

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad

**ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR UNIVERSAL CON
ALIMENTACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA Y CORRIENTE ALTERNA**

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a
la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Autor:

Oliver Otoniel Oñate Macas

Director:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Identificación de la obra

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172582328-8		
APELLIDOS Y NOMBRES	Oñate Macas Oliver Otoniel		
DIRECCIÓN:	Av.17 de Julio y Gral. José María Cordova		
EMAIL:	oonatem@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	X	TELÉFONO MÓVIL:	0999565539

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de comportamiento de un motor universal con alimentación en corriente directa y corriente alterna.
AUTOR (ES):	Oñate Macas Oliver Otoniel
FECHA: DD/MM/AAAA	11/12/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc

Constancia

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos primordiales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de diciembre del 2023.

EL AUTOR



Oñate Macas Oliver Otoniel

C.I. 172582328-8



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc.

Certificación

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Oñate Macas Oliver Otoniel, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **“ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR UNIVERSAL CON ALIMENTACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA Y CORRIENTE ALTERNA”**. Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico aprobando la defensa, impresión y empastado.

Ing. Jhonny Barzola MSc.

DIRECTOR DE TESIS

Dedicatorias

Dedico el presente trabajo de grado a mis padres, María Macas y Jose Oñate, quienes han sido parte fundamental en mi vida, personal, académica y profesional. Su ejemplo de dedicación ha sido la fuerza que impulso parte de mis logros, me han demostrado un apoyo incondicional, amor y esmero que han sido vitales para alcanzar con éxito cada una de mis metas planteadas.

A mi esposa, Daniela Zevallos, le dedico un agradecimiento especial, por estar siempre presente brindándome apoyo emocional y su amor incondicional, que me motivo en gran manera a culminar con éxito mi carrera profesional.

A mi pequeña hija, Sofia Oñate, por ser mi principal fuente de inspiración y brindarme un amor tan puro y sincero que me impulsa a esforzarme aún más allá, cada logro alcanzando está marcado por el deseo de ofrecerle un futuro de mejores oportunidades y felicidad.

A mi hermano Fabricio Oñate y su familia, por impulsarme siempre a realizar mis proyectos con la mayor pasión y esfuerzo posible. A través de sus ejemplos de constancia y esfuerzo, eh aprendido la importancia de afrontar los desafíos con determinación.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por el regalo de la vida y la oportunidad de culminar con éxito mi trayectoria universitaria. Un agradecimiento especial a mis padres, principalmente a mi padre, Jose Oñate, por ser un gran ejemplo e impulsarme siempre a alcanzar mis objetivos.

Reconozco y agradezco a la gloriosa Universidad Técnica del Norte por su acogida y haberme preparado de manera profesional y técnica. De igual forma, quedo muy agradecido con los diferentes docentes quienes con dedicación compartieron sus conocimientos, contribuyendo así en mi desarrollo como ingeniero eléctrico.

Un reconocimiento especial y agradecimiento para mi tutor y asesor de tesis, quienes estuvieron siempre pendientes de mis avances en el trabajo de titulación. En particular, agradezco a mi tutor, Jhonny Barzola, por sus recomendaciones y consejos que me motivaron siempre a esforzarme y realizar mi trabajo con determinación.

Tabla de Contenido

Resumen	XIV
Abstract	XV
Contextualización	XVI
Planteamiento del problema	XVIII
Pregunta de investigación.....	XVIII
Objetivo general	XIX
Objetivos específicos	XIX
Alcance.....	XIX
Justificación.....	XX
CAPÍTULO I	1
1.1 Motor eléctrico.....	1
1.2 Motor universal.....	2
1.2.1 Partes constitutivas de un motor universal	2
1.2.2 Principio de funcionamiento del motor universal	4
1.2.2.1 Principio de funcionamiento en corriente directa.....	4
1.2.2.2 Principio de funcionamiento en corriente alterna.....	5
1.2.2.3 Principio de funcionamiento como generador	5
1.2.2.4 Motor universal AC vs motor universal DC	6
1.2.3 Características motor universal	7
1.3 Parámetros técnicos del motor universal	8
1.3.1 Magnitudes Fundamentales	8
1.3.2 Parámetros técnicos para el motor universal en AC.....	9
1.3.3 Parámetro de arranque de un motor universal	10
1.3.4 Régimen del motor universal.....	11
1.3.4.1 Factor de servicio (FS).....	11
1.3.4.2 Sistema de aislamiento y materiales.....	11
1.3.4.3 Sistema aislante	12
1.3.4.4 Material aislador	12
1.4 Tipos de pruebas para obtención de parámetros con un motor universal	12
CAPÍTULO II	16
2.1 Metodología.....	16
2.2 Diseño del módulo de pruebas	17
2.3 Dimensionamiento y selección de materiales	21
2.3.1 Módulo PZEM-004t (AC)	21
2.3.2 Módulo PZEM-016 (AC)	22
2.3.3 Módulo PZEM-017 (DC)	23

2.3.4	Módulo PZEM-031	24
2.3.5	Módulo PZEM-015	25
2.3.6	Elementos adicionales del banco de pruebas.....	26
2.4	Simulaciones del motor universal	35
2.4.1	Prueba DC de motor universal	36
2.4.2	Simulación de prueba de circuito abierto (CA).....	39
2.4.3	Simulación de prueba de cortocircuito (CC)	41
2.4.4	Simulación de prueba con carga en DC y AC.....	43
2.4.5	Simulación de curvas mediante osciloscopio.....	48
2.4.6	Simulación FEMM.....	50
2.5	Montaje del módulo.....	61
2.5.1	Conexión de módulo PZEM 004t.....	61
2.5.2	Conexión de módulo PZEM 017.....	63
2.5.3	Conexión de módulo PZM015	64
2.5.4	Conexión de tacómetro con sensor de efecto hall.....	65
2.5.5	Elaboración del mecanismo de acople de las máquinas	65
2.5.6	Conexión de elementos del circuito rectificador	66
2.5.7	Elaboración de tablero.....	67
CAPITULO III		69
3.1	Prueba de circuito abierto (CA).....	69
3.2	Prueba de cortocircuito (CC)	73
3.3	Prueba de carga.....	76
3.3.1	Prueba de carga en DC	77
3.3.2	Prueba de carga en AC	79
3.3.3	Prueba de carga AC-DC.....	82
3.4	Curvas mediante osciloscopio	84
Conclusiones.....		88
Recomendaciones		89

Índice de figuras

Fig. 1: Motor monofásico universal.	2
Fig. 2: Rotor de motor universal.	3
Fig. 3: Estator de motor universal.....	3
Fig. 4: Conmutador de motor universal.	3
Fig. 5: Escobillas de motor universal.....	3
Fig. 6: Esquema de conexión de un motor universal.....	4
Fig. 7: Forma de onda de voltaje en corriente directa.	4
Fig. 8: Forma de onda de voltaje en corriente alterna.	5
Fig. 9: Circuito equivalente de generador universal de excitación separada.....	6
Fig. 10: Curva características par-velocidad de un motor universal.	7
Fig. 11: Arranque directo.	10
Fig. 12: Arranque fase partida.	10
Fig. 13: Arranque con condensador.	10
Fig. 14: Arranque con condensador permanente.	11
Fig. 15: Normas de materiales y sistemas aislantes.....	12
Fig. 16: Prueba en vacío de un motor eléctrico.	13
Fig. 17: Prueba con carga mecánica de motor eléctrico.	14
Fig. 18: Prueba con carga mecánica de motor eléctrico.	14
Fig. 19: Prueba térmica de motor eléctrico.	15
Fig. 20: Metodología para la implementación de un banco de pruebas con un motor universal.	16
Fig. 21: Diseño inicial del módulo de pruebas.	19
Fig. 22: Motor universal para banco de pruebas.	20
Fig. 23: Módulo de medición AC PZEM - 004t.....	21
Fig. 24: Módulo de medición AC PZEM - 016.....	22
Fig. 25: Módulo de medición DC PZEM – 017.....	23
Fig. 26: Módulo de medición DC PZEM - 031.....	24
Fig. 27: Módulo de medición DC PZEM – 015.....	25
Fig. 28: Diseño final del módulo de pruebas.....	33
Fig. 29: Esquema eléctrico del módulo de pruebas a) control y arranque y b) esquema general de conexión.....	34
Fig. 30: Mediciones de prueba DC en motor universal a) voltaje y b) corriente.	36
Fig. 31: Mediciones de prueba DC de la inductancia del motor universal.	37
Fig.32: Simulación de prueba DC motor universal.	38
Fig. 33: Simulación de prueba de circuito abierto CA.....	40
Fig.34: Curva de magnetización CA motor universal (Simulación).	41

Fig.35: Simulación de prueba de cortocircuito CC.....	42
Fig.36: Curva de cortocircuito CC motor universal (Simulación).....	43
Fig.37: Simulación de prueba con carga en DC.	44
Fig.38: Curva par-velocidad del motor de simulación en AC.....	45
Fig.39: Simulación de prueba con carga en AC.	46
Fig.40: Curva par-velocidad del motor de simulación en AC.....	47
Fig.41: Curvas características del motor de las simulaciones en AC y DC.	48
Fig.42: Formas de onda de a) voltaje y b) corriente en AC.	49
Fig.43: Formas de onda de a) voltaje y b) corriente en DC.....	49
Fig.44: Diseño y medidas estándares de motor universal.....	50
Fig.45: Diseño CAD con a) medidas del estator y rotor b) medidas de láminas de armadura.	54
Fig.46: Diseño FEMM con medidas registradas.	54
Fig.47: Bobinado imbricado tipo H en armadura.	55
Fig.48: Bobinado de motor universal en formato CAD.	55
Fig.49: Propiedades de los materiales (estator y rotor).....	56
Fig.50: Magnitudes para el bobinado del estator.....	57
Fig.51: Características del bobinado del estator.....	57
Fig.52: Magnitudes para el bobinado de la armadura.	58
Fig.53: Características del bobinado de la armadura.	58
Fig.54: Simulación de malla eléctrica del motor universal (FEMM).....	59
Fig.55: Simulación inicial del motor universal en FEMM.	59
Fig.56: Simulación del flujo del motor: a) estator energizado b) armadura energizada y c) estator y rotor energizado.....	60
Fig.57: Esquema de conexión para módulo PZEM 004t.	61
Fig.58: Registro de variables eléctricas de módulo PZEM 004t en pantalla LCD.	61
Fig.59: Registro de variables eléctricas en programa CoolTeem.....	62
Fig.60: Datos de medición exportados a software Excel.....	62
Fig.61: Esquema de conexión para modulo PZEM 017 DC.....	63
Fig.62: Mediciones de verificación para módulo PZEM 017.....	63
Fig.63: Circuito de prueba para módulo PZEM 015.....	64
Fig.64: Esquema de conexión de módulo PZEM 015.....	64
Fig.65: Esquema de conexión para sensor de efecto hall.....	65
Fig.66: Medición de prueba de sensor de efecto hall como tacómetro.....	65
Fig.67: Matrimonio implementado para pruebas con carga.	66
Fig.68: Unión de capacitor y rectificador para circuito DC.....	66
Fig.69: Construcción de la parte externa del tablero para banco de pruebas.	67
Fig.70: Construcción de la parte interna del tablero para banco de pruebas.	67

Fig.71: Banco de pruebas final para pruebas con motor universal.	68
Fig.72: Conexión de componentes para prueba de circuito abierto CA.	70
Fig.73: Medición de velocidad para prueba de CA.	70
Fig.74: Mediciones de prueba de CA.	71
Fig.75: Curva característica de magnetización con prueba de CA.	72
Fig.76: Conexión de componentes para prueba de cortocircuito CC.	74
Fig.77: Mediciones de prueba de CC.	74
Fig.78: Curva característica de magnetización con prueba de CC.	75
Fig.79: Conexión de elementos para la prueba de carga en DC.	77
Fig.80: Registro de mediciones de prueba de carga en DC en monitor serie.	78
Fig.81: Curva par- velocidad de motor universal en DC.	79
Fig.82: Conexión de elementos para la prueba de carga en AC.	80
Fig.83: Registro de mediciones de prueba de carga en AC en monitor serie.	80
Fig.84: Curva par-velocidad de motor universal en AC.	81
Fig.85: Comparación de las curvas par-velocidad del motor universal en AC y DC.	82
Fig.86: Curvas de corriente y voltaje sin carga con osciloscopio, a) AC y b) DC.	85
Fig.87: Curvas de corriente y voltaje con carga con osciloscopio, a) AC y b) DC.	86
Fig. 88: Generador de excitación separada.	95
Fig. 89: Generador Juquiang.	95
Fig. 90: Arduino Atmega 2560.	96
Fig. 91: Arduino UNO.	96
Fig. 92: Pantalla LCD 16x2.	97
Fig. 93: Pantalla LCD 128X64.	97
Fig. 94: Rectificador KBL-1010.	98
Fig. 95: Rectificador RS-607.	98
Fig. 96: Capacitor 2200 uF.	99
Fig. 97: Capacitor 1000 uF.	99
Fig. 98: Resistencia calefactora.	100
Fig. 99: Resistencia luminosa.	100
Fig. 100: Disyuntor termomagnético Ebasee.	101
Fig. 101: Disyuntor termomagnético Schneider.	101
Fig. 102: Fusible EATON.	101
Fig. 103: Fusible SCHNEIDER.	101
Fig. 104: Selector 2 polos.	102
Fig. 105: Selector 3 polos.	102
Fig. 106: Luces piloto CAMSCO.	103
Fig. 107: Luces piloto SIEMENS.	103

Fig. 108: Sensor de efecto hall KY-003.....	104
Fig. 109: Sensor de efecto hall LM-393.	104

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Partes de un motor universal</i>	3
Tabla 2. <i>Magnitudes básicas de un motor universal</i>	8
Tabla 3. <i>Parámetros técnicos de los sistemas de corriente alterna</i>	9
Tabla 4. <i>Tipos de arranque para motores monofásico</i>	10
Tabla 5. <i>Especificaciones técnicas del motor universal</i>	20
Tabla 6. <i>Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 004t</i>	21
Tabla 7. <i>Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 016</i>	22
Tabla 8. <i>Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 017</i>	23
Tabla 9. <i>Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 031</i>	24
Tabla 10. <i>Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 015</i>	25
Tabla 11. <i>Mediciones registradas de prueba DC en motor universal</i>	37
Tabla 12. <i>Mediciones registradas de la simulación de la prueba de CA</i>	40
Tabla 13. <i>Mediciones registradas de la simulación de la prueba de CC</i>	42
Tabla 14. <i>Mediciones registradas de la simulación de la prueba de carga DC</i>	45
Tabla 15. <i>Mediciones registradas de la simulación de la prueba de carga AC</i>	47
Tabla 16. <i>Medidas y especificaciones de motor universal</i>	51
Tabla 17. <i>Registro de mediciones de la prueba de CA</i>	71
Tabla 18. <i>Registro de mediciones de la prueba de CC</i>	75
Tabla 19. <i>Registro de mediciones de la prueba de carga en DC</i>	78
Tabla 20. <i>Registro de mediciones de la prueba de carga en AC</i>	81
Tabla 21. <i>Especificaciones técnicas de generadores</i>	95
Tabla 22. <i>Especificaciones técnicas de microcontroladores</i>	96
Tabla 23. <i>Especificaciones técnicas de pantallas LCD</i>	97
Tabla 24. <i>Especificaciones técnicas de rectificadores</i>	98
Tabla 25. <i>Especificaciones técnicas de capacitores</i>	99
Tabla 26. <i>Especificaciones técnicas de las cargas</i>	100
Tabla 27. <i>Especificaciones técnicas de las protecciones</i>	101
Tabla 28. <i>Especificaciones técnicas de selectores de 3 posiciones</i>	102
Tabla 29. <i>Especificaciones técnicas de luces piloto</i>	103
Tabla 30. <i>Especificaciones técnicas de sensores de efecto hall</i>	104

Resumen

Se llevó a cabo la implementación de un banco de pruebas experimental con el propósito de realizar un análisis minucioso del funcionamiento de un motor universal de manera práctica. El proceso se divide en 5 etapas, se inicia con la revisión bibliográfica, describiendo las características principales del motor, funcionamiento, tipos de pruebas, entre otros aspectos. La segunda etapa corresponde al diseño del módulo, en la que se presentan las consideraciones para su desarrollo y un modelo inicial del banco de pruebas. Luego, se procede con el dimensionamiento y selección de materiales para contar con componentes adecuados que cumplan con los requerimientos para el motor y el desarrollo de las prácticas. Además, en esta etapa se desarrollan simulaciones para el funcionamiento del motor en condiciones ideales de operación. En la cuarta etapa se desarrolla la conexión de todos los componentes seleccionados para estructurar el banco de pruebas. Finalmente, se realiza el análisis característico de la máquina mediante una serie de ensayos prácticos con el motor, la prueba de circuito abierto, prueba de cortocircuito y la prueba de carga, tanto en corriente directa como en corriente alterna. Los resultados demuestran que las características magnéticas del motor tanto en circuito abierto como en cortocircuito se producen de forma adecuada permitiendo verificar diferentes aspectos del motor, como la fuerza magnetomotriz en función de la corriente de campo, las capacidades de corriente del motor frente a un cortocircuito y las respectivas curvas características. Por otro lado, la prueba de carga permitió verificar la característica par-velocidad del motor con distintos tipos de alimentación. La implementación del banco de pruebas para desarrollar las pruebas prácticas permitió verificar los aspectos magnéticos del motor y establecer que el motor opera de manera más adecuada y con una mayor generación de par en corriente directa que en corriente alterna.

Palabras clave: Banco de pruebas, curva, generador, motor universal.

Abstract

Experimental test stands have been implemented with the purpose of a universal engine close examination by practical support. This process is divided into five stage procedure. It starts with a literature review describing the main characteristics of the engine, its operation and types of tests among others aspects. The second stage involves the module design in which the development considerations and test stands initial model are introduced. Subsequently, sizing and choice of materials are carried out to take into account accurate components which comply with the engine requirements and practices development. Furthermore, engine's operation is developed by simulations in ideal conditions to be run during this stage. In the fourth stage, the selected components connection is developed to structure the test stands. Finally, the machine characteristic analysis takes place through series of practical tests with the engine, including open circuit proof, short circuit proof and load test, both in direct current and alternating current. The results so far show that magnetic engine characteristics in open circuit as in short circuit are produced in an adequate way, allowing to verify the different engine aspects such as magnetomotive force in field current function, the engine current capabilities in front of a short circuit and the respective curve characteristics as well. On the other hand, the load test showed the engine torque/speed characteristics under different power supplies. The implementation of the test stands to develop the practical tests enables the verification of the engine's magnetic aspects, establishing that the engine operates more properly with a direct current bigger torque generation than with an alternating current.

Keywords: Test bench, curve, generator, universal motor.

Introducción

Contextualización

Realizar el análisis de un motor monofásico mediante la utilización de un módulo de pruebas permite adquirir una mayor destreza de las conexiones internas con las que cuenta el motor, así como establecer cuáles son los accesorios, protecciones, dispositivos de medición, entre otros factores con los que cuenta la máquina, necesarios para que el motor tenga su correcto funcionamiento, así lo menciona Erick Cornejo y Jorge Tinajero (2015) en su trabajo de grado: “Diseño y construcción de un banco didáctico para pruebas de motores monofásicos”.

En muchos casos el modelamiento de motores puede presentar un problema al no poder realizar un análisis de estos a simple vista, lo que limita las aplicaciones de una máquina, un ejemplo es el adaptar el motor a una velocidad de giro específica, ya que la mayoría de máquinas están diseñadas para trabajar a una velocidad nominal específica, sin embargo, para esta aplicación se debe tomar en cuenta que un motor monofásico universal cuenta con la capacidad de adaptar su velocidad de giro, ya sea reduciendo o aumentando la misma a cualquier valor deseado, por lo cual es, necesario que el operador tenga un conocimiento necesario para el manejo de la máquina y pueda realizar las evaluaciones necesarias y así comprobar funcionamiento de la máquina y realizar un análisis fiable, según Mejías et al (2015).

En un banco didáctico para la realización de prácticas, los elementos para realizar el control de un motor eléctrico deben contar con características operativas eficientes y acorde a los requerimientos con los que cuenta la máquina, por lo cual es de vital importancia seleccionar los componentes correctos, necesarios para el diseño del módulo y así obtener resultados confiables y comprobados, una vez realizado el análisis del motor así lo refiere Eybar Contreras y Rolando Sánchez (2015).

María Arteaga (2011) menciona que a pesar de la demanda de motores y las actuales exigencias de calidad para las máquinas, es indispensable la utilización de diferentes elementos que permitan realizar un análisis de los diferentes parámetros eléctricos, para lo cual es frecuente el uso de sistemas de monitoreo de fallas y la detección de estas, los cuales deben estar acorde a los requerimientos del motor eléctrico que se esté operando, para así evitar cualquier tipo de afectación de la máquina durante su funcionamiento, además es recomendable realizar pruebas de forma periódica de los motores para así poder determinar los cambios y daños con el tiempo que sufre la máquina y la evolución que puede llegar a tener la misma con el paso del tiempo, logrando establecer los criterios antes mencionados mediante la realización de un análisis de funcionamiento del motor.

En el ámbito económico, el costo de un motor monofásico universal es uno de los más accesibles debido al uso y demanda que tienen los mismos, tomando como referencia otro tipo de motores monofásicos, esto se debe a que este tipo de motores pueden trabajar de diferentes maneras si se toma en cuenta el tipo de alimentación con la que se va a operar el sistema, ya sea corriente directa o corriente alterna, tal como lo menciona Jesús Balta (2015).

El estudio realizado por Humber Murillo (2010) indica que el motor monofásico universal, al ser puesto a prueba en vacío produce un fenómeno de embalamiento, por lo cual es importante tener en cuenta este parámetro para el estudio y análisis de este tipo de componentes, además, en este tipo de componentes es necesario laminar el núcleo del estator de la máquina para que esta pueda operar con sus diferentes tipos de alimentación.

Arriola et al (2018), a través de su investigación afirma que la experimentación con máquinas eléctricas es fundamental para mejorar el aprendizaje técnico de los estudiantes dentro de su formación académica, lo que incentiva al desarrollo de su proyecto que es el diseño y construcción de un banco de pruebas para un motor de combustión interna, logrando analizar y verificar los parámetros eléctricos de los diferentes motores.

El diseño de un método para la realización de pruebas de los motores eléctricos, contribuye de forma directa al análisis de estado de estos, ya que las pruebas de caracterización realizadas mediante un sistema de evaluación de la máquina, permiten establecer cuáles son las condiciones ideales de operación, así como los aspectos de seguridad necesarios para el manejo de estos componentes, principalmente los límites que van a tener las magnitudes de estos elementos y si tiene variaciones con respecto a los datos enviados por el fabricante, evitando así cualquier tipo de afección a la máquina, logrando alargar su vida útil, así lo menciona Jimmy Baque y Esteban Bellén (2019).

En la Universidad Católica de Colombia Federmann Cruz (2019) se realizó la implementación de un banco didáctico para pruebas con motores eléctricos, de la cual afirma que; del estudio realizado se logró un aporte a los conocimientos principalmente prácticos del estudiante, respecto al manejo de máquinas eléctricas, obtenidos mediante pruebas prácticas de conexión de motores bifásicos y trifásicos, usando elementos de control, como un PLC, contactores, entre otros.

Farid Sinisterra (2020) menciona en su investigación, que los motores eléctricos son uno de los componentes más utilizados en el sector industrial, llegando a tener una demanda de hasta un 70% por parte de estas máquinas, por lo cual ve la necesidad de desarrollar un software que cuenta con la capacidad de simular resultados de eficiencia del motor a partir de variables medidas mediante herramientas analíticas necesarias para la estimación de los resultados.

Planteamiento del problema

En la actualidad la demanda de motores eléctricos de inducción, sistemas de medición y monitoreo a nivel de industrias y empresas es bastante amplia; y va en aumento, esto debido a la solución que brindan en el desarrollo de procesos y la reducción de tiempo que se puede lograr en diferentes procesos afines. Por lo que la experimentación de forma investigativa con máquinas eléctricas es fundamental para mejorar el aprendizaje técnico de estas. Arriola et al (2018).

Además, la diversidad de motores eléctricos es bastante amplia, esto por las diferentes aplicaciones que requieren una componente motriz; tales como: electrodomésticos, vehículos, bombas, ascensores, etc. Siendo uno de los componentes más utilizados en el sector industrial, y llegando a tener una demanda de hasta un 70% por parte de estas máquinas. Farid Sinisterra (2020)

La siguiente investigación presenta como problemática el análisis del comportamiento de las características principales de un motor universal. Donde se pueden verificar los parámetros de diseño y funcionamiento del motor que son de gran importancia para las aplicaciones mencionadas. Para realizar el análisis de este motor se requiere de la implementación de un banco de pruebas, que permite al estudiante tener interacción en tiempo real con la máquina. Además, el estudio de este motor representa mayor complejidad considerando que este funciona con alimentación de corriente directa y alterna, mientras que la mayoría de los motores solo cuenta con un tipo de alimentación.

Por este motivo el análisis de las características principales del motor universal mediante el uso del módulo de pruebas proporciona información relevante de este tipo de máquina, donde el estudiante complementa el conocimiento técnico en esta rama de la electricidad.

Pregunta de investigación

¿Cómo realizar el análisis de comportamiento de un motor monofásico universal para verificar los parámetros eléctricos mediante experimentación en un módulo de pruebas?

Objetivo general

Analizar el comportamiento de un motor monofásico universal con alimentación en corriente directa y corriente alterna, para la determinación de los parámetros eléctricos de la máquina, mediante experimentación en un banco de pruebas.

Objetivos específicos

1. Describir los parámetros técnicos del motor monofásicos universal.
2. Implementar un módulo de pruebas para el motor universal
3. Analizar el comportamiento del motor universal mediante un banco de pruebas.

Alcance

El análisis de comportamiento de un motor universal se divide en 3 etapas que permitan cumplir los objetivos planteados y alcanzar el propósito final de la investigación. En la primera etapa se realizará una investigación del aspecto teórico basado en los parámetros técnicos de la máquina, usando información de investigaciones anteriores, libros técnicos, tesis, artículos, datasheet, etc., adquiriendo la destreza necesaria de los parámetros técnicos del motor universal y logrando describir los mismos, permitiendo realizar las etapas consecuentes con un conocimiento fundamentado. Por otro lado, el diseño módulo el cual corresponde a la segunda etapa, estará estructurado principalmente con el uso de un motor monofásico universal, el cual tendrá una potencia de 2 HP, operará con un voltaje de 120/240 V. Para el control de pruebas de caracterización se utilizará un sistema embebido Arduino ideales para sistemas de medición, de igual forma se hará uso de la plataforma IDE Arduino para la programación del código acorde a los requerimientos de las pruebas de comportamiento de la máquina. Por otro lado, se realizará simulaciones de comportamiento de la máquina mediante el software FEMM (Método magnético de elemento finito). Además, en la etapa de diseño se usan sensores genéricos para obtener las respectivas mediciones de las diferentes variables que se estudian en la etapa de análisis de comportamiento del motor. Tomando en cuenta la alimentación en corriente continua se utilizará una fuente externa que alimente al motor y para la alimentación en corriente alterna se realizará la conexión directa a la red.

En la última etapa se desarrolla el análisis de comportamiento del motor universal mediante el módulo de pruebas para la verificación de los parámetros eléctricos del motor. El módulo permitirá realizar pruebas de la máquina respecto a parámetros importantes de la máquina con sus diferentes tipos de alimentación CA y CC, permitiendo determinar factores importantes de la máquina como arranque, frenado (mediante el método de contracorriente o por inyección de corriente continua) y medición de algunas variables de funcionamiento como voltaje, frecuencia, factor de potencia y corriente del motor monofásico universal, las pruebas van a estar regidas bajo el Método Clásico y un método alternativo que permita verificar los

parámetros antes mencionados, así como las formas de onda mediante un osciloscopio como complemento para el módulo de pruebas, para interpretar la señales de voltaje e intensidad obtenidas ante variaciones de carga a las que se someta el motor. Las respectivas evaluaciones serán realizadas en la Universidad Técnica del Norte.

Justificación

El motor universal a tenido una gran acogida en diferentes sectores donde se requiere el uso de estos componentes, debido a que cuenta con varias características favorables, principalmente la de operar con corriente directa y corriente alterna. Un ejemplo de la aplicación del motor en la industria es su uso en la mayoría de los electrodomésticos por su eficiencia en el desarrollo de ese tipo de procesos, otros de los factores que influyen en el uso de estos motores es principalmente por el bajo costo que representa su obtención y la fácil adquisición en el medio.

El estudio del motor monofásico universal ha sido bastante amplio, y se ha enfocado en los diferentes aspectos que intervienen en el funcionamiento del motor, siendo de gran relevancia la realización pruebas de caracterización con la máquina para determinar algunos factores importantes del motor, así como poder evaluar las variables de funcionamiento con las que cuenta el motor con sus diferentes tipos de alimentación.

Para el modelamiento, pruebas y aplicaciones del motor universal es esencial contar con un conocimiento previo de los diferentes parámetros eléctricos del motor. Dichos parámetros sirven como base para la realización de simulaciones que permitan interactuar con el motor bajo diferentes circunstancias de operación, logrando verificar y predecir de mejor manera el funcionamiento de la máquina.

El análisis de comportamiento del motor universal mediante un módulo de pruebas permite verificar los parámetros antes mencionados a través de la realización de simulaciones y pruebas de comportamiento de la máquina para poder obtener la medición de las variables de funcionamiento del motor con sus diferentes tipos de alimentación. Por otro lado, se realizará un análisis de las curvas características del motor obtenidas de un osciloscopio verificando las formas de onda simuladas de corriente y voltaje, componentes fundamentales para el diseño de motores universales, por lo cual se ve la necesidad del estudio.

El análisis, módulo de pruebas del motor universal, así como los resultados obtenidos pueden contribuir a futuras investigaciones sobre motores eléctricos con alimentación en corriente directa y corriente alterna, además de la disponibilidad del módulo para realizar pruebas de comportamiento de la máquina en los laboratorios de la carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte.

CAPÍTULO I

Descripción de parámetros técnicos del motor universal

Los parámetros técnicos de un motor monofásico universal abarcan una serie de definiciones relacionadas directamente con la estructura y funcionamiento del motor. Por lo tanto, se estima necesario estudiar motores tanto de corriente continua como de corriente alterna. De manera específica, se centrará en el motor serie de corriente continua, dado que el motor monofásico universal comparte elementos de su estructura y opera en base a los principios de funcionamiento similares a los del motor mencionado. A continuación, se ilustrará la temática que se tratará en este capítulo.

- Motor eléctrico
- Motor universal
- Parámetros técnicos del motor universal
- Tipos de pruebas para obtener parámetros del motor universal

1.1 Motor eléctrico

Un motor eléctrico se puede definir como una máquina que utiliza energía eléctrica para transformar esta en energía mecánica, esto mediante efectos electromagnéticos producidos por las bobinas en el interior del motor. Los motores eléctricos, tanto en corriente alterna como en corriente directa, satisfacen una amplia gama de aplicaciones y necesidades de servicio, siendo utilizados para diferentes propósitos como arrancar, acelerar, mover, frenar cargar y detener un elemento determinado. Esto indica que los motores se diseñan en base a los requerimientos de operación, aumentando o disminuyendo su potencia y velocidad según el grado de complejidad (BUN-CA, 2011).

Por otro lado, un motor eléctrico puede funcionar como generador si se hace referencia a los motores reversibles, los cuales transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Incluso existen motores eléctricos que cuenta con la capacidad de transformar ambos tipos de energía , dependiendo de su aplicación (Universidad Nacional de la Plata, 2022).

1.2 Motor universal

El motor universal es uno de los motores más utilizados a nivel industrial para diferentes aplicaciones, tales como electrodomésticos, bombas de agua, lavadoras, etc. Cuenta con la característica principal de estructurarse con un sistema de alimentación que funciona tanto con corriente continua (DC), como con corriente alterna (AC). Su estructura es básicamente similar a la del motor serie de corriente continua (Quevedo, 2010). Además, estos motores cuentan con un diagrama de conexión similar, en el que se conecta en serie la armadura con el campo de la máquina. En la Figura 1 se muestra la estructura superficial de un motor monofásico universal.



Fig. 1: Motor monofásico universal.
Fuente: (Tonato, 2017).

El uso de estos componentes es más común en corriente alterna, ya que es el sistema de alimentación principal con el que se cuenta en los hogares o industrias. Además, son motores de fácil adquisición en el medio y considerablemente económicos. Cuentan con un buen par de arranque y en operación pueden alcanzar velocidades de rotación elevadas (Quevedo, 2010).

1.2.1 Partes constitutivas de un motor universal

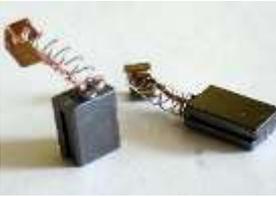
En la actualidad se construyen distintos tipos de motores universales, siendo el más común el motor universal tipo serie bipolar. Esta máquina cuenta con dos arrollamientos concentrados para el inducido y otro tipo de arrollamiento para el inductor, el cual se encuentra distribuido en las ranuras del rotor, similar al motor de fase partida (Murillo, 2010). Las partes principales del motor universal son:

- Armadura o rotor
- Estator
- Colector
- Escobillas

En la Tabla 1, se realiza una breve descripción de las partes principales del motor y se muestra una imagen referencial de los elementos que conforman dicha estructura.

Tabla 1

Partes de un motor universal

Componente	Descripción	Figura
Armadura	Se estructura por grupo de chapas, las cuales, al disponerse en ángulos normales u oblicuos producen un núcleo compacto. (García, 2015). En la Figura 2 se muestra el rotor de un motor universal.	 Fig. 2: Rotor de motor universal. Fuente: (Tonato, 2017).
Estator	Se estructura de un conjunto de chapas dispuestas entre sí de forma correcta, siendo apretadas y fijas con el uso de remaches o elementos que permitan tener núcleos polares de inductores firmes. Este componente se presenta en la Figura 3.	 Fig. 3: Estator de motor universal. Fuente: (Tonato, 2017).
Colector	Componente de forma circular, ubicado sobre el eje del motor. Se construye con varias láminas de cobre (delgas), las cuales se aíslan entre sí y del rotor. Permite que las escobillas transfieran la energía a la armadura manteniendo una correcta polaridad. En la Figura 4 se presenta este elemento.	 Fig. 4: Conmutador de motor universal. Fuente: (Tonato, 2017).
Escobillas	Se encuentran alojadas en un porta-escobillas, son de carbón y se consideran fundamentales para el motor, debido a que a través de estas se produce la conmutación entre el rotor y el estator. Este componente se presenta en la Figura 5.	 Fig. 5: Escobillas de motor universal. Fuente: (Tonato, 2017).

Nota. Fuente: (García, 2015).

De las partes del motor universal, se consideran únicamente los elementos más relevantes para el estudio de funcionamiento de la máquina, ya que no se describen los elementos secundarios del mismo, como los escudos, elementos de fijación, entre otros.

1.2.2 Principio de funcionamiento del motor universal

En un motor universal el bobinado del inducido se conecta en serie con el bobinado del inductor. Dicho bobinado produce un campo magnético generando el paso de corriente eléctrica. Además, existe un desplazamiento del campo del inducido al ser expuesto al campo magnético del inductor. El cual, al ser sometido a una corriente eléctrica por el campo magnético del inductor produce el movimiento del rotor (Chapman, 2012). En la Figura 6 que se presenta a continuación, se ilustra el circuito equivalente de un motor universal.

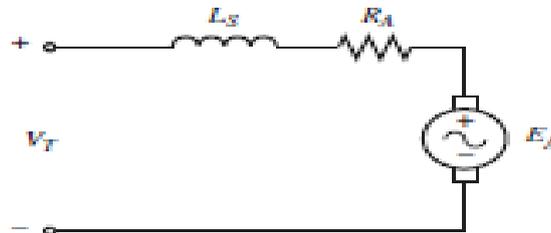


Fig. 6: Esquema de conexión de un motor universal.
Fuente: (Chapman, 2012).

Un motor universal se puede considerar como un motor serie con la capacidad de ser alimentado tanto con corriente alterna como con corriente continua, que es lo que lo diferencia de un motor serie común, los cuales funcionan únicamente mediante una fuente DC. Sin embargo, sus circuitos equivalentes y la mayoría de sus principios de funcionamiento son similares en operación (Chapman, 2012).

1.2.2.1 Principio de funcionamiento en corriente directa

Cuando el motor es alimentado con corriente directa existe una inversión de corriente continua del motor universal, la dirección en la que se genera la rotación permanece constante, mientras que el flujo de corriente producido entre el estator y el campo magnético provoca la inversión de manera simultánea, a pesar de ello, el motor permanecerá girando en la misma dirección (Qi et al., 2020). En la Figura 7 se presenta la señal de voltaje característica del motor con alimentación en corriente continua.



Fig. 7: Forma de onda de voltaje en corriente directa.
Fuente:(Vargas, 2018).

El motor universal en corriente directa frecuentemente alcanza un cierto grado de eficiencia mayor en términos de generación de par, en comparación con la alimentación en corriente alterna. Esto debido a las características propias de cada tipo de alimentación y el diseño de la máquina (Qi et al., 2020).

1.2.2.2 Principio de funcionamiento en corriente alterna

Cuando un motor universal es alimentado con corriente alterna, el flujo varía cada medio ciclo, produciendo que la mitad de la onda de corriente se considere como positiva y la otra negativa. En el ciclo positivo las corrientes producidas en los devanados del estator cuentan con la misma dirección que el movimiento de las manecillas de un reloj, de izquierda a derecha y viceversa, produciendo un par contrario al de las manecillas del reloj en la máquina (Qi et al., 2020). En la Figura 8 se presenta la forma característica de voltaje con alimentación AC.



Fig. 8: Forma de onda de voltaje en corriente alterna.

Fuente: (García, 2015).

Por otro lado, la otra mitad del ciclo corresponde a la parte negativa. Durante este ciclo el voltaje que se aplica al motor invierte la polaridad, resultando en un cambio en la dirección de la corriente, de derecha a izquierda. Además, el flujo de corriente que es el resultado de los efectos magnéticos producidos en los polos se encuentra dispuesto de izquierda a derecha. A pesar de ello, el par de arranque no sufre modificaciones en su dirección debido a que en la mitad del ciclo se invierte la corriente y el flujo (Qi et al., 2020).

1.2.2.3 Principio de funcionamiento como generador

Un motor universal puede utilizarse como un generador al separar el circuito interno de la máquina. Por tanto, es necesario desconectar los terminales del campo de los de la armadura, para contar con terminales de alimentación independientes. Dando como resultado un circuito equivalente similar al de un generador de excitación separada (Chapman, 2012). El cual se presenta en la Figura 9 que se muestra a continuación.

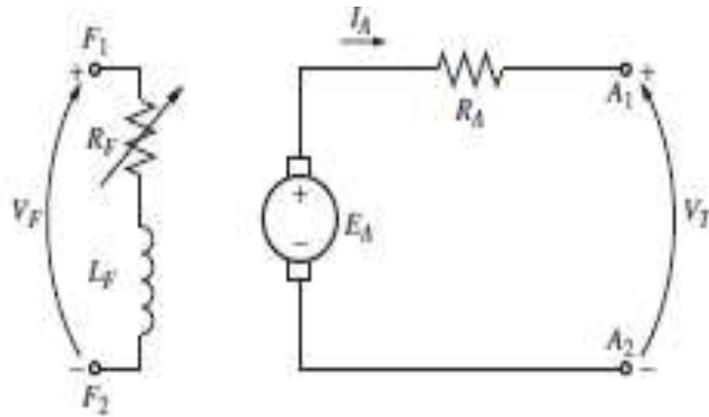


Fig. 9: Circuito equivalente de generador universal de excitación separada.

Fuente: (Chapman, 2012).

Para este tipo de generación se aplica corriente al campo del motor mediante una fuente DC, y para generar el movimiento del rotor se usa un instrumento mecánico externo que generalmente es otra máquina. Cabe recalcar, que el voltaje generado dependerá de la corriente aplicada en el campo y el movimiento producido en el eje del motor, este voltaje se verá reflejado en los terminales de la armadura del motor (Chapman, 2012).

1.2.2.4 Motor universal AC vs motor universal DC

El motor universal no es más que un motor serie DC funcionando en corriente alterna, para lo cual es necesario que los polos se encuentren totalmente laminados, al igual que la cubierta del estator. Si no se lámina en su totalidad los componentes mencionados se producirán enormes pérdidas en el núcleo del motor (Airboman, 2020).

Si el motor universal se conecta a una fuente de corriente continua, la conmutación será mucho más eficiente en comparación con la alimentación con corriente alterna. Por otro lado, el par y la velocidad en DC y en AC difieren principalmente a causa de dos factores (Airboman, 2020). Los cuales se detallan a continuación:

1. La reactancia en los devanados de la armadura y del campo es considerablemente alta a 60 Hz. Además, el voltaje de entrada sufre una caída de tensión por la reactancia, resultando en un voltaje de suministro menor. A consecuencia de estos factores el motor se mueve más lento cuando se alimenta con corriente alterna.
2. La saturación del motor con alimentación en corriente alterna, se produce cuando el motor opera en un valor de corriente cercano a la corriente máxima. Al aumentar o variar la corriente el flujo rms puede ser menor, lo que a su vez disminuye el par inducido del motor. Estos efectos pueden opacar parcialmente el factor antes mencionado.

Para entender de mejor forma la diferencia de operar con distintos tipos de alimentación, se presentan las curvas par-velocidad del motor universal en AC y DC en la Figura 10 que se muestra a continuación.

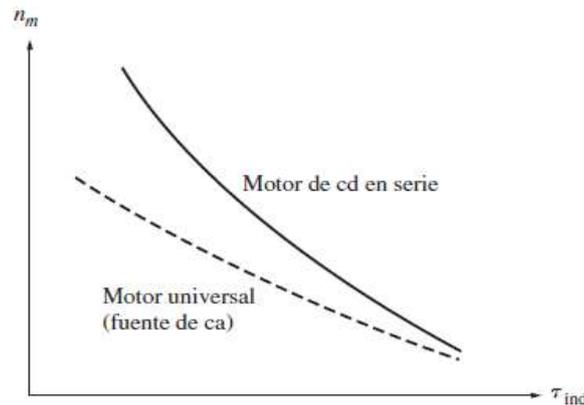


Fig. 10: Curva características par-velocidad de un motor universal.
Fuente: (Chapman, 2012).

Se observa que la curva característica par-velocidad del motor universal en corriente continua alcanza siempre una mayor velocidad que el motor en corriente alterna, a pesar de contar con el mismo par, esto debido a los aspectos antes mencionados (Chapman, 2012).

1.2.3 Características motor universal

El motor universal cuenta con una serie de particularidades que lo diferencia del resto de motores eléctricos, las principales características son:

- El motor universal al ser alimentado con corriente continua cuenta con el mismo principio de funcionamiento que un motor serie DC normal, presentando características de funcionamiento similares.
- Cuenta con una menor potencia cuando está operando en corriente alterna, debido a que el motor operando en AC produce un par de manera pulsante y la corriente está limitada por la impedancia, la cual se produce por el inductor y la resistencia del bobinado.
- Posee un par de arranque muy elevado.
- Tiende a embalsarse si el motor se encuentra operando en vacío.
- El valor de velocidad se puede considerar directamente proporcional al valor de corriente.
- El motor universal puede ser utilizado tanto como motor como generador de excitación separada, si se desconecta la armadura del campo y se alimentan las terminales de forma independiente.

Para entender el funcionamiento del motor universal es necesario estudiar los parámetros eléctricos y mecánicos que intervienen en el funcionamiento de la máquina. Por lo cual, se realiza una breve descripción de estos.

1.3 Parámetros técnicos del motor universal

De forma general los parámetros o especificaciones técnicas de los motores eléctricos cumplen con la función de brindar instrucciones de manipulación, utilización y funcionamiento de las máquinas eléctricas. Frecuentemente estos parámetros se encuentran dentro de manuales, los cuales sirven como guía para compradores, vendedores y operadores de motores eléctricos (WEG, 2021).

1.3.1 Magnitudes Fundamentales

Las magnitudes fundamentales de un motor se consideran dentro de los parámetros técnicos de un motor universal, mismos que se detallan en las placas de especificación técnica. Conocer estos parámetros es fundamental para comprender el funcionamiento de un motor universal, debido a que mediante las variables fundamentales del motor es posible determinar si la máquina opera acorde a las especificaciones establecidas para el mismo (WEG, 2018). En la Tabla 2 se presentan los principales parámetros de operación del motor monofásico universal.

Tabla 2

Magnitudes básicas de un motor eléctrico

Parámetro	Descripción
Voltaje	Magnitud encargada de mantener una diferencia entre cargas positivas y negativas existentes entre dos terminales de un circuito. La unidad del voltaje es el Voltio (V).
Corriente	Se define como la cantidad de cargas denominadas electrones o la intensidad con la que estos van a circular por un conductor. Se genera cuando existe un voltaje aplicado en los extremos de una carga. La corriente se mide en Amperios (A).
Potencia	Representa cuanto trabajo es capaz de realizar durante un determinado periodo de tiempo el motor eléctrico. Depende directamente de los valores de voltaje y corriente aplicados. Se mide en Watts (W).
Par	Representa la medida del esfuerzo que realiza el motor para lograr la rotación del eje. Además, el par inducido es proporcional a la velocidad angular del eje. Se de mide en Newton-metro (Nm).

Factor de potencia (cos φ)	Es el ángulo de desfase del voltaje con relación a la corriente, es la relación directa entre la potencia activa y la potencia aparente. Permite conocer la eficiencia o rendimiento de un sistema eléctrico, midiendo el aprovechamiento de la energía.
Rendimiento	Es la eficiencia de un motor para poder realizar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica para producir trabajo. Relación de la potencia de entrada con la de salida.

Nota. Fuente: (WEG, 2018).

Se debe realizar la medición de las magnitudes básicas en el suministro y la máquina previo a utilizar el motor en alguna aplicación, con el fin de verificar las magnitudes de alimentación y comprobar que los valores obtenidos son aproximados a los de la placa del motor para evitar daños en la máquina (Universidad Nacional de la Plata, 2009).

1.3.2 Parámetros técnicos para el motor universal en AC.

Para el motor universal alimentado con corriente alterna se considera algunos parámetros fundamentales para su operación. Los cuales se detallan en la Tabla 3, a continuación.

Tabla 3

Parámetros técnicos de los sistemas de corriente alterna.

Parámetro	Descripción
Frecuencia	Número de veces por segundo que el voltaje varía el sentido volviendo a una condición inicial. Se mide en ciclos por segundo o Hertz (Hz).
Valor eficaz (Voltaje – corriente)	Valor generado entre un voltaje y una corriente continua que desarrollan una potencia que corresponde a la desarrollada con la alimentación en corriente alterna.
Desfase (φ)	Retraso de la onda de corriente frente a la onda de voltaje. Se mide el ángulo que corresponde a la fracción de un ciclo completo, se simboliza por φ . En sistemas monofásicos se produce un desfase de 90° , mientras que en sistemas trifásicos el desfase entre líneas es de 120° .
Velocidad síncrona (Ns)	Velocidad de rotación del campo giratorio del rotor, depende del número de polos del motor, el voltaje aplicado y la frecuencia. La velocidad síncrona se mide en revoluciones por minuto (rpm).

Nota. Fuente (WEG, 2021).

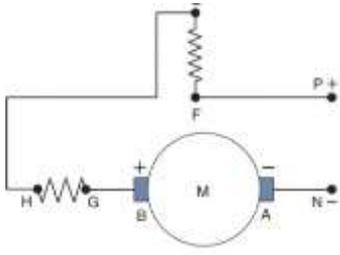
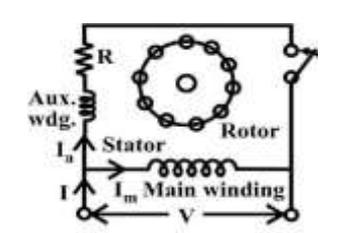
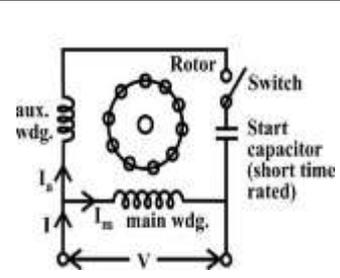
Para la alimentación de un motor eléctrico con corriente alterna se toma en cuenta los valores nominales de las magnitudes eléctricas. Un valor nominal hace referencia al valor para el cual el motor fue proyectado o construido para operar de forma estable (WEG, 2021).

1.3.3 Parámetro de arranque de un motor universal

A diferencia de los motores trifásicos, en los monotes monofásicos no existe un tipo de arranque definido. Por lo cual, se suelen emplear distintos métodos para el disparo o activación del motor (GETMYUNI, 2015). Existe una clasificación de arranques para motores monofásicos en base a los elementos utilizados para el mismo, en la Tabla 4 se muestran los tipos de arranques según el tipo de motor y el componente utilizado para el arranque.

Tabla 4

Tipos de arranque para motores monofásicos

Componente	Descripción	Figura
<p>Arranque directo</p>	<p>Es el método más simple para el arranque de un motor. El motor se conecta de manera directa a la fuente de suministro eléctrico, produciendo la activación del motor y por ende el giro del rotor.</p>	 <p>Fig. 11: Arranque directo. Fuente: (Oriol Planas, 2018).</p>
<p>Arranque en fase partida</p>	<p>El motor contiene dos devanados, el principal o de trabajo y el auxiliar, este último se utiliza para el arranque, conectando los devanados en paralelo mediante un switch, el cual activa y desactiva la máquina.</p>	 <p>Fig. 12: Arranque fase partida. Fuente: (GETMYUNI, 2015).</p>
<p>Arranque con condensador</p>	<p>El estator del motor cuenta con dos devanados, el devanado auxiliar el cual se utiliza para arrancar el motor y se conecta en serie con un condensador y el devanado de trabajo. El motor se activa mediante un switch.</p>	 <p>Fig. 13: Arranque con condensador. Fuente: (GETMYUNI, 2015).</p>

Arranque con condensador permanente

El motor cuenta con un devanado principal y un devanado auxiliar utilizado para energizar el motor. El devanado principal se encuentra conectado en serie con un condensador para mantener una señal estable. Su activación se produce de forma directa al conectarse a la fuente de alimentación.

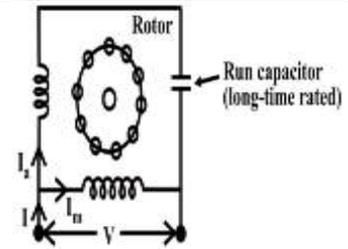


Fig. 14: Arranque con condensador permanente. Fuente: (GETMYUNI, 2015).

Nota. Fuente: (GETMYUNI, 2015).

El arranque de un motor eléctrico es fundamental para un funcionamiento apropiado. Por lo cual, es importante seleccionar el método adecuado para su accionamiento, el cual está basado principalmente en la potencia y par de arranque de un motor (GETMYUNI, 2015).

1.3.4 Régimen del motor universal

El régimen es un parámetro fundamental para el estudio y diseño de un motor eléctrico debido a que interviene en una serie de factores como el calentamiento del devanado, la vida útil del motor, las clases de aislamiento, las protecciones térmicas de los motores eléctricos, el régimen de servicio y el factor de servicio (WEG, 2018).

1.3.4.1 Factor de servicio (FS)

Se define como factor de servicio al factor que depende de la potencia nominal aplicada para poder establecer la permisibilidad de la carga continua a la que se someterá el motor eléctrico. De igual forma, se define como factor de servicio a la capacidad de sobrecarga continua que puede soportar el motor. El factor de servicio es igual a la unidad, lo que permite establecer que los motores eléctricos no están diseñados para operar por encima de su nivel de potencia nominal, el cual es diferente para cada motor (WEG, 2021).

1.3.4.2 Sistema de aislamiento y materiales

El aislamiento del motor universal y de cualquier motor eléctrico desempeña un papel fundamental en la prolongación o reducción de la vida útil del mismo, lo que amerita la selección de un correcto tipo de aislamiento para un motor. Los factores que pueden afectar al aislamiento son la humedad, vibraciones, ambientes corrosivos y principalmente la elevación de la temperatura, afectando los materiales de la máquina cuando se sobrepasa los 8 grados centígrados del límite establecido. Mientras más se incumpla con los límites de temperatura, la vida útil del motor se acortará de manera más significativa (WEG, 2021).

1.3.4.3 Sistema aislante

Se considera como sistema aislante a la combinación dada por dos o más materiales aisladores. Este sistema consiste básicamente en el esmaltado del alambre, aislamiento en el fondo y cierre de la ranura, aislamiento de los cables de conexión, entre otras partes del motor. El resto de los materiales que se encuentren en contacto con los devanados no forman parte del sistema de aislamiento (WEG, 2018).

1.3.4.4 Material aislador

El material aislador es el encargado de limitar y direccionar el paso de la corriente eléctrica. Se utiliza básicamente para impedir el flujo de la corriente hacia el exterior de la máquina, evitando el peligro que la corriente alterna representa para el operador. Sin embargo, el material aislador también es el encargado de dar un soporte mecánico, proteger el conductor de la corrosión y de las elevaciones de temperatura por encima de los niveles de tolerancia (WEG, 2018). Las normas para los materiales aislantes se muestran en la Figura 15 la cual presenta la clasificación de los materiales y los sistemas aislantes.

Materiales	Sistemas	Materiales y Sistemas
UL 746B	UL 1446	IEC 60085
IEC 60216	UL 1561 / 1562	
	IEC 60505	
	IEEE 117	

Fig. 15: Normas de materiales y sistemas aislantes.

Fuente: (WEG, 2018).

Las normas presentadas de los materiales y sistemas de aislamiento están regidas bajo normas internacionales las cuales se aplican de igual forma en el país, principalmente las normas de materiales y sistemas ANSI, IIEE e IEC, las cuales utilizan comúnmente materiales aisladores termoplásticos como PVC o polietileno, los cuales brindan un alto nivel de flexibilidad y resistividad a la temperatura y los factores ambientales (WEG, 2018).

1.4 Tipos de pruebas para obtención de parámetros con un motor universal

En el estudio de un motor universal se puede realizar una serie de ensayos prácticos para obtener los diferentes parámetros eléctricos, térmicos y mecánicos de la máquina que permiten caracterizar y entender su funcionamiento. Las pruebas más comunes son:

- Prueba DC
- Prueba en vacío
- Prueba a plena carga
- Motor universal como generador de excitación separada
- Pruebas térmicas

Prueba DC: Se realiza la prueba DC para obtener la resistencia del devanado del motor. Se aplica un voltaje bajo en corriente directa y se realiza el registro del voltaje y la corriente obtenidos. Además, para calcular la resistencia es necesario aplicar las ecuaciones adecuadas con los datos medidos. Esta prueba se realiza para verificar si la resistencia del devanado está dentro de las especificaciones del fabricante o para obtener dicha resistencia en el caso de no mostrarse en las especificaciones (Rojas et al., 2015).

Prueba en vacío: La prueba en vacío, se realiza aplicando al motor su voltaje nominal, con el objetivo de registrar la corriente de arranque, potencia de entrada y la velocidad del motor, cuando este opera sin carga (Pozueta, 2009). En la Figura 16 se observa el esquema de conexión para la prueba en vacío de un motor trifásico. Sin embargo, el esquema sirve de referencia para realizar la práctica con el motor universal, ya que se aplican los mismos principios de medición para un sistema monofásico.

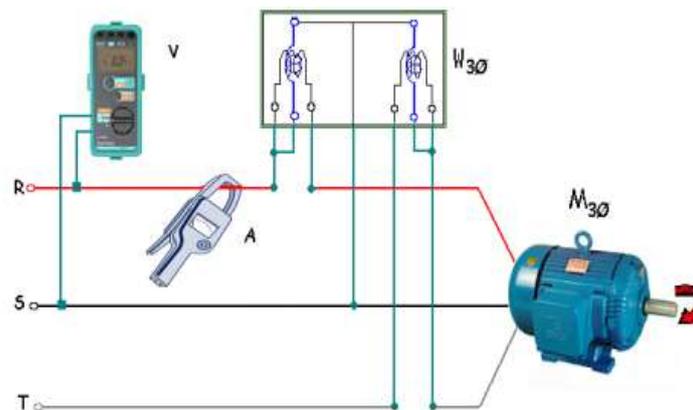


Fig. 16: Prueba en vacío de un motor eléctrico.
Fuente: (Chapman, 2012).

Otro de los parámetros de estudio que se puede verificar con este método, son las pérdidas de energía en el motor, lo que permite analizar si estas no son muy elevadas al operar en vacío, para confirmar un funcionamiento estable y adecuado del motor.

Prueba a plena carga: Se conecta una carga mecánica al motor y se realiza la medición de diferentes parámetros como velocidad, torque, potencia, entre otros parámetros eléctricos. Esto con el fin de verificar los cambios producidos en el motor cuando se modifican los valores de carga. Además, este ensayo permite conocer la eficiencia real del motor durante su funcionamiento (Pozueta, 2009). En la Figura 17 se muestra un ejemplo de un banco de pruebas utilizado para la prueba de carga, en el cual la carga conectada es otra máquina eléctrica que demanda potencia al motor principal.

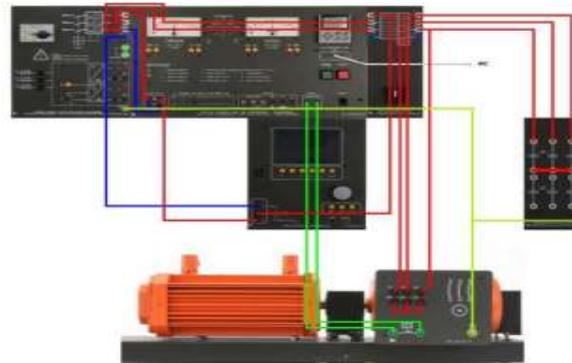


Fig. 17: Prueba con carga mecánica de motor eléctrico.
Fuente: (Chapman, 2012).

La carga utilizada para evaluar al motor debe contar con la capacidad de modificar sus valores, para demandar diferentes valores de potencia. De esta forma es posible verificar el funcionamiento de la máquina sometido a diferentes niveles de carga.

Motor universal como generador: Para transformar un motor universal en un generador es necesario separar el campo de la armadura, dando como resultado un circuito equivalente de un generador de excitación separada. Para la prueba se aplica un voltaje DC en el campo y se genera el movimiento mecánico en el eje mediante un componente externo con el fin de generar voltaje en la armadura (Hernández et al., 2008). En la Figura 18 se muestra el ensayo de un generador conectado a un motor encargado de producir el movimiento.

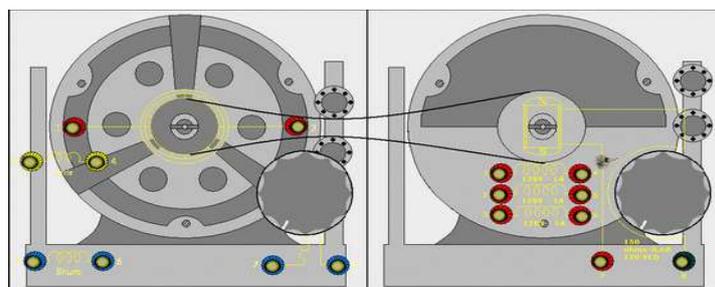


Fig. 18: Prueba con carga mecánica de motor eléctrico.
Fuente: (Chapman, 2012).

El voltaje generado en esta prueba se mide en los terminales de la armadura en corriente directa. Además, se observa que el mecanismo para unir los ejes de las máquinas es una cinta transportadora, este componente es fundamental para el ensayo ya que este debe brindar estabilidad y una unión firme. Este tipo de pruebas se realizan cuando se desea emular una carga eléctrica o para conocer la capacidad de generación de un motor (Hernández et al., 2008).

Pruebas térmicas: Las pruebas térmicas en el motor universal se realizan con el propósito de evaluar la capacidad de operar a altas temperaturas sin que la máquina sufra daños. Por lo cual, se somete al motor a diferentes niveles de carga, realizando las mediciones de la variación de temperatura. Los valores registrados permiten realizar un análisis de datos para evaluar el desempeño térmico del motor (Trocel, 2017). En la Figura 19 se presenta un modelo de cómo se realiza las pruebas térmicas de un motor.

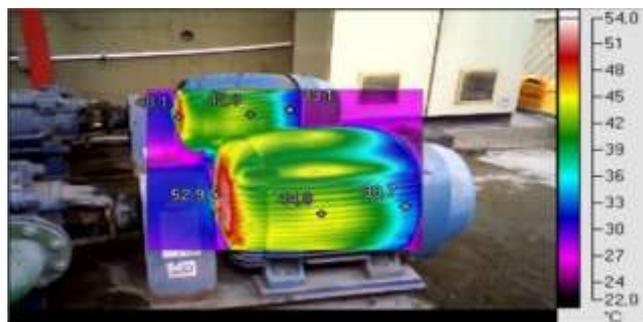


Fig. 19: Prueba térmica de motor eléctrico.
Fuente: (Trocel, 2017).

Esta práctica se realiza con un componente de medición térmico conocido como termopar o termorresistencia. Además, estos ensayos pueden causar daños al motor si no se realizan adecuadamente debido a las altas temperaturas que se pueden alcanzar durante la práctica. Por lo tanto, es recomendable realizar este ensayo con la asistencia de un experto en el área de máquinas eléctricas y utilizando las protecciones adecuadas para la manipulación del motor (Trocel, 2017).

Mediante la revisión bibliográfica es posible desarrollar los capítulos siguientes con las bases adecuadas, logrando reconocer y describir las diferentes partes del motor universal, su funcionamiento en corriente directa y corriente alterna, los parámetros técnicos y eléctricos del motor, y los tipos de pruebas experimentales que se pueden aplicar en este tipo de máquinas. Por lo tanto, la implementación de un banco de pruebas para ensayos en laboratorio con un motor universal y el análisis de dicho motor realizados en los siguientes capítulos, se llevan a cabo en base a la información obtenida del estudio bibliográfico realizado, desarrollando las siguientes etapas de manera orientada y técnica.

CAPÍTULO II

Implementación de banco de pruebas para experimentación con motor universal

Para la implementación de un banco de pruebas con un motor universal, es necesario aplicar las metodologías, modelos matemáticos y los materiales adecuados, con el fin de realizar un análisis completo del funcionamiento de la máquina mediante pruebas de experimentación. Por lo cual, en el capítulo 2 se presentan los métodos matemáticos, elementos de medición y el resto de los componentes para el diseño del banco de pruebas.

2.1 Metodología

El desarrollo de la metodología se basa en varios factores, tales como las especificaciones técnicas, métodos de medición, cálculos matemáticos, costos económicos, facilidad de adquisición en el medio, entre otros puntos. En la Figura 20 se muestra la metodología utilizada para realizar el diseño e implementación del banco de pruebas con el motor universal, así como un posterior análisis de funcionamiento de la máquina.

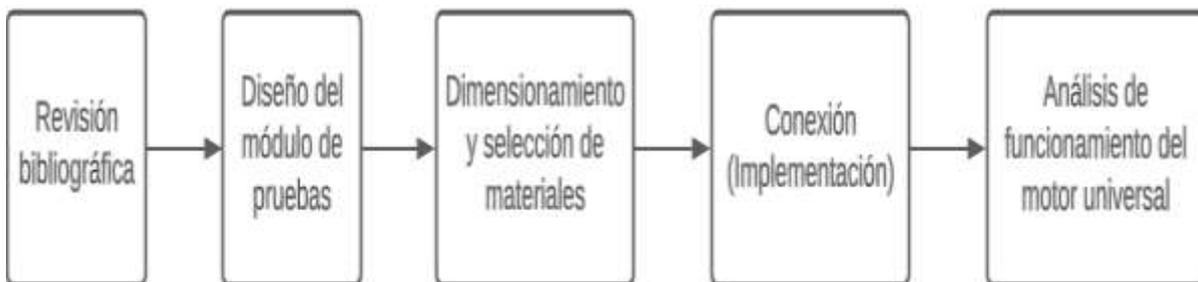


Fig. 20: Metodología para la implementación de un banco de pruebas con un motor universal.
Fuente: autor.

Cada etapa conlleva una serie de actividades que permiten cumplir cada una de estas de forma eficaz. A continuación, se detalla cada etapa de la metodología:

- 1. Revisión bibliográfica:** Con el fin de contar con bases adecuadas y tener conocimiento de cómo estructurar un banco de pruebas para evaluar un motor eléctrico, se realiza un estudio del motor universal, revisando los parámetros técnicos y los tipos de pruebas con el motor universal. Además, se realiza el estudio de bancos de pruebas con otros motores, con el fin de revisar las metodologías y experiencias de otras investigaciones.

2. **Diseño del módulo de pruebas:** De forma inicial se plantea el diseño del banco de pruebas con los componentes a utilizarse en base al estudio realizado para obtener los parámetros de funcionamiento del motor universal. Por lo cual, se realiza de forma previa el levantamiento de información de los componentes, tomando en consideración costos, características y valores nominales de operación. Además, se verifica la facilidad de adquisición en el medio.
3. **Dimensionamiento y selección de materiales:** Una vez seleccionados los componentes que permiten obtener las variables eléctricas del motor, se procede a dimensionar estos en base a los valores nominales del motor universal y los valores de alimentación con los que se realizan las pruebas. Además, en este punto se realizan las simulaciones de funcionamiento del motor universal y los diagramas de conexión finales con los materiales seleccionados.
4. **Conexión (Implementación):** La última etapa del capítulo 2 corresponde a la conexión de todos los componentes, es decir, la implementación del banco de pruebas. En este punto, se realizan las primeras pruebas de medición para verificar si los elementos operan conforme a sus valores nominales y coinciden con los cálculos obtenidos. Este punto es fundamental debido a que se realiza la verificación del banco de pruebas.
5. **Análisis del motor universal:** Una vez realizado el conexionado de todos los componentes que conforman el banco de pruebas, se procede a realizar pruebas de experimentación con el motor universal, analizando el funcionamiento en circuito abierto, cortocircuito y con carga, con alimentación en AC y DC.

En base a las 5 etapas presentadas en la metodología se realiza el diseño y construcción de un banco de pruebas para realizar el análisis de funcionamiento del motor. Las etapas de la metodología se detallan a continuación.

2.2 Diseño del módulo de pruebas

La implementación de un módulo de pruebas tiene como alcance obtener los parámetros eléctricos y la velocidad del motor universal, tanto en corriente directa como en corriente alterna, cuando el motor opera en vacío, en cortocircuito y emulando una carga. Por lo tanto, para el diseño se toma en cuenta las siguientes consideraciones: ´

- Con el propósito de emular una carga se utiliza un motor universal adicional acoplado al rotor del motor principal para actuar como generador, de esta forma se logra emular una carga tanto mecánica como eléctrica.
- Para el registro de los parámetros eléctricos del motor es necesario el uso de instrumentos de medición en AC y DC.
- Se debe considerar la seguridad de los operadores y de los instrumentos para las pruebas de funcionamiento del motor. Por lo cual, se utiliza protecciones que resguarden al banco de pruebas y a los operadores.
- Se deben separar los circuitos de corriente directa y de corriente alterna.
- Para lograr caracterizar al motor universal se considera su estructura y operación similar a las de un motor serie DC. Sin embargo, se deben considerar las diferencias producidas por la inductancia, reactancia y otros aspectos presentes en la alimentación en AC. Por lo cual, las pruebas necesarias para lograr caracterizar el motor son la de circuito abierto o vacío, prueba de cortocircuito y prueba de carga en AC y DC para verificar las diferencias en la máquina.
- Para las pruebas se utilizan instrumentos extras como fuentes de alimentación, un tacómetro y un osciloscopio. Sin embargo, dichos elementos no se toman en consideración para el diseño, debido a que son componentes externos proporcionados por la Universidad Técnica del Norte, específicamente con fines de experimentación.

En base a las consideraciones mencionadas, el estudio realizado del motor universal y de los métodos para obtener sus diferentes parámetros mediante un banco de pruebas, las distintas pruebas a las que se someterá el motor para lograr su caracterización, se realiza el bosquejo inicial del módulo de pruebas para poder evaluar el motor universal utilizado, dando como resultado el diseño inicial presentado en la Figura 21 que se muestra a continuación.

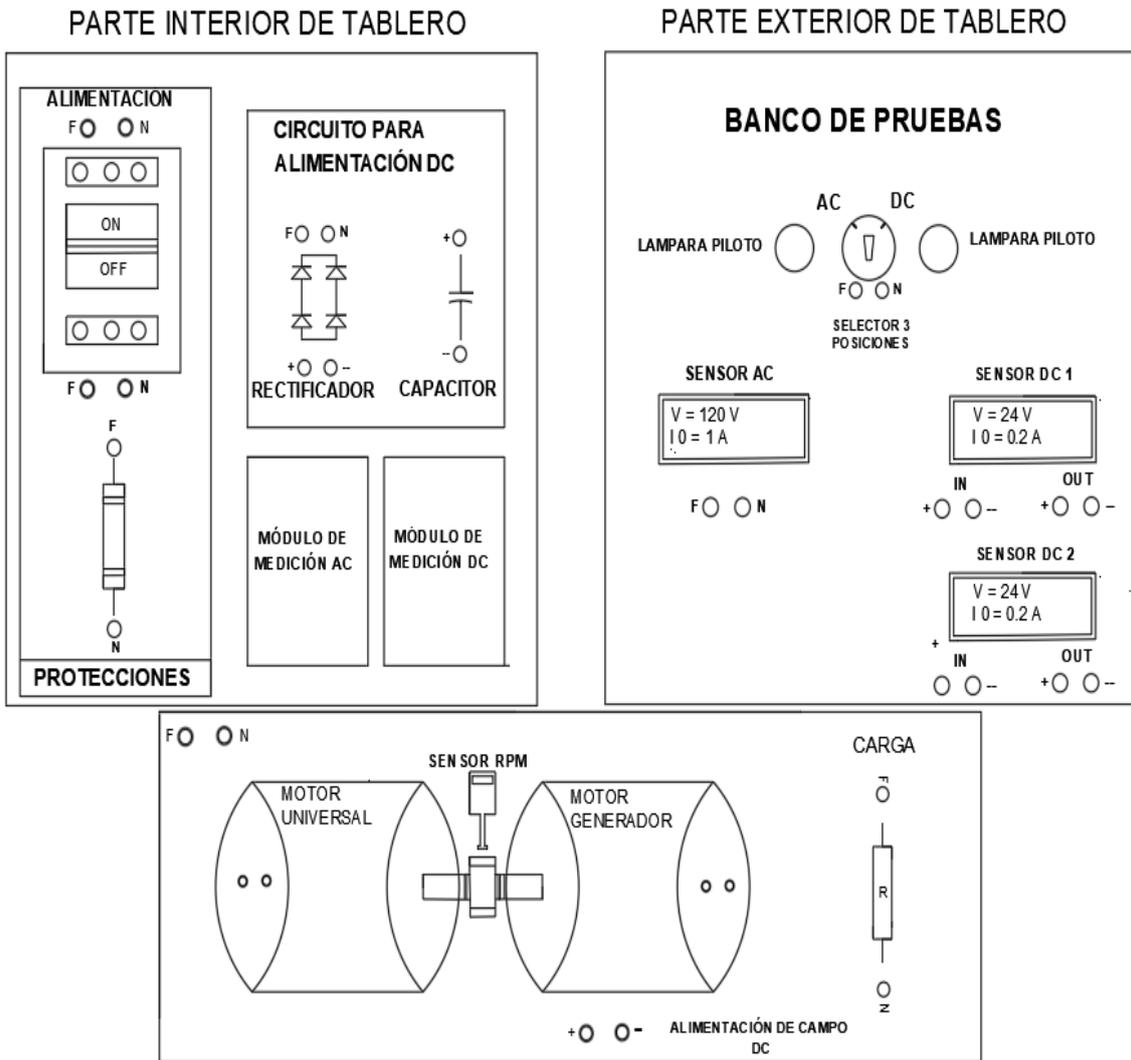


Fig. 21: Diseño inicial del módulo de pruebas.
Fuente: autor.

El diseño inicial sirve de referencia para realizar la selección de materiales y dimensionar estos en base a los aspectos antes mencionados para desarrollar los ensayos prácticos de forma adecuada y segura. Por lo cual, se hace una descripción del motor principal y de los materiales que conforman el banco de pruebas, para posteriormente realizar el diseño final con todos los materiales definidos.

Motor universal

El motor universal utilizado dentro del banco de pruebas al igual que todo motor de este tipo, se caracteriza por contar con la capacidad de operar en corriente directa y en corriente alterna. Lo que permite realizar un estudio más amplio del motor, debido a que es el único motor eléctrico que puede ser alimentado de diferentes formas (Chapman, 2012). En la Figura 22 se presenta el motor universal principal utilizado para el banco de pruebas.



Fig. 22: Motor universal para banco de pruebas.
Fuente:(MADE, 2023).

En base al motor principal y las pruebas que se aplican a la máquina, se realiza el dimensionamiento del resto de los componentes necesarios para lograr obtener los parámetros del motor universal. En la Tabla 5 se presentan las especificaciones principales del motor, las cuales sirven como base para dimensionar las protecciones, el circuito rectificador, el calibre del conductor, entre otros parámetros. Los cuales se basan principalmente en la corriente, voltaje, potencia, par motor y la velocidad de la máquina.

Tabla 5

Especificaciones técnicas del motor universal

Dispositivo	Magnitud	Valores nominales y/o características
Motor universal principal	Voltaje nominal	110/220 VAC
	Potencia nominal	1500 W
	Corriente nominal	5-6.5 A
	Velocidad	29000 rpm +/-15%
	Frecuencia	50-60 Hz
	Par	20 Nm
	Clase de aislamiento	B/F
	Fusible:	One
		shot/recuperable

Nota. En esta tabla se presentan los parámetros fundamentales del motor a evaluar, obtenido de: (MADE, 2023).

Además, se realizan pruebas y simulaciones con el motor universal para verificar el funcionamiento de la máquina operando en las diferentes pruebas con las que se evalúa el motor universal.

2.3 Dimensionamiento y selección de materiales

En esta etapa se toma como referencia los valores nominales del motor principal y las consideraciones presentadas en la etapa de diseño. Además, se presentan modelos distintos con el fin de tener una variedad para la selección de componentes, eligiendo los más adecuados para esta aplicación. Considérese que se realiza el cálculo de las dimensiones eléctricas únicamente para los componentes necesarios.

2.3.1 Módulo PZEM-004t (AC)

El módulo PZEM 004t es un elemento de medición diseñado para registrar las principales variables eléctricas de cualquier componente eléctrico que funcione en AC, realizando el registro de diferentes variables, como voltaje, corriente, potencia activa, entre otras variables (SDielec, 2023). El módulo se presenta en la Figura 23 a continuación



Fig. 23: Módulo de medición AC PZEM - 004t.
Fuente: (SDielec, 2023).

Este sensor presenta las variables registradas tanto en un monitor serial como en una pantalla LCD mediante la comunicación con una placa de Arduino u otro microcontrolador. En la Tabla 6 se detallan las especificaciones principales del módulo de medición.

Tabla 6

Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 004t

Dispositivo	Magnitud	Valores nominales
PZEM-004t	Rango de voltaje	60 - 260 VAC
	Rango de potencia	0 - 22000 W
	Rango de corriente	0 - 100 A
	Rango de frecuencia	45 - 65 Hz
	Precisión de medición	1.0
	Variables de medición:	Voltaje, corriente, potencia, energía, frecuencia y factor de potencia

Nota. Fuente: (SDielec, 2023), modificada por el autor.

Este elemento se ajusta a las especificaciones técnicas del motor. Además, para el código de programación, se utiliza los códigos base, configurándolos para que se adecuen a los requerimientos según el tipo de aplicación.

2.3.2 Módulo PZEM-016 (AC)

Sensor de medición eléctrico-electrónico para aplicaciones en corriente alterna, está diseñado para registrar varios parámetros eléctricos como corriente, voltaje, potencia, factor de potencia, frecuencia y energía. Además, se caracteriza por contar con un software propio en el que se presentan las variables registradas. En la Figura 24 se presenta el módulo de medición.



Fig. 24: Módulo de medición AC PZEM - 016.
Fuente: (Solarduino, 2020a).

Si se requiere la comunicación con un controlador externo o un microcontrolador, es necesario utilizar un módulo de comunicación RX485. Esto lo diferencia del módulo AC mencionado anteriormente, el cual realiza una comunicación directa. Las características técnicas de este componente se pueden visualizar en la Tabla 7 a continuación.

Tabla 7

Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 016

Dispositivo	Magnitud	Valores nominales y/o características
PZEM-016	Rango de voltaje	80 - 260 VAC
	Rango de corriente	0 - 100 A
	Rango de potencia	0 – 23 kW
	Material	Policarbonato
	Protocolo de comunicación:	ModbusRTU
	Interfaz de comunicación	RS485
	Variables de medición:	Voltaje, corriente, potencia, energía, factor de potencia y frecuencia

Nota. Fuente: (AliExpress, 2023c), modificada por el autor.

Si se observa el rango de medición de voltaje, encuentra que este componente inicia el registro en los 80 V. Por lo cual, en el caso de requerir realizar mediciones en un rango menor, es necesario de un componente externo como un voltímetro o un multímetro.

2.3.3 Módulo PZEM-017 (DC)

Componente de medición electrónico diseñado para medir y monitorear diferentes parámetros eléctricos producidos en corriente continua, tales como voltaje, corriente, potencia activa y energía (Solarduino, 2020b). En la Figura 25 que se muestra a continuación, se presenta el sensor PZEM 017.



Fig. 25: Módulo de medición DC PZEM – 017.
Fuente: (Solarduino, 2020b).

Este sensor se caracteriza por contar con una interfaz de comunicación para poder leer los datos y mostrarlos en una aplicación propia del sensor. Además, en el caso de requerir llevar un control más automatizado, se conecta el sensor a un controlador externo o un microcontrolador, presentando las mediciones en un monitor serial o una pantalla LCD (Solarduino, 2020b). Las especificaciones de este componente se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 017

Dispositivo	Magnitud	Valores nominales y/o características
PZEM-017	Rango de voltaje	0 - 300 VDC
	Rango de corriente	0 - 300 A
	Rango de potencia	0 – 90 kW
	Material	Policarbonato
	Protocolo de comunicación:	ModbusRTU
	Interfaz de comunicación	RS485
	Variables de medición	Voltaje, corriente, potencia, energía,

Nota. Fuente: (AliExpress, 2023b), modificada por el autor.

En base a las especificaciones de este componente se puede establecer que se adecua a las especificaciones del motor principal. Además, para la comunicación de este componente es necesario de un módulo de comunicación RS485, el cual se utiliza para conectar con Arduino o un módulo con salida USB directo al computador.

2.3.4 Módulo PZEM-031

Sensor de medición eléctrico para aplicaciones en corriente continua, registra diferentes variables como corriente, voltaje, potencia y energía. Además, las variables registradas se presentan en una pantalla integrada dentro del módulo. En la Figura 26 se presenta el sensor PZEM 031.



Fig. 26: Módulo de medición DC PZEM - 031.
Fuente: (AliExpress, 2023d).

La conexión de este componente es sencilla al contar con 4 terminales señalizados, dos de estos para la fuente y los dos restantes para la carga. Sin embargo, no cuenta con terminales para realizar la comunicación con algún componente externo. Las especificaciones de este componente se presentan en la Tabla 9 que muestra a continuación.

Tabla 9

Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 031

Dispositivo	Magnitud	Valores nominales y/o características
PZEM-031	Rango de voltaje	6.5 – 100 VDC
	Rango de corriente	0 – 20 A
	Rango de potencia	0 – 2 kW
	Rango de energía	0.9999 kWh
	Precisión	1.0
	Variables de medición:	Voltaje, corriente, potencia, energía.

Nota. Fuente: (AliExpress, 2023d), modificada por el autor.

Este componente se adecua a las especificaciones técnicas del motor principal. Por otro lado, si se requiere guardar las mediciones registradas se lo debe hacer de forma manual al no contar con puertos de comunicación con otros componentes que permiten realizar un registro automatizado.

2.3.5 Módulo PZEM-015

Módulo de medición de corriente directa, utilizado para registrar en tiempo real varios parámetros eléctricos, tales como voltaje, corriente, potencia, energía resistencia e inductancia de una fuente y/o una carga (ZloTRobotik, 2023). En la Figura 27 que se presenta a continuación, se presenta el módulo PZEM 015.



Fig. 27: Módulo de medición DC PZEM – 015.
Fuente: (ZloTRobotik, 2023).

El sensor cuenta con una pantalla integrada en su estructura para visualizar las mediciones sin el uso de ningún otro componente. Sin embargo, no es posible realizar una comunicación con un microcontrolador o directamente con el computador para guardar los datos registrados. Las especificaciones de este componente se muestran en la Tabla 10 que se presenta a continuación.

Tabla 10

Especificaciones técnicas del módulo PZEM – 015

Dispositivo	Magnitud	Valores nominales y/o características
PZEM-015	Rango de voltaje	0 – 200 VDC
	Rango de corriente	0 – 50 A
	Rango de potencia	0 – 60 kW
	Rango de energía	0 – 9999 kWh
	Precisión	1.0
	Variables de medición:	Voltaje, corriente, potencia, energía.

Nota. Fuente: (AliExpress, 2023a), modificada por el autor.

Al igual que los anteriores módulos de medición descritos, se seleccionó este componente en base a las especificaciones técnicas del motor principal y los requerimientos de las pruebas a realizar con la máquina.

2.3.6 Elementos adicionales del banco de pruebas

Se realiza una descripción breve del resto de los componentes del banco de pruebas, estos elementos a diferencia de medir las variables eléctricas se encargan de diferentes puntos como la medición de los parámetros mecánicos, las protecciones para el motor, los elementos de conexión, entre otros.

Generador: Para llevar a cabo la prueba de carga de manera adecuada, se emplea un motor eléctrico con las mismas características técnicas o un generador de similares características. En el caso de utilizar el motor, es posible reconfigurar sus conexiones internas para convertirlo en un generador de excitación separada, separando la armadura del campo del motor (Chapman, 2012). La selección de esta máquina se basa en los valores nominales del motor principal, siendo de gran relevancia el valor de velocidad por ser considerablemente alto. Las especificaciones del motor y del generador se presentan en el Anexo A.

Arduino: Se utilizan dos microcontroladores tipo Arduino debido a los requerimientos de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, necesarios para lograr la comunicación con los sensores de medición AC y DC, el sensor de velocidad y las pantallas de visualización. Por lo tanto, se presentan dos modelos para la selección de estos componentes: Arduino Uno y Arduino ATmega2560. Estos modelos se diferencian principalmente por la cantidad de pines que poseen. Las especificaciones de estos modelos se presentan en el Anexo B.

Pantalla LCD con módulo I2E: Se utiliza una pantalla digital para la visualización de caracteres programados previamente en un microcontrolador (GeekFactory, 2017). Además, mediante el módulo I2C se reduce el número de pines necesarios para su conexión, lo que facilita tanto la conexión como el desarrollo del código de programación. Se emplean 2 pantallas para mostrar las variables eléctricas registradas en los sensores AC y DC. Por otro lado, para la selección de este componente se presentan dos modelos distintos, principalmente en tamaño y costo. Las especificaciones técnicas se encuentran disponibles para su revisión en el Anexo C.

Rectificador: Componente electrónico utilizado para la transformación de señales de corriente alterna en señales de corriente directa (Mohan et al., 2009). Para la alimentación del motor universal en DC es necesario un puente rectificador, que transforme la corriente alterna en corriente directa y por ende rectifique la señal. Para realizar el dimensionamiento

de este componente se debe considerar los valores de alimentación. La ecuación 1 que se presenta a continuación, representa el voltaje rms que corresponde al valor eficaz de voltaje, valor que es necesario para el cálculo del puente rectificador.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Donde:

V_{rms} : Voltaje eficaz

V_p : Voltaje pico

Despejando la ecuación para obtener el voltaje pico considerando una alimentación de 120 V en corriente alterna, que es el voltaje nominal del motor, se tiene:

$$V_p = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 120 \cdot \sqrt{2} = 169.70 \text{ V}$$

$$V_p = 169.7 \text{ V}$$

La ecuación 1 muestra el voltaje pico de la entrada del circuito, el cual varía en la salida. Para el voltaje pico generado en la salida del puente rectificador en DC representado por $V_{p_{out}}$ se utiliza la ecuación 2 que se presenta a continuación.

$$V_{p_{out}} = V_p - 1.4 \text{ V} \quad (2)$$

$$V_{p_{out}} = 169.7 - 1.4 \text{ V}$$

$$V_{p_{out}} = 168.3 \text{ V}$$

En base al voltaje de salida es posible calcular el voltaje DC rectificado, el cual se representa por V_{DC} en la salida del puente rectificador como se menciona anteriormente, utilizando la ecuación 3 se calcula V_{DC} , dando como resultado lo siguiente:

$$V_{DC} = \frac{2 V_{p_{out}}}{\pi} \quad (3)$$

$$V_{DC} = \frac{2 \cdot 168.3}{\pi} ; V_{DC} = 107.1$$

El valor de referencia de corriente para seleccionar el rectificador será el valor de corriente nominal del motor universal, debido a que este valor no debe ser excedido.

Para la selección del rectificador se deben considerar los parámetros obtenidos y los valores nominales del motor. Por lo tanto, se presentan dos modelos que se diferencian principalmente por la capacidad de corriente y capacitancia, los componentes son: el

rectificador SEP KBL-1010 y el rectificador SEP ZU-607, los cuales cumplen con los requerimientos para el desarrollo de pruebas en corriente continua con el motor universal. La tabla con las especificaciones de los componentes se encuentra disponible en el Anexo D.

Capacitor: En un circuito eléctrico este componente tiene como propósito suavizar la señal de voltaje producida en la salida del puente rectificador (Flores et al., 2014). Para el banco de pruebas este componente sirve para estabilizar la señal emitida, debido a que la señal del rectificador de forma frecuente presenta varias fluctuaciones.

Para el cálculo de la capacidad de este componente se toma en consideración algunos resultados ya obtenidos en el dimensionamiento del puente rectificador. El voltaje de rizado v_{rizado} , es la diferencia entre el voltaje pico y el voltaje rms presentado en la ecuación 4 que se muestra a continuación.

$$v_{rizado} = Vp - Vrms \quad (4)$$

Resolviendo se tiene:

$$v_{rizado} = 169.7 - 120$$

$$v_{rizado} = 49.7 V \approx 50 V$$

Con el valor obtenido del voltaje de rizado es posible realizar el cálculo de la capacidad del capacitor representado por C mediante la ecuación 5, la cual se muestra a continuación.

$$C = \frac{I}{2\pi f \cdot v_{rizado}} \quad (5)$$

Donde:

I : corriente máxima (corriente nominal del motor para este caso)

f : frecuencia nominal

Calculando se tiene:

$$C = \frac{6.5 A}{2\pi \cdot 60 Hz \cdot 50V}$$

$$C = 34.48 mF$$

Por otro lado, en caso de querer una mayor precisión para poder suavizar la curva de salida del voltaje de rizado, se estima únicamente en un 10% del voltaje eficaz para el cálculo. Para aplicar este método se utiliza la ecuación 6, dando como resultado lo siguiente:

$$v_{rizado} = 10\% Vrms \quad (6)$$

$$v_{rizado} = 10\% \cdot 120 V$$

$$v_{\text{rizado}} = 12 \text{ V}$$

Por tanto, la capacidad del capacitor para un voltaje de rizado de 12 V es:

$$C = \frac{6.5 \text{ A}}{2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 12 \text{ V}}$$
$$C = 1.44 \text{ mF}$$

Basándose en los resultados obtenidos de la capacitancia mediante los cálculos desarrollados, se selecciona un capacitor con un valor de capacidad C mayor. Se presentan dos modelos que cumplen con los requerimientos: un capacitor de 2200 μF y un capacitor de 1000 μF . Estos modelos permiten reducir aún más el voltaje de rizado, generando una señal más continua y estable, lo que se adecúa a las pruebas con el motor universal. Las especificaciones completas de los componentes se encuentran disponibles en tabla presentada en el Anexo E.

Fuentes de alimentación: La alimentación del motor universal es un punto importante para tomar en cuenta, debido el motor evaluado puede operar en AC y DC. Estos instrumentos son elementos extras al módulo, proporcionados por la Universidad Técnica del Norte con fines de experimentación.

- **Fuente de voltaje DC:** Fuente regulable de voltaje DC, con un rango máximo de voltaje de 30 V y de corriente de 30 A, utilizada para las pruebas de generación alimentando el campo del generador, el cual cuenta con un límite de corriente de 6 A.
- **Fuente de voltaje AC (Variac):** Modifica los valores de tensión según sean los requerimientos en los diferentes ensayos. Sus valores nominales se establecen en los 150 V y 10 A. Dentro del módulo de pruebas se encarga de energizar al motor, logrando un mayor grado de precisión al ser una fuente variable. Se utiliza para la alimentación en AC de forma directa y en DC mediante un circuito rectificador.

Carga: Una carga es cualquier componente eléctrico o electrónico que consume una potencia determinada de un circuito. Para la selección de este componente, se presentan dos opciones: una carga de 700 W tipo calefactora y una carga de 700 W tipo luminosa. Además, se varía la corriente de campo del generador para modificar los valores de carga a los que se somete el motor por los efectos mecánicos producidos al aumentar o disminuir la corriente de campo. Las especificaciones de estos componentes se pueden revisar en el Anexo F.

Protecciones: Las protecciones eléctricas son fundamentales dentro de cualquier circuito debido a que mediante estos elementos es posible evitar daños a los equipos y usuarios ante fallas de operación de un motor (WEG, 2023). Para las protecciones del circuito se utiliza un disyuntor termomagnético en conjunto con un fusible con el fin de proteger el motor y el resto de los componentes de sobrecargas y cortocircuitos. Para el cálculo de la capacidad de protección se utiliza la ecuación 7 que se presenta a continuación.

$$Cp = I_{nominal} \times Fs \quad (7)$$

Donde:

Cp : capacidad de protección.

$I_{nominal}$: corriente nominal.

Fs : factor de servicio constante = 1.15.

Se realiza el cálculo de las protecciones en base a los valores nominales del motor, dando como resultado lo siguiente:

$$Cp = 6.5 \cdot 1.15$$

$$Cp = 7.475 A \approx 7.5 A$$

En base al resultado obtenido se seleccionó el disyuntor termomagnético y el fusible, para lo cual, se presentan dos modelos tanto del disyuntor como del fusible que se diferencian principalmente por los valores de corriente y voltaje, y el costo económico. Las especificaciones de las protecciones se presentan en el Anexo G.

Tablero: Se utiliza un tablero eléctrico con el propósito de realizar la interconexión de los componentes de manera ordenada tanto dentro como fuera de este, lo que contribuye a una mayor seguridad tanto para los elementos como para los operadores. Esto permite aislar los circuitos de alimentación y los sensores en el interior del tablero, estableciendo conexiones exclusivamente para las pruebas en la parte exterior del mismo. Por lo tanto, la selección de este componente se realiza en base al espacio necesario para realizar la conexión de todos los elementos del banco de pruebas que formen parte del control y monitoreo de las máquinas.

Selector 3 posiciones: El selector de tres posiciones posibilita alterar la posición de un circuito de acuerdo con los requisitos específicos, Su uso es habitual para segmentar circuitos con diferentes niveles de voltaje o diferentes configuraciones de alimentación (Gonzaga & Rodríguez, 2023). Dentro del marco del banco de pruebas, su función es separar el circuito

de corriente directa del circuito de corriente alterna utilizado para la alimentar el motor. Se presentan dos modelos diferentes, cada uno con sus respectivas especificaciones para ser considerados en el proceso de selección. Las especificaciones de estos modelos están disponibles en el Anexo H.

Luces piloto: La función principal de las luces pilotos es la señalización, permitiendo que el operario interprete las indicaciones asignadas, como la activación o desactivación de un circuito específico, la separación del tipo de alimentación, el progreso de diferentes procesos, entre otras aplicaciones. Dentro del módulo, estas luces indicarán el tipo de alimentación en uso. Se presentan diferentes modelos de luces piloto que se diferencian principalmente por su marca y coste económico en el Anexo I.

Cables de conexión: Facilitan la conexión entre los distintos elementos del circuito al permitir conducción de corriente a través de los hilos conductores. En la selección de este componente, se toman en cuenta los valores nominales del motor como punto de partida. Además, se utilizan guías y tablas diseñadas bajo los formatos ANSI e IEEE. Dentro de estas referencias, se identifica un calibre ideal de 16 AWG (TFF), con valores de operación de 600 V, 60° C, junto con una corriente de 10 A. Las opciones disponibles incluyen las marcas Centelsa y Electrocables.

Sensor de efecto hall: Se emplea un sensor de efecto hall para lograr la medición de la velocidad a través del efecto magnético generado por un imán de neodimio. Este sensor se compone de un semiconductor, frecuentemente de silicio, que genera una corriente específica. Al aplicar un campo magnético en perpendicular con el sensor, se produce una diferencia de potencial eléctrico. Esta diferencia permite la lectura de la posición, velocidad, corriente, entre otras variables, de un objeto determinado. Dentro del banco de pruebas se utiliza este sensor para medir la velocidad en rpm. Para la selección de este componente, se presentan dos modelos que se distinguen por el número de polos, la capacidad de detección de proximidad y el costo económico. Las especificaciones de estos modelos se presentan en el Anexo J.

El cálculo de los componentes es de gran relevancia para el diseño y montaje del módulo, ya que mediante los resultados obtenidos se realiza las simulaciones para verificar el funcionamiento del motor y posteriormente realizar la adquisición de los componentes con los cuales se realizan las distintas pruebas prácticas. Los materiales seleccionados son:

- **Sensor AC:** PZEM 004t
- **Sensor DC:** PZEM 015 y PZEM 017
- **Generador:** Generador de excitación separada (XC9525)
- **Arduino:** ATmega2560
- **Pantalla:** Pantalla LCD con I2C (16x2)
- **Rectificador:** SEP KBL-1010
- **Capacitor:** JCCON-2200 uF
- **Carga:** Calefactora
- **Disyuntor:** EBASEE C10 (10 A)
- **Fusible:** EATON (10 A)
- **Tablero:** Gabinete metálico doble fondo (40x30x15 cm)
- **Selector 3 posiciones:** ZB2-BE101 (2 polos)
- **Luces piloto:** CAMSCO (verde y amarilla)
- **Cables de conexión:** 16 AWG TFF (Centelsa)
- **Sensor de efecto hall:** LM-393 (4 pines)

Los materiales presentados fueron seleccionados por adecuarse de mejor forma a las especificaciones del motor universal y por el aspecto económico. Además, se realiza un nuevo diseño del banco de pruebas en el que se incluyen los materiales seleccionados. Los cuales permiten evaluar el motor universal en la parte eléctrica y mecánica de forma eficaz en el desarrollo de los ensayos prácticos. En la Figura 28 se presenta el diseño tentativo para el banco de pruebas real.

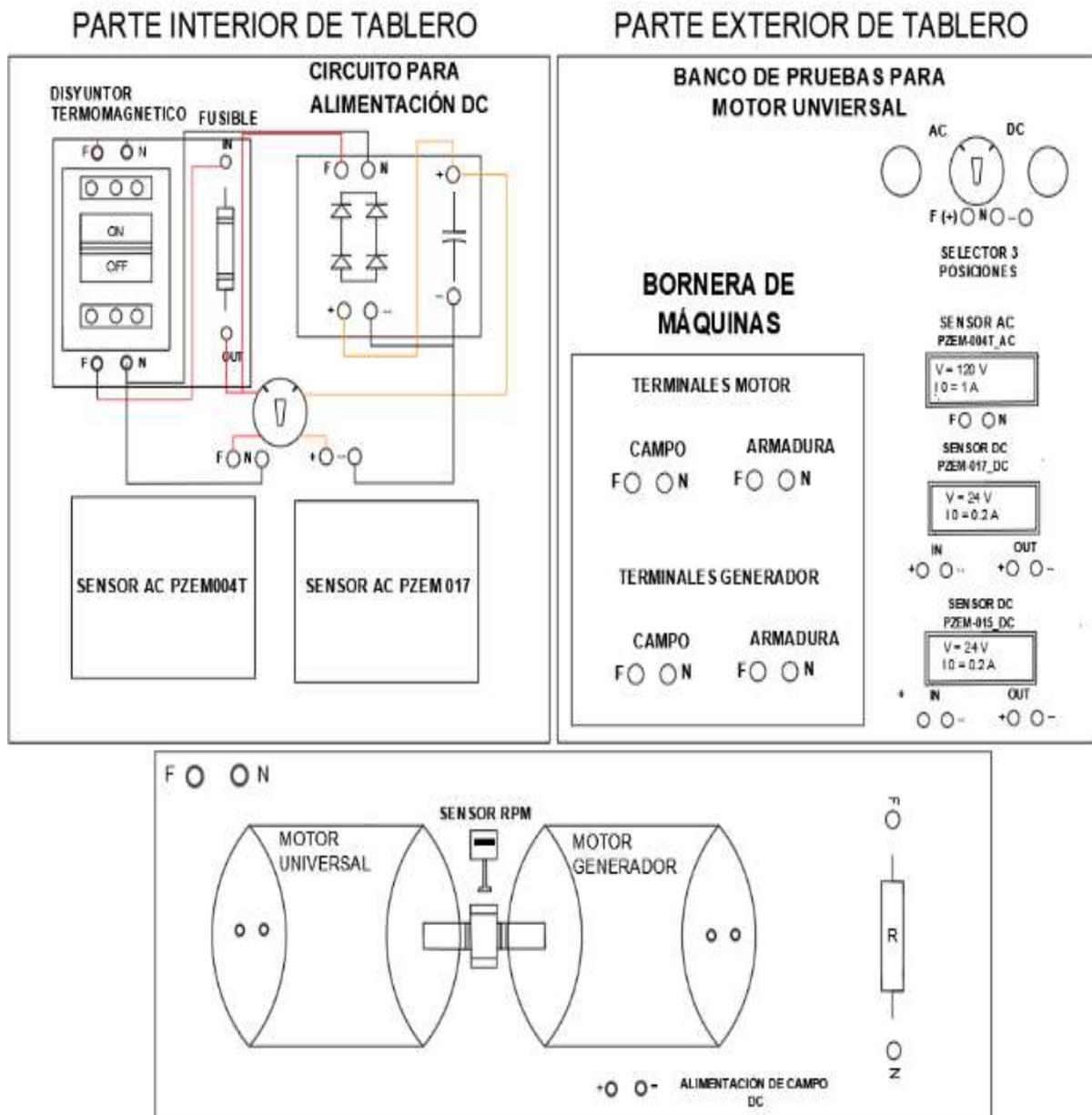
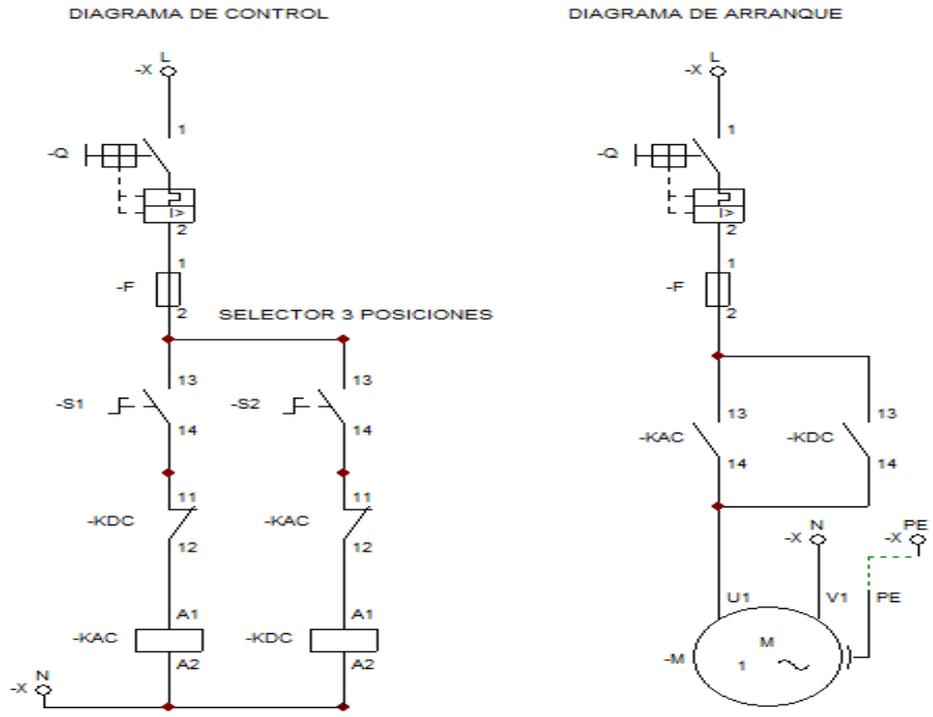
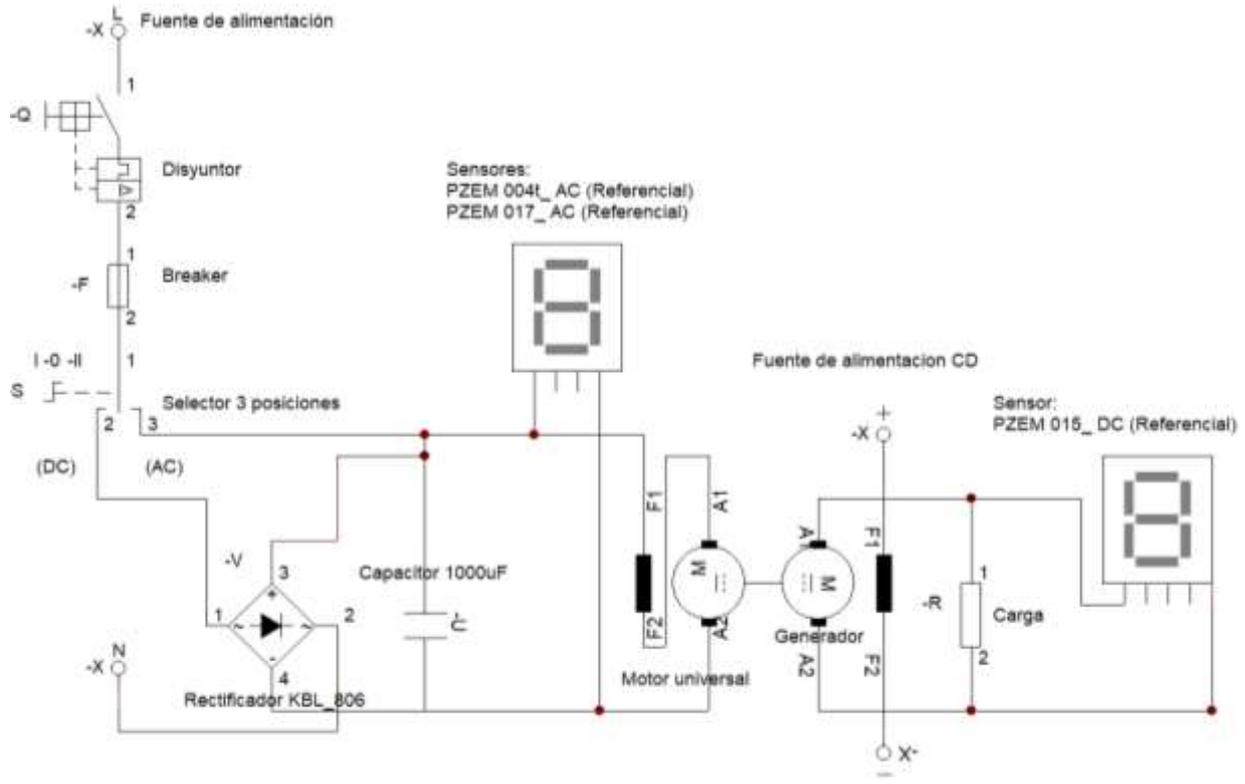


Fig. 28: Diseño final del módulo de pruebas.
Fuente: autor.

Con los componentes con los que se estructura el banco de pruebas definidos, el módulo de pruebas diseñado con dichos componentes, se realiza el diagrama de control, el de arranque y un diagrama de conexión general del motor. El esquema eléctrico se muestra en la Figura 29, donde se presenta a) el diagrama control y arranque, y b) el diagrama de conexión general, en el cual algunos componentes están ubicados únicamente como referencia.



a)



b)

Fig. 29: Esquema eléctrico del módulo de pruebas a) control y arranque y b) esquema general de conexión. Fuente: autor.

Tanto el diagrama de control y arranque como el de conexión general permiten realizar la conexión de los componentes del banco de pruebas de forma orientada. Además, sirven de referencia para realizar la conexión en los simuladores utilizados para evaluar al motor universal.

Con los diagramas de conexión desarrollados y los materiales seleccionados y dimensionados de forma adecuada, se procede a realizar las simulaciones del motor universal, aplicando los valores nominales del motor y de los diferentes componentes requeridos para evaluar el motor en las simulaciones que se realicen en los softwares utilizados.

2.4 Simulaciones del motor universal

Se realiza simulaciones de funcionamiento del motor universal bajo el método clásico, el cual se enfoca en la obtención de varios parámetros del motor en circuito abierto, cortocircuito y con carga. Las simulaciones incluyen el desarrollo del circuito, la obtención de variables eléctricas, la velocidad y curvas características de la máquina. Estas simulaciones se realizan mediante el software Matlab con la herramienta Simulink, lo que permite interactuar sobre el funcionamiento, las características y la obtención de parámetros de un motor universal. Además, como complemento a las curvas obtenidas se simula las formas de onda de voltaje e intensidad del motor. Por otro lado, se realiza simulaciones en el software FEMM para analizar el comportamiento del motor en cuanto a flujo producido.

Cabe aclarar que los resultados de simulación pueden variar de alguna forma con los datos obtenidos en experimentación, por las condiciones reales que presenta un entorno experimental, como pérdidas por fricción y rozamiento, alimentación, entre otros puntos. En comparación con las condiciones ideales de los simuladores. Las pruebas que se realizan mediante los simuladores son:

- Prueba DC del motor universal
- Prueba de circuito abierto CA (Vacío)
- Prueba de cortocircuito CC
- Prueba de carga (AC y DC)
- Curvas de corriente y voltaje
- Simulación FEMM (Densidad de flujo)

2.4.1 Prueba DC de motor universal

Se realiza la prueba DC con el motor universal para obtener la resistencia de la máquina y conocer su corriente de arranque con diferentes niveles de tensión. Para llevar a cabo esta prueba, se conecta el motor a una fuente DC y se registran los valores de voltaje e intensidad de corriente mediante un multímetro. En la Figura 30 se muestra el resultado de una de las mediciones registradas, en la que se presenta a) voltaje y b) corriente.



a)

b)

Fig. 30: Mediciones de prueba DC en motor universal a) voltaje y b) corriente.
Fuente: autor.

En base a los valores registrados y aplicando la Ley de Ohm, con la ayuda de la ecuación 8 que se presenta a continuación, se calcula la resistencia del motor.

$$IDC = \frac{VDC}{R} \quad (8)$$

Despejando la variable de la resistencia se tiene:

$$R = \frac{VDC}{IDC} = \frac{3.73 V}{1.15 A} = 3.24 \Omega$$

$$R = 3.24 \Omega$$

Con la toma de varios datos con diferentes niveles de voltaje (V_{motor}) y corriente (I_{motor}), se calcula la resistencia equivalente del motor aplicando la respectiva ecuación. En la Tabla 11 se muestran los datos registrados y calculados para obtener la resistencia equivalente del motor.

Tabla 11

Mediciones registradas de la prueba DC en motor universal

$V_{motor}(V)$	$I_{motor}(A)$	$R(\Omega)$
2,45	0,73	3,36
3,73	1,15	3,24
5,18	1,46	3,55
7,03	1,75	4,02
8,92	2,04	4,37
10,87	2,26	4,81
$R_a + R_f$		3,89

Nota. Valores registrados durante la prueba DC para obtener la resistencia del motor.

Se considera que la resistencia equivalente del motor es la suma de la resistencia de la armadura y la resistencia del campo del motor, debido a que estos componentes se encuentran conectados en serie. Otro de los parámetros fundamentales en el estudio del funcionamiento del motor, es la inductancia (L), la cual fue medida utilizando un multímetro LCR. En la Figura 31 presentada a continuación, se muestra el registro de la reactancia.



Fig. 31: Mediciones de prueba DC de la inductancia del motor universal.
Fuente: autor.

Con el fin de verificar que los resultados medidos y calculados son correctos, se realiza una simulación utilizando la herramienta de un motor universal incluido en el software Simulink. En la Figura 32 se presenta el circuito desarrollado para la simulación, en la que se ingresan los valores obtenidos.

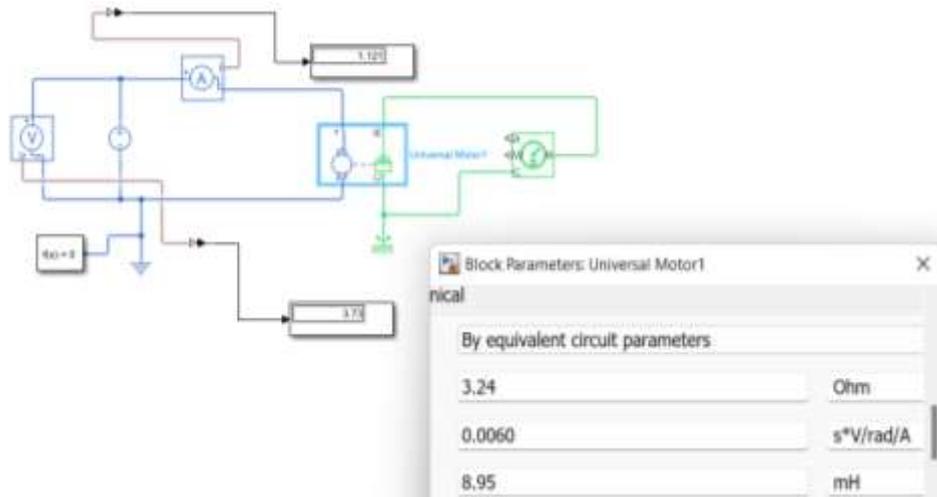


Fig.32: Simulación de prueba DC motor universal.
Fuente: autor.

Mediante las simulaciones es posible comprobar que los resultados registrados en la prueba DC son aproximados a los obtenidos en el software. Además, el software solicita ingresar la constante de fuerza contraelectromotriz para realizar la simulación de forma adecuada. Por ende, esta constante se calcula utilizando la ecuación 9 que se presenta a continuación, empleando los valores nominales del motor.

$$E_k = \frac{V_{nominal}}{I_{nominal} \cdot \omega_{nominal}} \quad (9)$$

Donde

E_k : constante de fuerza contraelectromotriz

$\omega_{nominal}$: velocidad nominal del motor universal

Calculando se tiene:

$$E_{fem} = \frac{120 V}{6.5 A \times 29000 \frac{rev}{min} \times \left(\frac{1min}{60 s}\right) \times \left(\frac{2\pi rad}{1 rev}\right)}$$

$$E_{fem} = 0.0060 V/rad$$

De esta forma se obtuvo el valor ingresado en la simulación para determinar la resistencia del motor universal, corroborando así que los resultados de simulación guardan similitud con los resultados obtenidos de forma práctica.

Por otro lado, cuando el motor universal es alimentado con corriente alterna, interviene la reactancia (X_L), provocando que una parte significativa del voltaje de entrada caiga por los terminales. Por esta razón, es necesario calcular este parámetro, que se resuelve utilizando la ecuación 10 mostrada a continuación:

$$X_L = 2\pi f \cdot L \quad (10)$$

Resolviendo se tiene:

$$X_L = 2\pi \cdot 60\text{Hz} \cdot (8,95\text{mH})$$

$$X_L = 3,37 \Omega$$

El valor de reactancia obtenido permitirá calcular los valores reales del motor en AC, aplicando las ecuaciones adecuadas para encontrar la caída de voltaje producida por este parámetro, afectando en consecuencia al resto de componentes del motor.

2.4.2 Simulación de prueba de circuito abierto (CA)

La prueba de circuito abierto o de vacío se realiza con el fin de obtener la curva de magnetización del motor, la cual se considera como una herramienta fundamental para comprender y analizar las características magnéticas de un motor universal, como la excitación del campo y las características del flujo magnético. La prueba consiste en hacer girar al motor a una velocidad constante cercana a su valor nominal a través de un circuito externo, mientras se mide el voltaje en los terminales de la armadura a medida que se inyecta corriente en el campo de forma gradual, hasta alcanzar su corriente nominal. Los datos utilizados para la simulación son:

- Potencia: 1500 W
- Número de polos: 2
- Frecuencia: 60 Hz
- Voltaje: 120 V
- Corriente: 6 A.
- Velocidad: 29000 rpm

Se prevé que los resultados obtenidos varíen con los del motor real debido a las condiciones que se presentan en un circuito real. Sin embargo, las características y resultados del motor universal deben ser similares a los del motor utilizado en las pruebas. La simulación de CA del motor realizada con los valores nominales del motor se puede observar en la Figura 33 que se presenta a continuación.

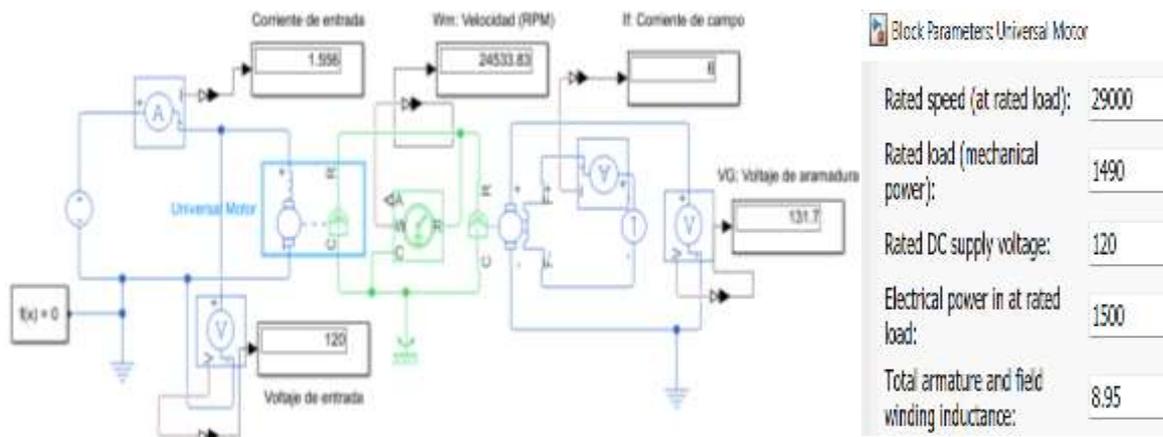


Fig. 33: Simulación de prueba de circuito abierto CA.
Fuente: autor.

La corriente de campo se incrementa de forma gradual cada 0.5 A, hasta alcanzar su valor nominal. Además, se utilizó un motor universal con las mismas características como componente para producir el movimiento. Debido a que el motor cuenta con una alta velocidad, se consideró el método más adecuado para el ensayo. Por otro lado, el acople de motores genera un torque natural en la máquina, lo cual reduce su velocidad; esto se puede apreciar de mejor forma en las pruebas reales con la máquina. Los resultados obtenidos de la simulación de la prueba de CA se pueden observar en la Tabla 12 que se presenta a continuación.

Tabla 12

Mediciones registradas de la simulación de la prueba de CA

$V_{in} (V)$	Wm_{rpm}	$I_{f\ campo} (A)$	$V_{generado} (V)$
120	24530	0,00	0,00
120	24530	0,50	10,98
120	24530	1,00	21,96
120	24530	1,50	32,94
120	24530	2,00	43,92
120	24530	2,50	54,89
120	24530	3,00	65,87
120	24530	3,50	76,85
120	24530	4,00	87,83
120	24530	4,50	98,81
120	24530	5,00	109,80
120	24530	5,50	120,76
120	24530	6,00	131,70

Con los resultados obtenidos es posible formar la curva de magnetización del motor, la cual servirá de guía para realizar diferentes cálculos en otras pruebas a las que se somete la máquina. La curva característica de magnetización, formada en base a los resultados de simulación se puede apreciar en la Figura 34.

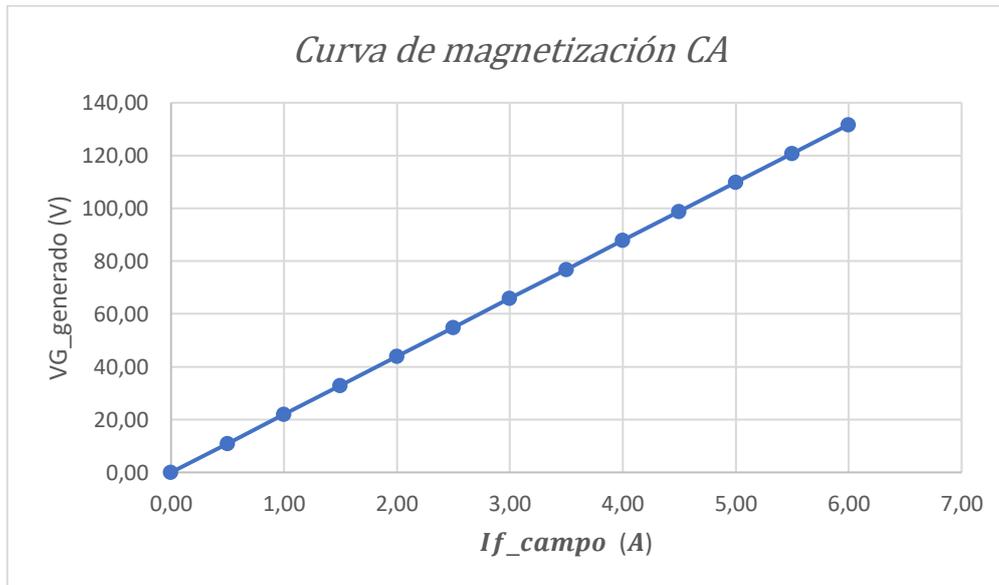


Fig.34: Curva de magnetización CA motor universal (Simulación).
Fuente: autor.

La curva real de circuito abierto de un motor universal tiende a tener una forma curva, principalmente en los valores cercanos a los puntos de saturación del motor. Sin embargo, el simulador no considera los factores que intervienen en el funcionamiento real de la máquina, como pérdidas mecánicas por fricción y rozamiento, la carga natural del motor y el generador, entre otros factores. Por lo cual, se puede realizar una comparativa entre los resultados de simulación con los medidos en los ensayos prácticos con el motor.

2.4.3 Simulación de prueba de cortocircuito (CC)

La prueba de cortocircuito se realiza con el objetivo de adquirir información sobre las potencialidades de corriente del motor universal. Para llevar a cabo esta prueba, se utiliza el mismo componente que la prueba de CA para producir el movimiento del motor. Además, se eleva gradualmente la corriente en el campo mientras se registra la corriente de armadura, la cual se conecta en cortocircuito uniendo sus terminales. La simulación de la prueba de CC se presenta en la Figura 35. Esta se realiza con los mismos datos nominales que la prueba anterior, ya que se trata del mismo motor, con la única diferencia en la conexión de las terminales del motor.

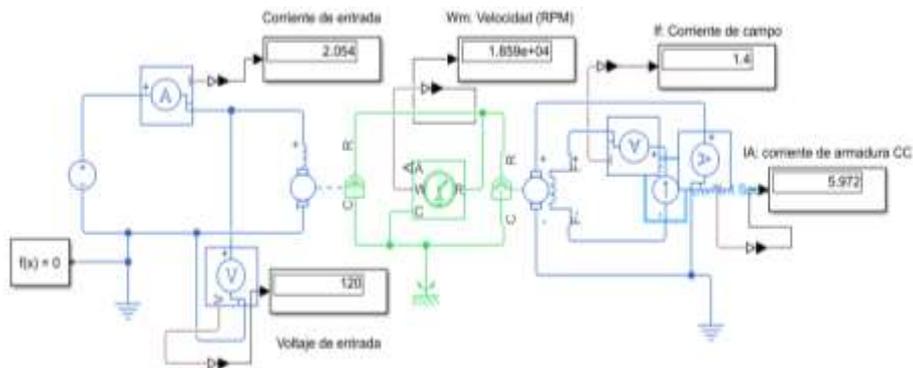


Fig.35: Simulación de prueba de cortocircuito CC.
Fuente: autor.

A diferencia de la prueba de CA, se puede notar que en esta prueba la velocidad se reduce en una cantidad determinada cada vez que se eleva la corriente de campo, y su vez, se eleva de forma más rápida la corriente de armadura. Esto se debe a que se presenta un flujo opuesto de corriente al flujo normal, lo que produce un ligero freno que se eleva a medida que se aumenta la corriente de campo. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 13 que se muestra a continuación.

Tabla 13

Mediciones registradas de la simulación de la prueba de CC

$V_{in} (V)$	Wm_{rpm}	$I_{f\ campo} (A)$	$I_{armadura\ CC} (A)$
120	24530	0,00	0,00
120	24320	0,20	1,12
120	23720	0,40	2,18
120	22850	0,60	3,15
120	21810	0,80	4,00
120	20710	1,00	4,57
120	19620	1,20	5,40
120	18590	1,40	5,97

Por otro lado, en esta prueba se debe tener mucha precisión en el suministro de corriente de campo, debido a que, por el cortocircuito producido en la armadura, la corriente de armadura se eleva rápidamente en comparación con su funcionamiento normal. Mediante los datos registrados se formó la curva de cortocircuito presentada en la Figura 36 que se muestra a continuación.

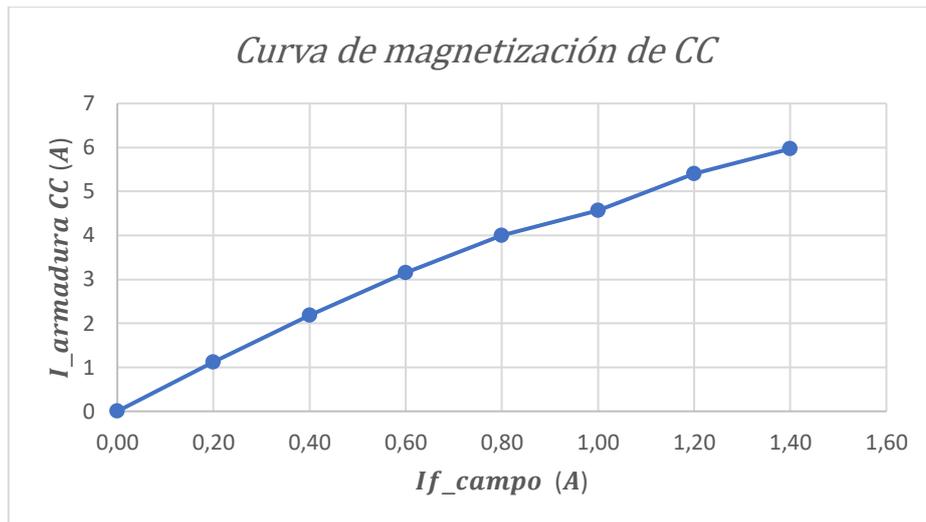


Fig.36: Curva de cortocircuito CC motor universal (Simulación).
Fuente: autor.

Esta curva frecuentemente se presenta en línea recta. Por tanto, si se considera la curva obtenida como resultado de la simulación, esta se desarrolla de forma lineal, como indica la teoría, con algunas variaciones que se producen por condiciones mecánicas principalmente. Además, con las pruebas de CC y CA, es posible formar la curva de magnetización completa y hacer una comparativa con los datos registrados en las pruebas reales con la máquina.

2.4.4 Simulación de prueba con carga en DC y AC

La prueba de carga de un motor universal se realiza con el fin de conocer los diferentes parámetros eléctricos de la máquina, tales como voltaje, corriente, velocidad, torque, entre otros, cuando el motor es sometido a una carga o a variaciones de carga. Para emular una carga eléctrica, se une el motor universal con el generador mediante un mecanismo de acople y se conecta una resistencia en la salida del generador, la resistencia cuenta con un valor de 32Ω y una potencia de 700 W , correspondiente a los valores de la carga utilizada en las pruebas reales. Para variar la carga, se aumenta gradualmente el valor de corriente de campo del generador.

Esta prueba se realiza tanto en corriente directa como en corriente alterna, con el fin de realizar una comparativa de resultados. Se inicia con la prueba en corriente directa con una fuente DC con un voltaje nominal de 120 V , dando como resultado el circuito mostrado en la Figura 37, donde también se presentan los datos del motor y de la carga.

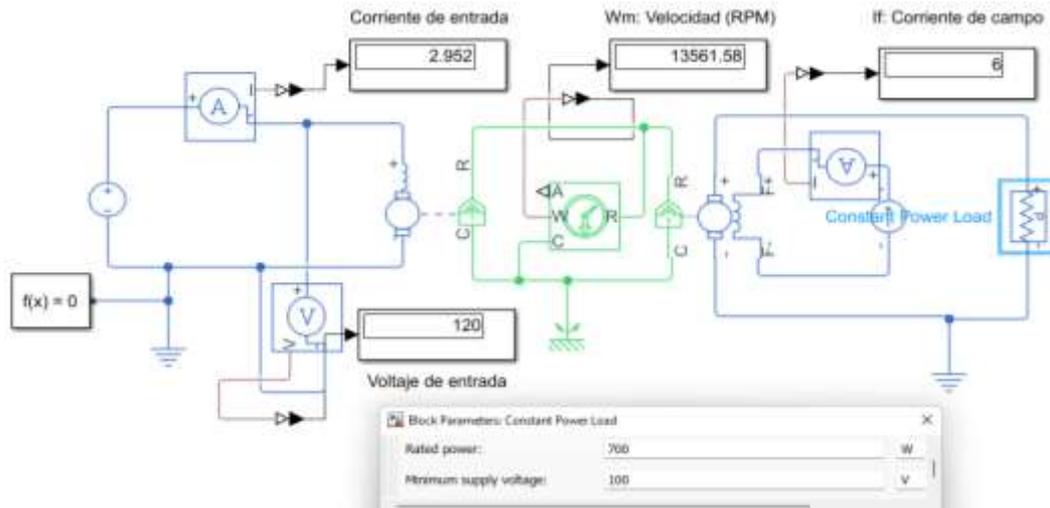


Fig.37: Simulación de prueba con carga en DC.
Fuente: autor.

La corriente de campo se varía gradualmente con intervalos de 0.5 A, desde 0 a 6 A, que corresponde al valor nominal del generador. Con los datos registrados, se procede a realizar los cálculos de voltaje de armadura E_A , la velocidad W_m en rad/s y el torque inducido T_{ind} . Para el cálculo de E_A , se sigue la ecuación 11 mostrada a continuación

$$E_A = V_T - I_A \cdot (R_a + R_f) \quad (11)$$

Donde:

V_T : voltaje en los terminales

I_A : corriente de armadura del motor

$R_a + R_f$: resistencia interna del motor

Este valor corresponde al valor de la caída de tensión producida a través de la resistencia del motor. Para la conversión de unidades de la velocidad de rpm a rad/s se sigue la ecuación 12 que se presenta a continuación

$$W_m = \frac{rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1 rev} * \frac{min}{60 s} = \frac{rad}{s} \quad (12)$$

Una vez calculado E_A y realizada la conversión de unidades de velocidad, es posible calcular el par inducido T_{ind} del motor siguiendo la ecuación 13, misma que se declara a continuación:

$$T_{ind} = \frac{E_A \cdot I_A}{W_m} \quad (13)$$

Los resultados obtenidos de las simulaciones y los cálculos realizados para poder formar la curva par velocidad, se ordenan en la Tabla 14 que se presenta a continuación.

Tabla 14

Mediciones registradas de la simulación de la prueba de carga DC

V_T (V)	$I_{f_{gen}}$ (A)	Wm_{rpm}	I_A (A)	$Wm_{rad/s}$	E_A (V)	T_{ind} (Nm)
120,00	1,62	24918,00	0,00	2609,41	113,69	0,07
120,00	1,64	24628,00	0,50	2579,04	113,62	0,07
120,00	1,69	23833,00	1,00	2495,79	113,41	0,08
120,00	1,77	22705,00	1,50	2377,66	113,08	0,08
120,00	1,88	21427,00	2,00	2243,83	112,67	0,09
120,00	2,00	20134,00	2,50	2108,43	112,20	0,11
120,00	2,13	18901,00	3,00	1979,31	111,70	0,12
120,00	2,26	17765,00	3,50	1860,35	111,18	0,14
120,00	2,40	16735,00	4,00	1752,49	110,64	0,15
120,00	2,54	15609,00	4,50	1634,57	110,09	0,17
120,00	2,69	14978,00	5,00	1568,49	109,52	0,19
120,00	2,82	14232,00	5,50	1490,37	109,00	0,21
120,00	3,00	13561,00	6,00	1420,10	108,30	0,23

Con los datos tabulados y ordenados, se procede a formar la curva par-velocidad en DC, tomando como referencia los valores de velocidad en rad/s y el par inducido del motor, dando como resultado la curva presentada en la Figura 38 que se muestra a continuación.

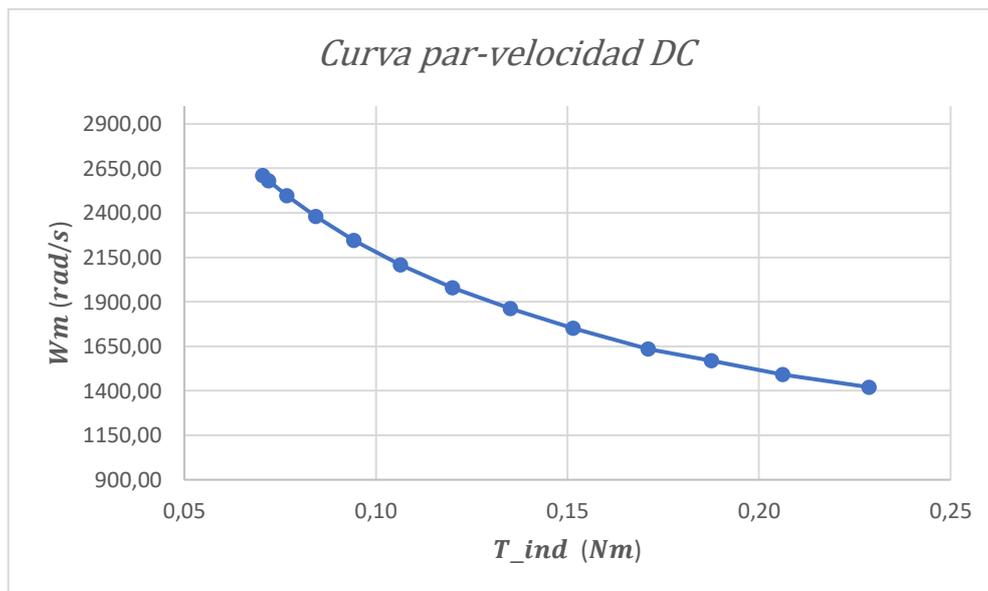


Fig.38: Curva par-velocidad del motor de simulación en AC.
Fuente: autor.

La curva mostrada guarda relación con la teoría, la cual indica que en un motor universal mientras mayor es el torque, menor será la velocidad y viceversa. Esto se aplica para los dos tipos de alimentación.

Por otro lado, para la prueba de carga con corriente alterna, se utiliza los mismos valores en el motor, generador, carga y el resto de los componentes, con la excepción de la fuente y algunos elementos adicionales utilizados para medir de forma correcta los parámetros en corriente alterna. En la Figura 39 se presenta el circuito con los respectivos elementos y medidas registradas.

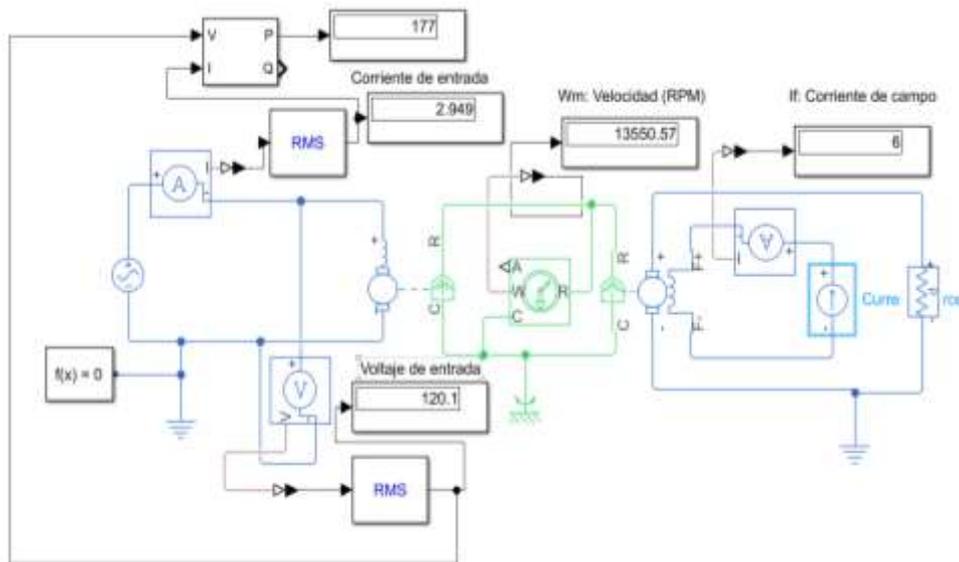


Fig.39: Simulación de prueba con carga en AC.
Fuente: autor.

Se realiza la variación de corriente de campo del generador y se registran los diferentes parámetros eléctricos. Además, se debe considerar que en corriente alterna interviene un parámetro extra conocido como reactancia XL , la cual afecta en el funcionamiento del motor provocando una mayor caída de tensión que en DC. Por lo tanto, para el cálculo de E_A , se adapta la ecuación 11 considerando el valor de reactancia, generando la ecuación 14 mostrada a continuación,

$$E_A = VT - I_A \cdot (Ra + Rf + XL) \quad (14)$$

Al considerar la reactancia, se puede notar que hay una mayor caída de tensión de VT . Por otro lado, para el cálculo de la velocidad en rad/s y el par inducido, se utiliza las mismas ecuaciones que en la simulación en DC. Una vez terminado el registro de mediciones y haber desarrollado los cálculos correspondientes, se ordenan los resultados en la Tabla 15 que se presenta a continuación.

Tabla 15

Mediciones registradas de la simulación de la prueba de carga AC

V_T (V)	$I_{f_{gen}}$ (A)	Wm_{rpm}	I_A (A)	$Wm_{rad/s}$	E_A (V)	T_{ind} (Nm)
120,00	1,62	24899,00	0,00	2607,42	108,26	0,07
120,00	1,64	24609,00	0,50	2577,05	108,12	0,07
120,00	1,69	23813,00	1,00	2493,69	107,73	0,07
120,00	1,77	22684,00	1,50	2375,46	107,12	0,08
120,00	1,88	21410,00	2,00	2242,05	106,37	0,09
120,00	2,00	20117,00	2,50	2106,65	105,50	0,10
120,00	2,13	18884,00	3,00	1977,53	104,57	0,11
120,00	2,26	17752,00	3,50	1858,99	103,59	0,13
120,00	2,40	16722,00	4,00	1751,12	102,60	0,14
120,00	2,54	15795,00	4,50	1654,05	101,59	0,16
120,00	2,67	14964,00	5,00	1567,03	100,59	0,17
120,00	2,82	14215,00	5,50	1488,59	99,53	0,19
120,00	2,95	13550,00	6,00	1418,95	98,59	0,20

Una vez obtenida la tabla resumen con los resultados de las simulaciones y los datos calculados, es posible formar la curva par-velocidad en AC, con las variaciones en los puntos registrados, dando como resultado la curva mostrada en la Figura 40 que se presenta continuación.

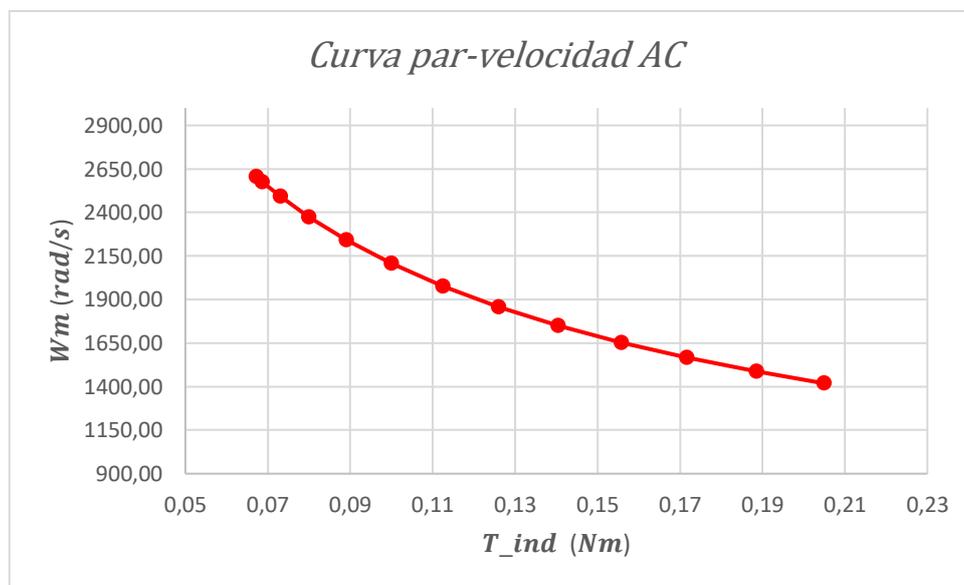


Fig.40: Curva par-velocidad del motor de simulación en AC.
Fuente: autor.

Se puede notar que, al igual que en corriente directa, la curva par-velocidad del motor se produce de forma decreciente, lo que indica que mientras mayor sea el torque, menor es la velocidad del motor.

Con el fin de realizar una comparativa de resultados para verificar las diferencias en la capacidad de generación de par del motor, se realiza una gráfica que incluye las dos curvas características obtenidas. El resultado de la comparativa se presenta en la Figura 41, en la que se presentan las curvas par-velocidad del motor alimentado por diferentes fuentes.

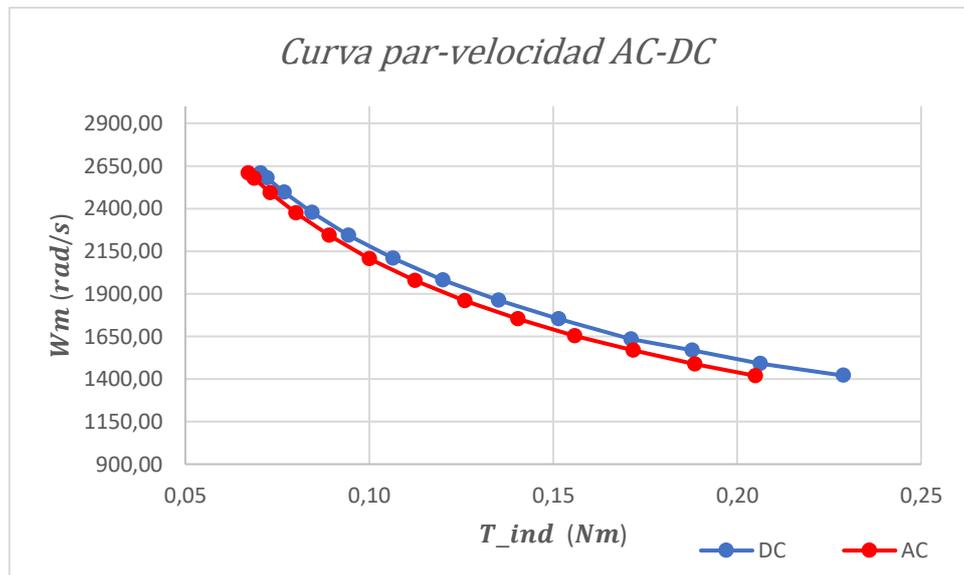
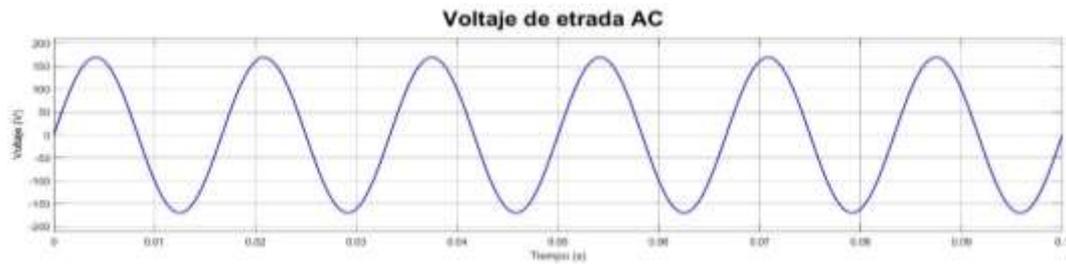


Fig.41: Curvas características del motor de las simulaciones en AC y DC.
Fuente: autor.

La curva par-velocidad en DC se encuentra por encima de la curva producida en AC, lo que indica un mayor rendimiento y mayor capacidad de producir par en corriente continua, aunque con diferencias pequeñas. Por otro lado, con el fin de verificar las simulaciones realizadas, se llevan a cabo pruebas prácticas con la máquina en el siguiente capítulo para comprobar los datos reales del motor.

2.4.5 Simulación de curvas mediante osciloscopio

Las señales de las variables eléctricas permiten entender y verificar de mejor forma como se producen las curvas de voltaje y corriente. Por lo cual, se considera necesario obtener las formas de onda de los parámetros mencionados en los diferentes circuitos simulados, aplicando de forma efectiva la medición con el osciloscopio. En la Figura 42 se presenta las curvas del motor con alimentado en AC, de a) voltaje y b) corriente,



a)



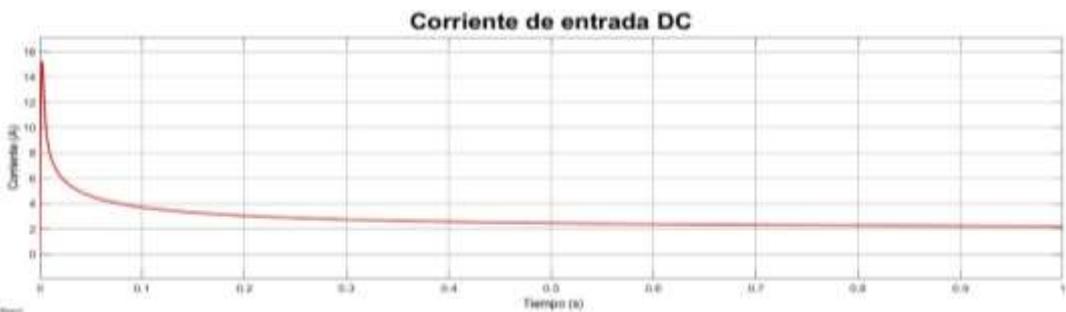
b)

Fig.42: Formas de onda de a) voltaje y b) corriente en AC.
Fuente: autor.

Las ondas obtenidas con alimentación en corriente alterna se presentan de forma sinusoidal tanto para el voltaje como para la corriente en la entrada de la máquina, lo que es común con esta alimentación. Además, como todo motor universal, en el arranque se sufre una elevación de corriente para luego estabilizarse en un valor determinado. Por otro lado, para la alimentación del motor en DC, se obtienen las mismas formas de onda que en AC, las cuales se visualizan en la Figura 43, en la que se presenta: a) voltaje y b) corriente.



a)



b)

Fig.43: Formas de onda de a) voltaje y b) corriente en DC.
Fuente: autor.

A diferencia de las señales de corriente alterna, las señales de corriente continua, tanto de corriente como de voltaje, se presentan como una línea recta, donde el voltaje permanece constante durante la operación de la máquina. Sin embargo, al igual que en corriente alterna, la corriente de entrada del motor cuenta con un pico de arranque. Las curvas obtenidas se verificarán en el siguiente capítulo con la ayuda de un osciloscopio. Cabe mencionar que se obtienen las curvas únicamente del motor caracterizado, en el cual se centra el estudio.

2.4.6 Simulación FEMM

Se realiza simulaciones en el software FEMM diseñado como método de elementos finitos, con el fin de observar el comportamiento del flujo magnético y el flujo de corriente de la máquina. Además, se toman en cuenta las mediciones reales del motor para el diseño inicial y se utiliza una guía de las mediciones presentadas en el datasheet del motor. El diseño de la máquina con algunas de las medidas del motor se presenta en la Figura 44.

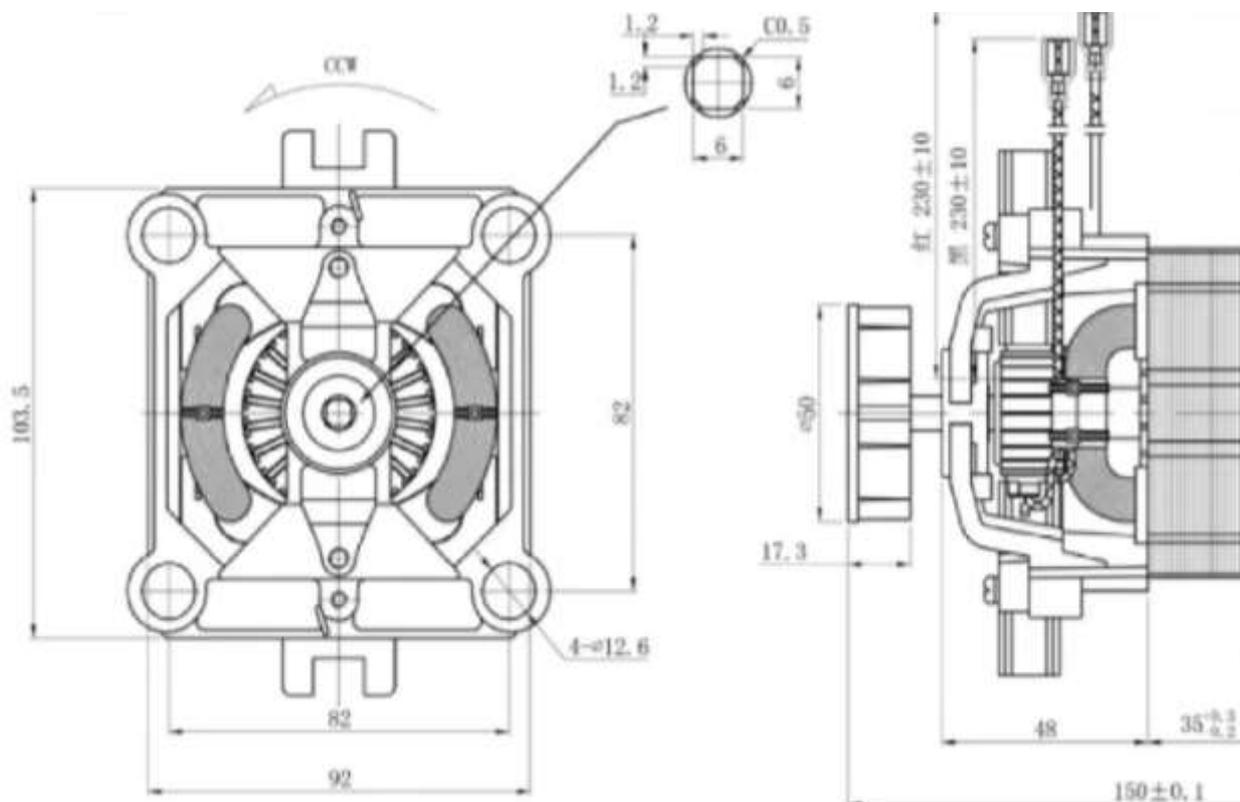


Fig.44: Diseño y medidas estándares de motor universal.
Fuente: (MADE, 2023).

Las mediciones presentadas se realizan en milímetros. Además, es necesario realizar mediciones de otros componentes internos para los cuales no se brindan especificaciones, como el diámetro del rotor, diámetro de núcleo, tamaño de ranuras del rotor y otras medidas de las partes internas de la máquina. Los datos registrados y algunos parámetros del motor consultados se pueden revisar en la Tabla 16 que se presenta a continuación.

Tabla 16*Medidas y especificaciones de motor universal*

Parámetro	Medida registrada
Número de fases (Nf)	1
Número de ranuras (Nr)	22
Polos (p)	2
Corriente nominal (I_{nom})	5 A
Voltaje nominal (v_{nom})	120 / 240 V
Densidad de flujo magnético	1.2 T
Largo de rotor	68 mm
Largo estator	25 mm
Diámetro del rotor	48.8 mm
Brecha rotor-estator	1.2 mm
Diámetro del estator	50 mm
Diámetro de núcleo	12 mm
Ancho de ranura	40 mm
Diámetro interno de bobina de estator	40 mm
Diámetro externo de bobina del estator	60 mm

Nota. Se presentan los datos necesarios para calcular diferentes aspectos fundamentales del motor como: ángulos de disposición entre materiales y los bobinados.

Con las mediciones base y los valores registrados con la mayor precisión posible, se realiza el cálculo de ciertos parámetros necesarios para el diseño del motor universal, tales como:

- Número de ranuras por polo
- Paso angular entre ranuras de armadura
- Número de vueltas de bobinas de estator y rotor

Para calcular el número de ranuras por polo (q), se utiliza la ecuación 15 mostrada a continuación.

$$Nr = q \cdot Nf \cdot 2p \quad (15)$$

$$q = \frac{Nr}{Nf \cdot 2p}$$

Resolviendo se tiene:

$$q = \frac{22}{1 \cdot 2(2)} = 5.5 \approx 6$$

Por otro lado, los motores universales al igual que la mayoría de los motores cuenta con un devanado de trabajo $q_{trabajo}$ expresado a través de la ecuación 16 que ocupa la mayor parte del devanado, y uno de arranque $q_{arranque}$ expresado a través de la ecuación 17, el cual ocupa apenas el 20% de las ranuras. Si se calcula estos valores se tiene los siguientes resultados:

$$q_{trabajo} = 80\% q \quad (16)$$

$$q_{trabajo} = 80\% \cdot 6 = 4.8 \approx 5$$

$$q_{arranque} = 20\% \cdot q \quad (17)$$

$$q_{arranque} = 20\% \cdot 6 = 1.2 \approx 1$$

Para el cálculo del ángulo ente ranuras α_{ranura} , se cuenta el número de ranuras $N_{ranuras}$ de la armadura del motor, utilizando la ecuación 18, misma que se presenta a continuación.

$$\alpha_{ranura} = \frac{N_{ranuras}}{360^\circ} \quad (18)$$

$$\alpha_{ranura} = \frac{22}{360^\circ} = 16.36^\circ$$

$$\alpha_{ranura} = 16.36^\circ$$

Por otro lado, para calcular el ángulo geométrico de separación α_{esc} , generado entre las líneas de las escobillas, se aplica la ecuación 19 presentada a continuación.

$$\alpha_{esc} = \frac{360}{2p} \quad (19)$$

Resolviendo se tiene:

$$\alpha_{esc} = \frac{360}{2(2)} = 90^\circ$$

$$\alpha_{esc} = 90^\circ$$

Para el cálculo de vueltas de las bobinas del estator y de las ranuras de la armadura se calcula la longitud por cada vuelta l_{vuelta} en las bobinas del estator y la longitud total l_{total} de la misma. Para ello, se utilizan los valores del diámetro externo $D_{externo}$ e interno $D_{interno}$ de las bobinas del estator y se aplica la ecuación 20 que se presenta a continuación.

$$l_{vuelta} = \pi \cdot D_{interno} + \pi \cdot D_{externo} \quad (20)$$

Resolviendo se tiene:

$$l_{vuelta} = \pi \cdot 40 \text{ mm} + \pi \cdot 60 \text{ mm}$$

$$l_{vuelta} = 157.18 \text{ mm} = 15.72 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}$$

Una vez calculado este término y considerando que la longitud total l_{vuelta} para el enrollamiento de cada bobina del estator es de 15 metros, se calcula el número de vueltas totales que se realizan para lograr el enrollamiento en las bobinas del estator utilizando la ecuación 21 que se presenta a continuación.

$$N_{est} = \frac{l_{total} \cdot Z}{l_{vuelta} \cdot p} \quad (21)$$

Donde:

Z : número total de conductores en la bobina.

p : número de polos del motor.

Además, al considerar que no existe ninguna configuración especial para el enrollamiento del estator se consideran únicamente los dos extremos de cada bobina para Z , y considerando el número de polos del motor se tiene:

$$N_{est} = \frac{15 \text{ m} \cdot 2}{0.16 \text{ m} \cdot 2}$$

$$N_{est} = 93.75 \text{ vueltas} \approx 100 \text{ vueltas}$$

Por otro lado, para el cálculo del bobinado del rotor N_{arm} es necesario considerar el bobinado tipo H con paso 1-11. En este caso, cada bobina abarca 11 ranuras del núcleo y, por tanto, se consideran 11 conductores por bobina, siendo el valor aplicado para Z . Para resolver este parámetro, se utiliza la ecuación 22 que se presenta a continuación.

$$N_{arm} = Z \cdot p \quad (22)$$

Resolviendo se tiene:

$$N_{arm} = 11 \cdot 2$$

$$N_{arm} = 22 \text{ vueltas}$$

De esta forma es posible realizar los respectivos enrollamientos del motor en el software FEMM, tanto para el estator como para el rotor de la máquina.

Una vez realizados los cálculos, se procede a desarrollar el diseño del motor universal utilizado en el banco de pruebas con los valores reales en formato CAD, mismo que se puede visualizar en la Figura 45, en la que se presenta a) las medidas estator y rotor b) las medidas de las láminas de la armadura, estas medidas se realizan en milímetros.

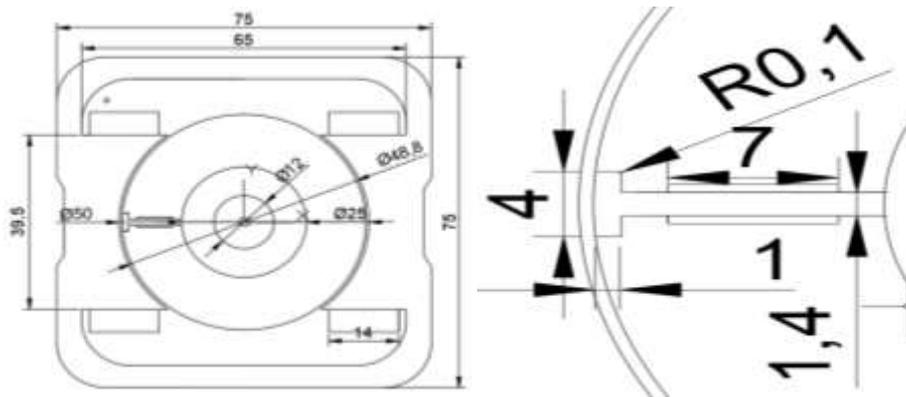


Fig.45: Diseño CAD con a) medidas del estator y rotor b) medidas de láminas de armadura.
Fuente: autor.

Se realiza el diseño en un programa con formato CAD debido a que cuenta con una interfaz de diseño más dinámica y fácil de interpretar que el software FEMM. Además, estos softwares son compatibles mediante el formato DXF con FEMM. Con el diseño base completado, se importa el archivo desde el programa FEMM, para posteriormente completar el diseño mediante una herramienta que permite copiar y rotar los puntos según se requiera. El diseño completo se presenta en la Figura 46 con los datos que se aplica para la simulación.

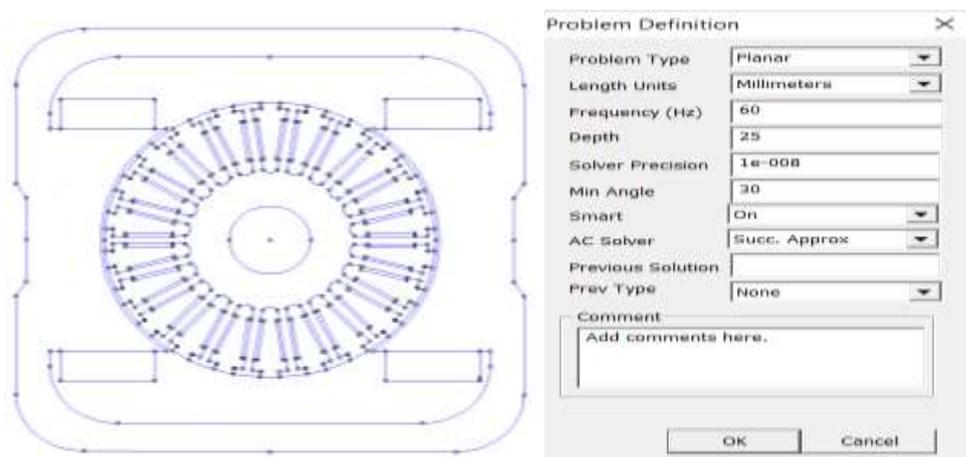


Fig.46: Diseño FEMM con medidas registradas.
Fuente: autor.

Una vez realizado el diseño en el software FEMM, se verifica las unidades de medida, la profundidad, el tipo de problema, entre otros parámetros. Con el fin de poder simular de forma eficaz el comportamiento del motor universal.

Para realizar el enrollamiento de las bobinas en las espiras del rotor, se debe considerar el número de espiras y el tipo de bobinado. En el caso del motor utilizado, se ha implementado un bobinado tipo H, cuya configuración se puede observar en la Figura 47 presentada a continuación.



Fig.47: Bobinado imbricado tipo H en armadura.
Fuente: autor.

Por otro lado, se debe considerar la distancia entre ranuras y la cantidad de ranuras que hay de distancia entre los extremos del enrollamiento. Se utiliza la técnica de rebobinado rectangular y utilizando un paso de ranura 1-11, obtenido mediante la revisión de la armadura real. Se realiza el diagrama de bobinado de la armadura en formato CAD, mismo que se presenta en la Figura 48 que se muestra a continuación.

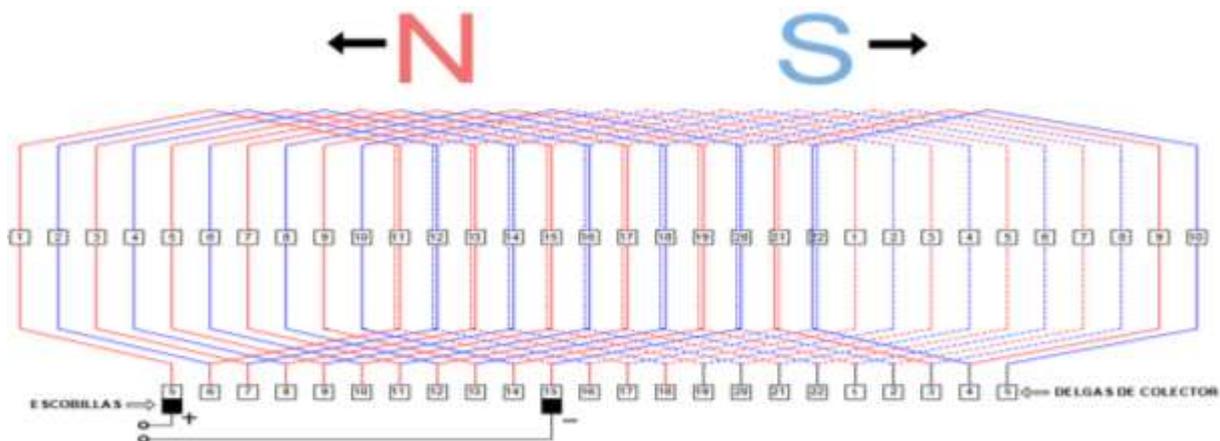


Fig.48: Bobinado de motor universal en formato CAD.
Fuente: autor.

El bobinado del estator es más simple, ya que consiste únicamente en la estructura del enrollamiento de las bobinas a través de los polos magnéticos; se realiza una bobina por cada polo. En el caso del motor universal, que cuenta con dos polos, se tienen dos bobinas en el estator. Debido a que no hay una unión entre algún tipo de ranuras y solo se realiza el enrollamiento de las bobinas, no se considera necesario el uso de un diagrama para la estructura del bobinado del inductor. En este caso, simplemente se considera el número de vueltas calculadas para el enrollamiento.

Una vez definidos los parámetros de simulación en FEMM, y habiendo desarrollado la estructura externa del motor y la estructura del inducido e inductor de la máquina, se procede a la aplicación de los materiales para cada una de las partes del motor. Para lo cual, se utiliza la biblioteca de materiales del software FEMM, aplicando está en base a los materiales reales del motor universal. Los materiales utilizados para la simulación son:

- **Acero inoxidable (304 Stainless Steel):** Este material es comúnmente utilizado por su alta resistencia a la tracción y su durabilidad. Además, puede soportar cargas elevadas por periodos prolongados, lo que lo hace ideal para el diseño de ejes de rotores, como el del motor universal.
- **Aire (Air):** Se utiliza el aire dentro de la simulación para poder desarrollar condiciones físicas reales del funcionamiento del motor.
- **Aluminio (Aluminum, 1100):** Se utiliza el aluminio por sus características de conductividad para las 22 ranuras del rotor.
- **Cobre (Copper 16 y 22 AWG):** El cobre se utiliza como conductor para el enrollamiento de las bobinas del estator y la armadura, utilizando un conductor de calibre 16 AWG 'para el estator y un calibre 22 AWG para la armadura.
- **Hierro fundido (Gray iron, as cast):** El hierro fundido se utiliza para la construcción del estator, estructurado con dos polos magnéticos. La selección del material se debe a que cuenta con una alta conductividad, lo que lo hace ideal para la construcción de estos componentes.
- **Hierro puro (Pure iron):** Para la armadura se aplica hierro puro, material comúnmente aplicado para estos fines. El hierro puro produce una gran conductividad, al igual que el material del estator, lo que permite que los fenómenos magnéticos se produzcan de forma eficaz.

Una de las ventajas de este software, es que cuenta con una amplia biblioteca de materiales para el diseño y construcción de componentes. En la Figura 49 se presenta el ejemplo de las características de un grupo de materiales, en este caso, del inductor y del inducido.

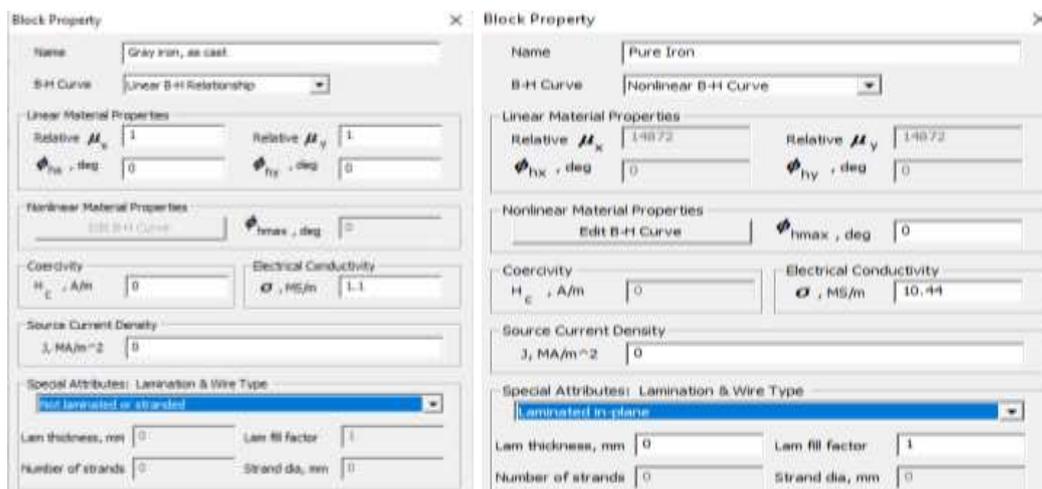


Fig.49: Propiedades de los materiales (estator y rotor).
Fuente: autor.

Durante el diseño del motor, para la simulación no debe existir ningún punto suelto en las conexiones, ya que cada punto tiene un material definido. Por otro lado, para la construcción de las bobinas enrolladas en los polos, se considera el número de vueltas calculadas y la corriente aplicada. En la Figura 50 se muestra la configuración designada para las bobinas.

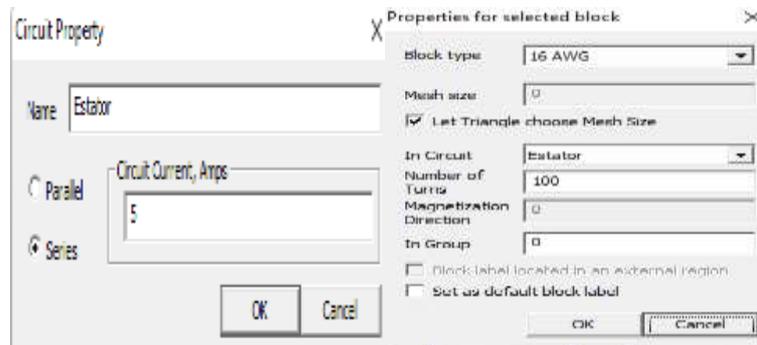


Fig.50: Magnitudes para el bobinado del estator.
Fuente: autor.

Para el enrollamiento en el estator, se utiliza la técnica de signos invertidos, la cual permite simular un enrollamiento de la bobina a través del polo, tal y como se muestra en la Figura 51 que se presenta a continuación.

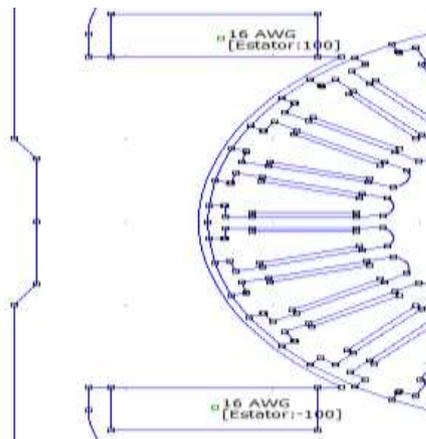


Fig.51: Características del bobinado del estator.
Fuente: autor.

De igual forma, para las bobinas enrolladas en las 22 ranuras de la armadura, se utiliza la misma técnica y el mismo proceso. En la Figura 52 se pueden visualizar los valores ingresados de corriente y el número de vueltas para las bobinas de la armadura.

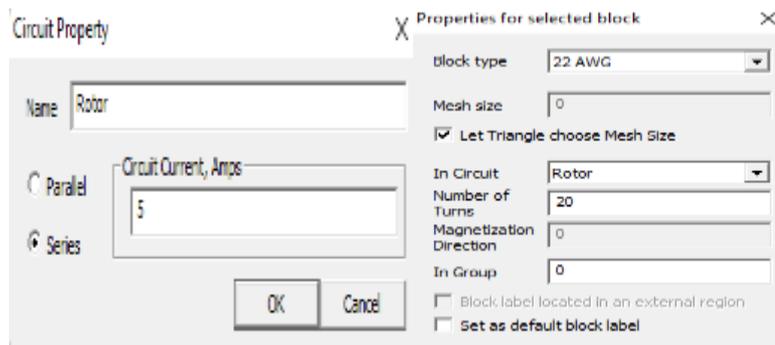


Fig.52: Magnitudes para el bobinado de la armadura.
Fuente: autor.

Por otro lado, se debe considerar el sentido en el que se enrollan las bobinas; el giro de la armadura se realiza en el sentido de las manecillas del reloj. Por tanto, el enrollamiento se realiza, de izquierda a derecha, lo que produce que la parte positiva de la bobina se encuentra en la parte izquierda y la parte negativa en la parte derecha. Esto se puede visualizar en la estructura de las bobinas diseñadas en la Figura 53 que se muestra a continuación.

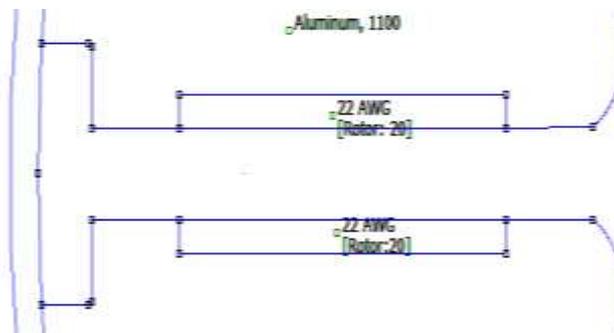


Fig.53: Características del bobinado de la armadura.
Fuente: autor.

Las bobinas del inductor deben estar aisladas de las láminas de la armadura. Por lo cual, se aplica en los espacios sin componentes un material aislador que permita un correcto bobinado.

Con el bobinado estructurado y los materiales establecidos para cada uno de los componentes que conforman la estructura del motor universal, es posible simular el programa, con el fin de verificar la dirección y la forma en la que se genera la corriente y el flujo magnético de la máquina.

Resultados de simulación

Para verificar que se ha asignado un material para cada componente y no existe ningún punto suelto, se compila el programa, dando como resultado la simulación mostrada en la Figura 54 que se presenta a continuación.

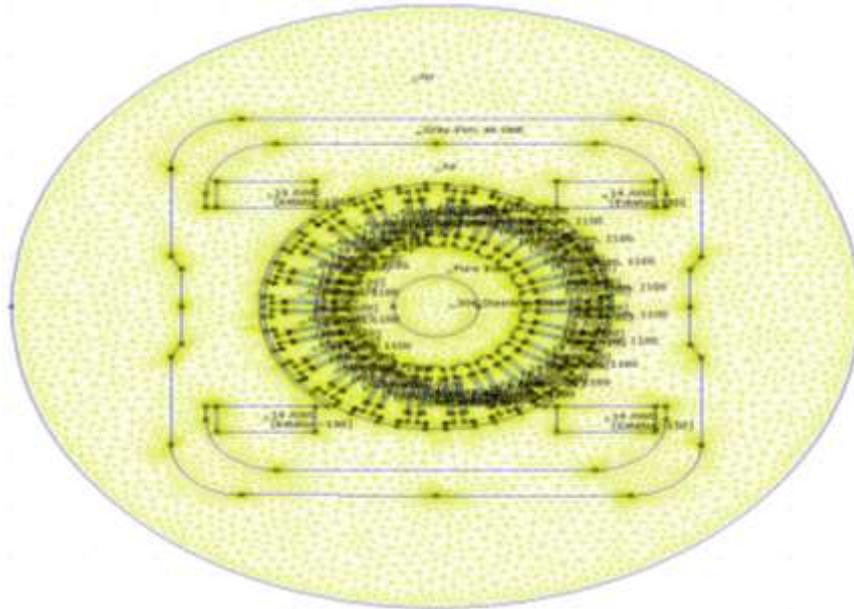


Fig.54: Simulación de malla eléctrica del motor universal (FEMM).
Fuente: autor.

Si existe algún elemento suelto o algún error en el circuito, el software emite una señal de advertencia y no permite realizar la simulación. Por otro lado, al activar la malla del circuito, es posible visualizar cómo se genera la densidad de flujo y la corriente, así como su dirección. En la Figura 55 se observa la simulación del circuito activado.

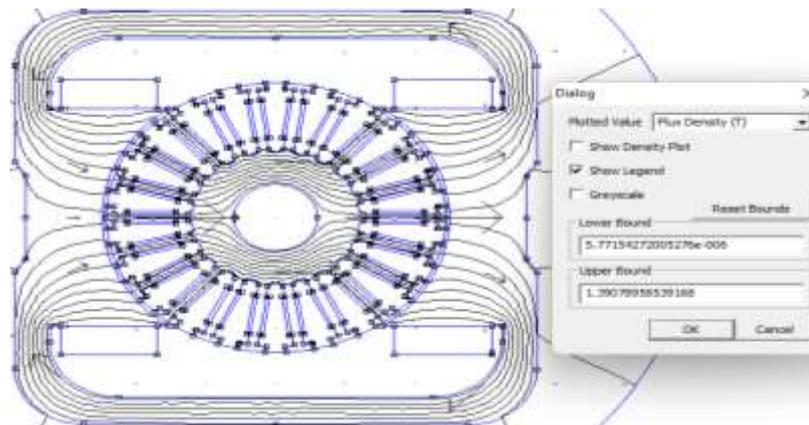
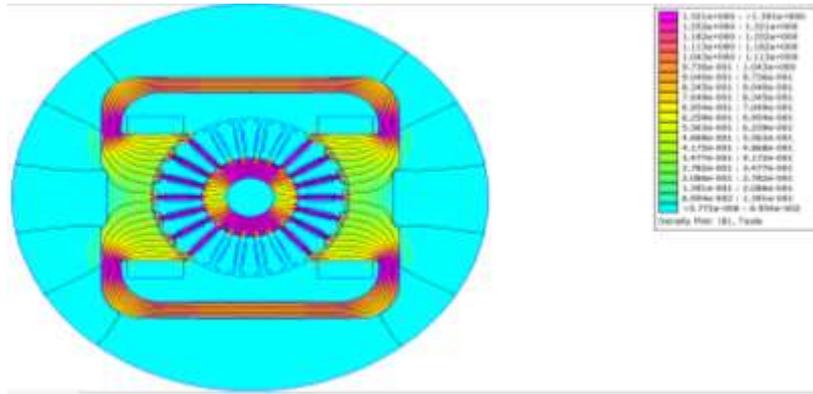
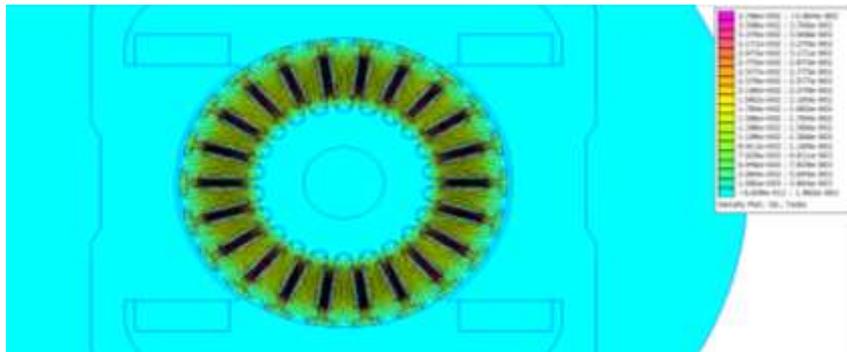


Fig.55: Simulación inicial del motor universal en FEMM.
Fuente: autor.

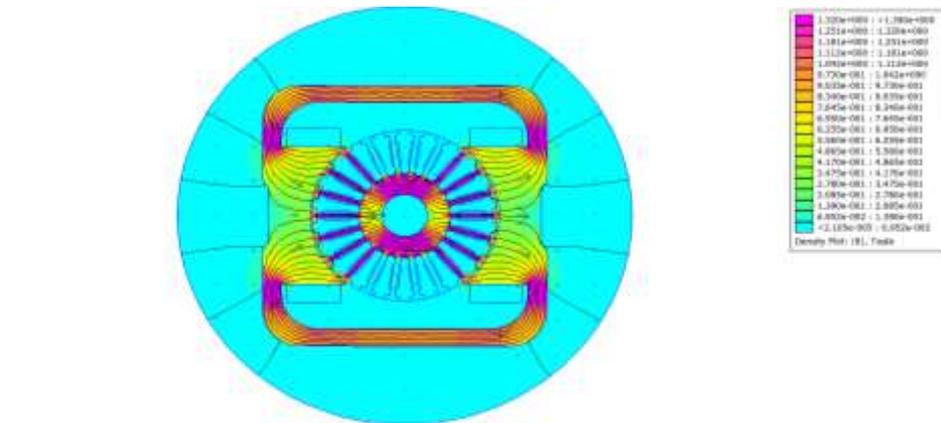
La dirección de flujo y de la corriente es la misma para un motor universal, como se verifica en la simulación realizada. Por otro lado, para las simulaciones del comportamiento de la armadura y del campo de la máquina, se consideró energizar el inductor y el inducido de forma independiente, y otra simulación en la que se energiza los dos al mismo tiempo. En la Figura 56 se pueden visualizar los resultados de las simulaciones obtenidos, mostrando en el literal a) el estator energizado, el b) la armadura energizada y el literal c) el estator y rotor energizados de forma simultánea.



a)



b)



c)

Fig.56: Simulación del flujo del motor: a) estator energizado b) armadura energizada y c) estator y rotor energizado. Fuente: autor.

Se puede notar que la forma en la que se produce el movimiento del flujo es similar al de un motor DC, transmitiéndose a través de la armadura y el campo conectados en serie. En el estator, la corriente aplicada genera un campo magnético rotativo, mientras que en el rotor la corriente fluye a través de las bobinas generando un campo magnético opuesto, lo que produce el movimiento del motor. Esto se debe a que todo motor universal está estructurado en base al diseño de un motor serie de corriente directa, con modificaciones internas para poder operar en corriente alterna y corriente directa, lo que lo hace un motor único.

Con el diseño del banco de pruebas, el dimensionamiento de materiales, las simulaciones realizadas en Simulink para obtener los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina, así como las simulaciones FEMM para verificar el comportamiento del motor en cuanto a flujo y densidad de corriente, es posible realizar el montaje del banco de pruebas, con las bases necesarias para estructurar este de forma adecuada y se pueda aplicar para realizar los ensayos prácticos con el motor.

2.5 Montaje del módulo

Para la construcción del módulo de pruebas se realiza una breve descripción de cómo se realizó el montaje del banco de pruebas, el cual se utiliza para el desarrollo de pruebas experimentales en el capítulo 3. Además, se presenta las respectivas pruebas de funcionamiento de los componentes para verificar su buen estado.

2.5.1 Conexión de módulo PZEM 004t

Para la medición de las varias variables eléctricas del motor universal en corriente alterna, se utiliza un módulo de medición PZEM-004t, conectado a una pantalla LCD para visualizar las variables registradas en AC. En la Figura 57 se presenta el esquema de conexión del sensor.

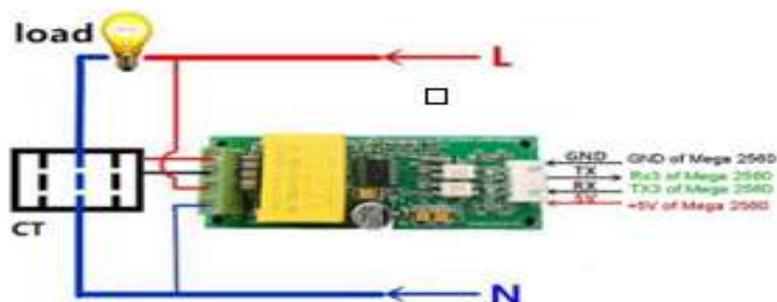


Fig.57: Esquema de conexión para módulo PZEM 004t.
Fuente: (Arduino, 2019).

Se puede observar que la configuración para el registro de mediciones es sencilla y práctica. Sin embargo, es necesario de un código de programación, el cual se presenta en el Anexo K. En la Figura 58 se presenta los resultados obtenidos en una pantalla LCD de una prueba con el sensor PZEM-004t para comprobar su estado integro.



Fig.58: Registro de variables eléctricas de módulo PZEM 004t en pantalla LCD.
Fuente: autor.

Una vez realizado el circuito de prueba y verificado que las mediciones obtenidas son fiables al compararlas con los resultados medidos mediante un multímetro, es posible conectar este componente al banco de pruebas para desarrollar las pruebas en AC.

Además, para el registro automatizado de mediciones se registran los resultados utilizando los dos métodos: primero, se registran los datos en el computador mediante el monitor serie de la plataforma IDE Arduino y, segundo, mediante el programa CoolTeem con su propio monitor serie. Este último programa también permite guardar las variables medidas en formato txt para facilitar el manejo de datos. En la Figura 59 se muestra una de las mediciones de pruebas tomadas en el programa.

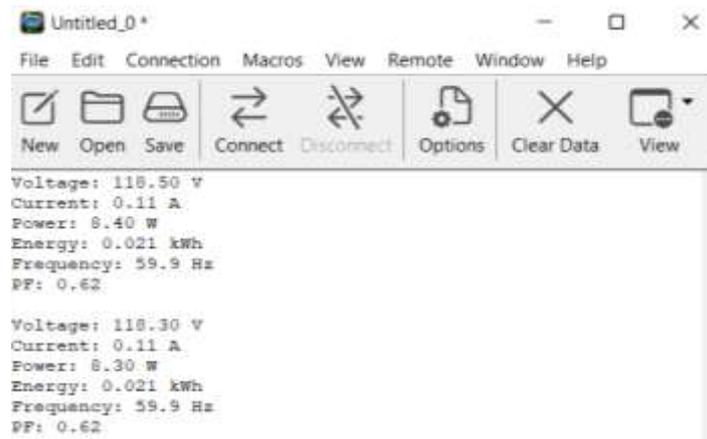


Fig.59: Registro de variables eléctricas en programa CoolTeem.
Fuente: autor.

Con el archivo en formato txt, se puede exportar las mediciones al programa Excel para facilitar el manejo de las variables registradas. Además, mediante las mediciones realizadas en las pruebas de experimentación, se desarrollan las curvas características del motor universal. En la Figura 60 se pueden observar los datos tomados en un circuito de prueba desarrollado para verificar el correcto funcionamiento de este componente.

	A	B	C
1	DATOS REGISTRADOS		
2			
3	Variable	Magnitud	Unidad
4	Voltage:	117.30	V
5	Current:	0.11	A
6	Power:	8.00	W
7	Energy:	0.021	kWh
8	Frequency:	60.0	Hz
9	PF:	0.62	
10			
11	Voltage:	118.30	V
12	Current:	0.11	A
13	Power:	8.30	W
14	Energy:	0.021	kWh
15	Frequency:	60.0	Hz
16	PF:	0.62	

Fig.60: Datos de medición exportados a software Excel.
Fuente: autor.

En base a los resultados obtenidos, se puede considerar que el sensor es fiable para el registro de mediciones en DC, para las pruebas experimentales con el motor universal. Además, las mediciones registradas serán exportadas al software CoolTeem y posteriormente a Excel para facilitar el manejo de datos y mantener un mayor orden de estos, de manera similar que con el sensor AC. El código del sensor PZEM 017 se presenta en el Anexo L.

2.5.3 Conexión de módulo PZM015

Con el fin de verificar el funcionamiento de este componente, se realiza mediciones de prueba con el sensor y se comparan los resultados obtenidos con valores los medidos mediante un multímetro, así como para el sensor AC. En la Figura 63 se muestran los resultados de las mediciones de un circuito de prueba, con a) el módulo PZEM 015 y b) el multímetro.



a) b)
Fig.63: Circuito de prueba para módulo PZEM 015.
Fuente: autor.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del sensor y que los valores medidos son aproximados a los registrados con el multímetro, se procede a realizar la conexión del componente dentro del banco de pruebas. El esquema para la conexión de este elemento se muestra en la Figura 64 que se presenta a continuación.

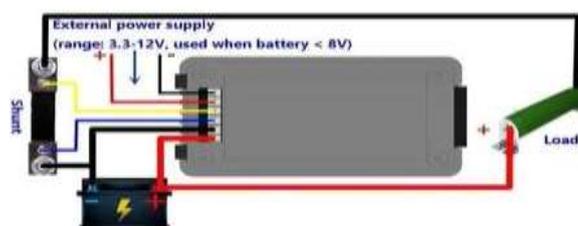


Fig.64: Esquema de conexión de módulo PZEM 015.
Fuente: autor.

En base al esquema de conexión presentado, se realizan las conexiones con el fin de obtener las mediciones del motor universal, cuando se realizan las pruebas en DC. Sin embargo, este componente se utiliza más como una adición opcional, para medir la corriente de campo del generador o el voltaje generado en conjunto con la carga. A pesar de ello, los datos principales y necesarios para el estudio son únicamente los del motor principal, los cuales son registrados con los sensores mencionados anteriormente.

2.5.4 Conexión de tacómetro con sensor de efecto hall

El sensor de efecto hall, mediante un imán, permite contar las rpm producidas por el motor. Es necesario el uso de un microcontrolador para visualizar y registrar las mediciones de velocidad del motor, en el monitor serie de los softwares IDE Arduino o CoolTem y/o en una pantalla LCD. En la Figura 65 se muestra el esquema de conexión necesario para desarrollar el dispositivo de medición de velocidad.

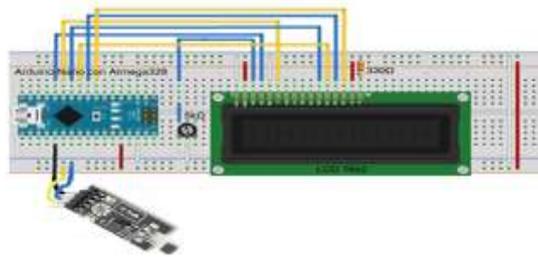


Fig.65: Esquema de conexión para sensor de efecto hall
Fuente: autor.

Mediante los efectos magnéticos producidos por el imán y el semiconductor del sensor, es posible leer la velocidad de la máquina. Una de las mediciones de prueba registradas en el monitor serie, se puede visualizar en la Figura 66 que se presenta a continuación.

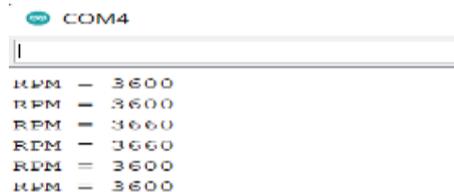


Fig.66: Medición de prueba de sensor de efecto hall como tacómetro.
Fuente: autor.

Las mediciones de velocidad son de gran relevancia para las pruebas experimentales con el motor, ya que a partir de los resultados de esta variable, es posible calcular los parámetros necesarios para caracterizar la máquina y poder formar las curvas par-velocidad del motor. Por lo tanto, se añade este componente a los códigos de los sensores AC y DC para realizar una medición completa y en conjunto, evitando así, el uso de más microcontroladores o algún otro elemento para la comunicación.

2.5.5 Elaboración del mecanismo de acople de las máquinas

Con el propósito de emular una carga en la salida del generador se construye un mecanismo de acoplamiento desarmable entre el motor y el generador. De esta forma, se produce el movimiento necesario para poder generar un voltaje en los terminales de la armadura en la salida del generador, al cual que se puede conectar una carga. En la Figura 67 se muestra el matrimonio construido para unir el motor con el generador.



Fig.67: Matrimonio implementado para pruebas con carga.
Fuente: autor.

Mediante el mecanismo de acoplamiento se logra el movimiento de los motores. Este movimiento, aplicando un voltaje nominal al motor, alcanza una velocidad considerablemente alta debido a su diseño de fabricación. Sin embargo, esto también produce que el control del motor sea complicado y se generen vibraciones. Por esta razón, se construyó una base metálica que brinde una mayor estabilidad y sujeción a las máquinas con el fin de realizar las pruebas de forma segura y adecuada. Esta parte es fundamental para el desarrollo de todas las pruebas de experimentación. por lo cual se verifica de forma minuciosa cada punto de su diseño y construcción.

2.5.6 Conexión de elementos del circuito rectificador

Para la alimentación con corriente continua del motor, se construye un circuito rectificador AC-DC, compuesto por un puente rectificador y un capacitor dimensionados anteriormente. Se puede observar el circuito implementado en la Figura 68 que se muestra a continuación.



Fig.68: Unión de capacitor y rectificador para circuito DC.
Fuente: autor.

Las terminales del capacitor, que representan la salida del circuito, se unirán al selector en la posición asignada para corriente directa. Además, con el uso de estos elementos, no es necesario el uso de una fuente DC para la alimentación en las pruebas de corriente continua, como la de CA, CC, y carga. Además, se utiliza este circuito para alimentar el campo del generador de ser necesario.

2.5.7 Elaboración de tablero

Una vez probados los elementos para verificar su correcto funcionamiento y haber establecido las bases y las conexiones necesarias para los componentes del banco de pruebas, se procede a unir los componentes dentro del tablero. Se comienza con la parte externa, realizando los respectivos espacios para introducir las pantallas, borneras, luces, y selector, dando como resultado la parte externa del tablero presentada en la Figura 69 que se muestra continuación.



Fig.69: Construcción de la parte externa del tablero para banco de pruebas.
Fuente: autor.

Una vez realizados los respectivos espacios y haber instalado los componentes externos, el siguiente paso fue realizar la conexión de los componentes internos y, por ende, el cableado y las soldaduras respectivas. La conexión de todos los elementos internos del tablero se puede visualizar en la Figura 70.



Fig.70: Construcción de la parte interna del tablero para banco de pruebas.
Fuente: autor.

Finalmente, se conectan las máquinas en las respectivas borneras y se asienta el tablero completado en una estructura común con los motores. Estos elementos en conjunto conforman el banco de pruebas final, diseñado para poder realizar ensayos prácticos con el motor universal. El banco de pruebas implementado se puede visualizar en la Figura 71 que se presenta continuación.



Fig.71: Banco de pruebas final para pruebas con motor universal.
Fuente: autor.

El banco de pruebas diseñado cuenta con la capacidad de evaluar al motor de forma adecuada en los diferentes ensayos que se requieran para alcanzar este objetivo. Además, brinda la seguridad e integridad necesaria para resguardar a los componentes y usuarios al momento de su aplicación. La construcción del banco de pruebas se puede apreciar en el Anexo M.

Con la unión de todos los elementos, se considera que las etapas de diseño, simulación e implementación del banco de pruebas han sido completadas, lo que da paso a realizar las pruebas de experimentación correspondientes en el siguiente capítulo. La implementación del módulo es de gran relevancia, debido a que los resultados obtenidos en la instalación serán fundamentales para realizar el análisis completo del funcionamiento del motor universal. Por esta razón, esta etapa se realizó con la mayor precisión posible, con el fin de garantizar que los resultados obtenidos son reales y fiables. Además, esta etapa es crucial para lograr una comunicación eficaz entre los sensores de medición y las máquinas evaluadas para el manejo de datos.

CAPITULO III

Análisis de funcionamiento del motor universal mediante experimentación con el banco de pruebas

El capítulo final del trabajo de investigación se enfoca en el análisis de funcionamiento del motor universal mediante pruebas de experimentación. Para ello, se desarrolla una serie de ensayos que permitan evaluar el funcionamiento de la máquina tanto en corriente directa como en corriente alterna. De esta forma, se logra obtener las curvas características de magnetización y las curvas par-velocidad del motor, aplicando el método clásico para realizar las respectivas pruebas. Además, se emplea un método alternativo para la obtención de las curvas de voltaje y corriente, utilizando un osciloscopio. Estas pruebas son fundamentales para caracterizar el motor universal y permiten obtener información crucial para su análisis y comprensión. Los ensayos que se realizan para evaluar la máquina son:

- Prueba de cierto abierto CA (vacío)
- Prueba de cortocircuito CC
- Prueba con carga (par-velocidad)
- Curvas mediante osciloscopio (voltaje e intensidad)

Para evaluar el motor universal se consideran las pruebas características aplicadas a un motor serie de corriente directa, debido a su estructura semejante y operación similar, como se menciona en los capítulos anteriores. Sin embargo, cuando el motor se alimenta con corriente alterna, se debe tener en cuenta la parte inductiva del motor, la cual interviene de cierta forma en su funcionamiento. Con el fin de verificar las diferencias del motor en AC y DC, se realiza la prueba de carga. Estas pruebas se llevan a cabo utilizando el banco de pruebas implementado. A continuación, se detalla cada una de las prácticas realizadas.

3.1 Prueba de circuito abierto (CA)

La prueba de circuito abierto CA o de vacío tiene como objetivo determinar los diferentes parámetros eléctricos y la velocidad del motor universal sin carga conectada, centrándose en las características de magnetización del motor. Esta prueba proporciona la fuerza magnetomotriz (mmf) y, por ende, la corriente de excitación del motor cuando opera sin carga conectada y su eje gira a una velocidad constante. En resumen, para obtener la curva característica de magnetización en circuito abierto, se toma en cuenta la variación del voltaje de magnetización en función de la corriente de campo aplicada.

Desarrollo

Para la prueba de vacío, se conecta el motor con el generador mediante la pieza de acople. A continuación, se identifican los respectivos terminales de la armadura y el campo del motor para proceder a separarlos. En los terminales de la armadura se conecta el sensor PZEM 017 para registrar el voltaje generado, y en los terminales del estator se conecta un multímetro o el sensor PZEM 015 para registrar y controlar la corriente de campo. Además, dado que se utilizan dos motores de las mismas características, uno de ellos se destina para producir el movimiento del rotor necesario para el ensayo. Por otro lado, se utiliza un circuito rectificador para transformar la señal AC a DC y así poder suministrar corriente en el campo del motor. La conexión de todos los elementos para esta prueba se puede visualizar en la Figura 72 que se presenta a continuación.



Fig.72: Conexión de componentes para prueba de circuito abierto CA.
Fuente: autor.

Se energiza el motor que producirá el movimiento con un voltaje nominal de 110 V, logrando establecerse en una velocidad constante de aproximadamente 20000 rpm. El valor de velocidad nominal del motor se ve reducido en cierta forma debido al torque mecánico que presenta el motor principal conectado con el generador mediante la pieza de acople. Se realiza la primera medición de velocidad para establecer el valor base sobre el cual se está formando la curva de magnetización en CA. Además, la velocidad se verá afectada al aplicar y variar la corriente de campo del generador. Una de las mediciones de velocidad se presenta en la Figura 73.



Fig.73: Medición de velocidad para prueba de CA.
Fuente: autor.

Una vez establecida una velocidad constante, se procede al registro de las mediciones de voltaje generado en base a la corriente de campo del motor universal. Para ello, se registra inicialmente el voltaje generado aplicando una corriente de campo de 0 A, y se incrementa en intervalos de 0.5 A, hasta alcanzar un valor cercano a los 6 A. La corriente de campo puede aumentarse hasta alcanzar la corriente nominal o hasta que el voltaje generado sea el doble del valor especificado. En la Figura 74 se muestra cómo se van registrando las mediciones de voltaje generado en la armadura a través de la pantalla LCD, conectada al sensor PZEM 017, mientras que la corriente de campo que es inyectada se registra por medio de un multímetro.



Fig.74: Mediciones de prueba de CA.
Fuente: autor.

Se debe considerar que, al no existir una carga conectada en las terminales de la armadura del motor, se registra únicamente el voltaje generado, ya que la corriente es cero al no existir carga, tal y como se muestra en la pantalla LCD. Las capturas de cada medición realizada se pueden encontrar en el Anexo N. Con las mediciones obtenidas, se realiza la tabulación de datos para formar la curva característica de magnetización real del motor en CA. Los datos registrados se presentan en la Tabla 17, misma que se muestra continuación.

Tabla 17

Registro de mediciones de la prueba de CA

V_{in} (V)	Wm_{rpm}	I_{campo} (A)	$V_{armadura}$ (V)
120,00	20000,00	0,00	8,00
120,00	20000,00	0,50	23,00
120,00	20000,00	1,00	41,00
120,00	20000,00	1,50	61,00
120,00	20000,00	2,00	76,00
120,00	20000,00	2,50	89,00
120,00	20000,00	3,00	97,00

120,00	20000,00	3,50	99,00
120,00	20000,00	4,00	103,00
120,00	20000,00	4,50	106,00
120,00	20000,00	5,00	110,00
120,00	20000,00	5,50	112,00
120,00	20000,00	6,00	112,00

Nota. Se presentan las variaciones del voltaje de magnetización al modificar la corriente.

Una vez obtenido todos los datos, se procede a formar la curva de magnetización que corresponde a la prueba de circuito abierto, utilizando los datos de corriente de campo (I_{campo}) y el voltaje generado en la armadura ($V_{armadura}$) de la tabla de resultados. La curva de magnetización de CA formada a partir de estos valores se muestra en la Figura 75 que es presenta continuación.

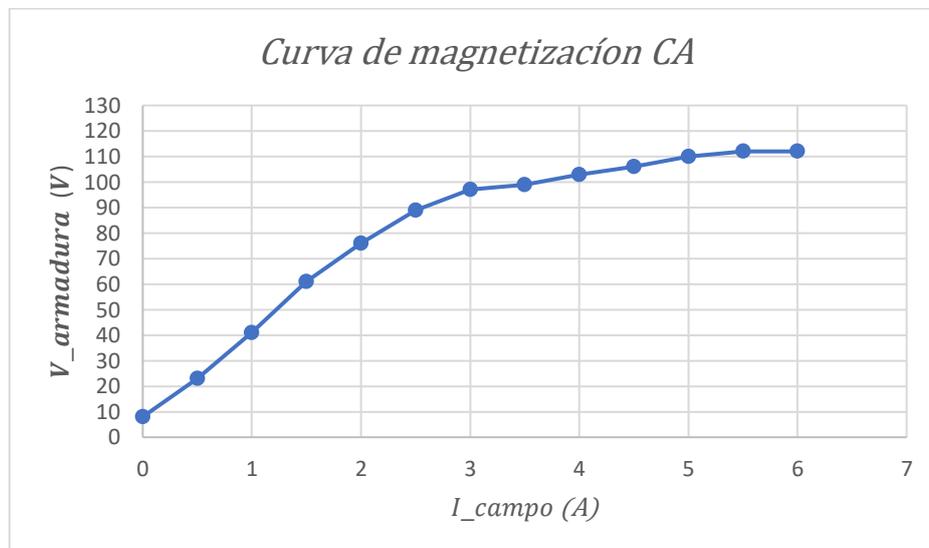


Fig.75: Curva característica de magnetización con prueba de CA.
Fuente: autor.

Al comparar la curva obtenida con la de un motor DC en serie, se observa una similitud de forma entre ambas. Además, el voltaje generado se incrementa conforme se eleva la corriente de campo, alcanzando un valor cercano al voltaje nominal cuando se aplica la corriente nominal en el campo. Esto sugiere que la relación entre el flujo magnético y la corriente de campo del motor es estable y predecible. Así mismo, esta curva sirve como guía para realizar otras pruebas, tomando como referencia los puntos cercanos a la saturación de la máquina.

Por otro lado, al realizar una comparativa con la curva y los resultados obtenidos en las simulaciones, se puede establecer que en la simulación de CA se trabajó en condiciones ideales, lo que resulta en una relación casi lineal entre el voltaje y la corriente, dando lugar a una línea creciente prácticamente recta en la formación de la curva. Esto se debe a que la mayoría de los simuladores no pueden capturar completamente el aspecto no lineal que presenta un motor universal en relación con su característica par-velocidad. Mientras tanto, en la curva obtenida en la prueba experimental se observa un crecimiento constante y casi lineal hasta que el motor alcanza valores cercanos a la de corriente de saturación. Esto hace que el voltaje generado en esos puntos alcance un punto más equilibrado a medida que se acerca a la corriente de máxima del motor deformando en cierto grado la curva, lo que permite apreciar un comportamiento más realista del motor en condiciones reales de funcionamiento.

3.2 Prueba de cortocircuito (CC)

La prueba de cortocircuito se realiza con el fin de conocer las potencialidades de corriente de un motor universal. Para llevar a cabo este proceso, se separan los terminales de la armadura y del estator, de manera similar a la prueba de circuito abierto. Sin embargo, en esta prueba, se conectan los terminales de la armadura en serie para lograr el cortocircuito mientras el motor gira a una velocidad constante mediante el mismo mecanismo utilizado en la prueba de CA.

Nota: Es importante mencionar que esta prueba puede causar daños en el motor si no se tiene un correcto control de la corriente inyectada en el estator, por lo que se recomienda realizarla con la asistencia de un experto en el área.

Desarrollo

Para realizar la prueba de cortocircuito, primero se conecta el generador con el motor mediante la pieza de acople. Luego, se procede a separar las terminales del estator y del rotor del motor principal. Las terminales de la armadura se unen en serie para cortocircuitarlas y simular así una condición de cortocircuito. Además, se conecta un multímetro a los terminales de la armadura para registrar la corriente de CC que circula debido al cortocircuito, y el sensor PZEM 015 se conecta al campo para registrar la corriente aplicada en el campo del motor. En la Figura 76 se muestra la conexión realizada de todos los elementos para llevar a cabo este ensayo.



Fig.76: Conexión de componentes para prueba de cortocircuito CC.
Fuente: autor.

Una vez comprobada la conexión de todos los componentes, se energiza el motor que produce el movimiento, el cual funciona con un voltaje nominal de 110 V, y al ser aplicados el motor alcanza una velocidad constante de aproximadamente 20000 rpm, valor similar con el que se desarrolla la prueba de CA. A continuación, se aumenta gradualmente la corriente en el campo del motor principal, desde 0 A, hasta que alcance un valor cercano a su corriente nominal en la armadura. La Figura 77 presentada a continuación, muestra una de las mediciones registradas durante la prueba.



Fig.77: Mediciones de prueba de CC.
Fuente: autor.

El valor máximo de corriente ingresada en el campo fue de 1.2 A, lo que hizo necesario establecer varios intervalos de medición de 0.1 A, para registrar diferentes valores y formar la curva de la mejor forma posible. Las capturas de las mediciones realizadas se encuentran disponibles en el Anexo O. Una vez registrados los datos, se procede a realizar la tabulación de los resultados obtenidos durante el ensayo, los cuales se presentan en la Tabla 18 que se expone a continuación.

Tabla 18

Registro de mediciones de la prueba de CC

V_{in} (V)	Wm_{rpm}	I_{campo} (A)	$I_{armadura}$ (A)	$I_{armadura_{aprox}}$ (A)
120,00	20000,00	0,00	0,89	0,90
120,00	20000,00	0,10	1,29	1,30
120,00	20000,00	0,20	1,66	1,70
120,00	20000,00	0,30	2,11	2,10
120,00	20000,00	0,40	2,53	2,50
120,00	20000,00	0,50	2,88	2,90
120,00	20000,00	0,60	3,45	3,50
120,00	20000,00	0,70	4,50	4,50
120,00	20000,00	0,80	4,77	4,80
120,00	20000,00	0,90	5,11	5,10
120,00	20000,00	1,00	5,42	5,40
120,00	20000,00	1,10	5,69	5,70
120,00	20000,00	1,20	6,03	6,00

La curva de magnetización de la prueba de cortocircuito generalmente se presenta como una línea recta. Por lo tanto, para obtener una curva aproximada a la real, se procede a aproximar los valores obtenidos de las mediciones a valores enteros. Para formar esta curva, se utilizan los valores de corriente de armadura ($I_{armadura_{aprox}}$) y la corriente de campo (I_{campo}) de la tabla de resultados. Estos datos son empleados para construir la curva característica de CC presentada en la Figura 78 que se muestra a continuación.

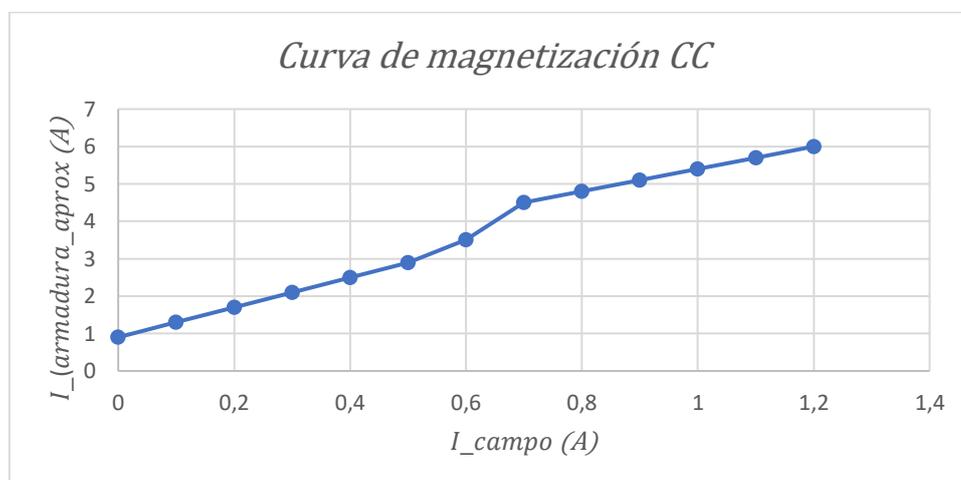


Fig.78: Curva característica de magnetización con prueba de CC.
Fuente: autor.

A diferencia de la prueba de CA, la corriente obtenida en la armadura se eleva rápidamente en comparación con la baja corriente inyectada en el campo. Esto se debe al cortocircuito, el cual reduce la resistencia a valores insignificantes, acelerando el flujo de corriente. Por otro lado. Al analizar la forma en la que crece la curva, se puede observar la relación directa entre la corriente de campo y la corriente de armadura. Esto indica que el motor responde de manera lineal y predecible a los cambios producidos en la armadura por un incremento de corriente en el campo. Generalmente, esta prueba se realiza una sola vez con el motor, ya que el funcionamiento en cortocircuito de la máquina puede acortar significativamente la vida útil del motor y afectar a su operación habitual.

Por otro lado, a diferencia de la prueba de CA, las curvas obtenidas en las simulaciones y en las pruebas experimentales, guardan mucha relación entre sí, tanto en la forma de la curva como en los datos registrados. Esto permite afirmar que los resultados obtenidos están generados de forma efectiva e indican con precisión el comportamiento del motor bajo la condición de cortocircuito.

3.3 Prueba de carga

El objetivo de esta prueba es determinar las variaciones de las magnitudes eléctricas, tales como corriente, voltaje, frecuencia y factor de potencia, y la velocidad del motor cuando opera con carga. Además, a través de las variables medidas, se pueden formar las curvas par-velocidad de la máquina. Estas pruebas se realizan tanto en corriente directa como en corriente alterna con el fin de reconocer las diferencias de funcionamiento del motor cuando se conecta una carga con los distintos tipos de alimentación.

Desarrollo

El primer punto consiste en modificar uno de los motores para que actúe como generador, separando el campo de la armadura, mientras el motor a caracterizar se mantiene con su estructura original, es decir, conectando en serie la armadura con el estator. Estas modificaciones se aplican para los dos tipos de alimentación. Por otro lado, en esta prueba, para realizar las variaciones de carga, se varía la corriente de campo del generador producida en DC mediante un circuito rectificador. Esto produce un efecto de frenado en el motor debido a la interacción del campo magnético y las corrientes inducidas en las bobinas del rotor del motor. Un cambio del campo magnético de la armadura genera una mayor resistencia para el motor, lo que se refleja en una mayor carga o un freno hacia el motor. Cabe mencionar que, para el registro de datos, se consideran únicamente los parámetros eléctricos, la velocidad y el torque del motor, ya que este es el componente que se está caracterizando.

3.3.1 Prueba de carga en DC

Con el acople de las máquinas y la configuración en las conexiones del motor realizadas correctamente, se conectan los sensores de medición para esta prueba. Se utiliza el sensor PZEM 017 para registrar diferentes parámetros eléctricos necesarios para la prueba como voltaje, corriente y potencia. También se emplea un sensor de efecto hall con un imán de Neodimio para medir la velocidad del motor, y un multímetro para llevar un control de la corriente de campo del generador. En la Figura 79 se puede visualizar la conexión de todos los componentes utilizados para este ensayo.

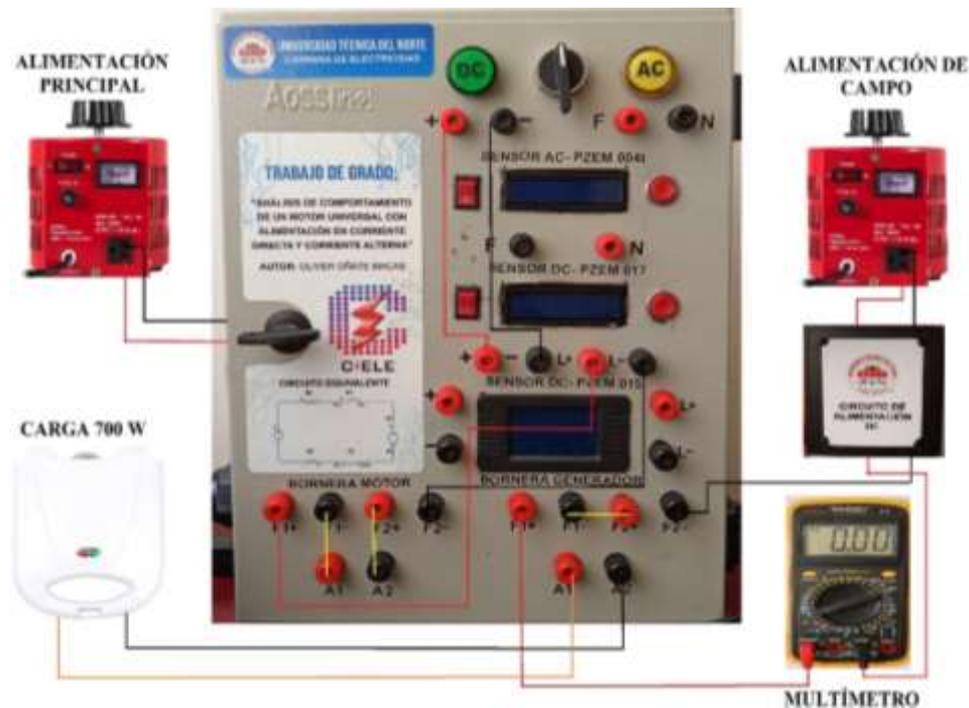


Fig.79: Conexión de elementos para la prueba de carga en DC.
Fuente: autor.

Con todos los elementos conectados, el primer paso es energizar el motor con voltaje nominal o un valor cercano a los 120 V, esto sin ninguna carga conectada. Se realiza la primera medición de las variables eléctricas y la velocidad para luego proceder a conectar la carga, la cual cuenta con un valor de resistencia 32 Ω y opera a una potencia de 700 W.

Cuando la carga es conectada, se comienza a variar la corriente de campo del generador de 0 a 3 A con intervalos de 0.5 A. Los cambios en el motor se registran de forma automática mediante el sensor PZEM 017 y se reflejan en un monitor serie en la computadora. Sin embargo, se debe llevar un control de cuándo se producen dichos cambios, que son generados al realizar un aumento o reducción de la corriente de campo del generador. Una de las mediciones registradas en el monitor se presenta en la Figura 80.

rpm	V	A	W	Wh
21180	119.9	2.830	339.2	873
19680	119.4	2.820	336.8	873
19800	120.0	2.785	334.1	874
19830	119.6	2.740	327.6	875
19890	117.9	2.860	337.2	875

Fig.80: Registro de mediciones de prueba de carga en DC en monitor serie.
Fuente: autor.

Una vez terminado el registro, se procede con la exportación de datos a Excel para un mejor manejo y tabulación de estos, los cuales se pueden revisar en el Anexo P. Se realiza el cálculo del voltaje de armadura (E_A) con la ecuación 11 y el torque (T_{ind}) con la ecuación 13, ecuaciones presentadas en el capítulo anterior. Además, se realiza la conversión de unidades de velocidad de rpm a rad/s. Luego, con los datos registrados y calculados, se forma la Tabla 19, en la que se presentan los resultados relevantes del ensayo.

Tabla 19

Registro de mediciones de la prueba de carga en DC

V_T (V)	I_A (A)	P (W)	E_A (V)	$I_{f_{gen}}$ (A)	Wm_{rpm}	$Wm_{rad/s}$	T_{ind} (Nm)
120,00	2,79	340,40	109,15	0,00	22400,00	2345,72	0,13
120,00	2,82	338,40	109,03	0,00	21900,00	2293,36	0,13
120,00	3,17	380,40	107,67	0,50	20270,00	2122,67	0,16
120,00	3,59	430,80	106,03	1,00	18830,00	1971,87	0,19
120,00	3,84	460,80	105,06	1,50	17720,00	1855,63	0,22
120,00	4,45	534,00	102,69	2,00	15940,00	1669,23	0,27
120,00	5,17	620,40	99,89	2,50	14510,00	1519,48	0,34
120,00	5,44	652,80	98,84	3,00	12740,00	1334,13	0,40

La tabla presenta un resumen de las mediciones registradas durante la prueba de carga. Para formar la curva par-velocidad, se consideran los valores del torque T_{ind} para el eje X y los valores de velocidad $Wm_{rad/s}$ para el eje Y, lo que da como resultado la curva característica presentada en la Figura 81 que se muestra a continuación.

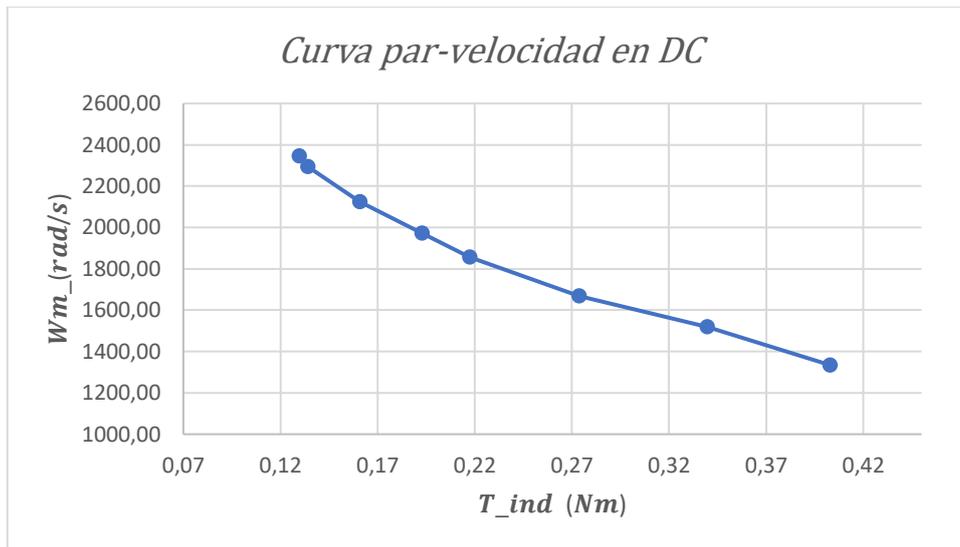


Fig.81: Curva par- velocidad de motor universal en DC.
Fuente: autor.

La curva par-velocidad obtenida guarda relación con la teoría y con los resultados obtenidos en las simulaciones, principalmente en la forma de la curva. Sin embargo, se puede encontrar diferencias en los datos medidos, las cuales son producidas por las condiciones reales en las que se realizan la prueba, generando mayores valores de toque debido a la carga natural del generador, la fricción y el rozamiento producidos durante el movimiento de los motores, entre otras variables. Además, la curva par-velocidad generada indica que a medida que se aumenta el par en el motor, la velocidad se ve reducida y viceversa.

3.3.2 Prueba de carga en AC

Una vez realizada la correcta conexión de motor y el generador, se conectan los sensores necesarios para el registro de mediciones con corriente directa. Se utiliza un sensor PZEM 004t, el cual mide las diferentes variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia, frecuencia, factor de potencia y energía. Para la medir la velocidad, se utiliza un sensor de efecto hall con un imán de Neodimio, al igual que en DC, y para controlar la inyección de corriente en el campo del generador, se utiliza un multímetro. La conexión de todos los componentes para este ensayo se puede visualizar en la Figura 82 que se presenta a continuación.



Fig.82: Conexión de elementos para la prueba de carga en AC.
Fuente: autor.

Se registran las variables al igual que en la prueba de carga con corriente directa. Primero se energiza el motor con un voltaje de 110 V, valor cercano al valor nominal. Luego, se realiza la primera medición de todos los parámetros sin aplicar corriente de campo al generador y sin carga conectada. Cuando se conecta la carga, se realizan las mediciones variando la corriente de campo del generador cada 0.5 A, desde 0 a 3 A, valor de corriente en cual el motor alcanza un valor de corriente cercano al nominal. En la Figura 83 se puede visualizar una de las mediciones registradas durante el ensayo.

RPM	rpm	Voltage	V	Current	A	Power	W	Energy	kWh
16860	rpm	105.40	V	5.15	A	532.80	W	0.057	kWh
16860	rpm	105.40	V	5.19	A	535.90	W	0.057	kWh
16860	rpm	105.40	V	5.19	A	535.90	W	0.058	kWh
16860	rpm	105.40	V	5.18	A	535.90	W	0.058	kWh
16860	rpm	105.20	V	5.15	A	531.40	W	0.058	kWh
16800	rpm	105.80	V	5.19	A	537.70	W	0.058	kWh

Fig.83: Registro de mediciones de prueba de carga en AC en monitor serie.
Fuente: autor.

Las mediciones se registran de forma automática en el sensor PZEM 004t y se reflejan en el monitor serie del software CoolTeem, mientras son almacenadas en el mismo, para luego ser exportadas a Excel en formato txt. Además, al igual que en la prueba de carga con corriente directa, se debe llevar un control de los momentos en los que se producen las variaciones en la corriente de campo del generador. Así mismo, se deben realizar los cálculos de voltaje de armadura E_A utilizando la ecuación 14, la cual considera la reactancia del motor la cual afecta al funcionamiento de este cuando se alimenta con corriente alterna. Por otro lado, el torque T_{ind} del motor se calcula mediante la ecuación 13, y para la conversión de

unidades de la velocidad se utiliza la misma ecuación que en la prueba con corriente continua. Con los resultados registrados y calculados, se estructura la Tabla 20 en la que se presenta un resumen del registro de mediciones y cálculos de la prueba de carga con corriente alterna.

Tabla 20

Registro de mediciones de la prueba de carga en AC

V_T (V)	I_A (A)	P (W)	I_A (A)	E_A (V)	Wm_{rpm}	$Wm_{rad/s}$	T_{ind} (Nm)
110,00	3,07	329,10	0,00	87,71	22980,00	2406,46	0,11
110,00	3,13	335,20	0,00	87,28	22800,00	2387,61	0,11
110,00	3,54	374,90	0,50	84,30	20880,00	2186,55	0,14
110,00	3,96	416,30	1,00	81,25	19050,00	1994,91	0,16
110,00	4,37	457,20	1,50	78,27	18000,00	1884,96	0,18
110,00	5,16	532,00	2,00	72,54	16860,00	1765,58	0,21
110,00	5,55	569,60	2,50	69,71	15960,00	1671,33	0,23
110,00	5,89	601,70	3,00	67,24	14760,00	1545,66	0,26

Con los cálculos de T_{ind} y la conversión de velocidad presentados en la tabla, se estructura la curva par-velocidad del motor universal alimentado con corriente alterna. Además, si se requiere el registro de datos completo en corriente alterna, revítese el Anexo Q. La curva resultante de la prueba de carga en corriente directa se puede visualizar en la Figura 84 presentada a continuación.

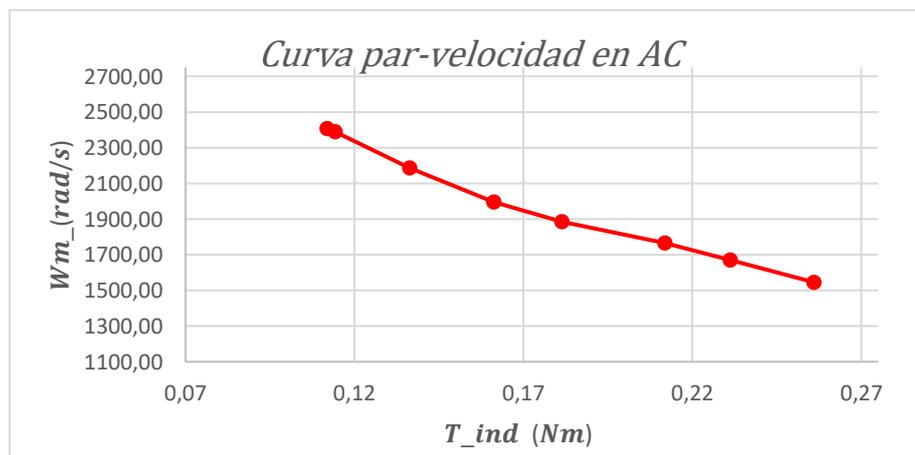


Fig.84: Curva par-velocidad de motor universal en AC.
Fuente: autor.

La curva par-velocidad obtenida con corriente alterna cuenta con una forma similar a la generada mediante las simulaciones, al igual que la curva producida en la prueba de carga con corriente continua. Sin embargo, al analizar los resultados, se observan valores de torque menores con corriente alterna en comparación con los obtenidos con alimentación con

corriente continua, a pesar de alcanzar velocidades similares. Por lo tanto, es necesario realizar una comparativa que permita explicar por qué se producen las diferencias en las características del motor con sus diferentes tipos de alimentación.

3.3.3 Prueba de carga AC-DC

Con los resultados obtenidos de las pruebas de carga en corriente directa y corriente alterna, se realiza una comparativa de resultados, ajustando estos para poder estructurar de forma adecuada las curvas par-velocidad del motor universal en AC y DC. Se consideró que la curva debe realizarse en base a una misma velocidad o con velocidades aproximadas para los dos tipos de alimentación. Por lo tanto, se realizó la prueba DC a 120 V y la prueba AC a 110 V, valores aplicados en las pruebas realizadas anteriormente, ya que con dichos valores de suministro se logra aproximar las velocidades a un valor en común.

Tomando como referencia la velocidad en rad/s y los valores de torque inducido para los dos tipos de alimentación de forma independiente, se forman las curvas par-velocidad del motor universal caracterizado, dando como resultado las curvas de la velocidad respecto al torque de la máquina presentados en la Figura 85 que se muestra a continuación.

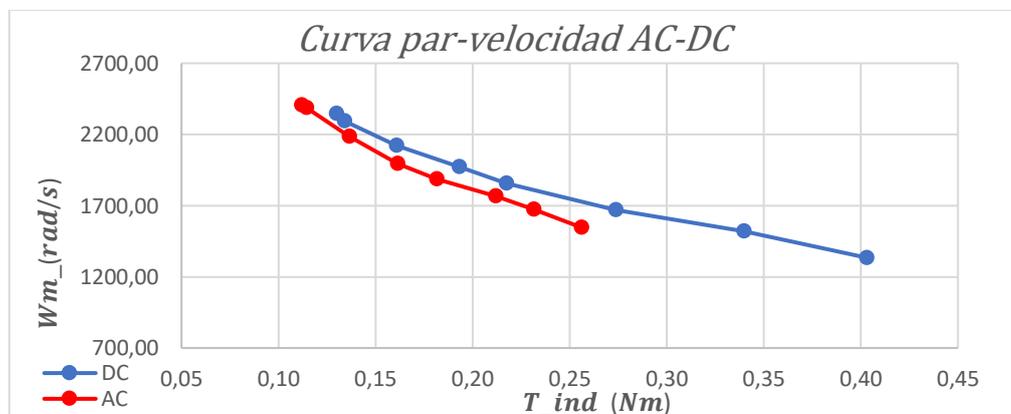


Fig.85: Comparación de las curvas par-velocidad del motor universal en AC y DC.
Fuente: autor.

Se puede observar que la curva obtenida con corriente directa está por encima de la curva con corriente alterna, lo que indica que difieren entre sí. Esto ocurre debido a que los devanados del rotor y el estator conectados en serie tienen una reactancia significativamente alta, y una parte considerable del voltaje se pierde debido a esta reactancia, lo que resulta en una disminución del voltaje de armadura E_A y, por ende, una reducción en la velocidad. Esto afecta el valor de torque calculado, dando como resultado valores menores en comparación con los obtenidos en corriente directa, donde la reactancia no interviene debido a que la corriente continua fluye en una dirección de forma constante y no experimenta cambios durante su operación. Por lo tanto, este factor solo se considera en corriente alterna.

Por otro lado, en corriente alterna el voltaje pico es el producto entre el voltaje rms y $\sqrt{2}$, lo que afecta directamente a la saturación de la máquina, haciendo que esta ocurra en un valor cercano a su corriente pico. Además, dicha saturación puede disminuir considerablemente el flujo rms del motor, reduciendo el par inducido del motor con el incremento de los niveles de corriente. Sin embargo, se debe considerar que la reducción del flujo magnético provoca un aumento en la velocidad y esto puede mitigar parcialmente los efectos de disminución causados por los factores antes mencionados. Esto se pudo constatar en la prueba de carga en AC, en la que se alcanza una velocidad considerablemente alta, siendo incluso mayor que la obtenida en DC al aplicar el mismo nivel del voltaje. Esto ameritó una reducción de voltaje en la prueba con corriente alterna, como se mencionó anteriormente, para lograr un mismo nivel de velocidad necesario para realizar esta comparativa.

De esta forma, se pudo establecer que el motor en corriente directa tiene un mayor rendimiento de par en comparación con los valores obtenidos en corriente alterna, logrado producir mayores valores de par en DC. Además, se corrobora que el motor universal ofrece un mayor rendimiento en aplicaciones donde se requiere un alto par de arranque o un control preciso de velocidad.

Nota: Las prácticas con el motor, principalmente la de carga, deben realizarse únicamente con los materiales propuestos y siguiendo de forma estricta las indicaciones presentadas en los manuales en el Anexo T. Si se realiza un cambio en la carga, se debe tener un control preciso de la corriente para no elevarla, y por ende su potencia, por encima de sus límites. Además, el motor no está diseñado para operar en sobrecarga, por lo que realizar pruebas con cargas mayores a las que puede soportar perjudica el funcionamiento y acorta la vida útil de la máquina por el calentamiento y los sobreesfuerzos mecánicos.

3.4 Curvas mediante osciloscopio

El osciloscopio Hantek 6002BE utilizado para esta prueba es una herramienta digital, la cual permite visualizar las formas de onda de voltaje, corriente y frecuencia con los distintos tipos de alimentación. En el estudio del motor universal, como complemento a las curvas características obtenidas, se realizan mediciones de corriente y voltaje producidas por el motor mientras se encuentra en operación, con carga. y sin carga conectada a este. Por lo tanto, se toman las consideraciones necesarias, como el cambio de la punta de medición común por una pinza diferencial para mediciones con valores de corriente más altos. Otras consideraciones que se tomaron para realizar las pruebas incluyen:

- Para la medición de voltaje, se usa la pinza diferencia con la escala x50 y en el software x100, lo que origina que el voltaje suministrado al motor se vea duplicado en la medición obtenida en el software. Para las pruebas sin carga y con carga se aplica un voltaje de 60 V tanto en AC como en DC, reflejándose la medición en el software en un valor de aproximadamente 120 V.
- Para realizar la medición de corriente, se utiliza una pinza amperimétrica con una relación de 10mV/A, esto debido a que el osciloscopio utilizado en las pruebas registra mediciones únicamente en voltios. Además, la escala en el software se mantiene en x1 para esta medición.
- Para verificar las variaciones de voltaje y corriente al conectar una carga, se conecta una luz led de 10 W, teniendo la carga mínima del generador y la carga luminosa. Además, al variar la corriente de campo del generador se produce una mayor carga, dando como resultado una pequeña caída de tensión, un incremento de corriente y pequeñas distorsiones en las formas de onda, principalmente en corriente directa.
- Se seleccionan los canales para corriente y voltaje, los cuales se diferencian por el color mostrado en el monitor, teniendo en color amarillo el canal 1 utilizado para las mediciones de voltaje y en color verde el canal 2 para las mediciones de corriente. Esto aplica para todas las mediciones realizadas con el osciloscopio.

Una vez tomadas las consideraciones necesarias para realizar las mediciones, se presentan los resultados de las formas de onda obtenidos. Se inicia con las curvas sin carga en corriente alterna y corriente continua, dando como resultado las curvas mostradas en la Figura 86, donde la parte a) corresponde a las curvas de corriente alterna y la parte y b) a las curvas de corriente continua.

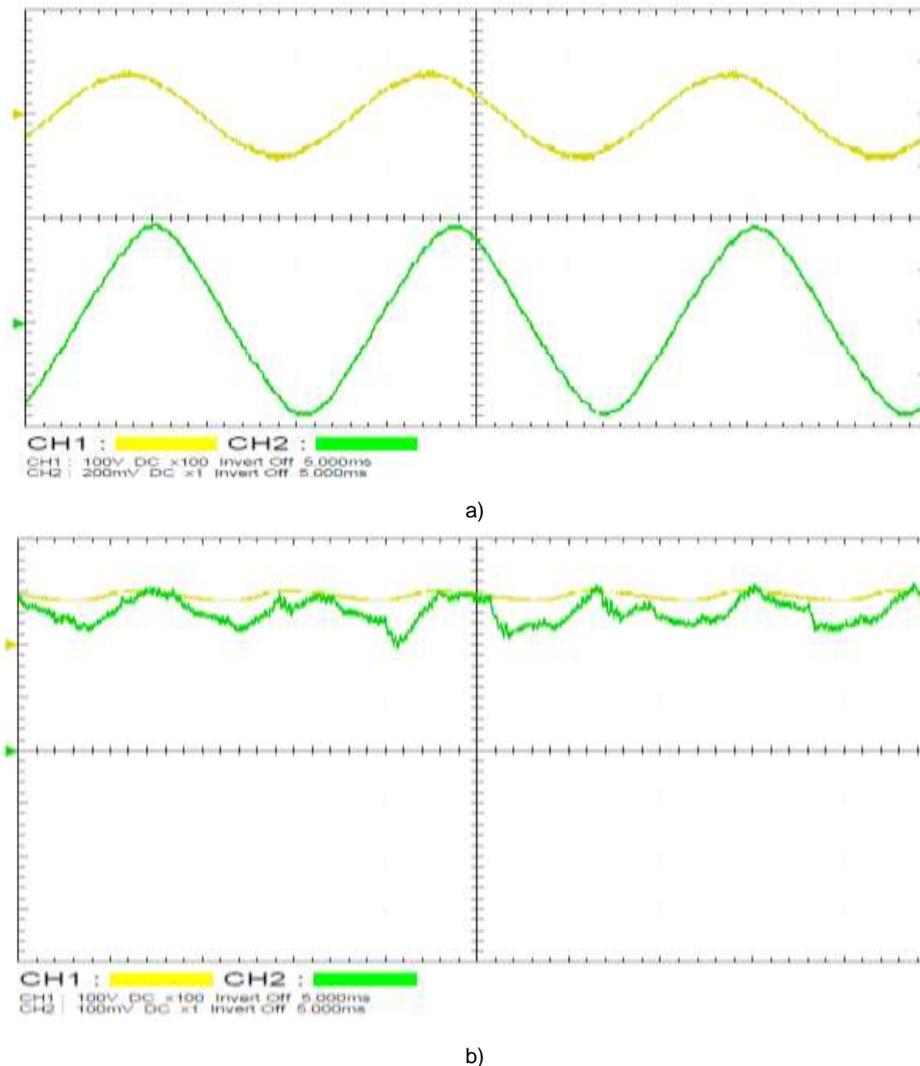
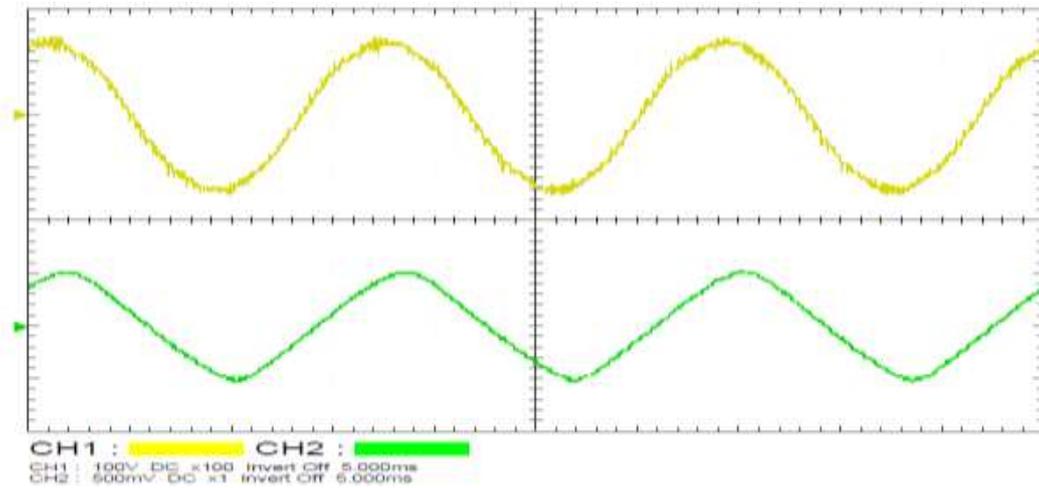
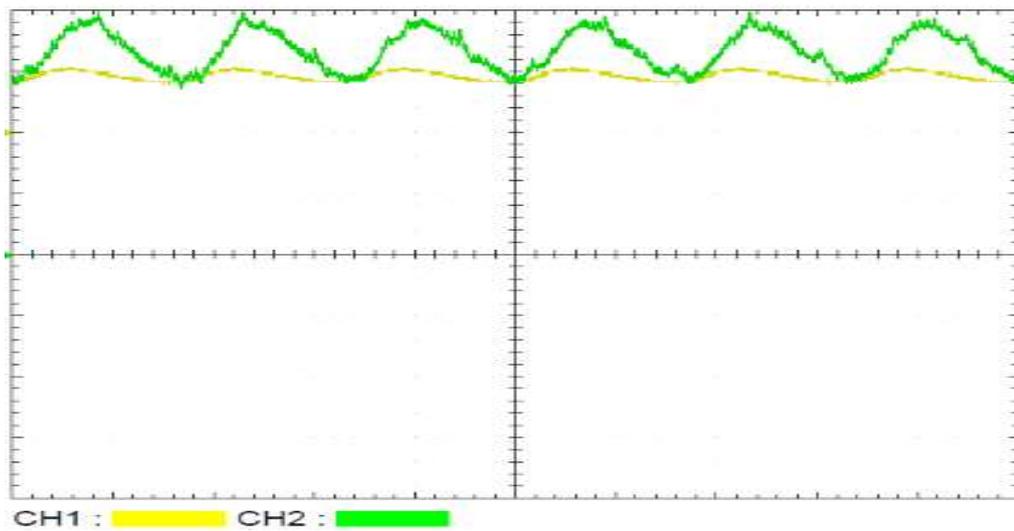


Fig.86: Curvas de corriente y voltaje sin carga con osciloscopio, a) AC y b) DC.
Fuente: autor.

Los datos medidos se pueden visualizar y comprobar en el Anexo R. Además, al analizar las curvas obtenidas sin carga, se puede observar que las formas de onda en corriente alterna tienen una forma sinusoidal tanto para la corriente como para el voltaje, lo que indica un funcionamiento eficiente y estable con ese tipo de alimentación. Por otro lado, en corriente directa las curvas de corriente y voltaje deberían presentarse en una línea recta o de forma constante, a pesar de ello, se encuentran ciertas distorsiones en las ondas, principalmente en la forma de onda de corriente. Esto es debido al voltaje de rizado producido por el circuito rectificador y los efectos causados por la inductancia del motor, lo que provoca ciertas deformaciones en las ondas debido a su naturaleza reactiva. Por otro lado, para las mediciones con carga se tomaron las consideraciones necesarias, dando como resultado las curvas mostradas en la Figura 87, donde se representa la parte a) AC y b) DC.



a)



b)

Fig.87: Curvas de corriente y voltaje con carga con osciloscopio, a) AC y b) DC.
 Fuente: autor.

Los resultados medidos con carga y la comprobación de estos se encuentran en el Anexo S. Por otro lado, si se analizan las señales obtenidas tanto de corriente como de voltaje en corriente alterna, se puede observar que el comportamiento de las curvas del motor es similar con carga y sin carga, variando más en magnitud que en forma, aumentando la corriente y provocando una ligera caída de voltaje cuando el motor opera con carga. Por otro lado, las señales de corriente y voltaje en corriente continua presentan ciertas alteraciones en su forma, especialmente la señal de corriente como en la prueba señal sin carga. Se aprecia incluso que la señal exhibe picos de deformación ligeramente más elevados, pero se genera de forma más constante. Si se requiere realizar una comparativa con las señales propias de una fuente DC, se puede consultar el Anexo T, donde se presentan las señales de voltaje y corriente del motor, al aplicar el voltaje máximo de la fuente DC utilizada, establecido en un valor aproximado a los 30 V.

El desarrollo de pruebas experimentales para evaluar el funcionamiento del motor universal fue de gran relevancia, ya que permitió comprender el comportamiento de la máquina mediante un análisis realizado al someter al motor a diferentes condiciones de operación. Se llevaron a cabo diversas pruebas, como la de circuito abierto, cortocircuito, prueba de carga en AC y DC, así como la obtención de curvas mediante un osciloscopio. Estas pruebas permitieron reconocer las características de magnetización y operación de la máquina, tanto con carga como sin carga, y entender cómo se generan sus parámetros eléctricos y mecánicos, así como las posibles alteraciones en su funcionamiento. Además, se realizó un análisis gráfico mediante curvas basadas en los resultados obtenidos y mediante el uso del osciloscopio.

Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica, se desarrolla un conocimiento teórico sólido del motor universal, logrando una comprensión completa y descripción detallada del funcionamiento, partes, características, parámetros técnicos y tipos de pruebas del motor. Esto permitió determinar las pruebas necesarias para evaluar al motor: prueba de circuito abierto, prueba de cortocircuito y prueba de carga en AC y DC. De igual forma, se establecieron los diferentes parámetros del motor a evaluar que varían entre, parámetros eléctricos y mecánicos como: voltaje, corriente, velocidad, par, entre otros.

El diseño e implementación del banco de pruebas se desarrolló en base a los valores nominales del motor universal que se está evaluando y las pruebas prácticas seleccionadas. Esto resultó en la adecuada dimensión y selección de materiales, así como el desarrollo eficaz de los diagramas de conexión, diagrama de control, de arranque y general, logrando implementar un banco de pruebas adecuado para evaluar de forma práctica al motor universal. De igual forma, se realizaron simulaciones en los programas Matlab y FEMM que permitieron verificar el funcionamiento en circunstancias ideales de operación y en diferentes condiciones de prueba. Los resultados obtenidos mediante circuitos, tablas y gráficos concuerdan con las pruebas realizadas con el prototipo implementado.

El análisis práctico permitió determinar diferentes características de funcionamiento del motor. La prueba de circuito abierto determinó diferentes características magnéticas del motor, como los puntos de saturación, la cual se alcanza en los 5.5 A, valor establecido entre los de corriente nominal del motor, de 5 a 6.5 A. Por otro lado, la prueba de cortocircuito complementó las características magnéticas al determinar las capacidades de corriente tanto de la armadura como del campo del motor, logrando alcanzar la corriente máxima del motor en la armadura con el campo apenas en 1.2 A. La prueba de carga en AC y DC permitió verificar el funcionamiento del motor al conectarse a una carga, encontrando que a medida que se aumenta el torque se reduce la velocidad sin importar el tipo de alimentación. Sin embargo, al alimentar el motor con corriente directa el motor alcanza una mayor generación de par. En AC se alcanza el límite de corriente en un valor de torque de 0.26 Nm, mientras que en DC se alcanza a este límite con un torque de 0.40 Nm. Además, en los diferentes intervalos de medición, el torque siempre se muestra mayor en DC. Los resultados prácticos con los de simulación se muestran similares pese a algunos factores adicionales como las pérdidas por fricción y rozamiento, pérdidas por conmutación, sensibilidad de elementos de control y fuerza, y la disposición física de los diferentes elementos del banco de pruebas.

Recomendaciones

El enfoque del trabajo de investigación realizado se centra en las características magnéticas y de funcionamiento con una carga conectada, dejando a un lado aspectos importantes en estas máquinas como lo es el control de velocidad por las altas revoluciones que se tiende a alcanzar. Se recomienda para futuros estudios la implementación de un control de velocidad a través de un mecanismo PID o mediante DIACS Y TRIACS, con el propósito de analizar las características operativas del motor con una velocidad menor y controlada, y reduciendo de esta forma el desgaste en las escobillas y del conmutador del motor.

Otros estudios que se recomienda realizar con el motor universal son los de vibraciones y ensayos de temperatura del motor. De esta forma, se puede descartar fallos potenciales, pérdidas excesivas y verificar el funcionamiento adecuado dentro de las normas y estándares establecidos para una operación eficiente de la máquina.

Para realizar los ensayos prácticos con el motor universal, se recomienda de forma estricta revisar de forma previa las indicaciones propuestas en los manuales de usuario y prácticas, y el de mantenimiento de ser necesario. Esto con el propósito de evitar realizar conexiones que puedan afectar a las máquinas y el resto de los componentes, y contar con una guía detallada para realizar de forma correcta y precisa cada una de las prácticas.

Bibliografía

- AEMT. (2003). *El Efecto de la Reparación/Rebobinado en la Eficiencia del Motor Estudio de Rebobinado EASA/AEMT y Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor*. https://www.motronic.es/upfiles/taller_img/files/reparacion-y-rebobinado-de-motores-ac-es_1921.pdf
- Airboman, A. (2020). A comparative analysis on the performance of universal motor when driven by alternating current/direct current. *Department of Electrical/Electronic Engineering*.
https://www.researchgate.net/publication/348190623_A_comparative_analysis_on_the_performance_of_universal_motor_when_driven_by_alternating_currentdirect_current
- Alibaba. (2023). *220v High Power Brushless Electric Generator Motor Welding Single-phase Ac Generator - Buy Electric Generator Motor,Single-phase Ac Generator,Electric Motor Generator Product on Alibaba.com*. https://www.alibaba.com/product-detail/220V-High-Power-Brushless-Electric-Generator_1600698277950.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.18302431WO03OM
- AliExpress. (2023a). *Indicador de capacidad de batería PZEM-015, 200v, 50a, 9 en 1, potencia de cc, Kwh, resistencia de impedancia SOC, amperímetro Digital, voltímetro, medidor de energía - AliExpress Herramientas*.
<https://es.aliexpress.com/i/1005001658423659.html>
- AliExpress. (2023b). *Medidor de corriente CC PZEM-017, interfaz RS485, voltímetro Modbus, vatímetro de energía de 0-300V, 50A/300A, Cable USB de derivación - AliExpress*.
https://es.aliexpress.com/item/32969025453.html?gps-id=platformRecommendH5&scm=1007.18499.231170.0&scm_id=1007.18499.231170.0&scm-url=1007.18499.231170.0&pvid=3bbaba49-6679-4592-a6ad-eb271e9bddb6&_t=gps-id%3AplatformRecommendH5%2Cscm-url%3A1007.18499.231170.0%2Cpvid%3A3bbaba49-6679-4592-a6ad-eb271e9bddb6%2Ctpp_buckets%3A668%232846%238111%231996&pdp_ext_f=%7B%22sceneld%22%3A%228499%22%2C%22sku_id%22%3A%2266631578874%22%7D&browser_id=d621f0806f9c43b78178995139731b26&aff_trace_key=&aff_platform=m site&m_page_id=00117c76f2dc0a17d0dc62f16249cb6a31b0d821ea&gclid=&gatewayAdapt=Msite2Pc
- AliExpress. (2023c). *Peacefair-Medidor de energía eléctrica, dispositivo de medición de*

- corriente de voltaje 100A, voltaje de vatios Kwh, frecuencia de Factor de potencia, bobina CT, RS485 Modbus, PZEM-016 - AliExpress. <https://es.aliexpress.com/item/32862049796.html>
- AliExpress. (2023d). PZEM-031, voltímetro, amperímetro, CC 6,5-100V, 4 en 1, LCD, medidor de consumo de energía y corriente - AliExpress. <https://es.aliexpress.com/i/32413784036.html>
- AliExpress. (2023e). Taidacent-módulo De Sensor Hall Lm393 3144, Sensor De Efecto Hall Para Contador De Medición De Velocidad, Sensor De Posición De Efecto Hall, 25 Uds. - Accesorios lot - AliExpress. <https://es.aliexpress.com/i/4000338299612.html>
- Amazon. (2023). TOMPAR Condensadores 28PCS-2PCS 400v 1000uf 1000uf 400v1000uf condensador electrolítico volumen 1.378 * 2.362 in hongpingzhou (tamaño : 9PCS) : Industrial y Científico. <https://www.amazon.com/-/es/dp/B0C3LSF9WY>
- Arduino. (2019). New PZEM004T v3.00 and power flow direction - Using Arduino / Sensors - Arduino Forum. <https://forum.arduino.cc/t/new-pzem004t-v3-00-and-power-flow-direction/597264/3>
- ARDUINO. (2023). ARDUINO – Blog de Tecnologías. <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/rsuagued/arduino/>
- BUN-CA. (2011). Manual Técnico: Motores eléctricos (Vol. 1). <https://www.bun-ca.org/wp-content/uploads/2019/02/Motores.pdf>
- Chapman, S. (2012). Máquinas eléctricas (Quinta edición) (5th ed.). <https://ia803201.us.archive.org/8/items/266539159MaquinasElectricasChapman5taEdicionPdf/266539159-Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf>
- EcoGreenSolar. (2023). Luminaria Alumbrado Público 300W | Eco Green Solar. <https://www.ecogreensolar.co/producto/luminaria-alumbrado-publico-300w/>
- EEVAD. (2023). RESISTENCIA 700W 230V 180X185MM. <https://www.eevad.com/es/resistencia-700w-230v-180x185mm-2-8569.html>
- ElectroniLab. (2023). Sensor de Efecto Hall Magnético KY-003 - Electronilab. <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-efecto-hall-magnetico-ky-003/>
- FERRELECTRICA. (2023). Selector tipo pacco 3 posiciones 3 Polos 20a 1-0-2 | Ferrelectrica SPA. <https://www.ferrelectrica.cl/product/selector-tipo-pacco-3-posiciones-3-polos-20a-1-0-2>

- Flores, L., López, E., Gaytan, J., & Rodríguez, L. (2014). *Aproximación exponencial para cálculo de capacitor en rectificador de onda completa*. 108.
- García, G. (2015). *EL MOTOR UNIVERSAL* . <https://es.scribd.com/doc/315180162/universal-motor-pdf>
- GeekFactory. (2017, May 29). *LCD 16x2 por I2C con Arduino usando solo dos pines* - Geek Factory. Tutoriales Arduino . <https://www.geekfactory.mx/tutoriales-arduino/lcd-16x2-por-i2c-con-arduino/>
- GETMYUNI. (2015). *Starting Methods for Single-phase Induction Motor*. https://getmyuni.azureedge.net/assets/main/study-material/notes/electrical-engineering_engineering_basic-electrical-technology_starting-methods-for-single-phase-im_notes.pdf
- Gonzaga & Rodriguez. (2023a). *Luces Piloto LED CAMSCO 22mm* - Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda. <https://electricoindustrial.com.ec/producto/luces-piloto-led-camsco-22mm/>
- Gonzaga & Rodriguez. (2023b). *Luz Piloto LED SIEMENS SIRIUS ACT 22mm* - Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda. <https://electricoindustrial.com.ec/producto/luz-piloto-led-siemens-sirius-act-22mm/>
- Gonzaga, & Rodriguez. (2023). *Selector CAMSCO Plástico 3 posiciones 22mm* - Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda. <https://electricoindustrial.com.ec/producto/selector-camsco-plastico-3-posiciones/>
- Hernández, T., Campos, A., Domínguez, J., Herrera, A., Chiñas, M., & Sadot del Angel, H. (2008). EXPERIENCIA EDUCATIVA DE MÁQUINAS ROTATORIAS DE CORRIENTE DIRECTA . *Manual de Prácticas* .
- HIGH-TEC. (2023). *X2 Puente Diodo Rectificador 1000v 6a 6 Amp Recto Rs607 Htec*. https://hightecelelectronica.mercadoshops.com.ar/MLA-902539537-x2-puente-diodo-rectificador-1000v-6a-6-amp-recto-rs607-htec-_JM
- INSELEC. (2023). *SELECTOR 3 POS. (Ref: V-1200)*. <https://inselec.com.ec/store/inicio/1837-selector-3-pos-ref-v-1200-.html>
- MADE. (2023). *AC Universal Motor for Blender with EMC and Capacitor - China Meat Grinder Motor and Mix Belnder Motor*. <https://fine-watt.en.made-in-china.com/product/iSBERQkrvhYu/China-AC-Universal-Motor-for-Blender-with-EMC-and-Capacitor.html>

- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*. 3. www.FreeLibros.me
- Oriol Planas. (2018). ¿Qué es un motor serie? Características y aplicaciones. *DEMOTOR*. <https://demotor.net/motores-electricos/motores-corriente-continua/motor-serie>
- Pozueta, M. (2009). ENSAYOS PARA EL RENDIMIENTO DE UN MOTOR ASÍNCRONO
Resistencias de aislamiento: $R_{U-V} = \frac{M}{U}$ $R_{V-W} = \frac{M}{U}$ $R_{W-U} = \frac{M}{U}$
 $R_{U-C} = \frac{M}{U}$ $R_{V-C} = \frac{M}{U}$ $R_{W-C} = \frac{M}{U}$. *Ensayo Para El Rendimiento de Un Motor Asíncrono*.
[https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Hoja ensayos motor IEC_Web.pdf](https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Hoja%20ensayos%20motor%20IEC_Web.pdf)
- Qi, H., Ling, L., Jichao, C., & Wei, X. (2020). Design and research of deep slot universal motor for electric power tools. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1604–1615. <https://doi.org/10.1007/S43236-020-00131-6>
- Quevedo, A. (2010). *EL MOTOR UNIVERSAL*. Repara Tu Mismo. <http://repara-tu-mismo.webcindario.com>
- Rojas, Y., Amanzo, R., & Gomez, J. (2015). *Ensayo laboratorio de maquinas electricas - Motores DC - DOKUMEN.TIPS*. <https://dokumen.tips/documents/ensayo-laboratorio-de-maquinas-electricas-motores-dc.html?page=1>
- RSlogo. (2023). *C14G10 Eaton | Fusible de cartucho Eaton C14G10 10A Cerámica, 14 x 51mm | 703-8428 | RS Components*. <https://export.rsdelivers.com/es/product/eaton/c14g10/fusible-de-cartucho-eaton-c14g10-10a-ceramica-14-x/7038428>
- Schneider Electric. (2023). *A9F85210 - Interruptor Termomagnético Riel Acti 9 iC60H 2P 10 A D curve 10 kA (IEC 60898-1) 15 kA (IEC 60947-2) | Schneider Electric Perú*. <https://www.se.com/pe/es/product/A9F85210/interruptor-termomagnético-riel-acti-9-ic60h-2p-10-a-d-curve-10-ka-iec-608981-15-ka-iec-609472/>
- SDielect. (2023). *MODULO PZEM-004T MEDIDOR MULTI-FUNCIÓN - UART*. Magnitudes Eléctricas . <https://ssdielect.com/magnitudes-electricas-1/168-md-pzem-004t.html>
- SDielect. (2023). *KBU1010 PUENTE DE DIODOS 1000V 10A*. <https://ssdielect.com/electronica-de-potencia/1326-kbu1010.html>
- Solarduino. (2020a). *PZEM-014 or 016 AC Energy Meter with Arduino – A blog about DIY solar and arduino projects*. <https://solarduino.com/pzem-014-or-016-ac-energy-meter-with-arduino/>

- Solarduino. (2020b). *PZEM-017 DC Energy Meter with Arduino – A blog about DIY solar and arduino projects*. <https://solarduino.com/pzem-017-dc-energy-meter-with-arduino/>
- THIDO. (2023). *Display LCD 16x2 Con Retroiluminación Pantalla Azul*. THIDO - Display LCD 16x2 Con Retroiluminación Pantalla Azul. <https://www.electronicathido.com/detallesProducto.php?id=dE5YQjJ5YXFjaCtaK0w0VIpjS2VKdz09>
- Tonato, P. (2017). *Partes Constructivas* | PDF. <https://es.scribd.com/document/348968434/Partes-Constructivas>
- Trocel, D. (2017). *PERFIL TÉRMICO EN MOTORES ELÉCTRICOS*. <https://es.linkedin.com/pulse/perfil-térmico-en-motores-eléctricos-david-trocel>
- Universidad Nacional de la Plata. (2009). *Electricidad Basica*. https://www.trabajosocial.unlp.edu.ar/uploads/docs/electricidad_basica_ii.pdf
- Universidad Nacional de la Plata. (2022). *Motores Eléctricos*. In *Fichas Educativas* . <https://wordpress-test.cespi.unlp.edu.ar/wp-content/uploads/32/33732/cbe4aba99c3a4eccc904dd2c666d1f03.pdf>
- Vargas, H. (2018). *Equivalencia de corriente alterna a corriente directa - Código IoT*. <https://www.codigoiot.com/base-de-conocimiento/equivalencia-de-corriente-alterna-a-corriente-directa/>
- WEG. (2015). *Motores | Automatización| Energía | Trasmisión & Distribución | Pinturas*. www.weg.net
- WEG. (2018). *MOTORES ELÉCTRICOS: Guía de Especificación* . https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6862/mod_resource/content/1/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf
- WEG. (2021). *GUÍA DE ESPECIFICACIÓN MOTORES ELÉCTRICOS. WEG: MOTORES ELÉCTRICOS*. <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- WEG. (2023). *Maniobra y Protección de Motores y Circuitos Eléctricos*.
- WINSTAR. (2023). *Pantalla LCD 128x64, Pantalla Serial LCD 128x64 - Winstar Display*. <https://www.winstar.com.tw/es/products/graphic-lcd-display-module/dot-lcd-display.html>
- ZloTRobotik. (2023). *Medidor De Batería Pzem-015* . <https://abbaster.com/ziotrobotik/category/21/product/487>

Anexos

Anexo A: Tabla de especificaciones de los generadores

Tabla 21

Especificaciones técnicas de generadores

Dispositivo	Valores nominales y/o características	Figura
<p>Motor universal (Generador de excitación Separada)</p>	<p>Voltaje generado: 0-120 VDC Corriente nominal: 5-6.5 A Potencia nominal: 1500 W Velocidad: 29000 rpm +/-15% Frecuencia: 50-60 Hz Par: 20 Nm Clase de aislamiento: B/F Fusible: One shot/recuperable Costo (\$): 70.00</p>	 <p>Fig. 88: Generador de excitación separada. Fuente:(MADE, 2023).</p>
<p>Generador JUQUIANG</p>	<p>Voltaje generado: 0-230 VDC Corriente nominal: 250 A Potencia nominal: 18000 W Velocidad: 3500 rpm Frecuencia: 50-60 Hz Clase de aislamiento: B Costo (\$): 240.00</p>	 <p>Fig. 89: Generador Juquiang. Fuente: (Alibaba, 2023).</p>

Anexo B: Tabla de especificaciones de microcontroladores

Tabla 22

Especificaciones técnicas de microcontroladores

Dispositivo	Valores nominales y/o características	Figura
Arduino Atmega2560	Voltaje operativo: 5 VDC	
	Tensión de entrada: 7-12 VDC	
	Voltaje de entrada (limites): 6-20 VDC	
	Pines digitales: 54 de los cuales 14 son salidas PWM	
	Pines analógicos: 16	
	Corriente DC por pin: 40 mA	
	Corriente DC en pin: 50 mA	
	Memoria Flash: 256 KB	
	SRAM: 8 KB	
	EPROM: 4 KB	
Clock Speed: 16 MHz		
Costo (\$): 30.00		
Voltaje operativo: 5 VDC		
Tensión de entrada: 7-12 VDC		
Voltaje de entrada (limites): 6-20 VDC		
Pines digitales: 14 de los cuales 6 son salidas PWM		
Pines analógicos: 6		
Corriente DC por pin: 40 mA		
Corriente DC en pin: 50 mA		
Memoria Flash: 32 KB		
SRAM: 2 KB		
EPROM: 1 KB		
Clock Speed: 16 MHz		
Costo (\$): 21.00		

Fig. 90: Arduino Atmega 2560.
Fuente: (ARDUINO, 2023).

Fig. 91: Arduino UNO.
Fuente: (ARDUINO, 2023).

Anexo C: Tabla de especificaciones de pantallas LCD

Tabla 23

Especificaciones técnicas de pantallas LCD

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
LCD (16X2)	Interfaz: IIC/I2C	
	Pantalla: STN, Reflective, azul (-)	
	Voltaje operativo: 5 VDC	
	Fonde de luz: Azul	
	Resolución: 16x2 (caracteres x línea)	
	Área de visualización: 6.5x1.5cm Costo (\$): 7.50	
LCD (128X64)	Interfaz: IIC/I2C	
	Pantalla: STN, Reflective, azul (-)	
	Voltaje operativo: 3.3 – 5 VDC	
	Fonde de luz: Azul	
	Resolución: 128x64 (caracteres x línea)	
	Área de visualización: 9.3 x 7.0 cm Costo (\$): 22.00	

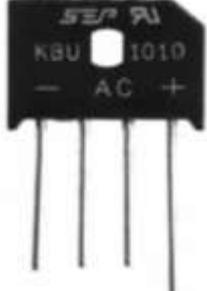
Fig. 92: Pantalla LCD 16x2.
Fuente: (THIDO, 2023).

Fig. 93: Pantalla LCD 128X64.
Fuente: (WINSTAR, 2023).

Anexo D: Tabla de especificaciones de rectificadores

Tabla 24

Especificaciones técnicas de rectificadores

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
Rectificador SEP KBL-1010	Voltaje de pico: 1000 V	 <p>Fig. 94: Rectificador KBL-1010. Fuente: (SDielect, 2023).</p>
	Corriente pico: 10 A	
	Voltaje RMS: 560 V	
	Voltaje DC pico: 1.1 V	
	Temperatura: 55 a 150°C	
	Tipo de diodo: Fase única	
	Encapsulado: KBL	
	Número de pines: 4	
	Material: Silicio	
Costo (\$): 6.50		
Rectificador SEP RS-607	Voltaje de pico: 1000 V	 <p>Fig. 95: Rectificador RS-607. Fuente: (HIGH-TEC, 2023).</p>
	Corriente pico: 6 A	
	Voltaje RMS: 560 V	
	Voltaje DC pico: 1.1 V	
	Temperatura: 55 a 150°C	
	Tipo de diodo: Fase única	
	Encapsulado: RS	
	Número de pines: 4	
	Material: Silicio	
Costo (\$): 6.00		

Anexo E: Tabla de especificaciones de capacitores

Tabla 25

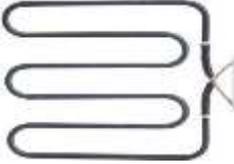
Especificaciones técnicas de capacitores

Dispositivo	Valores nominales y/o características	Figura
<p>Capacitor 2200 uF</p>	<p>Voltaje pico: 250 V Capacitancia: 2200 uF Temperatura de operación: 0 a 105° C Tolerancia de capacitancia: ±20% Marca: JCCON Costo (\$): 4.50</p>	 <p>Fig. 96: Capacitor 2200 uF. Fuente: (HIGH-TEC, 2023).</p>
<p>Capacitor 1000 uF</p>	<p>Voltaje pico: 400 V Capacitancia: 1000 uF Temperatura de operación: 0 a 105° C Tolerancia de capacitancia: ±20% Marca: Nichicon Costo (\$): 3.00</p>	 <p>Fig. 97: Capacitor 1000 uF. Fuente: (Amazon, 2023).</p>

Anexo F: Tabla de especificaciones de las cargas

Tabla 26

Especificaciones técnicas de las cargas

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
<p align="center">Carga calefactora</p>	<p>Voltaje nominal: 120 V Potencia: 700 watts Frecuencia: 60 Hz Temperatura de operación: 0 a 200 °C Resistencia: 32 Ω Costo (\$): 30.00</p>	 <p>Fig. 98: Resistencia calefactora. Fuente: (EEVAD, 2023).</p>
<p align="center">Carga luminosa</p>	<p>Voltaje nominal: 120 V Potencia: 700 watts Frecuencia: 60 Hz Temperatura de operación: 0 a 200 °C Costo (\$): 400.00</p>	 <p>Fig. 99: Resistencia luminosa. Fuente: (EcoGreenSolar, 2023).</p>

Anexo G: Tabla de especificaciones de las protecciones

Tabla 27

Especificaciones técnicas de las protecciones

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
<p>Disyuntor EBASEE</p>	<p>Voltaje nominal: 110/ 220 V Corriente máxima: 10 A Tipo de protección: Termomagnética Número de polos: 2 Normas de diseño: IEC 60898 Marca: EBASEE Costo (\$): 10.00</p>	 <p>Fig. 100: Disyuntor termomagnético Ebasee Fuente: (Alibaba, 2023).</p>
<p>Disyuntor SCHNEIDER</p>	<p>Voltaje nominal: 110/ 220 V Corriente máxima: 10 A Tipo de protección: Termomagnética Número de polos: 2 Normas de diseño: IEC 60947-2 Marca: Schneider Costo (\$): 60.00</p>	 <p>Fig. 101: Disyuntor termomagnético Schneider. Fuente: (Schneider Electric, 2023).</p>
<p>Fusible EATON</p>	<p>Voltaje máximo: 500 V Corriente máxima: 10 A Normas de diseño: IEC 60269 Material: Cerámico Marca: EATON Costo (\$): 2.00</p>	 <p>Fig. 102: Fusible EATON. Fuente: (RSlogo, 2023).</p>
<p>Fusible SCHNEIDER</p>	<p>Voltaje máximo: 500 V Corriente máxima: 10 A Normas de diseño: IEC 60269 Material: Cerámico Marca: SCHNEIDER Costo (\$): 8.00</p>	 <p>Fig. 103: Fusible SCHNEIDER. Fuente: (RSlogo, 2023).</p>

Anexo H: Tabla de especificaciones de selectores de 3 posiciones

Tabla 28

Especificaciones técnicas de selectores de 3 posiciones

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
<p>Selector (2P)</p>	<p>Voltaje máximo: 240 V Corriente nominal: 10 A Tipo de contacto: NA Posiciones: 3 Número de polos: 2 Modelo: ZB2-BE101 Costo (\$): 7.50</p>	 <p>Fig. 104: Selector 2 polos. Fuente: (INSELEC, 2023).</p>
<p>Selector (3P)</p>	<p>Voltaje máximo: 560 V Corriente nominal: 20 A Tipo de contacto: NA Posiciones: 3 Número de polos: 3 Marca: LW26-20 Costo (\$): 16.00</p>	 <p>Fig. 105: Selector 3 polos. Fuente: (FERRELECTRICA, 2023).</p>

Anexo I: Tabla de especificaciones de las luces piloto

Tabla 29

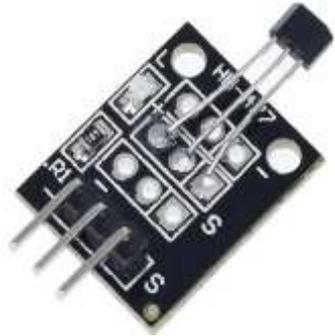
Especificaciones técnicas de luces piloto

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
Luz piloto CAMSCO	Voltaje operativo: 24/120/240 VDC Corriente nominal: 10 A Tamaño: 22 mm Colores: Amarillo, rojo, azul, verde Tipo: Led Marca: CAMSCO Costo (\$): 2.50	 <p data-bbox="1007 719 1390 763">Fig. 106: Luces piloto CAMSCO. Fuente: (Gonzaga & Rodriguez, 2023a).</p>
Luz piloto SIEMENS	Voltaje operativo: 24/120/240 VDC Corriente nominal: 10 A Tamaño: 22 mm Colores: Amarillo, rojo, azul, verde Tipo: Led Marca: SIEMENS Costo (\$): 12.00	 <p data-bbox="1007 1066 1390 1111">Fig. 107: Luces piloto SIEMENS. Fuente: (Gonzaga & Rodriguez, 2023b).</p>

Anexo J: Tabla de especificaciones de sensores de efecto hall

Tabla 30

Especificaciones técnicas de sensores de efecto hall

Dispositivo	Parámetro	Valores nominales y/o características
Sensor hall KY-003	Voltaje operativo: 4.5 – 24 VDC Voltaje (pull up): 3.3 V o 5 V Corriente de reposo: 3 mA Corriente operativa: 8 mA Temperatura: -40° a 85° C Pines: 3 Dimensiones: 18.5 mm x 15 mm Comparador: 3144 Costo (\$): 2.50	 <p>Fig. 108: Sensor de efecto hall KY-003. Fuente: (ElectroniLab, 2023).</p>
Sensor hall LM-393	Voltaje operativo: 5VDC Voltaje (pull up): 5 V Corriente de reposo: 3 mA Corriente operativa: 8 mA Temperatura: -40° a 85° C Pines: 4 Dimensiones: 27 mm x 14 mm Comparador: 3144 Costo (\$): 3.50	 <p>Fig. 109: Sensor de efecto hall LM-393. Fuente: (AliExpress, 2023e).</p>

Anexo K: Código de programación para PZEM 004t

```

AC_COMPLETO_TESIS Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
AC_COMPLETO_TESIS
#include <PZEM004TV30.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

PZEM004TV30 pzem(8, 9);

int val;
long last=0;
int stat=HIGH;
int stat2;
int contar=0;
int sens=100;
int nPalas=1;
int milisegundo=1000;
int periodo=1000;
unsigned long tiempoA;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13,OUTPUT);
  tiempoA = millis();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.print("PZEM test");
  lcd.print("by miliohm.com");
  delay(500);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  val=analogRead(0);
  if (val>sens)
    stat=HIGH;
  else
    stat=LOW;
  digitalWrite(13,stat);

  if (stat2!=stat){
    contar++;
    stat2=stat;
  }
  if ( (millis() - tiempoA) >= periodo){

```

```

AC_COMPLETO_TESIS Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
AC_COMPLETO_TESIS
  Serial.print("Power: ");
  Serial.print(power);
  Serial.print(" W ");
} else {
  Serial.println("Error reading power");
}

float energy = pzem.energy();
if (current != NAN) {
  Serial.print("Energy: ");
  Serial.print(energy, 3);
  Serial.print(" kWh ");
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print("E:");
  lcd.print(energy);
} else {
  Serial.println("Error reading energy");
}

float frequency = pzem.frequency();
if (current != NAN) {
  Serial.print("Frequency: ");
  Serial.print(frequency, 1);
  Serial.print(" Hz ");
} else {
  Serial.println("Error reading frequency");
}

float pf = pzem.pf();
if (current != NAN) {
  Serial.print("PF: ");
  Serial.print(pf);
  Serial.print(" ");
  lcd.setCursor(6, 0);
  lcd.print("PF:");
  lcd.print(pf);
} else {
  Serial.println("Error reading power factor");
}
Serial.println();
contar=0;
tiempoA = millis();
}
}

```

Anexo L: Código de programación para PZEM 017

```

sketch_jul18b Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

sketch_jul18b $
/* 1- PZEM-017 DC Energy Meter */

#include <ModbusMaster.h>
#define MAX485_DE 2
#define MAX485_RE 3
int val;
long last=0;
int stat=HIGH;
int stat2;
int contar=0;
int sens=250;
int nPulsos=1;
int milisegundos=1000;

static uint8_t pzemSlaveAddr = 0x01;
static uint16_t NewshuntAddr = 0x0003;

ModbusMaster node;
float PZEMVoltage = 0;
float PZEMCurrent = 0;
float PZEMPower = 0;
float PZEMEnergy = 0;
unsigned long startMillisPZEM;
unsigned long currentMillisPZEM;
const unsigned long periodPZEM = 1000;
int page = 1;

/* 2 - LCD Display */

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
unsigned long startMillisLCD;
unsigned long currentMillisLCD;
const unsigned long periodLCD = 1000;
int ResetEnergy = 0;
unsigned long startMillisEnergy;
unsigned long currentMillisEnergy;
const unsigned long periodEnergy = 1000;

void setup()

sketch_jul18b Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

sketch_jul18b $
void setup()
{
    /* 0 General */
    Serial.begin(9600);
    pinMode(13, OUTPUT);
    /* 1- PZEM-017 DC Energy Meter */
    setShunt(0x01);
    // resetEnergy(0x01);
    startMillisPZEM = millis();
    Serial3.begin(9600, SERIAL_8N2);

    node.begin(pzemSlaveAddr, Serial3);
    pinMode(MAX485_RE, OUTPUT);
    pinMode(MAX485_DE, OUTPUT);
    digitalWrite(MAX485_RE, 0);
    digitalWrite(MAX485_DE, 0);

    node.preTransmission(preTransmission);
    node.postTransmission(postTransmission);
    changeAddress(0XFS, 0x01);

    delay(1000);

    /* 3 - LCD Display */
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.print("PZEM test");
    lcd.print("by miliohm.com");

    startMillisLCD = millis();
    lcd.clear();
}

void loop()
{
    val = analogRead(0);
    if (val < sens)
        stat = HIGH;
    else
        stat = LOW;
    digitalWrite(13, stat);

    if (stat2 != stat)
        contar++;
    stat2 = stat;
}

if (millis() - last >= milisegundos) {
    int rpm = ((double) contar / nPulsos) / 2.0 * 1000.0 / milisegundos;
    int rpm2 = ((double) contar / nPulsos) / 2.0 * 60000.0 / milisegundos;
    Serial.print(rpm);
    Serial.print(" rpm ");
    contar = 0;
    last = millis();
}

/* 0- General */
}

/* 1- PZEM-017 DC Energy Meter */
currentMillisPZEM = millis();
if (currentMillisPZEM - startMillisPZEM == periodPZEM)
{
    uint8_t result;
    result = node.readInputRegisters(0x0000, 6);
    if (result == node.ku16Success)
    {
        uint32_t tempdouble = 0x00000000;
        PZEMVoltage = node.getResponseBuffer(0x0000) / 100.0;

        PZEMCurrent = node.getResponseBuffer(0x0001) / 400.0;

        tempdouble = (node.getResponseBuffer(0x0002) << 16) + node.getResponseBuffer(0x0003);
        PZEMPower = tempdouble / 10.0;

        tempdouble = (node.getResponseBuffer(0x0004) << 16) + node.getResponseBuffer(0x0005);
        PZEMEnergy = tempdouble;

        Serial.print(PZEMVoltage, 1);
        Serial.print(" V ");
    }
}

```

```

sketch_jul18b $
Serial.print(PZEMVoltage, 1);
Serial.print(" V ");
Serial.print(PZEMCurrent, 2);
Serial.print(" A ");
Serial.print(PZEMPower, 1);
Serial.print(" W ");
Serial.print(PZEMEnergy, 0);
Serial.print(" Wh ");
Serial.println();

if (pzemSlaveAddr==2)
{
  Serial.println();
}
else
{
  Serial.println("Failed to read modBus");
}
startMillisPZEM = currentMillisPZEM ;

/* 2 - LCD Display */

currentMillisLCD = millis();
if (currentMillisLCD - startMillisLCD >= periodLCD)
{
  if( page ==1)
  {
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(PZEMVoltage, 1);
    lcd.print("V ");
    lcd.setCursor(9,0);
    lcd.print(PZEMCurrent, 2);
    lcd.print("A ");
    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print(PZEMPower, 1);
    lcd.print("W ");
    startMillisLCD = currentMillisLCD ;
  }
}

```

```

sketch_jul18b $
void postTransmission()
{
  /* 1- PZEM-017 DC Energy Meter */

  delay(2);
  digitalWrite(MAX485_RE, 0);
  digitalWrite(MAX485_DE, 0);
}

void setShunt(uint8_t slaveAddr)
{
  /* 1- PZEM-017 DC Energy Meter */

  static uint8_t SlaveParameter = 0x06;
  static uint16_t registerAddress = 0x0001;

  uint16_t ul6CRC = 0xFFFF;
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, slaveAddr);
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, SlaveParameter);
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, highByte(registerAddress));
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, lowByte(registerAddress));
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, highByte(NewshuntAddr));
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, lowByte(NewshuntAddr));

  Serial.println("Change shunt address");
  preTransmission();

  Serial3.write(slaveAddr);
  Serial3.write(SlaveParameter);
  Serial3.write(highByte(registerAddress));
  Serial3.write(lowByte(registerAddress));
  Serial3.write(highByte(NewshuntAddr));
  Serial3.write(lowByte(NewshuntAddr));
  Serial3.write(ul6CRC);
  Serial3.write(highByte(ul6CRC));
  delay(10);
  postTransmission();
  delay(100);
  while (Serial3.available())
  {
    Serial.print(char(Serial3.read()), HEX);
    Serial.print(" ");
  }
}

```

```

sketch_jul18b $
Serial3.write(lowByte(ul6CRC));
Serial3.write(highByte(ul6CRC));
delay(10);
postTransmission();
delay(100);
while (Serial3.available())
{
  Serial.print(char(Serial3.read()), HEX);
  Serial.print(" ");
}

void changeAddress(uint8_t OldslaveAddr, uint8_t NewslaveAddr)
{
  /* 1- PZEM-017 DC Energy Meter */

  static uint8_t SlaveParameter = 0x06;
  static uint16_t registerAddress = 0x0002;
  uint16_t ul6CRC = 0xFFFF;
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, OldslaveAddr);
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, SlaveParameter);
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, highByte(registerAddress));
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, lowByte(registerAddress));
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, highByte(NewslaveAddr));
  ul6CRC = crc16_update(ul6CRC, lowByte(NewslaveAddr));

  Serial.println("Change Slave Address");
  preTransmission();

  Serial3.write(OldslaveAddr);
  Serial3.write(SlaveParameter);
  Serial3.write(highByte(registerAddress));
  Serial3.write(lowByte(registerAddress));
  Serial3.write(highByte(NewslaveAddr));
  Serial3.write(lowByte(NewslaveAddr));
  Serial3.write(lowByte(ul6CRC));
  Serial3.write(highByte(ul6CRC));
  delay(10);
  postTransmission();
  delay(100);
  while (Serial3.available())
  {
    Serial.print(char(Serial3.read()), HEX);
    Serial.print(" ");
  }
}

```

Anexo M: Construcción del banco de pruebas



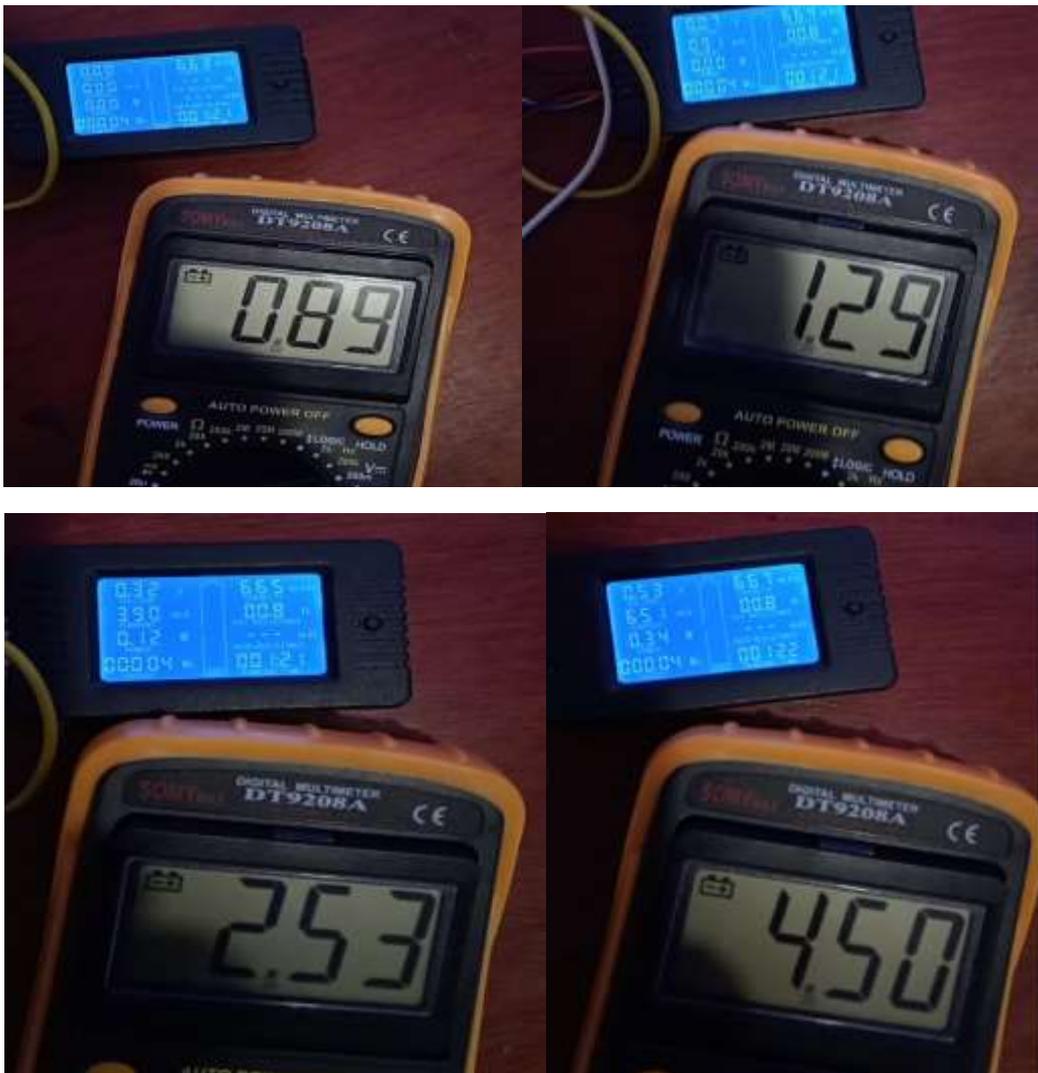
Anexo N: Tomas de registro de mediciones de prueba de CA







Anexo O: Tomas de registro de mediciones de prueba de CC





Anexo P: Capturas del registro realizado de la prueba de carga en DC

Autoguardado DC0101.xlsx - Excel (Error de activación de productos)

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda

Portapapeles Fuente Alineación

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Failed	to	read	modbus						
2		0 rpm	Failed	to	read	modbus				
3	m	rpm	Failed	to	read	modbus				
4		0 rpm	Failed	to	read	modbus				
5		0 rpm	Failed	to	read	modbus				
6		0 rpm	Failed	to	read	modbus				
7		30 rpm		25,2 V	2,415 A		60,9 W		844 Wh	
8		4350 rpm		25,3 V	2,365 A		59,8 W		844 Wh	
9		4500 rpm		25,6 V	2,745 A		70,2 W		845 Wh	
10		6240 rpm		46,8 V	3,23 A		151,1 W		845 Wh	
11		9060 rpm		54,6 V	2,895 A		158 W		845 Wh	
12		10020 rpm		55,9 V	2,875 A		160,8 W		845 Wh	
13		11220 rpm		65,7 V	2,815 A		184,9 W		846 Wh	
14		11970 rpm		66,3 V	2,835 A		187,8 W		846 Wh	
15		12810 rpm		75,1 V	2,875 A		215,9 W		846 Wh	
16		13440 rpm		75,4 V	2,67 A		201,3 W		847 Wh	
17		14100 rpm		82,6 V	2,82 A		233 W		847 Wh	
18		14850 rpm		83,5 V	2,735 A		228,5 W		847 Wh	
19		15330 rpm		89,8 V	2,825 A		253,7 W		848 Wh	
20		15900 rpm		92,1 V	2,745 A		252,9 W		848 Wh	
21		16530 rpm		96,8 V	2,925 A		283,1 W		849 Wh	
22		17010 rpm		102,9 V	3,07 A		316 W		849 Wh	
23		17550 rpm		102,6 V	2,945 A		302 W		850 Wh	
24		18270 rpm		110,3 V	2,94 A		324,3 W		850 Wh	
25		18480 rpm		110,5 V	2,78 A		307,1 W		851 Wh	
26		18870 rpm		114,1 V	2,815 A		321,2 W		851 Wh	
27		19260 rpm		118,6 V	2,835 A		336,3 W		852 Wh	
28		19770 rpm		119,4 V	2,85 A		340,3 W		852 Wh	
29		21400 rpm		123 V	2,775 A		341,2 W		857 Wh	
30		21400 rpm		122,2 V	2,79 A		341 W		858 Wh	
31		21400 rpm		122,2 V	2,79 A		341 W		858 Wh	
32		21400 rpm		122,2 V	2,79 A		341 W		858 Wh	
33		22400 rpm		122 V	2,79 A		340,4 W		861 Wh	
34		22400 rpm		119,3 V	2,78 A		331,7 W		872 Wh	
35		22450 rpm		119,9 V	2,77 A		339,2 W		873 Wh	
36		22290 rpm		119,4 V	2,775 A		336,8 W		873 Wh	
37		22200 rpm		120 V	2,78 A		334,1 W		874 Wh	
38		21970 rpm		119,6 V	2,75 A		327,6 W		875 Wh	
39		21970 rpm		119,9 V	2,88 A		337,2 W		875 Wh	
40		21930 rpm		119,5 V	2,825 A		337,4 W		876 Wh	
41		21900 rpm		119,6 V	2,82 A		337,272 W		875 Wh	
42		21920 rpm		119,9 V	2,785 A		333,9215 W		875 Wh	
43		21900 rpm		119,5 V	2,82 A		336,99 W		876 Wh	
44		21900 rpm		119,5 V	2,82 A		336,99 W		644 Wh	
45		21870 rpm		119,5 V	2,87 A		336,99 W		644 Wh	

DC0101

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
34	22400	rpm	119,3	V	2,78	A	331,7	W		872	Wh
35	22450	rpm	119,9	V	2,77	A	339,2	W		873	Wh
36	22290	rpm	119,4	V	2,773	A	336,8	W		873	Wh
37	22200	rpm	120	V	2,78	A	334,1	W		874	Wh
38	21970	rpm	119,6	V	2,75	A	327,6	W		875	Wh
39	21970	rpm	119,9	V	2,88	A	337,2	W		875	Wh
40	21930	rpm	119,5	V	2,825	A	337,4	W		876	Wh
41	21900	rpm	119,6	V	2,82	A	337,272	W		875	Wh
42	21920	rpm	119,9	V	2,785	A	333,9215	W		875	Wh
43	21900	rpm	119,5	V	2,82	A	336,99	W		876	Wh
44	21900	rpm	119,5	V	2,82	A	336,99	W		844	Wh
45	21870	rpm	119,5	V	2,82	A	336,99	W		844	Wh
46	21850	rpm	119,1	V	2,875	A	342,4125	W		844	Wh
47	21910	rpm	120,1	V	2,835	A	340,4835	W		845	Wh
48	21900	rpm	119,9	V	2,75	A	329,725	W		845	Wh
49	21880	rpm	119,3	V	2,77	A	330,461	W		846	Wh
50	21830	rpm	119,9	V	2,8	A	335,72	W		848	Wh
51	21900	rpm	119,8	V	2,685	A	321,663	W		848	Wh
52	21900	rpm	119,7	V	2,76	A	330,372	W		849	Wh
53	20920	rpm	119,7	V	2,69	A	321,993	W		850	Wh
54	20710	rpm	119,2	V	3,012	A	359,0304	W		851	Wh
55	20270	rpm	119,2	V	3,11	A	370,712	W		852	Wh
56	20100	rpm	119,8	V	3,15	A	377,37	W		852	Wh
57	20270	rpm	119,5	V	1,17	A	139,815	W		853	Wh
58	20270	rpm	118,8	V	3,17	A	376,596	W		856	Wh
59	20420	rpm	119,4	V	3,125	A	373,125	W		857	Wh
60	20200	rpm	119,1	V	3,1	A	369,21	W		858	Wh
61	20270	rpm	119,3	V	3,04	A	362,672	W		858	Wh
62	20350	rpm	118,6	V	3,14	A	372,404	W		859	Wh
63	20350	rpm	119,3	V	3,11	A	371,023	W		859	Wh
64	20300	rpm	119,2	V	3,09	A	368,328	W		860	Wh
65	20300	rpm	118,3	V	3,122	A	369,3326	W		860	Wh
66	19990	rpm	118,9	V	3,67	A	436,363	W		861	Wh
67	19470	rpm	119	V	3,601	A	428,519	W		862	Wh
68	19470	rpm	119,1	V	3,62	A	431,142	W		862	Wh
69	19220	rpm	118,3	V	3,6	A	425,88	W		863	Wh
70	18830	rpm	118,6	V	3,64	A	431,704	W		863	Wh
71	19220	rpm	118,9	V	3,59	A	426,851	W		864	Wh
72	18830	rpm	118,4	V	3,605	A	426,832	W		864	Wh
73	18830	rpm	118,7	V	3,59	A	426,133	W		869	Wh
74	19030	rpm	118,7	V	3,63	A	430,881	W		875	Wh
75	19220	rpm	119,4	V	3,57	A	426,258	W		877	Wh
76	19000	rpm	118,6	V	3,59	A	425,774	W		878	Wh
77	19140	rpm	118,5	V	3,583	A	424,5855	W		878	Wh
78	19030	rpm	118,1	V	3,62	A	427,522	W		879	Wh

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
81	18230	rpm	117,7	V	3,8	A	447,26	W		887	Wh
82	17860	rpm	117,4	V	2,792	A	327,7808	W		888	Wh
83	17700	rpm	117,2	V	3,81	A	446,532	W		888	Wh
84	17820	rpm	117,8	V	3,82	A	449,996	W		889	Wh
85	17770	rpm	117,8	V	3,84	A	452,352	W		889	Wh
86	17700	rpm	117,2	V	3,807	A	446,1804	W		882	Wh
87	17720	rpm	117,1	V	3,84	A	449,664	W		884	Wh
88	17720	rpm	117,4	V	3,79	A	444,946	W		885	Wh
89	17680	rpm	117,5	V	3,81	A	447,675	W		887	Wh
90	17659	rpm	117,8	V	3,796	A	447,1688	W		888	Wh
91	17720	rpm	115,9	V	3,82	A	442,738	W		888	Wh
92	17700	rpm	115,8	V	3,8	A	440,04	W		889	Wh
93	16910	rpm	114,5	V	4,235	A	484,9075	W		893	Wh
94	16740	rpm	114,6	V	4,265	A	488,769	W		893	Wh
95	16270	rpm	114,8	V	4,65	A	533,82	W		894	Wh
96	15940	rpm	114,3	V	4,225	A	482,9175	W		897	Wh
97	15850	rpm	114,2	V	4,245	A	484,779	W		899	Wh
98	16000	rpm	114,2	V	4,41	A	503,622	W		900	Wh
99	15940	rpm	114,9	V	4,4	A	505,56	W		900	Wh
100	15940	rpm	114,7	V	4,45	A	510,435	W		901	Wh
101	15920	rpm	114,5	V	4,41	A	504,945	W		902	Wh
102	15920	rpm	114,1	V	4,49	A	512,309	W		903	Wh
103	15830	rpm	113,6	V	4,473	A	508,1328	W		905	Wh
104	15950	rpm	112,7	V	4,46	A	502,642	W		906	Wh
105	15900	rpm	112,3	V	4,51	A	506,473	W		907	Wh
106	15900	rpm	112,3	V	4,51	A	506,473	W		907	Wh
107	14910	rpm	112,4	V	4,875	A	547,95	W		912	Wh
108	14510	rpm	112,1	V	5,23	A	586,283	W		913	Wh
109	14600	rpm	112,2	V	5,14	A	576,708	W		913	Wh
110	14570	rpm	112,8	V	5,107	A	576,0696	W		914	Wh
111	14510	rpm	112,6	V	5,15	A	579,89	W		915	Wh
112	14510	rpm	112,4	V	5,17	A	581,108	W		916	Wh
113	14490	rpm	112,6	V	5,201	A	585,6326	W		917	Wh
114	14450	rpm	112,3	V	5,15	A	578,345	W		918	Wh
115	14450	rpm	111,8	V	5,18	A	579,124	W		918	Wh
116	14400	rpm	112	V	5,14	A	575,68	W		919	Wh
117	14510	rpm	111,5	V	5,17	A	576,455	W		920	Wh
118	13730	rpm	111,7	V	5,23	A	584,191	W		921	Wh
119	12980	rpm	111,4	V	5,27	A	587,078	W		928	Wh
120	12720	rpm	111,7	V	5,3	A	592,01	W		928	Wh
121	12720	rpm	110,2	V	5,47	A	602,794	W		929	Wh
122	12810	rpm	110,7	V	5,442	A	602,4294	W		930	Wh
123	12790	rpm	110,3	V	5,42	A	597,826	W		931	Wh
124	12740	rpm	110,7	V	5,44	A	602,208	W		932	Wh
125	12790	rpm	110,1	V	5,453	A	600,3753	W		933	Wh

Anexo Q: Capturas de registro de mediciones de prueba de carga en AC

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Velocidad		Voltaje		Corriente		Potencia		Energia		Frecuencia		Factor P
2	0	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kwh	nan	Hz	nan
3	0	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kwh	nan	Hz	nan
4	0	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kwh	nan	Hz	nan
5	0	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kwh	nan	Hz	nan
6	0	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kwh	nan	Hz	nan
7	2940	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kwh	nan	Hz	nan
8	13620	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	0,046	kwh	60	Hz	0,48
9	19260	rpm	85,1	V	4,23	A	352,6	W	0,046	kwh	60	Hz	0,98
10	22080	rpm	105,7	V	3,9	A	406,4	W	0,046	kwh	59,9	Hz	0,99
11	23460	rpm	113,9	V	3,6	A	407,6	W	0,047	kwh	60	Hz	1
12	23880	rpm	114,3	V	3,31	A	375,6	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
13	24000	rpm	114,4	V	3,22	A	365,6	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
14	23940	rpm	114,5	V	3,19	A	362,3	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
15	23910	rpm	113,6	V	3,15	A	354,6	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
16	23790	rpm	113,6	V	3,15	A	354,6	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
17	23640	rpm	112,7	V	3,12	A	349,7	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
18	23460	rpm	111,4	V	3,1	A	342,2	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
19	23340	rpm	110,3	V	3,08	A	337	W	0,047	kwh	60	Hz	0,99
20	23190	rpm	109,3	V	3,06	A	332,2	W	0,048	kwh	60	Hz	0,99
21	23070	rpm	108,8	V	3,06	A	330,5	W	0,048	kwh	60	Hz	0,99
22	23040	rpm	108,8	V	3,06	A	330,5	W	0,048	kwh	60	Hz	0,99
23	22980	rpm	108,3	V	3,05	A	327,8	W	0,048	kwh	60	Hz	0,99
24	22980	rpm	108,3	V	3,04	A	326,8	W	0,048	kwh	59,9	Hz	0,99
25	22980	rpm	108,2	V	3,05	A	327,3	W	0,048	kwh	59,9	Hz	0,99
26	22980	rpm	108,2	V	3,07	A	329,1	W	0,048	kwh	60	Hz	0,99
27	23010	rpm	108,2	V	3,07	A	329,2	W	0,048	kwh	59,9	Hz	0,99
28	22980	rpm	108,2	V	3,06	A	329	W	0,048	kwh	59,9	Hz	0,99
29	23070	rpm	108,3	V	3,08	A	330,7	W	0,048	kwh	59,9	Hz	0,99
30	23070	rpm	108,2	V	3,07	A	329,6	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
31	23070	rpm	108,2	V	3,07	A	329,6	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
32	23040	rpm	108,3	V	3,05	A	327,6	W	0,049	kwh	59,8	Hz	0,99
33	23100	rpm	108,3	V	3,06	A	329	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
34	23100	rpm	108,3	V	3,08	A	330,3	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
35	23040	rpm	108,3	V	3,06	A	328,9	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
36	23010	rpm	108,2	V	3,07	A	328,6	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
37	23010	rpm	108,1	V	3,08	A	330,1	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
38	23040	rpm	108,1	V	3,08	A	330,1	W	0,049	kwh	59,9	Hz	0,99
39	23040	rpm	108,2	V	3,06	A	328,3	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
40	22980	rpm	108,1	V	3,06	A	328,9	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
41	22950	rpm	108	V	3,07	A	328,9	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
42	22950	rpm	108	V	3,09	A	330,8	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
43	22860	rpm	108	V	3,08	A	330,1	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
44	22860	rpm	108	V	3,09	A	331,1	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
45	22740	rpm	107,9	V	3,11	A	333	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
46	22740	rpm	107,9	V	3,11	A	333	W	0,05	kwh	59,8	Hz	0,99
47	22740	rpm	108,1	V	3,13	A	335,6	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
48	22800	rpm	108,1	V	3,13	A	335,2	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
49	22740	rpm	108,2	V	3,12	A	334,8	W	0,05	kwh	59,9	Hz	0,99
50	22620	rpm	108,1	V	3,12	A	334,5	W	0,051	kwh	59,9	Hz	0,99
51	22320	rpm	108,1	V	3,2	A	342,5	W	0,051	kwh	59,9	Hz	0,99
52	22200	rpm	107,8	V	3,27	A	349,7	W	0,051	kwh	59,8	Hz	0,99
53	21720	rpm	107,8	V	3,34	A	356,6	W	0,051	kwh	59,9	Hz	0,99
54	21600	rpm	107,8	V	3,34	A	356,6	W	0,051	kwh	59,8	Hz	0,99
55	21180	rpm	107,7	V	3,38	A	361,1	W	0,051	kwh	59,9	Hz	0,99
56	20730	rpm	107,5	V	3,46	A	367,8	W	0,051	kwh	59,9	Hz	0,99
57	20880	rpm	107,4	V	3,54	A	374,9	W	0,051	kwh	59,9	Hz	0,99
58	20880	rpm	107,1	V	3,5	A	370,7	W	0,052	kwh	59,9	Hz	0,99
59	20730	rpm	107,1	V	3,52	A	372,4	W	0,052	kwh	60	Hz	0,99

AC_CARGA

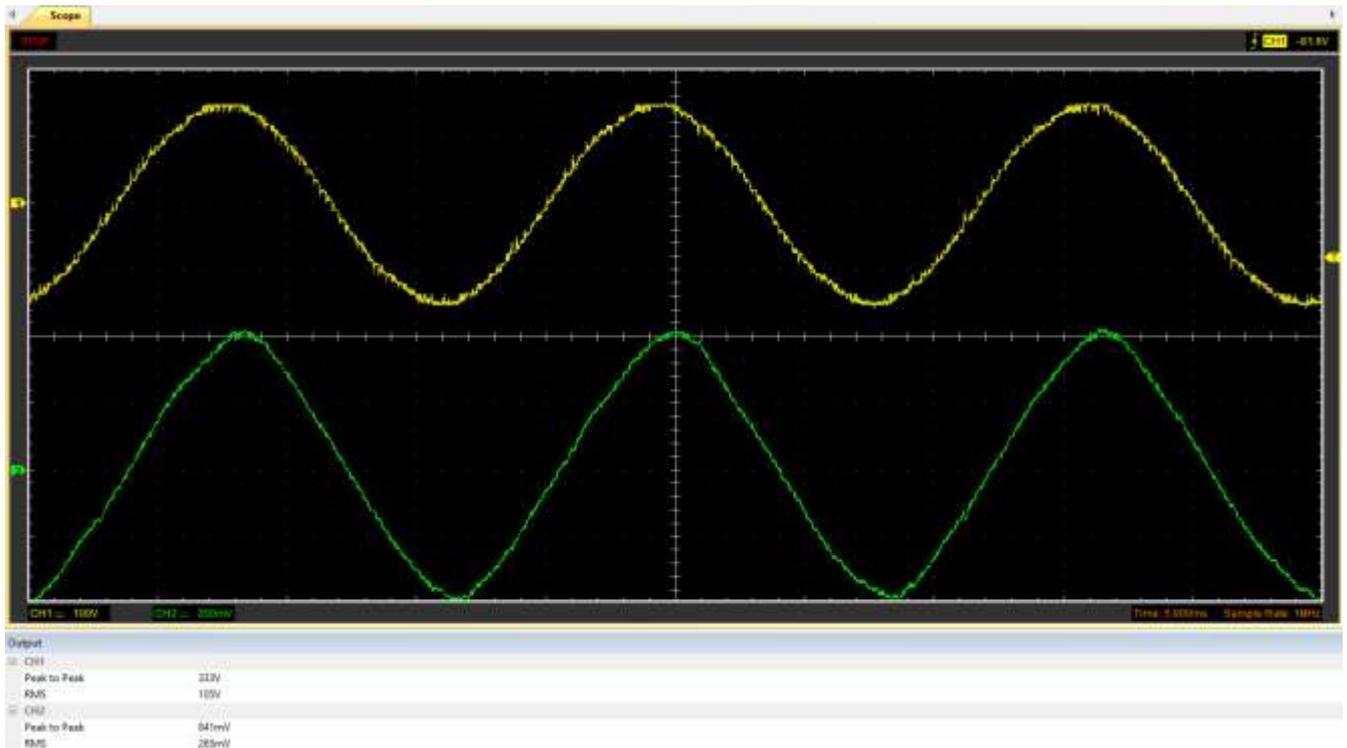
Hoja1

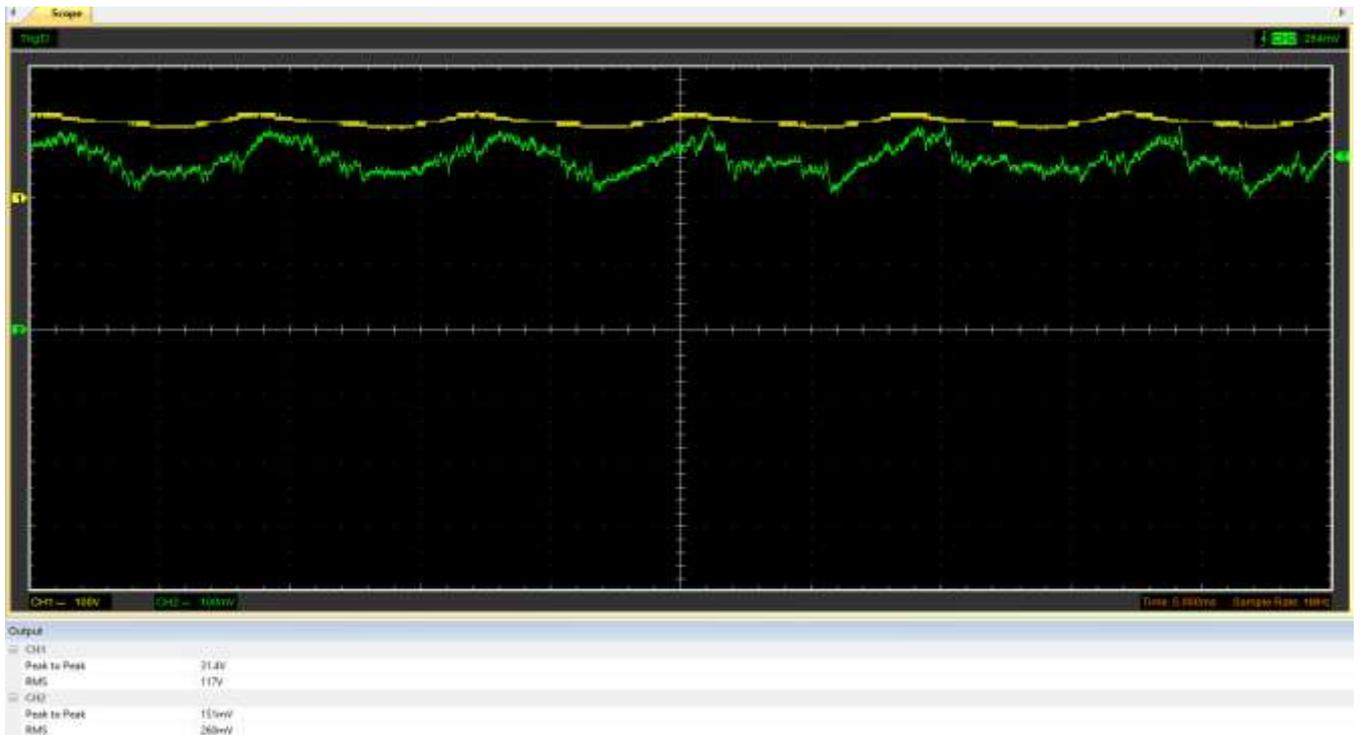


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
58	20880	rpm	107,1	V	3,5	A	370,7	W	0,052	kWh	59,9	Hz	0,99
59	20730	rpm	107,1	V	3,52	A	372,4	W	0,052	kWh	60	Hz	0,99
60	20700	rpm	107,2	V	3,54	A	375	W	0,052	kWh	59,9	Hz	0,99
61	20700	rpm	107,2	V	3,54	A	375	W	0,052	kWh	59,9	Hz	0,99
62	20700	rpm	107,5	V	3,54	A	375,7	W	0,052	kWh	59,9	Hz	0,99
63	20730	rpm	107,4	V	3,54	A	374,6	W	0,052	kWh	60	Hz	0,99
64	15510	rpm	107,5	V	3,54	A	376,1	W	0,052	kWh	60	Hz	0,99
65	18900	rpm	107	V	3,89	A	407,2	W	0,052	kWh	59,9	Hz	0,98
66	19200	rpm	107,1	V	3,86	A	407	W	0,052	kWh	60	Hz	0,98
67	19080	rpm	107	V	3,93	A	413	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
68	19080	rpm	107	V	3,95	A	415,5	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
69	19080	rpm	107	V	3,96	A	416,3	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
70	19050	rpm	107	V	3,96	A	416,3	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
71	19050	rpm	106,9	V	3,97	A	417,7	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
72	19020	rpm	107	V	3,97	A	417,6	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
73	18780	rpm	106,9	V	3,99	A	418,4	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
74	18270	rpm	106,7	V	4,24	A	442,8	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
75	18210	rpm	106,2	V	4,36	A	455,8	W	0,054	kWh	60	Hz	0,98
76	18150	rpm	106,2	V	4,36	A	455,8	W	0,054	kWh	60	Hz	0,98
77	18090	rpm	106,5	V	4,36	A	456,2	W	0,054	kWh	60	Hz	0,98
78	18000	rpm	106,4	V	4,36	A	454,4	W	0,054	kWh	60	Hz	0,98
79	18000	rpm	106,5	V	4,37	A	457,2	W	0,054	kWh	60	Hz	0,98
80	18000	rpm	106,4	V	4,36	A	455,6	W	0,054	kWh	60	Hz	0,98
81	17940	rpm	106,4	V	4,38	A	455,9	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
82	18060	rpm	106,2	V	4,46	A	464,2	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
83	17970	rpm	106,5	V	4,49	A	469	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
84	16530	rpm	105,9	V	4,94	A	512,8	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
85	16320	rpm	105,9	V	4,94	A	512,8	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
86	16680	rpm	105,6	V	5,01	A	518,3	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
87	16860	rpm	105,3	V	5,05	A	520,8	W	0,055	kWh	59,9	Hz	0,98
88	16860	rpm	105,5	V	5,05	A	522,1	W	0,056	kWh	60	Hz	0,98
89	16920	rpm	105,2	V	5,15	A	530,8	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
90	16920	rpm	105,2	V	5,17	A	533,2	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
91	16860	rpm	105,2	V	5,15	A	531,2	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
92	16860	rpm	105,2	V	5,15	A	531,2	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
93	16860	rpm	105,2	V	5,16	A	532	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
94	16860	rpm	105,2	V	5,17	A	532,6	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
95	16800	rpm	105,2	V	5,2	A	535,8	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
96	16860	rpm	105,2	V	5,17	A	533,2	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
97	16920	rpm	105,4	V	5,16	A	533,9	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
98	16860	rpm	105,4	V	5,15	A	532,8	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
99	16860	rpm	105,4	V	5,19	A	535,9	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
100	16860	rpm	105,4	V	5,19	A	535,9	W	0,058	kWh	60	Hz	0,98
101	16860	rpm	105,4	V	5,18	A	535,9	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
102	16860	rpm	105,2	V	5,15	A	531,4	W	0,058	kWh	60	Hz	0,98
103	16800	rpm	105,8	V	5,19	A	537,7	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
104	16740	rpm	105,4	V	5,14	A	531,1	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
105	16860	rpm	105,7	V	5,13	A	531,4	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
106	16680	rpm	105,4	V	5,15	A	531,9	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
107	16380	rpm	105,4	V	5,29	A	545,8	W	0,059	kWh	59,9	Hz	0,98
108	16320	rpm	105,4	V	5,29	A	545,8	W	0,059	kWh	59,9	Hz	0,98
109	16050	rpm	105,2	V	5,34	A	550	W	0,059	kWh	59,9	Hz	0,98
110	16080	rpm	105,1	V	5,43	A	557,8	W	0,059	kWh	60	Hz	0,98
111	15990	rpm	105	V	5,51	A	566,9	W	0,059	kWh	59,9	Hz	0,98
112	16020	rpm	104,9	V	5,53	A	567,5	W	0,06	kWh	59,9	Hz	0,98
113	15930	rpm	105,1	V	5,58	A	573,6	W	0,06	kWh	60	Hz	0,98
114	15990	rpm	105	V	5,55	A	569,6	W	0,06	kWh	59,9	Hz	0,98
115	15960	rpm	105	V	5,55	A	569,6	W	0,06	kWh	59,9	Hz	0,98
116	16020	rpm	105,2	V	5,52	A	568,9	W	0,06	kWh	60	Hz	0,98

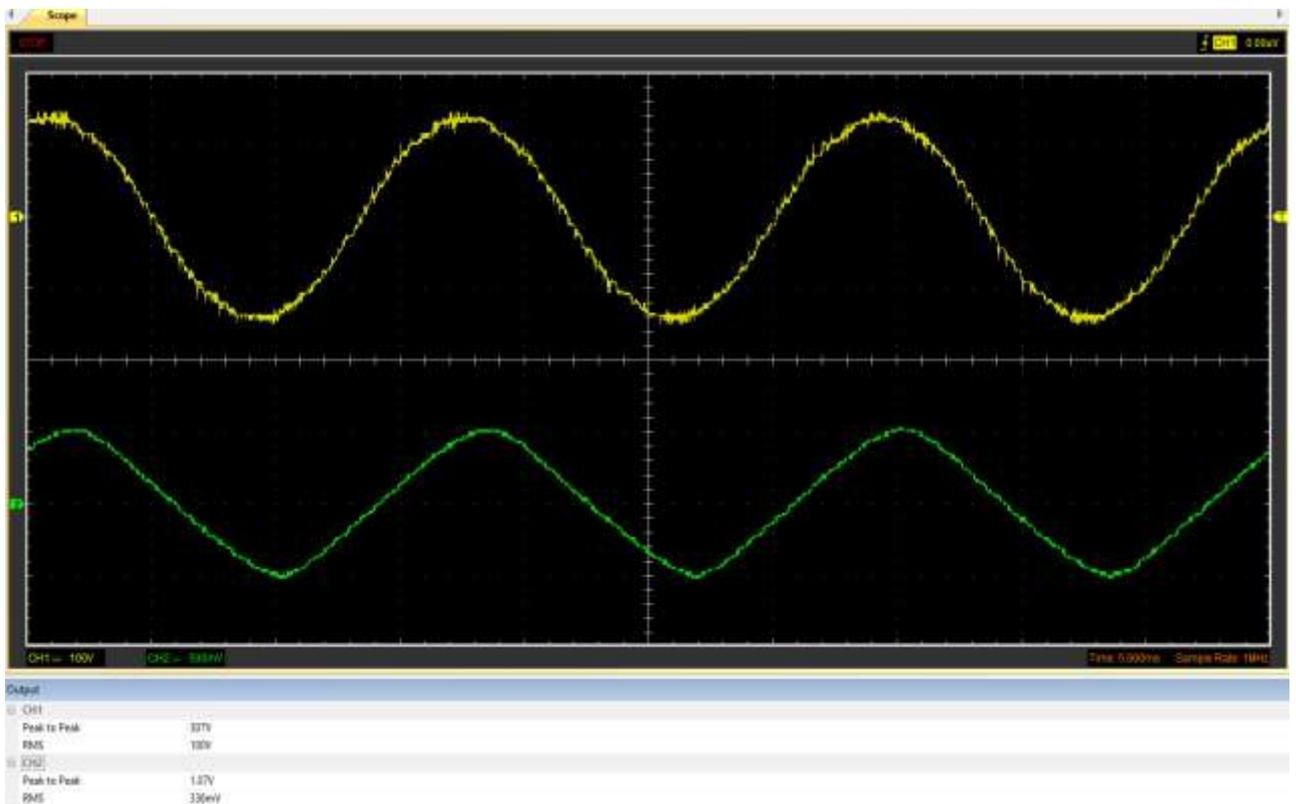
#2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
82	16060	rpm	105,2	V	4,46	A	464,2	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
83	17970	rpm	106,5	V	4,49	A	469	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
84	16530	rpm	105,9	V	4,94	A	512,8	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
85	16320	rpm	105,9	V	4,94	A	512,8	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
86	16680	rpm	105,6	V	5,01	A	518,3	W	0,055	kWh	60	Hz	0,98
87	16860	rpm	105,3	V	5,05	A	520,8	W	0,055	kWh	59,9	Hz	0,98
88	16860	rpm	105,5	V	5,05	A	522,1	W	0,056	kWh	60	Hz	0,98
89	16320	rpm	105,2	V	5,15	A	530,8	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
90	16320	rpm	105,2	V	5,17	A	533,2	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
91	16660	rpm	105,2	V	5,15	A	531,2	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
92	16660	rpm	105,2	V	5,15	A	531,2	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
93	16660	rpm	105,2	V	5,16	A	532	W	0,056	kWh	59,9	Hz	0,98
94	16860	rpm	105,2	V	5,17	A	532,6	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
95	16800	rpm	105,2	V	5,2	A	535,8	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
96	16860	rpm	105,2	V	5,17	A	533,2	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
97	16320	rpm	105,4	V	5,16	A	533,9	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
98	16860	rpm	105,4	V	5,15	A	532,8	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
99	16860	rpm	105,4	V	5,19	A	535,9	W	0,057	kWh	59,9	Hz	0,98
100	16860	rpm	105,4	V	5,19	A	535,9	W	0,058	kWh	60	Hz	0,98
101	16860	rpm	105,4	V	5,18	A	535,9	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
102	16860	rpm	105,2	V	5,15	A	531,4	W	0,058	kWh	60	Hz	0,98
103	16800	rpm	105,8	V	5,19	A	537,7	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
104	16740	rpm	105,4	V	5,14	A	531,1	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
105	16860	rpm	105,7	V	5,13	A	531,4	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
106	16680	rpm	105,4	V	5,15	A	531,9	W	0,058	kWh	59,9	Hz	0,98
107	16380	rpm	105,4	V	5,23	A	545,8	W	0,053	kWh	59,9	Hz	0,98
108	16320	rpm	105,4	V	5,23	A	545,8	W	0,053	kWh	59,9	Hz	0,98
109	16050	rpm	105,2	V	5,34	A	550	W	0,053	kWh	59,9	Hz	0,98
110	16080	rpm	105,1	V	5,43	A	557,8	W	0,053	kWh	60	Hz	0,98
111	15990	rpm	105	V	5,51	A	566,9	W	0,053	kWh	59,9	Hz	0,98
112	16020	rpm	104,9	V	5,53	A	567,5	W	0,06	kWh	59,9	Hz	0,98
113	15930	rpm	105,1	V	5,58	A	573,8	W	0,06	kWh	60	Hz	0,98
114	15990	rpm	105	V	5,55	A	569,8	W	0,06	kWh	59,9	Hz	0,98
115	15960	rpm	105	V	5,55	A	569,6	W	0,06	kWh	59,9	Hz	0,98
116	16020	rpm	105,2	V	5,52	A	568,9	W	0,06	kWh	60	Hz	0,98
117	16080	rpm	105,1	V	5,44	A	559,9	W	0,061	kWh	60	Hz	0,98
118	16140	rpm	105,4	V	5,41	A	558,1	W	0,061	kWh	60	Hz	0,98
119	16200	rpm	105,4	V	5,34	A	552,4	W	0,061	kWh	60	Hz	0,98
120	14700	rpm	105,5	V	5,35	A	551,3	W	0,061	kWh	60	Hz	0,98
121	15660	rpm	104,6	V	5,79	A	589,6	W	0,061	kWh	60	Hz	0,97
122	14760	rpm	104,7	V	5,69	A	601,7	W	0,061	kWh	60	Hz	0,98
123	12300	rpm	nan	V	nan	A	572	W	0,062	kWh	60	Hz	0,98
124	8760	rpm	105	V	nan	A	572	W	0,062	kWh	60	Hz	0,98
125	9000	rpm	106	V	4,89	A	508,8	W	0,062	kWh	60	Hz	0,98
126	9180	rpm	105,8	V	4,91	A	509,5	W	0,062	kWh	60	Hz	0,98
127	9270	rpm	105,9	V	4,93	A	512,3	W	0,062	kWh	60	Hz	0,98
128	9240	rpm	105,7	V	4,94	A	512,6	W	0,062	kWh	59,9	Hz	0,98
129	9150	rpm	105,8	V	4,91	A	509,8	W	0,063	kWh	60	Hz	0,98
130	9180	rpm	105,9	V	4,93	A	512,5	W	0,063	kWh	59,9	Hz	0,98
131	9120	rpm	nan	V	4,95	A	512,9	W	0,063	kWh	59,9	Hz	0,98
132	9180	rpm	nan	V	4,96	A	515,1	W	0,063	kWh	59,9	Hz	0,98
133	9180	rpm	nan	V	nan	A	515	W	0,063	kWh	59,9	Hz	0,98
134	8520	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kWh	nan	Hz	nan
135	6750	rpm	nan	V	nan	A	515,4	W	0,064	kWh	59,9	Hz	0,98
136	5280	rpm	nan	V	nan	A	517,5	W	0,064	kWh	59,9	Hz	0,98
137	3030	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kWh	nan	Hz	nan
138	540	rpm	nan	V	nan	A	517,7	W	0,064	kWh	59,9	Hz	0,98
139	60	rpm	nan	V	nan	A	nan	W	nan	kWh	nan	Hz	nan
140	0	rpm	106	V	4,93	A	512,2	W	0,065	kWh	59,9	Hz	0,98

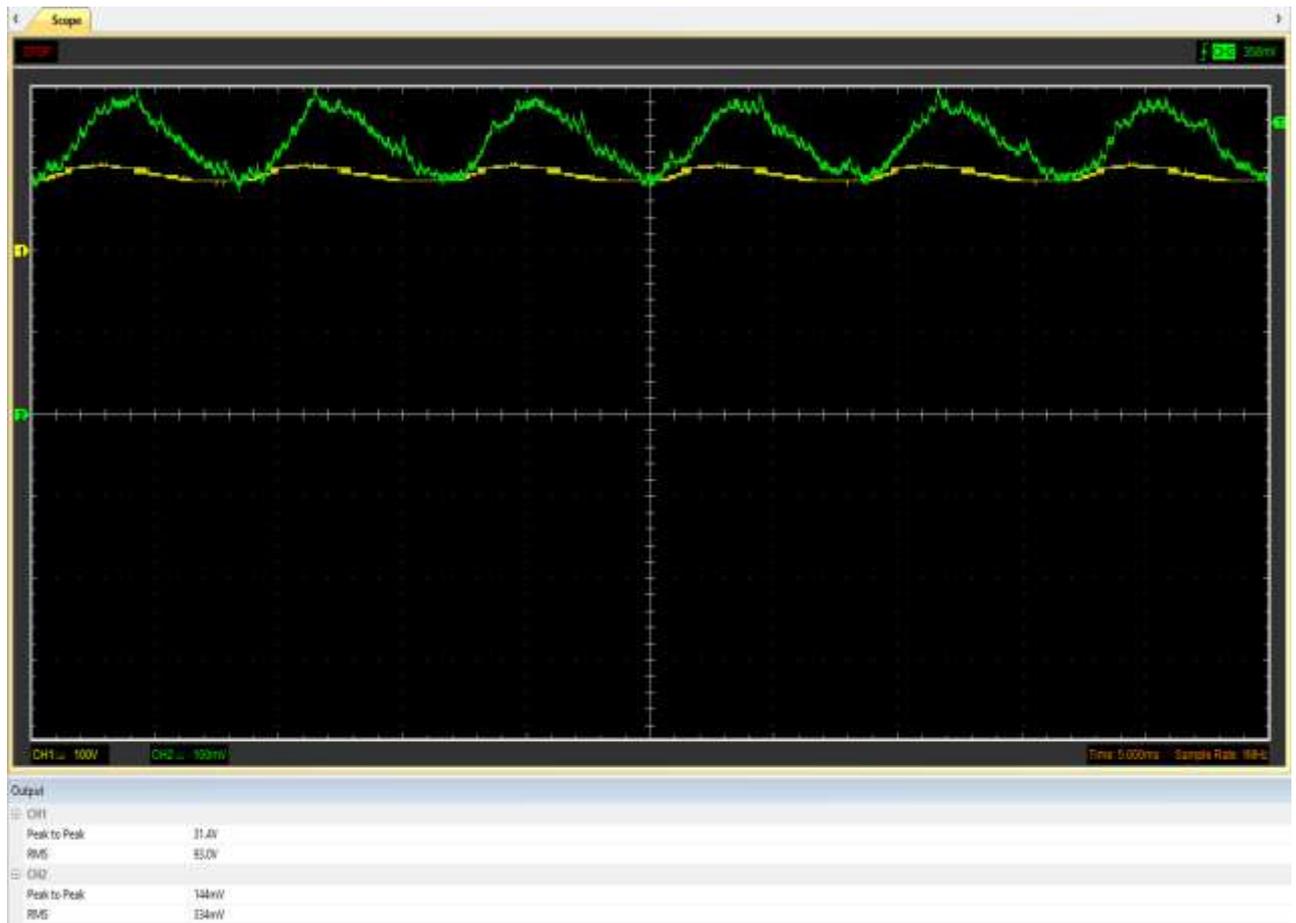
Anexo R: Medición con osciloscopio de voltaje y corriente en AC y DC sin carga.





Anexo S: Medicion de voltaje en AC y DC con carga





Anexo T: Manuales de usuario y prácticas de laboratorio, y de mantenimiento



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad



MANUAL DE USUARIO Y PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE UN BANCO DE PRUEBAS CON UN MOTOR UNIVERSAL

Autor:

Oliver Otoniel Oñate Macas

Ibarra – Ecuador

2023

INTRODUCCIÓN

Las pruebas experimentales con máquinas eléctricas desempeñan un rol fundamental en el desarrollo de habilidades prácticas y en la adquisición de la capacidad de resolución de problemas, facetas cruciales en la formación académica de un ingeniero eléctrico. Ante esta premisa, surge la necesidad imperante de elaborar un módulo de pruebas experimentales con un motor universal. El propósito del banco de pruebas radica en el desarrollo de diferentes ensayos prácticos que permitan comprender y analizar de manera exhaustiva el funcionamiento del motor universal. Entre las pruebas a las que se someterá al motor se incluyen la prueba de circuito abierto (CA), prueba de cortocircuito (CC), y la prueba de carga, la cual se realiza tanto en corriente directa como en corriente alterna. Los resultados brindan información relevante y crucial de las características magnéticas del motor y su comportamiento al aplicar distintos tipos de alimentación y graduar los niveles de carga. La elección de este motor como componente de estudio se justifica por su tecnología versátil y su amplio uso en aplicaciones de propósito general, como lavadoras, licuadoras, extractores y la mayoría de las aplicaciones domésticas en las que se requiere un torque y velocidad elevadas. Cabe destacar que el motor universal es el único con la capacidad de operar de manera eficiente con distintos tipos de alimentación.

MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Con el firme propósito de proporcionar información integral y estructurada para llevar a cabo las pruebas experimentales y realizar el análisis detallado del motor en evaluación, se plantea la elaboración de un manual técnico. Este manual será diseñado para ofrecer instrucciones paso a paso en relación con cada una de las prácticas a las que se somete el motor, enfocándose en aspectos prácticos y teóricos que permitan a los practicantes abordar los ensayos de manera efectiva. A través de la disposición de este manual, se busca facilitar el proceso de aprendizaje y fortalecer de manera significativa las habilidades prácticas y técnicas de los usuarios.

Motor universal

Un motor universal al igual que todo motor eléctrico, cuenta con la capacidad de transformar de forma eficiente la energía eléctrica en energía mecánica, para realizar una actividad determinada. Este motor se caracteriza por su versatilidad operativa al funcionar de manera precisa tanto en corriente directa (DC) como en corriente alterna (AC), lo que lo diferencia del resto de motores. Además, su conexionado interno es similar al de un motor serie DC debido a que conecta en serie los bobinados del estator y el rotor. Sin embargo, para que el motor universal opere de manera eficiente en AC se debe laminar en su totalidad los polos magnéticos del estator y el núcleo del rotor. De esta forma, se evita grandes pérdidas de potencia debido a corrientes parásitas. Se presenta el circuito equivalente del motor universal en la figura 6, para posteriormente aplicar los diferentes tipos de conexionado en el motor.

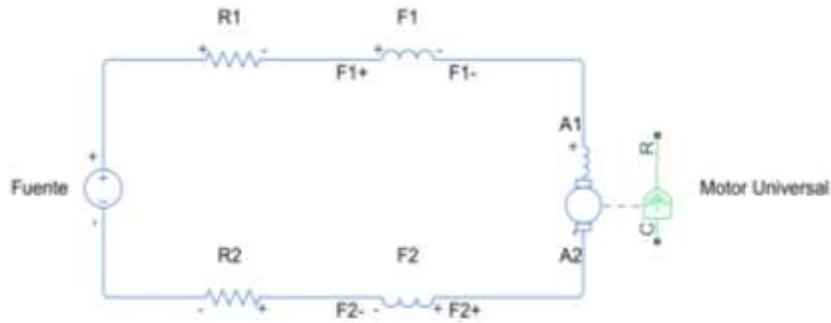


Fig. 6. Circuito equivalente del motor universal

Del circuito equivalente se puede establecer que las bobinas de campo se conectan en serie a través de las terminales de armadura, es decir, si se separa las terminales de armadura de las de campo, las bobinas del estator del motor quedan independientes y no en serie. Por lo cual, en el caso de realizar prácticas con el bobinado del estator y del rotor independientes, es necesario unir las bobinas del estator para realizar la práctica de manera adecuada.

Se presenta los diferentes conexionados que se pueden aplicar tanto para el motor como para el generador ya que cuenta con una misma configuración interna.

Borneras de máquinas



Fig. 7. Borneras del motor y el generador

Conexión serie del motor universal

El conexionado en serie se utiliza del motor se utiliza para la prueba de carga en AC y DC alimentando el motor en los terminales F1+ y F2-. Además, en las pruebas de circuito abierto y cortocircuito se aplica este conexionado al generador para producir el movimiento del motor.

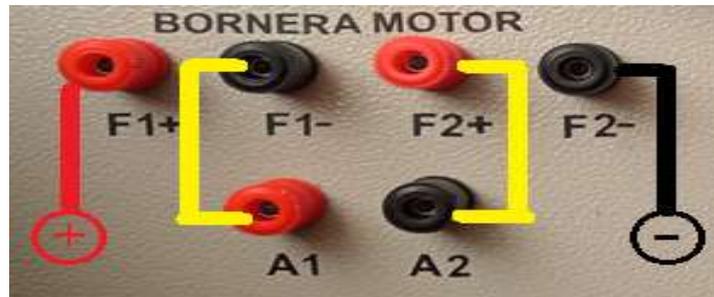


Fig. 8. Conexión serie del motor universal (Conexión original del motor)

Conexión con terminales de rotor y estator independientes del motor universal

El conexionado del motor con 2 terminales para el campo del motor y para la armadura se aplica para la prueba de circuito abierto y la de cortocircuito con la diferencia que en esta se unen las dos terminales de armadura. La unión entre F1- y F2+ es para unir las dos bobinas del estator.



Fig. 9. Conexión del motor con terminales del rotor y estator independiente

Conexión para el generador con estator y rotor separados

El conexionado del generador es igual al de un generador de excitación separada, se cuenta con dos terminales para la alimentación de campo F1+ y F2- , y con dos terminales para la armadura A1 y A2. Además, el campo une se dos bobinas conectando F1- y F2+.



Fig. 10. Conexión del generador de excitación separada

En las diferentes pruebas que se realiza con el motor y el generador es común que una máquina se encuentre con el conexionado en serie y la otra con terminales independientes, un ejemplo, en la prueba de CA el motor se encuentra con los terminales separados mientras que el generador con los terminales en serie para poder generar el movimiento necesario. Esta prueba y el resto de las prácticas se presenta a detalle para realizar los ensayos de manera práctica y con una guía adecuada.

Consideraciones del motor universal

- Si se utiliza el mismo motor del trabajo de investigación, para reducir la velocidad se puede aplicar un voltaje menor ya que en este tipo de motores la velocidad es proporcional al voltaje aplicado. Sin embargo, se debe considerar que los resultados varían para cada nivel de alimentación aplicado.
- El rango de voltaje aplicado para operar de forma estable y segura puede variar entre 25 V y 80 V, alzando velocidades de aproximadamente 14000 rpm. Los rangos en DC pueden variar entre: 20,30,40,60 y 70 V, mientras en AC los niveles pueden variar de entre 60,70 y 80 V. Los rangos para cada tipo de alimentación se establecen en base a la capacidad de medición de los sensores. Se recomienda realizar las prácticas a un nivel de entre 30 y 60 V.
- Si se desea aplicar el voltaje nominal que es 120 V considérese que se cuenta con una potencia nominal del motor de 1500 W y una velocidad de 29000 rpm \pm 15%. Con estos valores y el motor operando en vacío o con una carga baja, se cuenta con una gran presencia de ruido por las altas revoluciones y la potencia del motor. Además, se pierde un poco de estabilidad por la fuerza y la velocidad que alcanza el motor. De igual forma al manejar una velocidad tan elevada el desgaste de las escobillas y el conmutador se desarrolla de forma más acelerada. Por lo tanto, se recomienda realizar el ensayo aplicando estos valores únicamente de ser necesario el funcionamiento en estas condiciones.
- Realizar las practicas estrictamente con los materiales indicados, si ocupa componentes externos como otra carga, se debe verificar que esta no exceda el nivel de potencia del motor. además, llevar un control de la corriente con el fin de evitar exceder los límites y causar afecciones al motor.

Para los ensayos de laboratorio se recomienda seguir las pautas mencionadas en los puntos anteriores. Además, los niveles de tensión aplicados pueden ser modificados según se requiera, siempre y cuando se cumplan los rangos establecidos. A continuación, se detallada cada una de las prácticas con el motor universal con las instrucciones para desarrollar estas de forma adecuada y segura.

PRÁCTICA #1

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO (CA)

INTRODUCCIÓN

La prueba de circuito abierto en un motor universal se realiza con el objetivo de conocer las características de magnetización de la máquina analizando principalmente la corriente de excitación de campo y el voltaje de magnetización de la armadura. Durante esta prueba se registran varios parámetros eléctricos y mecánicos, como la corriente, el voltaje y la velocidad. Estos parámetros permiten comprender el comportamiento del motor sin ninguna carga mecánica. Para llevar a cabo esta prueba, es necesario que el motor gire a una velocidad constante mediante algún componente externo que frecuentemente es otro motor con los mismos valores de velocidad o aproximados, y se conecta mediante un mecanismo de acople.

OBJETIVOS

Experimento #1: Medir la velocidad a la que gira el motor.

Experimento #2: Medir los incrementos de corriente de campo.

Experimento #3: Medir el voltaje generado al variar la corriente de campo.

Los experimentos planteados para la práctica cuentan con una secuencia y se realizan en conjunto, es decir, al comenzar la práctica no se desactivan las máquinas en ningún momento hasta terminar con todos los experimentos, salvo el caso que exista algún factor externo que afecte el desarrollo del ensayo.

Datos para el Simulador

Motor

Model parameterization:	By DC rated power, rated speed & electrical power	
Rated speed (at rated load):	29000	rpm
Rated load (mechanical power):	1490	W
Rated DC supply voltage:	120	V
Electrical power in at rated load:	1500	W
Total armature and field winding inductance:	8.95	mH

Generador

Field type:	Wound	
Field resistance:	3.9	Ohm
Field inductance:	1	H
Field-armature mutual inductance:	8.95e-3	H
Initial field current:	0	A
Armature resistance:	3.9	Ohm
Armature inductance:	12e-6	H
Rotor damping parameterization:	By no-load current	
No-load current:	0	A
DC supply voltage when measuring no-load current:	120	V

Otros datos

Voltaje de entrada VDC = 30 V

Rango de corriente: 0 A – 5 A

Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A

EXPERIMENTO #1: VELOCIDAD DEL MOTOR (CA)

Datos para el experimento

Voltaje de entrada VT = 30 V

Rango de corriente: 0 A – 6 A

Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A

Procedimiento

- Se realiza la unión del motor con el generador mediante el mecanismo de acoplamiento.
- Es necesario conectar en serie las dos bobinas independientes del estator, uniendo los terminales F1- y F2+. Se garantiza la presencia de 2 terminales para el campo y 2 para la armadura.
- Los terminales del generador se conectan en serie para configurar y operar un motor serie y propiciar el movimiento del motor principal. La conexión se establece conectando F1- con A1 y F2+ con A2.
- Se establece la conexión de una fuente de corriente alterna a la entrada principal del tablero, seleccionando la posición de corriente directa.
- El generador se conecta a los bornes de alimentación principal en F1+ y F2-.
- Se conecta una fuente de corriente alterna en la entrada del circuito de alimentación de campo. En la salida, se conectan los terminales del sensor PZEM 015 o se utiliza un multímetro configurado para medir corriente directamente en los bornes de campo del motor, F1+ y F2-. No se debe energizar hasta llevar a cabo el experimento 2.
- En caso de haber seleccionado el sensor PZEM 015 en el paso anterior, se procede a conectar el sensor a los terminales de campo del motor, es decir, F1+ con L+ y F2- con L-. Si se opta por el multímetro, se continúa con el siguiente punto.
- Se conecta el sensor PZEM 017 en los terminales de armadura del motor, es decir, A1 y A2.
- Dependiendo de la elección entre el multímetro o el sensor PZEM 015, el componente libre se conecta a los terminales de campo del generador, realizando la conexión en F1+ y F2-.
- Se procede a energizar el generador aplicando un voltaje de 30 V para iniciar el movimiento de las máquinas. El aumento de voltaje se realiza de manera gradual y controlada.
- Una vez establecidos los 30 V y verificado el valor, se mide la velocidad Wm_{rpm} producida. La medición puede realizarse mediante los sensores del módulo o utilizando el tacómetro de los laboratorios de la carrera de Electricidad. Es importante destacar que solo se lleva a cabo la medición de la velocidad con la que inicia la prueba.
- El experimento concluye con la lectura de la velocidad establecida en 30 V.

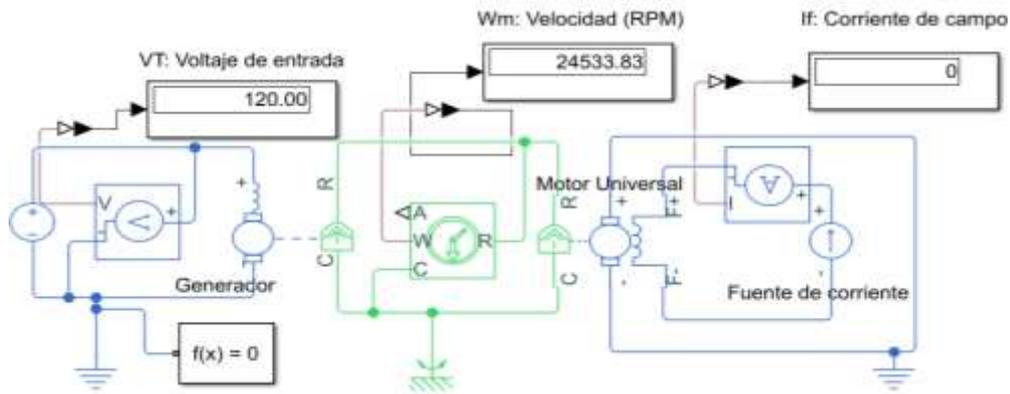


FIGURA #1

EXPERIMENTO #2: INCREMENTOS DE CORRIENTE DE CAMPO (CA)

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30 \text{ V}$.

Rango de corriente: $0 \text{ A} - 6 \text{ A}$

Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A

Procedimiento

- Este experimento inicia con la medición del valor velocidad Wm_{rpm} de las máquinas registradas en el experimento #1.
- Luego, con el motor en movimiento se eleva gradualmente el valor de corriente de campo I_f del motor mediante el circuito de alimentación de campo en un rango de 0 a 6 amperios, con intervalos de 0.5 amperios. Verifique los datos en el sensor.
- Se debe registrar los datos a medida que se realiza las variaciones de corriente. Por lo cual, este experimento se realiza al mismo tiempo que se desarrolla el experimento #3.

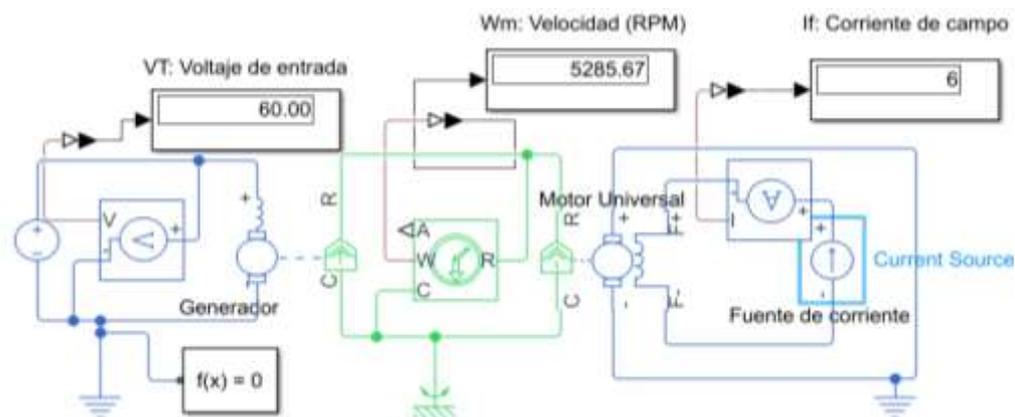


FIGURA #2

EXPERIMENTO #3: VOLTAJE GENERADO (CA)

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30\text{ V}$.

Rango de corriente: $0\text{ A} - 6\text{ A}$

Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A

Procedimiento

- Se realiza este experimento se realiza en conjunto con el experimento #2.
- Medir y registrar el voltaje generado V_G del motor a medida que se realizan las variaciones de corriente I_f en los terminales del estator del motor. La medición de V_G se realiza a través del sensor PZEM 017 conectándolo en los terminales del rotor de la máquina como se menciona en el experimento 1.
- Al completar las mediciones, se desactivan las fuentes y luego los sensores para proceder con la desconexión de todos los componentes para dar por culminada la práctica.

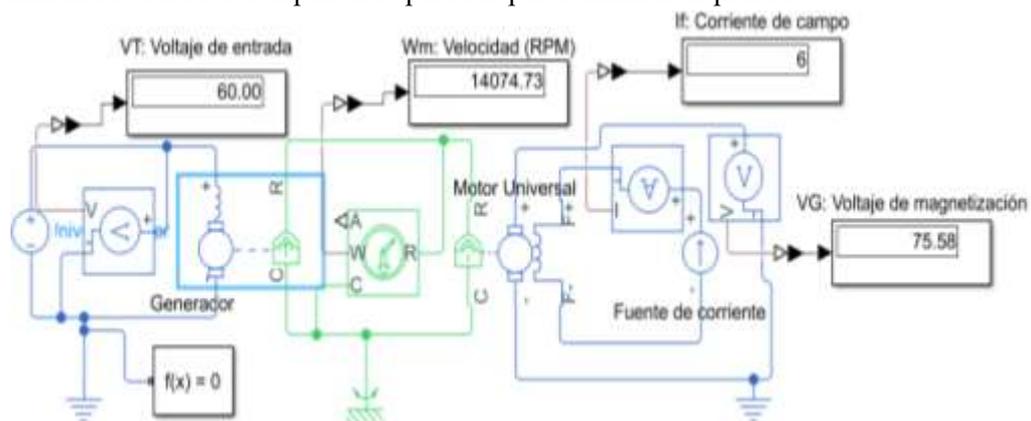


FIGURA # 3

PRÁCTICA #2

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO (CC)

INTRODUCCIÓN

La prueba de cortocircuito empleada en un motor universal tiene como propósito la determinación de las capacidades de corriente de la máquina, a través de mediciones de corriente tanto en el devanado de campo como en el devanado de armadura. Durante la ejecución de esta prueba, se conecta en serie el devanado de armadura para simular la condición de cortocircuito deseada del motor. Los resultados obtenidos en este ensayo constituyen un componente del análisis magnético de la máquina, ya que se experimentan puntos cruciales que influyen en la saturación del motor.

OBJETIVOS

Experimento #1: Medir la velocidad a la que gira el motor.

Experimento #2: Medir los incrementos de corriente de campo.

Experimento #3: Medir la corriente de cortocircuito en la armadura en cortocircuito al variar la corriente de campo.

Los experimentos propuestos para la práctica, al igual que en el caso anterior, siguen una secuencia y se ejecutan de manera conjunta. Así mismo, al iniciar la práctica, las máquinas no se desactivan en ningún momento hasta que se completen los experimentos o algún factor externo impida su culminación.

Datos para el Simulador

- El motor y el generador se mantiene con los mismos valores que en la prueba de circuito abierto
- Voltaje de entrada en DC $V_{in} = 30\text{ V}$
- Rango de corriente de armadura: $0\text{ A} - 6\text{ A}$
- Rango de corriente de campo: 0 hasta que la corriente de armadura alcance su nivel máximo
- Intervalos de incremento de corriente: 0.1 u 0.2

EXPERIMENTO #1: VELOCIDAD DEL MOTOR (CC)

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30\text{ V}$

Rango de corriente de armadura: $0\text{ A} - 6\text{ A}$

Rango de corriente de campo: 0 hasta que la corriente de armadura alcance su nivel máximo

Intervalos de incremento de corriente: 0.1 u 0.2

Procedimiento

- Se establece la conexión entre el motor y el generador a través del mecanismo de acoplamiento.
- Las dos bobinas independientes del estator del motor se unen en serie mediante la conexión de las terminales F1- y F2+. Además, las terminales de armadura A1 y A2 del motor se conectan en serie para producir el cortocircuito.
- Para registrar la corriente de cortocircuito, se utiliza un multímetro configurado para medir corriente, conectándolo en serie directamente con el motor en los terminales de la armadura A1 y A2.
- Se procede a conectar en serie los terminales de campo y armadura del generador con el objetivo de configurar y operar un motor serie para poner en movimiento el motor principal. La conexión se realiza conectando F1- con A1 y F2+ con A2.
- Se conecta una fuente de corriente alterna a la entrada principal del tablero, seleccionando la posición de corriente directa.
- Los bornes de alimentación principal se conectan a los terminales + y - del sensor PZEM 015. Y los terminales L+ y L- del mismo sensor se conectan al generador en los terminales de campo F1+ y F2- respectivamente.
- De igual forma, se conecta una fuente de corriente alterna en la entrada del circuito de alimentación de campo, y en la salida se conectan los terminales + y - del sensor PZEM 017. No se debe energizar hasta realizar el experimento 2.
- Se procede a conectar el sensor PZEM 017 a los terminales de campo del motor, es decir, F1+ con L+ y F2- con L-.
- Una vez verificadas todas las conexiones, se energiza el generador aplicando un voltaje de 60 V para poner en movimiento las máquinas. Se realiza el aumento de voltaje de forma gradual y controlada. Una vez tomada la medición se puede desactivar el sensor PZEM 015.
- Después de establecer los 30 V y verificar el valor, se mide la velocidad Wm_{rpm} producida. Esta medición puede realizarse mediante los sensores del módulo o el tacómetro de los laboratorios de

la carrera de Electricidad. Es importante destacar que solo se lleva a cabo la medición de la velocidad con la que inicia la prueba y se espera que sea igual o aproximada a la obtenida en la prueba de corriente alterna.

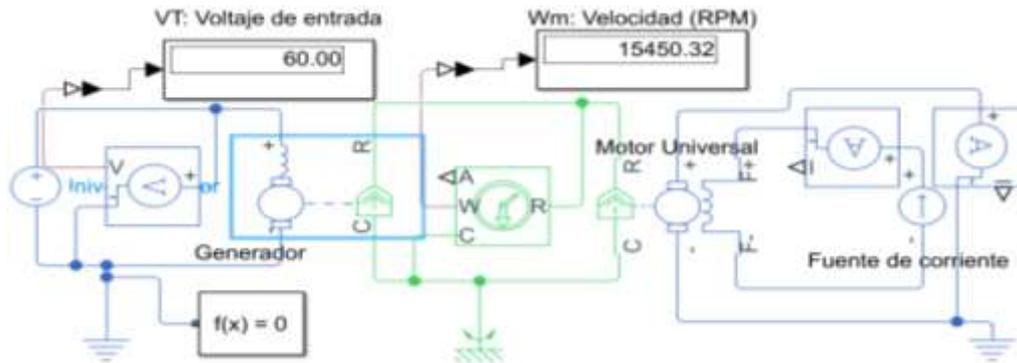


FIGURA #1

EXPERIMENTO #2: INCREMENTOS DE CORRIENTE DE CAMPO (CC)

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30 \text{ V}$

Rango de corriente de armadura: $0 \text{ A} - 6 \text{ A}$

Rango de corriente de campo: 0 hasta que la corriente de armadura alcance su nivel máximo

Intervalos de incremento de corriente: 0.1 u 0.2

Procedimiento

- El experimento da inicio con la confirmación del valor de velocidad $W_{m_{rpm}}$ de las máquinas, el cual previamente fue registrado en el experimento número 1.
- Una vez culminada la verificación, se procede a realizar una elevación gradual y controlada del nivel de corriente de campo I_f con el motor en movimiento. Esta elevación se efectúa de manera progresiva abarcando un rango que se extiende desde los 0 A hasta los 1.4 A o hasta que se alcance la corriente nominal en la armadura. Se realiza este ajuste en incrementos de 0.1 A con el fin de garantizar diferentes resultados para el desarrollo adecuado de la curva.
- Conforme se lleva a cabo la variación de la corriente de campo I_f se realiza el proceso de registro. Este experimento se hace en conjunto con el experimento #3.

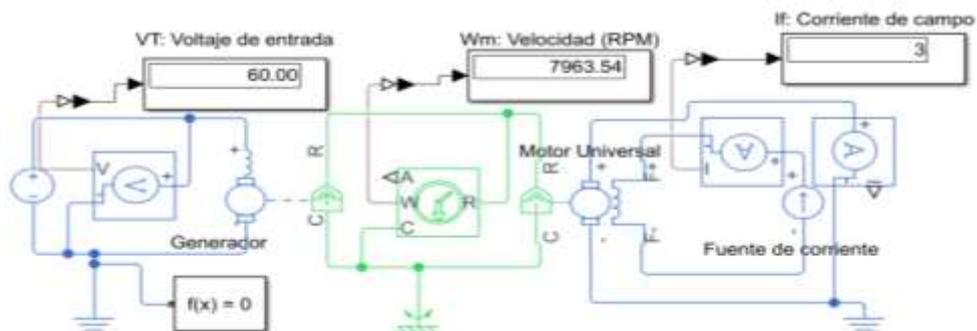


FIGURA #2

EXPERIMENTO #3: CORRIENTE DE COROTCIRCUITO (CC)

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30\text{ V}$

Rango de corriente de armadura: $0\text{ A} - 6\text{ A}$

Rango de corriente de campo: 0 hasta que la corriente de armadura alcance su nivel máximo

Intervalos de incremento de corriente: 0.1 u 0.2

Procedimiento

- Los experimentos # 2 y #3 se llevan a cabo simultáneamente, debido que el registro de la corriente de CC $I_{arm(CC)}$ depende de las variaciones de la corriente de campo I_f realizadas en el experimento #2.
- Se registran los valores de corriente de armadura $I_{arm(CC)}$, previamente conectada en cortocircuito, conforme se realizan las variaciones de corriente de campo I_f .
- Las mediciones se llevan a cabo de manera simultánea. La corriente de campo I_f puede incrementarse gradualmente en un rango previamente establecido o hasta alcanzar la corriente máxima $I_{arm(CC)}$ en la armadura.
- Una vez se registran los valores de corriente de CC $I_{arm(CC)}$, se desactivan las fuentes y posteriormente se desconectan los sensores y el resto de los elementos para dar por culminada la práctica.

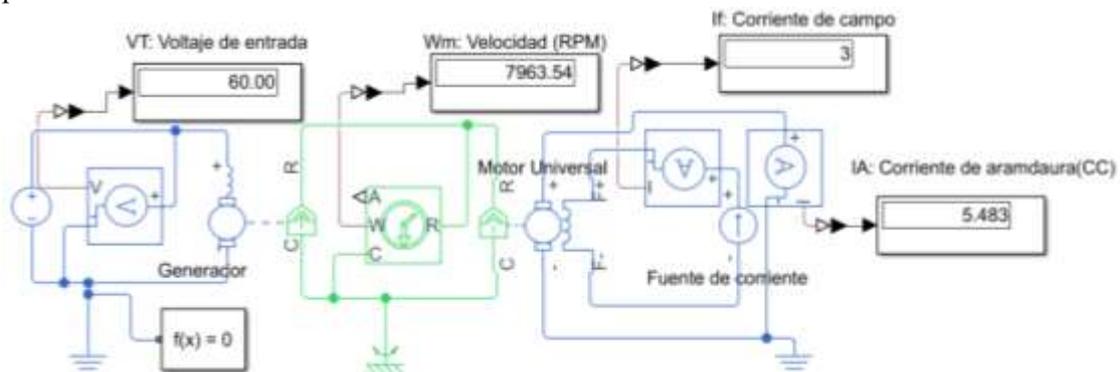


FIGURA #3

PRÁCTICA #3

PRUEBA DE CARGA EN AC Y DC

INTRODUCCIÓN

La prueba de carga aplicada a un motor universal se lleva a cabo con el propósito de evaluar el comportamiento de esta máquina al someterla a condiciones de carga variable. EL enfoque se dirige hacia el análisis tanto eléctrico como mecánico, con el objetivo de estructurar la curva par-velocidad del motor. Además, el motor universal es capaz de operar con dos tipos de alimentación, ya sea corriente alterna o corriente directa. Por tanto, con el objetivo de realizar una comparativa entre los diferentes tipos de alimentación, se realizan diferentes ensayos que permiten establecer con cuál de estas el motor logra una mayor generación de par del motor.

OBJETIVOS

Experimento #1: Medir la velocidad a la que gira el motor al variar la carga.

Experimento #2: Medir el voltaje y corriente del motor al variar la carga.

Experimento #3: Determinar los valores de par y la conversión de los valores de velocidad.

Los experimentos 1 y 2 planteados para completar esta prueba de forma efectiva, se realizan de forma simultánea, es decir, todas las mediciones se realizan en los mismos periodos de tiempo. Por lo tanto, previo al inicio de la práctica se sugiere leer todas las instrucciones de los procedimientos con los que se realiza el registro de los respectivos parámetros.

Datos para el Simulador

- El motor y el generador se mantiene con los mismos valores que en la prueba de circuito abierto
- Voltaje de entrada en DC $V_{in} = 30\text{ V}$
- Voltaje de entrada en AC $V_{in} = 60\text{ V}$
- Rango de corriente del generador $0\text{ A} - 6\text{ A}$
- Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A
- Carga: $32\ \Omega$, 700W , 120 V , 3 A

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30\text{ VDC}$; 60 VAC

Rango de corriente del generador $0\text{ A} - 6\text{ A}$

Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A

Carga: $32\ \Omega$, 700W , 120 V , 3 A

Procedimiento

- Se establece la conexión entre el motor y el generador mediante el mecanismo de acoplamiento.
- Se realiza la unión en serie de los terminales de armadura con los terminales de campo del motor, es decir, conectando F1- con A1 y F2+ con A2.
- En el caso del generador, se mantiene separada la armadura y el campo, pero se unen en serie las dos bobinas del estator, resultando en 2 terminales para la armadura y 2 para el campo.
- Se conecta una fuente de corriente alterna a la entrada principal del tablero, seleccionando la posición de corriente directa o corriente alterna.
- El sensor PZEM 017 o el PZEM 004t se conecta a las terminales de alimentación principal en el tablero, dependiendo el tipo de alimentación que se utilice.
- El motor se conecta a los bornes de carga del sensor PZEM 017, realizando la conexión en F1+ con L+ y F2- con L-, si se realiza la prueba en DC. Si la prueba se realiza en AC se conecta el motor a los terminales del sensor PZEM 004t, conectando F1+ con F y F2- con N.
- Se conecta una fuente de corriente alterna en la entrada del circuito de alimentación de campo y en la salida se conecta un multímetro configurado para medir corriente con los terminales de campo del generador, es decir, F1+ y F2-. Se puede utilizar el sensor PZEM 015 en lugar del multímetro. No se debe energizar hasta realizar el experimento 2.
- Si se elige el sensor PZEM 015 para alimentar el campo del generador, se debe conectar este a los terminales de campo del generador, es decir, F1+ con L+ y F2- con L-.

- Es necesario tener preparada la carga que se va a utilizar, ya que una vez energizado el motor se toma la primera medición. Luego, se conecta la carga en las terminales de armadura del motor universal, es decir, en los bornes A1 y A2.
- Después de verificar que todas las conexiones se han realizado correctamente, se energiza el motor aplicando el voltaje establecido para poner en movimiento las máquinas. Se realiza el aumento de voltaje de manera gradual y controlada.
- Tras energizar al motor, se verifica que el valor de velocidad Wm_{rpm} obtenido sea igual o similar al de la prueba de circuito abierto, ya que es el valor de referencia para esta prueba. En caso de mostrar una diferencia considerable, se ajusta el nivel de voltaje hasta lograr una velocidad aproximada. De esta manera, concluye este experimento.

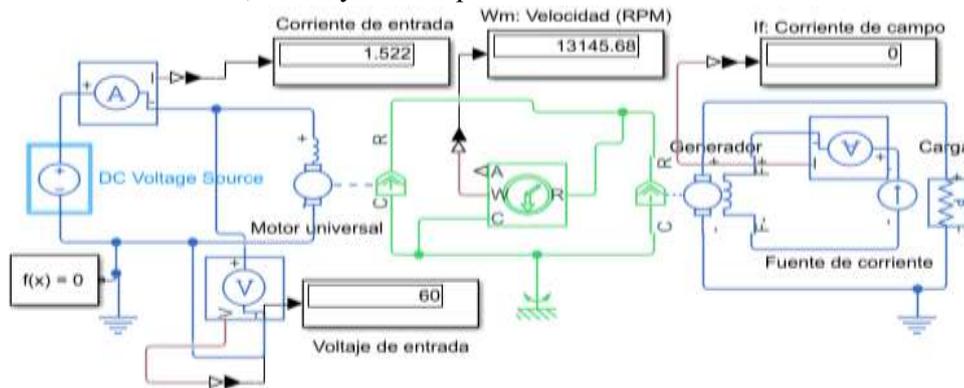


FIGURA #1

EXPERIMENTO #2: CORRIENTE Y VOLTAJE DE MOTOR UNVIERSAL

Datos para el experimento

Voltaje de entrada $V_T = 30 \text{ VDC}; 60 \text{ VAC}$

Rango de corriente del generador $0 \text{ A} - 6 \text{ A}$

Intervalos de incremento de corriente: 0.5 A

Carga: $32 \Omega, 700\text{W}, 120 \text{ V}, 3 \text{ A}$

Procedimiento

- Este experimento inicial una vez se establece el valor de velocidad inicial, el cual se generó sin carga conectada y sin aumentar el valor de corriente de campo del generador.
- Se conecta de manera inmediata la carga a los terminales de armadura del generador, el extremo positivo en A1 y el negativo en A2.
- Registrar el valor producido de voltaje y corriente mediante el sensor PZEM 017 al conectar la carga, sin elevar la corriente de campo del generador.
- Luego, se incrementa gradualmente el valor de corriente de campo del generador cada $0,5 \text{ A}$, hasta que el motor universal alcance un valor de corriente aproximado a su corriente nominal. La primera medición con carga conectada se realiza en 0 A .
- Mientras se realizan las variaciones de corriente de campo del generador se realizan las mediciones de corriente, voltaje, potencia, entre otros parámetros eléctricos del motor universal, siendo de relevancia los valores de corriente y voltaje que se registran y visualizan mediante el sensor PZEM 017. Además, como se mencionó anteriormente la velocidad se mide en los mismos periodos de registro.

- Se pueden visualizar los valores de carga en el sensor PZEM 015 o en el multímetro, dependiendo de cual haya sido la selección. Sin embargo, esto es opcional ya que dichos datos no son de relevancia para el estudio.
- Una vez culminado el registro se deben desactivar las fuentes de alimentación para continuar con el experimento 3.

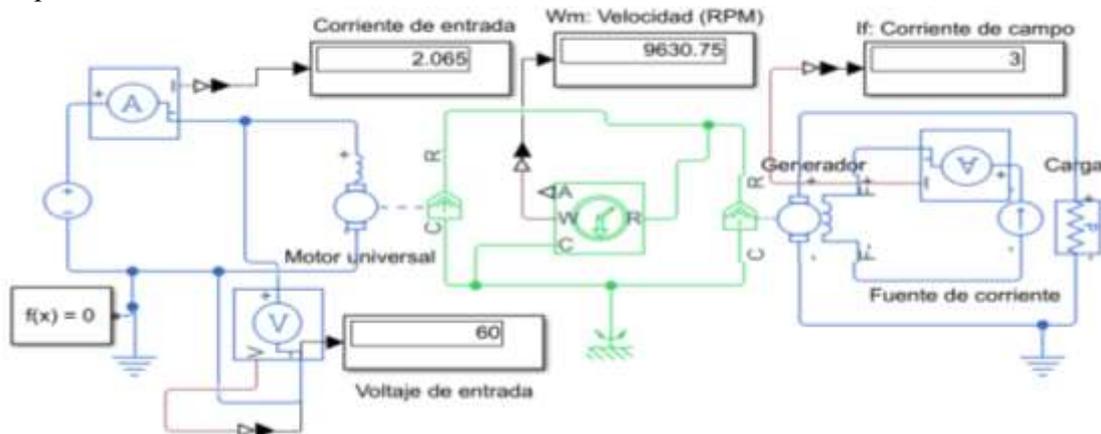


FIGURA #2

EXPERIMENTO #3: DETERMINAR EL PAR Y LA CONVERSIÓN DE UNIDADES DE LA VELOCIDAD

Datos para el experimento

Voltaje de entrada 30 VDC; 60 VAC

Rango de corriente del generador 0 A – 6 A

Intervalos de incremento de corriente 0.5 A

Carga: 32 Ω , 700W, 120 V, 3 A

Resistencia interna $R_a + R_f = 3,90 \Omega$

Voltaje de armadura $E_A = VT - I_A(R_a + R_f)$ [DC]; $E_A = VT - I_A(R_a + R_f + X_L)$ [AC]

Conversión de velocidad $Wm_{\frac{rad}{s}} = Wm_{rpm} \cdot \frac{2\pi}{60}$

Torque $T_{ind} = \frac{E_A \cdot I_A}{Wm_{\frac{rad}{s}}}$

Procedimiento

- Con los valores de voltaje VT y corriente I_A registrados en el experimento #2 se realiza el cálculo de voltaje de armadura E_A del motor, que corresponde al valor real de voltaje ya que se considera la caída de tensión del motor producida principalmente por la resistencia interna del mismo.
- Se realiza la conversión de unidades de rpm a rad/s, de todos los valores de velocidad que se registraron a medida que se varió la corriente de campo del motor.
- Se calcula el torque inducido T_{ind} del motor mediante los valores de voltaje de cálculo, la corriente del motor y la velocidad del motor. Con todos los datos calculados es posible estructurar la curva par-velocidad.
- Con la formación de la curva par-velocidad se da por culminada la práctica y se procede a desconectar los diferentes elementos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad



MANUAL DE MANTENIMIENTO PARA UN BANCO DE PRUEBAS CON UN MOTOR UNIVERSAL

Autor:

Oliver Otoniel Oñate Macas

Ibarra – Ecuador

2023

MANUAL DE MANTENIMIENTO

1. Introducción

Los motores eléctricos a nivel doméstico e industrial juegan un papel fundamental en el desempeño de diferentes actividades tanto cotidianas como aplicaciones complejas en la industria. De este hecho, surge la necesidad imperante de tener un control del funcionamiento eficiente de los diferentes motores eléctricos con el fin de que desarrollen las funciones para las que fueron programados con normalidad y evitando acortar la vida útil de estas máquinas. Se diseña un manual de reparación y mantenimiento para un banco de pruebas con un motor universal con el propósito de proporcionar prácticas y consejos para el cuidado y reparación a los diferentes operadores que utilicen el módulo de pruebas. El mantenimiento preventivo es esencial para el cuidado de la máquina ya que de esta forma se evita daños que acorten su vida útil. Sin embargo, en el desarrollo de algún ensayo se pueden presentar fallos inesperados que causen daños a piezas específicas de la máquina, obligando a buscar una solución provisional o realizar un cambio de la pieza con un repuesto adecuado. Los procedimientos que se aplican en esta guía se basan en diferentes estudios como “El efecto de la reparación/Rebobinado de la eficiencia del motor” (AEMT, 2003). “Manual de instalación, reparación y mantenimiento de motores línea D” (WEG, 2015). Los cuales abordan una serie de motores y aspectos de reparación. El manual se centra en el cuidado del banco de pruebas y el motor universal con procedimientos y recomendaciones específicas.

2. Terminología

La terminología es esencial para el adecuado manejo del motor, ya que permite reconocer los diferentes componentes que conforman un motor eléctrico y el banco de pruebas. En la figura 1 se presenta la terminología general de un motor de corriente alterna (AC), mientras en la figura 2 se presenta la terminología simplificada de un motor universal.

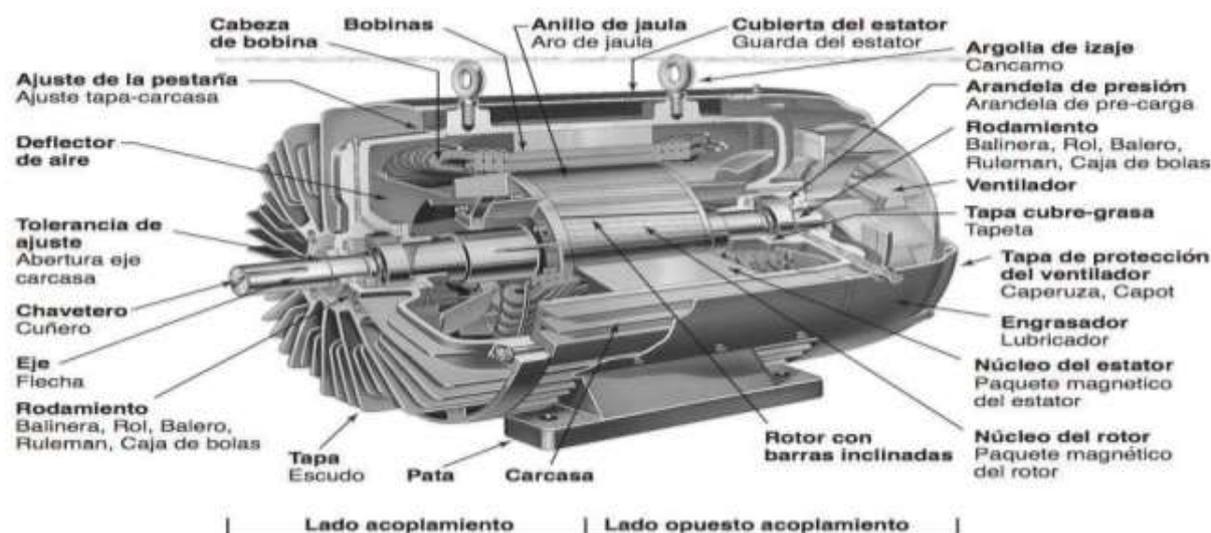


Fig.1. Partes de un motor eléctrico de AC.

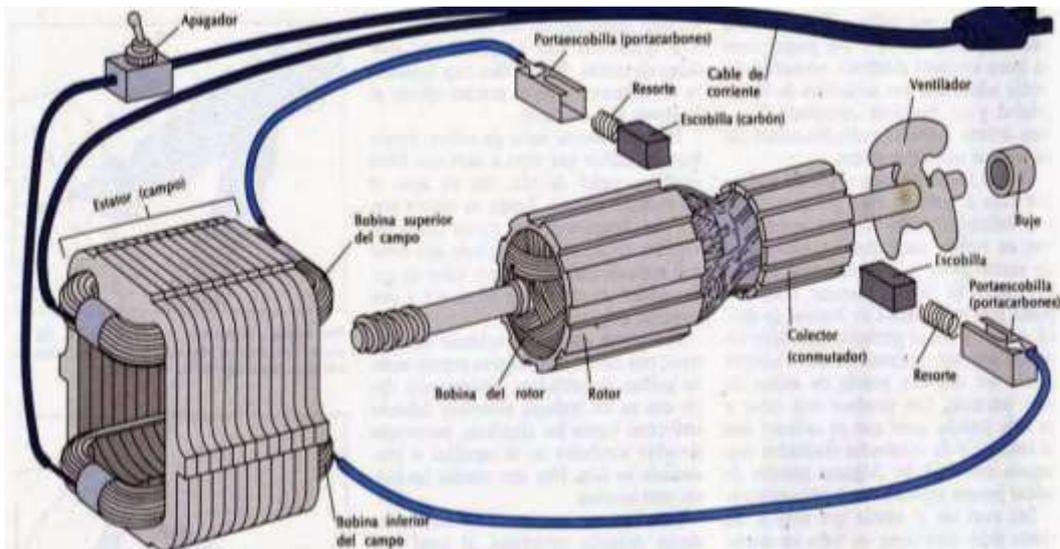


Fig.2. Partes de un motor universal.

Reconocer las diferentes partes del motor universal ayuda a determinar de mejor forma los componentes que frecuentemente sufren un mayor desgaste y requieren de un mayor cuidado y mantenimiento preventivo. Por otro lado, la terminología del banco de pruebas con sus diferentes componentes que lo conforman se presenta en la figura 3 que se presenta a continuación.

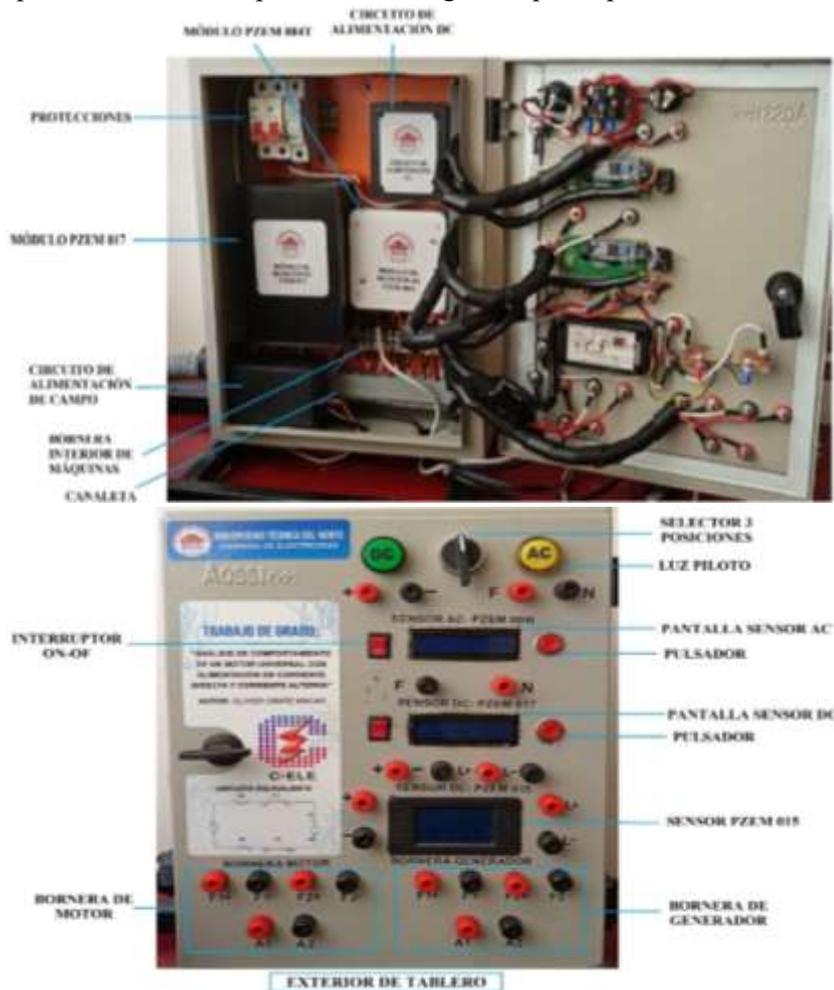


Fig.3. Partes del banco de pruebas

El mantenimiento del banco de pruebas se basa principalmente en el cuidado y reparación de los sensores eléctricos y mecánicos, así como sus puntos de conexión.

3. Detección de averías de un motor universal

Se puede lograr que el motor universal funcione de forma eficiente empleando diferentes métodos para un mantenimiento preventivo adecuado que busca la prolongación de la vida útil del motor. Algunos de los principales aspectos u orígenes que pueden contribuir a un mal funcionamiento de la máquina son:

- **Instalación incorrecta:** conexiones entre componentes mal realizadas, con elementos en mal estado o sujeciones mal apretadas, lo que puede provocar una afectación al rendimiento y durabilidad de la máquina.
- **Aplicaciones no adecuadas para el motor:** se puede presentar de diferentes formas, lo más común es una mala selección en el tamaño y modelo del motor para operar con una carga o un trabajo determinado. Si la aplicación requiere de un esfuerzo considerablemente mayor al que puede realizar el motor puede causar fallas prematuras en la máquina debido a factores como corrientes intensas de arranque, sobrecalentamiento, desgaste acelerado de escobillas, entre otros.
- **Condiciones ambientales adversas:** se presentan cuando se producen temperaturas excesivas ya sea del ambiente o la temperatura que deriva del motor. Por lo cual, es esencial revisar la temperatura de trabajo del motor que frecuentemente se ubica en la placa de este, por cada 10°C de aumento de temperatura por encima del límite máximo, la vida útil del aislamiento se ve reducida a la mitad.
- **Fallas eléctricas:** la mayoría de estas afectaciones se producen por un voltaje de suministro incorrecto o con variaciones considerables desencadenando una avería prematura del motor universal. Si se produce una caída de voltaje notable se genera un aumento de corriente lo que produce un sobrecalentamiento de la máquina. Por otro lado, un aumento de voltaje mayor al 10% de su voltaje nominal genera un flujo magnético más intenso produciendo mayores pérdidas en el hierro del motor y la saturación de este, así como una mayor intensidad de corriente que genera un sobrecalentamiento que puede ser perjudicial para la máquina.
- **Falta de mantenimiento o mantenimiento inapropiado:** no realizar un mantenimiento o no realizarlo de forma adecuada acorta de manera significativa la vida útil del motor. Cabe mencionar que antes de realizar cualquier mantenimiento se debe considerar si este tiene un costo adecuado y no es mayor a la adquisición de una nueva pieza o un nuevo motor de ser el caso.

4. Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento se realiza en base a los criterios de detección de fallas del motor y el banco de pruebas, los cuales se presentan en una serie de puntos descritos a detalle que permiten realizar un mantenimiento adecuado del motor previo a una falla y luego de una avería.

4.1 Consideraciones generales

La elaboración de un programa de mantenimiento adecuado para motores universales debe considerar las siguientes generalidades:

- Motor, banco de pruebas y elementos extras deben mantenerse limpios
- Medición periódica de la resistencia del aislamiento (cada 6 meses)
- Medición periódica de la temperatura en los devanados y el sistema de ventilación (cada 6 meses)
- Verificación eventual de desgastes en el conmutador y las escobillas (Cada 4 o 6 meses)
- Verificación eventual del sistema de lubricación (cada 6 meses)
- Medición de los niveles de vibración del motor (opcional)
- Verificar los equipos asociados (Banco de pruebas) (cada 6 meses)
- Inspección de protecciones, accesorios y conexiones del motor en buen estado (cada 6 meses)



Siga las recomendaciones generales mencionadas para evitar daños no deseados del motor y los equipos asociados. El tiempo para realizar estas acciones dependerá del motor y las condiciones locales de la aplicación.

4.2 Limpieza del motor

La limpieza es fundamental para el mantenimiento preventivo del motor y los equipos asociados, los puntos que se deben seguir en esta etapa son:

- Limpieza de la carcasa del motor para facilitar el intercambio de calor del motor con el medio. De esta forma se evita la acumulación de aceite o polvo en la parte externa del motor.
- De igual forma la parte interna del motor debe ser limpiada para evitar exento de polvo, detritos y aceites.
- La limpieza se debe realizar con escobillas, cepillos de cerdas suaves o con paños de algodón secos. De ser necesario utilice una aspiradora de boquilla fina para limpiar el polvo acumulado en las diferentes partes del motor.
- Se recomienda limpiar las cajas de conexión, borneras y diferentes puntos de conexión para evitar la oxidación y mantener buenas condiciones operativas.

4.3 Mantenimiento de los devanados (Estator y Rotor)

El motor universal cuenta con dos devanados conectados en serie, la armadura se conecta con el campo a través de las escobillas. Para este proceso se sugiere separar esta conexión. Además, la inspección de estos elementos se debe realizar con regularidad, estableciendo un periodo de 4 meses, o en largos periodos de operación del motor y después de paradas prolongadas. En la figura 4 se presenta un ejemplo de los devanados de un motor universal.



Fig.4. Devanados del estator y el rotor de un motor universal

La inspección debe ser tanto visual como práctica, analizando cada desperfecto, daño o suciedad. Si los valores de resistencia son elevados se debe realizar una inspección más a fondo para ver si es necesario un rebobinado. Sin embargo, esta sería la última opción. Frecuentemente los valores de resistencia interna del motor se elevan debido al polvo y la humedad que puede tener la máquina. La limpieza de estos componentes se puede realizar siguiendo los siguientes consejos:

- Mantener el área de trabajo libre de suciedad, aceite, polvo, etc.
- Limpieza periódica de los devanados para operar con aire limpio (2 a 3 veces al año)
- Para la limpieza utilice elementos suaves como un paño seco o una aspiradora con boquilla fina, de preferencia plástica para evitar roces entre metales.



Si utiliza algún solvente para la limpieza tomar en cuenta que la mayoría de estos son altamente tóxicos y/o inflamables.

Los puntos principales donde se realiza la inspección una vez terminada la limpieza de los devanados son los siguientes:

- Revisar los aislamiento del devanado y sus conexiones con otros componentes.
- Verificar que las sujeciones, ranuras y soportes estén firmes.
- Revisar si no existen grietas, malas soldaduras de ser el caso, unión entre elementos que formen cortocircuitos. Si se detecta una irregularidad se recomienda visitar un técnico.
- Verificar que los cables estén conectados correctamente y los elementos de sujeción se encuentren bien apretados. De ser necesario realice nuevamente el proceso de reapriete.

NOTA: La resistencia de aislamiento se debe medir únicamente cuando se hayan realizado todos los procesos de mantenimiento. Frecuentemente se realiza la prueba DC para obtener los valores de resistencia. Si el motor ha estado en reposo un largo periodo es imprescindible medir la resistencia de aislamiento del motor previo a su activación.

4.4 Mantenimiento Conmutador

El conmutador debe encontrarse en buen estado para el correcto funcionamiento del motor universal. En la figura 5 que se presenta a continuación, se puede apreciar el conmutador de un motor universal.



Fig.5. Conmutador de un motor universal

Este componente requiere de una inspección periódica considerando los siguientes puntos:

- El conmutador debe estar completamente limpio incluyendo los surcos entre láminas. Además, se debe encontrar libre de aceite o grasa.
- Revisar la coloración de la platina del conmutador, frecuentemente presenta un color marrón oscuro o levemente negra. Si al verificar la superficie se encuentra esta brillante o áspera, es probable que las escobillas requieran mantenimiento para evitar daño del conmutador.

- Si la platina del conmutador presenta una camada negra y espesa se debe frecuentemente a que el motor ha sido sometido a sobrecargas prolongadas con presencia de humedad. Para remover esta deposición se utiliza piedra pome artificial o una lija fina N.º 220.
- Revisar la posición de la pista de las escobillas con la superficie del conmutador, si la diferencia es mayor a 0.1 mm se debe reacondicionar el conmutador. Reacondicionar al conmutador consiste en un torneado fino y el rebajamiento de las láminas de mica. En la figura 6 se muestra el mínimo de diámetro desgastado que el conmutador puede llegar a tener.
- Verificar la altura entre láminas adyacentes, si cualquiera es mayor a 0.5 mm, se requiere reparación del conmutador por un técnico.
- De igual forma si la ovalidad del conmutador es mayor a 0.1 mm se debe reparar con un técnico.
- Los puntos de mantenimiento mencionados anteriormente se deben aplicar únicamente si el valor económico no excede el costo de un repuesto nuevo o teniendo valores cercanos.
- La inspección de ese componente debe ser continua, cada 3 meses, con el fin de mantener una operación eficiente del motor. Sin embargo, el mantenimiento se realiza solo si existe algún daño en la máquina.

CARCASA	DIÁMETRO DEL CONMUTADOR (mm)	
	NUEVO	DESGASTADO
90	85	82
100	85	82
112 (2p)	92	89
112 (4p)	105	102
132	125	121
160	145	137
180	170	162
200	160	152
	190	180
225	180	170
250 (C)*	210	200
250	210	200
280 (C)*	240	228
280	240	228
315	270	258
355	270	258
400	320	306
450	380	364

Fig.6. Diámetro del conmutador

El proceso de reacondicionamiento debe ser realizado con especial cuidado para evitar laminar más de lo necesario, ya que un exceso puede resultar en un daño completo del componente.

Verificación de la conmutación

Se establece como una conmutación exitosa del motor universal cuando el proceso de conmutación no resulta en daños o perjuicios al conmutador y las escobillas. Cabe recalcar que la ausencia total de chispas no significa específicamente una conmutación exitosa. Se puede verificar una conmutación adecuada aplicando una carga y observando el chispeo, se considera anormal a partir del nivel $1 \frac{3}{4}$, obsérvese la Figura 7.

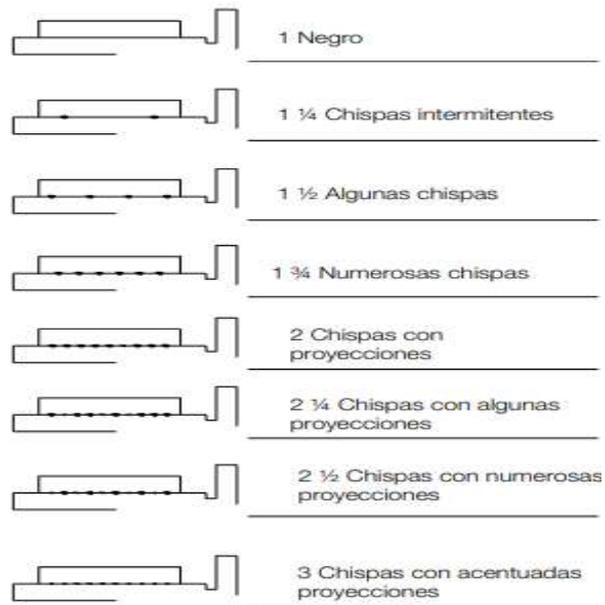


Fig.7. Niveles de chispeo del conmutador con las escobillas

Cuando se sobrepasa los niveles de chispeo es necesario determinar las causas, las cuales frecuentemente se producen por causas mecánicas, vibraciones, deformación del conmutador, etc. Además, se pueden presentar por problemas eléctricos como mal contacto entre escobillas y conmutador, problemas en los devanados, picos de corriente, etc. Los aspectos físicos reales también pueden afectar al conmutador como la humedad, polvo excesivo, existencia de vapores o gases corrosivos, etc.



Si el motor opera de forma continua con un conmutador desgastado se originan chispas en niveles excesivos, lo que puede desencadenar en un daño permanente del motor.

4.5 Mantenimiento del portaescobillas

El portaescobillas es el componente encargado de albergar los carbones del motor universal, deben permanecer limpias para permitir el correcto movimiento de las escobillas. La presión que deben tener los resortes debe variar entre 200 y 250 g/cm², a excepción de casos particulares. Por otro lado, se debe mantener una distancia entre el compartimento y la superficie del conmutador, la cual debe ser 2 mm aproximadamente. En la figura 8 se presenta un ejemplo de cómo deben estar situados estos componentes.

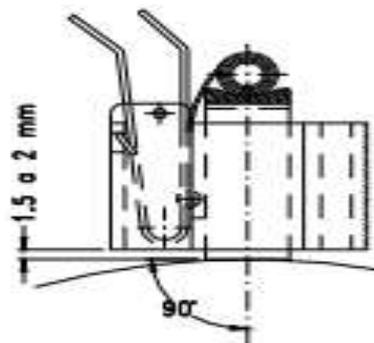


Fig.8. Disposición de portaescobillas y carbones

Las medidas presentadas se establecen con el objetivo de evitar la ruptura de los carbones y/o causar daños al conmutador de la máquina. El ajuste de fábrica inicial del portaescobillas se dispone en la posición más favorable para el proceso de conmutación, realizando marcas o ajustes en puntos determinados. En el caso de requerir desmontar este componente, se debe respetar la señalización o marcación para su nueva instalación. El mantenimiento de este componente básicamente se basa en la limpieza, ya que rara vez se requiere otro tipo de acciones. En el peor de los casos podrían sufrir una deformación dejando obsoleto a este elemento. Por lo cual, se sugiere un cambio por nuevos portaescobillas. Las consideraciones para realizar la limpieza de este componente son:

- Se debe limpiar los portaescobillas con una aspiradora de polvo o un paño seco que remueva el polvo de las escobillas hacia fuera del motor.
- No use ningún tipo de líquido de limpieza para la limpieza del portaescobillas debido a que el vapor que pueden generar estos productos afecta al funcionamiento de las escobillas.
- No se debe limpiar la película formada en las escobillas en el extremo que apunta al conmutador ya que es beneficioso para el proceso de conmutación.
- Realizar la limpieza de los soportes y terminales de conexión únicamente si están cubiertas de polvo.
- Limpiar las escobillas fuera del compartimentos para producir el libre movimiento.
- Se debe realizar una inspección después de unas 10 practicas o cada 4 meses si los motores no han sido utilizados.

Cabe mencionar que la limpieza puede ser superficial sin la necesidad de remover las escobillas. En el caso de tener algún tipo de problema con el proceso de conmutación, realizar una inspección completa retirando las escobillas y de ser necesario realizar el mantenimiento completo.

4.6 Mantenimiento de escobillas

Las escobillas juegan un papel fundamental en el funcionamiento del motor universal al permitir el proceso de conmutación entre el rotor y el estator del motor a través del conmutador. Cada motor universal cuenta con escobillas de una calidad determinada para una aplicación específica. La observación de este componente debe ser constante, asegurando que se cumplan los siguientes puntos:

- Contar con el mismo tipo de escobillas
- Contar con la misma longitud de cable
- Verificar el libre movimiento de las escobillas en su compartimiento
- Revisar el desgaste de las escobillas observando la marca en relieve en la cara lateral. Se debe conservar una altura mínima la cual se establece teniendo una marca visible. De esta forma se evitan daños del conmutador
- Si va a sustituir una escobilla, se debe sustituir todo el juego para que cuenten con el mismo nivel de desgaste
- Si el cambio de escobillas se realiza por unas de las mismas características no se debe retirar la pátina existente en el conmutador.
- Si el cambio de escobillas se da por unas de diferente calidad se debe remover de forma obligatoria la pátina del conmutador con una lija fina o piedra pome.

Si la demanda de potencia hacia el motor universal es inferior a la potencia nominal de manera constante se debe realizar una readecuación de este componte en función de la carga a la que es sometido. Los mantenimientos cumplen los mismos periodos que los portaescobillas. En la figura 9 se presenta un ejemplo de la marca de desgaste que suelen presentar los motores.

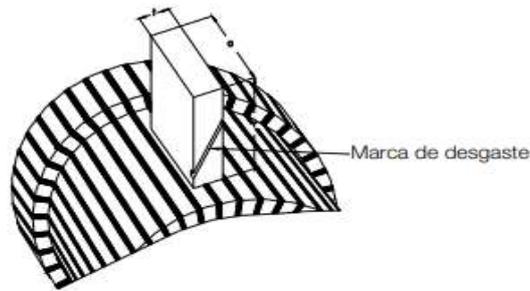


Fig.9. Referencia de la marca de desgaste de las escobillas

Los cambios de escobillas por unas de diferente calidad o la adecuación por los niveles de carga, deben ser consultados con un experto en el mantenimiento de máquinas eléctricas



Si no se realiza una adecuación de las escobillas en función de la carga con la que opera, puede ocurrir un desgaste excesivo de estas, así como la marcación de las pistas del conmutador y se puede causar daños al aislamiento del motor, lo que afecta directamente a la vida útil del motor.

4.7 Lubricación del motor universal

El motor universal se debe lubricar únicamente en los rodamientos, se debe remover todo sedimento o grasa vieja de las pistas de los rodamientos. Se debe expulsar todo el polvo u otros contaminantes que ocasione daño de estos componentes. En el caso de ser necesario se puede realizar la libración con el motor operando con el objetivo de que el lubricante alcance cada parte de los rodamientos. Si se lubrica el motor sin estar operando se debe considerar que la cantidad de lubricante previsto a usar debe reducirse a la mitad de lo que se usaría con el motor en funcionamiento

Utilice lubricante para motores eléctricos como el WD-40, el W80 o algún lubricante similar y de ser posible de uso específico para rodamientos. Revisar previamente las especificaciones del producto verificando si su aplicación no causa daños al motor. Se puede aplicar con espray o mediante la punta fina del lubricante. La lubricación se debe realizar cada 4 o 6 meses, según el uso de las máquinas.

4.8 Mantenimiento del banco de pruebas

El banco de pruebas se conforma de diferentes elementos de protección y control los cuales se asientan sobre un tablero. Cada componente requiere de un mantenimiento diferente, aunque muchos de estos cuentan con procesos similares. Los componentes del banco de pruebas a los cuales se debe realizar un mantenimiento periódico son:

- Arduino
- Circuito rectificador
- Protecciones
- Sensores de medición
- Conexiones
- Tablero

Se realiza una breve descripción de los componentes mencionados, así como el proceso de mantenimiento que se requiere para estos.

4.8.1 Mantenimiento Arduino

Dentro del banco de pruebas se cuenta con dos Arduinos ATmega 2560 los cuales se encargan del proceso de registro, visualización y almacenamiento de datos, siendo un componente primordial para poder analizar al motor universal. En la figura 10 se presenta un ejemplo del Arduino utilizado dentro del banco de pruebas.

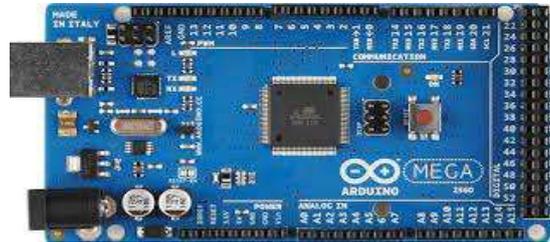


Fig.10. Arduino ATmega 2560

Para su mantenimiento se debe considerar los siguientes puntos:

- Realizar una limpieza cada 6 meses del Arduino cuidando las conexiones realizadas en el mismo. Utilice una aspiradora pequeña de punta fina o una brocha pequeña de cerdas suaves.
- Si se presenta suciedad acumulada que altere el funcionamiento del Arduino o los componentes conectados a este, remueva cuidadosamente las conexiones para realizar una limpieza más completa.
- Se debe revisar las pines de conexión, puntos de suelda y las diferentes partes del Arduino en el caso de que exista alguna falla durante su operación.
- No utilice ningún tipo de solvente o productos de limpieza para limpiar el Arduino ya que estos pueden causar el daño completo del componente
- Revisar si la alimentación que recibe el Arduino está dentro del rango permisible

De manera general este componente no requiere de un mantenimiento específico. Sin embargo, es importante mantenerlo limpio y bajo supervisión por la importancia que tiene dentro del módulo de pruebas

4.8.2 Mantenimiento del Circuito rectificador

El circuito rectificador está conformado por un capacitor y un rectificador que transforman la señal AC en DC y la mantienen estable. El mantenimiento de estos elementos es simple, consiste en revisar de forma periódica los puntos de suelda, si hay ruptura o no presentan firmeza realice nuevo puntos de suelda con ayuda de un caudín y estaño. Realizar una limpieza cada 6 meses con una aspiradora pequeña de boquilla fina o una brocha pequeña de cerdas suaves, sin el uso de ningún líquido de limpieza, se debe realizar en seco. En la figura 11 se presenta el circuito rectificador utilizado en el banco de pruebas.



Fig.11. Circuito rectificador AC-DC del banco de pruebas

Si se presentan problemas en la alimentación de forma continua o se presenta una señal con un voltaje de rizado muy alta, se debe revisar los valores de tensión ingresados y los valores de salida, para verificar que operen acorde a sus especificaciones, En el caso de no operar de forma estable la única alternativa es el cambio del componente por uno de iguales características, los cuales son de fácil adquisición en el medio y asequibles.

4.8.3 Mantenimiento de las Protecciones

El proceso de mantenimiento de las protecciones es fundamental para garantizar la seguridad y la operación confiable de los diferentes componentes del banco de pruebas. Por lo tanto, se sugiere realizar este proceso de forma periódica en un intervalo de 4 a 6 meses. Las protecciones utilizadas en el banco de pruebas se presentan en la figura 12 a continuación.



Fig.12. Elementos de protección del banco de pruebas

Las protecciones utilizadas se conforman de un disyuntor termomagnético y un fusible, los aspectos que se deben considerar para el mantenimiento de estos componentes son:

- Realizar una inspección visual de los protecciones en busca signos evidentes de daño, corrosión, suciedad o cualquier otro factor.
- Se realiza una limpieza periódica de las diferentes partes de estos componentes como contactos y puertos de conexión.
- Si se tiene la sospecha de que los componentes no están operando correctamente desconecte los elementos y realice pruebas de funcionamiento como la de disparo y la de restablecimiento. Solicite ayuda de un técnico o de alguien calificado para estas pruebas.
- Si los daños son graves se sugiere el cambio inmediato de los componentes.

4.8.4 Mantenimiento de sensores (PZEM 004t, PZEM 017, PZEM015 y LM3144)

Los sensores de medición son cruciales para la lectura de las diferentes variables eléctricas y mecánicas registradas en las pruebas prácticas que se aplica al motor universal. Por tanto, su cuidado y mantenimiento debe llevarse a cabo de forma periódica, cada 6 meses o menos si es necesario, tomando en consideración los siguientes aspectos:

- Limpiar los sensores de medición de forma periódica con una aspiradora pequeña con una boquilla fina o con una brocha pequeña de cerdas suaves.
- Revisar que las conexiones se mantengan firmes.
- Revisar siempre los límites de medición de los sensores de medición previo a cualquier práctica.
- Si existe algún error interno del sensor, se sugiere el cambio del componente por uno nuevo debido a la baja de disponibilidad de repuestos para el sensor en el medio y su reparación puede tener un costo elevado.

El mantenimiento de estos componentes es sencillo y se enfoca más en el aspecto preventivo, ya que un daño a estos componentes puede significar el cambio total del sensor.

4.8.5 Mantenimiento de conexiones

Dentro del banco de pruebas se realiza una serie de conexiones para unir los diferentes elementos que conforman el módulo de prácticas. La continuidad de señales es necesaria para realizar los ensayos de forma efectiva, lo que amerita un cuidado preventivo y periódico de las diferentes conexiones, cada 6 meses o menos si amerita. Las instrucciones para el mantenimiento son las siguientes:

- Si se presenta algún tipo de falla en el banco de pruebas y se revisaron previamente el resto de los componentes, se debe medir la continuidad de los cables mediante un multímetro para verificar que el error no se haya presentado por una conexión floja en las borneras o los terminales.
- Si existe una falla por sobrecalentamiento y el aislamiento de uno o varios cables sufren un daño grave se sugiere el cambio de los cables afectados por un cable del mismo calibre (16 AWG, TFF, 10 A).
- De forma periódica revisar que las conexiones se mantengan firmes y tengan continuidad entre terminales y borneras.
- Realizar la limpieza de borneras y terminales con una aspiradora pequeña de punta fina o con una broca pequeña de cerdas suaves (opcional).

Las pautas para el mantenimiento de las conexiones deben ser aplicadas cuando los motores y el resto de los componentes se encuentren fuera de funcionamiento.

4.8.6 Mantenimiento del tablero

El mantenimiento del tablero se enfoca netamente en la limpieza de este. Para su limpieza se debe utilizar una aspiradora pequeña de boquilla fina, un paño seco o una brocha pequeña de cerdas suaves. Se puede utilizar todos estos en conjunto para lograr un mejor resultado. Para cuidar el aislamiento del tablero no utilice ningún producto de limpieza y realice el proceso en seco. El mantenimiento debe realizarse de forma periódica cada 4 o 6 meses, todo dependerá de las condiciones del medio.

El mantenimiento del motor universal y del banco de pruebas se debe realizar de forma periódica, siguiendo las instrucciones de cuidado y reparación para cada uno de los elementos que conforman el módulo. Además, parte del cuidado de los motores es seguir las instrucciones del manual de prácticas para realizar los diferentes ensayos de forma adecuada y segura, evitando daños de las máquinas o algún otro elemento mientras se encuentran en funcionamiento.