



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Área Electromecánica



Acondicionamiento de sensores de corriente con aplicaciones en máquinas
herramientas

Tesis

Como parte de los requisitos para obtener el título de licenciatura de Ingeniero
Electromecánico

Línea terminal:

Mecatrónica

Presenta:

Duran Mondragón Alan Jenaro

Expediente: 209388

Dirigida por:

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

San Juan del Río, Querétaro, enero de 2026

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultada de Ingeniería
Campus San Juan del Rio



Acondicionamiento de sensores de corriente con aplicaciones en máquinas
herramientas

Tesis

Como parte de los requisitos para obtener el título de licenciatura de Ingeniero
Electromecánico Línea terminal en Mecatrónica

Presenta:

Duran Mondragón Alan Jenaro

Expediente: 209388

Sinodales

DR. RENÉ DE JESÚS ROMERO TRONCOSO (5119)
Presidente

DR. JUAN JOSÉ SAUCEDO DORANTES (15647)
Secretario

DR. ARTURO YOSIMAR JAEN CUELLAR (11825)
Vocal

DR. MIGUEL TREJO HERNÁNDEZ (6443)
Suplente

San Juan del Río, Querétaro, enero de 2026

Dedicatoria

***Dedico este trabajo de investigación
con mucho cariño a mi familia.***

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá Sara y a mi papá Jenaro, por su amor y apoyo, además de ser una gran inspiración para continuar mis sueños.

A mis hermanos mayores Axel y Luis, por siempre motivarme a siempre dar lo mejor de mí y por ser grandes ejemplos a seguir.

A mi director de tesis, Dr. René de Jesús Romero Troncoso por su disposición para ayudarme y sus consejos sobre este trabajo.

A mis asesores, Dr. Juan José Saucedo Dorantes, Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar y al Dr. Miguel Trejo Hernández por su retroalimentación, consejos y apoyo en este trabajo.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería, por su dedicación en la enseñanza y su disposición a siempre resolver una duda.

Al personal de la UAQ Campus SJR ya que sin su trabajo y esfuerzo este trabajo no sería posible.

A mis amigos, por siempre estar presentes y darme la confianza necesaria para continuar.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema capaz de monitorear la corriente en los dos estados de un motor de inducción de una máquina herramienta: el transitorio y el estacionario. Los sistemas convencionales de monitoreo de corriente para motores de inducción suelen requerir una calibración separada para cada estado debido a la variación significativa de la corriente entre el estado transitorio y el estacionario, lo que hace que la medición simultánea sea un desafío. En contraste, este módulo está diseñado para realizar lecturas de ambos estados de manera simultánea y automática, superando esta limitación. El sistema está basado en la teoría de filtros e integrados, logrando así cumplir con los principios de instrumentación para obtener una lectura correcta en ambas resoluciones. Este proyecto atiende las necesidades de la industria 4.0, con el objetivo de realizar un monitoreo automatizado con parámetros estandarizados de resolución para la lectura de ambos estados.

El trabajo consta de cuatro fases principales. La primera fase es el diseño y simulación de las configuraciones de filtrado y amplificación que se utilizarán. Posteriormente, se pasa a la segunda fase, que consiste en la prueba física, donde el circuito medirá la corriente de un dispositivo diferente al caso de estudio (por ejemplo, una tostadora). Esta etapa permite comprobar el funcionamiento tanto del circuito como de los sensores. Una vez superada la prueba, se procederá a realizarla con el caso de estudio. En la tercera etapa, se lleva a cabo el diseño de la PCB (Placa de circuito impreso), tomando como base la norma IPC-2152 para el diseño de circuitos impresos, además de su dimensionamiento para el gabinete. Finalmente, se procede con el armado del módulo y se realiza un muestreo.

Palabras clave: *Motor de inducción, monitoreo de corriente, estado transitorio, estado estacionario, monitoreo simultáneo, teoría de filtros, principios de instrumentación, industria 4.0, monitoreo automatizado, diseño de PCB, norma IPC-2152.*

Summary

This work presents the development of a system capable of monitoring the current in the two states of an induction motor in a machine tool: the transient and the stationary states. Conventional current monitoring systems for induction motors typically require separate calibration for each state due to the significant variation in current between the transient and steady states, making simultaneous measurement challenging. In contrast, this module is designed to perform readings for both states simultaneously and automatically, overcoming this limitation. The system is based on the theory of filters and integration, ensuring compliance with the principles of instrumentation to obtain proper readings in both resolutions. This project aligns with the needs of Industry 4.0, aiming to perform automated monitoring with standardized resolution parameters for reading both states.

The project consists of four main phases. The first phase involves the design and simulation of the filtering and amplification configurations to be used. The second phase consists of physical testing, where the circuit will measure the current of a device different from the case study (e.g., a toaster). This step allows for verification of both the circuit's and the sensors' functionality. Once the test is successful, it will be repeated with the case study. In the third phase, the PCB (Plated Circuit Board) design is carried out following the IPC-2152 standards for printed circuits, along with its sizing for the cabinet. Finally, the module is assembled, and sampling is conducted.

Keywords: *Induction motor, current monitoring, simultaneous monitoring, transient state, stationary state, filter theory, instrumentation principles, Industry 4.0, automated monitoring, PCB design, IPC-2152 standards.*

Índice General

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Resumen.....	v
Summary.....	vi
Índice General	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Hipótesis	6
1.4 Justificación.....	6
1.5 Objetivos.....	6
1.5.1 Objetivo General.....	6
1.5.2 Objetivos particulares	7
Capítulo 2. Marco Teórico	7
2.1 Sensores de Efecto Hall.....	7
2.1.1 Circuito cerrado	8
2.1.2 Circuito abierto	9
2.2 Transformador de corriente.....	9
2.3 YHDC HSTS023R (Sensor de Efecto Hall).....	11
2.4 SCT013-000 SCT013 (Transformador de corriente).....	12
2.5 Cadena de instrumentación.....	13
2.6 Fuente de voltaje dual regulada	13
2.7 Amplificadores operacionales (op-amp)	14
2.7.1 Amplificador no inversor.....	15
2.7.2 Amplificador de instrumentación AD620	15
2.8 Filtro	16
2.9 Filtro Butterworth KHN inversor bi-cuadrático.....	17
2.10 Transformada de Fourier.....	18
2.11 Motor de inducción de la máquina herramienta (Caso de estudio).....	18
Capítulo 3. Metodología.....	20
3.1 Sensores	21

3.2 Fuente Dual	24
3.3 Preamp	26
3.4 Amp	27
3.5 Filtrado	28
3.6 Circuito final.....	32
3.7 PCB.....	37
3.7.1 Caja del proyecto.....	43
3.8 Muestreo	47
3.9 Análisis de los datos	53
Capítulo 4. Resultados.....	58
4.1 Sistema de acondicionamiento.....	58
4.2 Torno.....	61
4.3 Resistencia (Pistola de calor).....	65
4.4 Motor con y sin espiras en corte	67
Capítulo 5. Conclusiones	69
5.1 Prospectivas	70
5.2 Normas	71
5.2.1 IEC 61000-4-7	71
5.2.2 IEEE 1159-2019.....	71
5.2.3 IPC-2152	71
5.3 Seguridad.....	73
5.3.1 Medidas de seguridad de FLUKE (NOM-029-STPS-2011).....	73
5.4 Materiales.....	74
5.5 Usos y aplicaciones del proyecto	75
5.6 Bibliografía	76
5.7 Anexos.....	80
5.7.1 Anexo 1: Código para el análisis FFT del Torno.....	80
5.7.2 Anexo 2: Código para el análisis FFT de la Pistola de calor	86
5.7.3 Anexo 3: Código para el análisis FFT del Motor sano y con espiras en corto.....	89

Índice de Figuras

Figura 1 Efecto Hall (Uraný, 2023)	7
Figura 2 Configuración del circuito cerrado en un sensor de efecto Hall (Administración, 2024)	8
Figura 3 Configuración del circuito abierto de un sensor de efecto Hall (Administración, 2024)	9
Figura 4 Funcionamiento del transformador de corriente (Maloy Smith, G., 2024)	10
Figura 5 Sensor de corriente de efecto Hall HSTS023R (Autoría propia)	11
Figura 6 Transformador de corriente SCT013 (Autoría propia)	12
Figura 7 Cadena de Instrumentación (Autoría propia)	13
Figura 8 Fuente de voltaje dual (EasyEDA - Online PCB Design & Circuit Simulator, 2025)	14
Figura 9 Conexiones del TL084 (Texas Instruments, 2024)	14
Figura 10 Conexiones del Amplificador no inversor (Ohms, 2024)	15
Figura 11 Conexiones del AD620 (alldatasheet.com, 2024)	15
Figura 12 Respuesta en frecuencia de un filtro pasa altas (Administrado, 2023)	16
Figura 13 Filtro Butterworth KHN inversor bi-cuadrático (Mohamed Soliman, 2008)	17
Figura 14 Torno ROMI (Autoría propia)	19
Figura 15 Diagrama de la metodología (Autoría propia)	20
Figura 16 Medición del caso de estudio (Autoría propia)	21
Figura 17 Pinza amperimétrica FLUKE (Autoría propia)	22
Figura 18 Medición de la pinza amperimétrica (Autoría propia)	22
Figura 19 Medición del sensor de toroide (Autoría propia)	23
Figura 20 Medición del sensor de efecto hall (Autoría propia)	23
Figura 21 Fuente dual montada en protoboard (Autoría propia)	25
Figura 22 Señal del sensor de efecto hall sin offset (Autoría propia)	26
Figura 23 Amplificador no inversor en la simulación («Circuitjs», 2016)	27
Figura 24 Señal del sensor de efecto Hall amplificada con un valor de 3 (Autoría propia)	28
Figura 25 Filtro Butterworth en la simulación («Circuitjs», 2016)	29
Figura 26 Filtro Butterworth con los valores modificados («Circuitjs», 2016)	29
Figura 27 Circuito del filtro Butterworth en físico (Autoría propia)	30
Figura 28 Comparación de la entrada y salida del filtro Butterworth físico (Autoría propia)	31
Figura 29 Circuito final (Autoría propia)	32
Figura 30 Posicionamiento de los sensores (Autoría propia)	32
Figura 31 Respuesta del sensor de efecto Hall (Autoría propia)	33
Figura 32 Respuesta del sensor de toroide (Autoría propia)	33
Figura 33 Colocación de los sensores en la condeleta para el torno (Autoría propia)	35
Figura 34 Lectura del sensor del estado estacionario (Autoría propia)	36
Figura 35 Lectura del estado transitorio (Autoría propia)	36
Figura 36 Esquemático del Circuito final (EasyEDA - Online PCB Design & Circuit Simulator, 2025)	37
Figura 37 Diseño de la PCB (EasyEDA - Online PCB Design & Circuit Simulator, 2025)	38
Figura 38 Cotización de la PCB (UNIT Electronics, 2025)	39
Figura 39 Propuesta técnica de la PCB (UNIT Electronics, 2025)	39
Figura 40 Placas PCB (Autoría propia)	40
Figura 41 PCB con los componentes (Autoría propia)	41
Figura 42 Señal del sensor de Hall de la PCB (Autoría propia)	42
Figura 43 Señal del sensor de toroide de la PCB (Autoría propia)	42

Figura 44 Caja del proyecto (COMPONENTESARAGON, 2024)	43
Figura 45 Base de la caja del proyecto (Autoría propia)	44
Figura 46 Separación de la PCB con la caja (Autoría propia)	44
Figura 47 Interruptor y foco piloto de la caja (Autoría propia).....	45
Figura 48 Conectores para las entradas y salidas de la PCB (Autoría propia).....	45
Figura 49 PCB en la Caja del proyecto (Autoría propia)	47
Figura 50 Tarjeta de adquisición de National Instruments NI USB-6211 (Autoría propia)	47
Figura 51 Colocación del sistema de acondicionamiento y los sensores para la prueba del torno (Autoría propia).....	48
Figura 52 Señales de los sensores, señal azul (sensor de toroide) y señal amarilla (sensor de efecto Hall) (Autoría propia)	49
Figura 53 Pistola de calor TRUPER (Autoría propia).....	49
Figura 54 Especificaciones de la pistola de calor (Autoría propia).....	50
Figura 55 Motor con espiras en corte (Autoría propia)	50
Figura 56 Placa de datos del motor (Autoría propia).....	51
Figura 57 Variador de frecuencia (Autoría propia)	51
Figura 58 Colocación de los sensores (Autoría propia).....	52
Figura 59 Resistencia para las espiras en corto (Autoría propia).....	52
Figura 60 Tablero para seleccionar el número de espiras en corto (Autoría propia)	53
Figura 61 Señales de la corriente del torno de la prueba 1 del sensor de toroide (A) y efecto Hall (B) (GNU Octave, 2025)	54
Figura 62 Funcionamiento del algoritmo de detección del voltaje pico (Autoría propia)	55
Figura 63 Señal de la corriente del torno modificada por el algoritmo (GNU Octave, 2025).....	56
Figura 64 FFT de la señal de corriente del torno de las 3 pruebas de 0-0.2 seg. (GNU Octave, 2025)	57
Figura 65 FFT de la señal de corriente del torno de las 3 pruebas de 0.8-1 seg. (GNU Octave, 2025)	57
Figura 66 Parte frontal del sistema de acondicionamiento (Autoría propia)	58
Figura 67 Parte trasera del sistema de acondicionamiento (Autoría propia).....	59
Figura 68 Sensor de toroide o basado en transformadores con su cable 8 bits hembra (Autoría propia)	59
Figura 69 Sensor de efecto Hall con su cable 8 bits macho (Autoría propia)	60
Figura 70 Conector VGA macho para la salida del sistema de acondicionamiento (Autoría propia).....	60
Figura 71 Arranque del motor del torno en ambos sensores (GNU Octave, 2025).....	61
Figura 72 11 puntos de la señal del motor del torno en ambos sensores del estado estacionario (GNU Octave, 2025)	62
Figura 73 FFT de las tres pruebas de la señal de corriente del torno en 0.8-1 seg (GNU Octave, 2025)	64
Figura 74 Señal de sensor de toroide de la pistola de calor (GNU Octave, 2025)	65
Figura 75 FFT de la señal de la pistola de calor de 6.75-7 seg (GNU Octave, 2025)	65
Figura 76 FFT de la señal de la pistola de calor de 2.75-3 seg (GNU Octave, 2025)	66
Figura 77 Señal del sensor toroide para el motor sin espiras en corte (GNU Octave, 2025)	67
Figura 78 Señal del sensor de toroide para el motor con espiras en corte (GNU Octave, 2025)	67
Figura 79 FFT para las señales del motor con y sin espiras (GNU Octave, 2025)	68

Figura 80 Gráfica para la selección del área transversal (Zhang, s. f.)	72
Figura 81 Gráfica para obtener el ancho mínimo de la pista (Zhang, s. f.)	73

Índice de Tablas

Tabla 1 Especificaciones del objeto de pruebas (Megafer Máquinas, 2024).....	19
Tabla 2 Especificaciones del objeto de pruebas (Autoría Propia).....	21
Tabla 3 resistencias para la fuente dual (Autoría propia)	25
Tabla 4 Voltajes de la fuente dual (Autoría propia)	26
Tabla 5 Materiales para el método de planchado (Steren)	40
Tabla 6 Conexiones de los conectores VGA y 8 bits (Autoría propia)	46
Tabla 7 Datos de la ventana de la Figura 72	63
Tabla 8 Materiales Físicos	74
Tabla 9 Softwares utilizados.....	75

Capítulo 1. Introducción

Los motores de inducción constituyen una de las máquinas más robustas y versátiles utilizadas en la industria desde hace décadas, debido a su capacidad para convertir energía eléctrica en energía mecánica. Se consideran altamente demandados por diversas empresas, en especial aquellas que requieren un elevado esfuerzo mecánico, y representan aproximadamente el 80 % de los motores eléctricos industriales (Rosa, 2015).

Se identifican múltiples aplicaciones en las que intervienen los motores de inducción. Un ejemplo de su uso se encuentra en las máquinas CNC (Control Numérico por Computadora), que ejecutan operaciones de corte, grabado, entre otras, sobre materiales como el acero. Estas tareas no pueden ser realizadas por una persona con la misma facilidad, precisión y rapidez que una máquina CNC.

Por lo general, la operación de los motores de inducción se desarrolla bajo dos regímenes o estados: transitorio y estacionario (o permanente). El régimen transitorio ocurre durante el arranque del motor, provocando un alto consumo de corriente, con valores que oscilan entre 6 y 20 veces la corriente nominal del motor (Bussman, 2005). Este consumo disminuye progresivamente hasta alcanzar el régimen estacionario, donde la corriente se estabiliza y coincide con su valor nominal.

El principal inconveniente asociado a este fenómeno radica en la gran variación de corriente durante el arranque, lo que dificulta la medición correcta de ambos regímenes y genera disturbios eléctricos en la línea de suministro. Para mitigar estos efectos, se emplean diversos métodos de arranque, como los controladores de AC (Corriente alterna). Sin embargo, dichos métodos suelen ser costosos y no aplicables a todos los motores de inducción. En consecuencia, si se requiere medir ambos estados, puede ser necesario realizar dos mediciones distintas con un sensor ajustable o utilizar un sensor autoajutable, el cual podría presentar pérdida de datos durante el proceso de ajuste. Aunque existen sensores

con alta sensibilidad y amplio rango de medición, estos suelen tener un costo elevado.

Actualmente, se dispone de diversos sensores y equipos comerciales diseñados para monitorizar el consumo energético de los motores de inducción. Entre los sensores más utilizados para la medición de corriente se encuentran el sensor de Efecto Hall y el sensor tipo toroide o bobina. El primero permite medir la fuerza del campo magnético mediante el Efecto Hall, a través de un diferencial de voltaje generado por la presencia de un campo magnético en una placa semiconductora. El segundo opera por medio de la inducción electromagnética, generando un diferencial de voltaje proporcional a la variación del campo magnético. Ambos sensores presentan la ventaja de estar eléctricamente aislados de la variable medida.

En este trabajo se plantea el diseño, prueba e implementación de un circuito de acondicionamiento en una PCB (placa de circuito impreso) para ambos sensores, uno destinado a medir el estado transitorio y otro el estado estacionario. Asimismo, el circuito se diseña para cumplir con los requerimientos de la industria 4.0 en cuanto a la entrega de datos enriquecidos, lo que permite monitorizar en tiempo real el consumo de corriente del motor. Además, se contempla el procesamiento de los datos adquiridos mediante algoritmos como la transformada de Fourier. El desarrollo de este proyecto se basa en conocimientos adquiridos en la línea terminal de mecatrónica, con énfasis en áreas como instrumentación, procesamiento de señales y control.

1.1 Antecedentes

El monitoreo de motores de inducción se realiza mediante distintos enfoques, ya que la mayoría de los estudios opta por analizar únicamente uno de los estados operativos. Un ejemplo se encuentra en el trabajo de Granados Romero Raúl, de la Universidad de Valladolid, donde se expuso la necesidad del análisis de detección de fallos en motores de inducción que operan en regímenes no estacionarios. Esta necesidad surge debido al tipo de operación que suelen presentar dichos motores en entornos industriales, especialmente ante la presencia

de los diferenciadores, los cuales incrementan el contenido armónico como resultado del mecanismo de conmutación del inversor de frecuencia (Granados Romero, 2017). Esta situación genera un alto nivel de ruido, lo que complica significativamente la observación y diagnóstico requeridos para implementar un mantenimiento predictivo, especialmente en áreas donde el diferenciador representa un componente crítico y de alto costo.

Por otra parte, en el trabajo de Díaz Berrio Jennifer Paola y Berrio Florez Adriana Margarita de la Universidad Tecnológica de Bolívar, donde se analizó un turbogenerador desde el estado estacionario, para después examinar los niveles máximos de cortocircuito en las barras del sistema eléctrico, con base en la Norma IEC 60909, utilizada como guía para el cálculo de corriente de cortocircuito en sistemas trifásicos AC (Jennifer Paola & Adriana Margarita, 2012). La elección del régimen estacionario se justifica por las características de operación continua de los turbogeneradores. De igual forma que en el caso anterior, este enfoque, centrado exclusivamente en un estado, es común en gran parte de los trabajos sobre análisis de corriente en motores de inducción.

Este enfoque responde a una limitación técnica: un sensor capaz de medir alta corriente (típica del estado transitorio en motores de inducción) no ofrece la resolución necesaria para captar correctamente corrientes nominales bajas (propias del estado estacionario en este tipo de motores). Por el contrario, un sensor diseñado para baja corriente puede saturarse al medir transitorios de alta corriente.

No obstante, se identifican investigaciones, como la desarrollada por Iván Auriol Muñoz Quiñonez y Jaime Zárate García en la Universidad Pontificia Bolivariana, que planteó el diseño de un sistema de adquisición de datos para la visualización de señales eléctricas en motores AC y DC (Corriente continua). En dicho sistema se empleó un sensor PI350, basado en el efecto Hall y con dos rangos de linealidad, capaz de medir desde 0 hasta 100 A y desde 100 hasta 350 A para la segunda linealidad. Este sensor requiere un circuito de acondicionamiento específico, según sus hojas técnicas. Además, se incorporó una sonda ACS752-SCA050, basada igualmente en el efecto Hall, para la medición de señales DC. Para

el filtrado de ambas señales, se utilizó un filtro activo pasa bajas Butterworth de segundo orden, con una frecuencia de corte de 1.25 kHz, considerando que el sistema de muestreo opera a una frecuencia de 3 kHz. En cuanto a las pruebas realizadas en los motores de inducción y DC, se realizaron en procedimientos de arranque, frenado e inversión de giro (Muñoz & Zárate, 2009). Si bien este análisis resulta parcialmente adecuado, se enfoca exclusivamente en el estado transitorio sin considerar el comportamiento estacionario. Como consecuencia, se obtienen datos con una resolución incorrecta en el régimen permanente, lo cual no se alinea con los objetivos de la instrumentación ni con las exigencias de la industria 4.0.

En relación con los sensores utilizados en los trabajos mencionados, se consulta un artículo del IEEE que describe los distintos sensores de corriente disponibles en la actualidad. El documento presentó un análisis comparativo de sus ventajas y desventajas, haciendo especial énfasis en los sensores basados en efecto Hall, debido a su similitud con los sensores de toroide y a su principal característica: el aislamiento entre la señal medida y el circuito. Además, se destaca su buena linealidad y amplio rango dinámico, que permite medir tanto señales de corriente directa como alterna (Crescentini et al., 2022).

Adicionalmente, se considera un estudio realizado en la Universidad Autónoma de Querétaro, realizado por José Manuel Muñoz Ugalde, en el cual se llevó a cabo el monitoreo y análisis de señales de potencia en lámparas incandescentes. El objetivo consistió en identificar cómo la calidad de la energía influye en la aparición del fenómeno conocido como “flicker”, clasificado dentro del régimen transitorio conforme a la norma IEEE 1159-2019. Al tratarse del monitoreo de una señal de corriente, se empleó un circuito de acondicionamiento que cumple con la norma IEC 61000-4-7, la cual regula los sistemas destinados a la medición de corriente, voltaje y potencia (Muñoz Ugalde, 2021). Si bien este antecedente resulta relevante al proporcionar una base para el análisis de señales eléctricas, su alcance se limita al estudio de señales de bajo amperaje. En contraste, el presente estudio plantea el desarrollo de un sistema de sensores capaz de medir tanto los estados transitorios de alta corriente como los estacionarios de baja corriente.

1.2 Planteamiento del problema

La medición de la corriente en motores de inducción resulta fundamental debido a su amplio uso en la industria. Esta necesidad responde a la importancia de generar datos que permitan caracterizar correctamente tanto el estado transitorio como el estado estacionario del motor. Sin embargo, la elevada variación de corriente en el arranque, que puede oscilar entre 6 y 20 veces el valor nominal, presenta un desafío significativo en la selección de sensores adecuados para la medición de ambos regímenes.

Un solo sensor, en general, no logra registrar correctamente ambos estados de operación de forma simultánea, ya que su rendimiento depende directamente de la sensibilidad y del rango de medida. Por ejemplo, si el sensor se calibra para el estado estacionario (mayor sensibilidad y menor rango), tiende a saturarse al momento de registrar el estado transitorio. Por el contrario, si se ajusta para el estado transitorio (mayor rango y menor sensibilidad), las variaciones del estado estacionario pueden no distinguirse del ruido eléctrico.

Este problema se acentúa en motores utilizados en máquinas CNC, donde el consumo de corriente varía constantemente en función de factores como la carga, los ciclos repetitivos de encendido y apagado, así como los cambios en la velocidad de operación. Dichas condiciones hacen que la señal de corriente sea aún más difícil de analizar de forma precisa con un único sensor convencional.

Por lo tanto, el problema central radica en la incapacidad de un único sensor para capturar de forma adecuada las señales correspondientes a ambos regímenes. Si el sensor está calibrado para registrar el estado transitorio, se pierde la capacidad de detectar las fluctuaciones en el estado estacionario; mientras que, si se calibra para el estado estacionario, el sensor presenta saturación ante las altas corrientes del arranque. Si bien existen soluciones como las pinzas amperimétricas ajustables, que permiten modificar la sensibilidad y el rango, estas no cumplen con los requerimientos de automatización y adquisición en tiempo real que demanda la industria 4.0.

1.3 Hipótesis

El desarrollo de un sistema de medición que integre dos sensores calibrados específicamente para los estados transitorio y estacionario permitirá obtener datos simultáneos y correctos del consumo de corriente en motores de inducción, mejorando la capacidad de monitoreo en comparación con el uso de un único sensor convencional.

1.4 Justificación

Se propone el desarrollo de un sistema de medición de corriente basado en dos sensores capaz de registrar, de forma automática y simultánea, los dos estados operativos de un motor de inducción: transitorio y estacionario. Este sistema busca proporcionar datos enriquecidos a una unidad de adquisición, permitiendo así un análisis más completo del comportamiento del motor.

La información obtenida podrá utilizarse para detectar fallas, optimizar el mantenimiento y, potencialmente, prevenir eventos que afecten la operación de la máquina. Esta solución contribuye en el área de instrumentación, al integrar sensores especializados y realizar acondicionamiento de señales que mejoran la resolución en la medición de variables eléctricas en entornos industriales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar un circuito de acondicionamiento para dos sensores de corriente, capaz de medir los estados transitorios y estacionarios de motores AC, mediante técnicas adecuadas de filtrado y amplificación, con el fin de obtener datos enriquecidos para su análisis en sistemas de adquisición.

1.5.2 Objetivos particulares

- Diseñar un circuito de acondicionamiento modular para la medición de los estados transitorio y estacionario del motor de inducción, seleccionando componentes electrónicos que permitan mantener una tolerancia máxima del 10%.
- Implementar los circuitos de acondicionamiento en una PCB.
- Realizar una comparativa de las señales de corriente obtenidas de los dos sensores con la finalidad de observar la diferencia de resolución en los estados transitorio y estacionario.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Sensores de Efecto Hall

El Efecto Hall ocurre en un material conductor por el cual circula la corriente eléctrica y sobre el cual actúa una fuerza magnética perpendicular, como se muestra en la Figura 1 donde al actuar un campo magnético perpendicular a la placa semiconductor, la corriente eléctrica que circula por esta es desplazada por las fuerzas de Lorentz al lado del conductor, lo que genera una diferencia de voltaje perpendicular a la corriente eléctrica y al campo magnético (Urany, 2023).

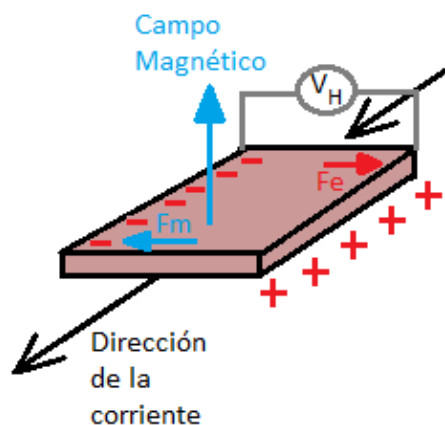


Figura 1 Efecto Hall (Urany, 2023)

Los sensores de corriente Hall se clasifican en tipos de circuito abierto y cerrado, siendo la mayoría de alta precisión los de circuito cerrado y estos suelen incorporar una estructura que concentre el campo magnético.

2.1.1 Circuito cerrado

Cuando la corriente primaria (IP) genera un flujo magnético, esta se concentra en el circuito magnético a través del núcleo magnético de alta calidad. El elemento Hall se coloca en el entrehierro para detectar el flujo magnético, y la corriente de compensación inversa sale a través de la bobina multifilar enrollada en el núcleo magnético, que se utiliza para compensar la generación de IP en el lado primario. De este modo, el flujo magnético en el circuito magnético se mantiene en cero. Después de ser procesado por un circuito especial, el terminal de salida del sensor puede generar un cambio de corriente que refleja con precisión la corriente del lado primario (Administración, 2024).

La Figura 2 ilustra el esquema del circuito, donde se pueden observar el núcleo magnético que rodea la corriente primaria, la ubicación del elemento Hall en el entrehierro del núcleo, y la bobina multifilar del devanado secundario encargada de generar la corriente de compensación. Este diseño permite mantener el equilibrio magnético y obtener una medición precisa y estable de la corriente primaria.

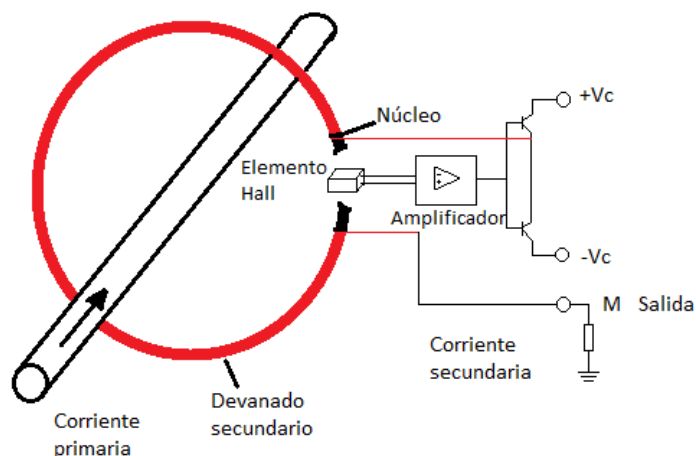


Figura 2 Configuración del circuito cerrado en un sensor de efecto Hall (Administración, 2024)

2.1.2 Circuito abierto

Cuando la corriente primaria (IP) fluye a través de un cable largo, se generará un campo magnético alrededor del cable. La magnitud de este campo magnético es proporcional a la corriente que fluye a través del cable. El campo magnético generado se acumula en el anillo magnético y pasa a través del entrehierro del anillo magnético. El elemento Hall mide y amplifica la salida, y su voltaje de salida VS refleja con precisión la corriente primaria IP. La salida nominal general está calibrada a 4V (Administración, 2024).

La Figura 3 muestra el esquema básico de funcionamiento de un sensor de efecto Hall. En él se representa cómo el campo magnético generado por la corriente primaria que circula en el conductor se canaliza a través del anillo magnético hasta llegar al entrehierro, donde se encuentra el sensor Hall. También se observa el procesamiento de la señal por un amplificador, que permite obtener una salida eléctrica proporcional a la corriente medida, lo que facilita su integración en sistemas de adquisición de datos.

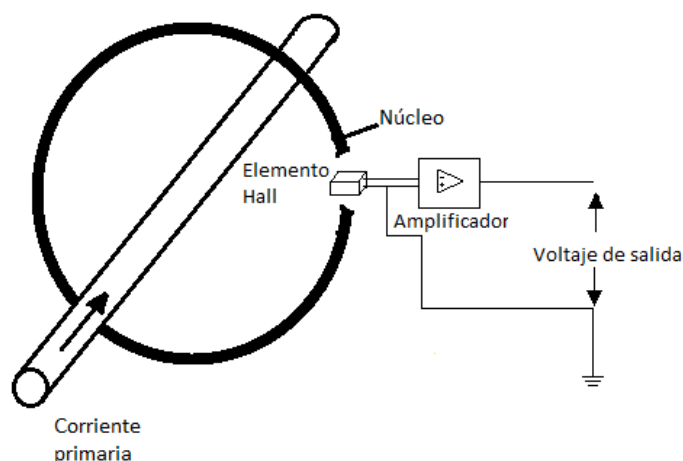


Figura 3 Configuración del circuito abierto de un sensor de efecto Hall (Administración, 2024)

2.2 Transformador de corriente

La función principal de un transformador de corriente es dividir o "reducir" corrientes alternas muy altas a niveles más bajos para mayor seguridad y medición más fácil. No transforman la corriente en otra cosa, simplemente la dividen. Sus

salidas reducidas se envían a amperímetros y otros instrumentos con fines de monitoreo, así como a relés y otros sistemas para aplicaciones de protección en sistemas de energía.

Un transformador de corriente (CT) funciona mediante el principio de inducción electromagnética. Cambiar la corriente en un transformador induce una tensión en otra bobina al variar el flujo magnético. Un transformador de corriente tiene un devanado primario de una sola vuelta, también conocido como "primario de barra". Este primario transporta toda la corriente (Maloy Smith, G., 2024), como se muestra en la Figura 4, donde el conductor induce una tensión en el devanado secundario (B), cuya salida es una división de la corriente. La relación entre los devanados primario y secundario es lo que determina el nivel de salida que se mide en la salida del secundario (A) (Maloy Smith, G., 2024).

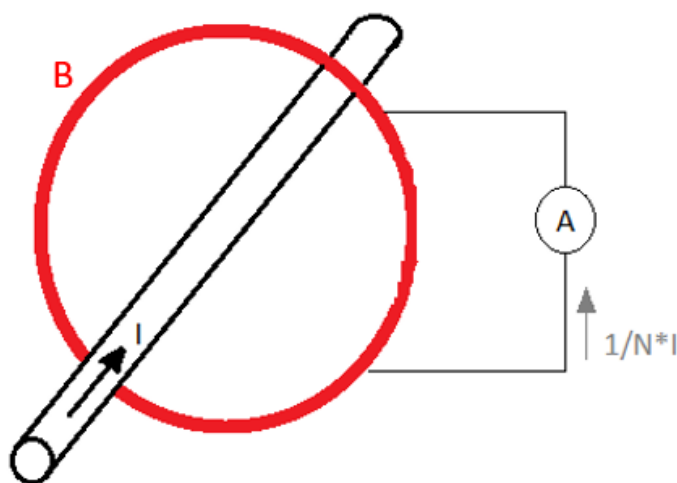


Figura 4 Funcionamiento del transformador de corriente (Maloy Smith, G., 2024)

Los transformadores de corriente se caracterizan por su alta precisión y linealidad dentro del intervalo de medición para el cual han sido diseñados. Debido a estas propiedades, resultan ampliamente utilizados en aplicaciones de generación y transmisión de energía. Además, proporcionan aislamiento galvánico y suelen emplearse en contextos donde se manejan corrientes elevadas. Estos dispositivos pueden ofrecer una sensibilidad de hasta 1 mV/A (Corona Ramírez et al., 2015).

2.3 YHDC HSTS023R (Sensor de Efecto Hall)

El sensor de corriente YHDC HSTRS023R permite realizar mediciones sin contacto directo con el conductor, al detectar el campo magnético que este genera cuando circula corriente. Este modelo ofrece una salida de 3.125 V o 1.875 V, dependiendo de la dirección de la corriente, para un flujo de 200 A.

La Figura 5 ilustra al sensor, donde puede observarse el orificio central por el que debe pasar el conductor y sus cables de entrada y salida. La disposición del sensor facilita su integración en sistemas eléctricos de corriente, manteniendo el aislamiento galvánico.



Figura 5 Sensor de corriente de efecto Hall HSTS023R (Autoría propia)

- Corriente de entrada máxima: 200A+20%
- Salida: $2.5V \pm 0.625V$
- Tensión de alimentación: +5V
- Corriente de consumo: 16mA
- Impedancia de carga: $10K\Omega$
- Precisión: 1%
- Factor de conversión: $K_1 = \frac{200A}{0.625V}$
- Frecuencia: DC-25kHz
- Pin de salida del sensor: Amarillo
- Pin de salida Offset: Blanco
- Pin de alimentación: Rojo
- Pin de GND: Negro
- Rango: AC y DC (AliExpress, 2024)

2.4 SCT013-000 SCT013 (Transformador de corriente)

El SCT013-000 SCT0103, mostrado en la Figura 6, corresponde a un transformador de corriente o sensor de toroide. A diferencia del sensor de efecto Hall, no requiere voltaje de alimentación; sin embargo, no permite la medición DC.



Figura 6 Transformador de corriente SCT013 (Autoría propia)

- Corriente de entrada: 0-30A
- Salida: 0-1V
- Linealidad: 1%
- Frecuencia: 50Hz-1kHz
- Factor de Conversión: $K_2 = \frac{30A}{1V}$
- Rango: AC (AliExpress, 2024)

2.5 Cadena de instrumentación

La cadena de instrumentación especifica los elementos requeridos en el circuito de acondicionamiento para realizar la instrumentación de un sistema físico, como se muestra en la Figura 7, donde el proceso inicia con la variable física a medir, en este caso, la corriente. A continuación, se emplea un sensor o transductor que convierte la variable física en otro tipo de variable, generalmente eléctrica. Posteriormente, la señal pasa por la etapa de acondicionamiento, donde se modifica para mejorar sus características, utilizando amplificadores y filtros. Una vez acondicionada la señal, se realiza el muestreo mediante un sistema de adquisición de datos, el cual captura y procesa la señal para su almacenamiento o procesamiento en un sistema digital.

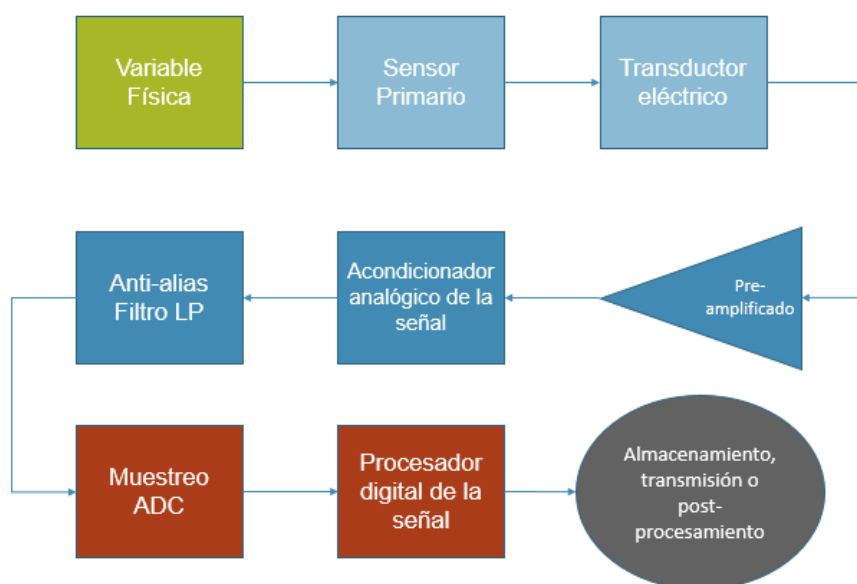


Figura 7 Cadena de Instrumentación (Autoría propia)

2.6 Fuente de voltaje dual regulada

Para alimentar el circuito de acondicionamiento, se requiere un suministro de voltaje positivo y negativo (o dual) de ± 12 V, o una fuente de voltaje dual regulada a 12 V. Esta fuente permite utilizar alimentación AC mediante su reducción, rectificación, disminución del rizado y posterior regulación a 12 V.

Existen diversos diseños para este tipo de suministro, por lo que se emplea el que utiliza los reguladores LM337 y LM317, debido a su capacidad de regulación del 5 % (Electrónica Unicrom, 2024). El circuito a utilizar se presenta en la Figura 8, con los valores teóricos de las resistencias y capacitores necesarios para obtener $\pm 12\text{ V}$ y 1 A. Las resistencias R5 y R6, conectadas a los pines OUT y ADJ de los reguladores, deben tener un valor exacto de 240 ohmios.

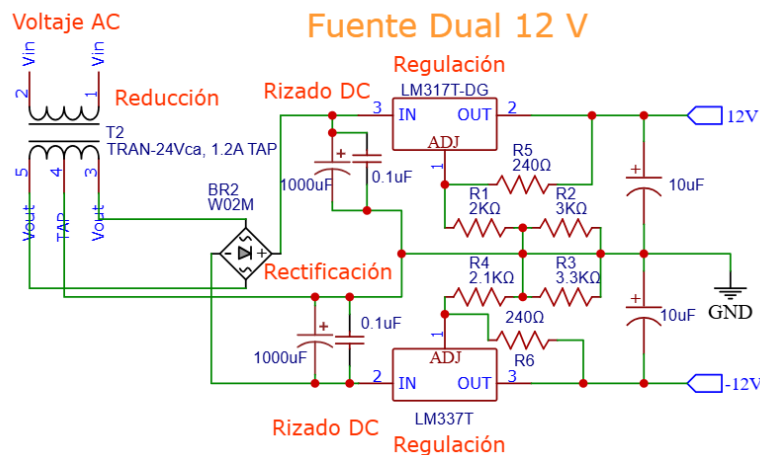


Figura 8 Fuente de voltaje dual (EasyEDA - Online PCB Design & Circuit Simulator, 2025)

2.7 Amplificadores operacionales (op-amp)

Los amplificadores operacionales u op-amp (operational amplifier) utilizados corresponden al modelo TL084, el cual, debido a su baja sensibilidad, presenta menor susceptibilidad al ruido externo. Las conexiones o pinout del TL084 se muestran en la Figura 9.

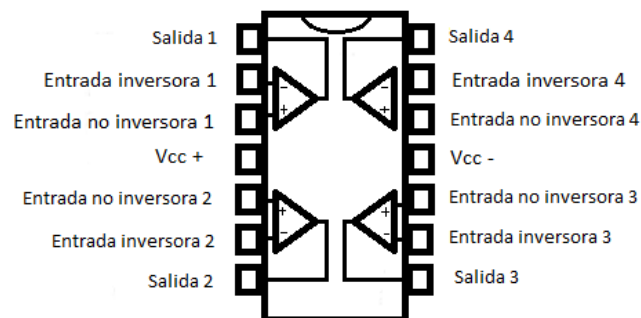


Figura 9 Conexiones del TL084 (Texas Instruments, 2024)

Estos dispositivos son circuitos integrados capaces de realizar diversas operaciones sobre señales eléctricas, como suma, resta, amplificación, entre otras (Ohms, 2024).

2.7.1 Amplificador no inversor

El amplificador no inversor amplifica la señal de entrada, sin reducir su amplitud, la ganancia está determinada por la Ecuación 1 (Ohms, 2024). Las conexiones de esta configuración se muestran en la Figura 10, donde el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada (V_e) multiplicado por la relación entre la resistencia de retroalimentación (R_2) y la resistencia a tierra (R_1).

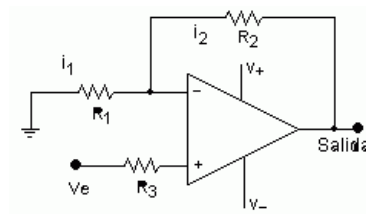


Figura 10 Conexiones del Amplificador no inversor (Ohms,2024)

$$Salida = V_e * \left(1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right) \quad Ec. 1$$

R_f = Resistencia de retroalimentación (Ohms)

R_2 = Resistencia a tierra (Ohms)

V_{out} = Voltaje de salida (Volts)

V_{in} = Voltaje de entrada (Volts)

2.7.2 Amplificador de instrumentación AD620

El amplificador de instrumentación elimina el que el sensor de efecto Hall produce de manera intrínseca, evitando que el amplificador no inversor amplifique dicho offset. La Figura 11 muestra las conexiones o pinout del AD620.

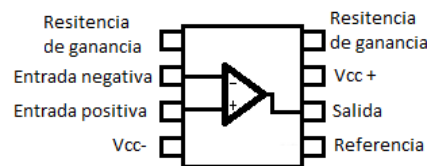


Figura 11 Conexiones del AD620 (alldatasheet.com, 2024)

La salida del amplificador es definida por la Ecuación 2.

$$Salida = ((Entrada Pos.) - (Entrada Neg)) * (1 + Resistencia de ganancia) \text{ Ec. 2}$$

La resistencia de ganancia que se emplea es de 0 ya que para la amplificación se utilizará otro amplificador por lo que no será necesario conectar una resistencia.

2.8 Filtro

El filtro es un circuito diseñado para permitir el paso de un rango específico de frecuencias, mientras atenúa las señales que se encuentran fuera de dicho rango. Por ejemplo, el filtro pasa-altas permite únicamente el paso de frecuencias superiores a la frecuencia de corte (F_c), mientras que las frecuencias inferiores comienzan a atenuarse (Administrado, 2023).

La respuesta en frecuencia del filtro pasa-altas se presenta en la Figura 12, donde se observa que el voltaje de salida pierde su relación unitaria con respecto al voltaje de entrada a medida que la frecuencia disminuye. Aunque esta disminución no ocurre de forma instantánea en la frecuencia de corte, en dicho punto la atenuación alcanza aproximadamente un 70 % respecto al voltaje de entrada.

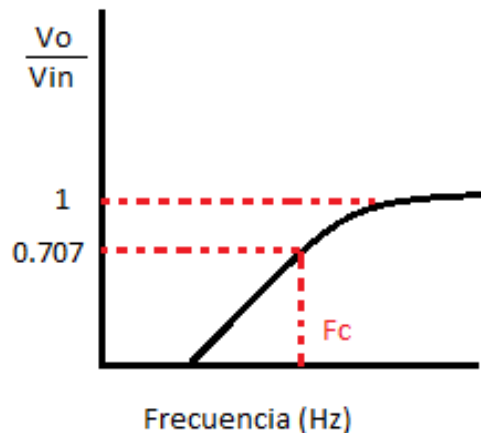


Figura 12 Respuesta en frecuencia de un filtro pasa altas (Administrado, 2023)

2.9 Filtro Butterworth KHN inversor bi-cuadrático

El filtro Butterworth KHN inversor bi-cuadrático, también llamado filtro de variable de estado, es un conjunto que presenta tres filtros de segundo orden en uno: filtro paso banda, filtro paso bajo y filtro paso alto.

Esta configuración se compone por tres amplificadores: un amplificador suma-restador y dos amplificadores integradores (Wilaeba Electronica, 2019). En la Figura 13 se muestra la configuración de circuito con los tres amplificadores y la Ecuación 3.1 y 3.4 para los cálculos de las resistencias respecto a los capacitores.

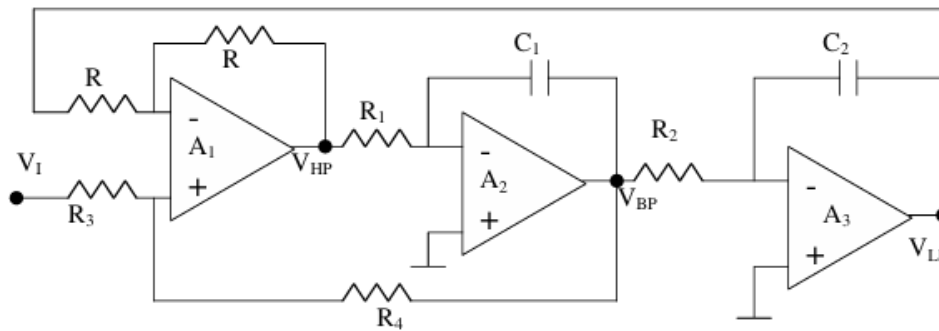


Figura 13 Filtro Butterworth KHN inversor bi-cuadrático (Mohamed Soliman, 2008)

$$R_1 \text{ y } R_2 = \frac{1}{2\pi f_o C} \quad \text{Ec. 3.1}$$

f_o = Frecuencia de corte (Hertz)

C = Valor de los capacitores (Faradios)

R o R_N = Resistencias de entrada (Ohmios)

$$R_4 = [(2 + A_{LP})Q - 1]R_3 \quad \text{Ec. 3.2}$$

A_{LP} = Valor de amplificación

Q = Factor de calidad

Para simplificar el cálculo, R , R_3 y R_4 se toman como iguales ya que no es necesaria la amplificación, por lo tanto, solo se considera la Ecuación 3.1, los capacitores C_1 y C_2 serán iguales y serán definidos con un valor comercial como el 104, además el factor de calidad y la amplificación se tomará como unidad o 1.

2.10 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es un método cuyo fin es cambiar el dominio del tiempo de una señal al dominio de la frecuencia. La expresión de la Transformada de Fourier se muestra en la Ecuación 4.1.

$$x(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega} dt \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde $x(t)$ es la señal original, $j = \sqrt{-1}$ y $\omega = 2\pi f$.

El primer paso de este método es modelar la dinámica del sistema mediante una ecuación diferencial, luego a esta ecuación se le aplica la transformada de Fourier para pasarla al dominio de la frecuencia. Esta ecuación resultante es simplificada mediante las propiedades de la transformada de Fourier, para encontrar la solución de la ecuación y obtener la respuesta del sistema.

La Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés, Fast Fourier Transform) es un algoritmo rápido y eficaz que evalúa la Transformada Discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés, Discrete Fourier Transform), reduciendo el número de operaciones en el cálculo. Es la forma más común para encontrar las componentes armónicas en una señal. Se calcula mediante la ecuación 4.2 (Muñoz Ugalde, 2021):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde $j = \sqrt{-1}$ y $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

2.11 Motor de inducción de la máquina herramienta (Caso de estudio)

Las máquinas herramientas se utilizan para dar forma a materiales sólidos, sobre todo metales, de modo que cada pieza se realice con determinado grado de rugosidad superficial y precisión. Este proceso se lleva a cabo con la eliminación de

una parte del material, ya sea: por arranque de viruta, fundición, forja, laminación, corte, deformación o electroerosión que se aplica en materiales eléctricamente conductores (TECNOMAQUINARIA, 2023).

El motor de inducción analizado corresponde al torno ROMI de la Figura 14 ubicado en el laboratorio-taller de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, campus San Juan del Río. En la Tabla 1 se detallan sus especificaciones técnicas.



Figura 14 Torno ROMI (Autoría propia)

Tabla 1 Especificaciones del objeto de pruebas (Megafer Máquinas, 2024)

Voltaje	Trifásico 220 V
Potencia	7.5 CV o 7.4 HP
Corriente nominal	12 A

Capítulo 3. Metodología

La metodología que se lleva a cabo para el desarrollo de este trabajo se muestra en el diagrama de la Figura 15, cuyo modelo está basado en la metodología ágil, la cual destaca por su gran flexibilidad, en el diagrama se muestran los pasos a seguir, donde se inicia desde las pruebas a circuitos individuales como los son los sensores, el preamp o amplificador de instrumentación, el amplificador y el filtro, para continuar en el circuito final con la combinación de cada uno de estos circuitos, donde seguido se diseña y adquiere la PCB, con la PCB se realiza el muestreo con las pruebas de los casos de estudio y finalmente se analizan los datos del muestreo.

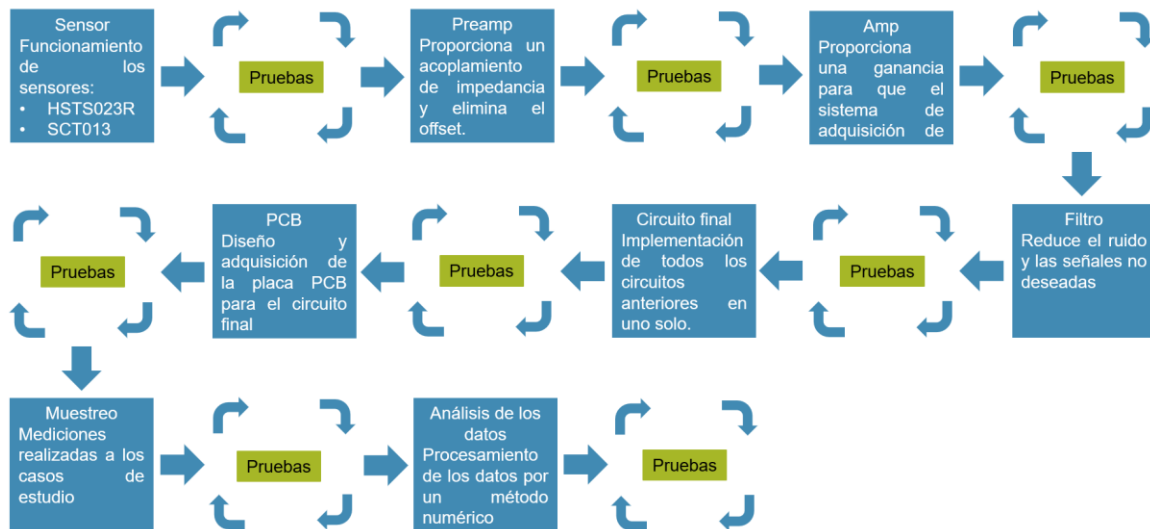


Figura 15 Diagrama de la metodología (Autoría propia)

Gracias a la flexibilidad de esta metodología es posible realizar cambios a ciertas partes del circuito sin suponer un gran problema a otras secciones de la misma, esto también es debido a la secuencia en donde los primeros pasos son los fundamentos y los siguientes las combinaciones de estos y además gracias a las pruebas que se realizan entre paso de la metodología para avanzar a la siguiente sección.

3.1 Sensores

Para las pruebas de los sensores, se efectúan lecturas con los transductores (Sensor de efecto Hall, el transformador de corriente y pinza amperimétrica), los cuales miden la señal de corriente de un electrodoméstico (una tostadora). La Tabla 2 muestra las especificaciones eléctricas de la Tostadora KH722D50.

Tabla 2 Especificaciones del objeto de pruebas (Autoría Propia)

Modelo	Tostadora KH722D50
Marca	KRUPS
Voltaje	120 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia	900 W
Corriente nominal	7 A

La Figura 16 muestra el montaje experimental utilizado para la evaluación de los sensores en un entorno controlado. En esta configuración, se observa la disposición de los transductores conectados al electrodoméstico de prueba, lo cual permite registrar fácilmente cualquier anomalía que estos presenten.



Figura 16 Medición del caso de estudio (Autoría propia)

Las lecturas de los sensores se comparan con la pinza amperimétrica FLUKE de la Figura 17, este sensor cuenta con dos equivalencias de 100 mV/A hasta 20 A y 10 mV/A hasta 200 A, la cual está disponible en el taller de la UAQ en la facultad de ingeniería campus San Juan del Río. Se espera que ambos sensores proporcionen una lectura similar a la obtenida con la pinza amperimétrica.



Figura 17 Pinza amperimétrica FLUKE (Autoría propia)

En la Figura 18 se muestra la lectura de la pinza amperimétrica, donde se registra una señal de 60 Hz con una amplitud de 1.06 V. Utilizando la equivalencia de 100 mV/A, se calcula un consumo de 10.6 A. Aunque este valor difiere significativamente del especificado por el fabricante, se emplea como referencia para el análisis, ya que resulta útil para estimar la respuesta esperada de un sensor en condiciones funcionales.

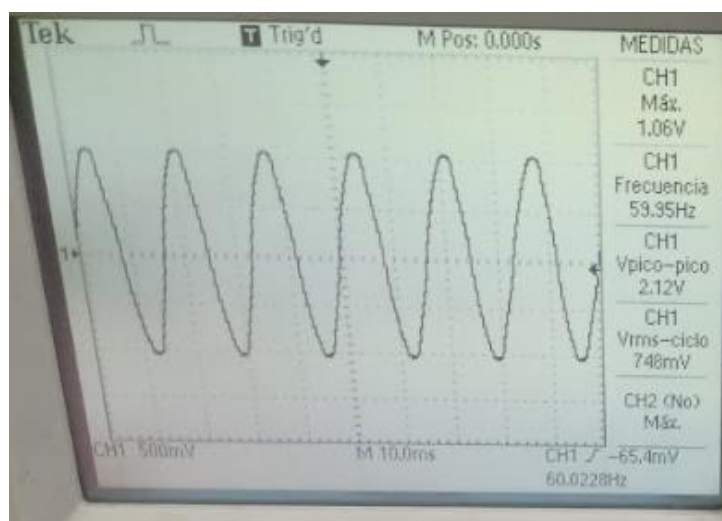


Figura 18 Medición de la pinza amperimétrica (Autoría propia)

Las señales registradas por los sensores se presentan en las Figuras 19 y 20, donde en la Figura 19 se observa que el sensor de toroide entrega una señal de voltaje con una amplitud de 368 mV correspondiente a un determinado amperaje.

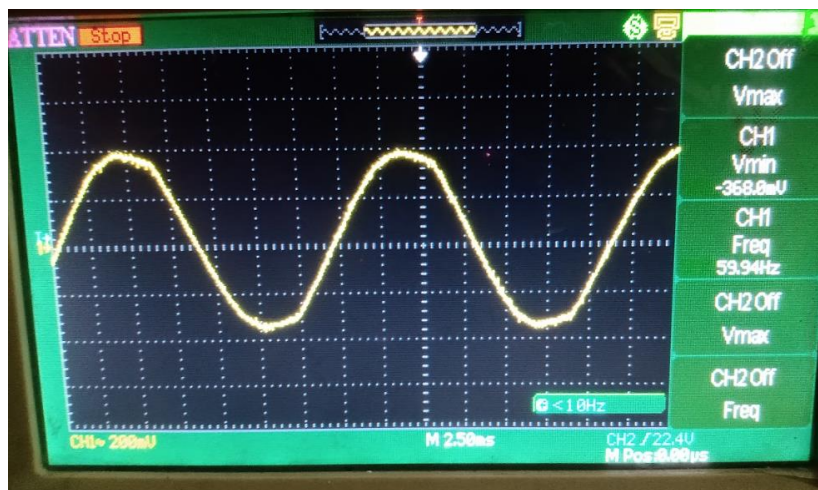


Figura 19 Medición del sensor de toroide (Autoría propia)

En la Figura 20 el sensor de efecto Hall entrega una señal de voltaje con una amplitud de 80 mV con un offset de 2.5 V. En ambos casos, las señales obtenidas presentan una frecuencia de 60 Hz.

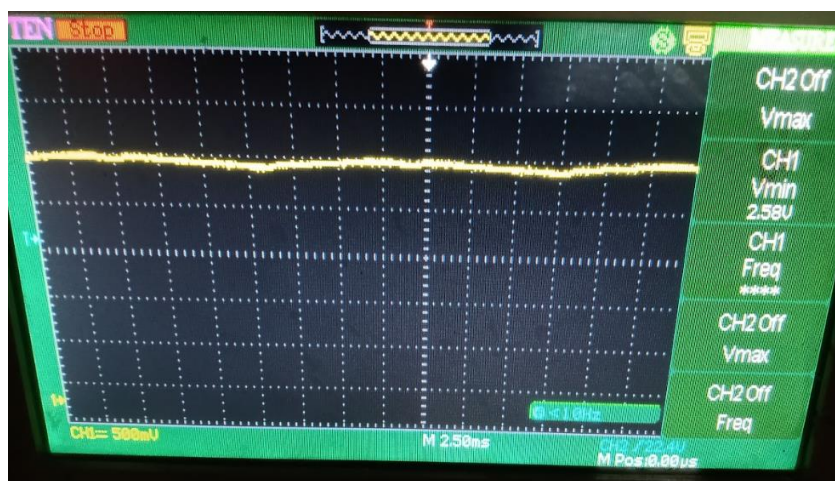


Figura 20 Medición del sensor de efecto hall (Autoría propia)

Aplicando las Ecuaciones 5 y 6, las cuales usan los factores de conversión (K) correspondientes a cada sensor, se obtiene el valor de la lectura en amperios para cada caso, como se muestra a continuación:

$$S_{Hall} = x * K_1 \quad Ec. 5$$

$$(2.58V - 2.5V) * \frac{200A}{0.625V} = 25A$$

$$S_T = x * K_2 \quad Ec. 6$$

$$0.368V * \frac{30A}{1V} = 11.04A$$

Como se observa en los datos obtenidos, el sensor de toroide (o transformador de corriente) presenta una mayor proximidad al valor registrado por la pinza amperimétrica, mientras que el sensor de efecto Hall muestra una diferencia significativa. Este comportamiento es coherente con las características de ambos dispositivos, ya que, al tratarse de una corriente de baja magnitud, el sensor de efecto Hall, diseñado para un rango de hasta 200 A, no logra detectar variaciones pequeñas correctamente debido a su poca resolución. Por lo tanto, se concluye que ambos sensores operan correctamente dentro de sus respectivos rangos de sensibilidad.

3.2 Fuente Dual

Para la prueba de la fuente dual, la cual debe entregar ± 12 V, se utiliza el circuito de la Figura 8, mencionado previamente en el marco teórico, con la excepción de que las resistencias R1, R2, R3 y R4 son trimpots de 5 k Ω . Estos se emplean para calibrar las fuentes, ya que permiten variar el voltaje entre 0 y 12 V, con el fin de comprobar los valores calculados teóricamente para las resistencias. Una vez obtenidos los valores necesarios, se miden los trimpots y se seleccionan combinaciones de dos resistencias comerciales con una tolerancia del 10 % para sustituirlos. Además, se añade un regulador LM317 para una fuente positiva de 5 V, destinada a la alimentación del sensor de efecto Hall.

La Tabla 3 especifica los valores de resistencia obtenidos mediante los trimpots para alcanzar el voltaje deseado en cada uno de los reguladores, así como las combinaciones de resistencias comerciales equivalentes a dichos valores y su configuración, ya sea en serie (+) o en paralelo (||).

Tabla 3 resistencias para la fuente dual (Autoría propia)

LM317 (+12V)		
Resistencia	Valor ideal	Combinación con valores comerciales
R1	2K ohms	1K + 1K
R2	3K ohms	1.5K + 1.5K
LM337 (-12V)		
Resistencia	Valor ideal	Combinación con valores comerciales
R3	2.1K ohms	4.7K 3.8k
R4	3.03K ohms	2.7K + 330
LM317 (+5V)		
R5	700 ohms	680 + 22
R6	320 ohms	270 + 56

En la Figura 21 se muestra el montaje en protoboard de los tres reguladores para la fuente dual de 12 V y la de 5 V, cada uno con las resistencias especificadas en la Tabla 3 y su configuración correspondiente para aproximarse al valor ideal.

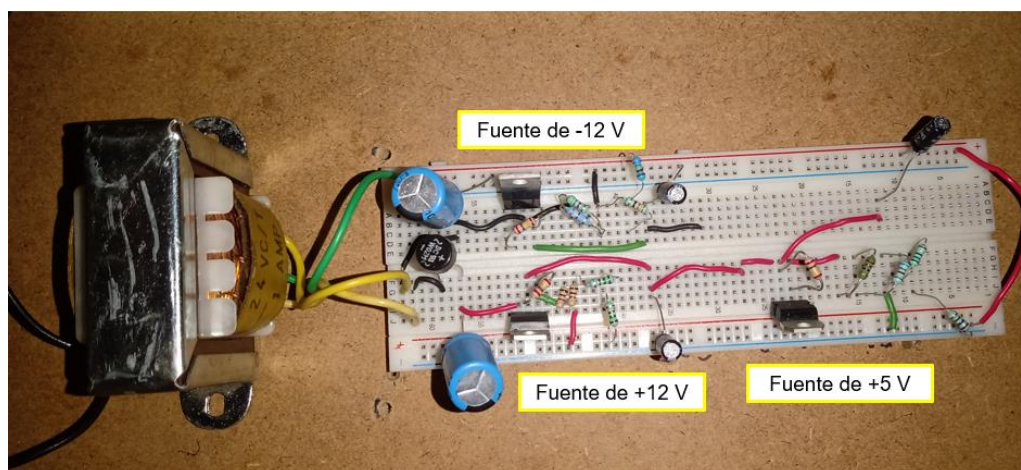


Figura 21 Fuente dual montada en protoboard (Autoría propia)

En la Tabla 4 se presentan los voltajes obtenidos por la fuente dual montada en protoboard, comparados con los valores esperados, donde se observa el cumplimiento de la tolerancia del 10 % respecto al valor esperado.

Tabla 4 Voltajes de la fuente dual (Autoría propia)

Valor esperado	Valor obtenido
+12 V	+11.44 V
-12 V	-12.18 V
+5 V	+4.88 V

3.3 Preamp

Con el sensor de efecto Hall en funcionamiento, se procede a realizar la prueba del circuito integrado AD620, el cual se alimenta mediante la fuente dual, mientras que el sensor recibe alimentación de los +5 V generados por la misma. La salida del sensor de efecto Hall (cable amarillo) se conecta a la entrada positiva del AD620, y el cable de offset (blanco) a la entrada negativa, y se realiza una medición a la tostadora. En la Figura 22 se observa la salida del amplificador, una señal con una amplitud de 64 mV, donde el offset esta eliminado, en contrario a la Figura 20, que aún conserva el offset.

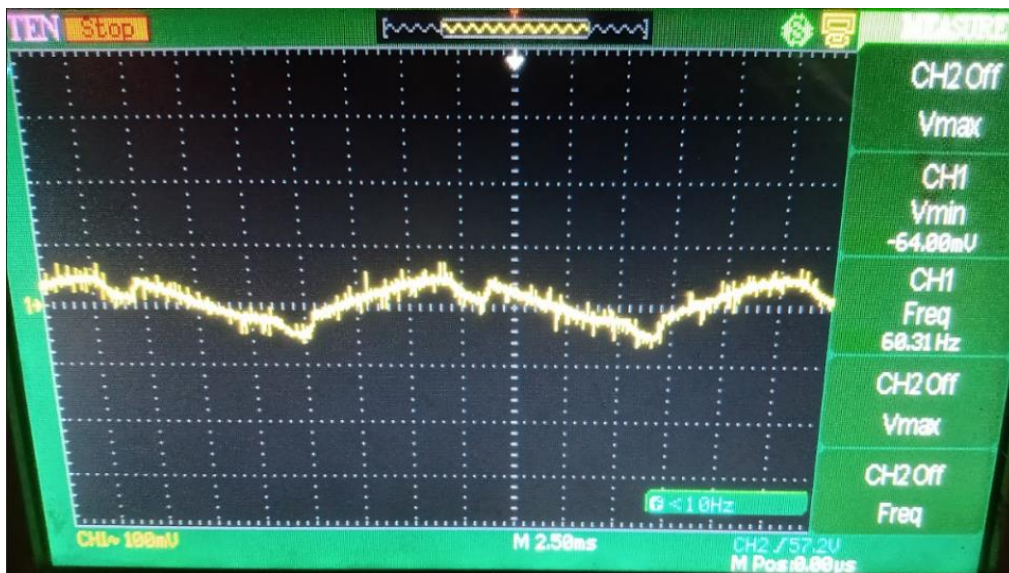


Figura 22 Señal del sensor de efecto hall sin offset (Autoría propia)

3.4 Amp

Para la amplificación se utiliza la configuración no inversora, la cual debe mostrar una salida amplificada respecto al voltaje de entrada, el valor de la amplificación es dado por el arreglo de resistencias usadas, y esta deberá conservar la misma polaridad que antes de la amplificación.

En la Figura 23 se muestra la prueba que se realiza en el software de simulación de circuitos, con el fin de comprobar el funcionamiento de la configuración del amplificador no inversor, donde se observa una amplificación de 3 veces a una señal de 5 V de AC, la cual conserva su polaridad antes de la amplificación.

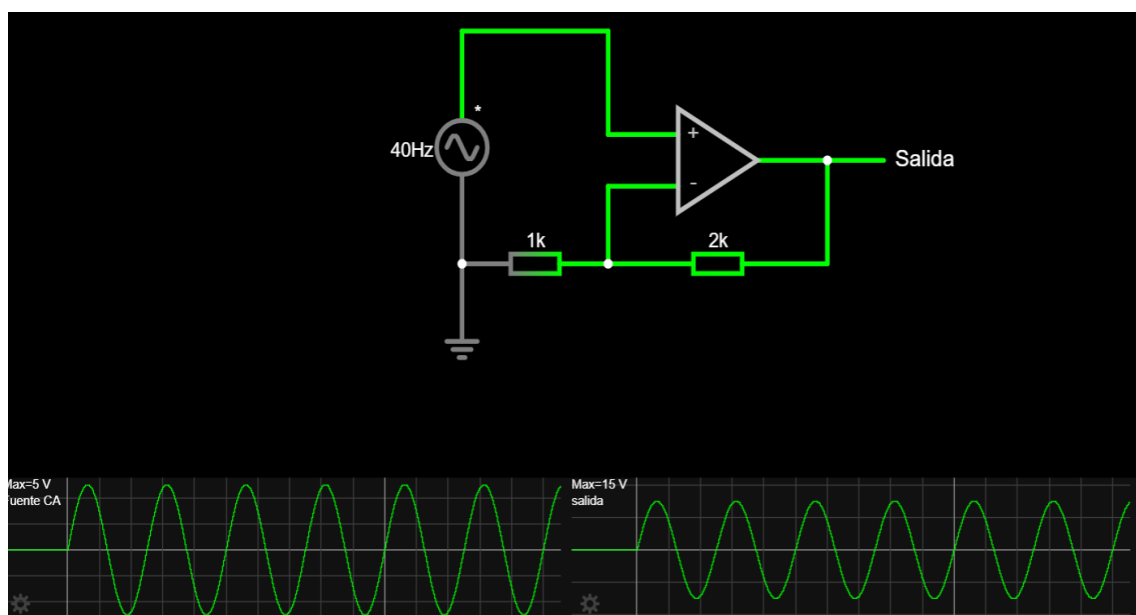


Figura 23 Amplificador no inversor en la simulación («Circuitjs», 2016)

Para el circuito en protoboard se usa un trimpot de 50k ohms, esto con el fin de poder modificar la amplificación, para esta prueba se ajusta a 2.5k ohms para la resistencia de retroalimentación y en la resistencia a tierra, se usa una de comercial de 1k ohm dando una amplificación de 2.5.

En la Figura 24 se muestra la señal obtenida por la medición de la tostadora, usando el sensor Hall sin el offset, la cual puede ser comparada con la Figura 22 con un valor de 68 mV, donde en esta señal se amplifica a 156 mV.

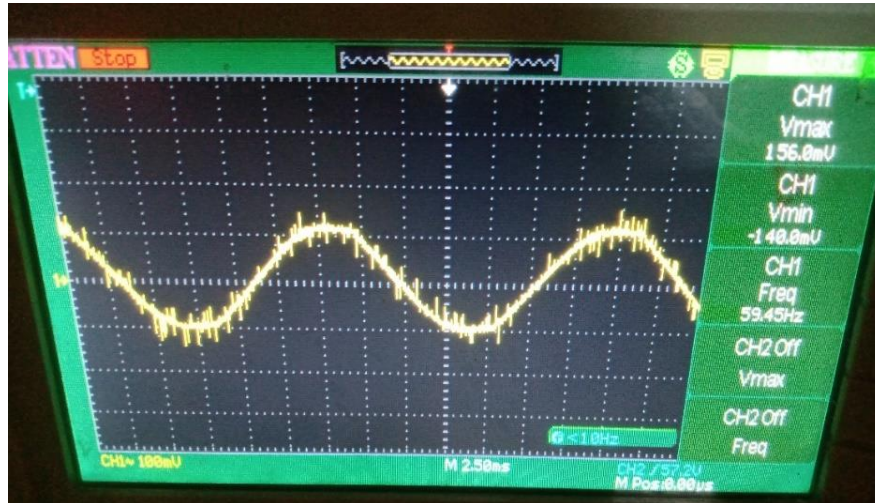


Figura 24 Señal del sensor de efecto Hall amplificada con un valor de 3 (Autoría propia)

3.5 Filtrado

En este apartado se realizarán las pruebas de los 2 circuitos de filtrado usando la configuración Butterworth KHN inversor bi-cuadrático primero se realizarán los cálculos de las resistencias utilizando la Ecuación 3.1 teniendo en cuenta que todos los capacitores serán de 10 nF, todas las resistencias serán iguales y se realizará con una frecuencia de corte (f_o) de 3.3 kHz, este valor es debido a la normativa IEC 61000-4-7 donde se especifica que los sistemas de medición de corriente deben ser capaz de medir los armónicos iguales o inferiores al 50, debido a que en nuestro caso trabajamos con señales de 60 Hz sería de 3 kHz, pero además también debemos considerar una tolerancia del 10% dando así la frecuencia de 3.3 kHz .

$$R \text{ o } R_n = \frac{1}{2\pi f_o C} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$R \text{ o } R_n = \frac{1}{2\pi(3300\text{Hz})(10 * 10^{-9}\text{F})} = 4822.8 \text{ ohms}$$

En la Figura 25 se observa la simulación del filtro realizada con los valores obtenidos en software circuitjs, en la cual la frecuencia de corte del filtro es de 4.2 kHz y no 3.3 kHz, un resultado esperado ya que la fórmula usada no es más que una aproximación, debido a la falta del factor de calidad, de ahí que el resultado sea algo cercano, por lo que es necesario realizar ajustes en las resistencias.

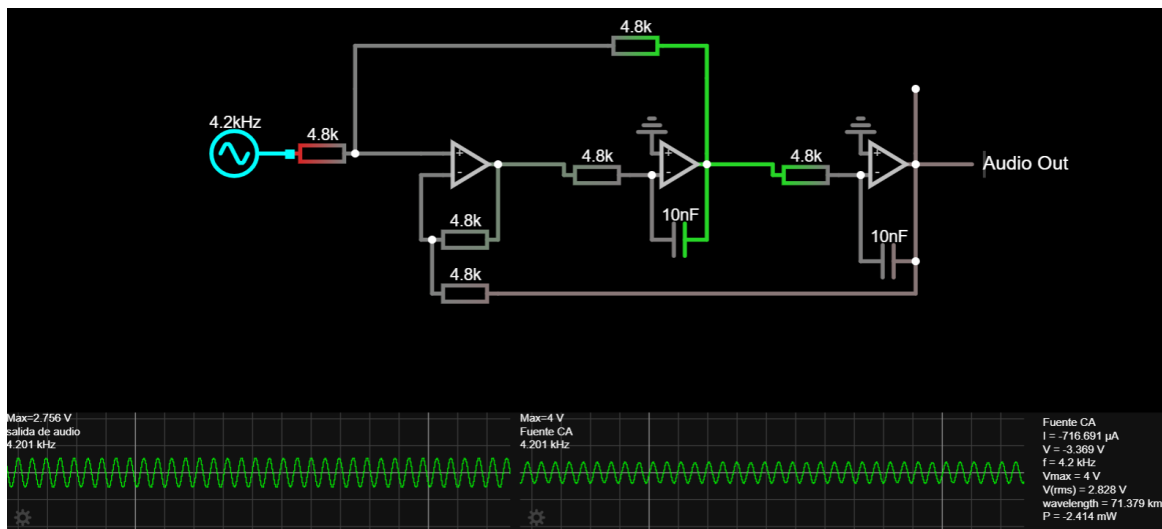


Figura 25 Filtro Butterworth en la simulación («Circuitjs», 2016)

En la Figura 26 se muestra el circuito del filtro Butterworth con las resistencias necesarias para obtener la frecuencia de corte en 3.3 kHz, esto se puede comprobar al observar la disminución de la salida en 70% al estar en la frecuencia de corte.

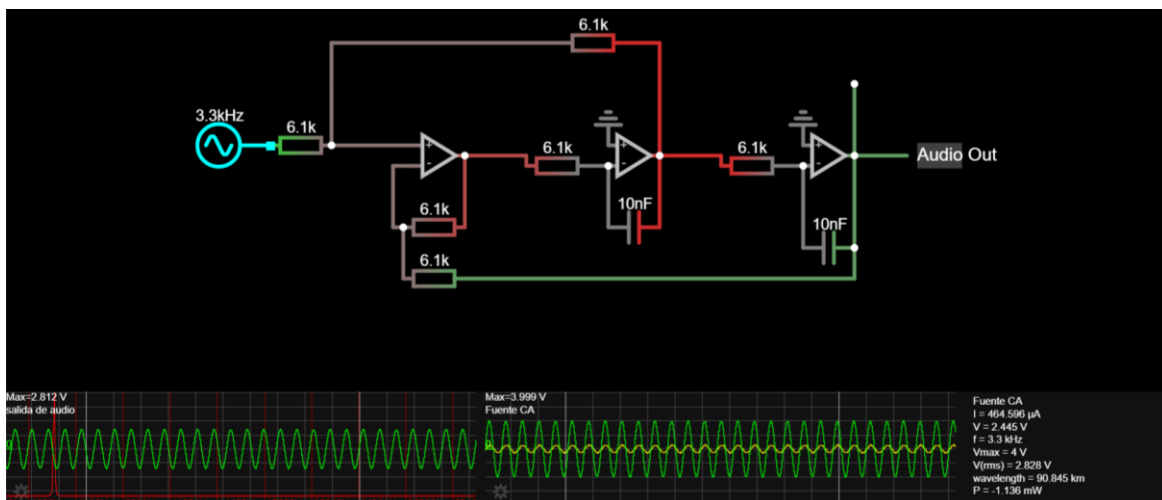


Figura 26 Filtro Butterworth con los valores modificados («Circuitjs», 2016)

Ahora se realiza el montaje del circuito en protoboard utilizando resistencias de 6.8 kohms esto debido a que es el valor comercial más cercano al especificado en la simulación, por lo que las resistencias en las entradas negativas de los opams 2 y 3 son cambiadas a trimpots con el fin de obtener el valor necesario para una frecuencia de corte de 3.3 kHz, se usa un generador de funciones disponible en el taller de la facultad de ingeniería, el cual nos proporcionara una entrada de una señal senoidal de 3.3 kHz con amplitud de 2.5 V, por lo que se ajustan los trimpots para obtener una señal senoidal desfasada 90° grados de 3.3 kHz con amplitud de 1.75 V en ambos filtros, ya con los trimpots calibrados se cambian por un arreglo de máximo 2 resistencias comerciales, cuya resistencia equivalente se acerque los más posible valor del trimpot.

En la Figura 27 se muestra el montaje del filtro Butterworth con las resistencias de 6.8 kohms, además de las 2 resistencias paralelas de 15 kohms dando una resistencia equivalente de 7.5 kohms, como se observa en el circuito, el filtro se añadió con el amplificador no inversor, todas las resistencias usadas tienen una tolerancia del 10%.

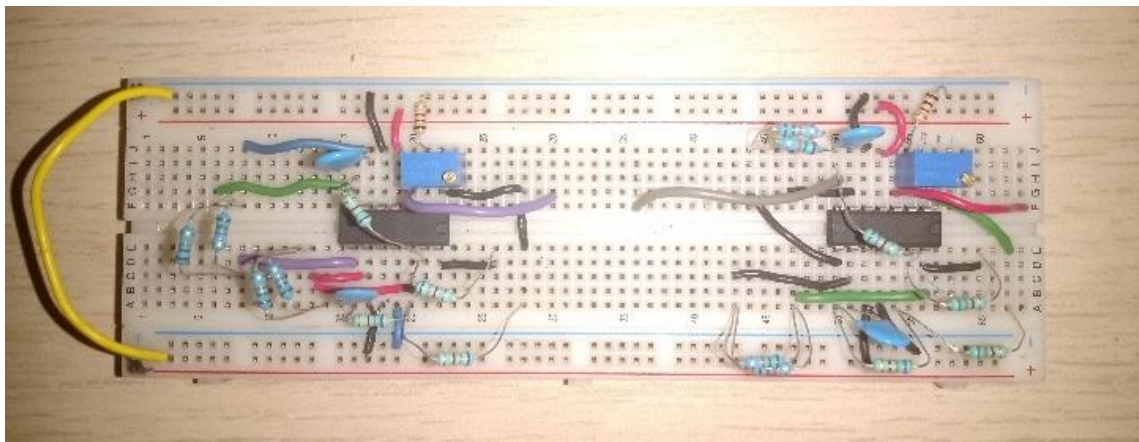


Figura 27 Circuito del filtro Butterworth en físico (Autoría propia)

En la Figura 28 se observa la señal de entrada y la salida del filtro, la entrada captada por el canal 1 o CH1 posee una mayor amplitud en comparación que la salida del canal 2 o CH2, además la salida esta desfasada 90° respecto a la entrada, en cuanto a la frecuencia de corte, se observa que en una frecuencia de 3.45 kHz y una amplitud de 2.56 V en la entrada se tiene una disminución en voltaje a 1.92 V, dando una disminución del 75%, por lo que es posible inferir que la frecuencia de corte es cercana a 3.6 kHz, la cual cumple con la tolerancia del 10% por lo que el filtro funciona de forma correcta.

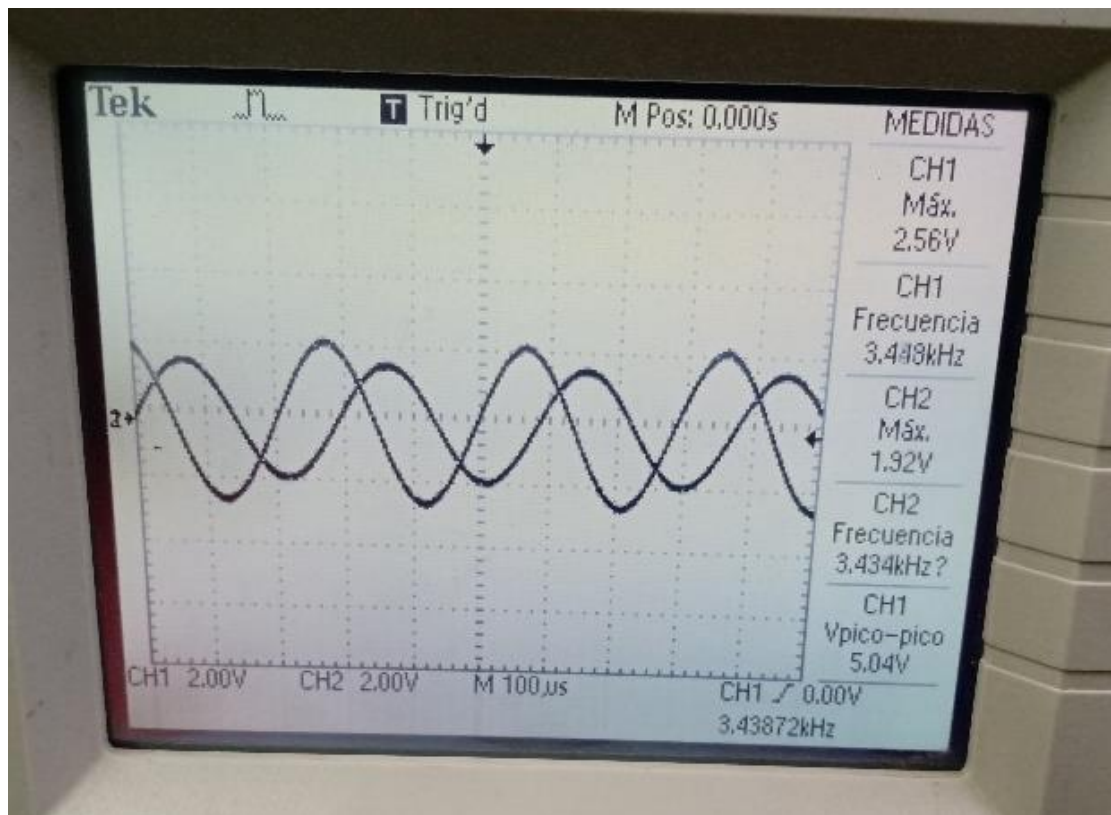


Figura 28 Comparación de la entrada y salida del filtro Butterworth físico (Autoría propia)

3.6 Circuito final

En la Figura 29 se muestra la combinación de cada uno de los circuitos, donde la fuente dual proporciona alimentación a los Opams del preamp, el amplificador y el filtro, además de alimentar al sensor con 5 V.

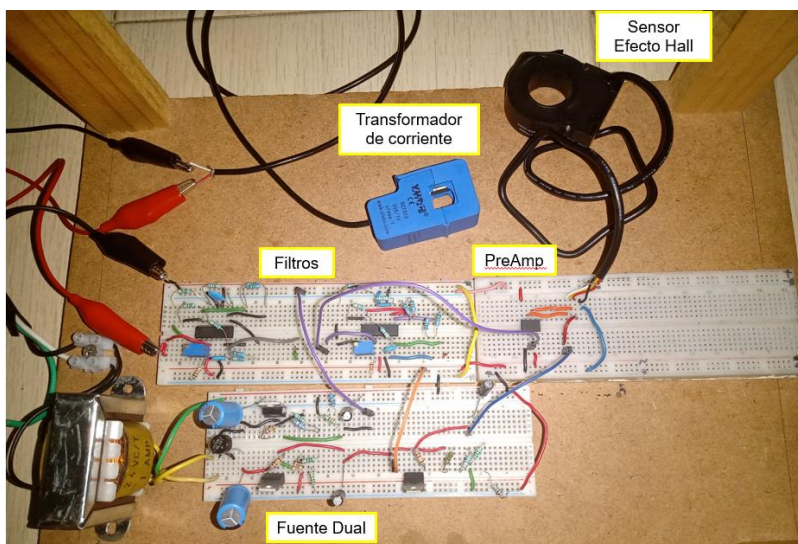


Figura 29 Circuito final (Autoría propia)

En la figura 30 se muestran los sensores colocados en uno de los cables de alimentación de la tostadora, debido a que se realiza una lectura simultanea estos se deben colocar de forma que las flechas de orientación de los sensores apunten en la misma dirección.



Figura 30 Posicionamiento de los sensores (Autoría propia)

En la Figura 31 se observa la salida del circuito final del sensor de efecto Hall cuya lectura es una señal de 60 Hz con una amplitud de 112 mV.

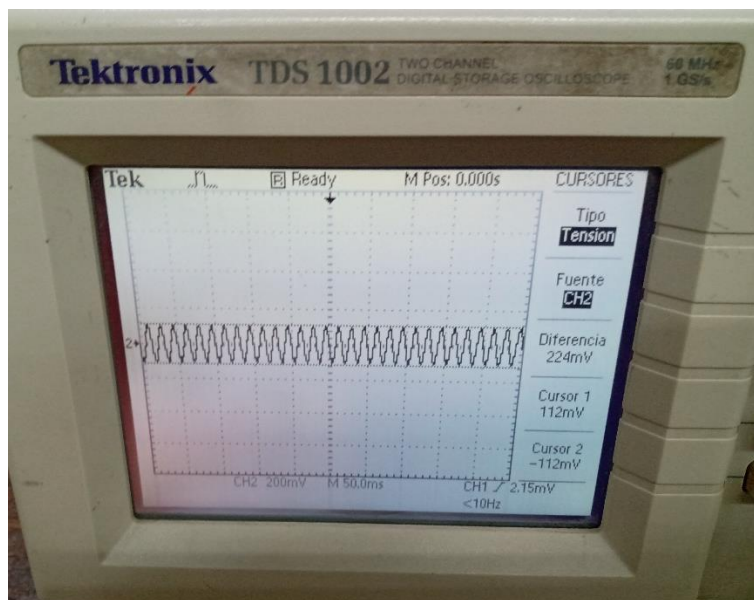


Figura 31 Respuesta del sensor de efecto Hall (Autoría propia)

En la Figura 32 se observa la salida del circuito final del sensor de toroide cuya lectura es una señal de 60 Hz con una amplitud de 1.48 V.

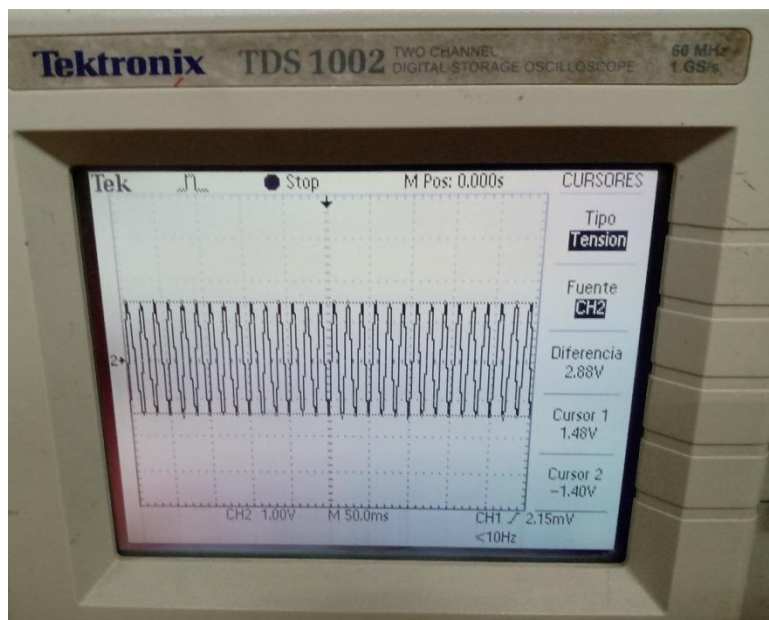


Figura 32 Respuesta del sensor de toroide (Autoría propia)

Con cada una de las lecturas se utiliza la fórmula correspondiente para obtener el valor de corriente.

En la medición de 112 mV del sensor de efecto Hall se utiliza la Ecuación 5 y se contempla que la medición está amplificada en 4.

$$S_{Hall} = x * \frac{200A}{0.625V} = \frac{0.112V}{4} * \frac{200A}{0.625V} = 8.96A$$

En la medición de 1.48 V del sensor de toroide se utiliza la Ecuación 6 y de igual forma se contempla que la medición está amplificada en 4.

$$S_T = x * \frac{30A}{1V} = \frac{1.48V}{4} * \frac{30A}{1V} = 11.1A$$

Si bien el resultado correcto deber ser una lectura cercana a la corriente nominal de 7 A especificada en la Tabla 2, se opta por usar el valor obtenido en la sección de sensores de 10.6 A de la pinza amperimétrica FLUKE, por lo tanto, el sensor que más próximo este valor es el sensor de toroide, este resultado era esperado debido a que el sensor de toroide posee mayor resolución y menor rango, en comparación con el sensor de efecto Hall.

Con el circuito final funcionando de forma correcta se realiza una prueba más, pero ahora se mide la corriente del caso de estudio (máquina herramienta o torno), para ello es necesario seguir las recomendaciones de seguridad dadas por el taller de la UAQ Campus SJR, mencionadas en el apartado de Seguridad de este documento y leer el manual del usuario para el torno proporcionado por el taller de la UAQ Campus SJR.

Primero es importante confirmar que el torno esté apagado, después abrir la conduleta que se encuentra próxima al torno y usando unos guantes de carnaza tomar uno de los 3 cables, estos guantes se pueden pedir en el taller de la facultad de ingeniería, el cable puede ser cualquiera ya que al ser un motor trifásico cualquiera de las 3 servirán, pero es recomendable elegir uno donde los 2 sensores se pueden colocar fácilmente.

En la Figura 33 se muestra la colocación de los sensores en uno de los cables de la condeleta, de igual forma con la tostadora al ser una lectura simultanea la orientación de ambos sensores debe apuntar en la misma dirección.

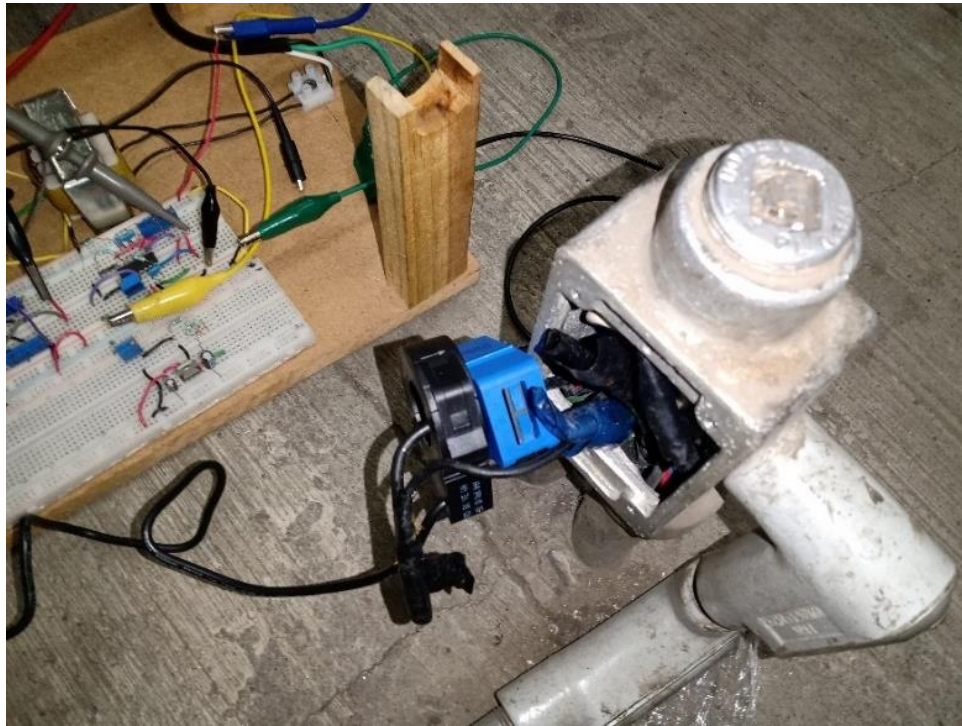


Figura 33 Colocación de los sensores en la condeleta para el torno (Autoría propia)

Para preparar el torno se coloca la velocidad a 224 RPM, se aprieta el Chuck del torno con la llave del mismo, se asegura el cambio de velocidad tratando de girar el Chuck utilizando la llave del Chuck, al tratar de girarlo este debe sentirse “pesado” o girar con dificultad, si gira con facilidad, es necesario reajustar la velocidad, finalmente se enciende el torno.

Se conecta el circuito con los sensores, las salidas del circuito son conectadas un osciloscopio para poder observar los resultados, primero se energiza el circuito de medición y acto seguido se energiza el motor del torno (el sentido del giro es irrelevante), pasados 2 segundos se detiene el torno.

En la Figura 34 se observa la señal del sensor de toroide (Grafica azul), por medio del uso de los cursores del osciloscopio el valor de amplitud del estado estacionario, registrado por el sensor de toroide, el cual cuenta con una amplitud de 2.8 V a -2.2 V.



Figura 34 Lectura del sensor del estado estacionario (Autoría propia)

En la Figura 35 se observa de igual forma la señal del sensor de efecto Hall (Grafica amarilla) por medio del uso de los cursores del osciloscopio el valor máximo del estado transitorio, registrado por el sensor de efecto Hall, el cual cuenta con una amplitud de -2.0 V a 1.92 V.



Figura 35 Lectura del estado transitorio (Autoría propia)

Con los valores obtenidos de cada sensor se realizan los cálculos para obtener el valor en corriente, utilizando las Ecuaciones 5 y 6.

$$S_{Hall} = x * \frac{200A}{0.625V} = \frac{2V}{4} * \frac{200A}{0.625V} = 160A$$

$$S_T = x * \frac{30A}{1V} = \frac{2.5V}{4} * \frac{30A}{1V} = 18.75A$$

Ahora se comparan estos valores con los obtenidos de la pinza amperimétrica en el apartado de sensores de esta misma sección, la cual registro 141 A para el estado transitorio y 21 A para el estacionario, los cuales se encuentran bastante cerca de los valores de ambos sensores.

3.7 PCB

Para el diseño se usa el programa de diseño gratuito EasyEDA (STD), el cual es gratis y muy sencillo de usar, además se usa la norma IPC-2152 para el ancho de pista de la PCB.

En la Figura 36 se muestra el esquemático del circuito final diseñado en el software de EasyEDA, el cual podrá generar la PCB a partir de las conexiones proporcionadas del esquemático, es por eso que es importante comprobar los componentes elegidos del esquemático con los reales del circuito de la protoboard.

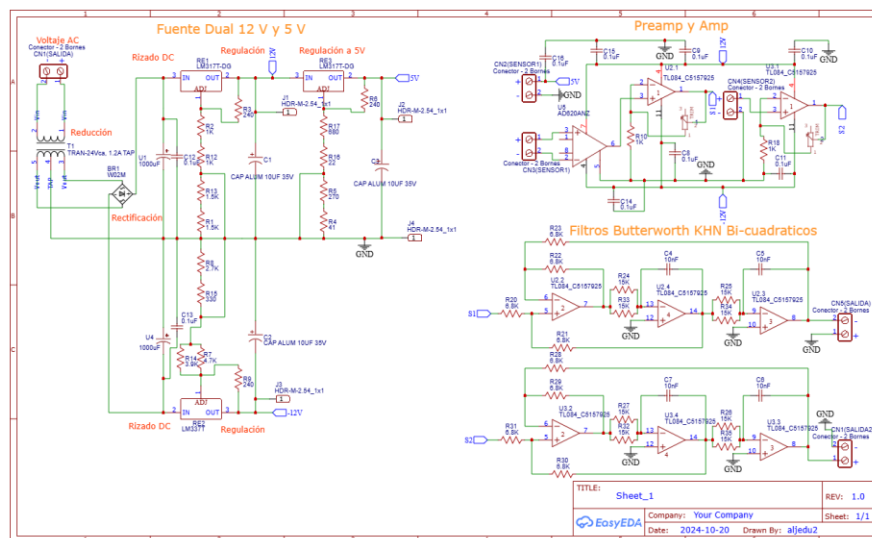


Figura 36 Esquemático del Circuito final (EasyEDA - Online PCB Design & Circuit Simulator, 2025)

En la Figura 37 se muestra la PCB con los componentes colocados y conectados, para el ancho de pista y la distancia entre pista se usa una medida de 0.8 mm, el ancho de la pista de tierra por lo general se recomienda que sea 2 veces mayor a la pista más grande por lo que se coloca con 2 mm, en las perforaciones de las esquinas se usa un diámetro de 3.15 mm, para las medidas de la placa se compactan la mayoría de los componentes lo más posible, teniendo en cuenta el disipador de calor de los reguladores, el cual mide 1cm, dando así una placa de 13.52x11.43 cm por la medida del contorno de la placa (Color morado), las conexiones de la capa inferior (Color azul) no se cruzan entre nodos y cumplen con la separación de 0.8 mm, en la capa serigráfica (Color amarillo) ningún componente se superpone a otro, por lo que los componentes no sufren colisiones entre ellos, el software cuenta con el DRC (Design Ruler Check), la cual es una herramienta que como su nombre dice, revisa que todas las reglas de diseño establecidas para la PCB se cumplan, además de revisar las conexiones de la misma.

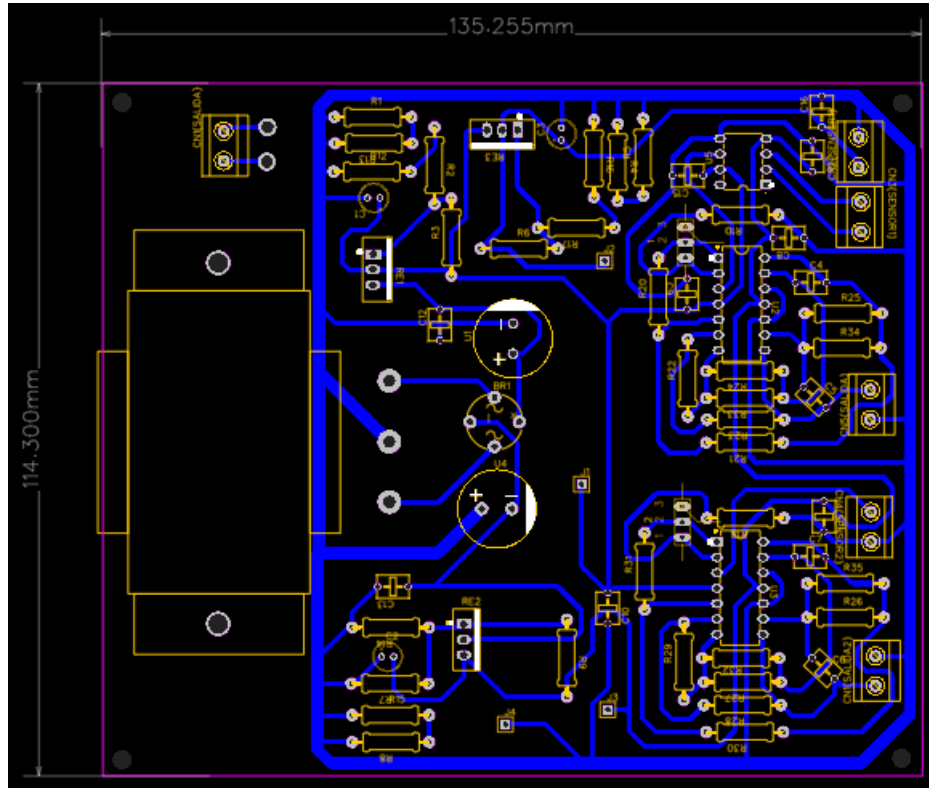


Figura 37 Diseño de la PCB (EasyEDA - Online PCB Design & Circuit Simulator, 2025)

Con la PCB diseñada se contacta a un fabricante, en la Figura 38 se muestra la cotización de la fabricación por UNIT Electronics, de la PCB diseñada, para esta fabricación el mínimo de piezas es de 5.

UNIT

ELECTRONICS

Tienda de Componentes Electrónicos



Cotización:

20250123-1640-PCB-290

23 de enero de 2025

\$1,511.24

PERSONA MORAL

UNIT ELECTRONIC SERVICES MX S.A. DE C.V.

RFC: UES2006161L5

Ampliación Asturias, Cuauhtémoc

Ciudad de México. CP 06890

cotizaciones@uelectronics.com

Dirigido a:

Alan Jenaro Duran Mondragon

aljedu2@gmail.com

Partida	Producto	SKU	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Servicio de fabricacion PCB 5 Piezas	PCB-290-1	1	\$ 1,163.79	\$1,163.79
	Envío a toda la República	E001	1	\$ 139.00	\$139.00
Sub-total					\$1,302.79
IVA					\$208.45
1	TOTAL				\$1,511.24

Figura 38 Cotización de la PCB (UNIT Electronics, 2025)

En la Figura 39 se muestra la propuesta técnica de UNIT Electronics o vista previa de la PCB, donde se puede observar la cara inferior y superior de la misma.

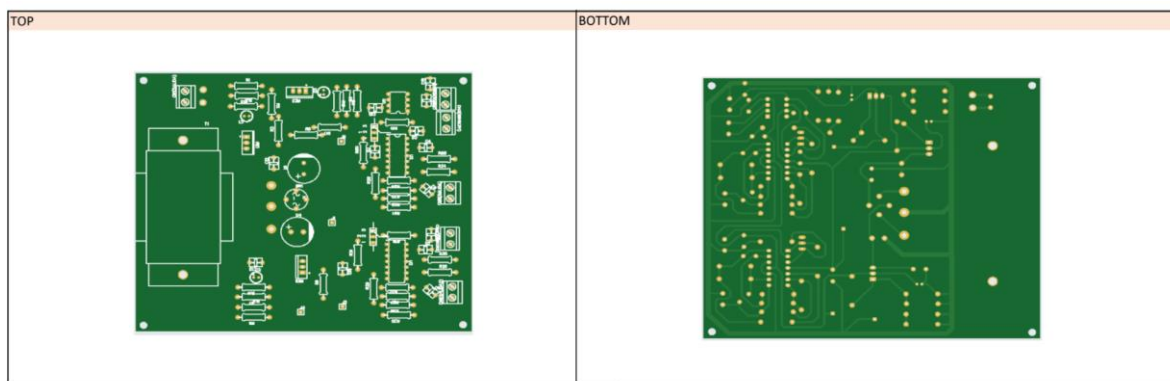


Figura 39 Propuesta técnica de la PCB (UNIT Electronics, 2025)

Adicionalmente, se intenta realizar la PCB mediante el método del planchado, ya que, como se muestra en la Tabla 3 donde se especifica el costo de los materiales para este método, es mucho menor al costo proporcionado por el fabricante.

Tabla 5 Materiales para el método de planchado (Stere)

Material	Cantidad	Precio
Hoja de papel couché	1	\$18
Placa fenólica 15x15 cm	1	\$75
220 ml de cloruro férrico	1	\$39
Total		\$132

En la Figura 40 se muestra la placa realizada por el método del planchado (Placa de la derecha) y la placa de UNIT Electronics (Placa de la izquierda), donde se puede observar una clara diferencia de calidad, donde la del fabricante es claramente la mejor. Las fallas en la placa de la derecha se deben a la falta de herramientas adecuadas para las perforaciones, así como a un exceso en el tiempo de exposición al ácido durante la etapa de reducción del cobre. Por ello, se considera que este método requiere de un equipo más apropiado.

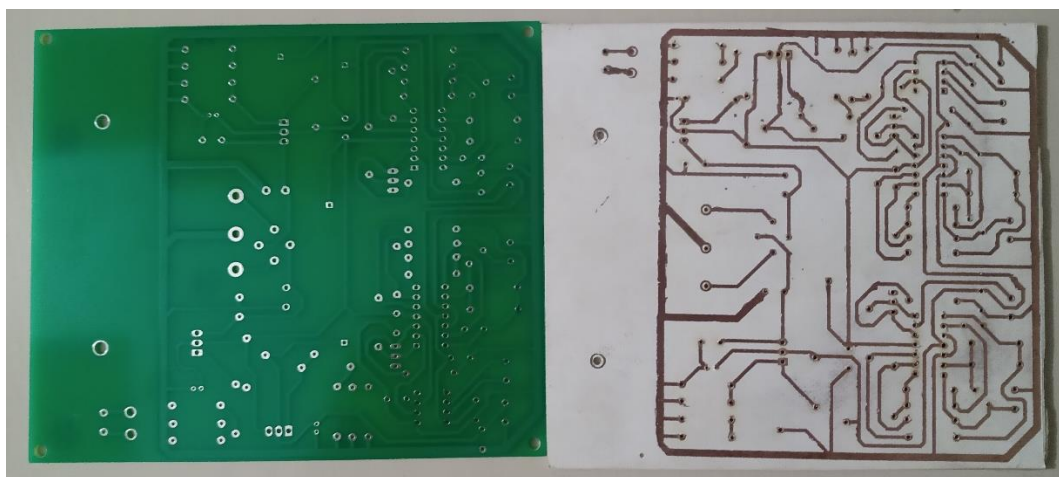


Figura 40 Placas PCB (Autoría propia)

Se revisan las conexiones de la placa PCB utilizando la función de continuidad del multímetro, esto con el fin de asegurar que la PCB sea correcta.

Con las conexiones correctas, se colocan y sueldan los componentes de la placa PCB como se muestra en la Figura 41, donde los Opams utilizan una base a presión, esto con el fin prevenir daños a estos componentes al soldarlos y en caso de una avería por parte de estos, se remplacen fácilmente.



Figura 41 PCB con los componentes (Autoría propia)

Ya con los componentes soldados es necesario conectar la PCB para comprobar las salidas de las alimentaciones de la fuente dual de 12 V y la de 5 V, estas lecturas deben ser las mismas que las de la fuente dual en protoboard, una vez terminado se realiza una lectura de la tostadora para comprobar el funcionamiento de la sección de acondicionamiento.

En la Figura 42 se muestra la señal de lectura de la corriente del tostador del sensor de efecto Hall del circuito de la PCB, esta señal senoidal cuenta con una amplitud de 148 mV, cabe destacar la presencia de ruido en esta señal, debido a la lectura baja de corriente que el sensor trata de medir.

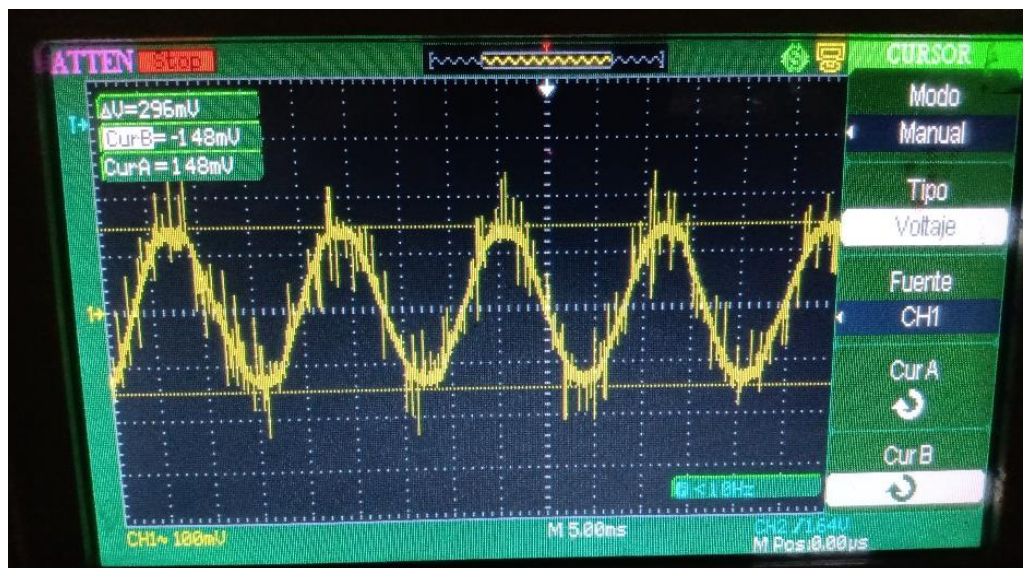


Figura 42 Señal del sensor de Hall de la PCB (Autoría propia)

En la Figura 43 se muestra la señal de lectura de la corriente del tostador del sensor de toroide del circuito de la PCB, esta señal senoidal cuenta con una amplitud de 1.56 V.



Figura 43 Señal del sensor de toroide de la PCB (Autoría propia)

Se utilizan las Ecuaciones para convertir las lecturas obtenidas a valores de corriente, la Ecuación 5 para el sensor de efecto hall y la 6 para el sensor de toroide:

$$S_{Hall} = x * \frac{200A}{0.625V} = \frac{0.148V}{4} * \frac{200A}{0.625V} = 11.84A$$

$$S_T = x * \frac{30A}{1V} = \frac{1.56V}{4} * \frac{30A}{1V} = 11.7A$$

Como se puede apreciar, los valores dados por los sensores son bastantes cercanos a las pruebas en protoboard, especialmente en el caso del transformador de corriente, mientras tanto en el sensor de efecto hall se aprecia una diferencia notoria de casi 4 A, esta diferencia puede ser debido al uso de diferentes osciloscopios, donde el osciloscopio del apartado de circuito final cuenta con una adquisición en el rango de 200 mV por división mientras que el de este apartado los realizo con 100 mV por división, lo que posiblemente ocasiona esa diferencia de voltaje , otra razón puede ser la dificultad que tiene este sensor de notar cambios en amperajes pequeños, a pesar de esa diferencia podemos decir que la PCB funciona de forma correcta en ambos sensores.

3.7.1 Caja del proyecto

En la Figura 44 se muestra la caja del proyecto a utilizar en este trabajo, la cual cuenta con dimensiones de 17x13x6 cm, esta elección se hace teniendo en cuenta la PCB de 13.52x11.43 cm, en cuanto a la altura, la PCB mide 4 cm con el transformador y se planeó un levantamiento de 1cm para la placa.



Figura 44 Caja del proyecto (COMPONENTESARAGON, 2024)

En la Figura 45 se muestran las perforaciones en la base de la caja para los tornillos M3, los cuales servirán como base para la PCB. Estas perforaciones cuentan con una separación de 12.8 cm en el ancho y 10.8 cm en el largo. Además, se considera una separación de 1.6 cm respecto al lado derecho de la caja.



Figura 45 Base de la caja del proyecto (Autoría propia)

En la figura 46 se muestra uno de los tornillos M3x25 mm, los cuales proporcionan una base para la PCB. Además, se emplean piezas cilíndricas de 1 cm impresas en 3D que funcionan como espaciadores para elevar la placa 1 cm, finalmente se utilizan tuercas para los tornillos M3, con el fin de asegurar la placa.

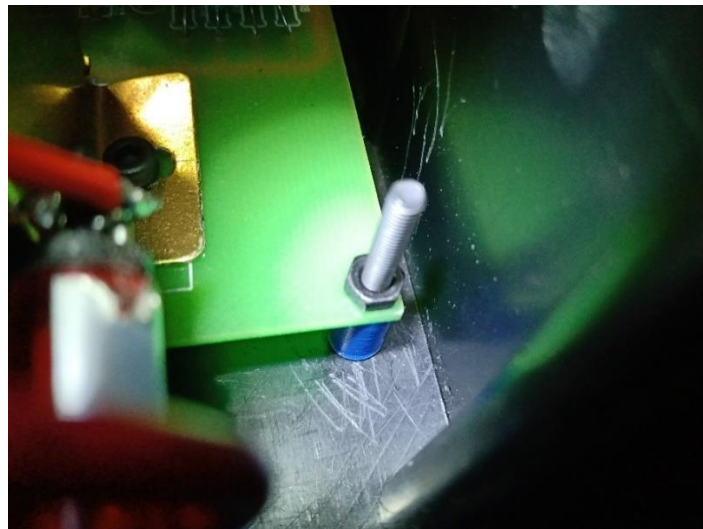


Figura 46 Separación de la PCB con la caja (Autoría propia)

En la Figura 47 se muestra la cara lateral izquierda de la caja, donde se colocan el conector del cable CA y el interruptor en un hueco de 4.36 x 1.71 cm, y el foco piloto en una perforación de 0.94 cm de diámetro. El conector con el interruptor se ubica en la esquina derecha, mientras que el foco piloto en la esquina izquierda.



Figura 47 Interruptor y foco piloto de la caja (Autoría propia)

En la Figura 48 se muestra la cara lateral derecha de la caja, donde se colocan los 2 conectores de 8 bits y el conector VGA, para ello se realizan 3 huecos de 1.94 x 1.1 cm, para el de 8 bits se colocan en la esquina izquierda y par el de VGA en la esquina derecha.



Figura 48 Conectores para las entradas y salidas de la PCB (Autoría propia)

Con los conectores y la PCB fijados, se efectúan las soldaduras del transformador y del foco piloto al interruptor, junto con la conexión de CA.

En la Tabla 6 se especifican las conexiones de los pines para los conectores de 8 bits y VGA respecto al cable de conexión, utilizando una numeración que va de derecha a izquierda y de arriba hacia abajo. De este modo, tomando como referencia la Figura 48, el pin ubicado en la esquina superior izquierda de cualquier conector corresponde al número 1.

Tabla 6 Conexiones de los conectores VGA y 8 bits (Autoría propia)

Núm. De pin	Conectores		
	8 bits hembra	8 bits macho	VGA hembra
1	No conexión	Cable rojo	No conexión
2	Cable blanco	No conexión	No conexión
3	Cable azul	Cable azul	Cable azul claro
4	No conexión	Cable blanco	Cable verde claro
5	Cable rojo	No conexión	Cable rojo claro
6	Cable verde	No conexión	No conexión
7	No conexión	Cable morado	No conexión
8	Cable morado	No conexión	No conexión
9	No conexión	Cable verde	No conexión
10 a 13 y 15	-----	-----	No conexión
14	-----	-----	Cable café

Para las entradas (8 bits) del sensor de efecto hall solo se necesitan 4 pines, para el de toroide solo 2 y para la salida (VGA) solo 3, por lo que se soldaran los cables necesarios a los conectores en los pines elegidos, se recomienda usar cable no tan rígido.

En la Figura 49 se muestra, la PCB posicionada en la caja con los cables de los conectores soldados, así como las conexiones del foco piloto, el transformador y el interruptor con la conexión de CA.



Figura 49 PCB en la Caja del proyecto (Autoría propia)

3.8 Muestreo

Se realizan tres pruebas con el motor del torno, tres con la medición de corriente de una pistola de calor Trupper y seis en un motor al que se le aplica un barrido de frecuencias: tres con el motor en condiciones normales y 3 con dos espiras en cortocircuito.

En la Figura 50 se muestra la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6211, con la cual se realiza la captura a una tasa de 5000 muestras por segundo (5 KHz).



Figura 50 Tarjeta de adquisición de National Instruments NI USB-6211 (Autoría propia)

Se menciona que, según la normativa IEC 61000-4-7 señalada en el apartado de normas, se especifica que los sistemas de medición de corriente deben ser capaces de adquirir en una frecuencia de muestreo de por lo menos el armónico 50, es decir, 60 Hz por 50, por lo que la frecuencia de muestreo debe ser de 3 KHz. Además, según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos 2 veces mayor a la frecuencia máxima, sin embargo, en la práctica se recomienda una frecuencia aún mayor. Por lo tanto, en este caso se requiere una frecuencia de muestreo de 8 KHz. Aunque la frecuencia de 5 KHz no cumple con este criterio, se utiliza debido a que el programa para la adquisición cuenta con ese valor por defecto.

Las pruebas se realizarán siguiendo las mismas indicaciones que las anteriores pruebas realizadas en esta sección de metodología.

En la Figura 51 se muestra la colocación del circuito de acondicionamiento para la prueba del torno a una velocidad de 224 RPM, donde los sensores se colocan en un cable individual que proporciona alimentación al caso de estudio y con su orientación en la misma dirección.

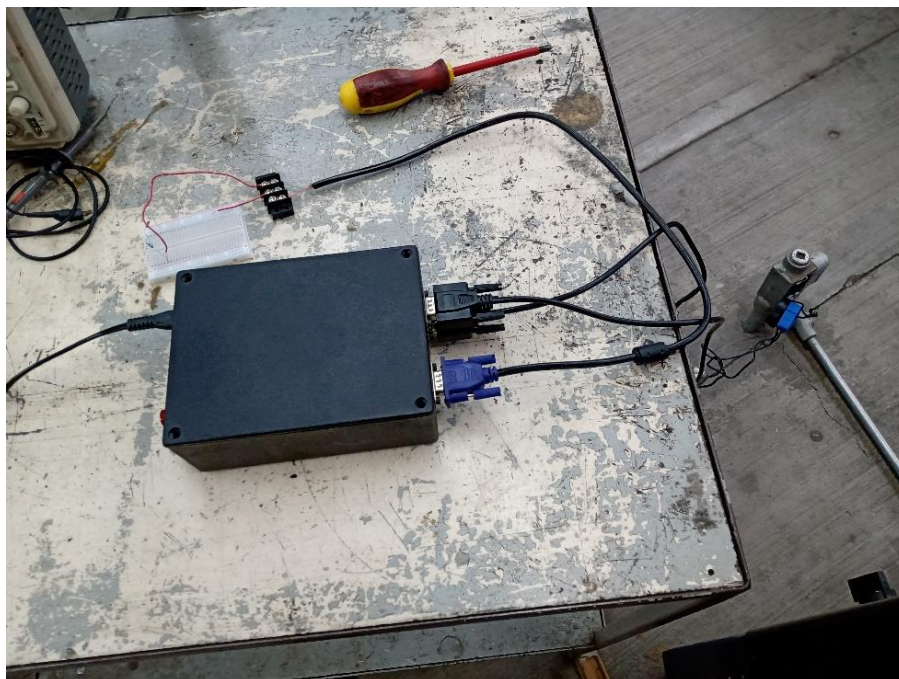


Figura 51 Colocación del sistema de acondicionamiento y los sensores para la prueba del torno (Autoría propia)

En la Figura 52 se muestran las señales de los sensores durante la prueba, en la cual se inicia la adquisición de datos, luego se enciende el torno y, pasados 5 segundos, se apaga y se finaliza la prueba.

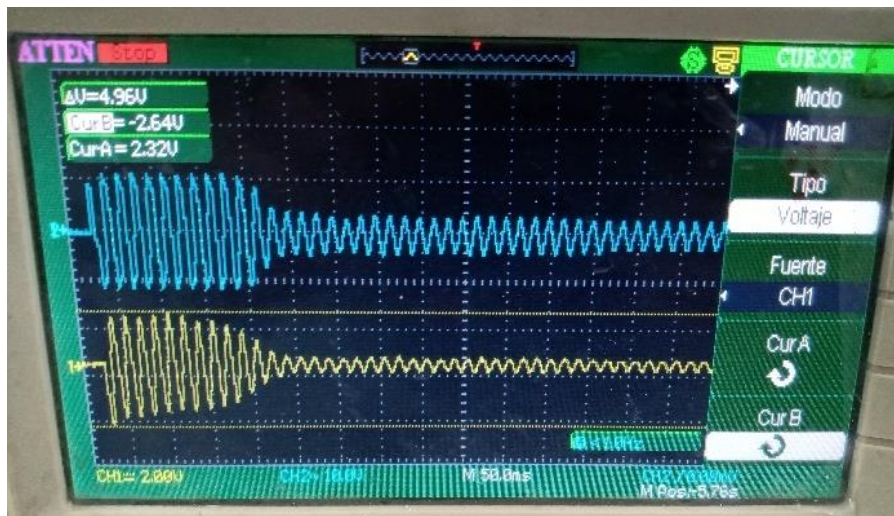


Figura 52 Señales de los sensores, señal azul (sensor de toroide) y señal amarilla (sensor de efecto Hall) (Autoría propia)

En la Figura 53 se muestra la pistola de calor TRUPPER que se utiliza en la siguiente prueba. Esta herramienta se encuentra disponible en el taller de la Facultad de Ingeniería.



Figura 53 Pistola de calor TRUPPER (Autoría propia)

En la Figura 54 se observan las especificaciones de la pistola de calor, como el modelo y el consumo en watts.



Figura 54 Especificaciones de la pistola de calor (Autoría propia)

Para la prueba, se inicia la adquisición de datos y se coloca la pistola en la temperatura baja (paso 1). Después de aproximadamente 2 segundos, se cambia a la temperatura más alta (paso 2); transcurridos otros 2 segundos, se regresa al paso 1 y, tras 2 segundos adicionales, se apaga la pistola y se finaliza la prueba.

En la Figura 55 se muestra el motor utilizado para la prueba de barrido de frecuencias, donde se observa que está conectado a una polea cuyo propósito es proporcionar una carga.

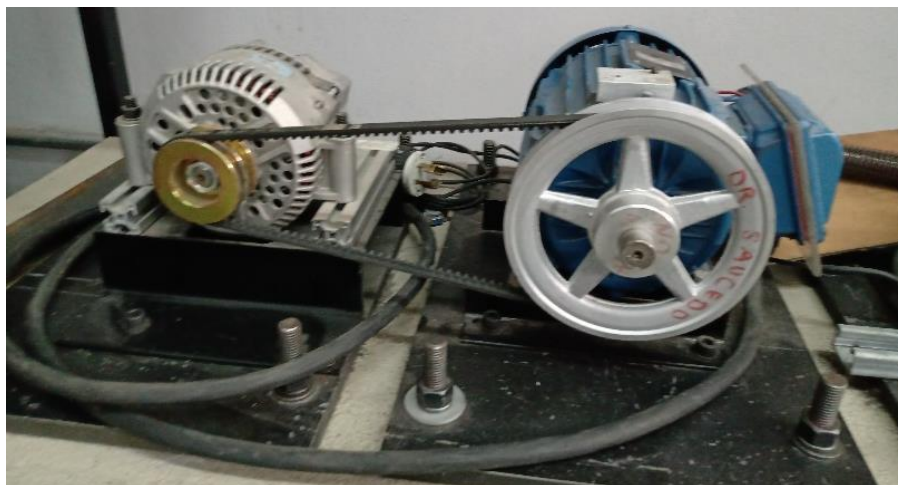


Figura 55 Motor con espiras en corte (Autoría propia)

En la Figura 56 se muestra la placa de datos, la cual especifica la potencia de 1.49 HP o CP y el amperaje nominal de 2.53 A.

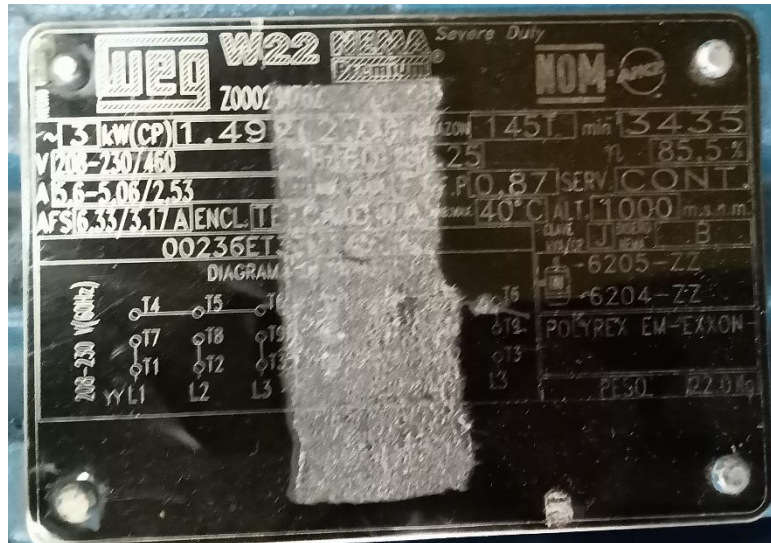


Figura 56 Placa de datos del motor (Autoría propia)

Primero se programó el variador de frecuencias de la Figura 57, el cual realizara una rampa de arranque de 5 segundos con una frecuencia de 30 Hz.



Figura 57 Variador de frecuencia (Autoría propia)

En la Figura 58 se muestra la colocación de los sensores para la prueba, en la cual se inicia la adquisición de datos una vez que se presiona el botón verde del variador de frecuencia. Transcurridos 5 segundos, se finaliza la prueba.



Figura 58 Colocación de los sensores (Autoría propia)

En la Figura 59 se muestra la resistencia usada para controlar el amperaje que producen las espiras en cortocircuito.



Figura 59 Resistencia para las espiras en corto (Autoría propia)

En la Figura 60 se muestra el tablero para la selección de espiras en cortocircuito. El botón con los dos puntos que se encuentra activado indica que se colocan dos espiras en cortocircuito.

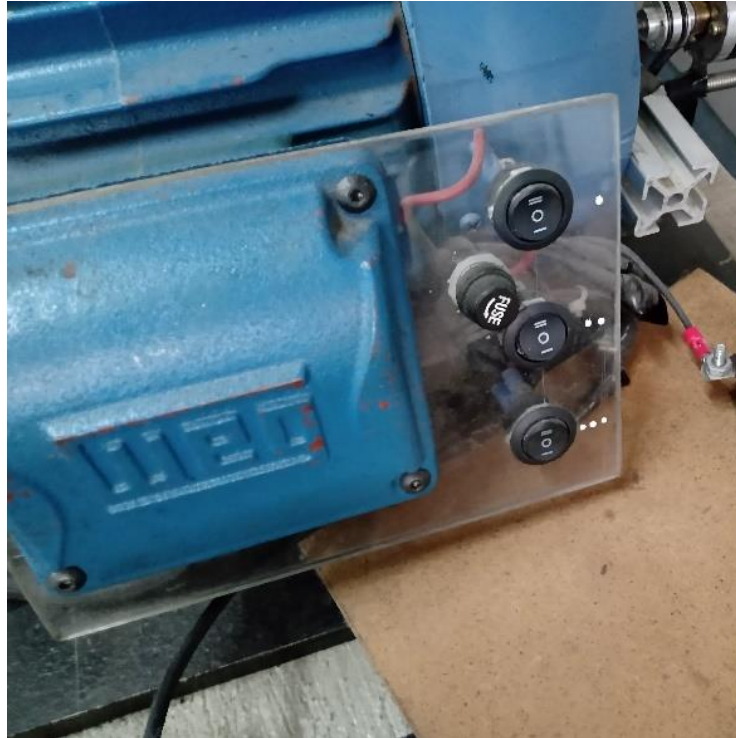


Figura 60 Tablero para seleccionar el número de espiras en corto (Autoría propia)

Con las pruebas realizadas y los datos capturados, se inicia el análisis de los datos.

3.9 Análisis de los datos

Para el análisis de los datos, se emplea un software que opere con un lenguaje de alto nivel para realizar cálculos numéricos. Matlab cumple con estas características, pero requiere licencia; por ello, se utiliza una alternativa libre y gratuita, GNU Octave, la cual funciona de manera similar a Matlab, y cuya documentación y ejemplos pueden ser compatibles con GNU Octave.

Con el software, se utilizan funciones como `csvread()` para leer los datos adquiridos. Estos datos se modifican utilizando las fórmulas 4 y 5 para convertir las lecturas de voltaje a amperaje.

En las gráficas de la Figura 61 se observan los datos de corriente en función del tiempo para ambos sensores, utilizando la función `plot()`. La gráfica A corresponde al sensor de toroide y la B al sensor de efecto Hall. En ambas gráficas se identifican múltiples puntos que pueden eliminarse, como las lecturas de cero cuando el torno esta apagado. No obstante, lo más relevante es tomar únicamente la lectura del arranque del sensor de efecto Hall y unirla con la lectura del estado transitorio del sensor de toroide, con el fin de obtener una única señal. Para ello, es necesario desarrollar un programa capaz de detectar los estados transitorio y estacionario, empleando como criterio principal la característica que mejor los diferencia en este caso: el voltaje pico a pico. El análisis de estos datos se centra principalmente en las pruebas del torno, ya que en estas el fenómeno del estado transitorio es más evidente, alcanzando incrementos de hasta diez veces.

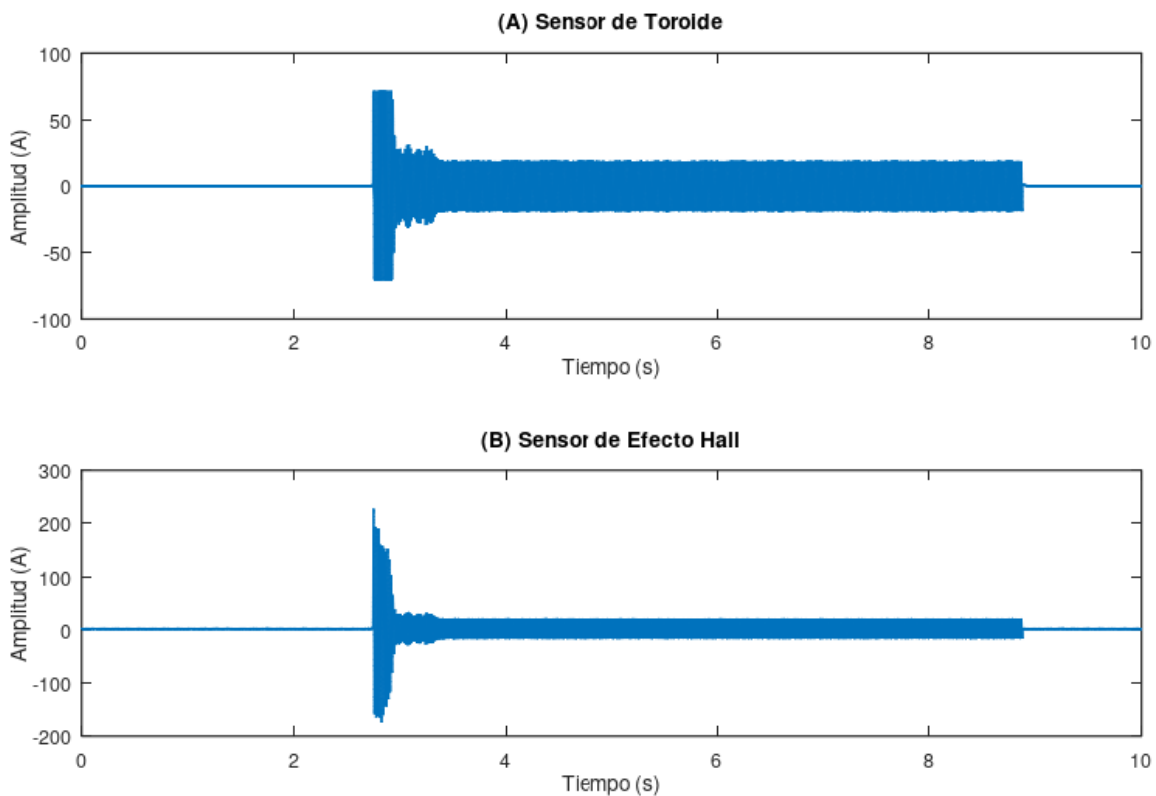


Figura 61 Señales de la corriente del torno de la prueba 1 del sensor de toroide (A) y efecto Hall (B) (GNU Octave, 2025)

En la Figura 62 se presenta un ejemplo del funcionamiento de algoritmo diseñado para detectar los estados transitorio y estacionario. El proceso inicia con la detección de un valor cercano a cero, lo que da comienzo a la adquisición. Esta finaliza al detectar nuevamente un valor cercano a cero. Durante la adquisición, se identifican los valores máximo y mínimo, siendo el mínimo igual a cero en este caso. Con base en el voltaje pico-pico, se determina si la señal adquirida corresponde a un estado estacionario o transitorio. Una vez determinado, la adquisición vuelve a empezar.

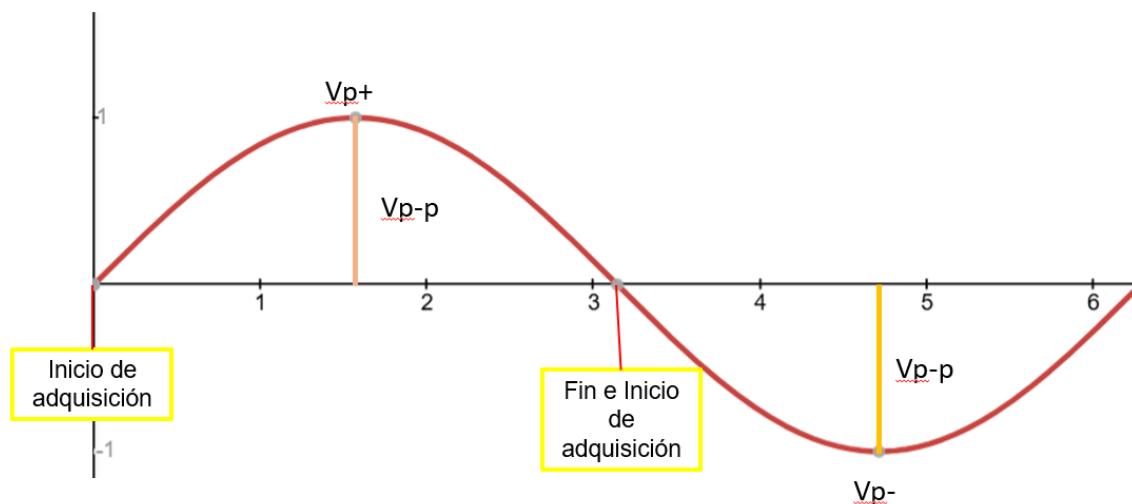


Figura 62 Funcionamiento del algoritmo de detección del voltaje pico (Autoría propia)

Para calcular el voltaje pico-pico tanto en el ciclo negativo como en el positivo se utiliza la fórmula 6.

$$V_{p-p} = \text{abs}(V_{p+} - V_{p-}) \quad (6)$$

V_{p-p} : voltaje pico-pico

V_{p-} : voltaje pico negativo

V_{p+} : voltaje pico positivo

En la gráfica de la Figura 63 se muestra la señal con los puntos correspondientes al torno apagado ya eliminados, así como la señal resultante de la combinación del estado transitorio detectado por el sensor de efecto Hall y el estado estacionario captado por el sensor de toroide. El punto rojo indicado en la gráfica representa la transición entre el estado transitorio y el estacionario, según lo determinado por el algoritmo.

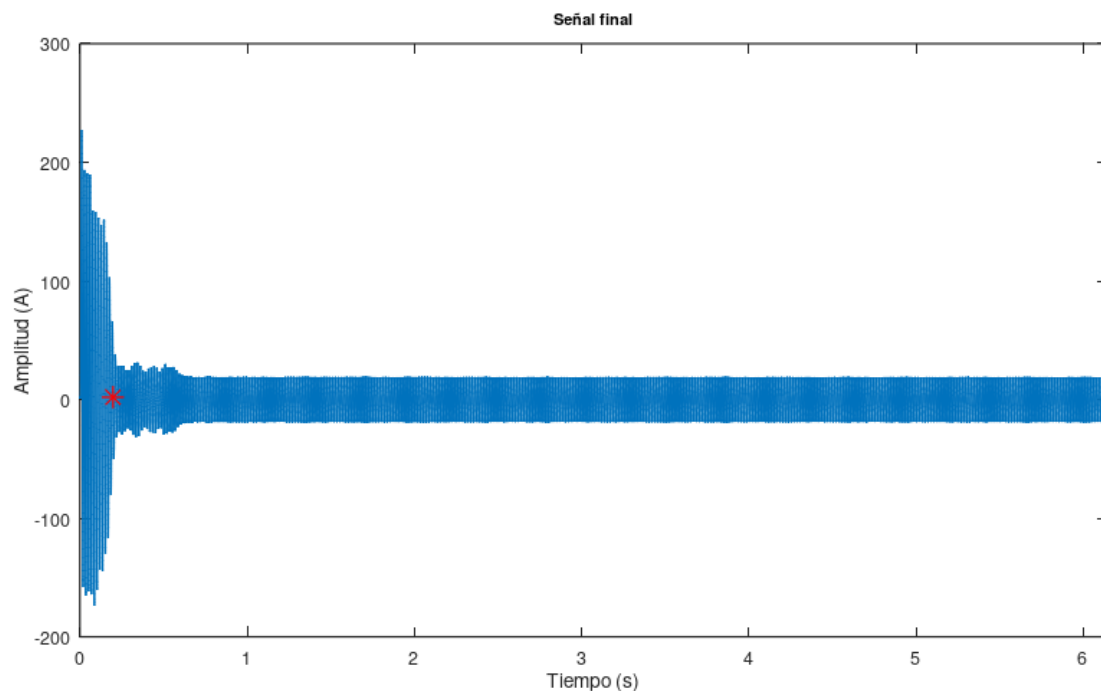


Figura 63 Señal de la corriente del torno modificada por el algoritmo (GNU Octave, 2025)

Con la nueva señal, es posible iniciar el análisis de los datos. Para ello, se emplea un análisis simple, como la FFT. Si bien la FFT no es el método más adecuado para analizar estados transitorios, los métodos más eficaces requieren un mayor nivel de especialización. Además, el análisis del estado estacionario resulta suficiente para este caso de estudio. Para el análisis mediante FFT, se utiliza como referencia la documentación de MATLAB correspondiente a dicha función, con el objetivo de generar una gráfica del espectro de amplitud unilateral. En este proceso, se analizan los datos desde 0 hasta 1 segundo, realizando pruebas cada 0.2 segundos hasta completar el intervalo.

En las gráficas de la Figura 64 se presentan los análisis por FFT realizados en el intervalo de 0 a 0.2 segundos, correspondiente al estado transitorio. Las gráficas A, B y C muestran el intervalo transitorio de las pruebas 1, 2 y 3, respectivamente, mientras que las gráficas D, E y F muestran la FFT de cada uno de estos intervalos.

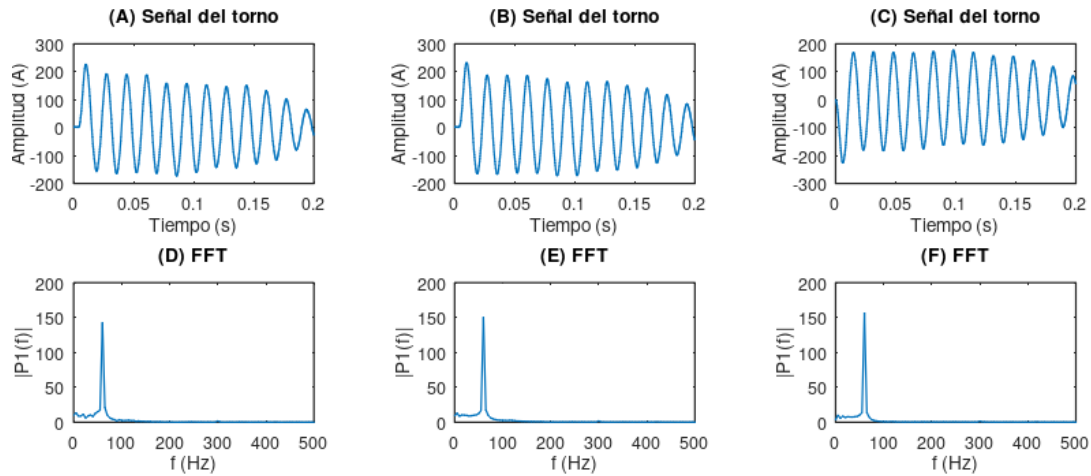


Figura 64 FFT de la señal de corriente del torno de las 3 pruebas de 0-0.2 seg. (GNU Octave, 2025)

En las gráficas de la Figura 65 se presentan los análisis por FFT realizados en el intervalo de 0.8 a 1 segundos, correspondiente al estado estacionario. Las gráficas A, B y C muestran el intervalo estacionario de las pruebas 1, 2 y 3, respectivamente, mientras que las gráficas D, E y F muestran la FFT de cada uno de estos intervalos.

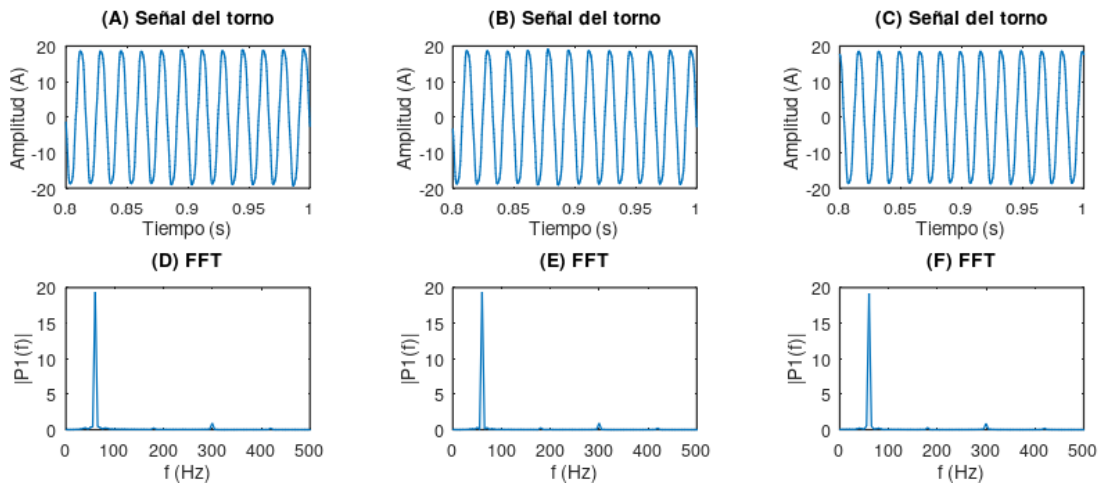


Figura 65 FFT de la señal de corriente del torno de las 3 pruebas de 0.8-1 seg. (GNU Octave, 2025)

El mismo proceso se realiza con las señales de las demás pruebas y, finalmente, con las gráficas de la FFT se procede al análisis de los resultados en la siguiente sección.

Capítulo 4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, que incluyen el sistema de acondicionamiento para sensores de corriente con una salida de ± 12 V, así como los gráficos obtenidos de la FFT de cada una de las pruebas.

4.1 Sistema de acondicionamiento

En la Figura 66 se muestra el dispositivo diseñado, específicamente su parte frontal. En esta se localiza el conector para el cable de alimentación CA, un interruptor para el encendido y apagado, y un LED piloto que indica el estado del dispositivo, el cual puede estar encendido o apagado.



Figura 66 Parte frontal del sistema de acondicionamiento (Autoría propia)

En la Figura 67 se observa la parte trasera del dispositivo, donde se encuentran dos conectores de 8 bits, uno hembra y otro macho, ambos conectados a las entradas de los sensores en la PCB. Además, se incluye un conector VGA hembra destinado a la salida de los dos sensores.



Figura 67 Parte trasera del sistema de acondicionamiento (Autoría propia)

Para los sensores conectados, se utiliza un cable compatible con cada tipo de conector, con el fin de evitar accidentes por conexiones erróneas.

En la Figura 68 se muestra el cable de 8 bits hembra conectado al sensor de toroide, cuya entrada en el sistema de acondicionamiento corresponde al conector 8 bits macho.



Figura 68 Sensor de toroide o basado en transformadores con su cable 8 bits hembra (Autoría propia)

En la Figura 69 se muestra el cable de 8 bits macho conectado al sensor de efecto Hall, cuya entrada en el sistema de acondicionamiento corresponde al conector 8 bits hembra.



Figura 69 Sensor de efecto Hall con su cable 8 bits macho (Autoría propia)

En la Figura 70 se muestra un cable VGA macho conectado a una terminal de tornillos, el cual sirve como salida del sistema. Esta salida se conecta a la entrada del sistema de acondicionamiento, correspondiente al conector macho de 8 bits.



Figura 70 Conector VGA macho para la salida del sistema de acondicionamiento (Autoría propia)

4.2 Torno

En la Figura 71 se muestra la señal de salida del sistema de acondicionamiento correspondiente al sensor de toroide, registrada durante la prueba del torno en la gráfica A. En la gráfica B se presenta la señal obtenida con el sensor de efecto Hall. En la gráfica A se observa que, al encenderse el torno, el sensor de toroide se satura, lo que genera una señal cuadrada durante el estado transitorio. En cambio, el sensor de efecto Hall proporciona una lectura correcta de la señal de corriente.

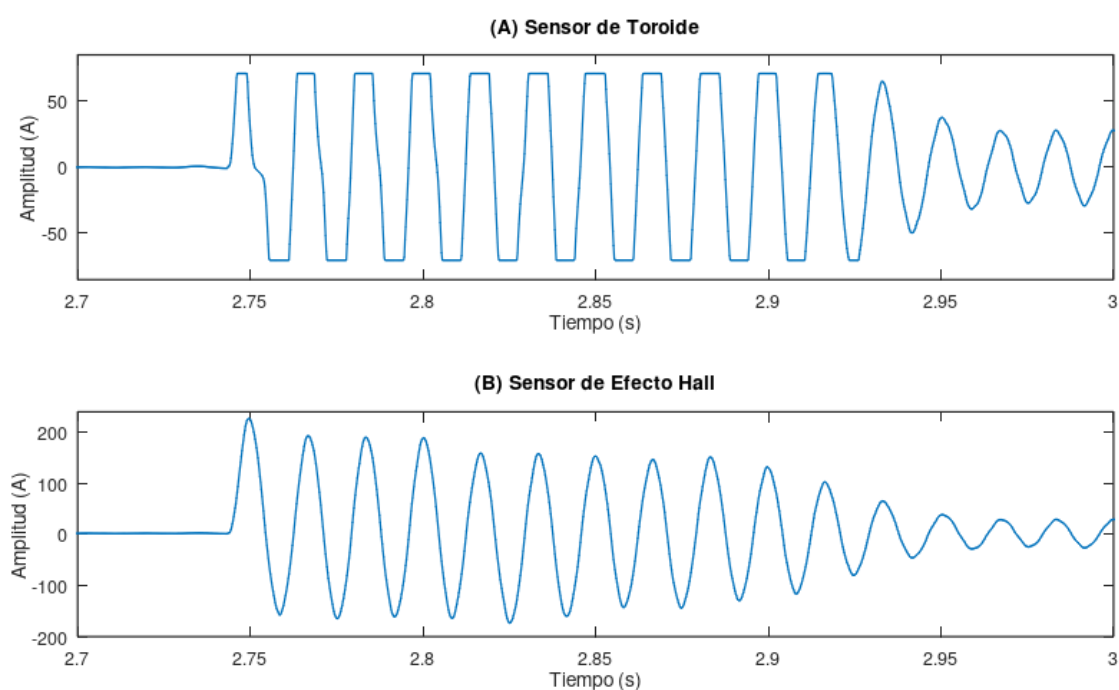


Figura 71 Arranque del motor del torno en ambos sensores (GNU Octave, 2025)

Por el contrario, en el estado estacionario no se aprecia un comportamiento diferente entre los sensores. Sin embargo, al analizar una pequeña cantidad de datos en este estado, se pueden observar diferencias significativas en la forma de la señal.

En la Figura 72 se muestran once puntos correspondientes a la lectura de corriente del torno, donde la señal roja representa al sensor de efecto Hall y la azul al sensor de toroide. Se observa que los valores registrados por ambos sensores no coinciden en algunos puntos. Además, la señal del sensor de toroide presenta una forma más cercana a una onda sinusoidal, mientras que la del sensor de efecto Hall muestra distorsiones tipo "curva cuadrada", como puede apreciarse en el octavo punto. Otro ejemplo se encuentra en los puntos nueve y diez, los cuales permanecen casi constantes en la señal roja, mientras que en la azul presentan variación.

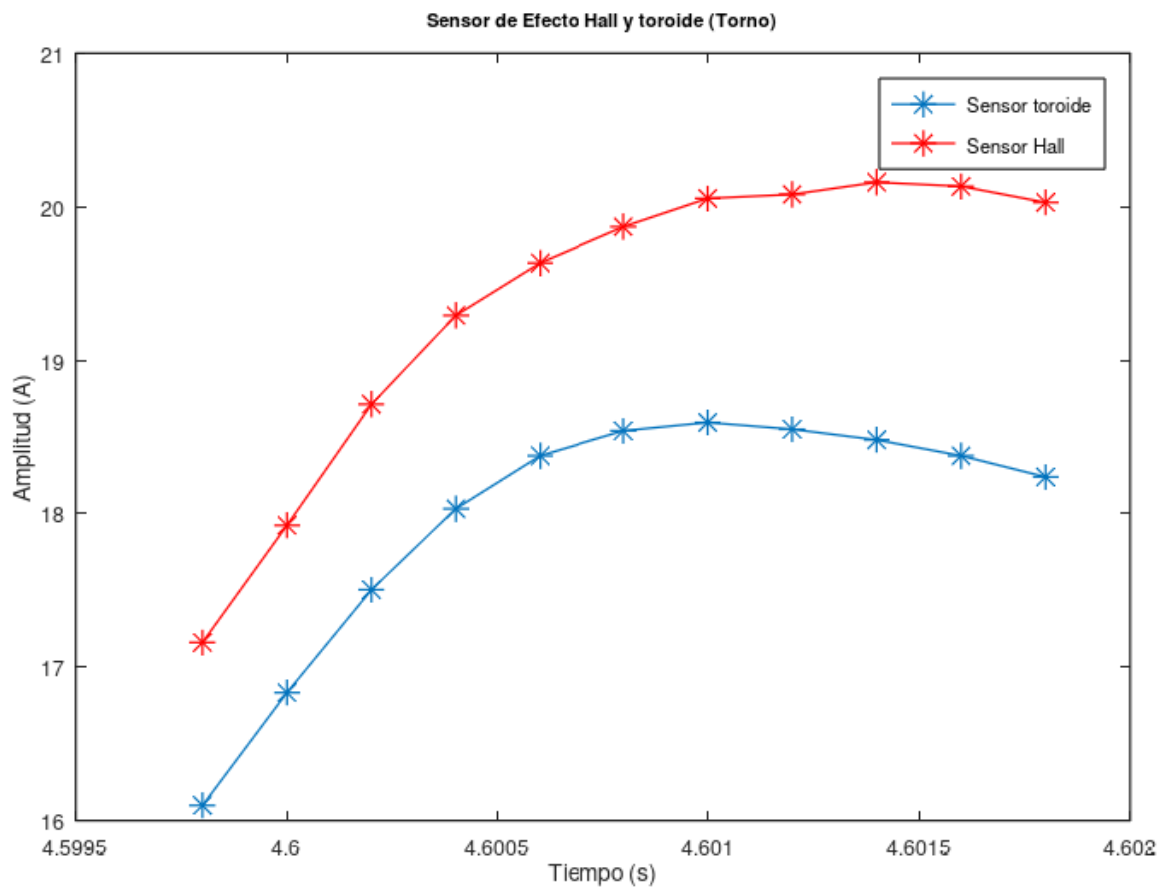


Figura 72 11 puntos de la señal del motor del torno en ambos sensores del estado estacionario (GNU Octave, 2025)

En la Tabla 7 se presentan los datos correspondientes a la ventana mostrada en la Figura 72, en los cuales se evidencia la diferencia mencionada previamente en los puntos nueve y diez.

Tabla 7 Datos de la ventana de la Figura 72

Punto	Señal del sensor de toroide	Señal de sensor de efecto Hall
1	16.099	17.161
2	16.834	17.924
3	17.504	18.713
4	18.032	19.291
5	18.377	19.633
6	18.54	19.87
7	18.594	20.054
8	18.55	20.08
9	18.481	20.159
10	18.377	20.133
11	18.238	20.028

Las diferencias observadas entre el estado transitorio y el estado estacionario se deben a las características de resolución y rango de cada sensor. El sensor de toroide, al contar con mayor resolución, pero menor rango, permite registrar con precisión la señal de corriente en estado estacionario; sin embargo, se satura ante incrementos bruscos de corriente durante el estado transitorio. Por otro lado, el sensor de efecto Hall, con un mayor rango, pero menor resolución, evita la saturación en el transitorio, aunque presenta limitaciones para detectar variaciones pequeñas de corriente en el estado estacionario.

En las gráficas de la Figura 73 se presentan los análisis por FFT realizados en el intervalo de 0.8 a 1 segundo, correspondiente al estado estacionario. Las gráficas A, B y C muestran el intervalo de 0.2 segundos para las pruebas 1, 2 y 3, respectivamente. Por su parte, las gráficas D, E y F presentan el análisis FFT correspondiente a cada una de estas pruebas. En estas tres gráficas se observa la presencia de los armónicos 1 (60 Hz), 3 (180 Hz), 5 (300 Hz) y 7 (420 Hz). La frecuencia del armónico 1 corresponde a la frecuencia fundamental del sistema, mientras que la aparición de armónicos impares puede estar asociada a fallas en el motor (eléctricas o mecánicas), en la red eléctrica o a la influencia de una carga externa.

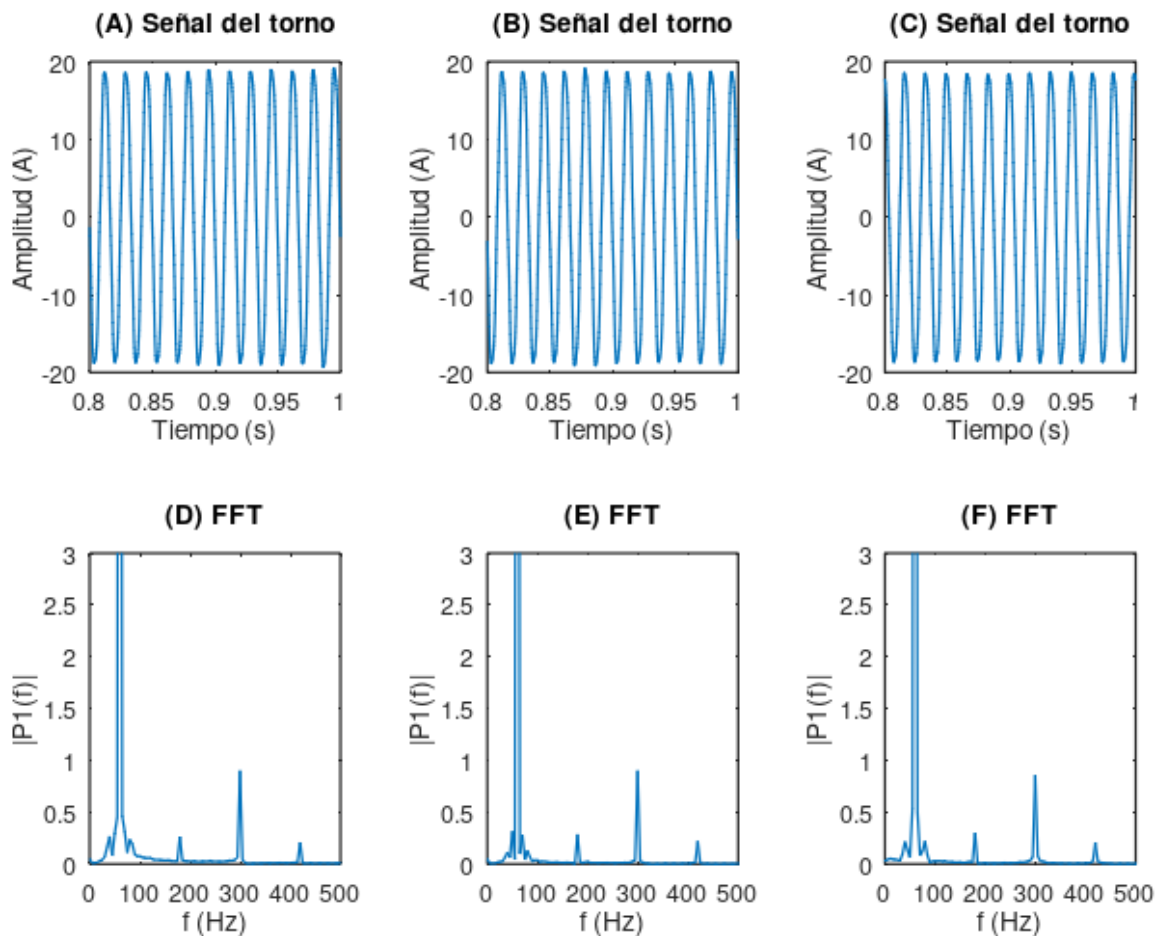


Figura 73 FFT de las tres pruebas de la señal de corriente del torno en 0.8-1 seg (GNU Octave, 2025)

4.3 Resistencia (Pistola de calor)

En la Figura 74 se muestra la señal de corriente de la pistola de calor registrada en la primera prueba por el sensor de toroide, esta señal de corriente no pasa de los 20 A por lo que está dentro del rango del sensor de toroide.

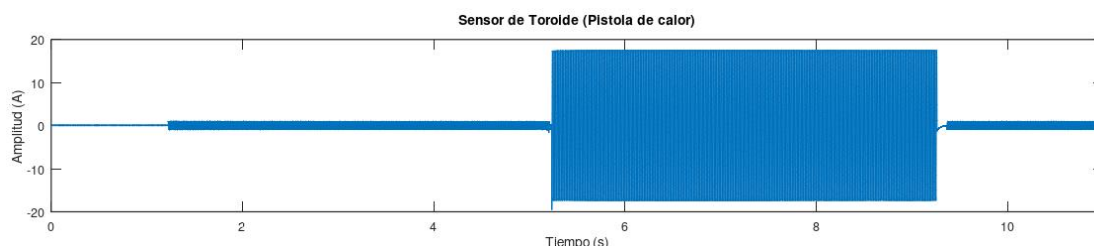


Figura 74 Señal de sensor de toroide de la pistola de calor (GNU Octave, 2025)

En las gráficas de la Figura 75 se presentan los análisis por FFT realizados en el intervalo de 6.75 a 7 segundos, asociado al nivel 2 de la pistola de calor. Las gráficas A, B y C muestran el intervalo de 0.25 segundos para las pruebas 1, 2 y 3, respectivamente. Por su parte, las gráficas D, E y F presentan el análisis de la FFT correspondiente a cada una de estas pruebas. En estas tres gráficas se observa la presencia de los armónicos 1 (60 Hz), 3 (180 Hz), 5 (300 Hz), 7 (420 Hz) y 9 (540 Hz), a diferencia de la FFT del torno la presencia de esto armónicos podría ser por el ruido causado de la red eléctrica debido a que su magnitud respecto a la de la frecuencia fundamental es muy poca.

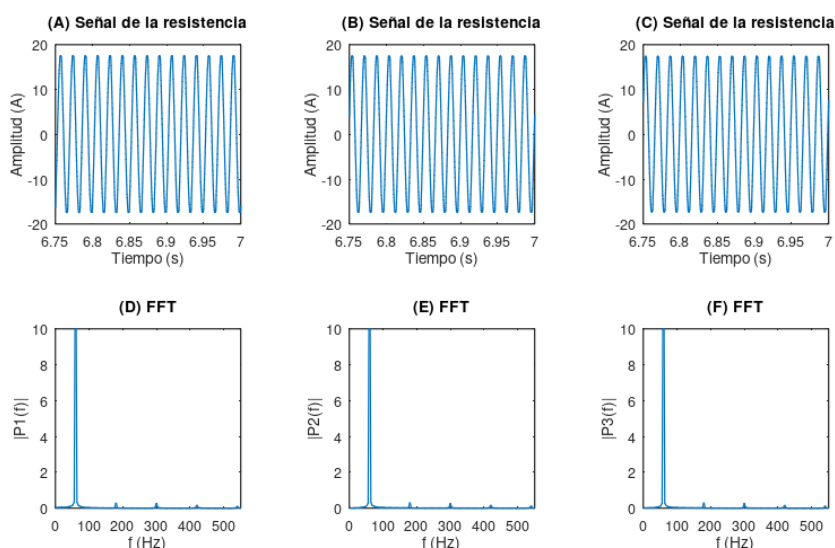


Figura 75 FFT de la señal de la pistola de calor de 6.75-7 seg (GNU Octave, 2025)

En las gráficas de la Figura 76 se presentan los análisis por FFT realizados en el intervalo de 2.75 a 3 segundos, correspondiente al nivel 1 de la pistola de calor. Las gráficas A, B y C muestran el intervalo de 0.25 segundos para las pruebas 1, 2 y 3, respectivamente. Las gráficas D, E y F presentan el análisis FFT correspondiente a cada una de estas pruebas. Al igual que en el nivel 2, se identifican los armónicos 3, 5 y 9; sin embargo, el armónico 7 no es visible en este nivel. Esto sugiere que la aparición de dichos armónicos puede deberse al ruido de la red eléctrica.

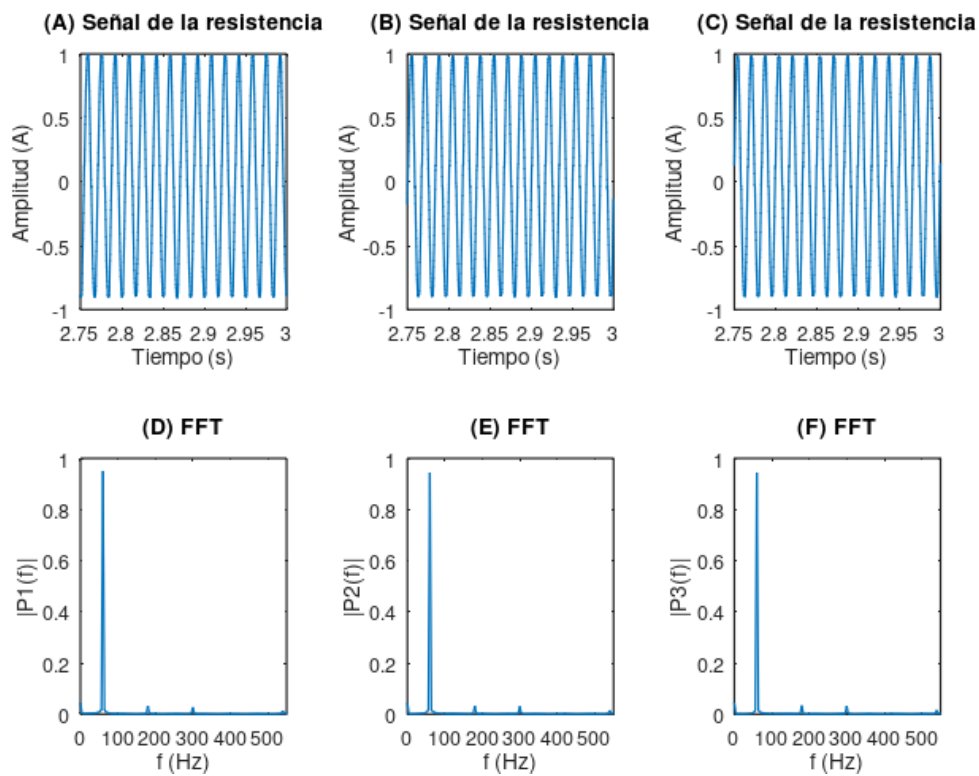


Figura 76 FFT de la señal de la pistola de calor de 2.75-3 seg (GNU Octave, 2025)

4.4 Motor con y sin espiras en corte

En la Figura 77 se muestra la señal de corriente del motor sano, registrada por el sensor de toroide, cuyo caso es similar al de la pistola de calor, ya que el sensor de toroide posee el suficiente rango para medir correctamente ese caso.

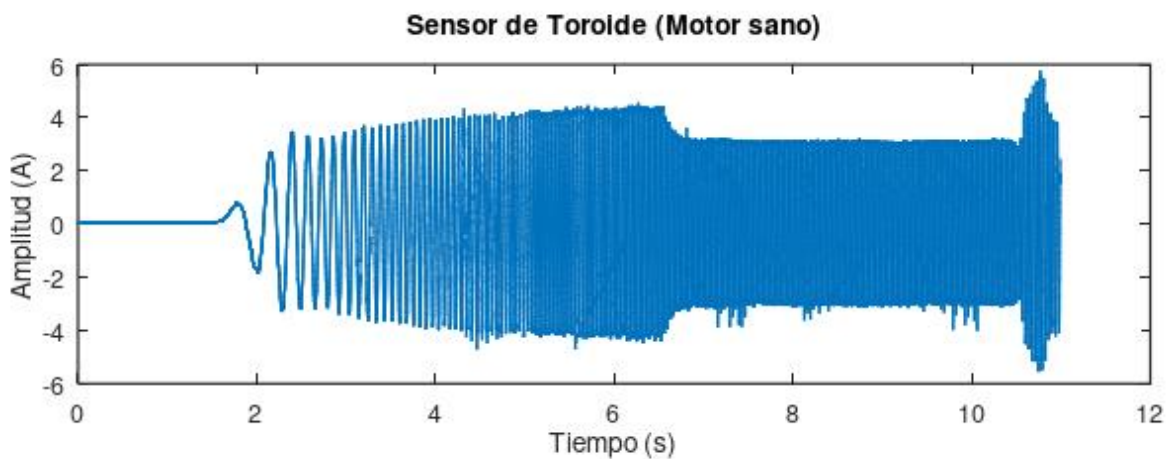


Figura 77 Señal del sensor toroide para el motor sin espiras en corte (GNU Octave, 2025)

En la Figura 78 se muestra la señal de corriente del motor con 2 espiras en cortocircuito, registrada por el sensor de toroide.

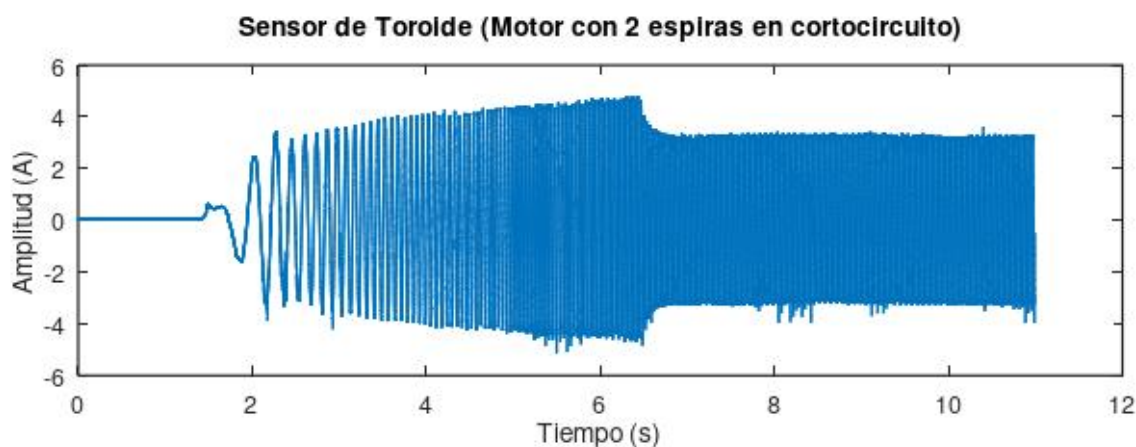


Figura 78 Señal del sensor de toroide para el motor con espiras en corte (GNU Octave, 2025)

En las gráficas de la Figura 79 se presentan los análisis por FFT realizados en el intervalo de 8 a 8.5 segundos, correspondiente al estacionario del motor donde el barrido de frecuencias termino y la frecuencia base es de 30 Hz. Las gráficas A, B y C muestran el intervalo de 0.5 segundos para las pruebas 1, 2 y 3 del motor sano, respectivamente. Las gráficas D, E y F presentan el análisis FFT correspondiente a cada una de estas pruebas. Por otra parte, las gráficas G, H e I representan el mismo intervalo de tiempo para las pruebas 1, 2 y 3 del motor con espiras en cortocircuito, mientras que las gráficas J, K y L presentan el análisis FFT correspondiente.

Si bien no se observa una diferencia notable entre el motor en condiciones normales y aquel con espiras en cortocircuito, las FFT del motor con fallas evidencian un aumento en los armónicos 3 (90 Hz) y 5 (150 Hz), así como una disminución del armónico 7 (210 Hz), en comparación con los valores obtenidos en las FFT sin errores.

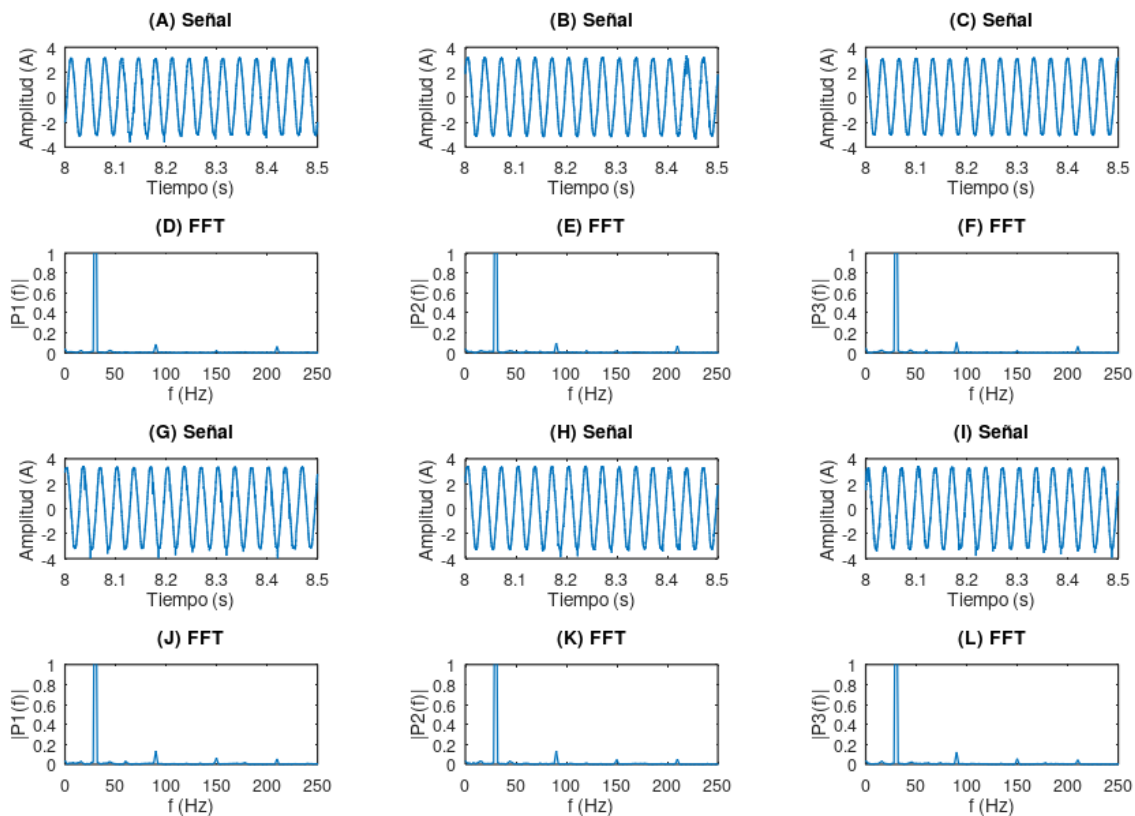


Figura 79 FFT para las señales del motor con y sin espiras (GNU Octave, 2025)

Capítulo 5. Conclusiones

En este trabajo de tesis, se presenta una metodología basada en el diseño de circuitos de acondicionamiento para sensores de corriente por efecto Hall y sensores basados en transformadores, con el objetivo de entregar datos enriquecidos a un sistema de adquisición de datos.

El sistema de acondicionamiento propuesto funciona de manera eficiente, ya que es capaz de entregar dos señales de voltaje dentro del rango de ± 12 V. Estas señales presentan diferentes resoluciones y rangos en función del sensor utilizado. Además, el sistema puede operar con diferentes sensores de corriente, siempre que correspondan al mismo tipo, es decir, sensores de efecto Hall y sensores tipo toroide. El sistema cumple, asimismo, con la normativa IEC 61000-4-7, recomendada para los filtros en la medición de disturbios eléctricos.

Adicionalmente, se propone un algoritmo capaz de determinar qué parte de la señal corresponde al arranque y cuál al estado estacionario. Este algoritmo es de naturaleza sencilla, ya que su única condición se basa en el voltaje pico a pico. Por esta razón, su funcionamiento se limita a dicho caso, aunque es factible implementar mejoras que permitan detectar otras características de los transitorios.

Al realizar el análisis de las FFT obtenidas, se observa que los armónicos impares (3, 5 y 7) aparecen en todas las pruebas, junto con la frecuencia fundamental de 60 Hz y, en el caso del motor del barrido de frecuencias, una componente de 30 Hz. No obstante, los armónicos impares muestran una mayor presencia en el motor de inducción del torno y en el motor con dos espiras en cortocircuito. En contraste, en la pistola de calor, los armónicos impares resultan casi imperceptibles en comparación con la fundamental de 60 Hz. Lo mismo ocurre con el motor de 1 hp en condiciones normales, donde la frecuencia fundamental es de 30 Hz.

Aunque la presencia de armónicos impares suele asociarse a una falla, ya sea debido a una carga conectada a la red, una falla eléctrica o mecánica en el motor, o incluso una deficiencia en el suministro de energía, se considera necesario

realizar un estudio basado en normativas sobre los límites armónicos, como la IEEE 519-2022.

Finalmente, se valida la efectividad del sistema mediante las gráficas obtenidas de los sensores, en las cuales puede observarse que, durante el arranque, el sensor tipo toroide se satura, generando datos incorrectos, para luego entregar datos válidos en el estado estacionario. Por su parte, el sensor de efecto Hall presenta el comportamiento opuesto, generando datos correctos durante el arranque.

5.1 Prospectivas

- Mejoras en el algoritmo de detección: El algoritmo actual de segmentación entre arranque y estado estacionario se basa únicamente en el análisis del voltaje pico a pico. En futuras investigaciones, podría desarrollarse un algoritmo más robusto, capaz de identificar otras características de los transitorios mediante técnicas de procesamiento de señales avanzadas o aprendizaje automático
- Evaluación con sensores alternativos: Si bien el sistema fue diseñado para sensores de efecto Hall y toroide, se sugiere explorar su compatibilidad con otros tipos de sensores de corriente, como sensores ópticos o sensores Rogowski, lo cual permitiría ampliar su aplicabilidad en diferentes entornos industriales.
- Modificación de la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos: Si bien la frecuencia de muestreo utilizada en este trabajo arrojó resultados correctos, resulta conveniente explorar cómo podrían variar estos resultados al considerar el teorema de Nyquist con una frecuencia de muestreo de 8 kHz
- Análisis del estado transitorio: Se propone aplicar un método numérico para el análisis detallado del estado transitorio en el caso de estudio, con el fin de obtener una caracterización más precisa del comportamiento dinámico del sistema.

5.2 Normas

En este trabajo se consideran diversas normas que regulan los sistemas de medición y la instrumentación, así como las directrices para el manejo de disturbios eléctricos y la seguridad en entornos propensos al arco eléctrico. Estas normas son esenciales para asegurar la precisión y confiabilidad en la medición de señales eléctricas, así como para garantizar la seguridad de los equipos y del personal en situaciones de riesgo. A continuación, se presentan las normas más relevantes que respaldan el diseño y la implementación de los circuitos de acondicionamiento en este estudio.

5.2.1 IEC 61000-4-7

Esta norma regula todo sistema que sea capaz de medir corriente, voltaje o potencia eléctrica. Dado el objetivo del presente trabajo, el circuito a implementar debe cumplir con los siguientes puntos especificados en la misma norma:

- El instrumento está diseñado para cumplir con mediciones de armónicos de orden menor o igual a 50, por ejemplo, para un sistema de 60Hz necesitará cumplir con frecuencias de 3 kHz aprox.
- La ventana de tiempo debe estar sincronizada con cada grupo de 10 o 12 ciclos dependiendo de la frecuencia (50Hz o 60Hz) por lo que su frecuencia de muestreo será de 6 kHz u 8 kHz (teorema de Nyquist).

5.2.2 IEEE 1159-2019

Esta norma define y clasifica los disturbios eléctricos en distintas categorías, en función de su espectro de frecuencia, duración y magnitud de la tensión. Su aplicación permite una adecuada identificación y análisis de fenómenos eléctricos anómalo.

5.2.3 IPC-2152

Este estándar industrial se utiliza para determinar la capacidad de corriente en las pistas de circuitos impresos, con el objetivo de seleccionar el ancho adecuado

para las pistas de cobre. La norma también considera la aplicación específica del circuito (por ejemplo, médica, automotriz o aeroespacial). En este estudio, se emplea únicamente para calcular el consumo máximo de corriente del circuito.

Para ello, se suman las corrientes máximas de consumo de cada componente, obtenidas de sus respectivas hojas de datos.

- Sensor de efecto Hall: 16 mA
- 2 TL084: 5 mA
- 1 AD620: 1.3 mA
- Corriente de consumo máxima: 22.3 mA

Con base en este valor, se recurre a la Figura 80 donde se usará la corriente de consumo máxima para determinar el área de la sección transversal de la pista de cobre. Dado que no se cuenta con una temperatura de aumento especificada para el diseño, se utiliza la más baja contemplada en la norma (10 °C). Bajo esta condición, se obtiene una sección transversal de 0.5 milésimas de pulgada cuadrada (sq-mils).

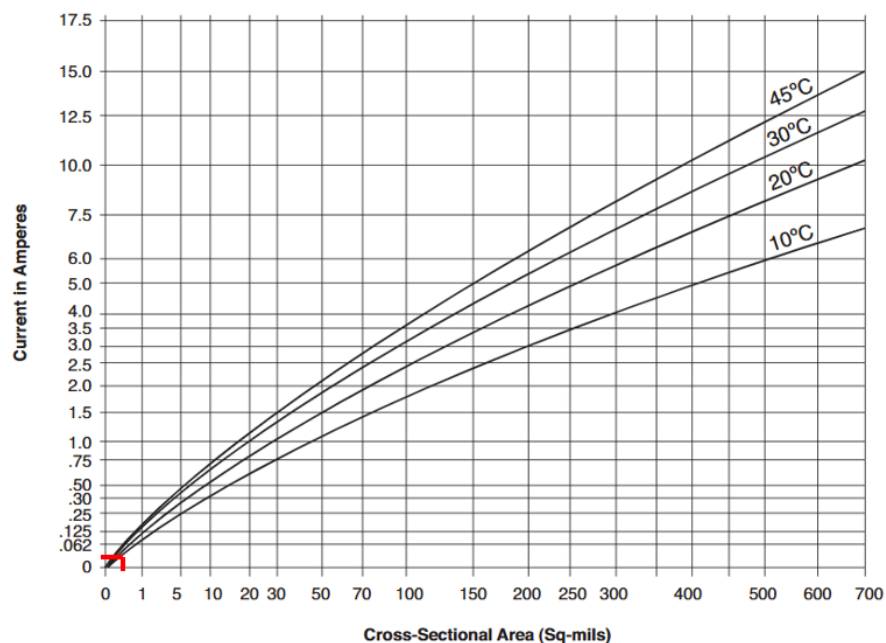


Figura 80 Gráfica para la selección del área transversal (Zhang, s. f.)

Con la sección transversal de 0.5 sq-mil determinada previamente, es posible utilizar la Figura 81 para calcular el ancho mínimo de pista. Para ello, también se requiere conocer la altura de la pista de cobre (track thickness), por lo que se adopta un valor estándar comúnmente utilizado en la industria: 1 oz/ft². Bajo esta condición, el ancho mínimo de pista necesario para este trabajo es de aproximadamente 0.0005 pulgadas (equivalente a 0.0127 mm).

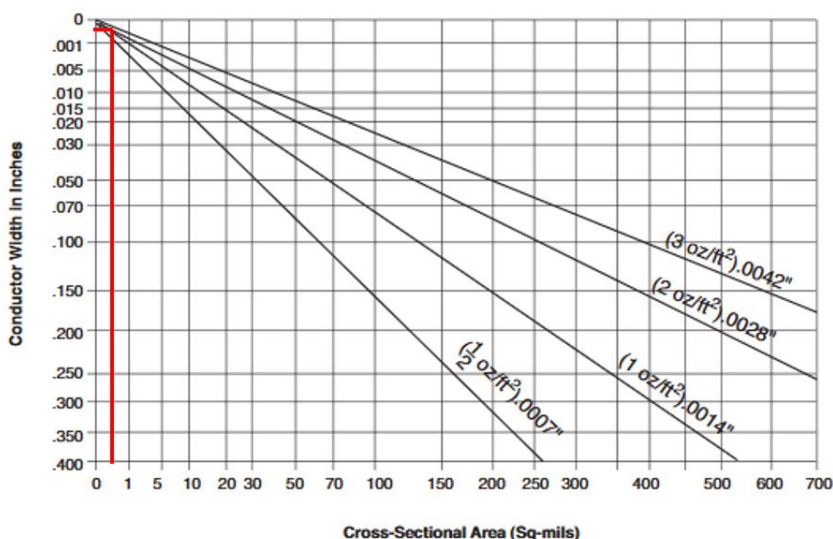


Figura 81 Gráfica para obtener el ancho mínimo de la pista (Zhang, s. f.)

5.3 Seguridad

Todas las pruebas se realizaron siguiendo las medidas de seguridad del Laboratorio/Taller de la UAQ, facultad de ingeniería Campus San Juan del Río y las siguientes recomendaciones dadas por FLUKE una empresa especializada en instrumentos de medición basadas en la NOM-029-STPS-2011:

5.3.1 Medidas de seguridad de FLUKE (NOM-029-STPS-2011)

- Evaluar el entorno antes de realizar la medición.
- No trabajar solo en áreas peligrosas.
- Utilizar el equipo de protección personal (PPE) establecido por NFPA 70 E según el riesgo de arco eléctrico (1-4).
- Asegurarse de que los instrumentos para las pruebas estén clasificados para el entorno de medición y el rango.
- Familiarizarse con los instrumentos de medición antes de realizar cualquier medición riesgosa (Fluke, 2024).

5.4 Materiales

Tabla 8 Materiales Físicos

Transformador 127V/12V 1A	Se encarga de reducir el voltaje para la fuente dual	
Puente rectificador 200V 2ª	Se encarga de rectificar el voltaje con el fin de separar positivo y negativo	
LM317	Se encarga de ajustar el voltaje positivo del transformador a un valor deseado	
LM337	Se encarga de ajustar el voltaje negativo del transformador a un valor deseado	
Opamp TL084	Amplificador operacional usado en circuitos de instrumentación	
AD620	Amplificador de instrumentación necesario para eliminar el offset de un sensor de efecto Hall	
YHDC HSTS023R (Sensor de Efecto Hall)	Sensor de corriente AC/DC basado en el Efecto Hall	
SCT013-000 SCT013 (Transformador de corriente)	Sensor de corriente AC de toroide o transformador de corriente	

Tabla 9 Softwares utilizados

Circuitjs	Software de simulación de circuitos eléctricos	
EasyEDA	Software de diseño de PCB	
GNU Octave	Software gratuito y de código abierto para cálculos numéricos con herramientas integradas de visualización y gráficos 2D/3D	

5.5 Usos y aplicaciones del proyecto

1. Monitoreo en Tiempo Real: Supervisión del consumo de corriente de la máquina durante su operación, donde se podrían identificar cambios relacionados con problemas mecánicos o eléctricos.
2. Detección de anomalías: Identificación de condiciones anormales, como sobrecargas o fallos.
3. Optimización de procesos: Al analizar el consumo de corriente con una mayor resolución, es posible realizar ajustes a los parámetros de operación de la máquina con el fin de obtener una mejor eficiencia si es posible.
4. Mantenimiento predictivo: Facilita la implementación de un sistema de mantenimiento basado en datos, donde el análisis de la corriente permite prever fallos antes de que ocurran.
5. Investigación y desarrollo: Los datos enriquecidos entregados pueden ser utilizados para, estudios sobre el comportamiento de máquinas herramientas y su respuesta a diferentes condiciones de operación.
6. Capacitación y formación: Como herramienta para enseñar sobre la cadena de instrumentación, principios de control, análisis de datos y filtros.

5.6 Bibliografía

- Administración. (2024). *¿Qué Es El Sensor De Corriente De Efecto Hall?* Hangzhi Precision – Hangzhi Precision. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://www.hangzhiprecision.com/es/centro-de-conocimiento/sensor-de-corriente-de-efecto-hall/>
- Administrador. (2023, 29 de mayo). *Filtros electrónicos: tipos, orden, fase*. Electrónica Unicrom. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://unicrom.com/filtros-electronicos-tipos-orden-fase/>
- Aliexpress. (2024). *Sensor de corriente SCT013-000 SCT01315A 20A 30A 50A 60A 100A 50MA SCT-013 0-100A1V1% derivación o interruptor, transformador de corriente 50HZ–150KHZ* – AliExpress 502. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://es.aliexpress.com/item/1005004647828268.html>
- Aliexpress. (2024). 15.91€ |YHDC Sensor de corriente de núcleo dividido HALL HSTS023R Entrada $\pm 50a \pm 100a \pm 200a \pm 300a \pm 400a \pm 500a \pm 600a$ Salida $2,5 \pm 0.625V$ 1% Tensión de alimentación + 5V - Transformadores - AliExpress. (2024). aliexpress.com. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://es.aliexpress.com/i/1005001605989714.html>
- alldatasheet.com. (2024). *AD620 PDF*. ALLDATASHEET. Recuperado 21 de mayo de 2024, de <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48090/AD/AD620.html>
- Bussman. (2005). *Motor protection*. Cooper Bussman. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/fuses/solution-center/bus-ele-tech-lib-motor-starting-currents.pdf>
- COMPONENTESARAGON. (2024). *Caja Proyectos Gabinete Plástico Negro Grande 17x13x6 Cm*. Mercado Libre. Recuperado 23 de agosto de 2024, de https://www.mercadolibre.com.mx/caja-proyectos-gabinete-plastico-negro-grande-17x13x6-cm/up/MLMU466894652#polycard_client=search-nordic&search_layout=grid&position=8&type=product&tracking_id=b3dc3944-dcd3-4fa5-b512-7b1bce9caac7&wid=MLM1886154961&sid=search
- Circuitjs. (2016). *Circuit simulator [Software]*. Paul Falstad (JavaScript). Recuperado de <https://www.falstad.com/circuit/>
- Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2015). *Sensores y actuadores: Aplicaciones con Arduino*. Grupo Editorial Patria.
- Crescentini, M., Syeda, S. F., & Gibiino, G. P. (2022, 1 de junio). *IEEE Xplore Full-Text PDF: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Sensors*

- Council. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9568879>
- Electrónica Unicrom. (2024, 8 octubre). Fuente de voltaje variable de doble polaridad. Electrónica Unicrom. Recuperado 18 de abril de 2025, de <https://unicrom.com/fuente-de-voltaje-variable-de-doble-polaridad/>
- Electropreguntas. (2023, 5 de febrero). *Corriente continua (DC) y corriente alterna (AC): conceptos básicos y usos*. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://electropreguntas.com/corriente-continua-dc-y-corriente-alterna-ac-conceptos-basicos-y-usos/>
- EasyEDA - Online PCB design & circuit simulator (STD Edition V6.5.51). (2025). [Software]. EasyEDA. <https://easyeda.com/>
- Fluke. (2024). *Consideraciones de seguridad en las mediciones de circuitos con corriente: concéntrese en su trabajo*. Fluke. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/consideraciones-de-seguridad-en-las-mediciones-de-circuitos-con-corriente-concentrese-en-su-trabajo>
- GNU Octave (V 10.3.0). (2025). [Software]. General Public License (GPL). <https://octave.org/>
- Granados Romero, R. (2017). *Diagnóstico de fallos en el rotor de motores eléctricos en estado transitorio mediante técnicas estadísticas* [Tesis de maestría, Universidad de Valladolid]. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25959>
- Jennifer Paola, D. B., & Adriana Margarita, B. F. (2012). Análisis del estado estacionario de la conexión de un turbogenerador a la subestación Splitter de la empresa Propilico S.A., por medio del programa Digsilen Power Factory. En Universidad Tecnológica de Bolívar. Universidad tecnológica de Bolívar. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/3400/0063143.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Joy, A. T. (2022, 29 de enero). *Qué es una pinza amperimétrica*. Tameson.es. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://tameson.es/pages/que-es-una-pinza-amperimetrica#:~:text=Una%20pinza%20amperim%C3%A9trica%20puede%20medir>
- Karla. (2023, 2 de noviembre). *Máquinas herramientas: Qué son y cuál es su función*. Tecnomaquinaria. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://www.tecnomaquinaria.com/maquinas-herramientas-que-son-y-cual-es-su-funcion/>

- Kohshin Electric Corporation. (2024). *Hall-effect current sensors*. Kohshin. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://www.kohshin-ele.com/en/products/currentsensor/hall/>
- Maloy Smith, G. (2024, 19 de febrero). *¿Cuáles son los principales tipos de sensores de corriente?* Soluciones de Adquisición de Datos (DAQ). Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://dewesoft.com/es/blog/cuales-son-los-principales-tipos-de-sensores-de-corriente>
- Megafer Máquinas. (2024). Torno mecánico Romi Tormax 30B reformado – Megafer Máquinas. Megafer. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://www.megafer.net/produto/torno-mecanico-romi-tormax-30b-reformado/>
- Mohamed Soliman, A. (2008). *History and progress of the Kerwin–Huelsman–Newcomb filter generation and op amp realizations*. ResearchGate. Recuperado 6 de abril de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/220337734_HISTORY_AND_PROGRESS_OF_THE KERWIN-HUELSMAN-NEWCOMB_FILTER_GENERATION_AND_OP_AMP_REALIZATIONS
- Muñoz, I. A., & Zárate, J. (2009). *Sistema de adquisición de datos para la visualización de señales eléctricas de motores AC y DC* [Tesis de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Recuperado 23 de agosto de 2024, de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/602/digital_182_46.pdf
- Muñoz Ugalde, J. M. (2021, 1 de noviembre). *Efectos de flicker en lámparas incandescentes* [Tesis de titulación, Universidad Autónoma de Querétaro]. Recuperado 18 de agosto de 2024, de <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/3224>
- Ohms. (2024, 30 de julio). *¿Qué es un amplificador operacional?* 330ohms. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://www.330ohms.com/blogs/blog/que-es-un-amplificador-operacional>
- Rosa, R. (2015). *Estudio sobre la viabilidad de los estadísticos de orden superior de la corriente de alimentación como indicadores para determinar el estado de un motor de inducción* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Valladolid]. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/13370/TFG-P-268.pdf;sequence=1>
- TECSA. (2021, 17 de marzo). *Las 4 categorías del equipo de protección personal para Arc Flash*. TECSA. Recuperado 29 de febrero de 2024, de

<https://www.tecsagro.com.mx/blog/equipo-de-proteccion-personal-para-arc-flash/>

Texas Instruments. (2024). *TL084 data sheet, product information and support*. Texas Instruments. Recuperado 21 de mayo de 2024, de <https://www.ti.com/product/TL084>

UNIT Electronics. (2025, 9 de octubre). *Tienda de componentes electrónicos en México*. UNIT Electronics. Recuperado 23 de enero de 2025, de <https://uelectronics.com/>

Uranty. (2023, 23 de enero). *Principios básicos del sensor de efecto Hall*. Uranty®. Recuperado 29 de febrero de 2024, de <https://uranty.net/blog/adquiere-precisi%C3%B3n-con-efecto-hall>

Wilaeba Electrónica. (2019, 6 de agosto). *Filtro bicuadrático KHN inversor*. Wilaeba Electrónica. Recuperado 23 de agosto de 2024, de <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2018/08/filtro-bicuadratico-khn-inversor.html>

Zhang, H. (s. f.). *IPC-2152 standard for current carrying capacity in PCB design*. STUDYLIB. Recuperado 5 de agosto de 2024, de <https://studylib.net/doc/27542731/ipc-2152-y2009-pcb%E8%BD%BD%E6%B5%81%E6%A0%87%E5%87%86-%E8%8B%B1%E6%96%87%E5%8E%9F%E7%89%88>

5.7 Anexos

5.7.1 Anexo 1: Código para el análisis FFT del Torno

```
clc()
clear all
close all
##Datos
Pr1 = csvread("Prueba1.txt");
Pr2 = csvread("Prueba2.txt");
Pr3 = csvread("Prueba3.txt");
##Constantes de los sensores
k1=(200/(0.625*4));##Sensor Hall
k2=((30*2)/(1*4));##Toroide
sv1=Pr1(1:end,2)*k2*(-1);
st1=Pr1(1:end,1);
sv2=Pr1(1:end,4)*k1;
st2=Pr1(1:end,3);
##Obtencion de ventana
ra=23000;##Rango
ven=10;##Ventana
spl=sv1(ra:ra+ven,1);
sp=sv2(ra:ra+ven,1);
splt=st1(ra:ra+ven,1);
spt=st2(ra:ra+ven,1);
figure
plot(splt,spl,"-*;Sensor toroide;",spt,sp,"-*r;Sensor Hall;")
title('Sensor de Efecto Hall y toroide (Torno)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
##Modificacion de los datos
m=2;
neg=max(sv2);
pos=min(sv2);
f=0;
f1=0;
tt1=[];
tt2=[];
te1=[];
te2=[];
for i=1:length(Pr1)
    p=sv2(i,1);
    pt=st2(i,1);
    if((f==0) || i==1)
        tim=pt;
        f=1;
        f1=0;
        neg=max(sv2);
        pos=min(sv2);
    endif
    if(f==1)
        co=[sv2(i,1) pos];
        pos=max(co);
        co=[sv2(i,1) neg];
        neg=min(co);
    end
end
```

```

    if(abs(p)>m)
        f1=1;
    endif
    if((abs(p)<m && f1==1) || i==length(Pr1))
        Res=abs(pos-neg);
        if(Res>50)
            tt1=[tt1 tim];
            tt2=[tt2 st2(i,1)];
        endif
        if(Res<50 && Res>m)
            te1=[te1 tim];
            te2=[te2 st2(i,1)];
        endif
        ##condicional para la revision de si es estacionario o transitoria
        f=0;
    endif
    endif
endfor

##CTR+R COMENTAR CTR+SHIFT+R DESCOMENTAR
##Modificacion de las señales
corte1=tt2(end);
cut=round(tt2(end)/st2(2,1))+1;
st=round(tt1(1)/st2(2,1))+1;
en=round(te2(end)/st2(2,1))+1;
tr=sv2(st:cut);
tes=sv1(cut:en);
signal1=[tr;tes];
##Señal del tiempo ti y de los sensores modificada t3
ti=[0:st2(2,1):(length(signal1)-1)*st2(2,1)'];
t3=[ti signal1];
figure
subplot(3,1,3)
plot(t3(:,1),t3(:,2))
title('(C) Señal final')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([0,ti(end)])
hold on
plot((length(tr)-1)*st2(2,1),sv2(cut),'r*')
subplot(3,1,1)
plot(st1,sv1)
title('(A) Sensor de Toroide')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(3,1,2)
plot(st2,sv2)
title('(B) Sensor de Efecto Hall')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr2(1:end,2)*k2*(-1);
st1=Pr2(1:end,1);
sv2=Pr2(1:end,4)*k1;
st2=Pr2(1:end,3);
m=2;
neg=max(sv2);
pos=min(sv2);
f=0;

```

```

f1=0;
tt1=[];
tt2=[];
te1=[];
te2=[];
for i=1:length(Pr1)
    p=sv2(i,1);
    pt=st2(i,1);
    if((f==0) || i==1)
        tim=pt;
        f=1;
        f1=0;
        neg=max(sv2);
        pos=min(sv2);
    endif
    if(f==1)
        co=[sv2(i,1) pos];
        pos=max(co);
        co=[sv2(i,1) neg];
        neg=min(co);
        if(abs(p)>m)
            f1=1;
        endif
        if((abs(p)<m && f1==1) || i==length(Pr1))
            Res=abs(pos-neg);
            if(Res>50)
                tt1=[tt1 tim];
                tt2=[tt2 st2(i,1)];
            endif
            if(Res<50 && Res>m)
                te1=[te1 tim];
                te2=[te2 st2(i,1)];
            endif
            ##condicional para la revision de si es estacionario o transitoria
            f=0;
        endif
    endif
endfor
##Modificacion de las señales
corte2=tt2(end);
cut=round(tt2(end)/st2(2,1))+1;
st=round(tt1(1)/st2(2,1))+1;
en=round(te2(end)/st2(2,1))+1;
tr=sv2(st:cut);
tes=sv1(cut:en);
signal1=[tr;tes];
ti=[0:st2(2,1):((length(signal1)-1)*st2(2,1))];
t4=[ti signal1];
figure
subplot(3,1,3)
plot(t4(:,1),t4(:,2))
title('(C) Señal final')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([0,ti(end)])
hold on
plot(((length(tr)-1)*st2(2,1)),sv2(cut),'r*')

```

```

subplot(3,1,1)
plot(st1,sv1)
title('(A) Sensor de Toroide')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(3,1,2)
plot(st2,sv2)
title('(B) Sensor de Efecto Hall')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr3(1:end,2)*k2*(-1);
st1=Pr3(1:end,1);
sv2=Pr3(1:end,4)*k1;
st2=Pr3(1:end,3);
m=2;
neg=max(sv2);
pos=min(sv2);
f=0;
f1=0;
tt1=[];
tt2=[];
te1=[];
te2=[];
for i=1:length(Pr1)
    p=sv2(i,1);
    pt=st2(i,1);
    if((f==0) || i==1)
        tim=pt;
        f=1;
        f1=0;
        neg=max(sv2);
        pos=min(sv2);
    endif
    if(f==1)
        co=[sv2(i,1) pos];
        pos=max(co);
        co=[sv2(i,1) neg];
        neg=min(co);
        if(abs(p)>m)
            f1=1;
        endif
        if((abs(p)<m && f1==1) || i==length(Pr1))
            Res=abs(pos-neg);
            if(Res>50)
                tt1=[tt1 tim];
                tt2=[tt2 st2(i,1)];
            endif
            if(Res<50 && Res>m)
                te1=[te1 tim];
                te2=[te2 st2(i,1)];
            endif
            ##condicional para la revision de si es estacionario o transitoria
            f=0;
        endif
    endif
endfor
##Modificacion de las señales

```

```

corte3=tt2(end);
cut=round(tt2(end)/st2(2,1))+1;
st=round(tt1(1)/st2(2,1))+1;
en=round(te2(end)/st2(2,1))+1;
tr=sv2(st:cut);
tes=sv1(cut:en);
signal1=[tr;tes];
ti=[0:st2(2,1):((length(signal1)-1)*st2(2,1))];
t5=[ti signal1];
figure
subplot(3,1,3)
plot(t5(:,1),t5(:,2))
title('(C) Señal final')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([0,ti(end)])
hold on
plot(((length(tr)-1)*st2(2,1)),sv2(cut),'r*')
subplot(3,1,1)
plot(st1,sv1)
title('(A) Sensor de Toroide')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(3,1,2)
plot(st2,sv2)
title('(B) Sensor de Efecto Hall')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
##FFT
##Valores de la prueba
w=1;##maximo de la ventana
tim=0.2;##tiempo de la prueba y division de ventana
step=st2(2,1);
L=(tim/step)+1;
Fs=1/step;
frec=Fs/L*(0:(L/2));
if(mod(w/tim,1)==0 && w<t3(end,1) && w<t4(end,1) && w<t5(end,1))
for i=1:(w/tim)
##FFT Prueba 1
Y=fft(t3(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1))+1,2),L);
P2=abs(Y/L);
P1=P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
##FFT Prueba 2
Y1=fft(t4(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1))+1,2),L);
P21=abs(Y1/L);
P11=P21(1:L/2+1);
P11(2:end-1) = 2*P11(2:end-1);
##FFT Prueba 3
Y2=fft(t5(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1))+1,2),L);
P22=abs(Y2/L);
P12=P22(1:L/2+1);
P12(2:end-1) = 2*P12(2:end-1);
figure
subplot(2,3,1)
plot(t3(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1))+1,1),t3(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1))+1,2))
title('(A) Señal del torno')

```

```

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([(i-1)*tim,i*tim])
subplot(2,3,4)
plot(frec,P1)
title(['(D) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P1(f)|")
xlim([0,500])
subplot(2,3,2)
plot(t4(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1)+1),1),t4(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1)+1),2))
title('(B) Señal del torno')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([(i-1)*tim,i*tim])
subplot(2,3,5)
plot(frec,P11)
title(['(E) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P1(f)|")
xlim([0,500])
subplot(2,3,3)
plot(t5(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1)+1),1),t5(((i-1)*(L-1))+1:(i*(L-1)+1),2))
title('(C) Señal del torno')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([(i-1)*tim,i*tim])
subplot(2,3,6)
plot(frec,P12)
title(['(F) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P1(f)|")
xlim([0,500])
endfor
elseif(mod(w/tim,1)!=0)
error("Division entre variable tim y w no da un entero")
elseif(w>t3(end,1) || w>t4(end,1) || w>t5(end,1))
error("Parametros de ventana incorrectos")
endif

```

5.7.2 Anexo 2: Código para el análisis FFT de la Pistola de calor

```
clc()
clear all
close all
Pr1 = csvread("Calentador1.txt");
Pr2 = csvread("Calentador2.txt");
Pr3 = csvread("Calentador3.txt");
k1=(200/(0.625*4));##Sensor hall
k2=((30)/(1*4));##Torroide
sv1=Pr1(1:end,2)*k2;
st1=Pr1(1:end,1);
sv2=Pr1(1:end,4)*k1;
st2=Pr1(1:end,3);
t1=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Torroide (Pistola de calor)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
xlim([0,11]);
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Pistola de calor)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr2(1:end,2)*k2;
st1=Pr2(1:end,1);
sv2=Pr2(1:end,4)*k1;
st2=Pr2(1:end,3);
t2=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Torroide (Pistola de calor)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Pistola de calor)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr3(1:end,2)*k2;
st1=Pr3(1:end,1);
sv2=Pr3(1:end,4)*k1;
st2=Pr3(1:end,3);
t3=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Torroide (Pistola de calor)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
```



```

title('Sensor de Efecto Hall (Pistola de calor)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
##Valores de la prueba
of=6;
w=7;##maximo de la ventana
tim=0.25;##tiempo de la prueba y division de ventana
step=st2(2,1);
L=(tim/step)+1;
Fs=1/step;
frec=Fs/L*(0:(L/2));
limx=550;
limy=10;
if(mod(w/tim,1)==0)
for i=1:((w-of)/tim)
##FFT Prueba 1
Y=fft(t1(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P2=abs(Y/L);
P1=P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
##FFT Prueba 2
Y1=fft(t2(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P21=abs(Y1/L);
P11=P21(1:L/2+1);
P11(2:end-1) = 2*P11(2:end-1);
##FFT Prueba 3
Y2=fft(t3(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P22=abs(Y2/L);
P12=P22(1:L/2+1);
P12(2:end-1) = 2*P12(2:end-1);
figure
subplot(2,3,1)
plot(t1(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t1(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(A) Señal de la resistencia')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,3,4)
plot(frec,P1)
title(['(D) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P1(f)|")
xlim([0,limx])
ylim([0,limy])
subplot(2,3,2)
plot(t2(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t2(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(B) Señal de la resistencia')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,3,5)
plot(frec,P11)
title(['(E) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P2(f)|")
xlim([0,limx])
ylim([0,limy])

```

```

subplot(2,3,3)
plot(t3(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t3(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(C) Señal de la resistencia')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,3,6)
plot(frec,P12)
title(['(F) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P3(f)|")
xlim([0,limx])
ylim([0,limy])
endfor
elseif
error("Division entre variable tim y w no da un entero")
endif

```

5.7.3 Anexo 3: Código para el análisis FFT del Motor sano y con espiras en corto

```
clc()
clear all
close all
Pr4 = csvread("Motorfallo1.txt");
Pr5 = csvread("Motorfallo2.txt");
Pr6 = csvread("Motorfallo3.txt");
Pr1 = csvread("Motorsano1.txt");
Pr2 = csvread("Motorsano2.txt");
Pr3 = csvread("Motorsano3.txt");
k1=(200/(0.625*4));##Sensor hall
k2=((30)/(1*4));##Toroide
sv1=Pr1(1:end,2)*k2;
st1=Pr1(1:end,1);
sv2=Pr1(1:end,4)*k1;
st2=Pr1(1:end,3);
t1=[st1 sv1];
##Valores de la prueba FFT
of=8;
w=9;##maximo de la ventana
tim=0.5;##tiempo de la prueba y division de ventana
step=st2(2,1);
L=(tim/step)+1;
Fs=1/step;
frec=Fs/L*(0:(L/2));
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Toroide (Motor sano)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Motor sano)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr2(1:end,2)*k2;
st1=Pr2(1:end,1);
sv2=Pr2(1:end,4)*k1;
st2=Pr2(1:end,3);
t2=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Toroide (Motor sano)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Motor sano)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
```

```

sv1=Pr3(1:end,2)*k2;
st1=Pr3(1:end,1);
sv2=Pr3(1:end,4)*k1;
st2=Pr3(1:end,3);
t3=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Toroide (Motor sano)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Motor sano)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr4(1:end,2)*k2;
st1=Pr4(1:end,1);
sv2=Pr4(1:end,4)*k1;
st2=Pr4(1:end,3);
t4=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Toroide (Motor con 2 espiras en cortocircuito)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Motor con 2 espiras en cortocircuito)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr5(1:end,2)*k2;
st1=Pr5(1:end,1);
sv2=Pr5(1:end,4)*k1;
st2=Pr5(1:end,3);
t5=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Toroide (Motor con 2 espiras en cortocircuito)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Motor con 2 espiras en cortocircuito)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
sv1=Pr6(1:end,2)*k2;
st1=Pr6(1:end,1);
sv2=Pr6(1:end,4)*k1;
st2=Pr6(1:end,3);
t6=[st1 sv1];
figure
subplot(2,1,1)
plot(st1,sv1)
title('Sensor de Toroide (Motor con 2 espiras en cortocircuito)')

```

```

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(2,1,2)
plot(st2,sv2)
title('Sensor de Efecto Hall (Motor con 2 espiras en cortocircuito)')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
if(mod(w/tim,1)==0)
for i=1:(w-of)/tim
##FFT Prueba 1
Y=fft(t1(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P2=abs(Y/L);
P1=P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
##FFT Prueba 2
Y1=fft(t2(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P21=abs(Y1/L);
P11=P21(1:L/2+1);
P11(2:end-1) = 2*P11(2:end-1);
##FFT Prueba 3
Y2=fft(t3(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P22=abs(Y2/L);
P12=P22(1:L/2+1);
P12(2:end-1) = 2*P12(2:end-1);
figure
subplot(4,3,1)
plot(t1(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t1(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(A) Señal')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(4,3,4)
plot(frec,P1)
title(['(D) FFT'])
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|P1(f)|')
xlim([0,250])
ylim([0,1])
subplot(4,3,2)
plot(t2(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t2(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(B) Señal')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(4,3,5)
plot(frec,P11)
title(['(E) FFT'])
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|P2(f)|')
xlim([0,250])
ylim([0,1])
subplot(4,3,3)
plot(t3(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t3(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(C) Señal')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')

```

```

subplot(4,3,6)
plot(frec,P12)
title(['(F) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P3(f)|")
xlim([0,250])
ylim([0,1])
##FFT Prueba 4
Y=fft(t4(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P2=abs(Y/L);
P1=P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
##FFT Prueba 5
Y1=fft(t5(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P21=abs(Y1/L);
P11=P21(1:L/2+1);
P11(2:end-1) = 2*P11(2:end-1);
##FFT Prueba 6
Y2=fft(t6(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2),L);
P22=abs(Y2/L);
P12=P22(1:L/2+1);
P12(2:end-1) = 2*P12(2:end-1);
subplot(4,3,7)
plot(t4(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t4(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(G) Señal')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(4,3,10)
plot(frec,P1)
title(['(J) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P1(f)|")
xlim([0,250])
ylim([0,1])
subplot(4,3,8)
plot(t5(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t5(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(H) Señal')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(4,3,11)
plot(frec,P11)
title(['(K) FFT'])
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P2(f)|")
xlim([0,250])
ylim([0,1])
subplot(4,3,9)
plot(t6(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),1),t6(((i-1)*(L-1))+1+(of/step):(i*(L-1))+1+(of/step),2))
title('(I) Señal')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
subplot(4,3,12)
plot(frec,P12)
title(['(L) FFT'])

```

```
xlabel("f (Hz)")
ylabel("|P3(f)|")
xlim([0,250])
ylim([0,1])
endfor
elseif
error("Division entre variable tim y w no da un entero")
endif
```