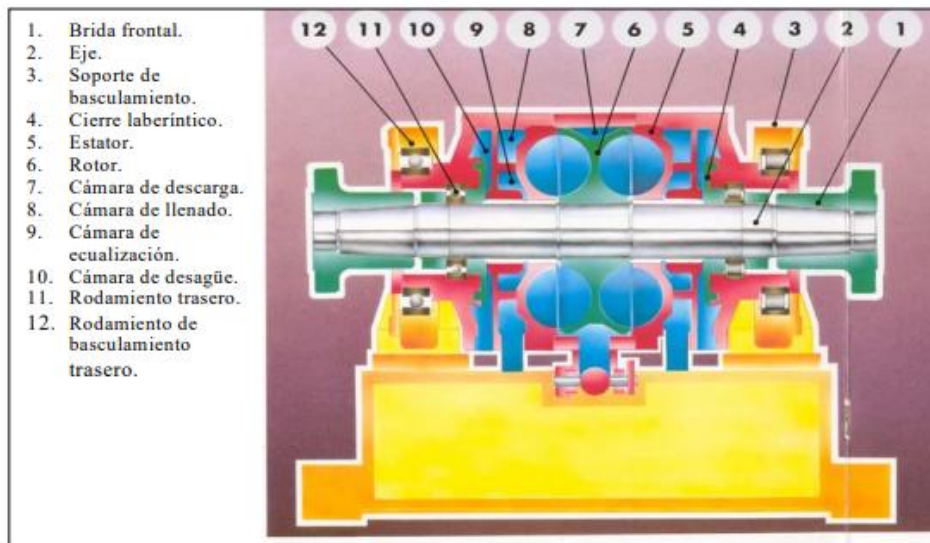


Figura 1 Freno Prony (Aeronautica general 2000)

Los frenos hidráulicos son similares a los convertidores hidráulicos de par, donde el agua impide girar al eje de salida, las partes que lo componen es de un rotor y una carcasa o estator llena de agua que sirve tanto de elemento de frenado como refrigerante, así como se muestra en la Figura 2. (Departamentgo de maquinas y motores termicos 2001)



1. Brida frontal.
2. Eje.
3. Soporte de basculamiento.
4. Cierre laberíntico.
5. Estator.
6. Rotor.
7. Cámara de descarga.
8. Cámara de llenado.
9. Cámara de ecualización.
10. Cámara de desagüe.
11. Rodamiento trasero.
12. Rodamiento de basculamiento trasero.

Figura 2 Freno hidráulico (PINEDA 2006)

Los frenos por corriente continua son similares al hidráulico ya que poseen un estator, donde el estator posee un montaje basculante y está unido a un sistema de medida de fuerza, como se muestra en la Figura 3. El par del motor se transmite al rotor donde se encuentra el estator que por medio de un campo magnético regular la carga. (Departamentgo de maquinas y motores termicos 2001)



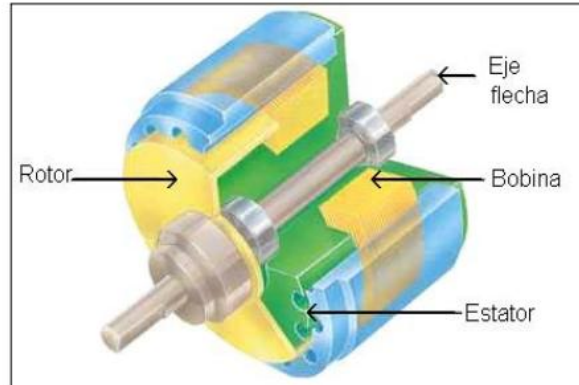


Figura 3 Freno por corriente continua (PINEDA 2006)

El freno por corrientes parásitas o de Foucault opera gracias al efecto que ocurre cuando un objeto conductor se ralentiza debido a fuerzas producidas por corrientes inducidas en él debido a campos magnéticos variables con el tiempo, como si fueran imanes. Esto se puede apreciar en la Figura 4 (forrister 2019).

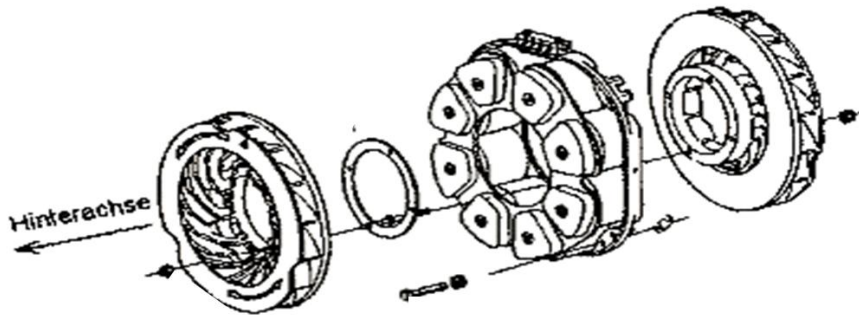


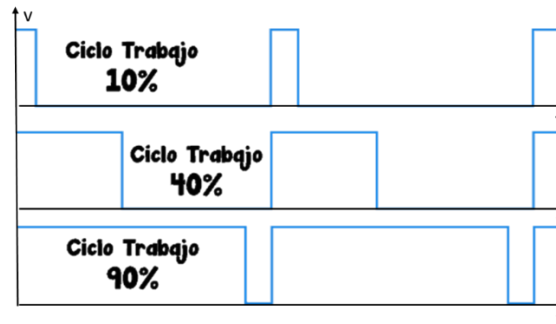
Figura 4 Freno por corrientes parásitas y sus componentes internos desde sus discos y bobinas (TELMA 2020)

En el laboratorio de Vehículos y Motores de la UNICE, se cuenta con frenos de corrientes parásitas de diferentes fabricantes con características específicas para cada dinamómetro: dos de ellos son de la marca TELMA, más en específico los modelos CE36 y OC442066.

En este trabajo se abordan los objetivos relacionados con el diseño y validación de sistemas de instrumentación y control de los frenos por corrientes parásitas utilizados en los dinamómetros de chasis y banco del laboratorio de motores de combustión interna. El principal propósito es describir el funcionamiento de los frenos dinamométricos por corrientes parásitas, así como desarrollar un sistema de control de frenos que sea fácil de mantener y operativamente eficiente. Además, se busca obtener datos precisos sobre el porcentaje de freno proporcionado por estos sistemas, lo que permitirá mejorar la precisión y confiabilidad de las mediciones.

En el presente trabajo se analizan únicamente frenos por corrientes parásitas (corrientes de Foucault). Estos frenos serán controlados por un sistema que implementa la modulación por ancho de pulso (PWM).

Se denomina PWM ( del inglés Pulse Width Modulation) a una señal de voltaje que suele usarse en muchos campos de la electrónica como el control de velocidad de motores de corriente continua. La modulación por ancho de pulso está formada por una señal periódica de onda cuadrada que no siempre tiene el mismo valor en el eje del tiempo, puede permanecer más tiempo encendida o apagada durante cada ciclo. (kojlhase 2020)



*Figura 5 Ciclos de trabajo de un PWM (Gomez 2017)*

Se denomina como ciclo de trabajo del PWM al porcentaje del período de la señal que el voltaje tiene un valor alto, como se muestra en la Figura 5. Esto quiere decir que la señal PWM es la encargada de controlar la potencia aplicada a un sistema esto por medio de una señal digital, por lo tanto esto dependerá del ciclo de trabajo si se aplica el 100% se está aplicando la potencia total y se aplica el 50% se está aplicando la mitad de la potencia teniendo una relación de proporción con el porcentaje de ciclo de (Gomez 2017).

La construcción de este controlador es llevado por etapas desde la toma de señal de la red eléctrica esto porque es necesario sincronizar la frecuencia entre la etapa de control y la de potencia, la pruebas que se llevan a cabo a diferentes velocidades establecidas que se relazarán en los diferentes dinamómetros, por ejemplo en el dinamómetro de chasis se harán a ciertas velocidades del rodillo en el cual esta acoplado el freno por corrientes parásitas, en el banco dinamométrico donde se realizan las pruebas de manera primeriza es para motos, el cual fue construido por los integrantes del laboratorio de motores de combustión interna (UNICE).

En el capítulo 1 del presente trabajo se hace mención sobre los frenos que existen para dinamómetros, Posteriormente, se trata de los frenos con los que cuenta el laboratorio de UNICE. Finalmente se profundiza en los frenos por corrientes parásitas.

En el capítulo 2 se trata sobre las diferentes formas de controlar los frenos de corrientes parásitas. Para ello se analizan los diferentes modos de conexión que existen para dichos frenos, analizando la forma de generación de la señal de modulación por ancho de pulso que se les aplica a estos frenos, los cuales son los que cuenta el laboratorio UNICE.

En el capítulo 3 se describe el proceso llevado a cabo para la elaboración y desarrollo de las placas de circuito impreso (PCB), abarcando desde el software utilizado hasta el proceso de maquinado necesario para fabricar el circuito en la placa fenólica, para luego proceder con su manufactura.

En el capítulo 4 se presentan las pruebas realizadas en uno de los bancos dinamométricos, verificando el comportamiento del freno a diferentes velocidades con diferentes ciclos de trabajo aplicado, tomando en cuenta el rendimiento del freno en las diferentes pruebas y así buscando adaptaciones necesarias o correcciones para que el funcionamiento sea lo más adecuado para las pruebas, así como los errores observados y corregidos en las placas de circuito, analizando el comportamiento de las unidades de absorción y las mejoras que podría llegar a atener.

# 1. Capítulo 1 Frenos para dinamómetros

En este capítulo se exploran los diversos tipos de frenos utilizados en los dinamómetros automotrices, desde los tradicionales hasta los más actuales, analizando su funcionamiento, importancia y aplicaciones. Además, se abordan los frenos hidráulicos, eléctricos y de fricción, detallando cómo cada uno contribuye a garantizar mediciones precisas y seguras durante las pruebas de potencia, torque y rendimiento.

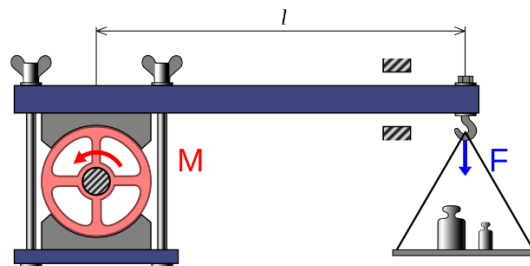
Los dinamómetros son herramientas clave para medir parámetros como la potencia a el freno, el consumo específico de combustible, o las emisiones específicas de los motores. Estos equipos constan de varias partes, entre ellas el freno o unidad de absorción de potencia (PAU), que se utiliza para aplicar un par a los motores objeto de estudio.

El freno está compuesto por un estator y un rotor. El rotor comúnmente está acoplado al sistema motriz del motor o vehículo que se evalúa, mientras que el estator genera la fuerza necesaria para frenar al rotor. El conjunto está montado sobre rodamientos que sostienen al rotor. Existen diversas tecnologías de frenos, y se trata de cada una de ellas como sus ventajas, desventajas y principio de funcionamiento, que pueden influir en el tipo de estudio que se realice, ya sea en términos de mayor precisión o menor costo de mantenimiento.

## 1.1.1 Freno prony

El freno Prony es una de las tecnologías más antiguas aplicadas en el frenado de los dinamómetros. Conocer este tipo de tecnología es importante para compararla con sistemas más recientes y eficientes. Este tipo de freno fue inventado por el matemático e ingeniero francés Gaspard Clair Marie Riche de Prony. (Chávez Reyes 2017)

El freno Prony consiste en un brazo de palanca acoplado a una rueda conectada al sistema motriz del vehículo. Esta rueda está unida a un freno de zapata externo, que puede estar hecho de materiales como madera, corcho u otros con un alto coeficiente de fricción. La carga de frenado se aplica mediante tuercas ajustables.



*Figura 6 Freno Prony, donde M es la masa que se encuentra conectada al dinamómetro y F es la fuerza que se ejerce para poder frenar (Universidad de Buenos Aires 2023)*

El diseño del freno que se muestra en la Figura 6 puede variar según el grado de precisión que se desee obtener. Una de las desventajas de este sistema es que no suele ser muy preciso en el frenado, debido a las limitaciones en la calibración de la aplicación del par de frenado (diseño y fabricación de un freno pronny 2017).

### 1.1.2 Freno hidráulico

El freno hidráulico genera un par opuesto al giro del sistema motriz del vehículo mediante una bomba de desplazamiento positivo, que es regulada por una válvula graduable. El freno consiste en uno o varios discos rotativos con paletas, los cuales conforman el rotor, el cual está montado en rodamientos acoplados al sistema motriz del vehículo, como se muestra en la Figura 7.

El freno comúnmente utiliza agua como fluido de operación. Cuando el agua pasa a través de los álabes, el rozamiento entre las paletas y el agua genera calor, a la vez que se opone al giro del rotor. La constante renovación del agua sirve como sistema de refrigeración para el freno.

La aplicación de carga se regula mediante la bomba mencionada anteriormente y la válvula que controla el caudal de agua hacia los álabes. Es decir, la cantidad de agua introducida en la unidad determina la cantidad de carga aplicada al sistema motriz.

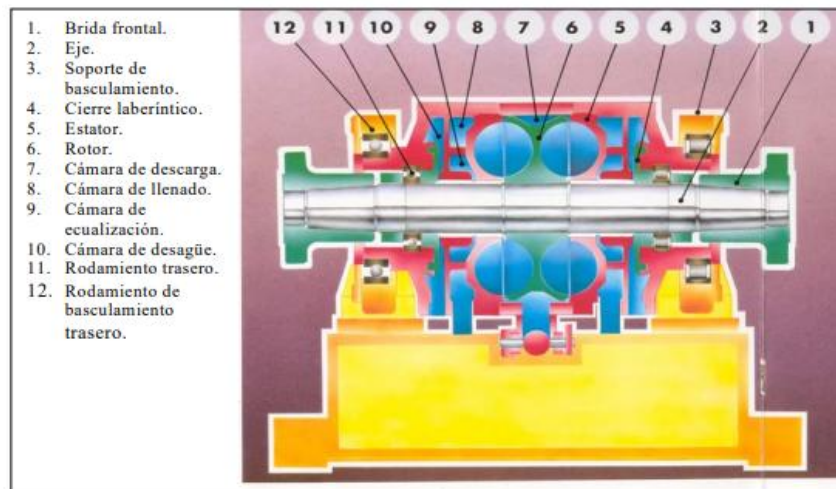


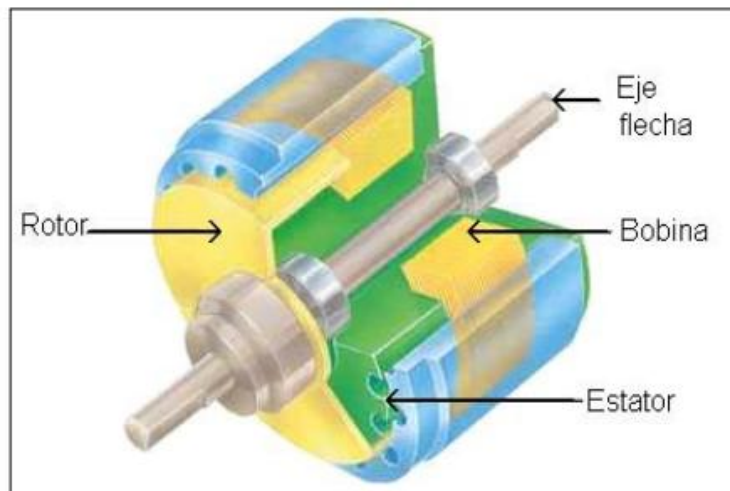
Figura 7 Freno hidráulico (Torres 2021)

En comparación con otras tecnologías de absorción de potencia, el freno tiene dimensiones reducidas, lo que facilita su manipulación. Además, algunas versiones cuentan con un circuito de alta eficiencia que permite disipar una gran cantidad de potencia por unidad de superficie.

Sin embargo, el freno presenta ciertos inconvenientes. A bajas revoluciones, su capacidad de frenado suele ser limitada, y además, tiende a sufrir un desgaste elevado debido a fenómenos como la cavitación y la turbulencia en la turbina (Torres 2021).

### 1.1.3 Freno de corriente continua

El freno de corriente continua transforma la energía mecánica generada por el sistema motriz en energía eléctrica. Esta unidad está compuesta por un generador de corriente continua (DC), que incluye un rotor y un estator, como se muestra en la Figura 8. Los rotores están montados sobre rodamientos, los cuales, a su vez, están ensamblados en los estatores. La bobina del estator se conecta a una carga variable, generalmente constituida por resistencias. Al modificar esta carga, la bobina genera una fuerza de frenado sobre el rotor. (Arranz 2008)



*Figura 8 Componentes de un freno de corriente continua (Arranz 2008)*

Existe una pérdida de energía en forma de calor, conocida como el efecto Joule, que se disipa en el ambiente. Por ello, se emplean métodos de refrigeración, como aire forzado o refrigeración líquida, para aumentar la eficiencia del freno.

Las unidades de absorción de potencia de corriente continua suelen ser de gran tamaño y generar un alto voltaje en su salida hacia las resistencias (Arranz 2008).

## 1.2 Funcionamiento de unidades de absorción de potencia por corrientes parásitas

Las corrientes de Foucault, también conocidas como corrientes parásitas, son corrientes inducidas en un medio cuando está expuesto a un flujo magnético variable en el tiempo. Este fenómeno es una consecuencia de la ley de inducción de Faraday-Lenz, que establece que un flujo de campo magnético variable genera un campo eléctrico, capaz de inducir una corriente eléctrica.

En dispositivos como transformadores o motores eléctricos, las corrientes de Foucault no son deseables, ya que provocan pérdidas de energía debido al efecto Joule. Sin embargo, en otros dispositivos, como detectores de metales o frenos magnéticos, estas corrientes son fundamentales para su funcionamiento (Soto 2008).

El principio de funcionamiento de un freno de corrientes parásitas consiste en el uso de discos metálicos que giran en presencia de un campo magnético generado por electroimanes como se puede observar en la Figura 9. Este campo magnético induce un par de rotación que se opone al movimiento del rotor, donde están montados los discos. El campo magnético es producido por las bobinas instaladas en el estator. Como resultado, se genera calor en los discos del rotor debido al efecto Joule. La intensidad de la corriente de excitación en las bobinas determina de manera proporcional el par de frenado.

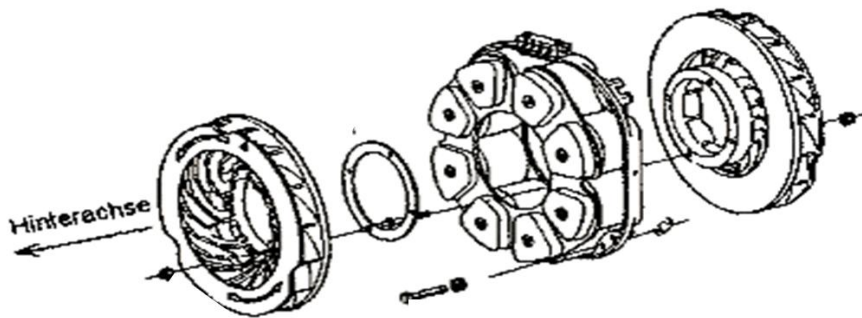


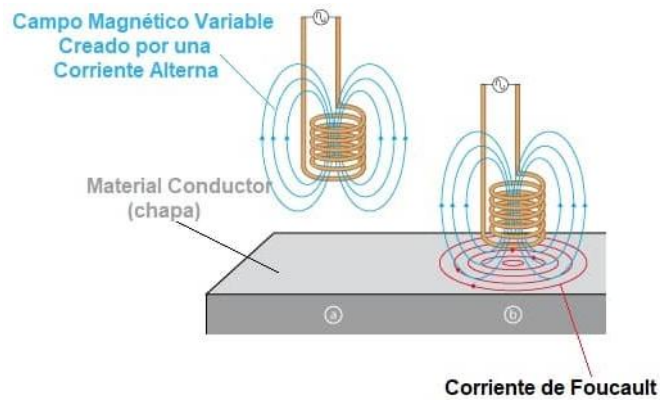
Figura 9 Diagrama de ensamblaje de un freno por corrientes parásitas (TELMA 2020)

Este tipo de unidad se caracteriza por proporcionar una alta fuerza de frenado a bajas revoluciones y por su fácil mantenimiento, lo que permite un control más preciso del frenado o de la aplicación de carga al sistema motriz. Sin embargo, presenta un problema de sobrecalentamiento cuando se utiliza durante periodos prolongados, ya que los discos tienden a calentarse y perder sus propiedades ferromagnéticas (Matias 2021).

## 1.3 Tipos de frenos por corrientes parásitas

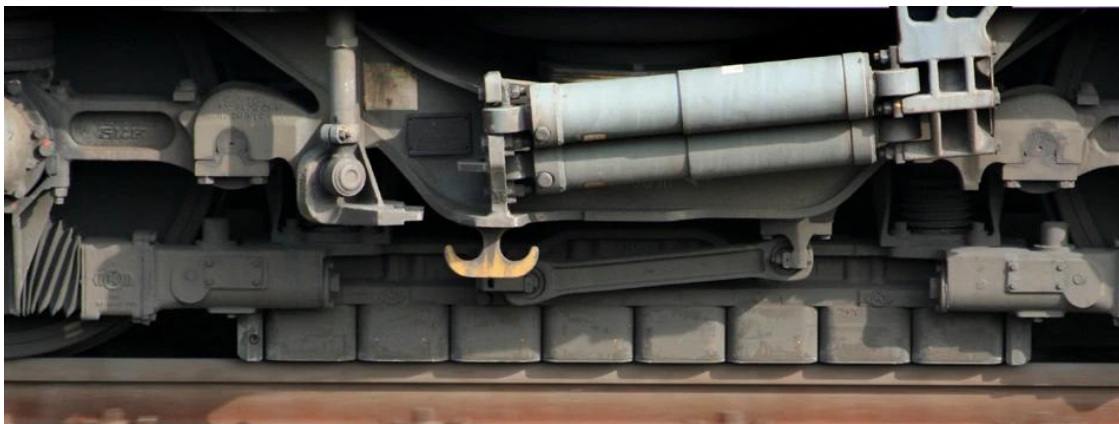
### 1.3.1 Lineales

Está compuesto por electroimanes y un conductor. Cuando el conductor se alinea con los electroimanes, el desplazamiento lineal de estos últimos induce corrientes parásitas a lo largo del conductor, como se muestra en la Figura 10. Como resultado, los campos magnéticos inducidos en el conductor generan una fuerza de frenado sobre el electroimán.



*Figura 10 Inducción de las corrientes parásitas en un conductor lineal (Café y deep learning 2023)*

Una aplicación del freno puede ser en su forma lineal se encuentra en una línea ferroviaria en Alemania, como se muestra en la Figura 11. En este sistema, ocho electroimanes están instalados entre las ruedas del tren, con una distancia aproximada de 7 mm del riel.



*Figura 11 Freno de ferrocarril en Alemania "las bobinas se encuentran justo por encima del riel, entre cada rueda del ferrocarril" (Fandom s.f.)*

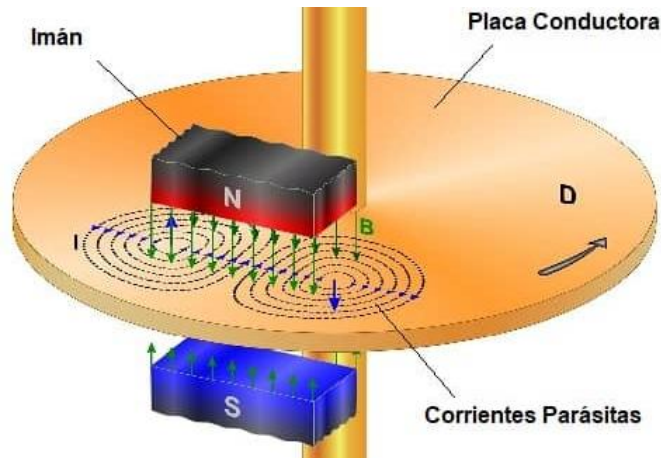
Los operadores de estos trenes pueden activar los electroimanes para reducir la velocidad. El principio de funcionamiento es que, dado que los rieles están fijos, el campo magnético generado por las bobinas en movimiento a altas velocidades induce corrientes parásitas significativas en los rieles. Como resultado, se genera una fuerza de frenado (Fandom s.f.).

La ventaja de estos frenos es que proporcionan un frenado sin fricción, lo que elimina el ruido. Además, ofrecen un control de frenado preciso y económico. Sin embargo, una desventaja es que los campos magnéticos generados pueden interferir con las señales del tren. Otro inconveniente es que no funcionan adecuadamente como freno de mano. (Fandom s.f.)



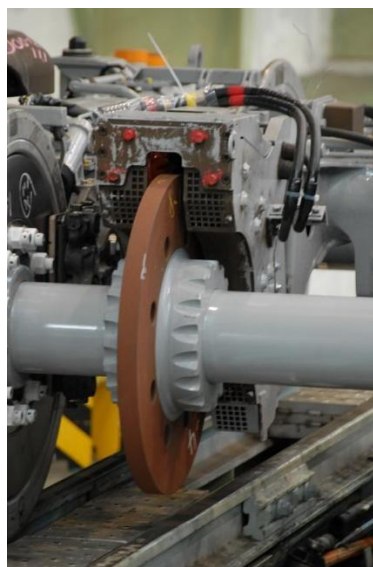
### 1.3.2 Rotatorios

Los frenos de corrientes parásitas rotatorios están compuestos por un disco giratorio y un imán permanente o un electroimán. Las propiedades conductoras del disco permiten que se induzcan corrientes parásitas a medida que gira dentro de los campos magnéticos, como se muestra en la Figura 12. Estas corrientes generan una fuerza de frenado que reduce la velocidad de rotación del disco. (Electricity magnetism 2023)



*Figura 12 Freno por corrientes parásitas, se puede observar cómo influye el campo magnético en el disco conductor (Electricity magnetism 2023)*

El tiempo de frenado dependerá de la intensidad del campo magnético generado por los electroimanes o imanes permanentes, así como de la capacidad del disco para disipar la energía. Estos frenos tienen diversas aplicaciones, como en montañas rusas, tal como se muestra en la Figura 13. (Departamento de física aplicada 2018)



*Figura 13 Freno circular en montaña rusa japonés (Departamento de física aplicada 2018)*

## 1.4 Frenos por corrientes parásitas del Laboratorio de Motores y Vehículos

El Laboratorio de Motores y Vehículos de la Unidad de Investigación de Control de Emisiones (UNICE) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, empezó sus actividades en octubre de 1996, perteneciente al departamento de Termo energía y Mantenimiento Ambiental, de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial (DIMEI). (Gabriela 2009)



*Figura 14 Laboratorio de la Unidad de Investigación de Control y Emisiones*

El principal objetivo del laboratorio es el estudio de las emisiones de vehículos automotores de combustión interna, con el propósito de reducir sus emisiones contaminantes. El laboratorio cuenta con cuatro dinamómetros, cada uno con diferentes características en cuanto a dimensiones y capacidades de trabajo. Dos de los dinamómetros son de banco, mientras que los otros dos son de chasis.

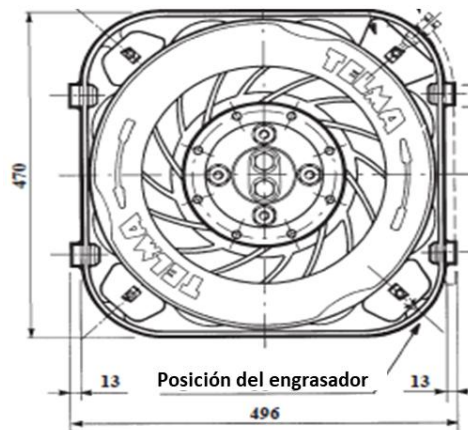
### 1.4.1 Dinamómetro de banco con motor Mercedes-Benz

Uno de los dinamómetros de banco está equipado con un motor diésel Mercedes-Benz de 6 cilindros en línea, que ofrece una potencia de 155 191 W a 2600 rpm y un par máximo de 660 Nm a 1400 rpm.



*Figura 15 Dinamómetro de banco con motor de Mercedes-Benz*

Este banco dinamométrico, mostrado en la Figura 15, está equipado con una PAU de corrientes parásitas, modelo CE 36 de la marca TELMA. La PAU tiene un peso de 192 kg y dimensiones de 496 mm de largo, 470 mm de alto y 266 mm de ancho como se observa en la Figura 16. Puede trabajar con un par máximo de 1250 Nm y una velocidad máxima de rotación de 4000 rpm (TELMA 2020).



*Figura 16 Plano de dimensiones del freno CE 36 de la marca TELMA (TELMA 2020)*

El voltaje de operación del freno es de 12 V o 24 V. Dependiendo del voltaje de operación seleccionado, las bobinas deben conectarse de una manera específica ya sea que se encuentren en serie o paralelo entre una y su bobina opuesta, esto quiere decir que el número significa la bobina que está conectada por ejemplo, en la terminal 1 está conectada la bobina 1 y la bobina 1 prima y así para las demás terminales como se puede observar en la Figura 17 y Figura 18 (TELMA 2020).

## 12 V Especificaciones

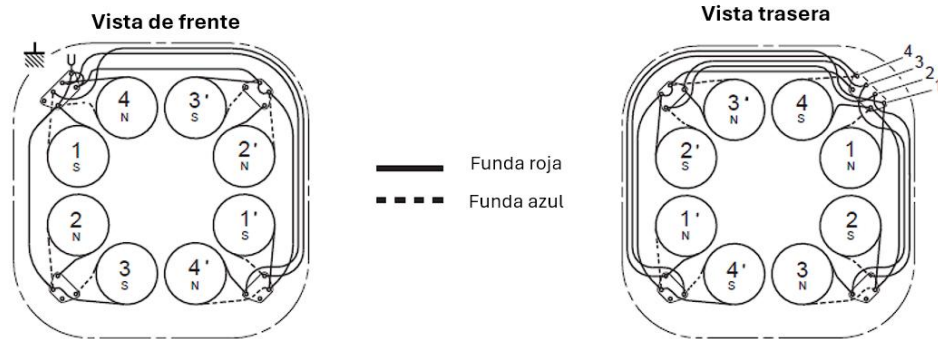


Figura 17 Diagrama de conexión a 12 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector (TELMA 2020)

Tabla 3 Consumo de corriente del freno PAU CE 36 dependiendo de la conexión

Estado	1	2	3	4
Corriente $\pm 5\%$ [A]	30	60	90	120

## 24 V Especificaciones

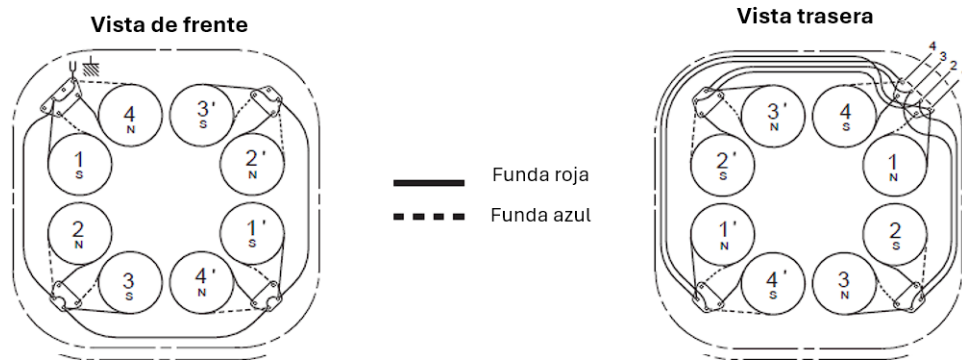


Figura 18 Diagrama de conexión a 24 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector (TELMA 2020)

Tabla 4 Consumo de corriente del freno PAU CE 36 dependiendo de la conexión

Estado	1	2	3	4
Corriente $\pm 5\%$ [A]	15	30	45	60

Tanto en la Tabla 3 y la Tabla 4 se muestra el consumo de corriente en cada una de las terminales ya sea en la terminal uno o que esté conectada hasta la terminal 4.

## 1.4.2 Dinamómetro de banco con motor V6

El dinamómetro de banco con motor V6 tiene una potencia de 128,713 W a 5,200 rpm y un par máximo de 264.4 Nm a 4,000 rpm. Este motor está alimentado con gasolina regular de 87 octanos.

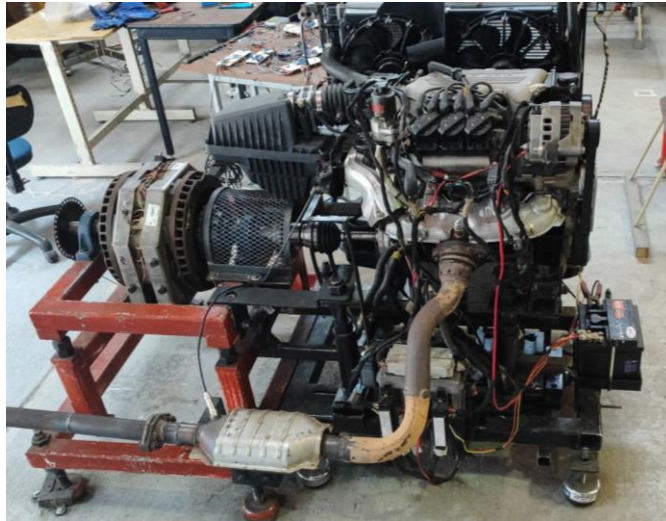


Figura 19 Dinamómetro de banco con motor V6

El dinamómetro mostrado en la Figura 19 está equipado con un freno de modelo OC442066 de la marca TELMA, que tiene un peso total de 125 kg. Esta PAU ofrece un par máximo aplicable de 900 Nm y una velocidad máxima de 4,500 rpm. Sus dimensiones son 400 mm de largo, 363 mm de alto y 261 mm de ancho (ver Figura 15) (TELMA 2020).

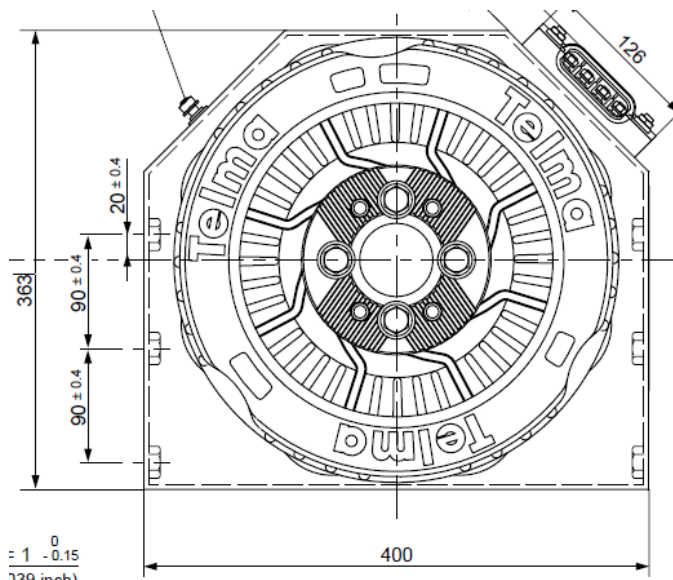


Figura 20 Plano de dimensiones del freno de modelo OC442066 y marca TELMA® (TELMA 2020)

El voltaje de operación del freno es de 12 V o 24 V. Dependiendo del voltaje de operación seleccionado, las bobinas deben conectarse de una manera específica ya sea que se encuentren en serie o paralelo entre una bobina y su opuesta, esto quiere decir que el número significa la bobina que está conectada por ejemplo, en la terminal 1 está conectada la bobina 1 y la bobina 1 prima y así para las demás terminales como se puede observar en la Figura 21 y Figura 22 (TELMA 2020).

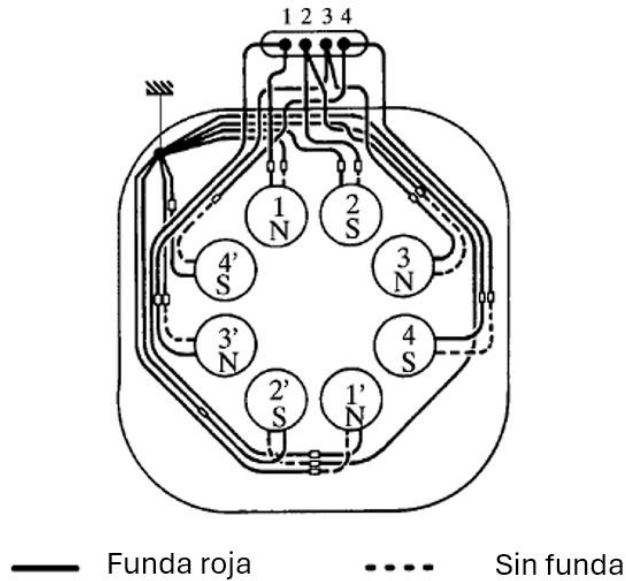


Figura 21 Diagrama de conexión a 12 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector (TELMA 2020)

Tabla 5 Consumo de corriente del freno PAU OC442066

Estado	1	2	3	4
Corriente $\pm 5\%$ [A]	46	96	144	192

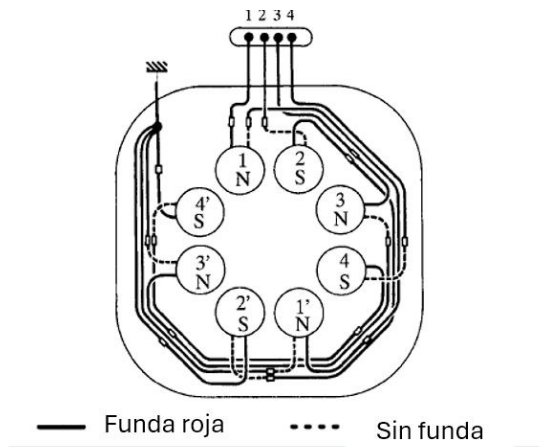


Figura 22 Diagrama de conexión a 24 V donde 1, 2, 3 y 4 corresponden al número de bobinas por conector (TELMA 2020)

Tabla 6 Consumo de corriente del freno PAU OC442066

Estado	1	2	3	4
Corriente $\pm 5\%$ [A]	24	48	72	96

Tanto en la Tabla 5 y la Tabla 6 se muestra el consumo de corriente en cada una de las terminales ya sea en la terminal 1 o que esté conectada hasta la terminal 4.

### 1.4.3 Dinamómetro de chasis para motocicletas

El dinamómetro para motocicletas fue diseñado para evaluar los diferentes modelos de motocicletas representativos que circulan en la Ciudad de México, con cilindradas que van desde 50 cc hasta 1500 cc. Se determinaron las características necesarias para el dinamómetro y el sistema de absorción de potencia, contando con una plataforma de 2,500 mm de largo y 900 mm de ancho, como se muestra en la Figura 23 (PINEDA 2006).

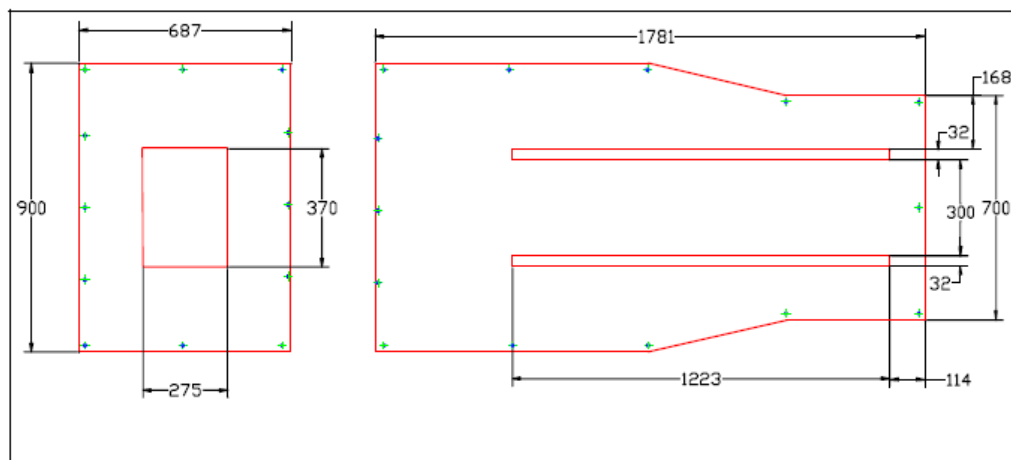


Figura 23 Dimensiones de plataforma del dinamómetro de motocicletas (PINEDA 2006)



Figura 24 Dinamómetro para motocicletas

El freno con el que cuenta este dinamómetro fue desarrollado por los miembros del mismo laboratorio en donde se encuentra esta unidad. Esta PAU cuenta con 6 bobinas por cada lado, esto quiere decir que tiene 12 bobinas en total.

En la Figura 24 se puede observar el dinamómetro para motocicletas, en el cual se encuentra montada una motocicleta Honda Cargo con un motor de de 150 cc.

#### **1.4.4 Dinamómetro de chasis para vehículos medianos**

El dinamómetro de chasis modelo BAR97 2WD de la marca Clayton cuenta con cuatro rodillos, que están acoplados de dos en dos. Cada rodillo tiene una longitud de 850 mm, y los pares de rodillos están separados por 710 mm. Este dinamómetro incluye un colchón neumático con un espesor de 190 mm para facilitar el montaje de cada vehículo. Sus capacidades son de un máximo de 110 325 W y una velocidad de 135 kph de acuerdo con el fabricante.



*Figura 25 Dinamómetro de chasis para vehículos medianos*

El dinamómetro mostrado en la Figura 25 posee un freno por corrientes parásitas compuesta por cuatro bobinas diseñadas por el mismo fabricante. Este dinamómetro requiere un suministro eléctrico de 230 V a 30 A, ya que cuenta con un motor eléctrico acoplado al eje de los rodillos.



## 2 Capítulo 2 Análisis y control a frenos por corrientes parásitas

En este capítulo se exploran en detalle los conceptos y técnicas relacionados con la modulación por ancho de pulso (PWM), una herramienta fundamental para el control eficiente de sistemas electrónicos, como los frenos por corrientes parásitas. A lo largo del capítulo, se abordan primero los principios básicos de la modulación PWM y las diversas formas en que se puede generar esta señal, esenciales para el control preciso de la potencia aplicada a los sistemas, además, del desarrollo de un circuito de control que pueda generar una señal PWM hasta el proceso de manufactura.

### 2.1 Modulación por ancho de pulso (PWM)

Los dinamómetros mencionados no contaban con un control para las unidades de absorción de potencia. Por lo tanto, se desarrolló un sistema capaz de moderar la intensidad de corriente que se les entrega a estas unidades. Este sistema utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) para lograr tal objetivo.

La modulación por ancho de pulso se basa en la variación del ciclo de trabajo de una señal digital para determinar la potencia aplicada. En este contexto, la señal digital no necesita capturar datos (Wagenbach 2023).

El ciclo de trabajo en cualquier onda cuadrada es, por norma, del 50%, ya que estas señales deben ser simétricas. Por ejemplo, si tenemos dos señales de modulación por ancho de pulso (PWM) con diferentes anchos de pulso, la primera señal tiene un tiempo de activación  $T_{ON}$  que dura la mitad de un periodo  $T$ , mientras que la otra señal se activa en un cuarto de  $T$ . Esto lleva a la definición del ciclo de trabajo

$$d = \frac{T_{ON}}{T} \quad 1$$

donde  $d$  representa el ciclo de trabajo. (solectro 2020)

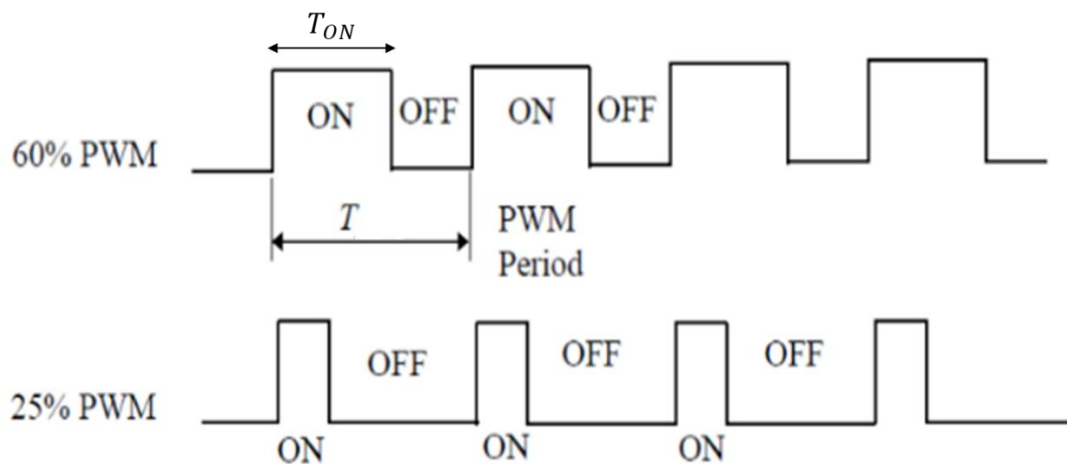


Figura 26 Comparación de dos señales de PWM con diferente ciclo de trabajo (kenio 2019)

En la Figura 26 podemos ver dos señales, con dos ciclos de trabajo distintos, donde ON es el tiempo de la señal que muestra el nivel lógico (alto) y T es el periodo de la señal.

Los usos del PWM son diversos. Por ejemplo, se considera un componente clave en los amplificadores de audio de clase D, ya que permiten aumentar los voltajes de salida del amplificador. Otra aplicación importante es el control de la velocidad de motores de corriente continua. Estos motores requieren altas corrientes para operar, y para variar su corriente con alta eficiencia se utiliza PWM. El diagrama de conexión para un control de velocidad de un motor DC es como se observa en la Figura 27 (Wagenbach 2023).

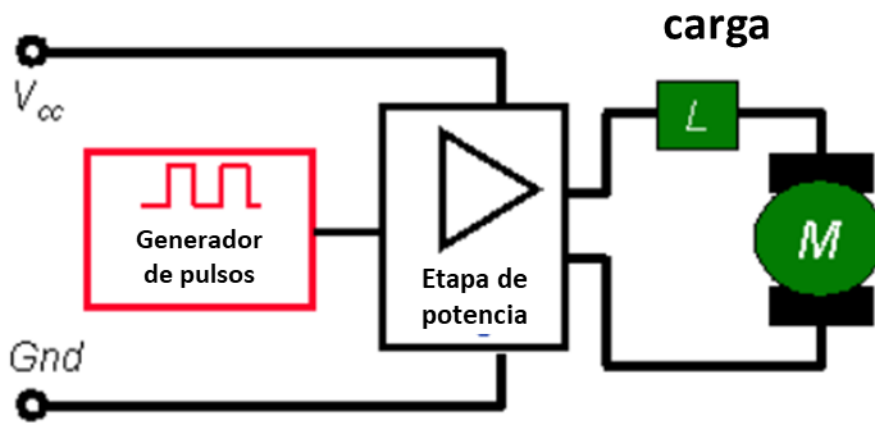


Figura 27 Diagrama de conexión de control de velocidad de un motor, con etapa de potencia (Wagenbach 2023)

## 2.2 Formas de generar PWM

### 2.2.1 Microcontroladores

Una forma común de generar señales de control PWM es mediante el uso de microcontroladores, los cuales suelen contar con módulos integrados capaces de generar estas señales de manera eficiente. Además, muchos de estos microcontroladores incluyen librerías y funciones que facilitan su programación, permitiendo a los desarrolladores implementar controles PWM sin necesidad de diseñar circuitos adicionales. En este contexto, se pueden considerar dos ejemplos populares: la tarjeta de desarrollo Arduino, que es ampliamente utilizada por su facilidad de uso y su entorno de programación accesible, y los microcontroladores PIC, conocidos por su flexibilidad y robustez, que son empleados en aplicaciones más específicas y complejas. Ambos sistemas proporcionan una forma eficiente y práctica de generar señales PWM para una variedad de aplicaciones.

Para el caso de un Arduino se genera mediante el uso de la función `analogWrite()`; la cual emula el efecto de un voltaje analógico de forma digital. Con esta función, se puede

encender un LED con distintos niveles de brillo o, como se mencionó anteriormente, variar la velocidad de un motor de corriente continua. (ARDUINO 2018)

*Tabla 7 Comparación de frecuencias de PWM en cada versión de Arduino (ARDUINO 2018)*

Versión	Salidas digitales de PWM	Frecuencia de PWM
UNO (R3y anteriores) Nano, Mini	3,5,6,9,10,11	490 Hz (pines 5 y 6 980 Hz)
UNO R4(Mínimo, Wifi)	3,4,5,6,9,10,11	490 Hz
Mega	2-13,44-46	490 Hz (pines 4 y 13 980 Hz)
GIGA R1	2-13	500 Hz
Leonardo, Micro, Yún	3,5,6,9,10,11,13	490 Hz (pines 3 y 11 980 Hz)
UNO WiFi Rev2, Nano	3, 5, 6, 9, 10	976 Hz
Placas MKR	0-8,10, A3, A4	732 Hz
WiFi MKR1000	0-8,10,11, A3, A4	732 Hz
Zero	3-13, A0, A1	732 Hz
Nano 33 IoT	2,3,5,6,9-12, A2, A3, A5	732 Hz
Nano 33 BLE/BLE sense	1-13, A0- A7	500 Hz
Due	2-13	1000 Hz
101	3, 5, 6, 9	3,9; 490 Hz 5, 6 980 Hz

Otro ejemplo de microcontrolador es el PIC, que permite generar una señal PWM como uno de los tres modos posibles de operación del módulo CCP (Captura, Comparación, PWM) como se puede observar en la Tabla 7, ya que es importante conocer la frecuencia de la señal que puede generar y su vez en que pines de salida se pueden obtener. El módulo CCP es un periférico que le permite medir para así programar una señal PWM con una resolución de hasta 10 bits, lo que permite 1024 configuraciones distintas de ciclos de trabajo. (TECmikro 2024).

*Tabla 8 Modos de operación de un CCP en PIC (Henriquez 2013)*

Modo de CCP	Recurso temporizador
Captura	Timer1
Comparación	Timer1
PWM	Timer2

Uno de estos modos es la generación de PWM, donde los registros CCP1 y CCP2 trabajan con el temporizador denominado timer1, el cual es un temporizador/contador de 16 bits. Para el caso de la entrada CCP1 se encuentra multiplexado con tres funciones en puertos bidireccionales, el cual debe poner en 0 para que el CCP1 se considera como una salida (Henriquez 2013).

La salida PWM tiene un tiempo base, es decir, el periodo de la señal, pero también un tiempo donde la señal permanece en un estado ALTO, lo cual consideramos como ciclo de trabajo.

Para el periodo de la señal de PWM, se utiliza el registro  $PR2$ , como  $T_{osc}$  que es el tiempo del cristal oscilador y por último el pre-escalador del timer1  $PT1$ , el cual es un circuito que divide la frecuencia y como se ve en la siguiente ecuación (Henriquez 2013).

$$T_{PWM} = [PR2 + 1] * 4 * T_{osc} * PT1 \quad 2$$

La frecuencia del PWM es el recíproco del período  $T_{PWM}$ .

## 2.2.2 Temporizador 556

En este generador de PWM se emplea un LM556, el circuito integrado es un temporizador de precisión que puede operar en modo astable y monoestable, en la configuración de este temporizador es en modo Astable, este modo es una forma de salida de señal rectangular con una frecuencia específica (analog devices 2020). El temporizador 556 es un temporizador dual que contiene dos circuitos temporizadores LM555 dentro de su encapsulado, los cuales los dos temporizadores actúan de forma independiente, y lo único que comparten es la alimentación y tierra.

Algunas aplicaciones de este temporizador son la sincronización secuencial, generador de retardo de tiempo, generación de pulsos, modulación de posición de pulso, generador de rampa lineal y la modulación por ancho de pulso (NATIONAL SEMICONDUCTOR 2000).

La forma en que se puede obtener es en agregar dos diodos de conmutación para poder restringir el semiciclo positivo y negativo en la carga y descarga del capacitor.

El cálculo de la frecuencia es por medio de la fórmula:

$$f = 1/(1.44 * R * C) \quad 3$$

Donde R es el valor de la resistencia ajustable mediante un potenciómetro de cualquier valor, y C es la capacitancia necesaria para obtener la frecuencia deseada. Es importante considerar que los valores de R y C deben corresponder a valores comerciales disponibles en el mercado, los cuales presentan una tolerancia especificada por el fabricante (Electgpl 2013).

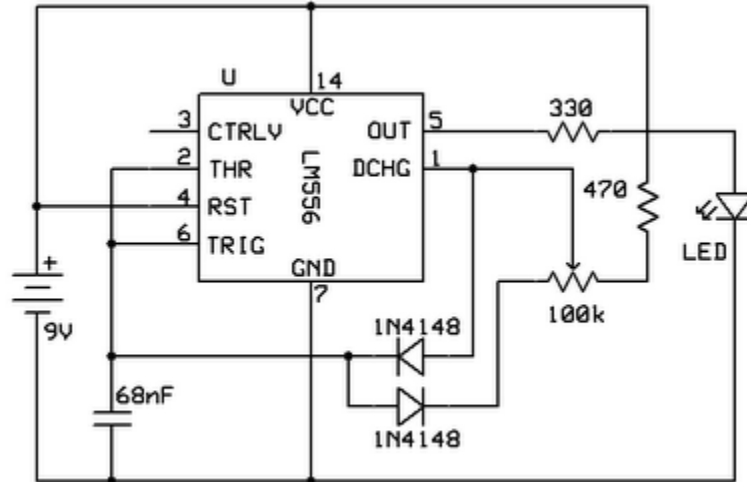


Figura 28 Diagrama de conexión de un LM556 en modo generador PWM (Electgpl 2013)

Los componentes necesarios para poder generar el PWM en el LM556 son mostrados en la Figura 28, posteriormente se utiliza un circuito de potencia que es controlado por un MOSFET IRFZ44 como se observa en la Figura 29.

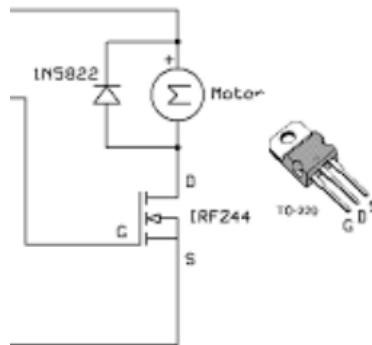


Figura 29 Diagrama de conexión del circuito de potencia controlado por un MOSFET (Electgpl 2013)

### 2.2.3 TL494

En el caso del integrado TL494 es circuito de control de PWM, que está diseñado principalmente para el control de una fuente de alimentación. Este dispositivo tiene la versatilidad para poder ser adaptado a un circuito diferente (TEXAS INSTRUMENTS 2022).

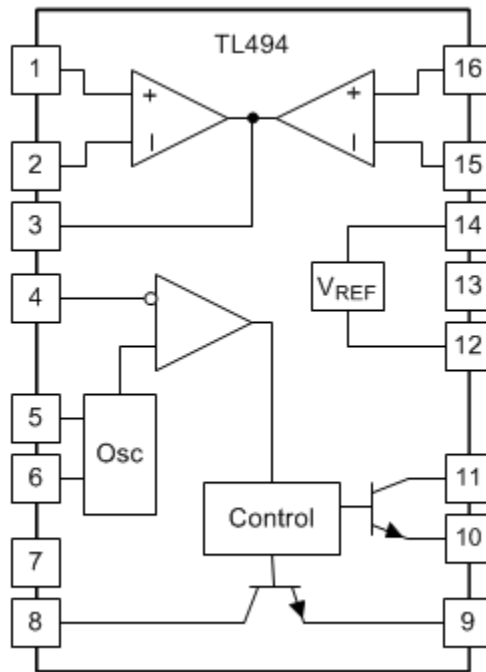


Figura 30 Diagrama interno del encapsulado TL494 (TEXAS INSTRUMENTS 2022)

El circuito integrado mostrado en la Figura 30 incorpora un oscilador (OSC), un comparador para variar el ancho de pulso y dos amplificadores operacionales para su monitorización. Además, incluye una fuente regulada de 5 V, lo que permite diversas aplicaciones gracias a su diseño integral para el control de fuentes. Este circuito se utiliza en dispositivos como hornos de microondas, fuentes de alimentación, microinversores solares, lavadoras y bicicletas eléctricas, entre otros.

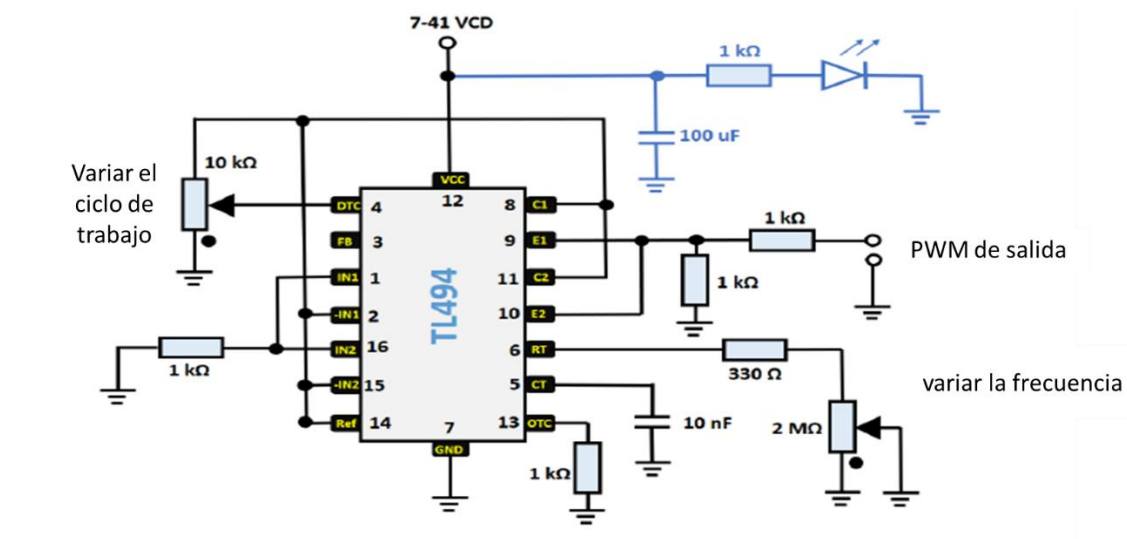


Figura 31 Diagrama de conexión de TL494 para generar una señal PWM con frecuencia variable (circuit 2022)

El circuito presentado en la Figura 31 permite variar de frecuencia en un rango de 100 Hz a 100 kHz mediante el uso de un potenciómetro. Además, dependiendo de la aplicación, es posible ajustar los componentes utilizados, lo que ofrece una gran flexibilidad para diversas configuraciones.

## **2.3 Diseño de circuito (PWM)**

Para generar una señal PWM con amplificadores operacionales, se debe seleccionar primero el amplificador adecuado. Una vez elegido, se comienza a diseñar el circuito utilizando los componentes necesarios según el tipo de tarea que tendrá la señal de PWM que se empleará. El circuito desarrollado consta de dos secciones: una de control y otra de potencia.

La sección de potencia incluye un transformador que se alimenta de la red eléctrica, por lo que tiene una frecuencia de 120 Hz. Debido a lo anterior, el circuito de control debe operar con múltiplos de esta frecuencia, tomando la señal de la red eléctrica como referencia. En el presente trabajo, el objetivo es controlar una PAU de corrientes parásitas de los dinamómetros disponibles en el laboratorio UNICE.

### **2.3.1 Fabricación del control para frenos de corrientes parásitas del laboratorio de emisiones (UNICE)**

Como se vio previamente, existen varias formas de generar una señal PWM, existen ventajas y desventajas en cada una. Por ejemplo, en el caso de los microcontroladores una de las desventajas es que se deben tener las herramientas necesarias para poder generar dicha señal y en ciertos casos pueden ser más costosos en comparación con las otras formas.

Por ello, se optó por utilizar amplificadores operacionales, los cuales suelen ser versátiles. No obstante, en el mercado existe una amplia variedad de estos dispositivos, cada uno con características de operación específicas que se adaptan a distintas aplicaciones.

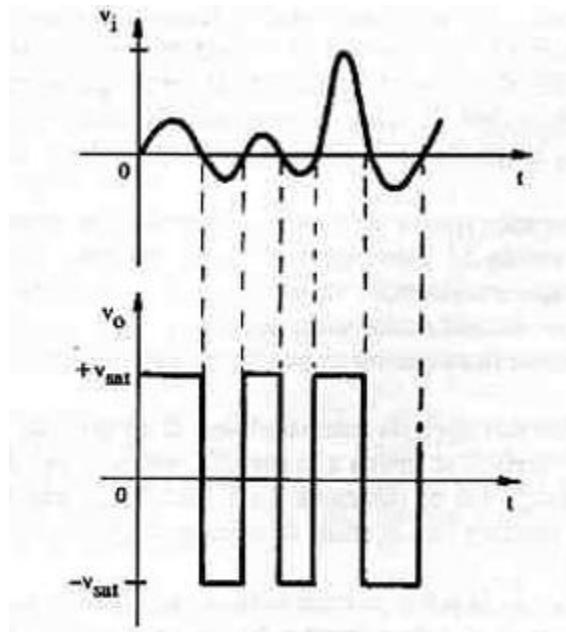
El laboratorio de control de emisiones UNICE dispone de un sistema de control de frenos de corrientes parásitas, así como de diferentes frenos de este tipo previamente mencionados en cada dinamómetro. Dicho sistema sirvió como base para el diseño de la unidad de control de freno. Este circuito se compone de cinco etapas distintas:

- Etapas de comparador cruce por cero
- Etapas de rampa lineal
- Etapas de comparación
- Etapas de visualización
- Etapas de potencia

### 2.3.1.1 Etapa de comparador de cruce por cero

En esta primera etapa se debe conocer los circuitos comparadores, esto surge de la necesidad de comparar dos señales entre sí, la cual consiste en determinar cuál de las dos señales es mayor, donde estas señales una es utilizada como referencia la que es fija.

Existen dos tipos de comparadores: el inversor y el no inversor. La salida de estos comparadores consiste en impulsos discretos que dependen de la señal aplicada. En este primer comparador, la señal de referencia se aplica a la entrada inversora del amplificador operacional, y la señal variable que se va a comparar entra por la entrada no inversora. Cabe destacar que el comparador generalmente se encuentra en un valor alto (saturación positiva) o en un valor bajo (saturación negativa). No obstante, existen formas de ajustar los límites de salida para evitar la saturación (Junior 2008).



*Figura 32 Señal de salida de circuito comparador de cruce por cero (Junior 2008)*

Como se observa en la Figura 32, cuando la señal de referencia se aplica a la entrada inversora, que está conectada a tierra, y la señal de comparación entra por la entrada no inversora, la señal de salida cambia de estado cada vez que la señal de comparación cruza por cero y vuelve a hacerlo en el siguiente cruce por cero.

El segundo tipo de comparador es el inversor, lo que significa que la señal de referencia se conecta a la entrada no inversora, mientras que la señal que se desea comparar se conecta a la entrada inversora.

Para este módulo de control, se decidió comparar la señal con otra que no está referenciada a tierra o a cero. La señal de referencia se conecta a la entrada no inversora, mientras que



la señal de comparación se conecta a la entrada inversora, permitiendo así obtener una señal de cruce por cero, la cual es esencial para esta aplicación (Junior 2008).

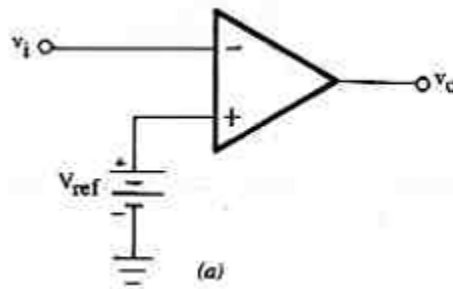


Figura 33 Conexión de referencia para la primera etapa (Junior 2008)

En el comparador mostrado en la Figura 33, la señal de comparación se conecta a la entrada inversora, mientras que la señal de referencia es un voltaje definido. Para un comparador de cruce por cero, esta señal de referencia debería estar conectada a tierra.

Para realizar la comparación, la señal debe ser variable en voltaje, permitiendo que se evalúen los cruces con la señal de referencia, la cual, en este caso, será un voltaje DC ajustable. Esto permite que la señal de referencia se modifique para lograr el ajuste deseado en el sistema.

La señal de entrada proviene de la red eléctrica, pero dado que el voltaje AC de la red es demasiado elevado (127 V AC), se reduce mediante un transformador, reduciendo el voltaje a 12 V AC sin alterar su naturaleza senoidal, como se observa en la Figura 34, conservando así la forma de la señal original.

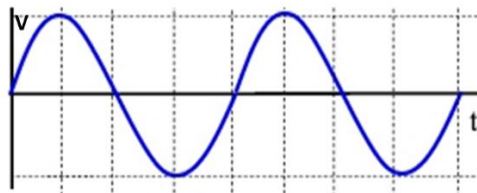


Figura 34 Señal de la red eléctrica

La señal reducida tiene una frecuencia de 60 Hz, la cual debe rectificarse para obtener solo valores positivos de voltaje. Esto implica que se deben generar dos señales senoidales con diferente fase; por ello, es necesario que el transformador incluya una derivación central, como se aprecia en la Figura 35.

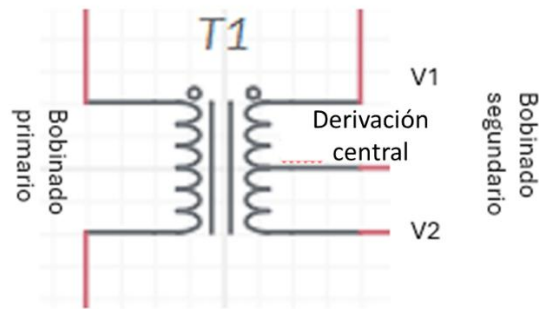


Figura 35 Diagrama de transformador con derivación de derivación central

Según la Figura 35, la bobina primaria está conectada a la red eléctrica. La bobina secundaria cuenta con dos salidas de voltaje, cuyos valores específicos de voltaje pueden variar según el fabricante. Es importante señalar que estos voltajes se miden entre una salida y la derivación central, el cual debe estar conectado a la tierra del circuito.

Para el caso de estudio, se sabe que el voltaje del bobinado secundario es de 24 V. Dado que existe una derivación central, el voltaje total se divide en dos partes iguales, siempre y cuando la derivación central se ubique en el punto medio exacto del bobinado obteniendo voltajes iguales de  $V1$  y  $V2$ , como se representa en la fórmula siguiente:

$$V2 = V1 = \frac{V_{\text{secundario}}}{2} \quad 4$$

Así mismo, ambos voltajes tienen una señal senoidal, pero cada uno cuenta con una fase diferente.

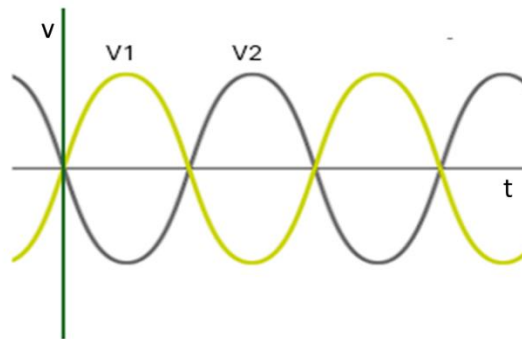
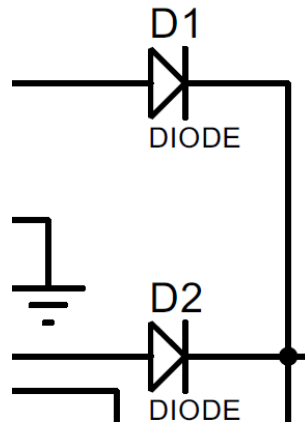


Figura 36 Diagrama de señales de voltajes de salida de un transformador con derivación central, donde las señales se encuentran desfasadas 180°

Como se puede observar en la Figura 36, las señales senoidales de salida del transformador están desfasadas 180°. Dado que se necesita una sola señal positiva, es

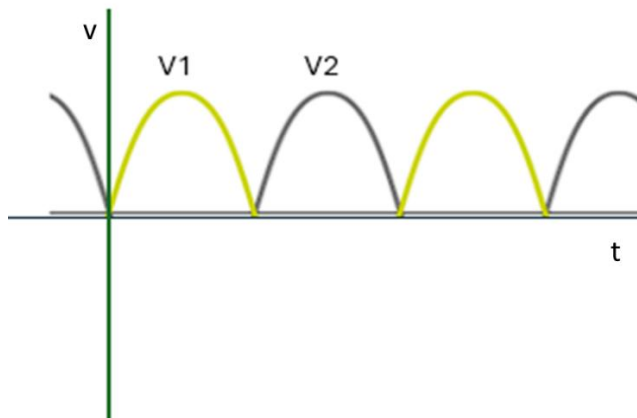
necesario rectificar estas dos señales solo en su ciclo positivo, lo cual se hace con un puente de diodos.

Un diodo es un dispositivo semiconductor que actúa como un interruptor unidireccional para la corriente. Esto significa que la corriente puede fluir en una sola dirección, impidiendo su paso en el sentido opuesto. Para obtener un ciclo positivo de cada señal de salida del transformador, se requieren dos diodos: uno para cada salida de voltaje (FLUKE s.f.).



*Figura 37 Diagrama de conexión de diodos al transformador*

Podemos observar en la Figura 37 las conexiones de cada salida de voltaje del transformador. Después de cada diodo, las salidas se conectan a un mismo punto, ya que, como se mencionó, necesitamos una sola señal para utilizarla en el comparador.



*Figura 38 Única señal conformada por los dos semiciclos positivos de las señales del transformador*

En la Figura 38, se presentan las dos señales combinadas con el propósito de generar una única señal, que se conectará a la entrada inversora del comparador. La señal de referencia se obtendrá a través de un divisor de voltaje, para lo cual es imprescindible el uso de un potenciómetro.

Un potenciómetro se define como un resistor eléctrico con resistencia variable, la cual puede ajustarse manualmente. Este dispositivo cuenta con tres terminales: la terminal 1 se conecta a la fuente de voltaje ( $V_{cc}$ ), la terminal 3 se conecta a tierra (GND), y la terminal 2 actúa como la salida del potenciómetro, tal como se ilustra en la Figura 39 (UAEH s.f.).

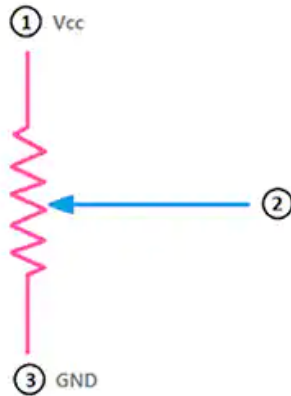


Figura 39 Diagrama eléctrico de un potenciómetro (Schweber 2021)

Se seleccionó un trimpot de 10 k $\Omega$  como divisor de voltaje, debido a que los trimpots tienen un tamaño menor y una mayor precisión en comparación con los potenciómetros convencionales. La terminal número 1 debe conectarse al voltaje de alimentación, que en este caso es de 12 V, mientras que la terminal número 3 debe conectarse a la tierra del sistema, correspondiente a la unidad de control. Por consiguiente, la terminal 2 que se trata de la central debe ir conectada a la entrada no inversora del comparador.

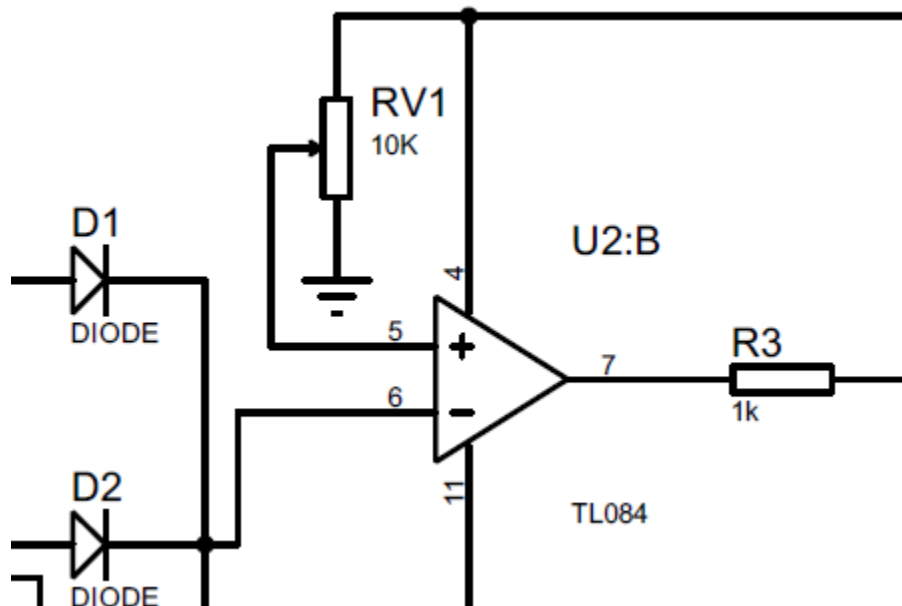


Figura 40 Diagrama de conexión de circuito comparador de cruce por cero

Como se observa en la Figura 40, se eligió el amplificador operacional TL084 debido a que, dentro de su encapsulado, cuenta con cuatro amplificadores operacionales. Además, es de

bajo costo y fácil de conseguir para su reemplazo. Sin embargo, este amplificador requiere una fuente de alimentación simétrica, lo que significa que debe contar con un voltaje tanto positivo como negativo. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, su voltaje de alimentación es de  $\pm 12$  V.

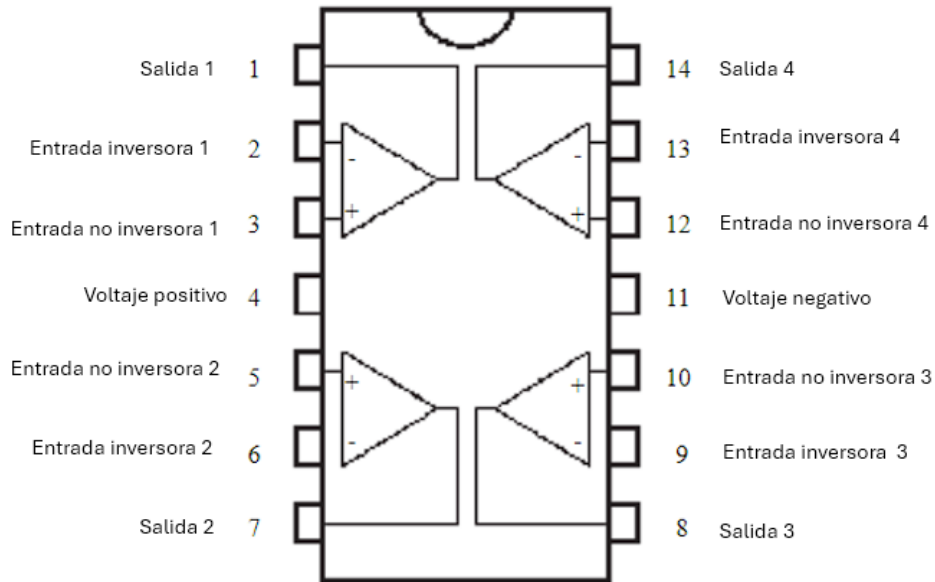


Figura 41 Pines de conexiones del amplificador TL084 (ST s.f.)

En la Figura 41 se ilustra la distribución de los amplificadores operacionales dentro del encapsulado, así como las conexiones correspondientes de cada amplificador.

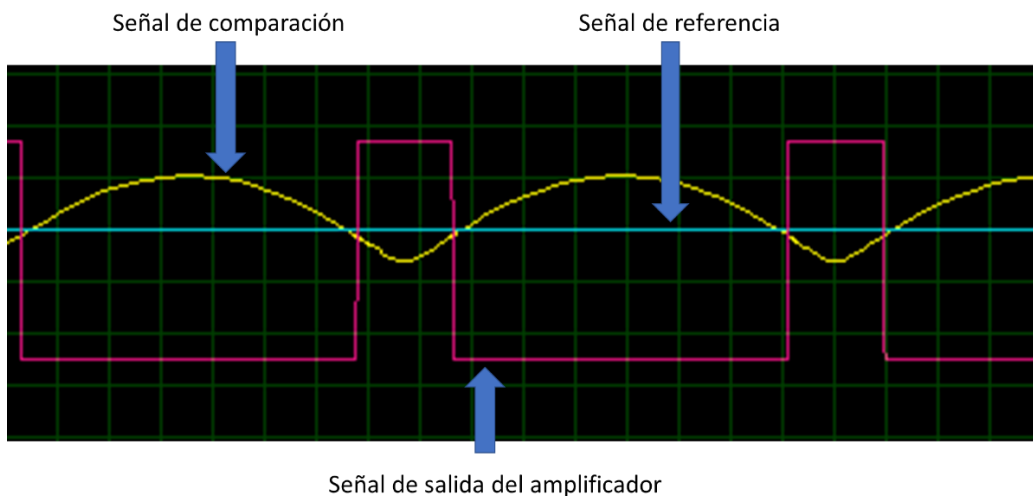


Figura 42 Plano de comparación de señales de un comparador

En la Figura 42, se pueden observar las dos señales de entrada (referencia en azul y comparación en amarillo) y la de salida. En este caso, la señal de referencia se establecerá

como nuestro punto de referencia cero, lo que permitirá comparar dicha señal con la señal rectificadora obtenida a partir de los diodos.

Es fundamental contar con una señal que presente pulsos delgados, ya que esto facilitará la obtención de la siguiente señal, la cual será un diente de sierra o rampa lineal. Esta configuración es esencial para el correcto funcionamiento del sistema de comparación y control.

### 2.3.1.2 Etapa de rampa lineal

Para generar la señal de dientes de sierra, es necesario emplear un circuito integrador, que constituye una de las aplicaciones más comunes de los amplificadores operacionales y es ampliamente utilizado en la práctica, como se observa en la Figura 43.

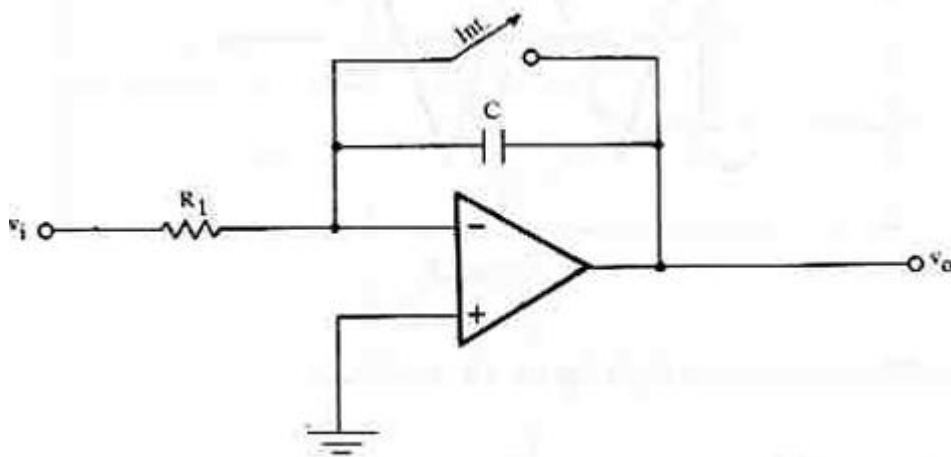


Figura 43 Circuito integrador con amplificador operacional (Junior 2008)

El sistema incluye varios componentes, como un capacitor, una resistencia y un interruptor. La función principal del capacitor es generar una rampa de voltaje durante el proceso de carga. El interruptor está conectado en paralelo al capacitor, permitiendo la descarga de este. Sin embargo, después de la descarga, el interruptor debe permanecer abierto para iniciar el proceso de integración. Esto asegura que el capacitor pueda cargar adecuadamente y proporcionar la señal deseada para el funcionamiento del circuito. (Junior 2008)

Cuando se aplica una señal de entrada cuadrada, se genera una señal de salida triangular. Para simular el funcionamiento del interruptor, se utilizará un transistor BC547, que pertenece a la familia de transistores bipolares de unión (BJT). El diagrama de conexión del transistor se presenta en la Figura 44. Este transistor permitirá controlar el flujo de corriente en el circuito, facilitando el proceso de carga y descarga del capacitor según sea necesario para obtener la señal deseada (MOUSER ELECTRONICS 2024).

Los transistores están compuestos por tres elementos: la base, el colector y el emisor. La base actúa como el punto de control entre el emisor, donde entra la corriente, y el colector, por donde sale. Al aplicar una corriente mínima de excitación en la base, el transistor se activa, permitiendo así el paso de la corriente máxima entre el emisor y el colector. Si no se

suministra esta corriente mínima, el transistor permanecerá en su estado de corte, impidiendo el flujo de corriente entre el emisor y el colector (Euipto editorial Etece 2021).

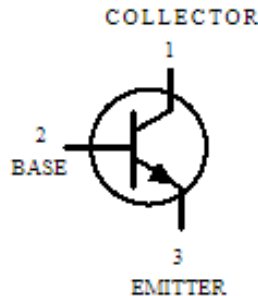


Figura 44 Diagrama de conectores del transistor BC547 (MOUSER ELECTRONICS 2024)

Los transistores surgieron de la necesidad de controlar el flujo de corriente en diversas aplicaciones. Funcionan como dispositivos que pueden amplificar señales, transformando una señal de baja potencia en una señal de mayor potencia, o bien, actuar como interruptores. En su estado de saturación, los transistores permiten el paso de la corriente máxima, lo que los convierte en componentes esenciales en circuitos electrónicos para el control eficiente de la corriente. (Euipto editorial Etece 2021).

Este circuito constituye una variante de un integrador común, conservando el mismo principio de funcionamiento. En este contexto, la señal de salida de la etapa anterior se emplea como señal de excitación para el transistor, tal como se muestra en la Figura 45.

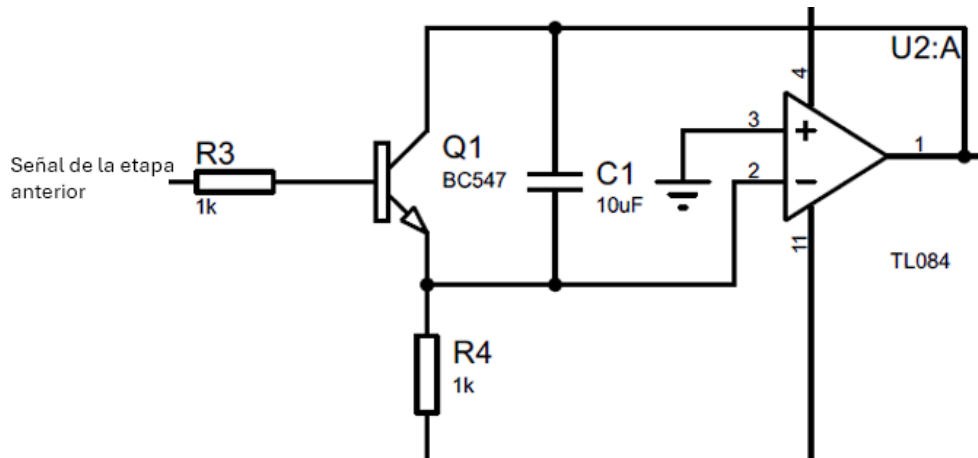


Figura 45 Diagrama de conexión de etapa de generación de señal de rampa lineal

La fórmula que se describe a un circuito integrador común es:

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^1 V_i dt$$

5

Donde  $V_o$  es el voltaje de salida del amplificador,  $R$  es la resistencia en la entrada del amplificador,  $C$  es el capacitor y  $V_i$  representa el voltaje de entrada del circuito integrador. Según la fórmula, el valor de salida es negativo; por lo tanto, se opta por una señal de entrada de valor negativo para obtener una señal de salida con voltaje positivo. Asimismo, es fundamental polarizar correctamente al capacitor, ya que se eligió un capacitor electrolítico.

Como se mencionó, la etapa anterior genera pulsos de salida, estos pueden ser regulados en su anchura, la cual es equivalente al tiempo que permanecerá en corto el transistor.

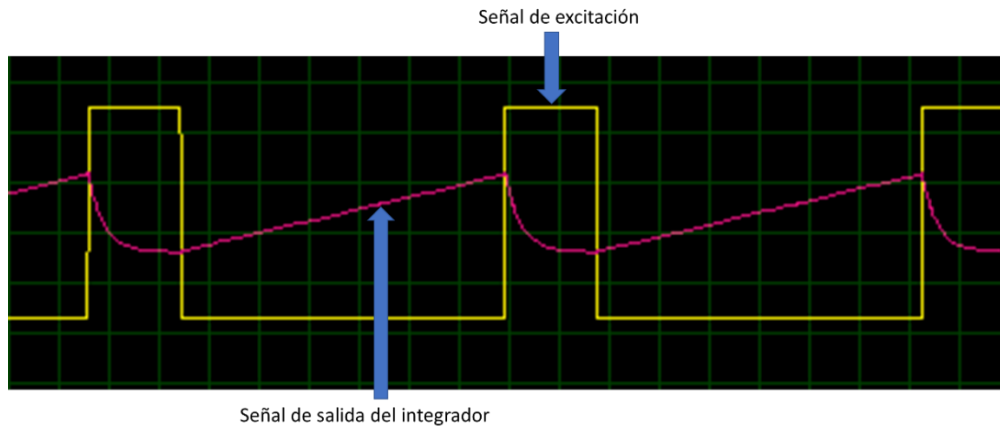


Figura 46 Comparación de señales entre la salida del integrador y la de excitación del transistor

En la Figura 46 se observa la señal de salida del integrador que el capacitor se carga cuando no se aplica un pulso al transistor BC547. En el instante en que se envía un pulso al transistor, el capacitor se pone en cortocircuito y comienza a descargarse hasta que finaliza el pulso de la señal de excitación, donde la dos señales se traslapan. Una vez concluido el pulso, el capacitor vuelve a iniciar su proceso de carga.

Al variar la anchura de los pulsos, se puede observar en la Figura 47 que el capacitor no alcanza a cargarse al voltaje total y permanece en cortocircuito por un período de tiempo más prolongado antes de iniciar nuevamente su proceso de carga.

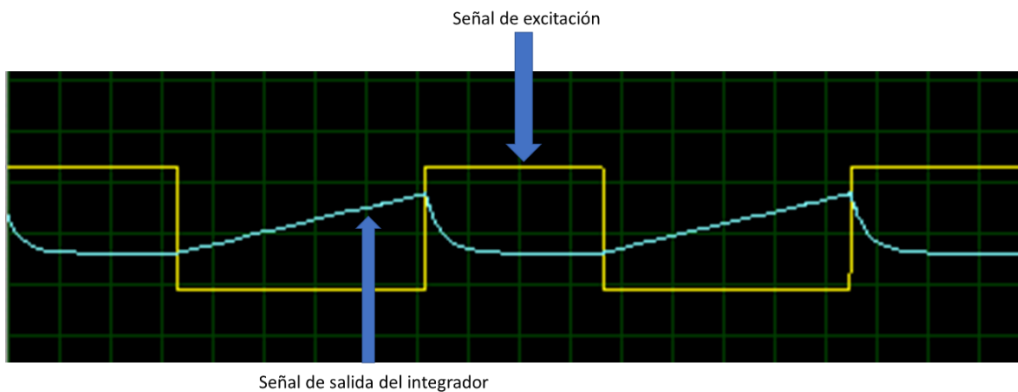


Figura 47 Comparación de señales con pulsos de diferente ciclo de trabajo de la señal de excitación



Para lograr un rango de operación más amplio, es necesario contar con una rampa lineal de mayor duración. Esto implica que los pulsos deben ser más delgados, de manera que no alcancen el voltaje máximo de carga del capacitor.

### 2.3.1.3 Etapa de comparación

Como última etapa para generar la señal PWM, se utiliza un comparador que compara la señal de rampa lineal con una señal de voltaje variable. En este caso, la señal de referencia será un voltaje variable en amplitud, mientras que la señal de entrada será la señal de salida del integrador, tal como se muestra en la Figura 48.

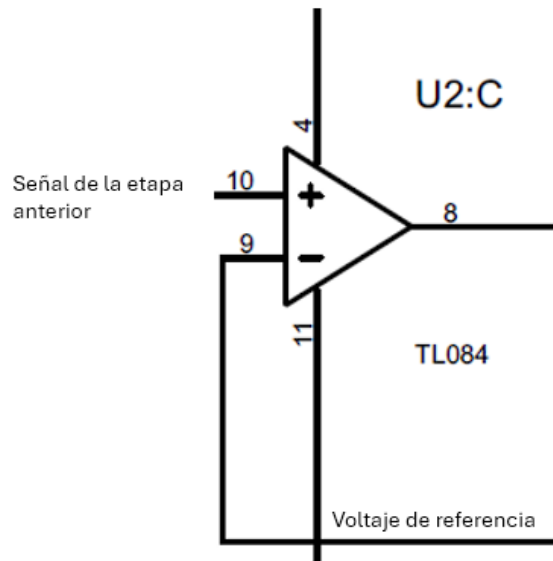


Figura 48 Diagrama de conexión de comparador TL084

Con estas dos señales se puede obtener la señal de modulación de ancho de pulso (PWM), la señal se obtiene comparando la señal de la etapa anterior con un voltaje variable (voltaje de referencia). En la Figura 49 se observa la comparación de las dos señales de entrada, lo cual permite la generación de la señal PWM.

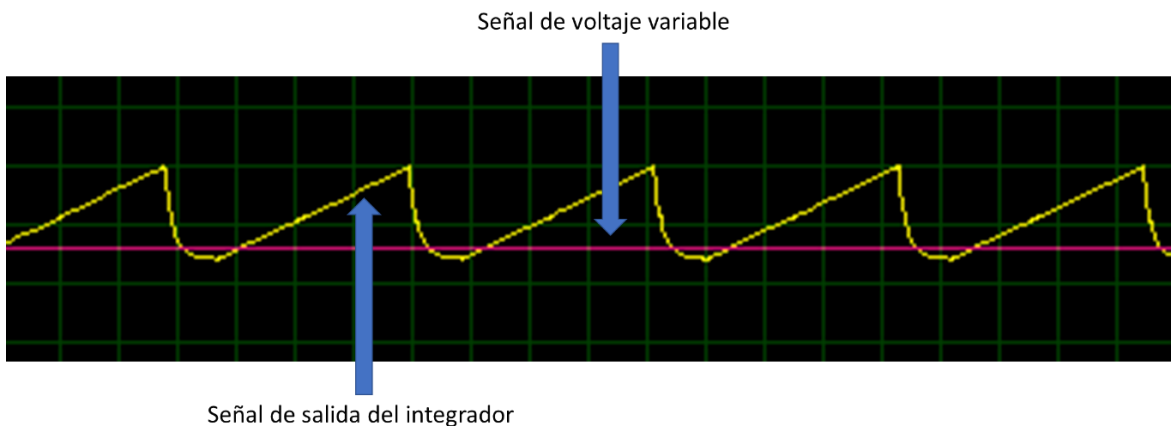
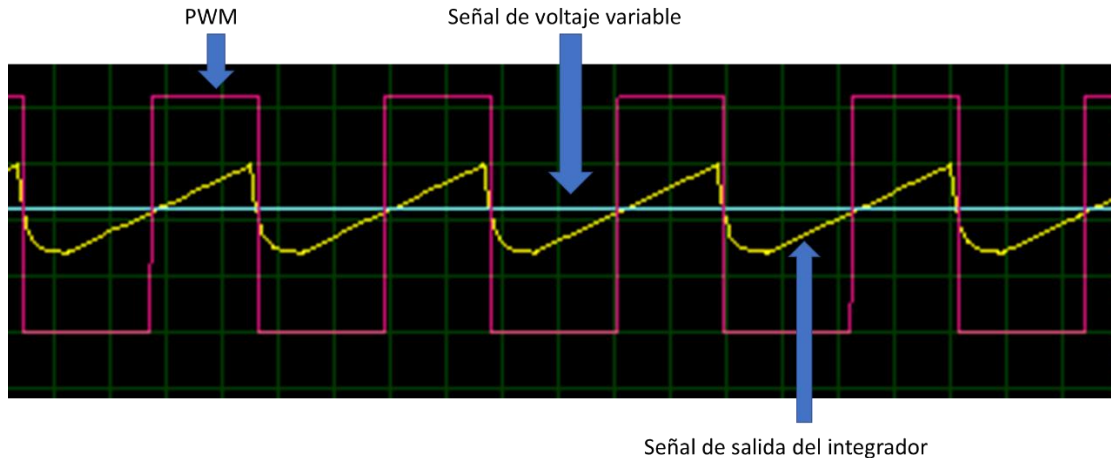
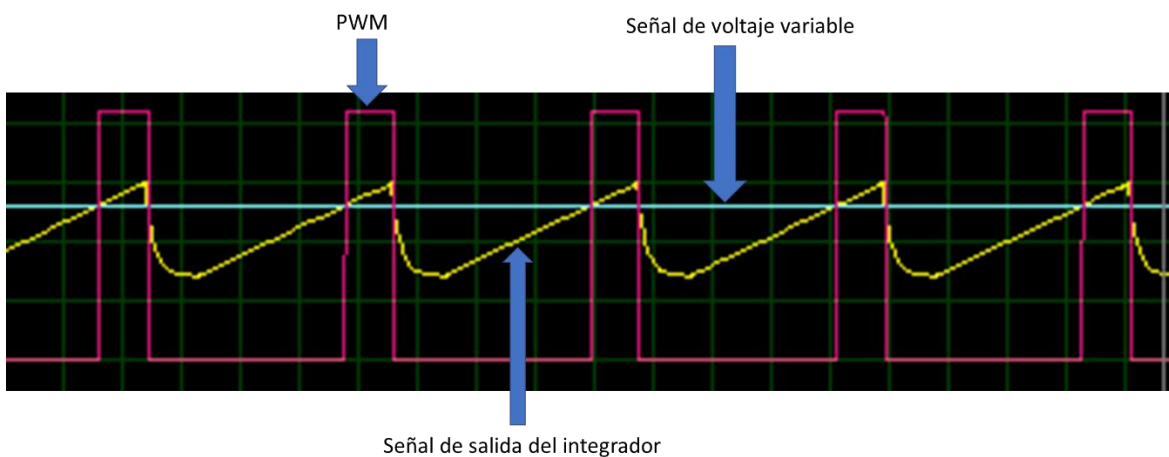


Figura 49 Comparación de señales de voltaje de referencia y la señal del integrador



*Figura 50 PWM con un ciclo de trabajo mayor al 40%*



*Figura 51 PWM con un ciclo de trabajo de 30%*

En las Figuras 50 y 51 se puede observar cómo, al variar la señal de voltaje variable y compararla con la señal del integrador, se genera un pulso en el momento en que ambas señales se interceptan y se termina cuando vuelven a interceptarse. De esta manera, se obtiene una señal PWM precisa y ajustable según las necesidades de cada caso.

Para obtener la señal de referencia, se consideran diferentes opciones. Una de ellas es la posibilidad de controlarla de forma manual mediante una perilla de precisión, dado que los potenciómetros utilizados cuentan con un número de vueltas mayor en comparación con uno convencional, que generalmente solo tiene una vuelta.

Otra opción consiste en controlar la señal de referencia a través de una computadora, utilizando un DAC (convertidor digital analógico). Una solución para permitir el control mediante estas dos modalidades es la inclusión de un interruptor, que se encargará de seleccionar la fuente de accionamiento del control, como se muestra en la Figura 52.

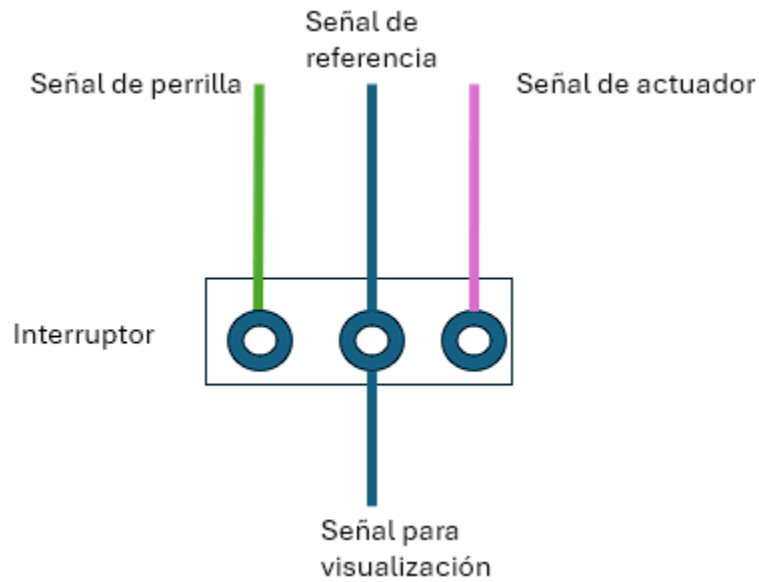


Figura 52 Diagrama de conexión de interruptor, el cual se muestra los tres pines del interruptor con las conexiones a cada una de las señales

La señal deberá enviarse a la etapa de visualización para su interpretación y para mostrar el porcentaje de freno aplicado. Dado que cada freno tiene un intervalo de trabajo específico, es necesario contar con una parte ajustable que permita definir el momento de accionamiento para que dicha unidad comience a operar.

Se utilizó un arreglo de divisor de voltaje con un diodo Zener; el circuito mostrado en la Figura 53 permite emplearlo como regulador de voltaje, lo que facilita la estabilización del voltaje necesario para su funcionamiento.

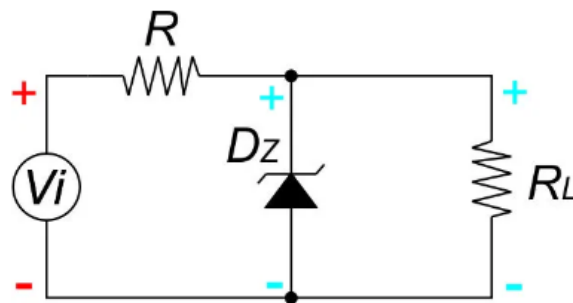
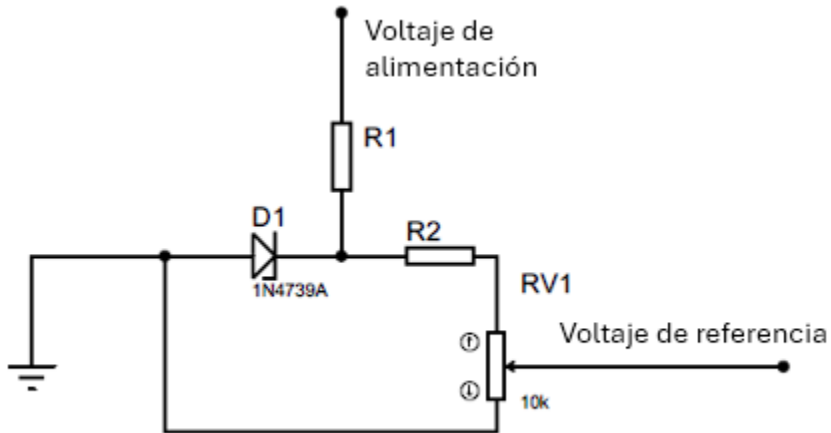


Figura 53 Diagrama de conexión de diodo Zener como regulador de voltaje (Chala 2020)

En este caso,  $R_L$  se refiere a una resistencia variable que permite ajustar con mayor precisión la salida de voltaje dirigida a la última etapa de comparación de la señal PWM.



*Figura 54 Conexiones del arreglo para el ajuste de accionamiento*

La Figura 54 ilustra el acondicionamiento del circuito, permitiendo ajustar la señal de referencia para cada PAU del laboratorio. Esto significa que, en el momento en que se desee accionar el freno, este actuará de inmediato para cada PAU. El circuito de acondicionamiento tiene como función principal limitar el voltaje a un intervalo de trabajo específico requerido por cada una de las unidades de absorción de potencia, ya que cada freno cuenta con un inicio de trabajo, esto quiere decir que tienen diferente rango de excitación.

### **2.3.1.4 Etapa de visualización**

Para visualizar el porcentaje de carga aplicada en cada freno, se utiliza un microcontrolador PIC16F877A, el cual cuenta con un convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits (S. C. Giraldo 2015).

Una señal analógica presenta valores que varían continuamente con el tiempo, a diferencia de una señal digital, que muestra valores discretos en cada punto de muestreo. Con el microcontrolador, se realiza una aproximación digital de la señal analógica; en el caso del circuito, la señal analógica variable es la del potenciómetro en la última etapa del circuito de control.

La resolución de la señal digital depende del microcontrolador utilizado. En el caso del microcontrolador PIC16F877A, que admite una entrada analógica entre 0 V y 5 V, la conversión numérica digital varía desde 0 hasta 1023 para voltajes entre 0 y 5 V, respectivamente (S. C. Giraldo 2015).

Estableciendo el voltaje de referencia en 5 V se puede obtener la resolución del microcontrolador PIC por medio de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{V_{ref} - T_{GND}}{1024}$$

6

Donde  $R$  es la resolución de la señal,  $T_{GND}$  es la tierra y  $V_{ref}$  es el voltaje de referencia.

Es necesario considerar que, por defecto, el microcontrolador PIC16F877A opera con 8 bits de resolución en su ADC. Por ello, se debe especificar en el código `#DEVICE ADC=10` para configurar el ADC con una resolución de 10 bits. Además, es fundamental configurar los pines del ADC como entradas analógicas y seleccionar el tiempo del reloj para convertir el voltaje analógico de entrada a su valor digital correspondiente (S. C. Giraldo 2015).

Una vez configuradas las entradas y salidas del microcontrolador, se escribe el código. En este caso, el microcontrolador debe realizar una interpolación para obtener el valor digital de la señal analógica de entrada el cual representa un valor proporcional a la señal de entrada, la interpolación se obtiene por medio de los valores superiores que en este caso el valor superior corresponde a 5 v y su respectivo valor digital es de 1023, posteriormente el valor inferior que corresponde a 0 v y su valor digital de 0, posteriormente se quiere saber el valor intermedio que corresponde a 2.5 v y con la interpolación podemos obtener su valor digital, y por último se envía el valor digital a una pantalla LCD mediante comunicación I2C. En la pantalla se muestran tanto el valor digital (en el rango de 0 a 1023) como el porcentaje de freno aplicado.

### 2.3.1.5 Etapa de potencia

Dado que el módulo de control no cuenta con la corriente suficiente para alimentar al freno por corrientes parásitas, es necesario implementar un conjunto de componentes para realizar esta función. Este conjunto incluye un relevador de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés), el cual es un interruptor eléctrico utilizado para conmutar entre los estados abierto y cerrado.

Los relevadores de estado sólido cambian de estado cuando se aplica un voltaje externo en el lado de entrada, el cual puede ser positivo o negativo según las especificaciones del fabricante. A diferencia de los contactores o relevadores electromagnéticos, los relevadores de estado sólido no contienen partes mecánicas móviles (Tei 2010).

Los relevadores de estado sólido consisten internamente de un sensor luminoso que recibe la energía luminosa emitida por un LED que se enciende cuando la entrada de control del relevador está energizada, ya sea de voltaje continuo (DC) o alterno (AC), como se muestra en la Figura 55. Esta señal, conocida como señal de excitación, activa o desactiva una línea de salida del relevador, para alimentar una carga (Tei 2010).

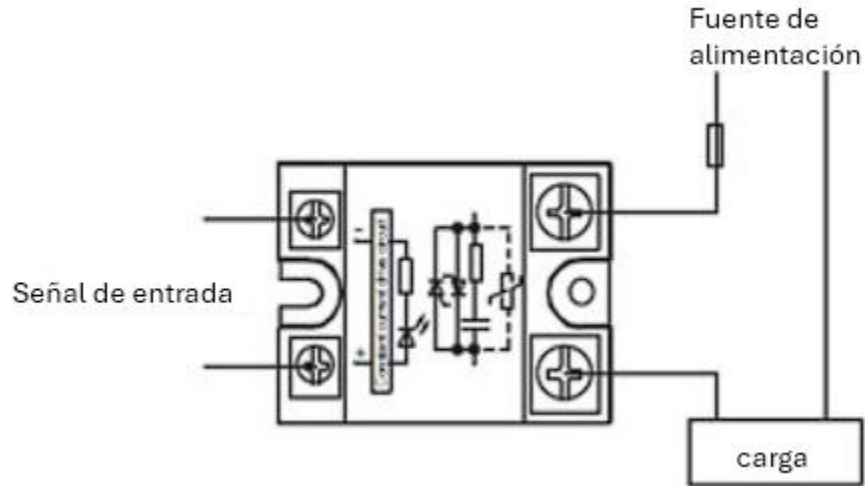


Figura 55 Diagrama de conexión de un relevador de estado sólido (Tei 2010)

Otro componente del arreglo es un transformador reductor de alta capacidad para alimentar al freno, cuya característica fundamental es que el voltaje de su bobinado secundario sea de 12 V o 24 V AC, ya que las unidades de absorción de potencia con las que se trabaja son de esa alimentación.

El último componente necesario en el arreglo es un puente de diodos, encargado de rectificar la corriente alterna y convertirla en corriente directa. Existen distintos tipos de puentes rectificadores, como el de media onda, el de onda completa con dos diodos y el de onda completa con cuatro diodos. Dado que en el laboratorio se disponía de transformadores sin toma central, se optó por utilizar un rectificador de onda completa de cuatro diodos, como se muestra en la Figura 56, para obtener una señal de corriente directa.

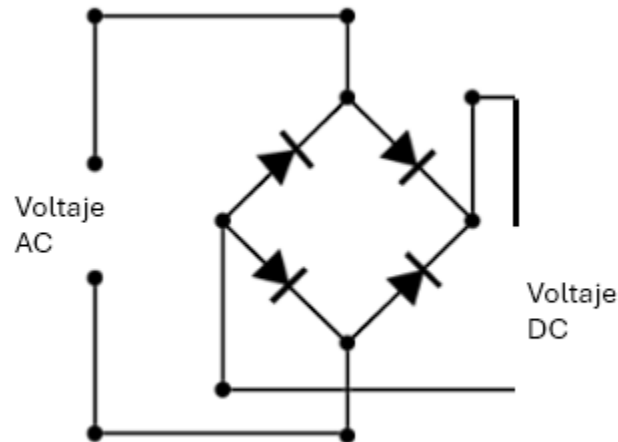
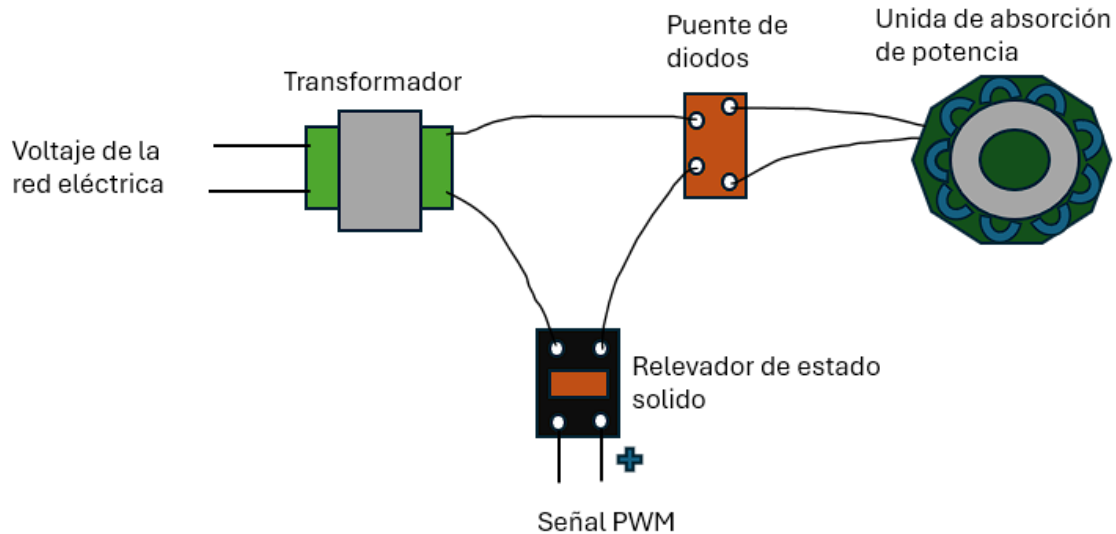


Figura 56 Conexión de puente de diodos (Sancho 2018)

Los componentes pueden variar en cuanto a sus características de funcionamiento, ya que cada dinamómetro está equipado con un freno distinto, lo que implica que cada uno requiere una corriente de excitación diferente, utilizando un transformador de potencia y un relevador de estado sólido diferentes.



*Figura 57 Diagrama de conexión de la etapa de potencia*

La Figura 57 muestra las conexiones de los componentes necesarios para la etapa de potencia. Como se mencionó, los transformadores y relevadores de estado sólido deben contar con características de operación específicas para cada dinamómetro, lo cual depende de las especificaciones del fabricante de cada freno.

### **2.3.2 Diseño en software (Proteus®)**

Cada uno de los diseños se realizaron en el software Proteus® 8.1, el cual es una herramienta que combina la captura de esquemas y el diseño de placas de circuito impreso (PCB). Esto proporciona un conjunto de herramientas que facilita el diseño electrónico. Adicionalmente, el software Proteus® permite simular los circuitos, por lo que se puede probar diseños de circuitos para evaluarlos previo a la fabricación de la PCB.

Para obtener el circuito impreso, es necesario trabajar en un software especializado en diseño de circuitos. El circuito incluye componentes que no se sueldan directamente a la placa, por lo que es importante tener en cuenta las dimensiones de los componentes fuera de la placa del circuito.

Con respecto a la placa de circuito impreso, se acomodó cada uno de los componentes de tal modo que no existan puentes entre pistas, ni zonas aisladas entre las demás pistas o islas.

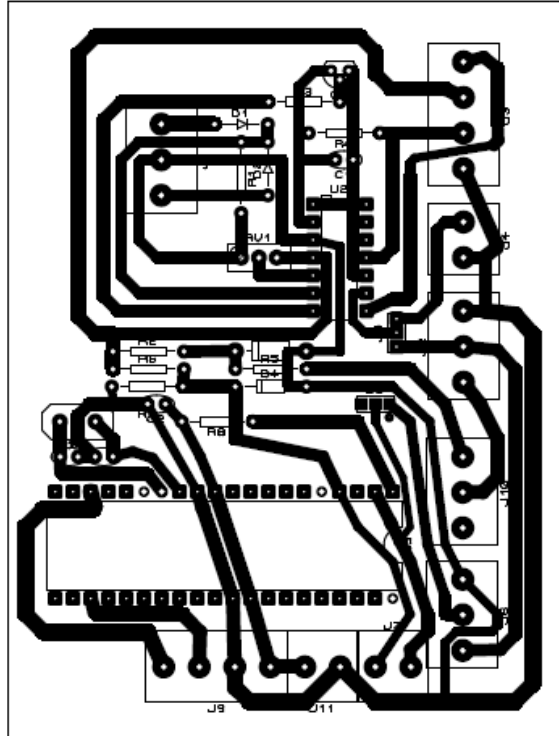


Figura 58 Diseño de circuito impreso en Proteus®

En la Figura 58 se muestra el diseño del circuito el cual incluye las etapas para poder generar la señal PWM y la etapa de visualización, cuyo objetivo es minimizar el tamaño de la PCB, con unas dimensiones de 80 mm por 105 mm, manteniendo al mismo tiempo un orden óptimo de los componentes y una disposición estética adecuada.

### 2.3.3 Fabricación de placa de circuito impreso (PCB)

El software Proteus® tiene la capacidad de exportar archivos en formato Gerber/Excellon, lo que facilita la obtención de los mapas de vectores de las pistas. Los mapas de vectores son representaciones de la información de cada una de las líneas del circuito. Para generar estos mapas de vectores, se utiliza el software FlatCAM®.

FlatCAM® permite generar el código G a partir de los mapas de vectores. El código G es un lenguaje de programación estandarizado utilizado para dar instrucciones a las máquinas de manufactura de control numérico. Cada instrucción del código G corresponde a un movimiento o acción específica de una máquina.

Una vez generado el formato Gerber/Excellon en Proteus® y abierto en FlatCAM®, es posible ajustar los parámetros de trabajo de la máquina de control numérico, como la selección de la herramienta de corte o fresa, tomando en cuenta sus características para una fabricación precisa del circuito.



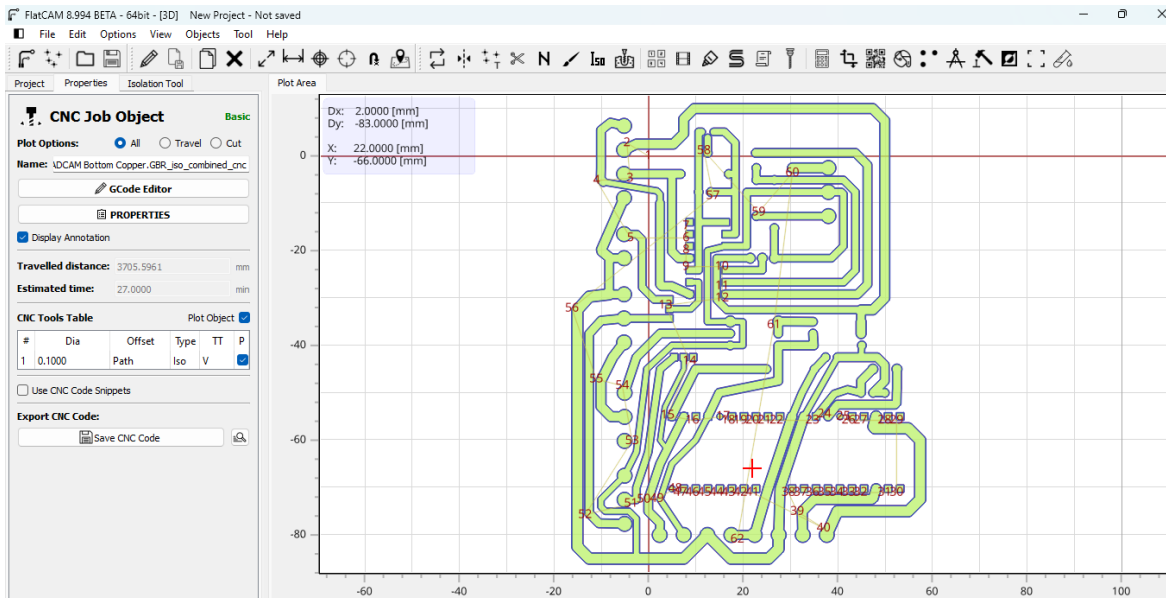


Figura 59 Software FlatCAM® mapa de corte para la CNC 3018

En la Figura 59 se aprecia el software FlatCAM® con el diseño del circuito de control. Una vez definidos los parámetros de trabajo, tales como la altura de corte, el tipo de fresa y las perforaciones para los componentes, se procede a delimitar el área de corte de la placa del circuito, como se muestra en la Figura 60.

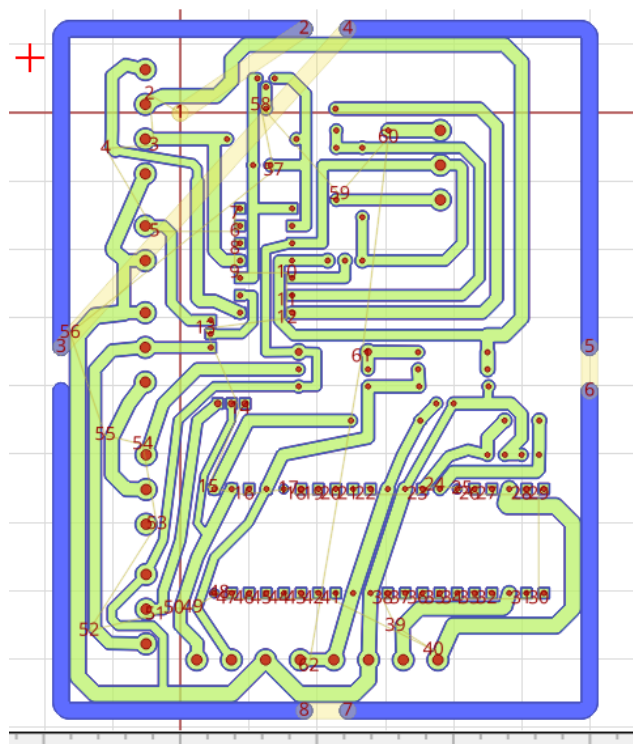


Figura 60 Mapa de corte, perforación para CNC 3018

Una vez generado el código G, la placa se maquina con ayuda del software Candle® que permite controlar la CNC por medio de un cable USB. El software Candle® permite manipular el origen o el cero máquina de la CNC, el cual es el origen de las coordenadas de la máquina, y generar un mapa de alturas. Como se puede observar en la Figura 61, se presenta un mapa de alturas que permite medir la elevación de cada área de la placa fenólica donde trabajará la fresa. Esto significa que la altura de la fresa variará de acuerdo con el mapa, lo que garantiza una profundidad de corte uniforme en toda la placa, independientemente de cualquier irregularidad en su superficie.

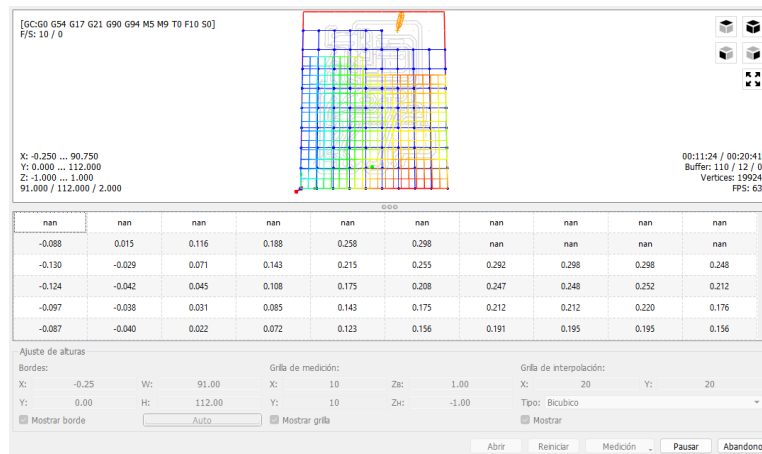
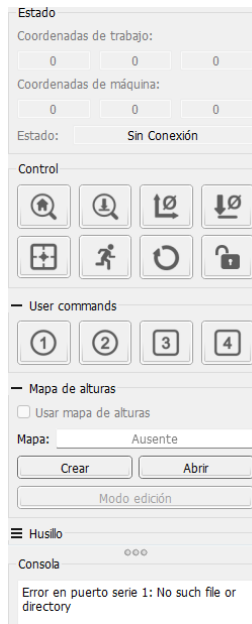


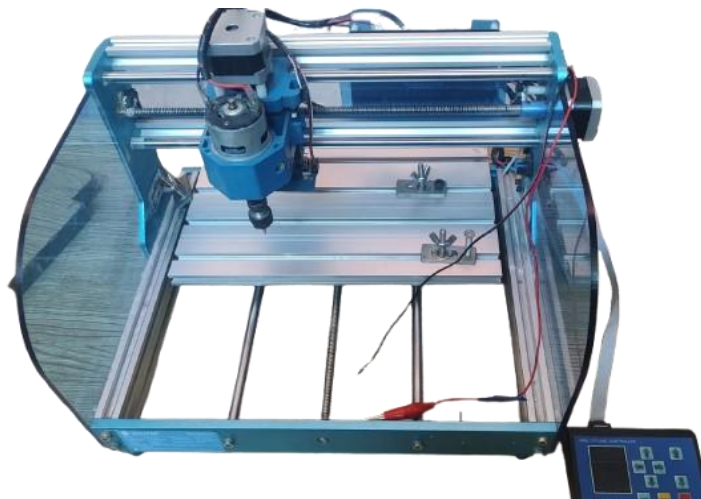
Figura 61 Mapa de alturas en CNC 3018 y software Candle®

El software ofrece diversas herramientas como poder controlar la maquina desde la computadora, guardar coordenadas específicas, así como la posibilidad de obtener la altura desde la bancada de la CNC hasta la placa fenólica, gracias a esto se puede obtener un grabado de las pistas con mayor precisión y exactitud. Además, permite observar en tiempo real la posición de la herramienta de corte y realizar pruebas de funcionamiento de cada componente de la fresadora, como se muestra en el menú de la Figura 62.



*Figura 62 Menú de manipulación del software Candle®, permitiendo manipular la velocidad del motor, guardar coordenadas y crear un mapa de alturas*

El menú del software permite guardar comandos que realicen una función, como también la posibilidad de poder regresar al cero máquina, guardar la altura y posición de la máquina. El laboratorio de investigación y control de emisiones cuenta con una CNC 3018 como se puede apreciar en la Figura 63, esta fresadora permite realizar el grabado de las pistas y también las perforaciones de los circuitos en las placas fenólicas, la CNC 3018 cuenta con tres ejes de movimiento en X, Y y Z y una zona de grabado de 284 mm de largo por 180 mm ancho y 40 mm de alto, en la cual se puede grabar en madera, acrílico, MDF, plástico, PVC entre otras.



*Figura 63 CNC 3018-PRO*

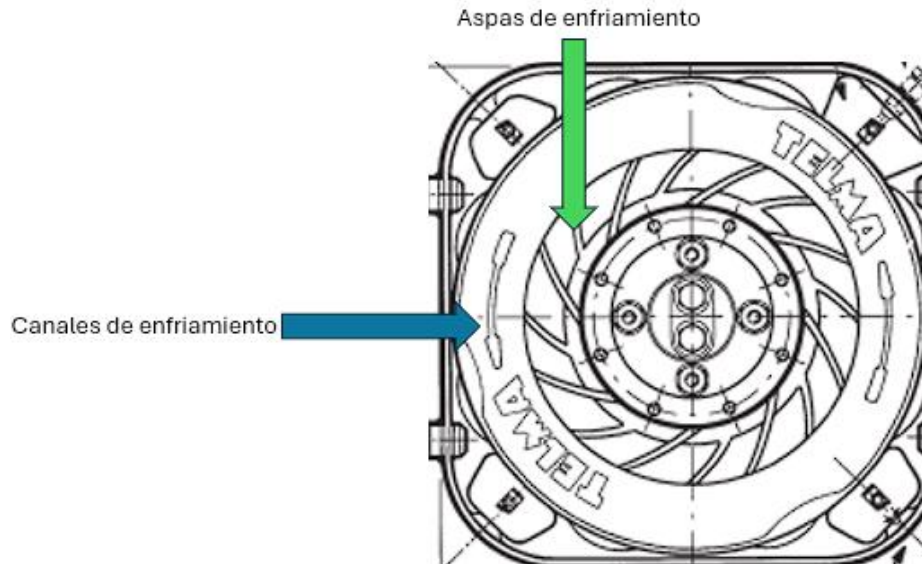
Una vez grabado el circuito con la CNC, se debe verificar que no haya continuidad entre la placa restante y las demás pistas, ya que puede llegar a provocar un cortocircuito entre los

componentes y, por ende, un mal funcionamiento. Posteriormente, se procede a limpiar la PCB con alcohol isopropílico y una fibra metálica para eliminar cualquier residuo de rebaba en los canales generados por la fresa. Tras esta limpieza, se realiza una comprobación final de la continuidad entre la placa y las pistas.

Finalmente, se aplica la máscara antisoldante, la cual evita la contaminación de las pistas con residuos que podrían causar cortocircuitos o puentes entre componentes no deseados, además de proteger la placa contra la corrosión. La máscara antisoldante, posterior a su aplicación, debe curarse mediante luz ultravioleta; para ello, es necesario colocar la pasta de manera que toda la superficie de la placa sea cubierta de manera uniforme para que promedio de una luz ultra violeta generada por una lámpara sea secada la máscara antisoldate y un tiempo de secado adecuado que es de aproximadamente de 5 min. Después del secado de la máscara en la placa, se retira la máscara por medio de un lijado únicamente en las áreas donde se soldará cada componente.

## 2.4 Sistema de refrigeración a unidades de absorción de potencia por corrientes parásitas

Los diseños de las unidades de absorción de potencia están equipados con aspas y canales, como se muestra en la Figura 64, los cuales permiten disipar el calor generado por las corrientes parásitas.



*Figura 64 Diagrama de canales y aspas de enfriamiento en unidades de absorción de potencia por corrientes parásitas (TELMA 2020)*

Las unidades de absorción de potencia presentan problemas de refrigeración debido a su ubicación estática en un dinamómetro de banco, instalado en un laboratorio. Esta configuración limita el flujo de aire alrededor de las unidades, lo que impide una refrigeración

adecuada. Para solucionar este inconveniente, se optó por instalar dos ventiladores en la posición más eficiente para mejorar el enfriamiento. Se eligieron ventiladores de dimensiones compactas, con el fin de no interferir con otros sistemas en operación. Los ventiladores seleccionados de modelo Rapid-Cool, comúnmente utilizados en motocicletas, tienen el tamaño adecuado para este entorno y funcionan con una alimentación de 12 V, lo que permite contar con una fuente de alimentación independiente.

### 2.4.1 Características de operación del sistema de refrigeración

El circuito para el sistema de refrigeración incluye un sensor de temperatura infrarrojo, encargado de activar los ventiladores cuando se excede cierta temperatura. Dado que los discos del freno son los componentes que se encuentran en movimiento y los que incrementan su temperatura, es esencial que cuenten con un sensor de temperatura sin contacto, por lo que se opta por un sensor infrarrojo. Este sensor debe colocarse a la distancia especificada en el manual de operación y en una posición que permita monitorear la temperatura de uno de los discos de manera precisa.

La medición de la temperatura se realiza mediante una tarjeta de desarrollo Arduino Uno, que compara la temperatura alcanzada por el disco con el valor de activación de los ventiladores. Cuando se llega a esta temperatura de referencia, el Arduino envía una señal a un relevador de estado sólido DC a DC, cuya única función es encender o apagar los ventiladores. Una vez que la temperatura del disco del freno ha disminuido lo suficiente, el Arduino deja de enviar la señal al relevador, apagando los ventiladores y entrando en un ciclo de enfriamiento continuo mientras la temperatura es monitoreada. El diagrama de conexión de estos componentes se presenta en la Figura 65.

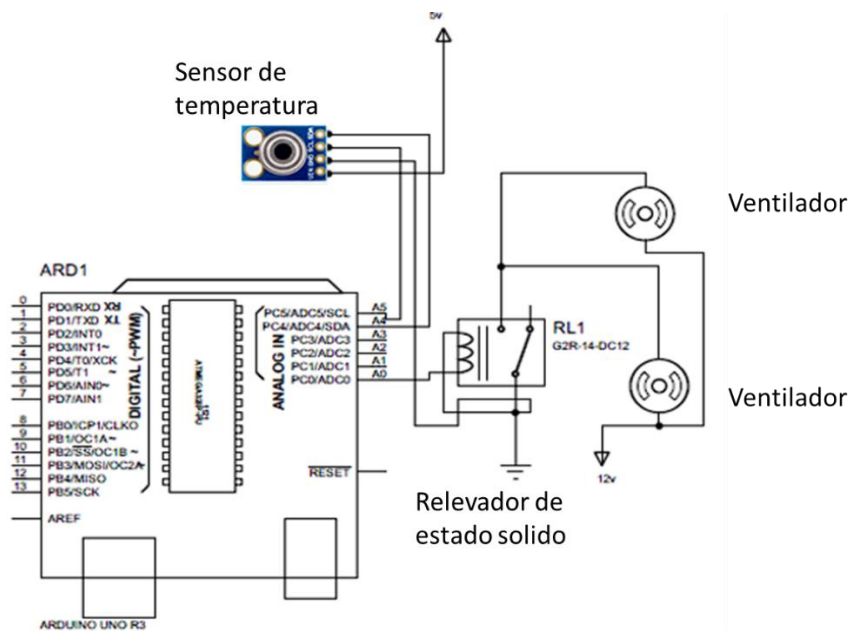
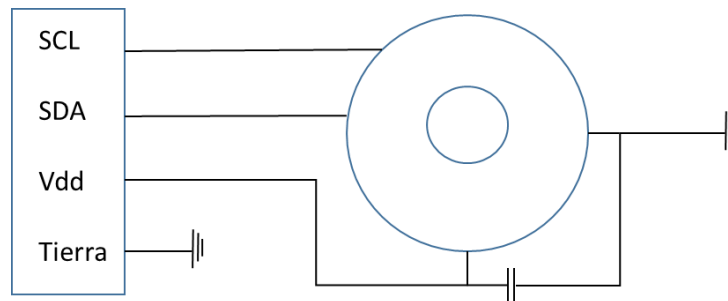


Figura 65 Diagrama de conexión de componentes para sistema de refrigeración

Dado que los ventiladores tienen un alto consumo energético se utiliza una fuente independiente de 12 v a 30 A, posteriormente se utiliza un relevador de 40 A, que permita soportar la corriente consumida sin que los ventiladores pierdan eficiencia en su funcionamiento y capacidad de enfriamiento. Además, el Arduino solo proporciona una salida máxima de 5V, por lo que el relevador debe contar con un voltaje de excitación dentro de este rango, es decir, que se active correctamente con la señal de 5V emitida por el Arduino. Esto asegura que el relevador funcione adecuadamente sin comprometer la eficiencia del sistema de refrigeración.

## 2.4.2 Componentes del sistema de refrigeración

Los componentes necesarios para este sistema fueron seleccionados en función de sus características específicas. Uno de los componentes clave es el sensor de temperatura infrarrojo MLX90614, fabricado por Melexis. Este sensor es ideal debido a su pequeño tamaño y su amplio intervalo de medición de temperatura, que abarca desde  $-70^{\circ}\text{C}$  hasta  $380^{\circ}\text{C}$  para objetos. Además, cuenta con una resolución de  $0.02^{\circ}\text{C}$ , lo que permite una medición exacta. El sensor puede ser alimentado con una fuente de 5V y ofrece la posibilidad de comunicarse mediante I2C, lo que facilita la obtención de los datos de temperatura de manera eficiente y sencilla (Microelectronic integrated systems 2007).



*Figura 66 Diagrama de conexión interno del sensor MLX90614 (Microelectronic integrated systems 2007)*

En la Figura 66 se muestra el diagrama de conexión del sensor de temperatura infrarrojo MLX90614. En este diagrama, se puede observar cómo se realiza la conexión de la entrada de alimentación del sensor, así como su integración con un Arduino R3. Este microcontrolador es el encargado de interpretar los datos proporcionados por el sensor y compararlos con la temperatura de activación de los ventiladores. De esta manera, el Arduino puede tomar decisiones basadas en la temperatura medida y activar o desactivar los ventiladores según sea necesario.

Para poder separar las dos etapas se utilizó un relevador de estado sólido de 40 A de modelo SSR-40 DD de la marca FDFER, el relevador cuenta con dos secciones, la de entrada y salida, en la entrada debe tener una señal de activación según el fabricante de 3

hasta 32 V de corriente continua y en la salida puede soportar una carga desde 5 hasta 200 V de corriente continua, la forma de conexión se puede observar en la Figura 67.



*Figura 67 Diagrama de conexión para el relevador de estado sólido SSR-40 DD*

Posteriormente, se seleccionaron ventiladores de la marca Hayden Automotive, específicamente del modelo de la serie Rapid-Cool. Se eligió un ventilador con un diámetro de 254 mm y un flujo de aire de 18.40 metros cúbicos por minuto. Estos ventiladores se conectaron al sistema de refrigeración correspondiente, como se muestra en la Figura 68, para verificar su correcto funcionamiento y el consumo de corriente.



*Figura 68 Componentes para el sistema de enfriamiento*

### **3. Capítulo 3 Actuadores y control de emergencia**

En este capítulo se abordan los aspectos fundamentales del control y la comunicación en sistemas electrónicos y automatizados. Posteriormente, se expone el análisis del control por computadora del sistema desarrollado, el cual permite gestionar y automatizar procesos mediante el uso de algoritmos y software.

Posteriormente, se explican dos importantes protocolos de comunicación, I2C y serial, los cuales facilitan la interacción entre dispositivos en un sistema maestro-esclavo. Adicionalmente, se desarrolla el diseño de los circuitos para el maestro y el esclavo y, finalmente, se desarrolla el diseño e importancia del botón de paro de emergencia, un dispositivo esencial para garantizar la seguridad en sistemas automatizados.

#### **3.1 Análisis de control por computadora**

El circuito de control está diseñado para recibir una señal analógica externa, la señal es proporcionada por un DAC, el cual es un convertidor que recibe una señal de entrada digital y produce una salida analógica.

Un actuador es un dispositivo que recibe una señal de entrada y la convierte en otro tipo de señal o movimiento (joy 2023). A medida que está evolucionando la tecnología, los sistemas de control permiten emplear un ordenador para controlar un sistema físico. Cada vez existen más sistemas controlados por computadora, por ejemplo, se pueden encontrar dentro de un vehículo, en casas inteligentes, en sistemas de aire acondicionado, entre otros. (Ramses 2013)

El control por computadora facilita ciertos procesos a nivel industrial, en el caso del circuito de control para frenos de corrientes parásitas proporciona ciertos beneficios como, por ejemplo, programar que el circuito llegue a un valor asignado de voltaje y mantenerlo en ese punto a modo de que si existen variaciones en la carga, esta pueda ser ajustada automáticamente. (Ramses 2013)

Por medio de la interfaz desarrollada en LabView®, se controla el circuito denominado actuador. La interfaz está organizada para los actuadores. En la sección de actuadores, se dispone de dos métodos para ingresar el valor o el porcentaje de accionamiento del actuador, como se muestra en la Figura 69. Estos métodos son escribir directamente el valor en la casilla o ajustar el porcentaje mediante la barra deslizante.



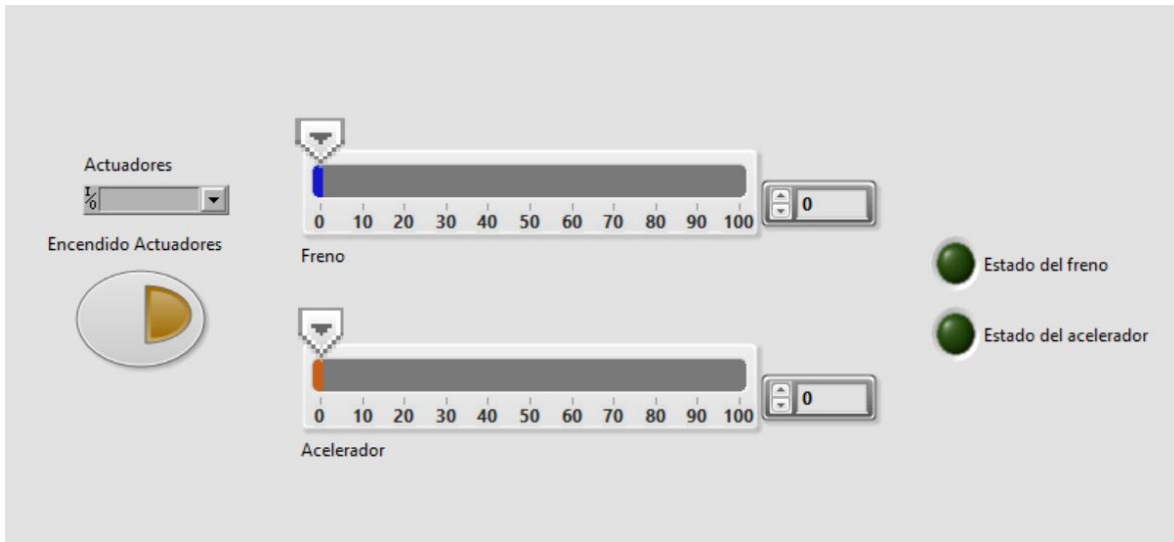


Figura 69 Sección de actuadores de la interfaz desarrollada en LabView®

Es importante mencionar que en la misma sección se encuentra un testigo, el cual tiene la función de indicar si el actuador está correctamente conectado o si presenta algún error. Esto significa que, si el testigo no está encendido, se debe considerar la existencia de un error de comunicación.

### 3.2 Protocolo de comunicación

El sistema está constituido por la interfaz desarrollada en LabView®, un circuito maestro encargado de proporcionar y dividir la cadena de datos y los dispositivos esclavos que reciben la información del circuito maestro, que en este caso son los actuadores. La comunicación entre los circuitos se lleva a cabo mediante dos protocolos: serial e I2C.

La comunicación I2C, siglas provenientes del nombre en inglés Inter-Integrated Circuit, es un protocolo que permite la comunicación entre múltiples dispositivos a través de dos líneas. Una de estas líneas, denominada SDA (Serial Data Line), es utilizada para la transmisión de datos. Esta transmisión es bidireccional, lo que significa que tanto el maestro como los dispositivos esclavos conectados al bus pueden enviar y recibir datos (Giraldo s.f.).

La otra línea, SCL (Serial Clock Line), es la encargada de transmitir la señal de reloj, la cual sincroniza la transferencia de datos en la línea SDA. Es importante destacar que todos los dispositivos conectados al bus deben compartir una tierra común (GND) para asegurar la correcta comunicación entre ellos (Carletti 2007).

### 3.2.1 Comunicación entre maestro e interfaz

La comunicación serial consiste en el envío de información de un punto a otro mediante sistemas electrónicos, utilizando técnicas digitales. En este proceso, la información se transmite a través de una sucesión de diferentes estados de una variable física, como puede ser el voltaje, que varía a lo largo del tiempo y se codifica en bits para su transmisión (Luna 1992).

El envío de información por comunicación serial consiste en transmitir un bit de manera secuencial, lo que implica que se envía un bit a la vez a un ritmo determinado por el emisor o receptor. Este tipo de comunicación sigue los estándares definidos por el RS-232 (Recommended standard 232) que establece los niveles de voltaje para representar los estados lógicos. En el protocolo RS-232, un nivel de -12 V representa un uno lógico, mientras que 12 V representa un cero lógico. Sin embargo, los microcontroladores, que suelen operar con 5 V, utilizan 5 V para representar un uno lógico y 0 V para un cero lógico (Igoe 2009).

En la actualidad, existen diferentes puertos que permiten la comunicación de manera serial, conocidos como puertos seriales. Estos han sido reemplazados en gran medida por el puerto USB (Universal Serial Bus), el cual proporciona una conexión más eficiente y versátil entre múltiples dispositivos (Igoe 2009).

La transmisión de datos puede realizarse de dos maneras: en serie o en paralelo. En la comunicación paralela, los datos se transmiten simultáneamente a través de diferentes canales, de forma separada, desde un mismo medio de transmisión. Por otro lado, en la comunicación en serie, la información se envía de manera secuencial por un único canal, es decir, los datos se transmiten uno tras otro, lo que requiere menos cables, pero puede implicar una menor velocidad de transmisión en comparación con la comunicación paralela. Como se puede observar en la Figura 70 (Wexter home 2020).

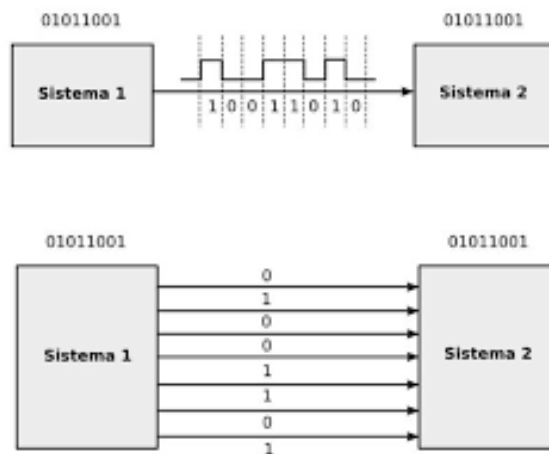


Figura 70 Comunicación en serie de la primera parte y la comunicación en paralelo la segunda parte (Wexter home 2020)

La computadora y el maestro se comunican a través de una comunicación serial. La interfaz es responsable de enviar los datos en serie, y el tamaño de la cadena dependerá del número de actuadores. Cada dato se envía en una cadena de 8 bytes, donde un byte está dividido por una letra. Esta letra marca el inicio y el final de la cadena de cada actuador, como se puede observar en la Figura 71.

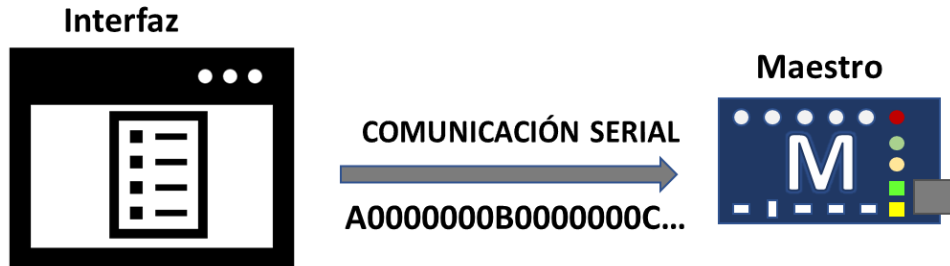


Figura 71 Diagrama de comunicación entre computadora (interfaz) y el maestro enviando la cadena de datos respectiva para cada actuador por medio de comunicación serial

### 3.2.2 Comunicación entre actuador y maestro

Una vez que el maestro recibe la cadena de datos por medio de la comunicación serial y que la cadena de datos se encuentra dividida en bloques mediante las letras, el proceso de transmisión se facilita, ya que permite al maestro separar la cadena y distribuir la información entre los distintos esclavos o actuadores. De esta manera, cada actuador recibe el dato correspondiente, que se transmite a través del protocolo I2C.

Para esta comunicación se debe utilizar resistencias pull-up, lo que quiere decir que las resistencias deben estar conectadas a voltaje (voltaje de corriente continua), como se puede observar en la Figura 72, para poder asegurar un nivel alto lógico cuando no haya dispositivos conectados (Giraldo s.f.).

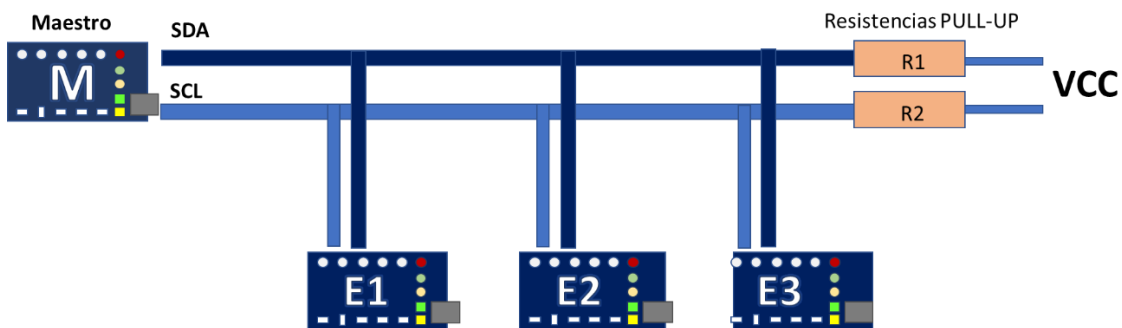


Figura 72 Diagrama de conexión entre maestro y esclavos en comunicación I2C

El microcontrolador esclavo, tras recibir su correspondiente cadena de datos, debe transmitirla a otro microcontrolador mediante comunicación serial. Esto se debe a que el DAC opera utilizando el protocolo de comunicación I2C. El primer microcontrolador recibe los datos a través de I2C, los procesa y los interpreta para garantizar que el DAC pueda manejarlos de manera adecuada. Posteriormente, el segundo microcontrolador, al recibir la cadena de datos procesada, la envía al módulo convertidor digital-analógico, como se ilustra en la Figura 73.

El módulo convertidor digital-analógico se encarga de convertir los datos binarios en señales analógicas de voltaje.

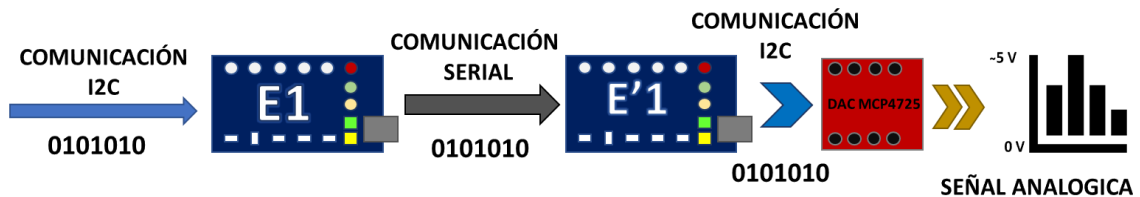


Figura 73 Diagrama de comunicación en el sistema de esclavo o actuador

### 3.3 Características de diseño

Para poder programar un código se utiliza un entorno de desarrollo integrado (IDE), la cual es una aplicación de software que ayuda a los programadores a desarrollar y validar un código de software de manera sencilla. (AMAZON 2023)

La IDE incluye funcionalidades que van más allá que cualquier editor de texto, proporcionando una interfaz que facilitan el proceso de desarrollo de código de forma eficiente. (AMAZON 2023)

Arduino cuenta con una de las plataformas de desarrollo más populares entre los nuevos programadores, debido a su interfaz de desarrollo integrada (IDE) fácil de usar y su lenguaje de programación basado en C, con similitudes a C++. Esto facilita la programación en el microcontrolador de Arduino.

El circuito maestro utiliza una tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560, basado en el microcontrolador ATmega2560, que dispone de 54 pines de entrada o salida y una alimentación de 5 V, como se muestra en la Figura 74. Dado que este microcontrolador tiene una mayor capacidad de procesamiento en comparación con el Arduino UNO R3, es la opción más adecuada debido a su facilidad de uso y manejo. (Arduino s.f.).

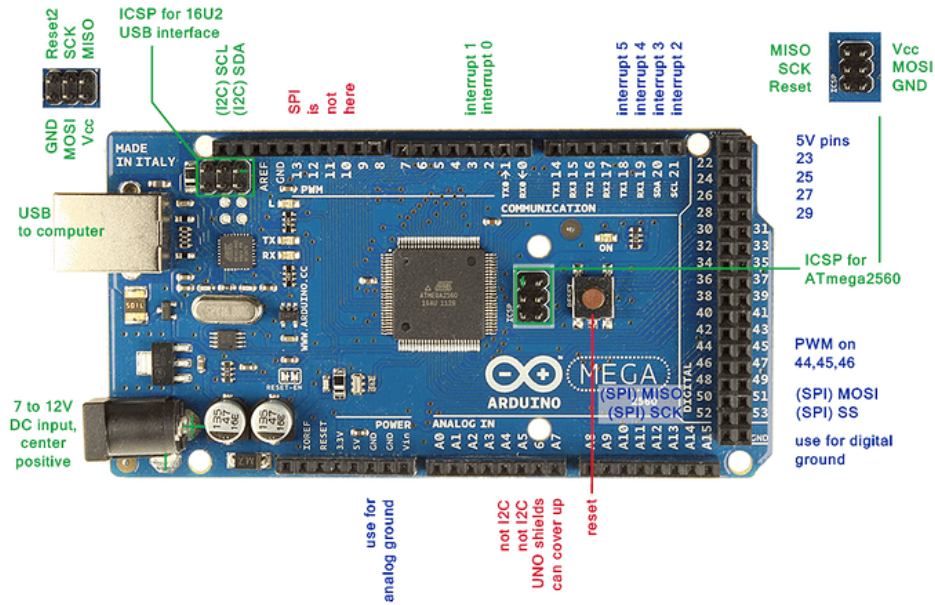


Figura 74 Pines de salida de Arduino Mega 2560 (Arduino s.f.)

El diseño del "shield" para el microcontrolador maestro consiste en una placa de circuito impreso desarrollada en el software Proteus 8®, la cual se coloca sobre una placa Arduino® para ampliar sus capacidades. Un "shield" es una extensión modular que se conecta directamente a un Arduino® para dotarlo de funcionalidades específicas, como mayor cantidad de puertos, comunicación con otros dispositivos o manejo de señales. En este caso, el diseño se llevó a cabo con el objetivo de crear una solución compacta y sencilla, como se ilustra en la Figura 75. Para permitir la conexión de un mayor número de actuadores, se añadieron puertos de conexión adicionales, los cuales están conectados en paralelo al puerto I2C del Arduino Mega. Asimismo, se incluyó una fuente de alimentación externa, garantizando que todos los circuitos compartan una tierra común con la computadora y entre sí, asegurando así un funcionamiento correcto.

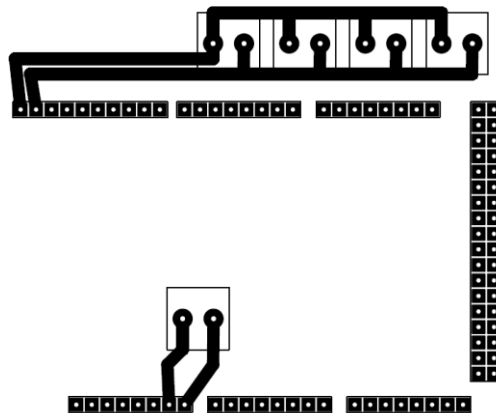


Figura 75 Diseño del shield para el Arduino del circuito maestro

De igual manera, la PCB del circuito se desarrolla en la CNC3018. Para obtener el mapa de vectores del circuito, se utiliza un programa antes mencionado FlatCam® que facilita la creación del mapeo de vectores de las pistas de cualquier circuito.

El actuador que controla la intensidad del frenado está dividido en tres secciones. La primera sección consiste en un Arduino Uno R3, cuyo microcontrolador está basado en el ATmega328p. Este microcontrolador cuenta con 14 pines de entrada o salida, incluye una conexión USB y tiene una alimentación de 5 V, como se muestra en la Figura 76 (Arduino s.f.).

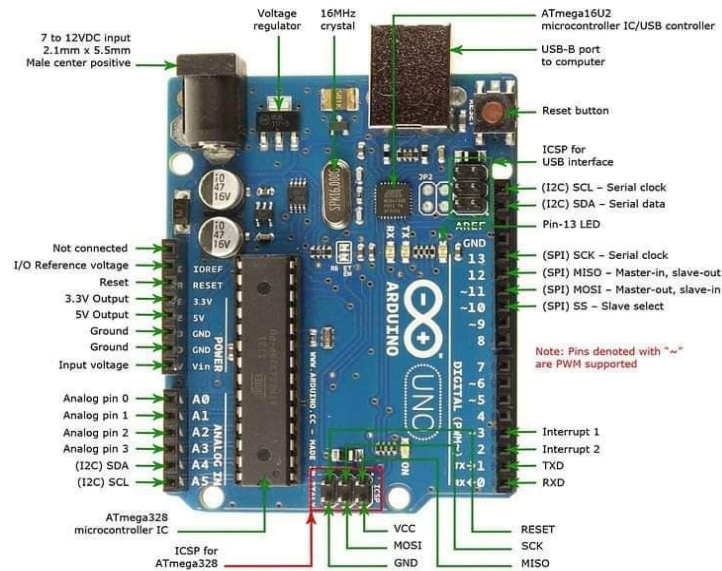


Figura 76 Pinout de arduino Uno R3 (abhishek 2020)

La comunicación entre el microcontrolador encargado de recibir la cadena de datos y aquel que realiza el envío al DAC se lleva a cabo mediante el protocolo de comunicación serial. Finalmente, en la última etapa del proceso, se dispone de un convertidor digital-analógico (DAC), encargado de transformar los datos digitales en señales analógicas para su uso posterior.

El DAC MCP4725 es un convertidor digital-analógico de 12 bits, lo que significa que puede convertir una señal digital en una señal de tensión analógica. Aunque el Arduino cuenta con salidas analógicas, estas solo proporcionan una señal PWM entre GND y Vcc. A pesar de que se aplique un filtro, no es posible obtener una señal de tensión analógica pura debido a la naturaleza de la señal PWM. El uso de un DAC permite convertir la señal digital en una señal de voltaje continuo y preciso, que es necesario para algunas aplicaciones (Llamas 2016).

El MCP4725 es controlado a través del protocolo de comunicación I2C. Además, este convertidor digital-analógico (DAC) cuenta con una memoria EEPROM incorporada, la cual permite guardar el valor de la salida de tensión incluso después de perder la comunicación.

La tensión de alimentación del MCP4725 es de 2.7 a 5.5 V, lo que lo hace adecuado para trabajar con diversas fuentes de alimentación. Si se alimenta a 5 V, el DAC puede generar hasta 4096 niveles de salida, debido a su resolución de 12 bits. Esto significa que puede ofrecer una precisión de hasta 1 mV en el rango de 0 a 5 V (Llamas 2016).

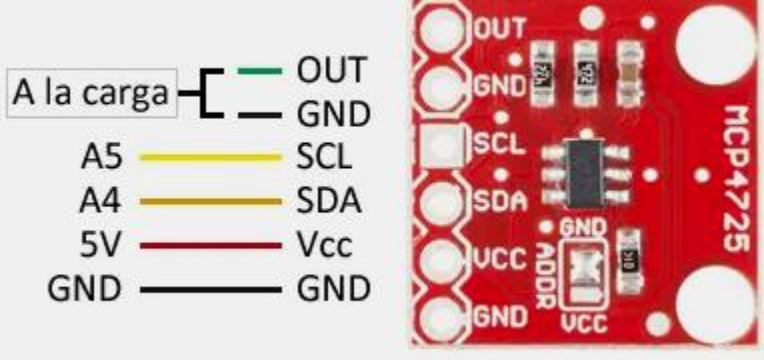


Figura 77 Diagrama de conexión del módulo DAC MCP4725 (Llamas 2016)

En la Figura 77 se muestra la conexión entre el Arduino Uno y la carga a la cual se debe conectar el circuito de control. Para el actuador, se utilizaron las dimensiones del Arduino Uno R3 como base para diseñar un shield que aloja ambos Arduinos en una sola PCB. El DAC MCP4725, que cuenta con dimensiones compactas, ofrece pines de entrada y salida, lo que facilita su reemplazo en caso de daño, ya que está ensamblado en la PCB mediante headers.

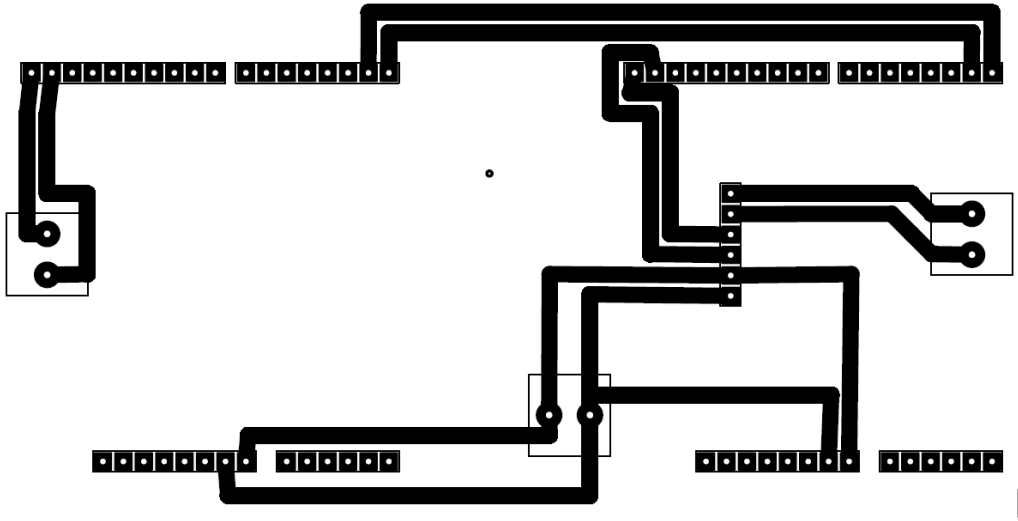


Figura 78 Diseño de pistas del circuito del actuador

En la Figura 78 se muestra el diseño de las pistas del circuito del actuador, el cual busca ser compacto sin comprometer su funcionamiento. Además, se ha cuidado que no haya puentes entre las pistas para evitar posibles problemas de conexión.

### **3.4 Botón de paro de paro de emergencia**

En diversos equipos de máquinas eléctricas, se incorporan elementos diseñados para poner en marcha dichos equipos, así como para permitir su detención en momentos específicos. La interrupción del equipo debe ser posible en condiciones normales de funcionamiento, lo que implica que, una vez finalizado su proceso o maniobra, debe detenerse de forma automática. Además, es crucial que el equipo pueda detenerse rápidamente en situaciones de peligro o emergencia, tanto para proteger al operador como para salvaguardar la máquina (Granda 2018).

Todas las máquinas en las que pueda existir un peligro mecánico durante las condiciones normales de operación deben estar equipadas con un dispositivo de paro de emergencia. La cantidad de dispositivos de paro de emergencia dependerá del tipo de máquina y, en algunos casos, de factores como la presencia de múltiples cabinas de mando, entre otros aspectos. La función principal de estos dispositivos es interrumpir la fuente de alimentación o, de otra manera, detener el funcionamiento de la máquina en cualquier situación de emergencia (Granda 2018).

El sistema de paro de emergencia en el control se encarga de detener el vehículo o el motor, dependiendo del dinamómetro en el que esté instalado. A través de un botón de paro de emergencia, se envía una señal de voltaje analógica al control del freno, lo que activa el sistema de freno al 100%.

Una de las terminales del botón de paro de emergencia se conecta a un voltaje positivo, que debe ser el máximo permitido en la última etapa de comparación del circuito generador de PWM. La segunda terminal se conecta en paralelo al interruptor que permite alternar entre el control por computadora y el manual, específicamente a la terminal central, que recibe las señales de ambos modos de control.

Esta conexión permite que, al accionar el botón, independientemente de quién lo controle, la señal recibida será de mayor voltaje. Además, se incorpora una protección mediante diodos para evitar cortocircuitos en las otras líneas de control.



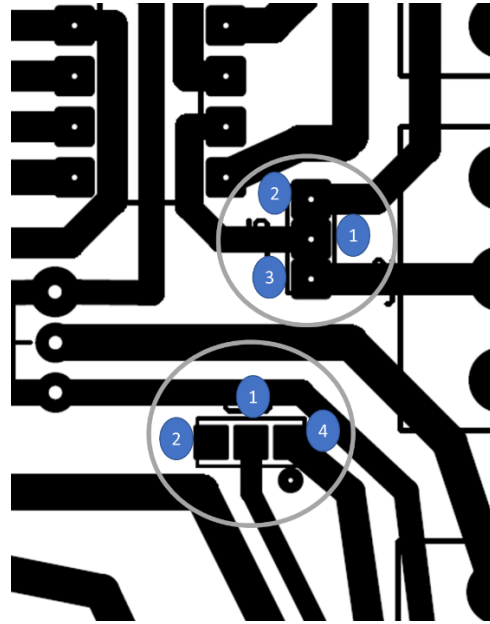


Figura 79 Terminales de conexión para el interruptor que intercambia de señal de control

La Figura 79 muestra la conexión del interruptor, en la que se identifican varios puntos clave. El punto 1 es donde recibe la señal enviada tanto al circuito generador de PWM como a la pantalla LCD, la cual indica el porcentaje de freno aplicado. En el punto 2, el interruptor recibe la señal del DAC o actuador, mientras que en el punto 3 se recibe la señal del potenciómetro de control manual. Finalmente, el punto 4 recibe la señal del potenciómetro ajustado para la LCD, debido a que el PIC 16F778A solo puede recibir un máximo de 5 V en sus entradas.

El botón de paro de emergencia debe conectarse en el punto 1, directamente en la terminal del interruptor. Las otras terminales, correspondientes a las señales de los diferentes puntos, deben contar con diodos de protección, tal como se muestra en la Figura 80.

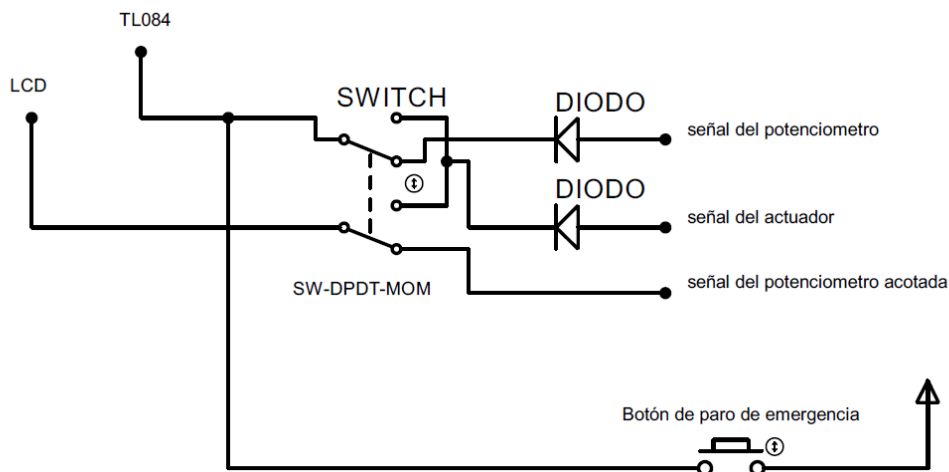


Figura 80 Diagrama de conexión del botón de paro de emergencia



*Figura 81 Botón de paro de emergencia ensamblado en el gabinete de resguardo de la instrumentación*

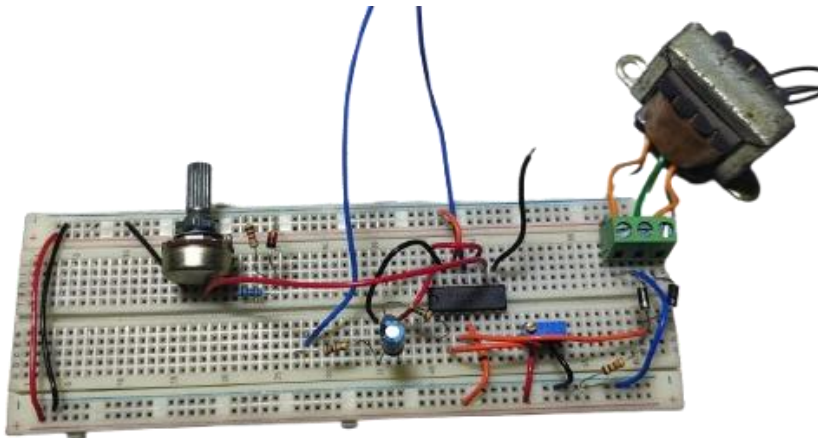
En la figura 81 se muestra el botón de paro de emergencia en la posición dentro del panel de instrumentación por otro lado cuando se envía la señal del botón de paro de emergencia al amplificador operacional, esta reemplaza la señal que recibe dicho amplificador, ya que tiene una mayor amplitud. De este modo, se puede asignar el porcentaje de frenado que se aplicará en el momento del paro de emergencia.

## 4. Capítulo 4 Pruebas y análisis del control del freno de corrientes parásitas.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las distintas etapas del circuito de control. Mediante una serie de ensayos, se evaluó el desempeño y la funcionalidad de cada fase del diseño, abarcando desde la generación de la señal PWM hasta la implementación del circuito de potencia y control. Los resultados obtenidos permiten analizar la efectividad del sistema, identificar posibles áreas de mejora y validar el cumplimiento de las especificaciones establecidas en el diseño. A continuación, se describen en detalle los resultados correspondientes a cada etapa evaluada.

### 4.1 Pruebas de las etapas de funcionamiento del circuito

En la primera prueba se verifican todas las etapas del circuito de control, que se simularon en el software Proteus®. El circuito de control fue probado en una protoboard, la cual es una tarjeta que permite diseñar circuitos al permitir conectar componentes sin que sea necesario soldarlos entre sí. Por ende, el diseño propuesto primero se ensambló en la tarjeta protoboard como se muestra en la Figura 82.



*Figura 82 Circuito de control ensamblado en una tarjeta protoboard*

Desde el primer paso, se verifica que el transformador con derivación centra tenga un correcto funcionamiento. Para ello, se utiliza un osciloscopio proporcionado por el laboratorio UNICE de la marca UNIT® con el objetivo de verificar que las dos señales que envía el transformador son las adecuadas.

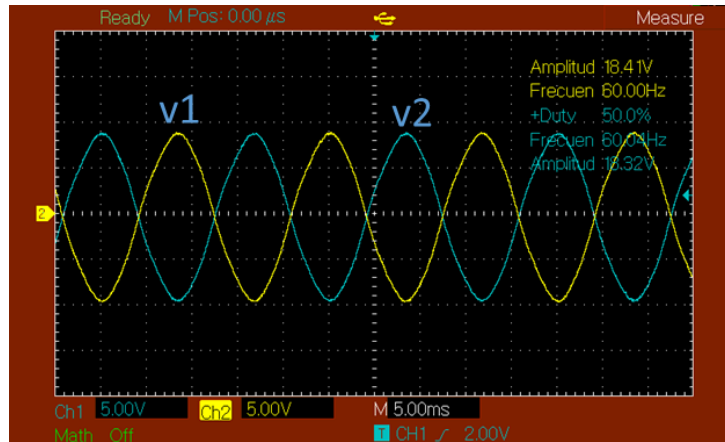


Figura 83 Señales sinusoidales de un transformador con derivación central. Siendo v1 una salida del transformador y v2 la otra salida

En la Figura 83 se muestran las dos señales sinusoidales que salen del transformador v1 y v2. Las señales se encuentran desfasadas 180°, eso es gracias a la derivación central por lo tanto podemos decir que se observa un correcto funcionamiento. Posteriormente, esta señal deber ser rectificadas como se muestra en la Figura 84.

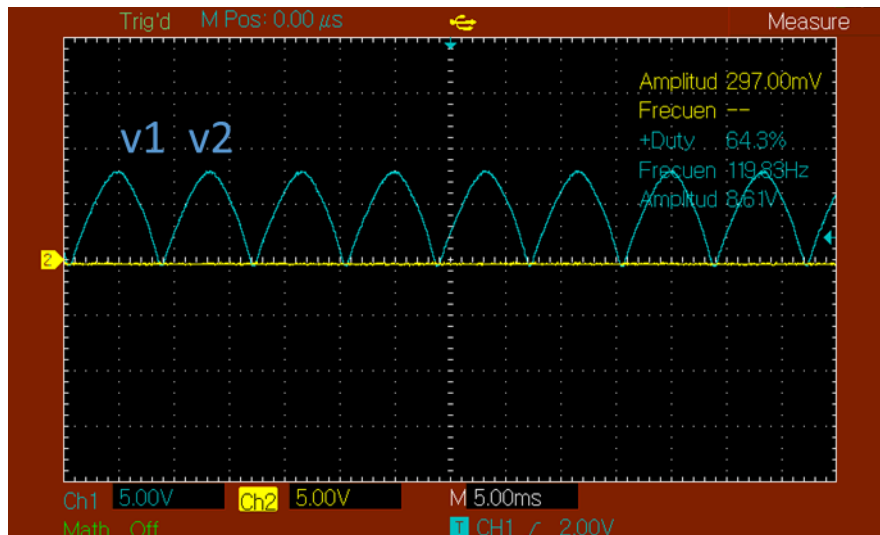


Figura 84 Señal rectificada por medio de dos diodos 1N4001

La siguiente etapa del circuito corresponde al cruce por cero, en la cual la señal rectificadas se compara con una señal de corriente directa. Esto permite verificar que, a la salida de esta etapa, se generen los pulsos necesarios para la etapa subsiguiente, tal como se ilustra en la Figura 85.

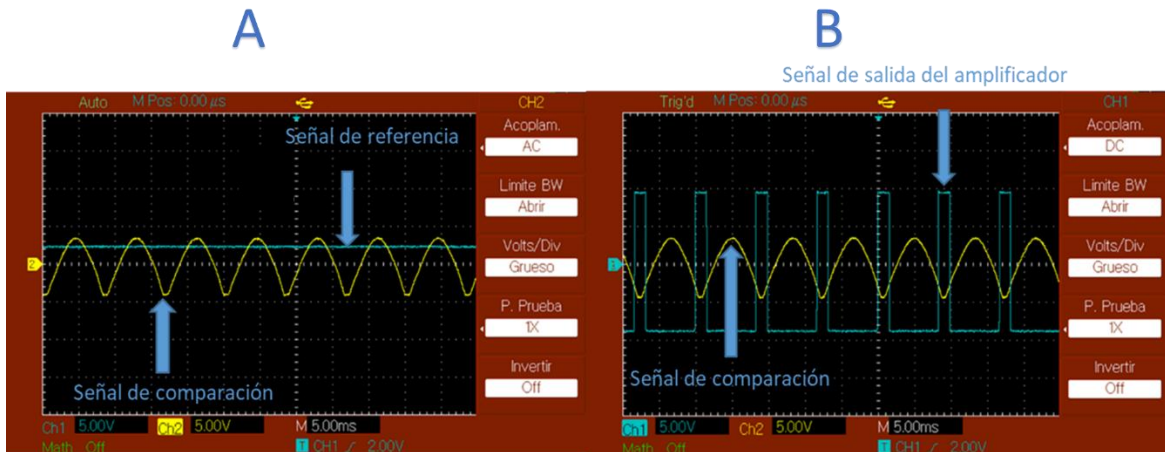


Figura 85 A) comparación de la señal rectificada y una señal DC B) señal de pulsos resultado de la comparación de las señales

Una vez ajustada la señal de salida de la etapa anterior, se puede observar en la Figura 86 que la señal generada corresponde a una rampa lineal. Además, al comparar esta señal con la obtenida en la simulación, se aprecia que son muy similares, presentando diferencias menores, como el tamaño del pulso y una descarga más rápida en la rampa lineal en comparación con la simulación.

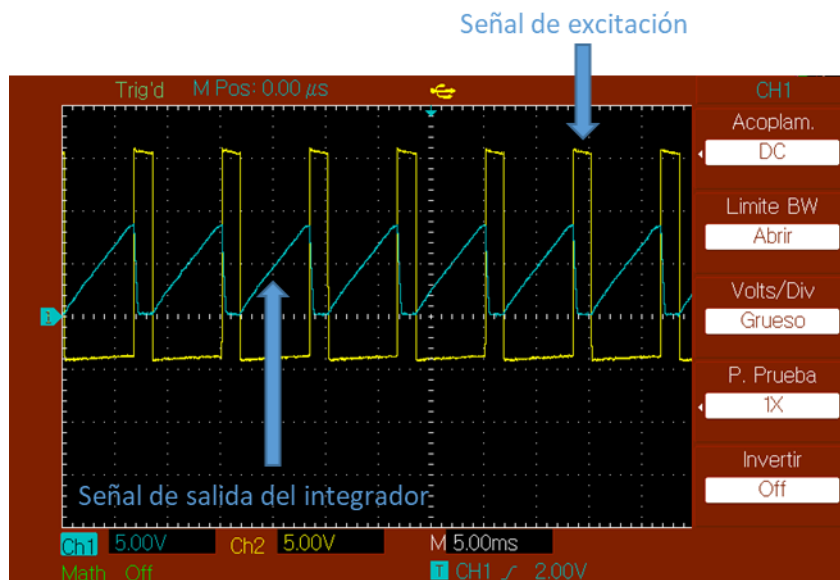


Figura 86 Señal generada en la etapa de rampa lineal del circuito de control

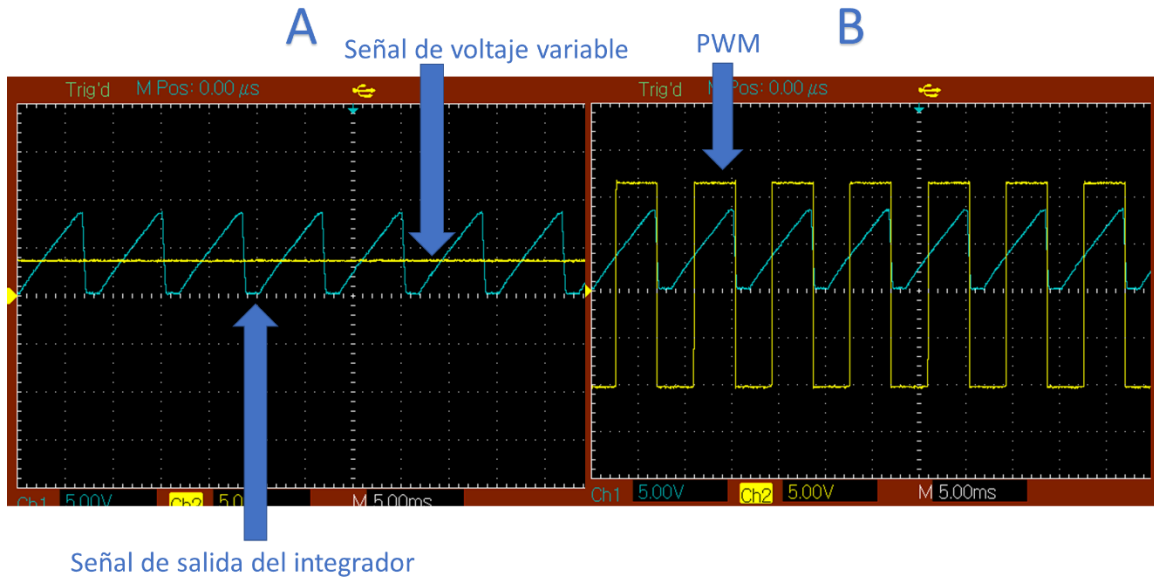


Figura 87 A) comparación de señal de rampa lineal con una de referencia B) comparación de señales entre la rapa lineal y el PWM con un porcentaje de ciclo de trabajo de 50%

En la Figura 87 se presentan las señales correspondientes a la última etapa del circuito. Dado que el osciloscopio solo permite monitorear dos señales simultáneamente, se visualizan únicamente las más relevantes. Además, se observa que el ciclo de trabajo de la señal PWM es de 50%. En contraste, en la Figura 88 se muestra una señal PWM con un ciclo de trabajo de 30%.

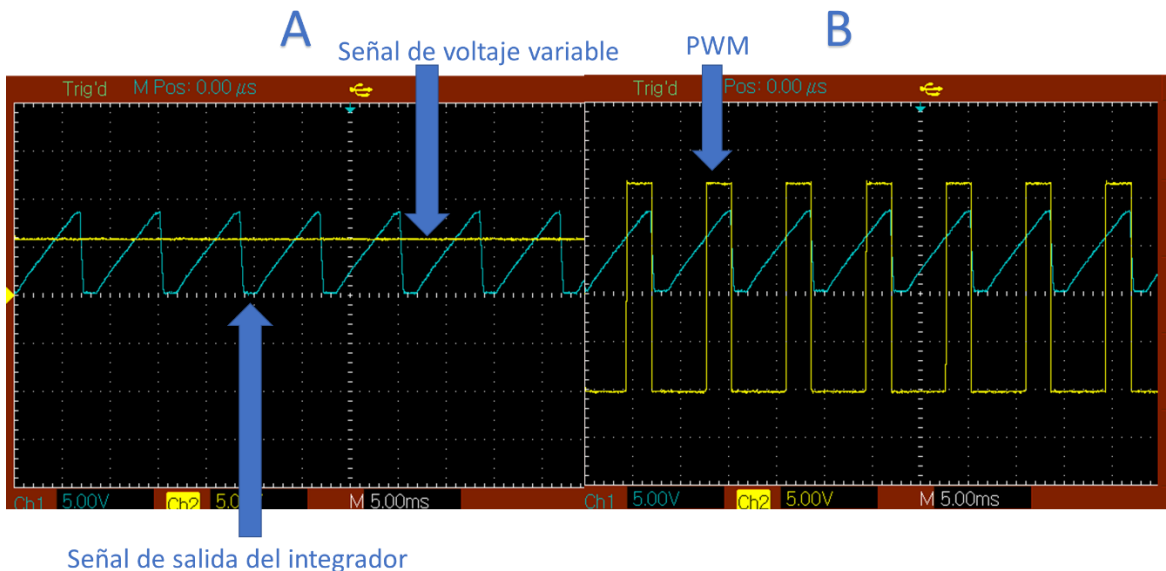


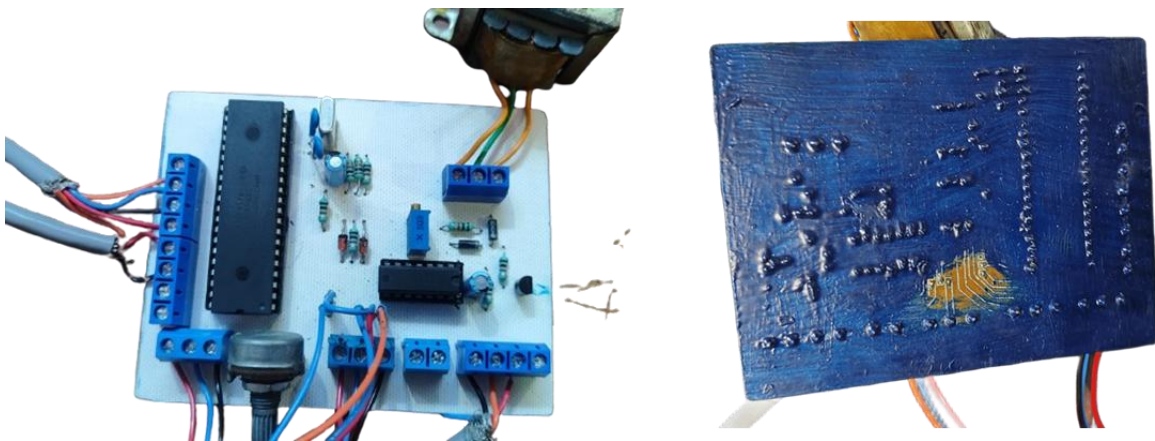
Figura 88 A) comparación de señal de rampa lineal con una de referencia B) comparación de señales entre la rapa lineal y el PWM con un porcentaje de ciclo de trabajo de 30%



*Figura 89 Pantalla LCD de visualización de porcentaje de freno aplicado*

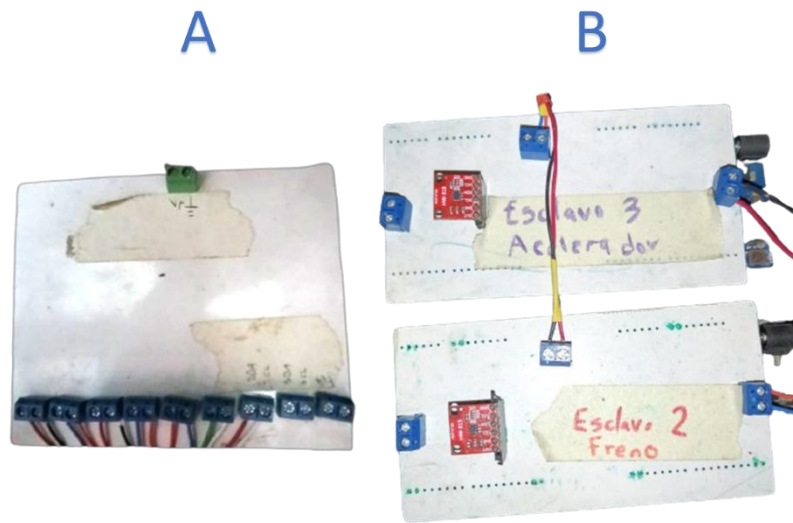
En la Figura 89 se presenta una pantalla LCD que indica el porcentaje de freno aplicado, acompañado del valor correspondiente al intervalo de 0 a 1023 expresado en bits. Este intervalo permite verificar que el porcentaje mostrado se corresponda con el valor en bits, lo que facilita la validación del correcto funcionamiento del circuito.

Habiendo evaluado el correcto funcionamiento del circuito en la protoboard, se procedió a fabricar la tarjeta PCB. Se verificó que el grabado de las pistas se hubiera realizado adecuadamente antes de colocar y soldar los componentes en la placa. Finalmente, se aplicó la máscara antisoldante para proteger el circuito, tal como se muestra en la Figura 90.



*Figura 90 Placa PCB de circuito de control vista de la parte superior e inferior*

En el caso del control por computadora, se realizaron las mismas pruebas que en la placa de circuito de control, con el objetivo de desarrollar una placa PCB tanto para el maestro como para el actuador. El resultado final de estas pruebas y el diseño correspondiente se puede observar en la Figura 91.

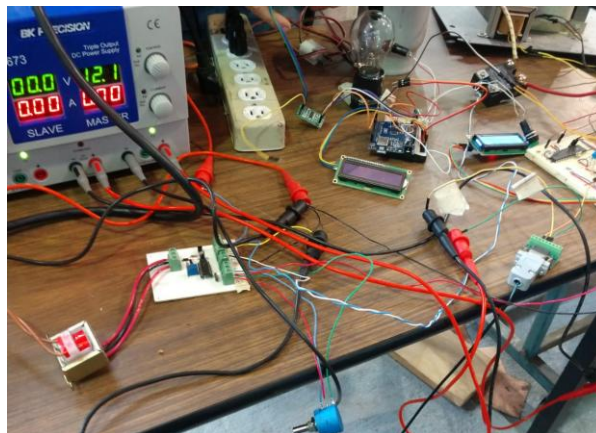


*Figura 91 Placa PCB del maestro A) y placa PCB del actuador B) vista de la parte superior*

Finalmente, después de realizar las conexiones pertinentes entre la computadora y el circuito de control, se verificó mediante un osciloscopio que la señal de salida del circuito PWM se generara de manera correcta.

## 4.2 Pruebas de intensidad de corriente

En la prueba de intensidad de corriente se verifica el correcto funcionamiento de la etapa de potencia, la cual, como se mencionó anteriormente, está constituida por un relevador de estado sólido, un transformador y un puente de diodos. Para comprobar su operación, se conectó un foco incandescente a la salida del relevador de estado sólido, tal como se muestra en la Figura 92.



*Figura 92 Prueba de funcionamiento de la etapa de potencia*



En la prueba de intensidad de encendido de un foco incandescente de 120 watts, a diferentes porcentajes de ciclo de trabajo del PWM, se observó que, para que el foco se encendiera al 1%, era necesario ajustar la perilla de control ya que se observó que en un principio no trabajaba de acuerdo al porcentaje de ciclo de trabajo aplicado de manera que el foco se activara en el instante en que se aplicaba la señal.



*Figura 93 Prueba de intensidad de encendido de un foco incandescente controlado por una señal PWM con un porcentaje menor al 20%*

En la Figura 93 se puede observar la intensidad de encendido del foco incandescente con un ciclo de trabajo menor al 20%, observando como el filamento del foco incandescente no se ilumina por completo, lo cual quiere decir que la señal que está recibiendo el relevador de estado sólido es la correcta.

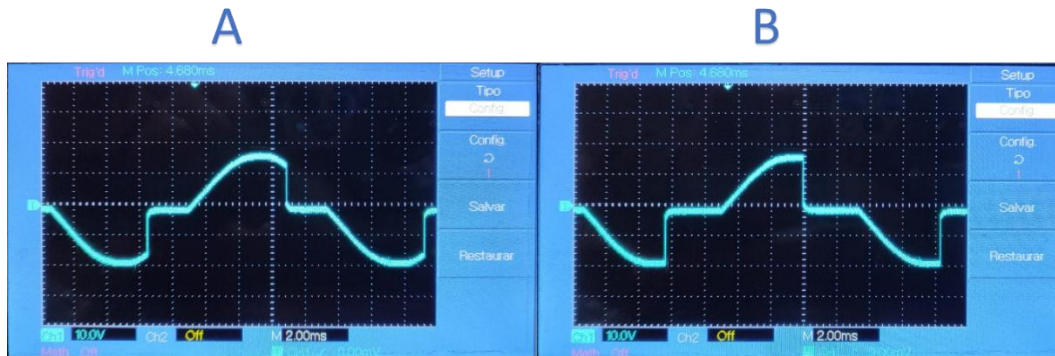


*Figura 94 Prueba de corriente por medio de amperímetro de gancho y ciclo de trabajo aplicado a un foco incandescente mostrado en un osciloscopio*

En la figura 94 se puede observar la pantalla del osciloscopio la cual nos muestra la señal PWM que se le suministra a él relevador de estado sólido, de otra manera también se puede observar el consumo de corriente por medio de un amperímetro de gancho, la relación que existe entre el ciclo de trabajo aplicado y el consumo de corriente deben ser proporcionales, a medida que el ciclo de trabajo sea mayor el consumo de corriente por ende debe ser

mayor. En el ciclo de trabajo aplicado corresponde a un consumo de corriente de 0.6 A, sabiendo que el foco es de 120 watts y el voltaje suministrado al foco es de 127 v de corriente alterna, haciendo los cálculos correspondientes por medio de la fórmula de potencia eléctrica, se puede obtener un consumo de un 1 A máximo, por lo tanto, se obtiene un 60 % de ciclo de trabajo aplicado.

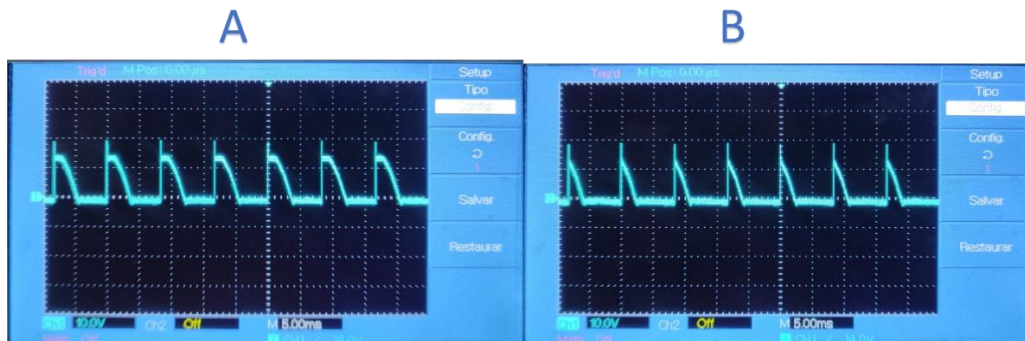
Otra prueba realizada consistió en el uso de un osciloscopio para comprobar la señal de salida del relevador de estado sólido y la salida del puente de diodos, de modo que se verificara que el comportamiento del equipo utilizado fuera el correcto.



*Figura 95 Señal de salida esperada del relevador de estado sólido a diferentes porcentajes de ciclo de trabajo, la cual muestra la señal senoidal cortada por el relevador*

En la Figura 95 se observa que la primera señal A corresponde a un ciclo de trabajo superior al 50%, mientras que la segunda señal B corresponde a un ciclo de trabajo inferior al 50%. Estas señales representan el porcentaje de la señal sinusoidal que es cortada por el relevador de estado sólido.

La señal observada en el osciloscopio valida el correcto funcionamiento del relevador de estado sólido. De manera similar, se verificó el funcionamiento del puente de diodos, lo que permitió confirmar que la señal de salida del mismo fuera la correcta, como se puede ver en la Figura 96.



*Figura 96 Señal de salida esperada del puente rectificador a diferentes porcentajes de ciclo de trabajo, la cual muestra la señal cortada por el relevador*

### 4.3 Pruebas de frenado

Las pruebas de frenado se realizaron en un dinamómetro de banco con un motor V6 y en un dinamómetro para motocicletas disponibles en el laboratorio UNICE. Las primeras pruebas se llevaron a cabo en el dinamómetro para motocicletas, consistiendo en subir una motocicleta Honda de 125 cc, como se muestra en la Figura 97.



*Figura 97 Prueba realizada en el dinamómetro de motocicletas del laboratorio UNICE con una moto honda de 125 cc*

La motocicleta cuenta con un motor monocilíndrico de encendido por descarga de capacitor CDI, teniendo una potencia total de 704 kW a 8500 r.p.m. y sabiendo que la motocicleta puede alcanzar una velocidad máxima de 100 km/h.

El objetivo de esta prueba fue verificar la influencia del freno sobre el desempeño de la motocicleta, obteniendo parámetros como la velocidad de la motocicleta y el porcentaje de freno aplicado como se puede observar en la Tabla 9.

*Tabla 9 Datos recopilados en prueba a motocicleta CG125*

<b>% Freno</b>	<b>R.P.M</b>	<b>V (km/h)</b>
0	504.032258	38.003137
0	545.692666	41.144258
0	528.466742	39.845454
0	525.504484	39.622105
0	522.575251	39.401246
0	522.575251	39.401246
0	540.034562	40.717647
49.803922	216.312875	16.309607
49.803922	248.541888	18.739617
49.803922	261.287625	19.700623
49.803922	268.624642	20.253821
49.803922	258.834898	19.515692
49.803922	270.017281	20.358823
49.803922	269.241815	20.300355

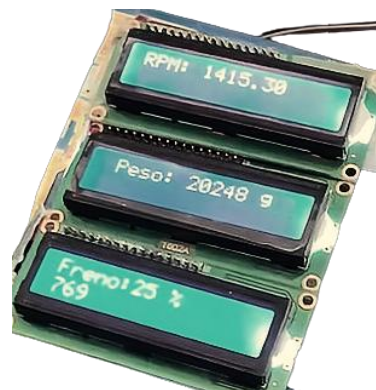
En la primera prueba se observó que, al aplicar carga a la motocicleta, su velocidad comenzó a disminuir hasta alcanzar un punto donde se estabilizó (20 km/h). La siguiente prueba, realizada en el dinamómetro de banco con un motor V6, consistió en llevar el motor a un estado conocido; en este caso, a un régimen de giro y un par motor preestablecidos. Esto implicó acelerar el motor hasta alcanzar una velocidad angular específica mientras se aplicaba una carga determinada.

Como primer paso, se llevó el motor a 1500 r.p.m. y se mantuvo durante un lapso de 5 minutos para asegurar que las revoluciones permanecieran lo más constantes posible. Posteriormente, se incrementó la carga de manera gradual. A medida que se aplicaba carga, fue necesario acelerar el motor para mantener las r.p.m. establecidas, hasta que llegó un punto en el que no fue posible incrementar más la carga sin que disminuyera la velocidad del motor.

La prueba tuvo una duración total de 40 minutos, contando desde el momento en que se encendió el motor hasta que alcanzó su temperatura de trabajo.



*Figura 98 Pruebas realizadas en el dinamómetro de banco con moto V6*

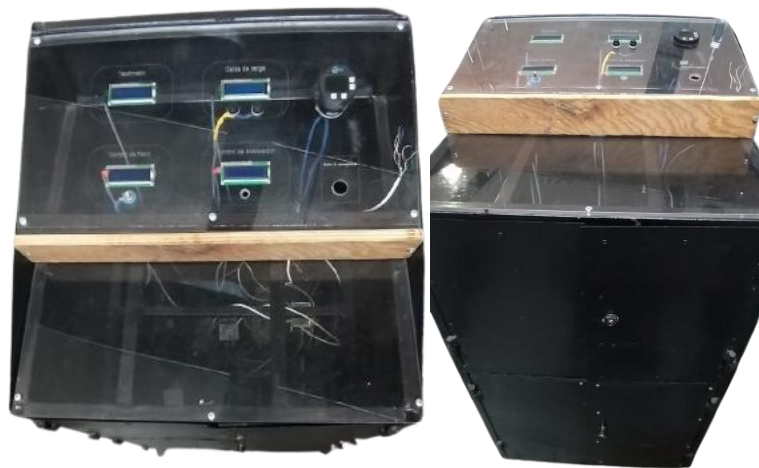


*Figura 99 Pantallas LCD de visualización de los parámetros de velocidad angular del freno, peso leído por la celda de carga empleada para el cálculo del par motor, y porcentaje de ciclo de trabajo aplicado de las pruebas realizadas a 1500 r.p.m. en el dinamómetro*

En la Figura 98 y la Figura 99 se observa la prueba realizada a un régimen de aproximadamente 1500 RPM, con un ciclo de trabajo del 25%, lo que genera un peso de 20 248 g y con un brazo de palanca de 480 mm se obtiene el par aplicado por el freno. A medida que se aplicó carga adicional al motor, este llegó a un punto en el que se detuvo.

También se pudo observar que el comportamiento de la perilla de ajuste del circuito de control fue el adecuado, ya que se realizaron pruebas en los distintos dinamómetros disponibles en el laboratorio UNICE.

Finalmente, se construyó un gabinete diseñado por los miembros del laboratorio, cuyo propósito es resguardar la instrumentación de cada uno de los dinamómetros. Este gabinete está dividido en secciones específicas para cada tipo de instrumento, como se puede observar en la Figura 100.



*Figura 100 Gabinete de resguardo de la instrumentación para los dinamómetros, con pantallas LCD para los parámetros de velocidad angular, celda de carga, porcentaje de aceleración, consumo de combustible y porcentaje de ciclo de trabajo aplicado*

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se abordaron aspectos relacionados con el diseño, construcción y prueba de un circuito de control modular para las unidades de absorción de potencia de corrientes parásitas en el laboratorio de control de emisiones. Este sistema de control se implementó utilizando una señal modulada por ancho de pulso (PWM), lo cual permitió un ajuste preciso del ciclo de trabajo para adaptarse a diferentes unidades de absorción de potencia. Además, se incorporó la posibilidad de controlar el sistema de manera manual. Este modo de control fue implementado para permitir la realización de pruebas rápidas sin necesidad de encender el equipo de cómputo, utilizando únicamente las pantallas LCD para la visualización de los datos. Asimismo, se añadió la opción de controlar el sistema mediante una interfaz gráfica virtual, lo que proporcionó mayor flexibilidad y facilidad en su operación.

También se diseñaron dos sistemas que abordan de manera efectiva dos problemas críticos en el funcionamiento de los dinamómetros de chasis y banco: la seguridad operativa y el control térmico del freno.

En primer lugar, se desarrolló un circuito de paro de emergencia, una herramienta esencial que garantiza la seguridad durante las pruebas. Este sistema está diseñado para actuar en situaciones críticas, evitando daños a los equipos y protegiendo tanto al personal del laboratorio como a los vehículos sometidos a prueba. Permite detener de manera inmediata el proceso en caso de que ocurra una falla o exista un riesgo potencial, representando así un avance significativo en la mejora de la seguridad operativa de los dinamómetros de chasis y de banco.

Además, se diseñó y construyó un sistema de refrigeración específico para prevenir el sobrecalentamiento del freno, provocado principalmente por las corrientes parásitas generadas durante su operación. Las corrientes parásitas, fenómenos eléctricos no deseados, generan un aumento de temperatura en la unidad que, si no se controla adecuadamente, puede comprometer su funcionamiento y reducir su vida útil. Con la implementación del sistema de refrigeración, se logran mitigar estos efectos térmicos, manteniendo al freno dentro de rangos seguros de temperatura y evitando fallas relacionadas con el sobrecalentamiento.

La construcción de estos sistemas constituyen pasos fundamentales para garantizar la fiabilidad y el desempeño del dinamómetro durante jornadas prolongadas de pruebas.

En cuanto a los objetivos planteados, se cumplieron satisfactoriamente en este trabajo. En primer lugar, se describió detalladamente el funcionamiento de los frenos dinamométricos por corrientes parásitas, comprendiendo tanto el origen de las corrientes como su impacto en el rendimiento del freno. En segundo lugar, se logró construir un sistema de control de freno de fácil mantenimiento, lo que garantiza que el sistema pueda ser operado de manera eficiente a lo largo del tiempo, con un mantenimiento sencillo y accesible para los alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Este enfoque también contribuye a reducir los costos asociados al mantenimiento y las reparaciones. Por último, se obtuvieron los datos necesarios para validar el sistema de control de circuito para las unidades de absorción de

potencia, lo cual es esencial para ajustar y calibrar el sistema de manera precisa, asegurando su desempeño óptimo en diferentes unidades de absorción de potencia.

En conclusión, este trabajo no solo mejora los procesos de pruebas experimentales en el laboratorio, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos relacionados con investigaciones llevadas a cabo en los diversos dinamómetros disponibles en el laboratorio.

## **5.1 Trabajo a futuro**

El sistema de paro de emergencia diseñado para los dinamómetros no pudo ser probado en el equipo seleccionado debido a la falla de la junta homocinética, un componente esencial que conecta la flecha de salida del motor con la del freno. Una vez reemplazada la junta, se realizarán las pruebas necesarias para evaluar el funcionamiento del sistema bajo condiciones de carga y en situaciones críticas.

De manera similar, las pruebas del sistema de refrigeración del freno aún no se han llevado a cabo por las mismas limitaciones. En el futuro, se verificará su capacidad para mantener la temperatura operativa dentro de los parámetros recomendados, asegurando un rendimiento eficiente y seguro.

El diseño modular del sistema de actuadores permite la incorporación de nuevos actuadores en el futuro, los cuales podrán ser gestionados desde la interfaz desarrollada. Como parte del plan de trabajo, también se realizarán pruebas de funcionamiento prolongadas en los distintos dinamómetros del laboratorio para garantizar la durabilidad y confiabilidad del sistema.

## 6. Anexos

Tabla 10 Listado de componentes utilizados en el circuito de control

<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Código de componente</b>
Amplificador TL084	1	U2
Borneras de 4	2	J3, J9
Bornera de 2	3	J4, J7, J11
Bornera de 3	4	J1, J2, J6, J10
Diodos 1N4001	2	D1, D2
Transistor BC547	1	Q1
Resistencias de 1 kOhm	8	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7
Resistencias de 10 kOhm		R8
Trimpot de 10 kOhm	1	RV1
Capacitor de 10 uF	2	C1, C2
Diodo Zener 1N4733	1	D4
Diodo Zener 1N4739	1	D5
Potenciómetro de 10 kOhm	3	J10
PIC 16F877A	1	U2
Cristal oscilador de 20 MHz	1	X1
Capacitores de 10 pF	2	C3, C4



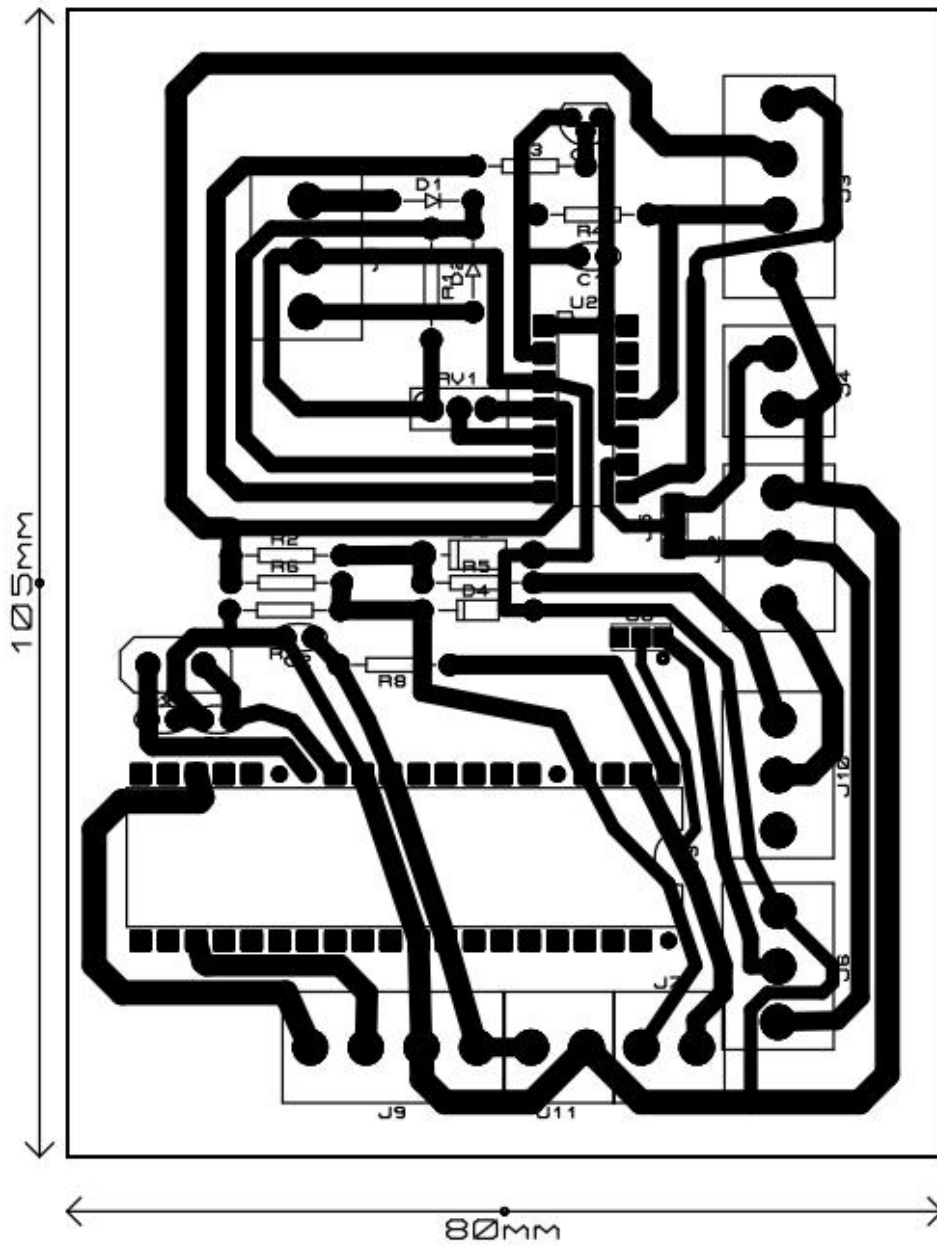


Figura 101 Dimensiones de circuito de control

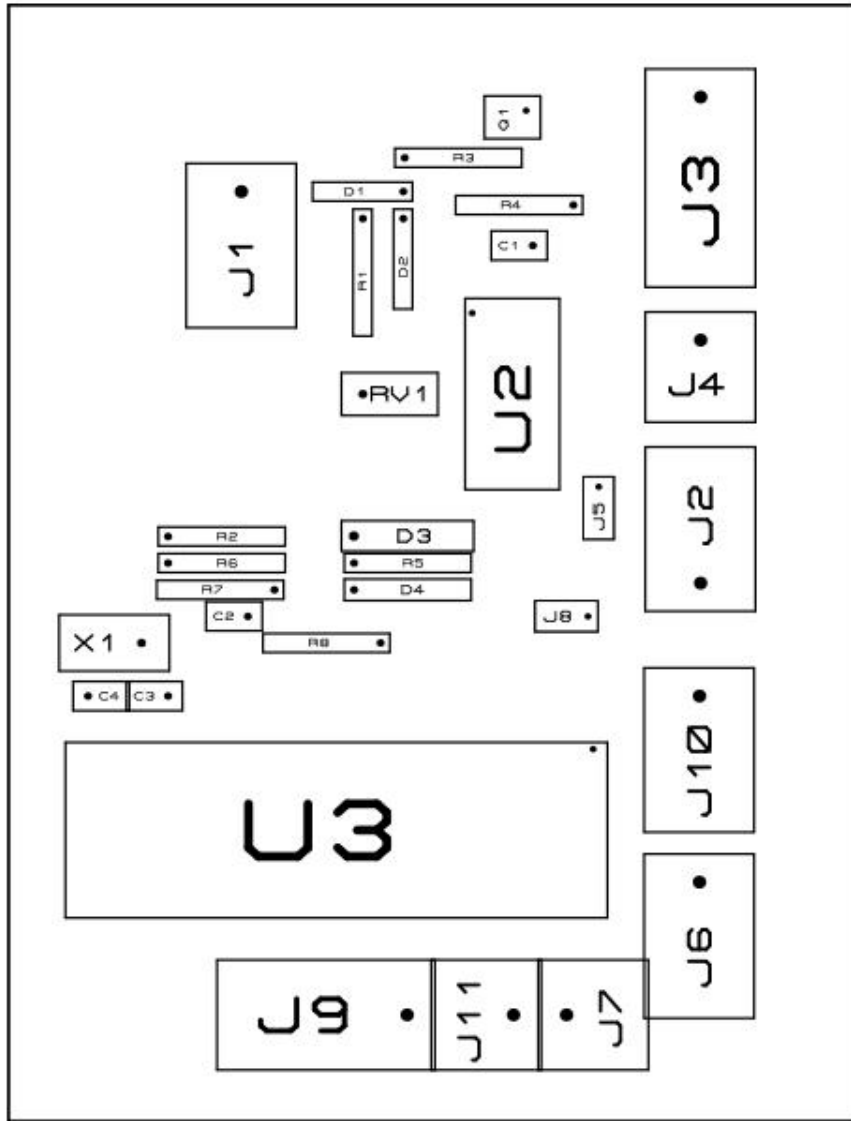
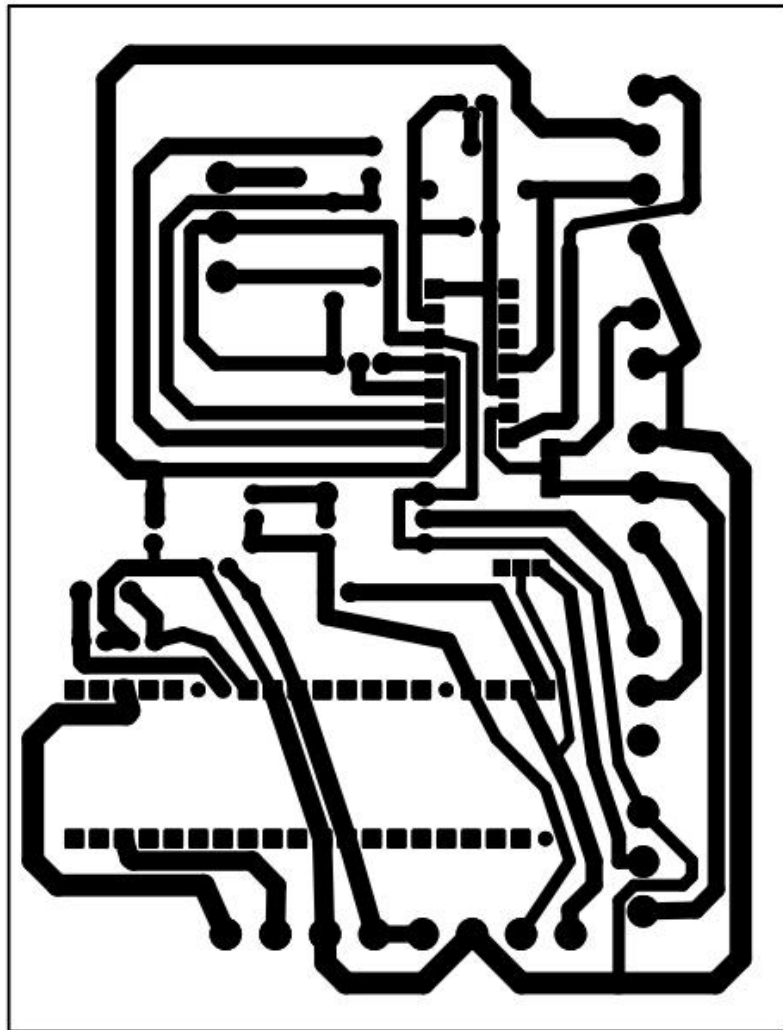
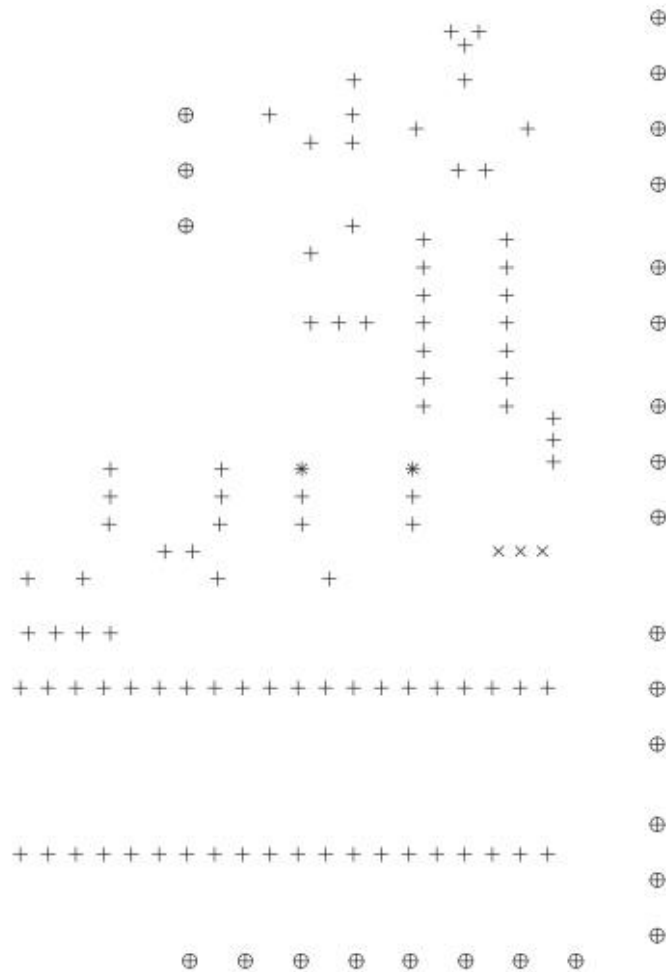


Figura 102 Diagrama de componentes del circuito de control



*Figura 103 Pistas del circuito de control*



SYM	SIZE	PLATED	QTY
+	30th	YES	95
x	38th	YES	3
*	40th	YES	2
⊕	60th	YES	26

Figura 104 Barrenos para el circuito de control

*Tabla 11 Componentes para el circuito de potencia*

<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Código de componente</b>
LCD de 16x2 con I2C	1	J9
SSR 240D45-10sp	1	J3
Puente rectificador MDS-200A 1600 V	1	-

*Tabla 12 Listado de componentes utilizados en el actuador*

<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Código de componente</b>
Bornera de 2	8	J1, J2, J3, J4, J5
Arduino UNO R3	2	ARD1, ARD2
Arduino Mega 2560	1	ARD
DAC MCP4725	1	DAC

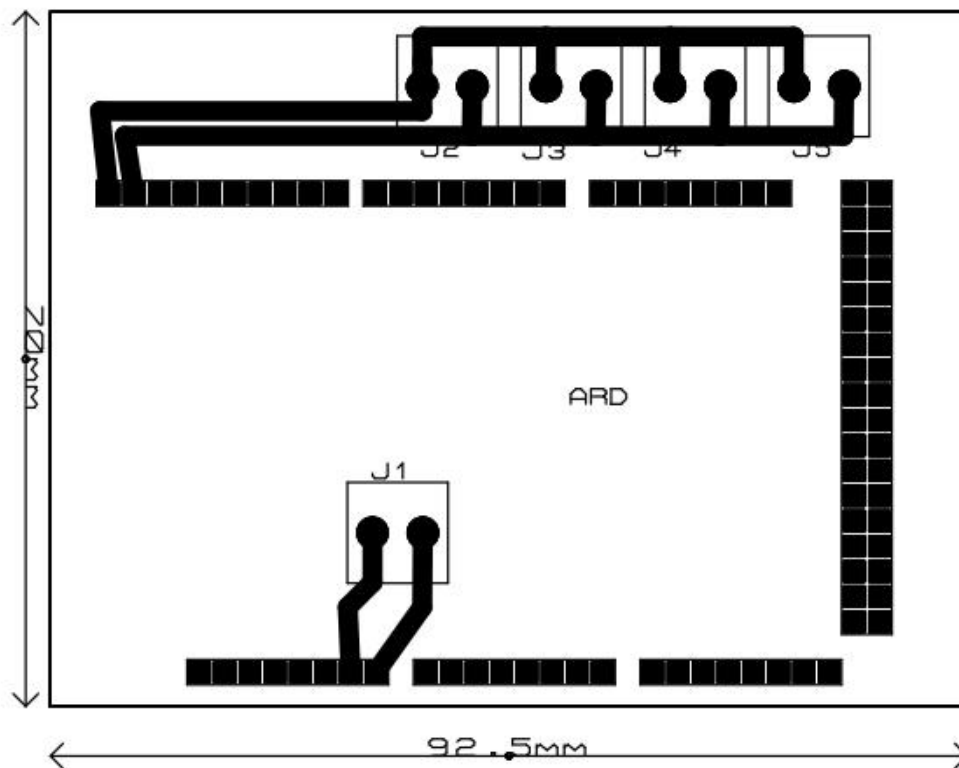


Figura 105 Dimensiones del circuito maestro

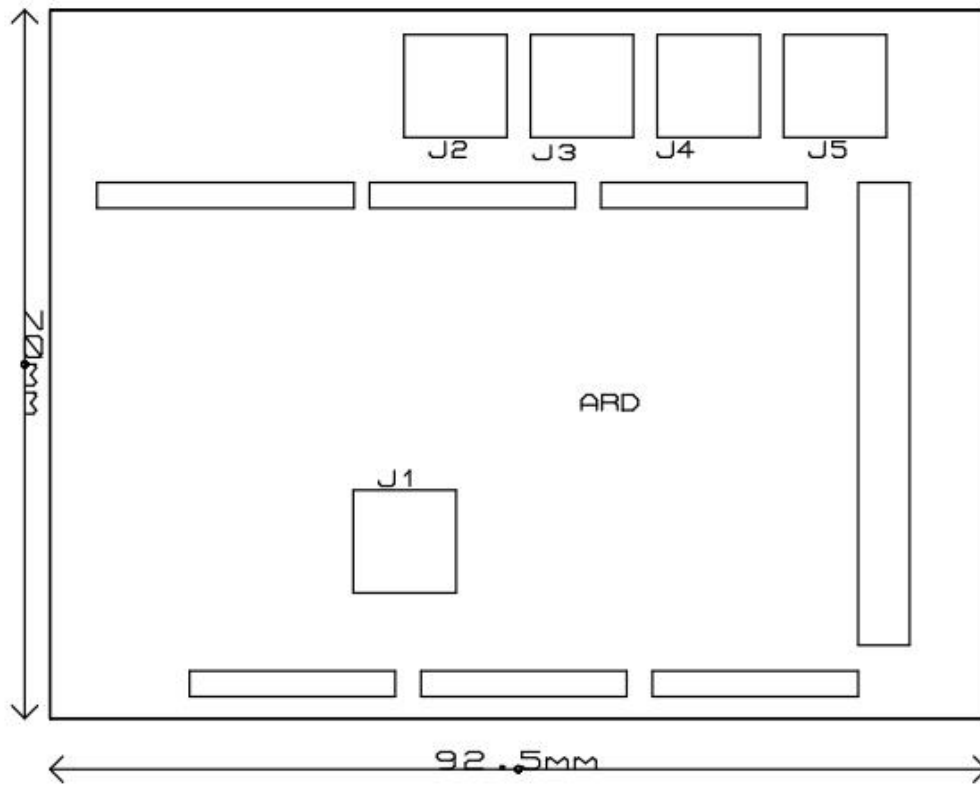
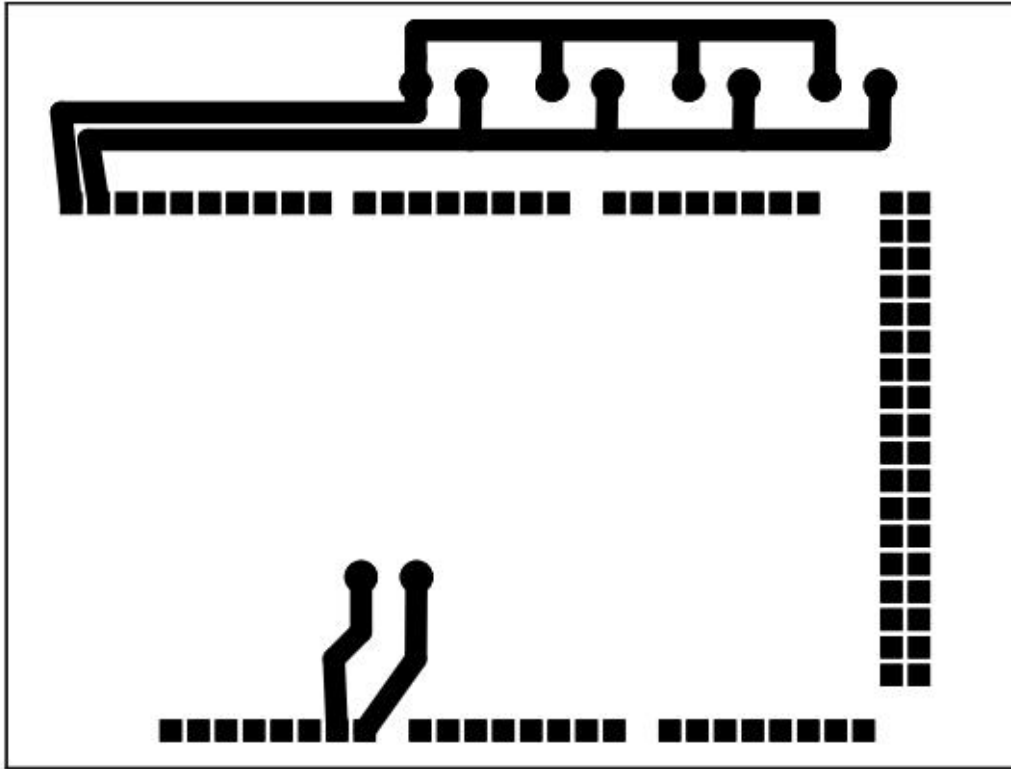
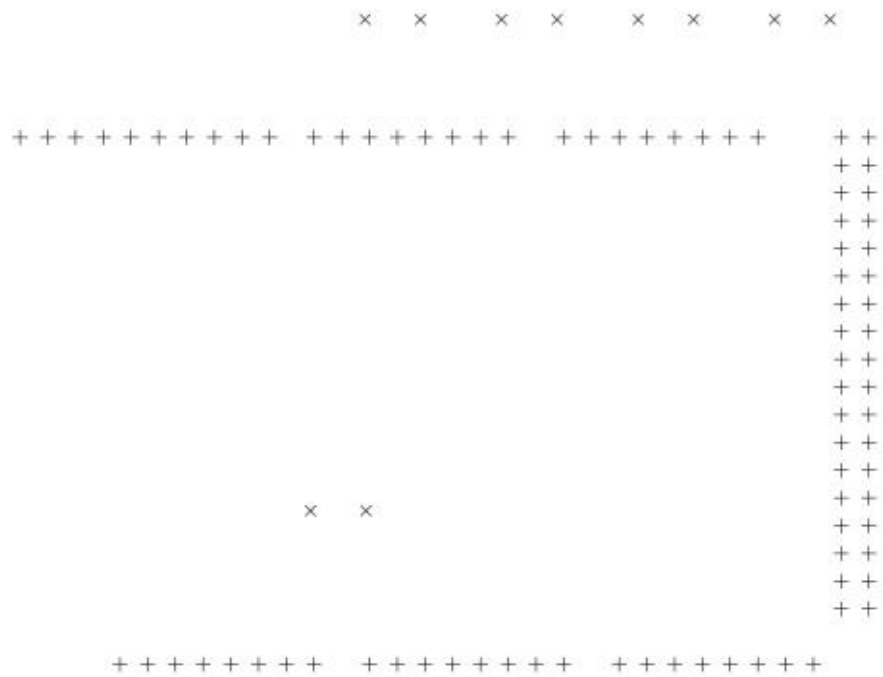


Figura 106 Diagrama de componentes del circuito maestro



*Figura 107 Pistas del circuito maestro*





SYM	SIZE	PLATED	QTY
+	40th	YES	86
X	60th	YES	10

Figura 108 Barrenos del circuito maestro

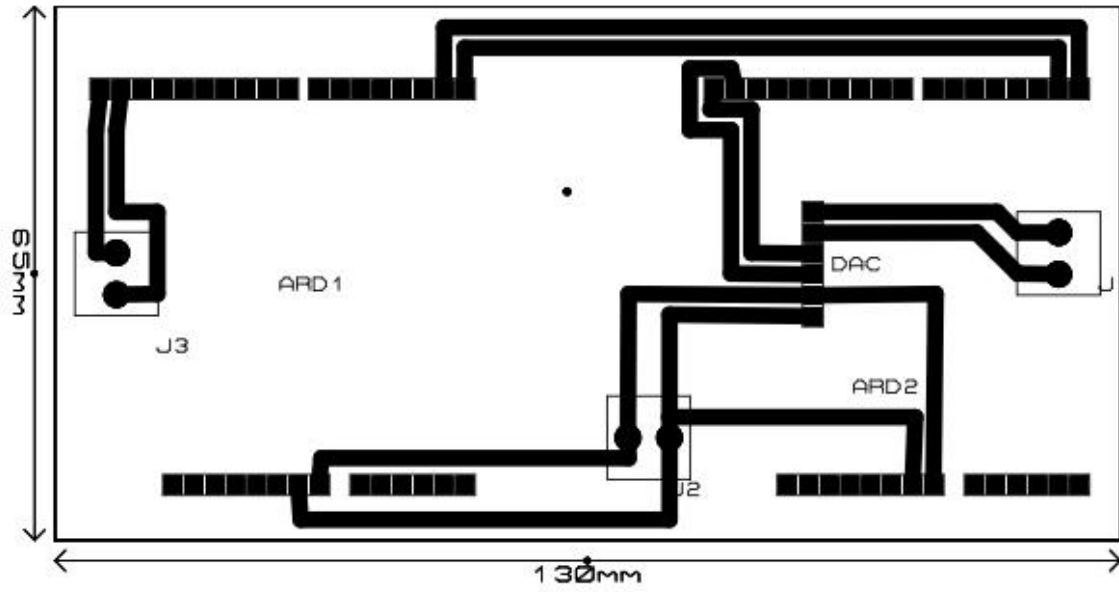


Figura 109 Circuito de DAC

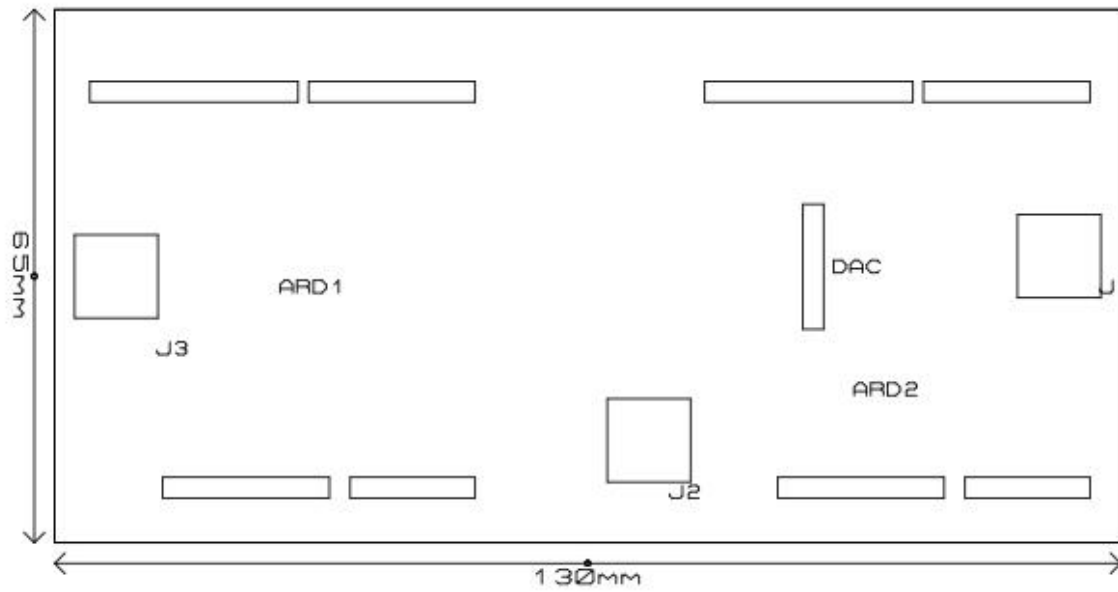


Figura 110 Diagrama de componentes DAC

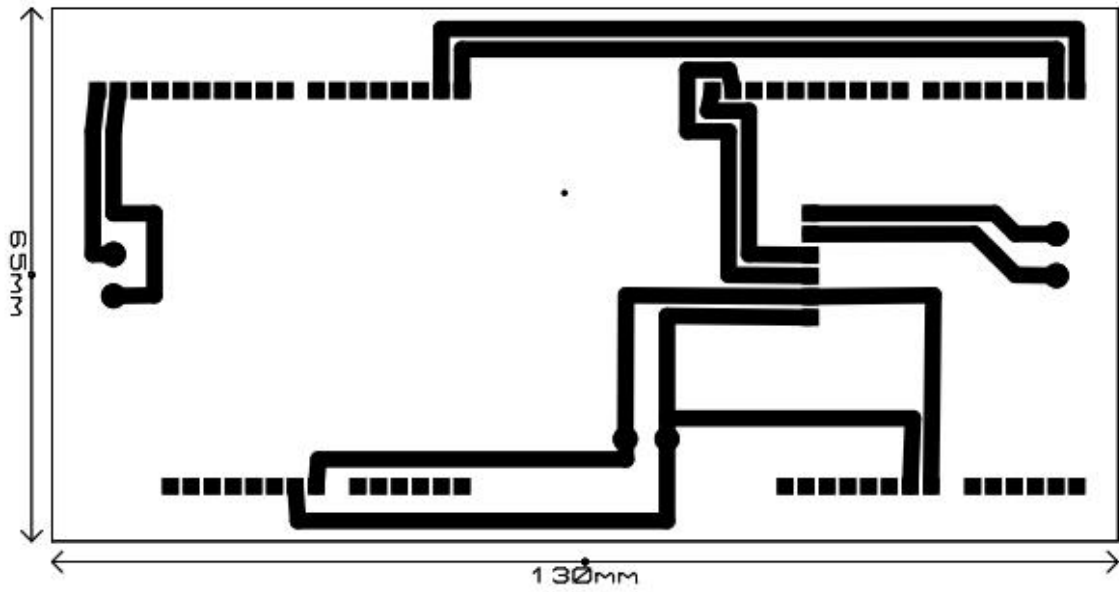
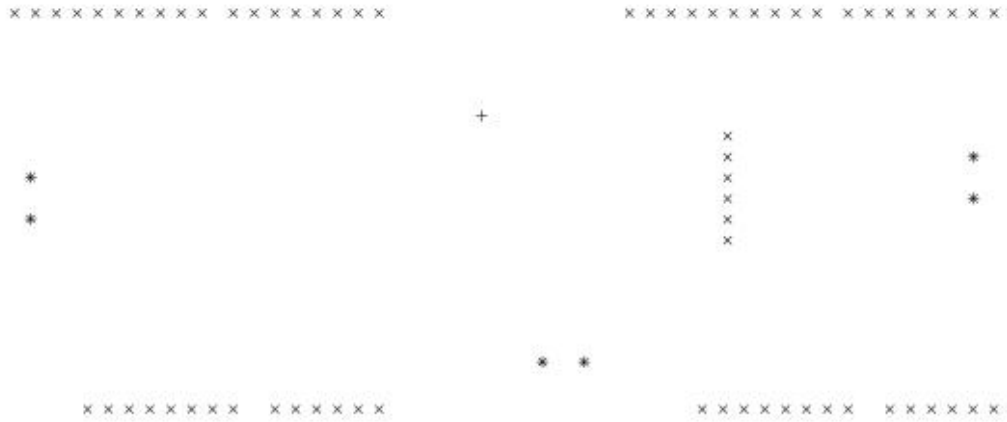


Figura 111 Pistas del circuito DAC



SYM	SIZE	PLATED	QTY
+	15th	YES	1
X	48th	YES	20
*	68th	YES	6

Figura 112 Barrenos del circuito DAC

Tabla 13 Listado de componentes del sistema de refrigeración

Componentes	Cantidad	Código de componente
Fuente de 12v 40A	1	-
Borneras de 2	2	J1, J2
Borneras de 4	1	J4
SSR-40DD	1	J2
Arduino Uno R3	1	ARD1
Sensor MLX90614	1	J4

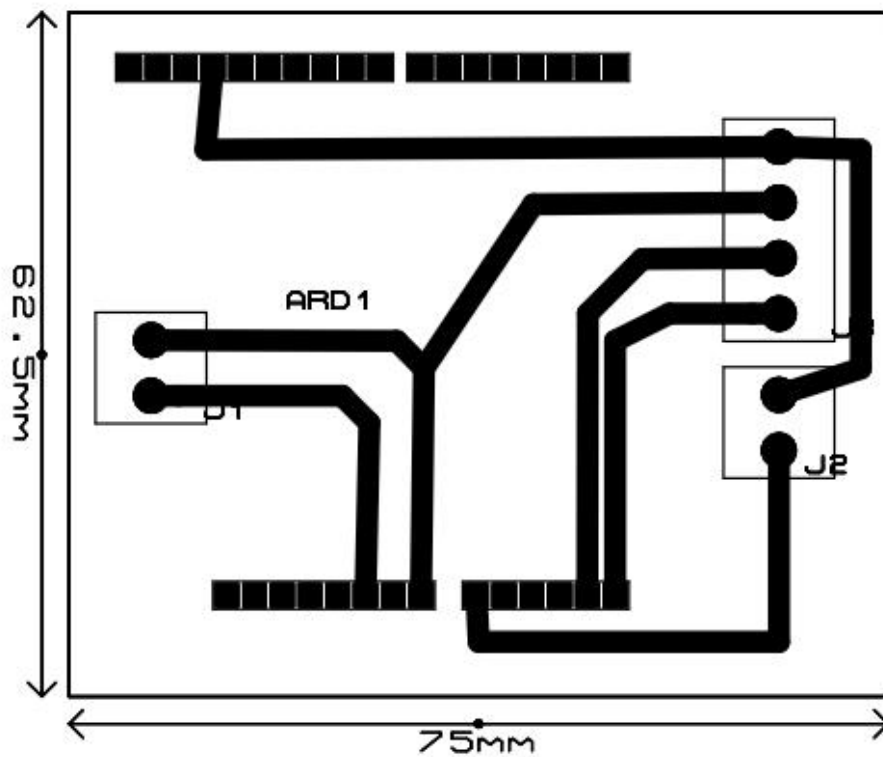


Figura 113 Circuito del sistema de refrigeración

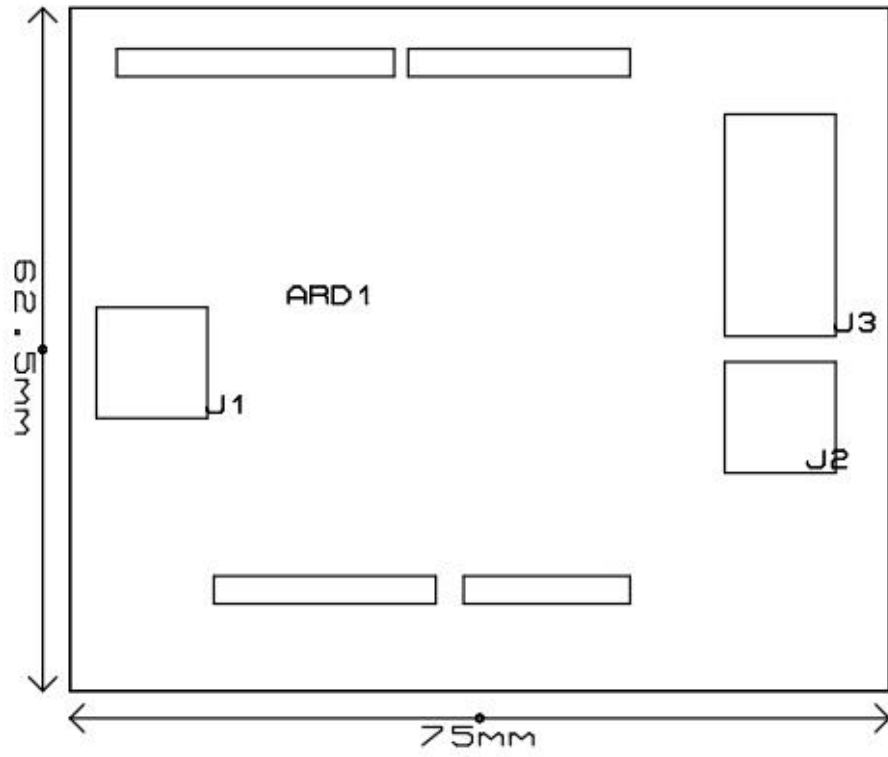


Figura 114 Diagrama de componentes del circuito de refrigeración

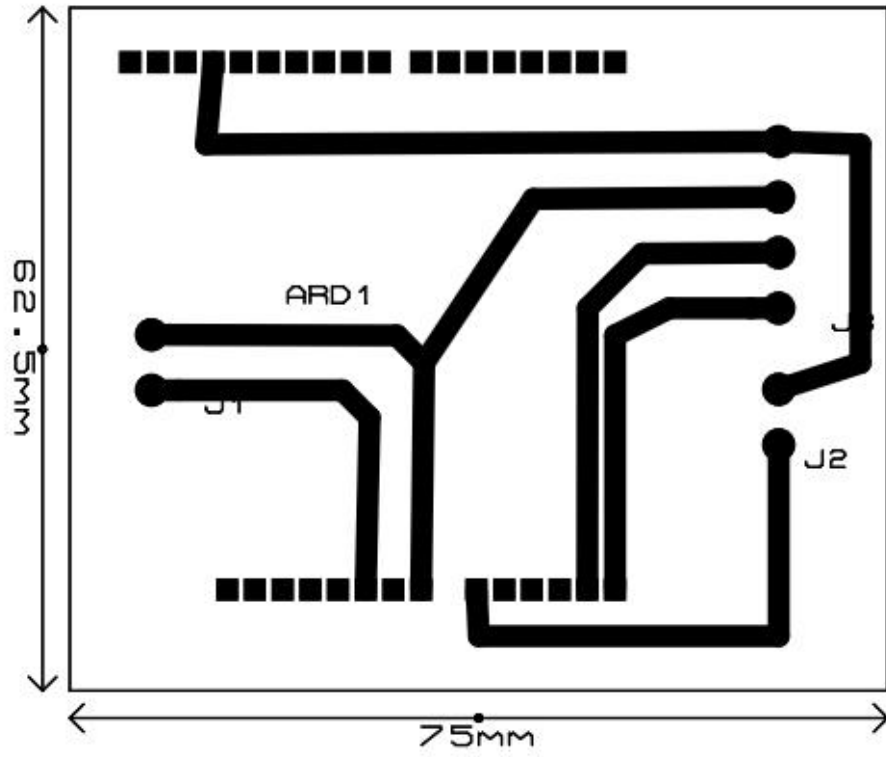


Figura 115 Pistas del Circuito de refrigeración

+++++++ ++++++

x

x

x

x

x

x

x

x

+++++++ ++++++

SYM	SIZE	PLATED	QTY
+	40th	YES	32
X	60th	YES	8

Figura 116 Barrenos del circuito de refrigeración

## 7. bibliografía

- abhishek. *hackatronic*. 1 de 06 de 2020. <https://www.hackatronic.com/arduino-uno-pin-out-and-its-special-features/> (último acceso: octubre de 2024).
- aeronautica generale. *altervista*. abril de 2000.  
[https://aero.altervista.org/propulsione/c1/potenza\\_albero.html](https://aero.altervista.org/propulsione/c1/potenza_albero.html).
- AMAZON. *amazonwebswevices*. 2023. <https://aws.amazon.com/es/what-is/ide/> (último acceso: septiembre de 2024).
- analog devices. «digikey.» 2020. <https://www.digikey.com.mx/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-555-timer#:~:text=En%20el%20modo%20astable%2C%20el,dos%20resistencias%20y%20un%20capacitor.> (último acceso: 22 de agosto de 2024).
- ARDUINO. *analogWrite()*. 2018. <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogwrite/>.
- Arduino. *ARDUINO STORE*. s.f. [https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?srsId=AfmBOopSrha\\_\\_SLdfaEGUyHCfIWx9-0rCtAJ9QbPdYeR\\_DhS77IgQA4](https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?srsId=AfmBOopSrha__SLdfaEGUyHCfIWx9-0rCtAJ9QbPdYeR_DhS77IgQA4) (último acceso: 17 de septiembre de 2024).
- Arranz, Manuel Muñoz. «implementacion y estudio de un sistema de freno regenerativo: aplicacion como carga mecanica.» ingenieria industrial, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATAGENA, 2008.
- «BANCO DE ENSAYO DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA.» licenciatura en ingenieria mecanica , UNIVERSIDAD TECNOLOGIA NACIONAL, 2016.
- café y deep learning. 3 de abril de 2023. <https://cafeytech.substack.com/p/corrientes-de-foucault-su-descubrimiento>.
- Carletti, Eduardo J. 2007.  
<https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/ComunicacionBusI2C.pdf> (último acceso: septiembre de 2024).
- castaño, sergio. *control automatico educacion*. s.f.  
<https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-embebidos/microcontroladores-pic/14-conversion-analogodigital-ad/> (último acceso: 02 de 09 de 2024).
- Chala, Elkin Fabian Cedeño. *vistronica*. 07 de 04 de 2020.  
<https://www.vistronica.com/blog/post/diodo-zenner-como-regulador-de-tension-.html> (último acceso: 05 de 05 de 2024).
- Chávez Reyes, Bernond Prudencio Stephen. «Diseño y fabricación de un freno de pronny.» 2017.
- circuit, some. *PWM con TL494 || 100 Hz - 100 kHz || + Simulación en Multisim*. 2022.
- Comision Reguladora de Energia . 19 de abril de 2016. <https://www.gob.mx/cre/prensa/emite-la-cre-norma-de-emergencia-nom-em-005-cre-2015-especificaciones-de-calidad-de-los>



petroliferos#:~:text=La%20Norma%20de%20emergencia%20NOM,y%20gas%20licuado%20de%20petr%C3%B3leo.&text=COMUNICADO%20DE%20PRENSA-,Norma%20de.

COMSOL. «How eddy current breaking technology is freeing us from friction .» 2019.

Departamentgo de maquinas y motores termicos. 20 de mayo de 2001.  
<http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/bancomot.htm#:~:text=TIPOS%20DE%20FRENOS%20DINAMOM%C3%89TRICOS.,Frenos%20hidr%C3%A1ulicos.>

departamento de fisica aplicada . junio de 2018.  
<https://www.areatecnologia.com/mecanismos/freno-magnetico.html>.

Diario oficial de la federacion. 19 de febrero de 2018.  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018#gsc.tab=0).

Diario oficial de la federacion. «NORMA Oficial Mexicana NOM-047-SEMARNAT-2014.» Ciudad de Mexico, 2014.

«diseño y fabricacion de un freno prony .» UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA, 2017.

Electgpl. «PWM con 555 o 556.» 2013.  
[didacticaselectronicas.com/index.php/semiconductores/circuitos-digitales/temporizadores-](http://didacticaselectronicas.com/index.php/semiconductores/circuitos-digitales/temporizadores-)

electricity magnetism. *electricity magnetism*. 26 de octubre de 2023. <https://www.electricity-magnetism.org/es/frenos-magneticos/>.

Euipo editorial Etece . *CONCEPTO*. 5 de 08 de 2021. <https://concepto.de/transistor/> (último acceso: 03 de 05 de 2024).

Fandom, Ferropedia. «Freno electromagnetico de patin.» s.f.  
[https://ferrocarriles.fandom.com/wiki/Freno\\_electromagn%C3%A9tico\\_de\\_patin](https://ferrocarriles.fandom.com/wiki/Freno_electromagn%C3%A9tico_de_patin) (último acceso: 6 de enero de 2024).

FLUKE. *FLUKE.com*. s.f. [https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-un-diodo#:~:text=Un%20diodo%20es%20un%20dispositivo,fluir%20en%20la%20direcci%C3%B3n%20puesta](https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-un-diodo#:~:text=Un%20diodo%20es%20un%20dispositivo,fluir%20en%20la%20direcci%C3%B3n%20puesta.). (último acceso: 1 de 05 de 2024).

forrister, Thomas. *comsol*. 6 de marzo de 2019. [https://www.addlink.es/noticias/comsol/2215-frenado-foucault#:~:text=El%20frenado%20por%20corrientes%20de%20Foucault%20es%20un%20efecto%20que,magn%C3%A9ticas%20m%C3%B3viles%20como%20los%20im%C3%A1nes](https://www.addlink.es/noticias/comsol/2215-frenado-foucault#:~:text=El%20frenado%20por%20corrientes%20de%20Foucault%20es%20un%20efecto%20que,magn%C3%A9ticas%20m%C3%B3viles%20como%20los%20im%C3%A1nes.).

Gabriela, Garcia Guerrero. «Migracion y renovaion de un sistema empleado para evaluar emisiones automotrices con interfaz virtual .» ciudad de Mexico, 2009.

Gallo, Omar D, Gonella, Rubén M. J, Ferreyra, Diego M, & Díaz, Alberto J. *scielo*. 2017.  
[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1851-17162017000100012&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-17162017000100012&lng=en&tlng=en).

- Giraldo, Sergio A. Castaño. *control automatico*. s.f.  
<https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-embibidos/microcontroladores-pic/comunicacion-i2c/> (último acceso: septiembre de 2024).
- gobierno de mexico. «NOM-042-SEMARNAT-2003.» ciudad de mexico, 2005.
- Gomez, Enrique. *rincon ingenieril*. 19 de diciembre de 2017. <https://www.rinconingenieril.es/ques-pwm-y-para-que-sirve/>.
- Granda, Eduardo Javier. «Editoresrsl.» 2018. [https://editoresrsl.com.ar/sites/default/files/ie332\\_granda\\_dispositivos.pdf](https://editoresrsl.com.ar/sites/default/files/ie332_granda_dispositivos.pdf) (último acceso: octubre de 2024).
- Henriquez, Eduardo. «PWM con PIC16F877A: Modulos y Registros Involucrados.» 2013.  
<https://es.slideshare.net/wahyohenriquez/pwm-con-pic16f877a-modulos-y-registros-involucrados> (último acceso: 30 de marzo de 2024).
- Igoe, Tom. *Word Press*. 21 de junio de 2009. <https://galaxi0.wordpress.com/el-puerto-serial/> (último acceso: septiembre de 2024).
- joy, Anju thangam. *Tameson*. 10 de febrero de 2023. <https://tameson.es/pages/actuador> (último acceso: 3 de septiembre de 2024).
- Junior, Antonio Pertence. *Amplificadores Operacionales y filtros activos*. buenos aires : McGraw-Hill, 2008.
- kenio, Cara. *dademuchconnection*. 22 de marzo de 2019.  
<https://dademuchconnection.wordpress.com/2019/03/22/sistema-de-control-de-motor-dc-en-matlab-pwm-pulse-width-modulation/>.
- kojlhase, kaleb. *digkey*. 15 de septiembre de 2020. [https://www.digkey.com.mx/es/blog/pulse-width-modulation?srsltid=AfmBOooO7\\_\\_t2b3Gr3rDpCMpUujpdvuN4wkQLpGZY8o1xVxcWss1Y16T](https://www.digkey.com.mx/es/blog/pulse-width-modulation?srsltid=AfmBOooO7__t2b3Gr3rDpCMpUujpdvuN4wkQLpGZY8o1xVxcWss1Y16T).
- llamas, Luis. 15 de noviembre de 2016. <https://www.luisllamas.es/salida-analogica-real-con-arduino-y-dac-de-12bits-mcp4725/> (último acceso: octubre de 2024).
- Luna, Nelson Galo Gonzalez. *Sistema didactico para comunicacion serial entre dos computadores personales*. Tesis de grado, QUITO/EPN/1992, 1992.
- Matias. «Banco de ensayo para motores con freno de corrientes parasitas.» FRVM, UNIVERSIDAD TECNOLOGIA NACIONAL , 2021.
- microelectronic integrated systems. «Alldatasheet.com.» 03 de octubre de 2007.  
<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/218975/ETC2/MLX90614/97/1/MLX90614.html> (último acceso: 03 de junio de 2024).
- MOUSER ELECTRONICS. «MOUSER ELECTRONICS.» s.f.  
<https://www.mouser.mx/ProductDetail/onsemi->

- Fairchild/BC547?qs=UMEuL5FsraAqhv1CRuL1g%3D%3D (último acceso: 03 de 05 de 2024).
- Muñoz, Julia. *autofact*. 15 de febrero de 2023. <https://www.autofact.com.mx/blog/comprar-carro/antecedentes/norma-euro-6>.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR. *LM556*. marzo de 2000. [didacticaselectronicas.com/index.php/semiconductores/circuitos-digitales/temporizadores](http://didacticaselectronicas.com/index.php/semiconductores/circuitos-digitales/temporizadores)- (último acceso: 30 de marzo de 2024).
- PINEDA, FRANCISCO GONZÁLEZ. «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS.» tlaxcala, 2006.
- Ramses, Velazquez Godinez. *Slideshare*. 20 de enero de 2013. <https://es.slideshare.net/slideshow/sistema-de-control-por-computadora/16092388#4> (último acceso: septiembre de 2024).
- Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll. *AMPLIFICADORES OPERACIONALES Y CIRCUITOS INTEGRADOS LINEALES*. estado de mexico: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, SA , 1993.
- Sancho, José Ramón Vaello. *automatismoindustrial*. s.f. <https://automatismoindustrial.com/cursos-carnet-instalador-baja-tension/d-automatizacion/1-2-control-de-potencia-aparamenta-electrica/puente-rectificador/> (último acceso: 04 de 05 de 2024).
- Schweber, Bill. *DIGIKEY*. 19 de 05 de 2021. <https://www.digikey.es/es/articles/the-fundamentals-of-digital-potentiometers> (último acceso: 01 de 05 de 2024).
- SENER. «Balance Nacional de Energia.» Ciudad de Mexico, 2021.
- solectro. 26 de septiembre de 2020. [https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38?srsId=AfmBOooYbhtbpyLc9Wkvuzl\\_-T-m8Dbu3leDy9V7cdlx\\_teAk4Rtr\\_mM](https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38?srsId=AfmBOooYbhtbpyLc9Wkvuzl_-T-m8Dbu3leDy9V7cdlx_teAk4Rtr_mM).
- Soto, Pacheco y Jose Alfonso. «corrientes de Foucault medida de conductividad eléctrica por inducción electromagnética.» UNIVERSIDAD DE VALENCIA , 2008.
- ST. «ALLDATASHEET.ES.» s.f. <https://html.alldatasheet.es/html-pdf/25385/STMICROELECTRONICS/TL084/1619/1/TL084.html> (último acceso: 01 de 05 de 2024).
- TECMIKRO. «PWM PIC - Modulación de Ancho de Pulso.» 2024. <https://tecmikro.com/content/69-pwm-pic-modulacion-de-ancho-de-pulso> (último acceso: 30 de marzo de 2024).
- Tei. *Tei*. 2010. <http://www.teii.com.mx/relevadores-estado-solido-ssr.html#:~:text=Los%20relevadores%20de%20estado%20s%C3%B3lido%20constan%20de%20un%20sensor%20el,sirenas%2C%20buzzer%2C%20etc%C3%A9tera>). (último acceso: 04 de 05 de 2024).
- TELMA. «Telma Retarder Inc.» 2020. <https://www.telmausa.com/technical-support/manuals-guides?view=article&id=87#>.

- TEXAS INSTRUMENTS. «TL 494 Controlador PWM de 40 V, 0.2 A y 300 kHz.» julio de 2022.  
<https://www.ti.com/product/es-mx/TL494> (último acceso: 31 de marzo de 2024).
- torres, Coloma. *diseño y construcción del sistema de freno hidráulico para el banco de pruebas del motor de combustión interna de 1400 cc de la universidad politécnica salesiana.*  
universidad politecnica salessiana, sede quito: ingeniería mecánica, 2021.
- UAEH. *ARDUINO.* s.f.  
[http://ceca.uaeh.edu.mx/informatica/oas\\_final/red4\\_arduino/potencimetro.html#:~:text=Un%20potenci%C3%B3metro%20es%20un%20resistor,corriente%20se%20utilizan%20los%20re%C3%B3stos](http://ceca.uaeh.edu.mx/informatica/oas_final/red4_arduino/potencimetro.html#:~:text=Un%20potenci%C3%B3metro%20es%20un%20resistor,corriente%20se%20utilizan%20los%20re%C3%B3stos). (último acceso: 1 de 05 de 2024).
- Universidad de Buenos Aires. «Universidad de Buenos Aires.» noviembre de 2023.  
<https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3651>.
- «vista de caracterización mecánica de un motor eléctrico de corriente alterna utilizando un freno de Foucault.» s.f.  
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4057/2215> (último acceso: 3 de enero de 2024).
- Wagenbach, Jürgen. *PWM, PWM scheme (2 level, 3 level), Current ripple, Motor heating.* 2023.  
<https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360012627240-PWM-PWM-scheme-2-level-3-level-Current-ripple-Motor-heating>.
- Weis, Olga. *Serial Port Monitor.* 3 de febrero de 2020. <https://www.serial-port-monitor.org/es/articles/serial-communication/> (último acceso: 17 de septiembre de 2024).
- wexter home. *Wexter home.* s.f. <https://www.wexterhome.com/curso-arduino/enviar-datos-y-leer-puerto-serie/> (último acceso: septiembre de 2024).