

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad De Ingeniería En Ciencias Aplicadas

Carrera De Electricidad

ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE MOTORES DE INDUCCIÓN MONOFÁSICOS

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

Autor:

Jonathan Fernando Chandi García

Tutor:

MSc. Jhonny Javier Barzola Iza

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. 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:	040206037-0	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Chandi García Jonathan Fernando	
DIRECCIÓN:	La Libertad, Espejo, Carchi	
EMAIL:	jfchandig@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	S/N	TELÉFONO MÓVIL: 0983461177

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE MOTORES DE INDUCCIÓN MONOFÁSICOS
AUTOR (ES):	Chandi García Jonathan Fernando
FECHA: DD/MM/AAAA	14/12/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Electricidad
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 14 días del mes de diciembre de 2023

EL AUTOR:

Jonathan Fernando Chandi García

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de implementación elaborado por el señor estudiante: Chandi García Jonathan Fernando, certifico que se ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de implementación titulado "ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE MOTORES DE INDUCCIÓN MONOFÁSICOS". Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico: aprobando la defensa, impresión y emplastificado.



Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

Dedico primeramente este trabajo a mis padres Alba y Juan, además de todas las personas que me apoyaron durante todo este transcurso y demás familiares que hoy no están presentes en este mundo y que siempre confiaron en mí.

Agradecimiento

A Dios y a mis padres por darme la vida y ayudarme salir adelante.

A mis hermanos Silvia, Viviana, Gabriela y Alexis, familiares y amigos quienes siempre estuvieron presente en los momentos difíciles brindándome su apoyo para superar estas etapas.

A la Universidad Técnica del Norte por darme la oportunidad de formar parte de ella para mi preparación académica, a la Carrera de Electricidad y sus docentes, quienes contribuyeron con su conocimientos, valores, virtudes y consejos para mi vida profesional y personal.

A todas las personas conocidas durante mi transcurso universitario, compañeros y amigos que subieron estar presente cuando se los necesitaba.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
Contexto	XIV
Planteamiento del problema	XVII
Formulación del problema	XVII
Objetivos.....	XVIII
Objetivo general	XVIII
Objetivos específicos	XVIII
Justificación	XIX
Alcance.....	XX
CAPÍTULO I	
1. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO	1
1.1. Motores de inducción.....	1
1.1.1. Aspectos generales del motor de inducción trifásico.....	2
1.1.2. Aspectos generales del motor de inducción monofásico	4
1.2. Pruebas para la realización de los métodos	8
1.2.1. Prueba de corriente continua	9
1.2.2. Prueba de rotor bloqueado	9
1.2.3. Prueba en vacío	9
1.3. Métodos para la determinación de los parámetros	10
1.3.1. Método Clásico.....	10
1.3.2. Método Suhr.....	12
1.3.3. Método de elementos finitos	13
CAPÍTULO II	
2. DISEÑO DEL MÓDULO DE PRUEBAS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO	15
2.1. Metodología para el desarrollo del diseño e implementación del módulo de pruebas	15
2.2. Simulaciones para el motor de inducción monofásico.....	18
2.2.1. Motor de inducción monofásico de ½ hp	18
2.2.2. Simulaciones en Matlab Simulink.....	20
2.2.3. Simulación de método de elementos finitos.....	25
2.3. Selección dimensionamiento de materiales.....	39
2.3.1. Puente rectificador.....	39
2.3.2. Capacitor.....	41

2.3.3.	Controlador de voltaje variable con medición	41
2.3.4.	Monitor pantalla para la visualización de datos.....	42
2.3.5.	Motor Universal de 700 watts.....	43
2.3.6.	Regulador UM-715	44
2.3.7.	Disyuntor	45
2.3.8.	Sistema operativo Arduino	45
2.3.9.	Placas de Arduino	46
2.3.10.	Medidores de corriente alterna.....	47
2.3.11.	Medidor de medición corriente directa.....	49
2.4.	Modelos matemáticos.....	51
2.5.	Diseño del módulo de pruebas.....	55
2.5.1.	Diagrama de flujo de arranque y control.....	55
2.5.2.	Diagrama de flujo general	56
2.5.3.	Diseño de distribución de los componentes.....	57
2.5.4.	Diagrama de flujo de procesos.....	60
CAPÍTULO III		
3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS PARA LA TOMA DE DATOS Y CÁLCULO DE PARÁMETROS.....	62
3.1.	Construcción del módulo de pruebas	62
3.1.1.	Programación e implementación de los módulos de medición	62
3.1.2.	Implementación de las salidas de alimentación del módulo	64
3.1.3.	Implementación de la carga variable	66
3.1.4.	Implementación completa del Módulo	67
3.2.	Análisis de métodos para la obtención de parámetros.	67
3.2.1.	Toma de datos del módulo de pruebas	67
3.2.2.	Cálculos mediante datos del módulo.....	70
3.2.3.	Cálculos mediante datos de las simulaciones.....	75
3.2.4.	Prueba con carga	78
3.3.	Comprobación los resultados de los parámetros de los métodos Suhr y Clásico	86
CONCLUSIONES.....		88
RECOMENDACIONES.....		89
BIBLIOGRAFÍA.....		90
Anexo 1: Código de programación del medidor PZEM-004T y sensor de Efecto Hall		91
Anexo 2: Código de programación del medidor PZEM-017		94
Anexo 3: Código de programación de la simulacion de la curva característica.....		98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Motor de inducción con: a) Monofásico con capacitor de autoarranque; b) Trifásico de estructura de aluminio.....	3
Figura 2: Vista exterior y vista de sus componentes internos de un motor de inducción trifásico.....	4
Figura 3: Construcción de un motor de inducción monofásico.....	5
Figura 4: Motor de inducción monofásico en circunstancias de arranque	6
Figura 5: Característica par-velocidad para componentes de secuencia positiva y	7
Figura 6: Conexiones del motor de inducción monofásico: a) Alimentación desde fase principal.....	7
Figura 7: Circuito equivalente del motor monofásico.....	11
Figura 8: Circuito equivalente monofásico en vacío	12
Figura 9: Sección transversal del SPIM.....	14
Figura 10: Metodología para el diseño e implementación de un módulo de pruebas ...	16
Figura 11: Motor Weg monofásico ½ hp.....	18
Figura 12: Datos de Placa del Motor de inducción monofásico ½ Hp	19
Figura 13: Circuito equivalente del motor de inducción monofásico.....	19
Figura 14: Simulación de prueba de corriente directa	21
Figura 15: Circuito equivalente de la prueba en vacío del Subsystem	22
Figura 16: Simulación de prueba en vacío.....	23
Figura 17: circuito equivalente de la prueba de rotor bloqueado	24
Figura 18: Simulación de prueba de rotor bloqueado	24
Figura 19: Parte Interna del motor de inducción a) Estator b) Rotor	25
Figura 20: Dibujo del rotor, estator y carcasa en AutoCAD	26
Figura 21: Dibujo de ranuras del estator en AutoCAD.....	26
Figura 22: Dibujo de ranuras del rotor en AutoCAD	27
Figura 23: Diagrama del bobinado del motor de inducción monofásico ½ hp.....	27
Figura 24: Configuración de la pestaña	30
Figura 25: Archivo importado del diseño de la parte interna del motor	30
Figura 26: Definición de datos del problema	31
Figura 27: Propiedades del aire	32
Figura 28: Propiedades de los conductores.....	32
Figura 29: Características del aluminio.....	33
Figura 30: Características del hierro.....	33
Figura 31: Propiedades del hierro	34

Figura 32: Propiedad del acero inoxidable.....	34
Figura 33: Propiedades de contorno.	35
Figura 34: Circuitos principal y auxiliar en corriente de arranque	36
Figura 35: Propiedades del bloque.....	36
Figura 36: Simulación de malla de elementos finitos.....	37
Figura 37: Distribución de densidad de la inducción magnética en arranque	37
Figura 38: Circuitos principal y auxiliar en corriente de vacío	38
Figura 39: Distribución de densidad de la inducción magnética en Vacío.....	39
Figura 40: Rectificador KBPC 1008.....	40
Figura 41: condensador electrolítico de aluminio	41
Figura 42: Controlador de voltaje variable con medición	42
Figura 43: Monitor ViewSonic	43
Figura 44: Motor Universal 700 watts	43
Figura 45: Regulador Modelo: UM-715.....	44
Figura 46: Disyuntor Electromagnético y fusible de 10 amperios	45
Figura 47: Placa Arduino Mega 2560	47
Figura 48: Medidor Eléctrico Monofásico Pzem-004t 3.0 Ttl Modbus 100A	47
Figura 49: Diagrama de conexión del pzem-004t.....	48
Figura 50: Medidor Digital Multi-Función D52-2066	49
Figura 51: Medidor PZEM-017	50
Figura 52: Diagrama de conexión del PZEM-017	50
Figura 53: Conexión del PZEM-017 con Arduino Mega	51
Figura 54: Diagrama de flujo de arranque y control	55
Figura 55: Diagrama unifilar general del módulo de pruebas	56
Figura 56: Distribución de los componentes del interior gabinete	58
Figura 57: Distribución de los componentes del exterior del gabinete	59
Figura 58: Diseño final del módulo de pruebas	60
Figura 59: Diagrama de Flujo de funcionamiento.....	61
Figura 60: Módulo del Medición de corriente alterna y sensor de Efecto Hall	63
Figura 61: Medidor de medición de corriente continua.....	64
Figura 62: Transformador de Corriente alterna a continua	65
Figura 63: Conexión de las salidas de alimentación	65
Figura 64: implementación de la carga variable.....	66
Figura 65: implementación completa del módulo	67
Figura 66: Medidas de la prueba en corriente directa	68
Figura 67: Pieza y medidas de la prueba en rotor bloqueado.....	69
Figura 68: Medidas de la prueba en vacío.....	70

Figura 69: Circuito reducido de la prueba de rotor bloqueado	72
Figura 70: Datos de la prueba con carga con resistencias en Excel	79
Figura 71: Cálculo de velocidad angular y deslizamiento en Excel.....	79
Figura 72: Cálculo de las impedancias directa e inversa en Excel.....	80
Figura 73: Cálculo del Par inducido del motor de Inducción en Excel.....	80
Figura 74: Gráfica de la curva par-velocidad en Excel 37V	81
Figura 75: Gráfica de la curva par-velocidad simulada y calculada en Matlab 37V	82
Figura 76: Datos de la prueba con carga con freno en Excel	82
Figura 77: Resultado del par inducido en Excel.....	83
Figura 78: Gráfica de la curva par-velocidad en Excel 65V	83
Figura 79: Gráfica de la curva par-velocidad simulada y calculada en Matlab 65V	84
Figura 80: Gráfica de la curva par-velocidad en Excel 80V	84
Figura 81: Gráfica de la curva par-velocidad simulada y calculada en Matlab 80V	85
Figura 82: Gráfica de la curva par-velocidad a diferentes voltajes.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos del Motor de Inducción Monofásico.....	28
Tabla 2 Medidas de la Prueba CD.....	68
Tabla 3 Datos de medidas de la Prueba en Rotor Bloqueado	69
Tabla 4 Datos de medidas de la Prueba en Vacío	70
Tabla 5 Datos de prueba DC.....	71
Tabla 6 Datos de prueba Rotor Bloqueado.....	72
Tabla 7 Datos de prueba en Vacío	73
Tabla 8 Datos de la Simulación de prueba DC Simulación.....	75
Tabla 9 Datos de la Simulación de prueba Rotor Bloqueado	76
Tabla 10 Datos de la simulación de prueba en Vacío	77
Tabla 11 Resultados de Corriente Directa	86
Tabla 12 Resultados de Rotor Bloqueado	86
Tabla 13 Resultados en Vacío	86
Tabla 14 Resultados de Método Suhr	87

RESUMEN

El análisis de los parámetros de los motores de inducción monofásicos es esencial al momento de abordar la evaluación, aplicación y diseño de estas máquinas. Con un conocimiento adecuado de los parámetros del circuito equivalente, es posible realizar simulaciones precisas que anticipen el comportamiento de la máquina en distintas condiciones operativas. Es importante mencionar que los motores de inducción monofásicos tienen presencia tanto en aplicaciones industriales como residenciales, gracias a su sencillez en la instalación y su adaptabilidad en una amplia variedad de dispositivos.

Para el análisis y obtención de parámetros, se empleó un motor de inducción monofásico de ½ Hp a 110 voltios - 220 voltios. Dicho motor fue evaluado utilizando dos métodos distintos: el método clásico y el método de Surh. Ambos enfoques incluyen pruebas en vacío, pruebas con rotor bloqueado y pruebas de corriente continua o directa. Además, se empleó el método de simulación de elementos finitos, conocido como FEMM, específicamente para analizar el comportamiento del flujo magnético dentro del motor.

En la obtención de datos necesarios en el cálculo de parámetros, se estableció un módulo de pruebas. Este módulo está equipado con medidores para corriente continua, alterna, dispositivos de alimentación y un sensor para las mediciones de revoluciones por minuto. Con estos instrumentos, se efectuó una prueba con carga para analizar el comportamiento y rendimiento del motor bajo diferentes condiciones, trazando la curva par-velocidad, finalmente se efectuaron simulaciones en MATLAB Simulink para la comparación de resultados de los parámetros.

Palabras claves: Monofásico, módulo de pruebas, Parámetros, Métodos, Motor, Clásico, Surh.

ABSTRACT

The analysis of parameters for single-phase induction motors is essential when addressing the evaluation, application, and design of these machines. With a proper understanding of the equivalent circuit parameters, it is possible to conduct accurate simulations that anticipate the machine's behavior under different operating conditions. It's worth noting that single-phase induction motors are found in both industrial and residential applications due to their ease of installation and adaptability in a wide range of devices.

For the analysis and acquisition of parameters, a single-phase induction motor of $\frac{1}{2}$ Hp at 110 volts - 220 volts were used. This motor was assessed using two distinct methods: the classic method and the Surh method. Both approaches involve no-load tests, blocked rotor tests, and direct current tests. Additionally, the finite element method simulation, known as FEMM, was employed specifically to analyze the magnetic flux behavior within the motor.

For the data collection necessary for parameter calculation, a test module was set up. This module is equipped with meters for direct and alternating current, power supply devices, and a sensor for revolutions per minute measurements. Using these instruments, a load test was conducted to analyze the motor's performance and behavior under different conditions, plotting the torque-speed curve. Finally, simulations were performed in MATLAB Simulink to compare the results of the parameters.

Key Words: Single-phase, Test module, Parameters, Methods, Motor, Classic, Surh.

INTRODUCCIÓN

Contexto

Las máquinas de inducción monofásicas (SPIM) se han utilizado durante mucho tiempo debido a su construcción simple y porque la fuente de alimentación monofásica está disponible en casi todos los hogares. Sin embargo, esta ventaja se ve compensada teniendo un menor aprovechamiento de la máquina por su complicada puesta en marcha. La energía monofásica suministrada a un devanado monofásico es una fuente de campo pulsante en una máquina que se puede resolver en dos campos giratorios iguales que giran en dirección opuesta (Hrabovcova et al., 2010).

La principal limitación de los motores de inducción monofásicos radica en que su campo magnético no realiza un giro, sino que oscila. Esto significa que se incrementa y disminuye su tamaño, pero siempre mantiene una dirección constante. Debido a la ausencia de un campo magnético giratorio en el estator, estos motores carecen de par de arranque. Esta realidad se evidencia al observar un motor con el rotor en estado estacionario. El flujo del estator aumenta y luego decrece, pero mantiene su enfoque constante en una única trayectoria. Como el campo magnético del estator no experimenta rotación, no hay movimiento relativo entre dicho campo y las barras del rotor. Esto implica que no hay voltaje inducido debido al movimiento relativo del rotor, no hay corriente del rotor provocada por el movimiento relativo y no se produce par inducido (Chapman, 2012, Cap 9, pp 417).

El motor de inducción monofásico presenta características similares a las del trifásico, pero con ciertas diferencias. En él, el estator aloja dos bobinas: la principal y la auxiliar, que están desfasadas 90° en el espacio. Esta es una distinción clave con respecto al motor de inducción trifásico, que cuenta con tres bobinados, uno para cada fase (Torre, 2019).

Los Motores de Inducción Monofásicos (SPIM) son ampliamente empleados en aplicaciones residenciales, como las bombas de calor. Conforme a los datos proporcionados por el Operador del Sistema Independiente del Medio continente (MISO, por sus siglas en inglés), aproximadamente el 34% de la electricidad residencial es consumida directamente por los SPIM. Comparados con los motores de inducción trifásicos, los SPIM tienen una mayor tendencia a detenerse durante fallas, lo que podría desencadenar escenarios de Recuperación de Voltaje tras Fallas de Inducción (FIDVR, por sus siglas en inglés). Se han reportado modelos de motores agregados de SPIM basados en un Modelo de Circuito Equivalente (EC, por sus siglas en inglés) por fase de motores trifásicos. Sin embargo, debido a las diferencias intrínsecas entre los motores trifásicos y monofásicos, es probable que el

método de agregación de motores trifásicos no represente de manera precisa el modelo agregado en los SPIM. A pesar de que los SPIM poseen una estructura más simple (Poudel & Field, 2019).

Debido a su robustez, los motores eléctricos de inducción se han convertido en uno de los elementos más esenciales en los sistemas modernos de accionamiento eléctrico. Estos motores son notablemente más pequeños, ligeros y económicos en comparación con los motores de corriente continua para la misma potencia. Además, sus requerimientos de mantenimiento son menores debido a la ausencia de escobillas. Estas ventajas han propiciado que la utilización de motores de inducción sea preferida a nivel industrial en comparación con los motores de corriente continua, y su uso continúa expandiéndose. Sin embargo, aún existen aplicaciones donde el uso de motores de corriente continua puede ser más conveniente (Arnanz et al., 2016).

En los últimos años, el motor de inducción se ha convertido en la máquina rotativa más utilizada en la industria, gracias en gran parte a su versatilidad. Su uso generalizado en numerosas aplicaciones ha motivado a los investigadores a centrar sus esfuerzos en áreas como el control de la velocidad, el control del par, la programación para ciclos de trabajo y la determinación de parámetros (Poudel & Field, 2019).

Algunos de los métodos y pruebas más utilizadas para la determinación de parámetros son:

- Método de los elementos finitos.
- Pruebas en condiciones de vacío y bloqueo del rotor.
- Método de respuesta transitoria.
- Información de catálogo.
- Utilización de algoritmos de reconocimiento.

La medición y determinación de parámetros de máquinas de inducción monofásica es una tarea bastante difícil en comparación con las máquinas de inducción trifásica simétrica. Aquí se describe tres métodos diferentes para la determinación de parámetros de máquinas monofásicas. El método convencional (clásico), generalmente utilizado para máquinas trifásicas, se complementa con el método de Suhr. Además, los parámetros medidos se apoyan y confirman mediante simulaciones y cálculos basados en el diseño de la máquina eléctrica. Los parámetros obtenidos se utilizan en el modelo de simulación de máquina monofásica en condiciones de estado estacionario en región estable y posteriormente se comparan con la medición en un pequeño motor real. Los resultados de la simulación

muestran un buen acuerdo con el comportamiento de una máquina real. (Hrabovcova et al., 2010).

Según (García et al., 2016) en la revista de comparación de métodos para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción subrayan en su artículo de comparación de métodos para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción, que la determinación y medición de estos parámetros son actividades esenciales en el diseño y modelado de estas máquinas eléctricas. Al tener conocimiento de los parámetros del circuito equivalente de cualquier tipo motor, se facilita la realización de simulaciones para prever su comportamiento.

Los motores de inducción monofásicos, dispositivos que transforman la energía eléctrica en mecánica, se presentan en diversas formas. Uno de los tipos más antiguos y ampliamente utilizados es el motor de fase partida, que consta de dos bobinados en el estator: principal de trabajo y otro auxiliar o de arranque. Por otro lado, los motores por condensador se emplean en aplicaciones que requieren un servicio riguroso, necesitando pares de arranque y funcionamiento significativos. Estos motores pueden encenderse y apagarse rápidamente. Al circular una corriente en el devanado primario, se crea un campo magnético giratorio que induce un voltaje en el devanado secundario (Bargalló, 2014, pp 9).

El motor de inducción (MI) es un sistema electromagnético complejo y no lineal con parámetros que varían. La investigación para mejorar el rendimiento del MI abarca diversos aspectos tecnológicos, entre ellos la precisa obtención de los parámetros del Circuito Equivalente del Motor (CEM) y el diseño del motor con las características deseadas. Pedra J. y Sainz L. discutieron exhaustivamente las limitaciones de los cuatro métodos mencionados anteriormente, y propusieron un conjunto de métodos que combinan pruebas sin carga, pruebas con rotor bloqueado y pruebas de sobrecarga. No obstante, no tuvieron en cuenta el efecto de las pérdidas de hierro. Habitualmente, para estimar los parámetros del CEM se utilizan los datos de la placa del fabricante o los valores empíricos proporcionados por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Sin embargo, estos valores no garantizan la exactitud de los parámetros del MI empleado. Por lo tanto, es necesario recurrir a métodos más sofisticados, como el circuito equivalente inverso a la carga. (Chen & Bi, 2020, pp 605).

Planteamiento del problema

Los motores de inducción monofásico tienen una amplia utilización en muchas aplicaciones, lo que ha conllevado a que los analistas se centren en ciertos asuntos como el control de velocidad, control del par de arranque, programación para períodos de trabajo y la determinación de los parámetros, que es la problemática por solucionar, pues la obtención de estos parámetros sigue siendo una tarea bastante difícil, especialmente en comparación con otras máquinas de inducción trifásica simétrica.

El presente trabajo de titulación tiene como problemática el análisis, medición y cálculos de los parámetros de un motor de inducción monofásico, ya que estos son de mucha importancia, pues estos datos ayudan al diseño, fabricación y evaluación de la máquina de inducción monofásica, y al no poder determinarlos en un análisis a simple vista, es necesario la utilización de ciertos métodos, simulaciones e implementaciones que busca encontrar y confirmar estos parámetros lo cuales se busca realizar a lo largo del trabajo.

Formulación del problema

¿Cómo realizar el análisis de los métodos de los parámetros de un motor de inducción monofásico para comprobarlas mediante la implementación de un módulo de pruebas?

Objetivos

Objetivo general

Analizar los métodos para la determinación de los parámetros eléctricos de un motor de inducción monofásico, mediante un módulo de pruebas.

Objetivos específicos

- Describir los diferentes métodos para la determinación de los parámetros de un motor de inducción monofásicos.
- Diseñar un módulo de pruebas para un motor de inducción monofásico.
- Implementar un módulo de pruebas para la verificación de los parámetros de los diferentes métodos.

Justificación

El motor de inducción monofásico representa en la época actual uno de los elementos más significativos en las instalaciones tanto industriales, debido a robustez y en instalaciones domiciliarias debido a que consta de un menor tamaño y peso, así como por su coste económico en comparación con los motores de corriente continua. Además, presenta la ventaja significativa de requerir un mantenimiento mínimo.

La determinación y registro de los parámetros de un motor de un motor de inducción ha suscitado un interés considerable en diversos campos de la ingeniería, debido a su amplio espectro de aplicaciones. Los investigadores han explorado una gran variedad de temas, como el control de velocidad, el control del torque de arranque, la programación de ciclos de trabajo y, fundamentalmente, la determinación de los parámetros.

El conocimiento de los parámetros de la máquina de inducción constituye la base fundamental para el diseño, fabricación, evaluación y aplicación de la máquina. Además, al tener conocimiento de los parámetros del circuito equivalente de cualquier tipo de motor, es posible realizar simulaciones que faciliten la predicción del comportamiento de dicha máquina bajo diversos regímenes operativos.

El análisis para la obtención de los parámetros de un motor de inducción monofásico se realizará utilizando varios métodos. El método convencional (clásico), comúnmente aplicado a máquinas trifásicas, será complementado con el método de Suhr y el método de simulación de elementos finitos, incorporando cálculos basados en el diseño de la máquina.

Los parámetros obtenidos del motor de inducción monofásico se utilizarán en la modelización y simulación de la máquina en condiciones de estado estable. Este análisis proporcionará una comprensión detallada del comportamiento de la máquina en una región de funcionamiento estable.

Finalmente, se llevará a cabo un conjunto de pruebas en el motor de inducción monofásico. Este paso es esencial por dos motivos principales: en primer lugar, para verificar los parámetros obtenidos de los métodos mencionados anteriormente y, en segundo lugar, para verificar las formas de onda simuladas de par y corriente en función de la velocidad. Estos son datos fundamentales para la construcción y operación eficiente del motor de inducción, por lo que su verificación es de suma importancia.

El módulo de pruebas del motor de inducción monofásico podrá contribuir con futuras investigaciones que requieran la obtención de parámetros para la creación de un motor.

Alcance

El análisis de los diferentes métodos para la determinación de los parámetros del motor de inducción monofásico se realizará primeramente mediante una investigación bibliográfica, como lo son: libros, artículos y revistas científicas, además de otros documentos que contengan información verificada que ayude a la realización de este proyecto de investigación e implementación además de información que también ayude a describir y calcular los parámetros.

Los métodos que se busca analizar para encontrar los parámetros del motor de inducción monofásico son: Método Clásico y Método de Suhr, los cuales se realizaran mediante simulaciones e implementación del módulo, para sus respectivas pruebas como lo es de corriente continua, de rotor bloqueado y vacío. Así también se contará de un método únicamente de simulación de elementos finitos en el software FEMM el cual se utilizará para el análisis magnético.

Para el de módulo de pruebas y simulaciones se contará con un motor de inducción monofásico de $\frac{1}{2}$ HP de 1720 RPM con un voltaje nominal de 110/220 V. En las mediciones del módulo se utilizará un sistema embebido Arduino, así como el uso de la plataforma IDE de este mismo para la programación del código, además de otros sensores genéricos de medición, los cuales se utilizarán de acorde a los requisitos de las pruebas.

El módulo de pruebas a implementarse se usará para la toma, verificación de datos y parámetros calculados obtenidos en las simulaciones de las pruebas de los métodos Clásico y Suhr. En este apartado también se busca realizar una prueba alternativa para visualizar la forma de la curva característica de la máquina.

CAPÍTULO I

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

Métodos para la determinación de parámetros del motor de inducción monofásico se llevó a cabo mediante una exhaustiva revisión bibliográfica. En el capítulo I, se describen inicialmente los conceptos fundamentales y aspectos básicos de las máquinas de inducción, tanto monofásicos como trifásicos. Además, se expone una descripción de las pruebas necesarias para aplicar los diversos métodos destinados a determinar los parámetros eléctricos de un motor de inducción monofásico. En este apartado, se detallaron métodos esenciales como el método clásico, Suhr y de elementos finitos FEMM.

1.1. Motores de inducción

Los motores y generadores, a menudo designados como "máquinas eléctricas", son componentes fundamentales en sistemas de accionamiento eléctrico. Estos aparatos exhiben una funcionalidad versátil, pudiendo operar en ambos sentidos de rotación y par, lo que los cataloga como dispositivos de cuatro cuadrantes. Esta característica implica que una máquina eléctrica puede funcionar como motor o generador en cualquier dirección. Es más, estas máquinas pueden cambiar su función de transformación de energía eléctrica a mecánica a transformación de energía mecánica a eléctrica en un breve lapso. Un ejemplo palpable se encuentra en vehículos híbridos o trenes, donde la energía cinética puede ser transformada en electricidad, almacenada en una batería, para su posterior utilización en la red eléctrica (JuhaPyrhönen y Semken, 2016, Cap 3, pp 36).

Una máquina con un conjunto único de devanados de amortiguamiento es conocida como máquina de inducción. Este nombre se deriva del hecho de que el voltaje generado en el rotor, que origina tanto la corriente como el campo magnético del mismo, se induce en los devanados del rotor en lugar de estar directamente conectados mediante cables. Una característica esencial de un motor de inducción es que no requiere de una corriente de campo de corriente continua (CC) para operar. Aunque es factible que este tipo de máquina funcione como generador, suele presentar varias desventajas en este modo de operación, por lo que raramente se utiliza en dicho contexto (Chapman, 2012, Cap 6, pp 232).

Dentro de la amplia gama de máquinas eléctricas, las más sobresalientes son las máquinas de inducción (IM) y las diversas máquinas síncronas (SM). La máquina de

inducción puede dividirse en dos categorías: máquinas de jaula de ardilla y máquinas de rotor bobinado con anillos rozantes. Pero las verdaderas herramientas de la industria son las de jaula de ardilla y las de rotor bobinado, con devanado trifásico el cual se ve utilizado en aplicaciones de energía eólica en sistemas de doble alimentación en los que el IM está conectado el línea directa y el rotor se controla mediante un convertidor de frecuencia de cuatro cuadrantes que permite el control de la velocidad sub síncrona y super síncrona (JuhaPyrhönen y Semken, 2016, Cap 3, pp 36).

Los motores de inducción representan una categoría diversa de máquinas, que incluye los motores de inducción trifásicos y monofásicos, este último siendo el objeto de estudio del presente trabajo. Aunque comparten características similares, existen aspectos diferenciadores clave entre ambos tipos de motores.

Por un lado, el motor monofásico se caracteriza por poseer un estator que aloja dos bobinas: la bobina principal y la bobina auxiliar. Estas bobinas se encuentran desfasadas 90° en el espacio, lo cual representa una de las principales diferencias respecto al motor de inducción trifásico. Este último, por su parte, dispone de tres bobinados, cada uno correspondiente a una fase diferente. De esta manera, a pesar de las similitudes, cada tipo de motor presenta sus particularidades en cuanto a diseño y funcionamiento, adecuándose a diferentes necesidades y aplicaciones en el ámbito de la ingeniería eléctrica (Torre, 2019).

1.1.1. Aspectos generales del motor de inducción trifásico

Las máquinas eléctricas operadas por AC (Corriente Alterna), se clasifican de varias formas, incluyendo su relación con el tipo de fuente de alimentación utilizada y su velocidad angular. En términos de la fuente de alimentación, estas máquinas pueden ser monofásicas, bifásicas o trifásicas. Además, dependiendo de su velocidad angular, las máquinas se pueden dividir en dos categorías: síncronas y asíncronas. Comúnmente, las máquinas asíncronas son reconocidas como motores de inducción. Este tipo de motores desempeña un papel significativo en diversas aplicaciones industriales debido a su robustez, eficiencia y la relativa simplicidad de su diseño y mantenimiento (Pacheco y Santos, 2020, pp 293).

Además de ser conocidos como motores asíncronos, estas máquinas se destacan por su capacidad para funcionar como dispositivos electromecánicos reversibles. Esto significa que pueden convertir la energía eléctrica a energía mecánica (cinética) y recíprocamente. Tales motores también se conocen como motores asíncronos trifásicos debido a sus características particulares. Una de las características que distingue a estos motores es que la velocidad de su campo estatórico es diferente de la velocidad de rotación del rotor. En condiciones estables, la velocidad mecánica del rotor nunca coincide con la velocidad del

campo giratorio en el estator. Esto es lo que les da la clasificación de 'asíncronos'. Este tipo de motor se utiliza ampliamente en varias aplicaciones debido a su versatilidad y eficiencia (Pacheco y Santos, 2020, pp 294).

El motor de inducción trifásico se ha consolidado como la elección predilecta en la industria, gracias a su fiabilidad, robustez, alta relación potencia-peso y bajo coste inicial. Estos motores se consideran como algunas de las máquinas eléctricas más confiables disponibles en la época actual, dado que requieren intervenciones de mantenimiento mínimas. Además, poseen la ventaja de poder adaptarse a una amplia variedad de requisitos de rendimiento, lo que los hace idóneos para satisfacer una serie de exigencias específicas (Soto, 2014).

Los motores de inducción, también identificados como motores de tipo jaula de ardilla, pueden ser alimentados ya sea por corriente alterna trifásica o monofásica, su elección depende de la configuración del motor y de las necesidades específicas del operario.

Los motores de inducción alimentados monofásicamente poseen dos fases en el devanado del estator, con el propósito de generar una condición de autoarranque. Por otro lado, los motores de inducción alimentados trifásicamente se caracterizan por contar con tres devanados en el estator que son alimentados por tres corrientes alternas de igual frecuencia, pero desfasadas en el tiempo. Este tipo de configuración proporciona un campo magnético rotatorio constante en el estator, lo que permite un arranque más suave y eficiente, además de una operación más equilibrada y eficaz en la Figura 1 (a) y (b).

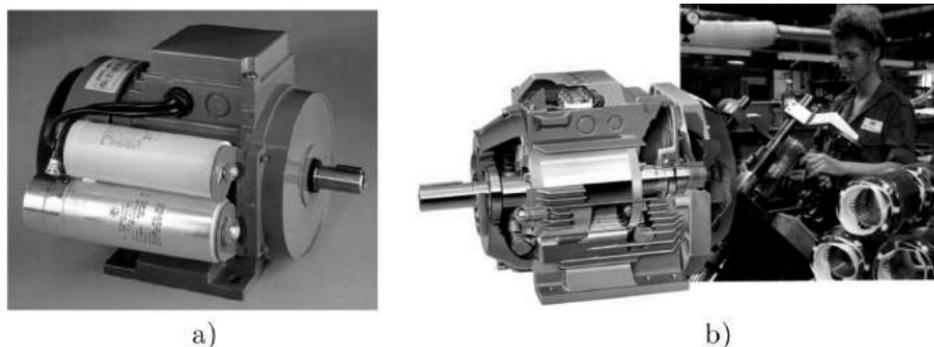


Figura 1: Motor de inducción con: a) Monofásico con capacitor de autoarranque; b) Trifásico de estructura de aluminio
Fuente: Martínez (2017)

La Figura 1(a) ilustra comúnmente los motores de inducción monofásicos, los cuales son ampliamente aplicados en el sector doméstico, en dispositivos como aspiradoras y lavadoras. Por otro lado, los motores de inducción trifásicos, mostrados en la Figura 1 (b), se construyen generalmente con una base de aluminio y se utilizan en aplicaciones de propósito general de hasta 55 kW. Son ampliamente reconocidos por su eficiencia y durabilidad, haciéndolos ideales para aplicaciones industriales y comerciales (Pacheco y Santos, 2020, pp 294).

Cabe destacar que el avance en la electrónica de control y la electrónica de potencia ha posibilitado la sustitución progresiva de motores que se ajustaban a la variación de velocidad, como el motor de corriente continua, por motores asíncronos. En la Figura 2 se muestra como está constituida la máquina de inducción trifásica tanto en la parte interna como externa, (Pacheco y Santos, 2020, pp 292).

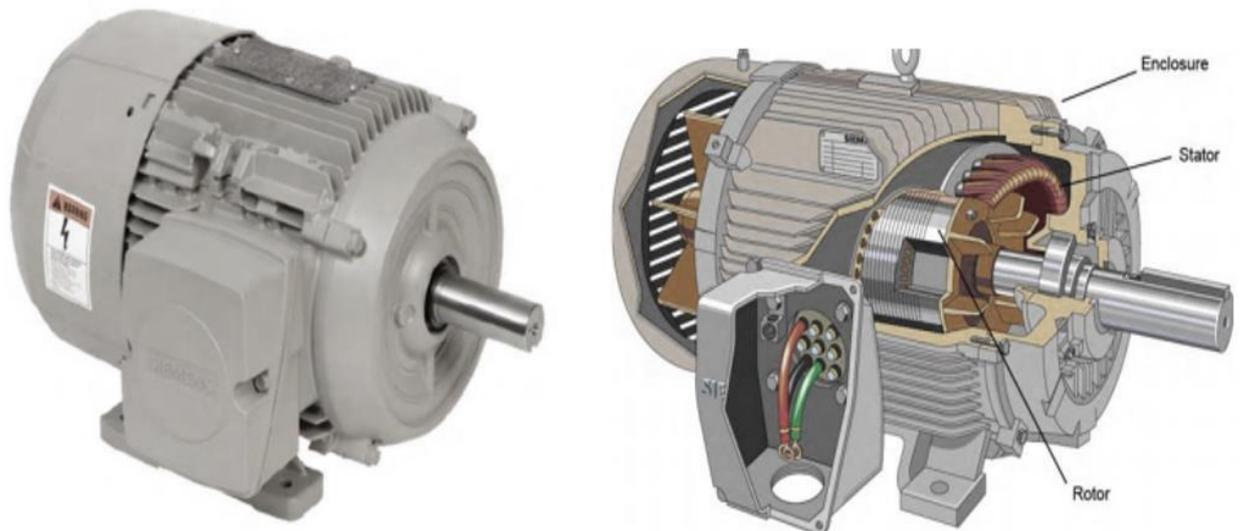


Figura 2: Vista exterior y vista de sus componentes internos de un motor de inducción trifásico
Fuente: *Catálogo de Máquinas y Accionamiento Eléctricos (3M4)*

Como se puede observar en la Figura 2, una máquina de inducción trifásica está constituida por dos componentes fundamentales: el estator, que es la parte estable de la máquina, y el rotor, que es la fracción móvil. Entre estos dos componentes se encuentra una separación conocida como entrehierro. El estator se caracteriza por ser una corona cilíndrica con una superficie interior ranurada, destinada a alojar el devanado trifásico. En contraposición, el rotor es otro cilindro cuya superficie además presenta ranuras, diseñadas para albergar un devanado que está conformado por barras de aluminio o cobre. En consecuencia, la máquina conformado de dos circuitos eléctricos independientes, uno en el estator y otro en el rotor, cada uno con su respectivo núcleo de material ferromagnético (Pacheco y Santos, 2020, pp 297).

1.1.2. Aspectos generales del motor de inducción monofásico

Los motores de inducción monofásicos son una clase importante de motores eléctricos ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales y domésticas. Su popularidad se debe a su diseño simple, bajo costo y facilidad de instalación. Estos motores funcionan con corriente alterna monofásica, lo que los hace especialmente adecuados para aplicaciones en las que únicamente se dispone de un suministro de energía monofásica, como en la mayoría de los hogares. Los motores de inducción monofásicos se emplean en

una amplia variedad de dispositivos y electrodomésticos, como ventiladores, bombas de agua, máquinas de coser, lavadoras, secadoras, refrigeradores y acondicionadores de aire, entre otros. Además de su versatilidad, estos motores ofrecen una operación eficiente y confiable, lo que los convierte en una opción popular para una variedad de aplicaciones en la industria y el hogar (Torre, 2019, pp 2).

Los motores de inducción monofásicos (SPIM, por sus siglas en inglés) han sido utilizados durante mucho tiempo debido a su construcción sencilla. Además, las fuentes de alimentación monofásica se encuentran fácilmente accesibles en la mayoría de los hogares, lo que facilita su uso. Este hecho apoya la prevalencia de estos motores en diversas aplicaciones domésticas e industriales de pequeña escala (Hrabovcova et al., 2010, pp 287).

En el ámbito de los motores de inducción, la versión monofásica resulta ser la más comúnmente utilizada. Aunque comparte una distribución interna parecida a la versión trifásica, se distingue por el hecho de que el estator está configurado con una única fase. Esto se ilustra en la Figura 3, la cual representa un motor de inducción de jaula de ardilla (Chapman, 2012, Cap 9, pp 417).

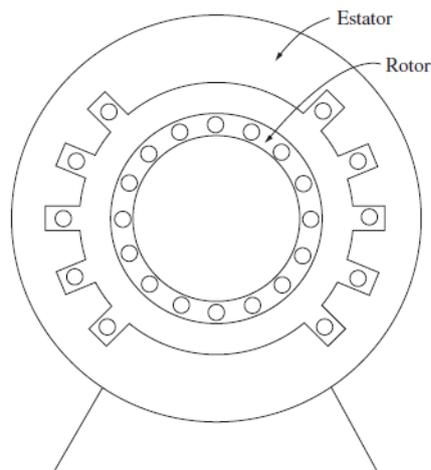


Figura 3: Construcción de un motor de inducción monofásico.
Fuente: Maquinas Eléctricas
Autor: S.J. Chapman

Es pertinente mencionar que los motores de inducción monofásicos presentan una limitación considerable. Debido a que estos dispositivos solo tienen una fase del devanado del estator, el campo magnético no experimenta rotación, sino que se mueve en un patrón oscilante. En otras palabras, el campo magnético aumenta y disminuye en magnitud, pero su dirección permanece constante. Como resultado de la ausencia de un campo magnético giratorio en el estator, por lo que se determina que los motores de inducción monofásicos no tienen un par de arranque (Hrabovcova et al., 2010, pp 287).

Esta observación se torna más evidente al examinar un motor con rotor estacionario. El flujo en el estator experimenta una variación, primero aumenta y luego disminuye, pero siempre mantiene la misma orientación. Dado que el campo magnético del estator permanece estático, no hay movimiento relativo entre el campo del estator y las barras del rotor. Por ende, no se induce voltaje debido a la ausencia de movimiento relativo, no hay flujo de corriente en el rotor a causa de dicho movimiento y, en consecuencia, no se genera un par inducido. De hecho, el voltaje se induce en las barras del rotor mediante la acción transformadora y, como las barras están en cortocircuito, se produce un flujo de corriente en el rotor. Sin embargo, este campo magnético está alineado con el campo magnético del estator y no produce ningún par neto en el rotor (Chapman, 2012, Cap 9, pp 417-418).

Dado que el rotor se encuentra en estado de reposo, el motor se asemeja a un transformador con su devanado secundario en cortocircuito durante las condiciones de arranque como en la Figura 4.

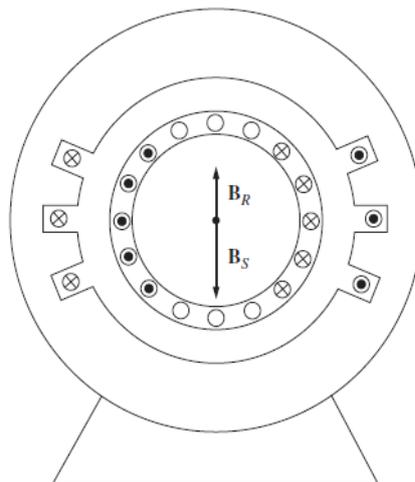


Figura 4: Motor de inducción monofásico en circunstancias de arranque
Fuente: Maquinas Eléctricas
Autor: S.J. Chapman

Es importante señalar que, durante las condiciones de arranque, se induce voltajes y corrientes inversas en el circuito del rotor a través del devanado del estator. Este fenómeno conduce a la generación de un campo magnético en el rotor, que se alineó con el campo magnético existente en el estator, tal como se muestra en la Figura 4 (Chapman, 2012, Cap 9, pp 418).

La energía monofásica que se suministra a un devanado monofásico da lugar a un campo pulsante en la máquina, el cual puede ser teóricamente dividido en dos campos rotativos con la misma magnitud, pero girando en direcciones opuestas. Por ende, la máquina no genera un par de arranque inicial esto se pudo considerar en la Figura 5.

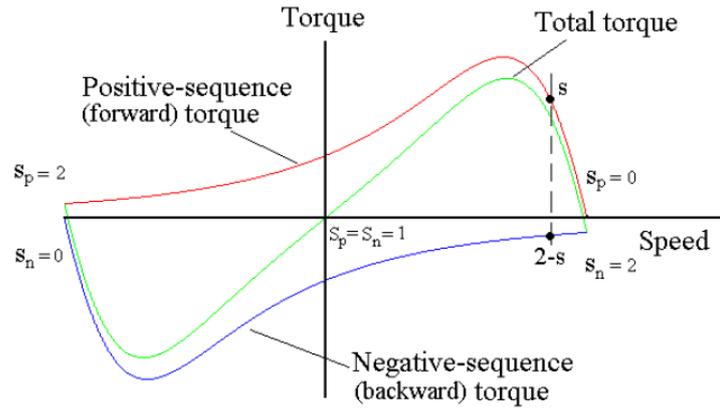


Figura 5: Característica par-velocidad para componentes de secuencia positiva y componentes de secuencia negativa.

Fuente: SPEEDAM 2010

Autores: V. Hrabovcova, L. Kalamen, P. Sekerak y P. Rafajdus

Después que el rotor comience a girar en una dirección por un impulso mecánico, el campo que gira en la dirección de la rotación del roto comienza a dominar sobre el campo que gira hacia atrás y el motor se pondrá en funcionamiento. El par del campo giratorio de rotación hacia atrás disminuirá con el aumento de la velocidad del rotor y a la velocidad nominal es sólo una fracción muy pequeña del par total. Por ende, los motores de inducción monofásicos (SPIM) con un único devanado de estator, tal como se observa en la Figura 6(a), no suelen fabricarse. Generalmente, se utiliza un devanado auxiliar con una impedancia distinta, desplazado 90° en el espacio para garantizar el arranque y optimizar el rendimiento inicial del SPIM, tal como se puede apreciar en la Figura 6(b) (Hrabovcova et al., 2010, pp 287).

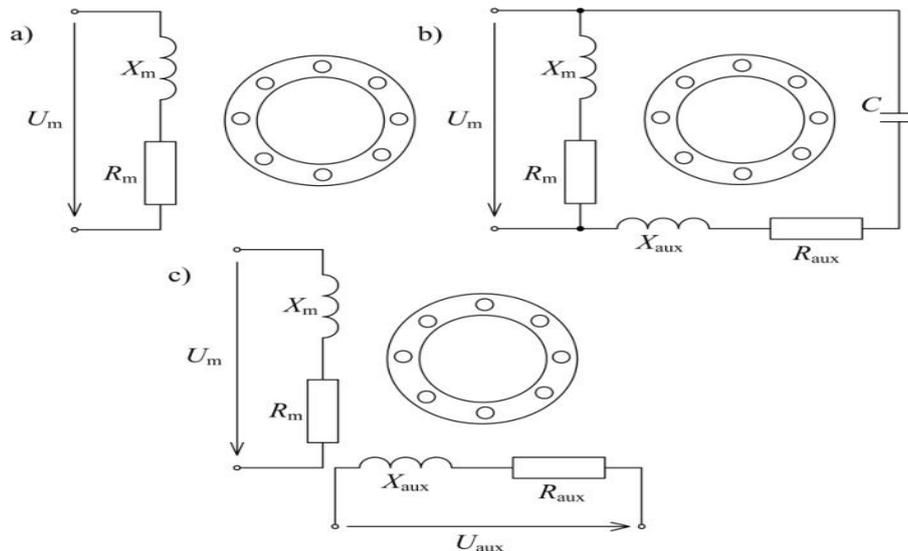


Figura 6: Conexiones del motor de inducción monofásico: a) Alimentación desde fase principal b) Con Condensador c) Alimentación bifásica

Fuente: SPEEDAM 2010

Autores: V. Hrabovcova, L. Kalamen, P. Sekerak y P. Rafajdus

El método más recurrente para poner en marcha los motores de inducción monofásicos (SPIM) es aquel que incorpora un condensador de arranque conectado de manera permanente, como se ilustra en la Figura 6(b). En este contexto, se observa que la corriente del devanado auxiliar se desplaza casi 90° y lidera a la corriente del devanado principal en relación con este último.

El campo generado por ambos devanados deja de ser pulsante y la máquina comienza a producir un par de arranque. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en las máquinas trifásicas, el campo producido en el entrehierro de la máquina no es simétrico, sino elíptico como se apreció en la Figura 5. Esto conlleva a que la magnitud de la densidad del campo magnético a lo largo del entrehierro no sea uniforme. Este campo desigual puede generar un aumento en el ruido y vibraciones, debido a las fuerzas radiales que afectan al estator (Hrabovcova et al., 2010, pp 288).

Los avances continuos en el ámbito de la electrónica de potencia han permitido el surgimiento de las máquinas de inducción bifásicas (TPIM, por sus siglas en inglés). Estas máquinas cuentan con dos devanados de estator idénticos, desplazados espacialmente en 90° , tal como se muestra en la Figura 6(c). Son alimentadas por un convertidor de potencia bifásico, con corrientes que se desplazan 90° en el tiempo. Este tipo de alimentación genera una onda de densidad de flujo rotatoria en el entrehierro, semejante al campo en las máquinas trifásicas. Este método permite suprimir las vibraciones y ruidos indeseables. Debido al menor número de interruptores de potencia requeridos en los convertidores para TPIM y a su construcción más simple, estas máquinas resultan ser bastante económicas. Cabe destacar que su par y potencia de salida son proporcionales al número de fases (Hrabovcova et al., 2010, pp 287).

1.2. Pruebas para la realización de los métodos

Las pruebas de motores de inducción evalúan diversos aspectos, haciendo uso para ello de equipos especializados, herramientas informáticas y modelos matemáticos. El objetivo primordial en el caso de motores eléctricos consiste en evaluar los parámetros correspondientes al circuito equivalente del mismo con diferentes métodos. En este apartado las pruebas conformadas por los métodos incluyen, pruebas en corriente continua, rotor bloqueado y vacío.

1.2.1. Prueba de corriente continua

Las pruebas de corriente continua aportan valores muy relevantes sobre las condiciones de la resistencia de aislamiento del motor, con el pasar del tiempo la acumulación de factores como polvo, humedad o aceite, general contaminación en los devanados de un motor, provocando una reducción de la resistencia a tierra (Cabezas y Bermejo, 2016).

La prueba de corriente directa (CD o CC) para la máquina de inducción monofásico resulta de gran relevancia dado que contribuye a la determinación de la resistencia del estator. En esencia, se inyecta voltaje de CC a los devanados del estator de un motor de inducción. Dado que la corriente es CC, no se genera voltaje inducido en el circuito del rotor, por ende, no se produce flujo de corriente en el rotor. Adicionalmente, con corriente directa, la reactancia del motor es cero. Por lo tanto, el único factor que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator (Chapman, 2012, Cap 6, pp 284).

1.2.2. Prueba de rotor bloqueado

La prueba de rotor bloqueado, tal como su nombre indica, implica la inmovilización mecánica del rotor del motor para impedir su giro. Durante esta prueba, se suministra voltaje a los devanados del estator del motor de inducción, lo que induce un voltaje en los devanados del rotor. En términos generales, la magnitud y la frecuencia del voltaje en el rotor son mayores cuando hay un mayor movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, y esto se observa principalmente cuando el rotor está en una condición de bloqueo o detenido. En esta condición, se induce el voltaje y la frecuencia más altos en el rotor. Por otro lado, el menor voltaje y frecuencia, que es cero (0), ocurre cuando el rotor se mueve a la misma velocidad que el campo magnético del estator, lo que resulta en la ausencia de movimiento relativo. La magnitud y la frecuencia del voltaje inducido en el rotor, en cualquier velocidad entre estos dos extremos, son directamente proporcionales al deslizamiento del rotor. Por lo tanto, si se llama E_{RO} a la magnitud del voltaje inducido del rotor en condición de rotor bloqueado (Chapman, 2012, Cap 6, pp 238).

1.2.3. Prueba en vacío

La prueba en vacío de un motor de inducción es fundamental, ya que posibilita la evaluación de las pérdidas rotacionales del motor y proporciona información valiosa acerca de los parámetros del núcleo. Durante esta prueba, el motor opera sin añadir carga mecánica al eje, es decir, opera con el rotor libre, sustentado por el estator a la frecuencia y tensión nominales. Es esencial destacar que los motores de inducción no pueden alcanzar la

velocidad de sincronismo, ya que, al lograr dicha velocidad, no generan torque o par motor. Desde el punto de vista del circuito equivalente de la máquina, si esta girara a la velocidad de sincronismo, implicaría que el valor de la resistencia en el secundario sería infinito (Mora, 2008, Cap 4, pp 308-310).

1.3. Métodos para la determinación de los parámetros

En el campo de la ingeniería, los motores de inducción han sido objeto de investigaciones exhaustivas durante un período considerable debido a su extenso uso en diversas áreas. Esta amplia aplicación ha llevado a los investigadores a enfocarse en aspectos fundamentales como el control de velocidad, el manejo del par de arranque, la programación de ciclos de trabajo y la determinación de parámetros. La adquisición de estos parámetros es esencial para llevar a cabo simulaciones que permitan anticipar el comportamiento del motor en diferentes condiciones, ya sea en estados transitorios, estables o en situaciones de potencial fallo incipiente (García et al., 2016, pp 381-382).

La obtención de parámetros eléctricos en los motores de inducción es de suma importancia, ya que gracias a estos se puede llevar a cabo la construcción y el diseño de los motores. Estos parámetros pueden ser obtenidos inicialmente a través de un enfoque teórico, mediante la aplicación de diversos métodos de cálculo y modelado, y posteriormente pueden ser verificados mediante pruebas de laboratorio (Gómez et al., 2010, pp 16).

Por lo tanto, se puede concluir que el cálculo o la determinación de los parámetros de la máquina constituye la base fundamental en el diseño, fabricación, evaluación y aplicación del motor de inducción.

Al existir varios métodos para la determinación de los parámetros de la máquina de inducción monofásica (SPIM) que varían en precisión y procedimiento, es crucial considerar que los parámetros de la rama directa del circuito equivalente se miden de la misma manera en todos los métodos mediante la prueba del rotor bloqueado. Sin embargo, una de las tareas más desafiantes consiste en determinar la reactancia magnética X_{μ} y el flujo del rotor que actualmente no puede ser medido directamente, ya que presenta una característica altamente no lineal. (Hrabovcova et al., 2010, pp 288).

1.3.1. Método Clásico

Este método, que se encuentra entre los más utilizados para la medición de máquinas trifásicas simétricas, puede aplicarse también a las máquinas de inducción monofásicas, debido a las similitudes existentes entre ambos tipos. En primer lugar, se efectúa una

medición de las resistencias de la fase principal y auxiliar. Esta medición se realiza mediante una prueba de corriente continua, basándose en la ley de Ohm. (Hrabovcova et al., 2010, pp 288).

Siguiendo el método clásico, posterior a la prueba de corriente continua, se lleva a cabo una prueba de rotor bloqueado. El objetivo de esta prueba es determinar los valores de las inductancias y la reactancia del rotor, ambos referidos al estator.

Es crucial prestar atención especial a la prueba de rotor bloqueado, ya que la temperatura del motor puede aumentar de manera rápida. Esta prueba consiste en aplicar al motor una tensión y frecuencia de valores bajos que permitan mantener el rotor en reposo mediante un medio externo. Se recomienda que los amperímetros registren la corriente nominal en la medida de lo posible. Asimismo, es fundamental documentar los datos relacionados con la potencia activa ingresada al motor, la corriente de línea y la tensión de línea. (Rincón & Jaramillo, 2013, pp 20).

En Figura 7 se representa un ejemplo con el circuito equivalente del motor de inducción monofásico, que sirve como referencia para evaluar condiciones o parámetros en estado estacionario.

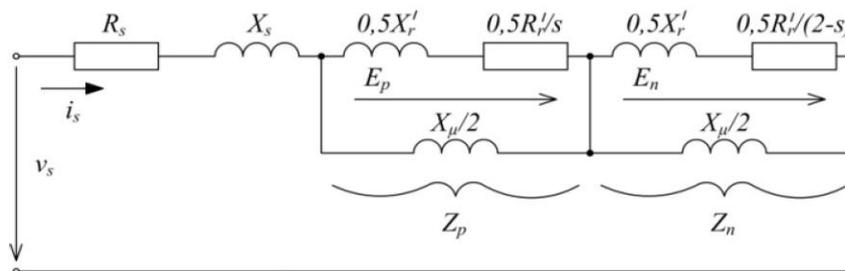


Figura 7: Circuito equivalente del motor monofásico.

Fuente: SPEEDAM 2010

Autores: V. Hrabovcova, L. Kalamen, P. Sekerak & P. Rafajdus

El circuito equivalente mostrado en la Figura 7, en combinación con los datos recolectados en cada una de las pruebas mencionadas anteriormente de DC y rotor bloqueado que componen el método clásico, facilita la determinación de los parámetros de la rama directa, como los son las resistencia y reactancias del estator y del rotor (R_s , R_r' , X_s , X_r').

La prueba en vacío, o prueba sin carga, se lleva a cabo después de haber completado las dos pruebas esenciales previas: la prueba de corriente continua (DC) y la prueba de rotor bloqueado. En esta fase, se utiliza como referencia el circuito equivalente que se ilustra en la Figura 8.

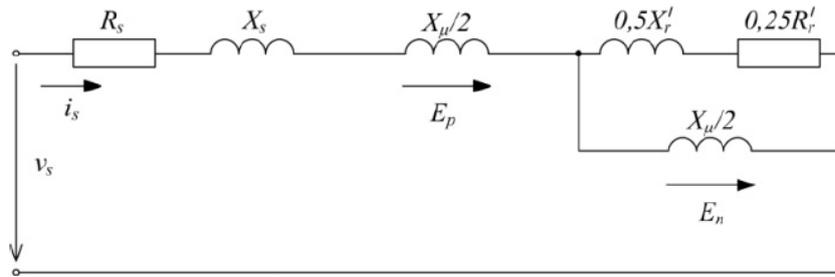


Figura 8: Circuito equivalente monofásico en vacío
 Fuente: SPEEDAM 2010
 Autores: V. Hrabovcova, L. Kalamen, P. Sekerak y P. Rafajdus

La prueba sin carga se efectúa con el objetivo de determinar la reactancia magnética X_m . Al igual que en las pruebas anteriores, es necesario registrar datos como la potencia, corriente y voltaje nominal del motor de inducción monofásico. Esta prueba implica permitir que el eje del motor gire libremente, acercándose a la velocidad síncrona, creando así condiciones donde el deslizamiento es casi nulo (Hrabovcova et al., 2010, pp 289).

1.3.2. Método Suhr

El método de Suhr para la determinación de los parámetros eléctricos del motor de inducción monofásico implica un análisis teórico-matemático profundo de estas máquinas, especialmente en situaciones de inactividad y sin carga. Este método se puede aplicar tanto a motores síncronos como asíncronos, asumiendo que la posición del devanado auxiliar, o devanado de arranque, está en cuadratura espacial con respecto al devanado principal (Hrabovcova et al., 2010, pp 289).

Las constantes del motor, como las resistencias primarias y secundarias, las reactancias de fuga primarias y secundarias, y la reactancia de magnetización, además de las pérdidas de hierro y las pérdidas por fricción, se derivan de las evaluaciones y conclusiones extraídas de las pruebas de rotor bloqueado y vacío. Este enfoque, parte integral del método de Suhr, busca proporcionar un análisis exhaustivo y teóricamente sólido de los motores de inducción monofásicos (Suhr, 1952, como se citó en Hrabovcova et al., 2010).

Este método se fundamentó en la medición de la tensión inducida en la fase auxiliar. Se conecta un vatímetro digital de tal manera que por su bobina curva no fluya ninguna carga I_{NL} del devanado principal y se aplique la tensión de la fase auxiliar a su bobina de voltaje o tensión. En este caso, el vatímetro mide potencia reactiva Q . Para luego la reactancia X_Q ser calculada mediante una forma matemática (Hrabovcova et al., 2010, pp 289).

Al medir la corriente de entrada, la tensión y la potencia activa potencia activa con el otro vatímetro, se puede determinar la X_0 como reactancia de entrada del devanado principal.

Donde X_s puede determinarse sobre la base de la medición del rotor bloqueado mediante una ecuación así también como la obtención de la reactancia magnética X_μ (Hrabovcova et al., 2010, pp 289).

Las observaciones que se debe de tener en cuenta según el método de Suhr (1952, como se citó en Hrabovcova et al., 2010) para evitar los efectos indeseables que influyen en el resultado de la obtención de los parámetros del motor de inducción serán las siguientes:

La reactancia de fuga es una función de la de la magnitud de la corriente; por esta razón, si se van a medir las reactancias en reposo de parada, deben medirse con corrientes sustancialmente iguales a los valores en vacío si estos pares de valores deben ser tratados como como entidades matemáticas simultáneas.

Debe evitarse la saturación de las vías magnéticas principales debe evitarse en vacío si estos caminos no se saturan en la condición de prueba de parada. Entonces también dado que las frecuencias fundamentales del rotor en vacío son cero y dos veces la frecuencia de línea, mientras que en reposo la frecuencia del rotor coincide con la frecuencia de la línea, este efecto debe tenerse en cuenta.

La resistencia del rotor aumenta con la profundidad radial de la barra, así como con la frecuencia. Se puede cuestionar si este efecto es totalmente un “efecto piel”. Es probable que las pérdidas locales en el hierro que rodea a las barras contribuyan al aparente aumento de la resistencia con la frecuencia y la profundidad de las barras. Realizando pruebas de impedancia a varias frecuencias (como $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$ y 2 veces la nominal) se puede evaluar la resistencia del rotor en función de la frecuencia. evaluar la resistencia del rotor en función de la frecuencia (Hrabovcova et al., 2010, pp 289).

Es necesario controlar los efectos de la temperatura o permitir compensaciones adecuadas. La necesidad de este refinamiento surge de la siguiente manera: cuando se realizan pruebas de impedancia en reposo, no es humanamente posible leer todos los instrumentos en el instante, como consecuencia, el autocalentamiento (DPI primario y secundario) provoca un aumento de la resistencia; esto es tanto más cierto cuanto mayor es el flujo de potencia en la máquina.

1.3.3. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEMM, por sus siglas en inglés), ha ganado considerable relevancia en la solución de problemas complejos de ingeniería que hasta hace poco eran considerados casi inabordables mediante métodos matemáticos tradicionales. Este método ha permitido reducir significativamente los tiempos de diseño, además de incrementar

el margen de seguridad. Las aplicaciones de este método comprenden usualmente todos los campos de la ingeniería, permitiendo realizar análisis de una extensa gama de fenómenos físicos, que incluyen esfuerzos, deformaciones, distribuciones de temperatura, flujos de fluidos y vibraciones.

Además, con el progreso de la tecnología y el desarrollo de diversos programas de análisis por elementos finitos, el método FEMM ha experimentado una evolución significativa. No obstante, para aprovechar de manera eficaz estas aplicaciones informáticas, resulta fundamental comprender los principios subyacentes del FEMM y las propiedades de los materiales involucrados en los análisis (Díaz & Castillo, 2018, Cap 1, pp 4).

En la Figura 9 muestra un ejemplo de la simulación de la distribución magnética de un motor de inducción monofásico de dos polos.

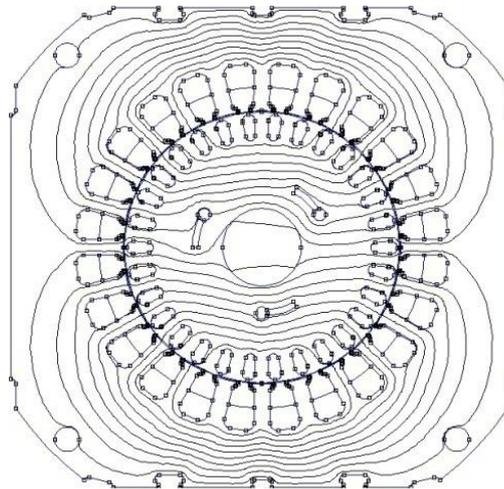


Figura 9: Sección transversal del SPIM

Fuente: SPEEDAM 2010

Autores: V. Hrabovcova, L. Kalamen, P. Sekerak y P. Rafajdus

El software FEMM se emplea para llevar a cabo una variedad de análisis, entre los que se incluyen análisis magnéticos, electrostáticos, de flujo de calor como de corriente. La meta principal de este programa es confirmar que la máquina de inducción esté operando de manera adecuada.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL MÓDULO DE PRUEBAS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

Después de describir los diversos conceptos y métodos para la determinación de los parámetros de motores de inducción monofásicos en el Capítulo I, en el presente Capítulo II se llevó a cabo la descripción de la metodología además de la realización de las distintas pruebas que incluyen los métodos, dichas pruebas se realizaron utilizando el software Matlab, específicamente en su extensión Simulink. Además, se realizó la simulación del Método de Elemento Finito (FEMM) para un motor monofásico de $\frac{1}{2}$ Hp. En esta sección, también se procedió a la selección y dimensionado de los componentes necesarios para el diseño y posterior construcción del módulo de pruebas. Este módulo fue representado inicialmente mediante el software de diseño asistido por computadora, AutoCAD. Además, se hicieron referencias a diversos modelos matemáticos que se aplicarían en el cálculo de los parámetros específicos de la máquina de inducción.

2.1. Metodología para el desarrollo del diseño e implementación del módulo de pruebas

La metodología para el desarrollo del diseño e implementación del módulo de pruebas se representa en un diagrama de bloques lineal, como se muestra en la Figura 10. Este diagrama presenta la secuencia de los procesos que se llevaron durante la realización del trabajo de grado de "Análisis de métodos para la determinación de los parámetros eléctricos de motores de inducción monofásicos", desde su inicio hasta su etapa final.

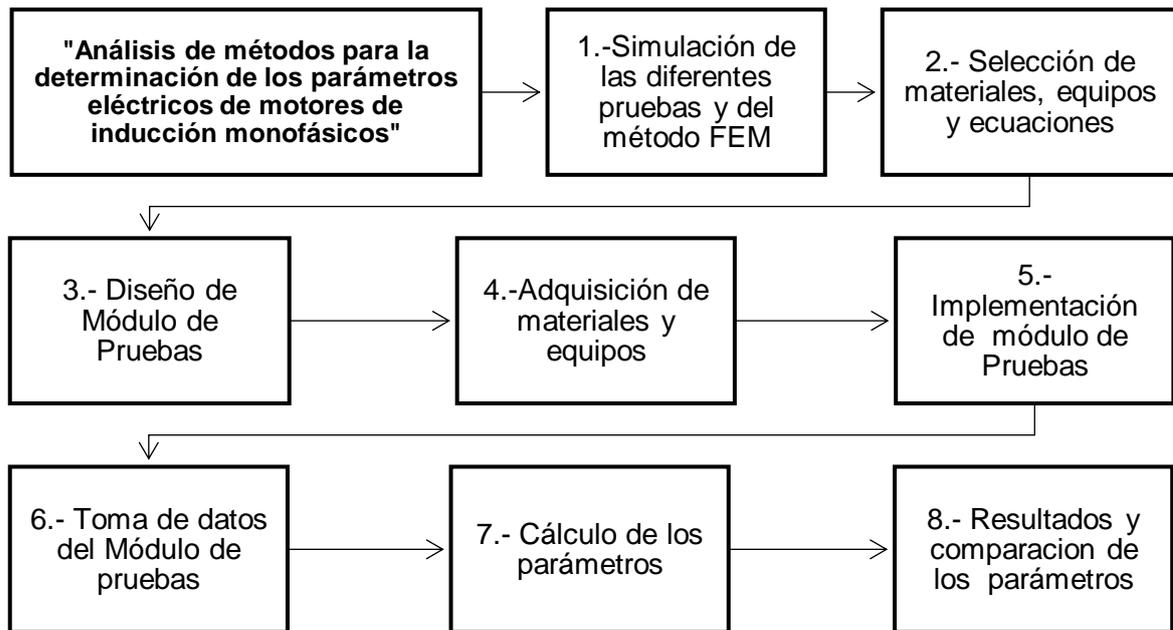


Figura 10: Metodología para el diseño e implementación de un módulo de pruebas
Fuente: Autor

En la fase inicial de la metodología, se realizaron simulaciones de diversas pruebas para verificar los datos del módulo de pruebas. Asimismo, se empleó el software FEMM para analizar el flujo magnético en el motor de inducción monofásico.

La segunda fase se enfocó en la selección de los materiales y equipos que se utilizarían tanto para la implementación del módulo como para la medición de las pruebas de este mismo.

En la tercera fase, se procedió a la selección y el dimensionamiento de los materiales, equipos y módulos de medición que permitirían la obtención de datos como voltaje, corriente y potencia. Posteriormente, se seleccionaron los modelos matemáticos que formarían la base esencial para el cálculo y la obtención de los parámetros de la máquina.

En la cuarta y última fase, cubierta en el Capítulo II, se llevó a cabo el diseño del módulo de pruebas, incorporando todos los materiales y equipos previamente seleccionados. La finalidad de esta etapa fue establecer una referencia a seguir, a través de un esquema creado en AutoCAD, para garantizar una implementación adecuada del módulo de pruebas.

En la quinta fase y primera del Capítulo III, se adquirieron todos los materiales, equipos y módulos de medición necesarios para la etapa número seis, correspondiente a la implementación del módulo de pruebas para el motor de inducción monofásico seleccionado, con una potencia de $\frac{1}{2}$ Hp o 0,37 kilowatts.

En la fase siete, se procedió a la recolección de datos del módulo de pruebas del motor de inducción monofásico, mediante la aplicación de los diversos métodos y pruebas correspondientes que se detallaron específicamente en el Capítulo I.

En la penúltima etapa de la metodología del trabajo de titulación, se llevaron a cabo los cálculos de los parámetros eléctricos de la máquina de inducción monofásico, utilizando para ello los modelos matemáticos que abarca cada uno de los métodos.

Finalmente, tras haber realizado y cumplido todas las etapas de la metodología del trabajo de grado, se obtuvieron los resultados y se procede a la realización de una comparación de los parámetros de las diferentes métodos y pruebas aplicadas.

Luego la explicación de la metodología la cual se aplicó en el trabajo de grado a continuación, se menciona todos los equipos utilizados, herramientas, softwares, materiales ,entre otros como son:

- Motor de Inducción Monofásico de ½ Hp (WEG)
- Motor DC de 24 rpm 700 vatios (Oster)
- Software Matlab Simulink
- Software AutoCAD
- Software de Elemento Finitos (FEMM O MEF)
- Controlador de Voltaje Variable (VARIAC)
- Regulador de Voltaje DC (UM-715)
- Rectificador
- Capacitor
- Selector de Tres posiciones
- Pantalla Monitor de PC (ViewSonic)
- Disyuntor Termomagnético 16 amperios
- Fusible y porta fusible
- Sistema Operativo Arduino
- Placas de Arduino Mega 2560 R3
- Módulo de medición de corriente alterna (PZEM-004T)
- Módulo de medición de corriente continua (PZEM-017)
- Medidor de Corriente Alterna D52-2066
- Modelo Matemáticos (Ecuaciones)
- Cajas de proyectos

- Conductores eléctricos 14 AWG flexible (Azul y Blanco)
- Freno de disco de bicicleta
- Canaletas

2.2. Simulaciones para el motor de inducción monofásico

Antes de iniciar las simulaciones del motor, fue esencial disponer de datos específicos provenientes de la placa del motor de inducción de ½ Hp. Por este motivo, se proporcionó una breve descripción de estos datos como paso preliminar a las simulaciones.

Las simulaciones realizadas en esta fase para el motor de inducción monofásico abarcaron pruebas de corriente continua, en vacío y de rotor bloqueado. Estas simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software Simulink de Matlab para recopilar datos necesarios en el cálculo de los parámetros y confirmación de estos con las pruebas prácticas. Además, se ejecutó la simulación del método de elementos finitos mediante el software FEMM para obtener datos relevantes en el análisis magnético.

2.2.1. Motor de inducción monofásico de ½ hp

El motor de inducción monofásico que se utilizó para el desarrollo de este trabajo y para la aplicación de los diversos métodos y pruebas fue el motor de la marca Weg de ½ Hp, tal como se evidencia en la Figura 11.



Figura 11: Motor Weg monofásico ½ hp
Fuente: Fotografía Autor

El motor de inducción seleccionado para este estudio ofrece los siguientes datos en su placa de características: una potencia de 0,37 kilo vatios (kW) o ½ Hp, voltaje de 110/220

voltios (ac) y corriente nominal de 8,40/4,20 amperios operando a 1720 RPM siendo de cuatro polos. Los datos restantes de la placa se pueden apreciar en la Figura 12.

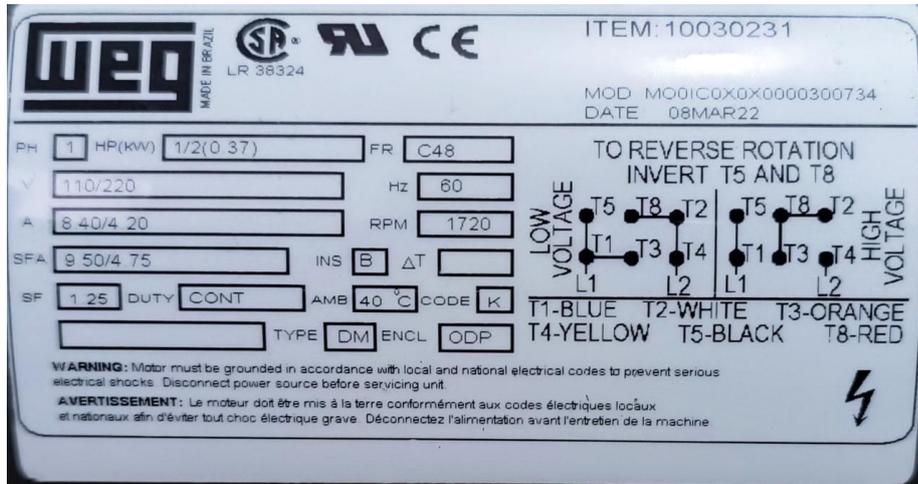


Figura 12: Datos de Placa del Motor de inducción monofásico ½ Hp
Fuente: Fotografía Autor

La placa de datos mostrada en la Figura 12 también proporciona información sobre el conector en configuraciones de bajo (110 V) y alto (220 V) voltaje, así como instrucciones para invertir la rotación del motor.

El circuito equivalente exhibido en la Figura 13, simboliza al motor de inducción monofásico. Este esquema es esencial, ya que permite realizar los cálculos de los parámetros y establecer la base para las simulaciones, en las cuales se considerarán variaciones a este modelo.

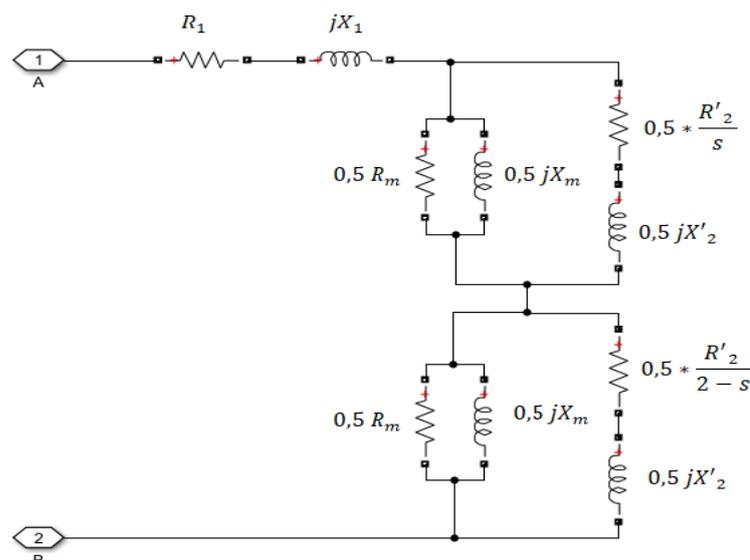


Figura 13: Circuito equivalente del motor de inducción monofásico.
Fuente: Autor

Donde:

R_1 = Resistencia del devanado principal o Resistencia del Estator

jX_1 = Reactancia principal o Reactancia del Estator

R_m = Resistencia magnetizante

jX_m = Reactancia magnética

R'_2 = Resistencia del Rotor

jX'_2 = Reactancia del Rotor

Una vez que todos estos datos y parámetros fueron identificados y analizados, se procedió a realizar las correspondientes simulaciones.

2.2.2. Simulaciones en Matlab Simulink

Durante el desarrollo del trabajo de grado, se recurrió a Simulink de Matlab para llevar a cabo las simulaciones. Esta plataforma, caracterizada por su entorno de programación visual a través de diagramas de bloques, facilita la construcción de modelos multidominio. Con ello, se pudo llegar a anticipar el comportamiento de los sistemas antes de su implementación real (MathWorks, n.d.-b).

Para las simulaciones de las pruebas eléctricas se empleó el módulo Simscape Electrical de Simulink para simular las pruebas eléctricas. Esta extensión de Simulink ofrece una variedad de librerías específicas diseñadas para modelar sistemas eléctricos, mecatrónicos y electrónicos. Dentro de estas librerías, se encuentran modelos predefinidos de semiconductores, motores y otros componentes, esenciales para sistemas electromecánicos, redes avanzadas y aplicaciones de energía renovable (MathWorks, n.d.-a).

Las simulaciones realizadas en el trabajo de titulación se las efectuaron con la finalidad de tener una comparativa con los resultados obtenidos en las pruebas prácticas como lo son:

- Corriente Directa (CC O DC)
- En Vacío
- En Rotor Bloqueado

Al iniciar las simulaciones en Simulink de Matlab, se comenzaron seleccionando diversos bloques. Uno de estos bloques, denominado "Subsystem", albergó el circuito equivalente del motor de inducción monofásico junto con las distintas variaciones que se presentaron para cada prueba específica. Se optaron por medidores para registrar la corriente, el voltaje y la potencia, o cualquier otro indicador que cada prueba pudo requerir.

Se utilizó un bloque RMS al sistema; este se encargó de calcular el valor eficaz (RMS) de cada fila o columna de entrada, o a lo largo de vectores dentro de una dimensión determinada. También tuvo la capacidad de calcular el valor RMS del conjunto total de la entrada. Es importante mencionar que este bloque fue específicamente empleado para las pruebas que involucraron corriente alterna.

Para culminar, se integró un bloque "Continuo", que actuó como solucionador de pasos variables en Simulink. Este permitió la discretización del sistema eléctrico para ofrecer soluciones en intervalos de tiempo fijos, así como la solución en forma de fasores.

2.2.2.1. Simulación de prueba en corriente directa

La realización de la prueba de Corriente Directa (CD), junto con su correspondiente simulación, tuvo como objetivo principal la determinación del valor de la resistencia del devanado principal, comúnmente conocida como resistencia del estator. Este análisis implicó la aplicación de un voltaje en corriente continua a los devanados del motor de inducción monofásico. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó el circuito equivalente del motor de inducción monofásico, representado en la Figura 13. La representación completa de la simulación se exhibe en la Figura 14, que se detalla a continuación.

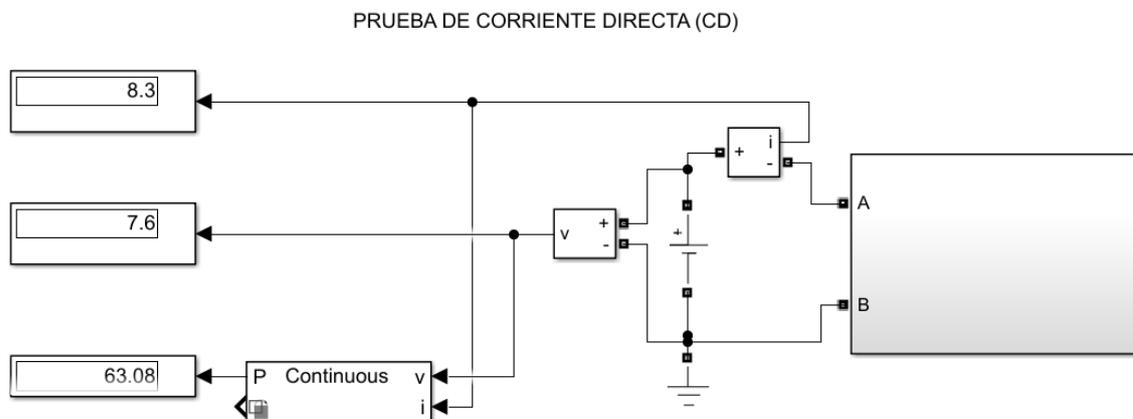


Figura 14: Simulación de prueba de corriente directa
Fuente: Autor

Al iniciar esta prueba, se ajustó la corriente en los devanados del estator cercano a su valor nominal de 8,40 A. Esta acción tendrá como objetivo calentar los devanados a una temperatura similar a la que tendrían durante una operación normal del motor en la prueba real. Las mediciones se realizaron en las terminales A y B. Utilizando instrumentos de medición de corriente (current measurement) y voltaje (voltage measurement), y visualizando

los resultados a través de dos pantallas de visualización (display), se registraron los siguientes datos.

- Voltaje (cd): 7,6 V
- Corriente: 8,30 A

2.2.2.2. Simulación de prueba en vacío

La simulación de la prueba en vacío, por otro lado, buscó replicar las condiciones en las que el motor operaría sin carga externa, girando libremente. Se entendió que, en una situación real, las principales fuentes de carga provendrían relacionadas con la fricción y la resistencia al aire. Esta característica se reflejó en la simulación al mantener el deslizamiento (s) del motor en valores extremadamente bajos, aproximadamente 0.001 o menos.

En el bloque "Subsystem", se diseñó el circuito equivalente del motor. Esta representación se basó en la Figura 8 del Capítulo I, resultando en un esquema que se representó en la Figura 15. La disposición de este circuito fue esencial para realizar las simulaciones y obtener los parámetros deseados del motor bajo estudio.

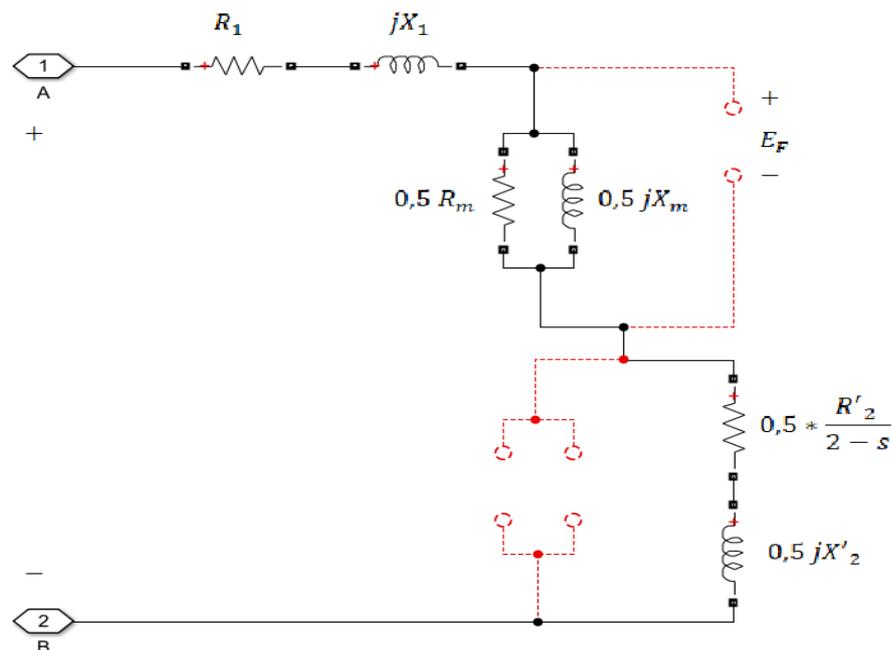
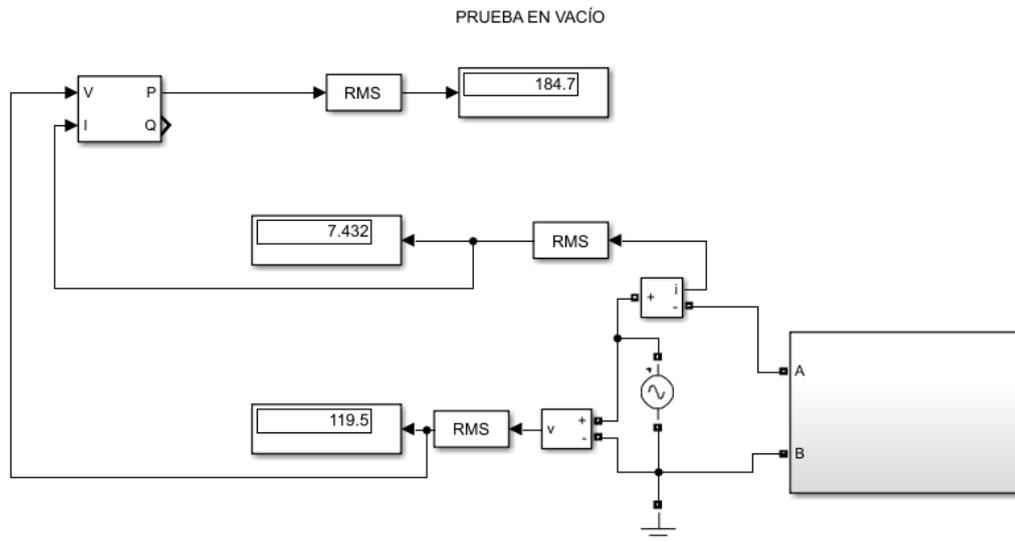


Figura 15: Circuito equivalente de la prueba en vacío del Subsystem
Fuente: Autor

En la Figura 16 se presenta la configuración completa de la prueba, incorporando una fuente de tensión alterna (AC Voltage Source) y utilizando los medidores de corriente, voltaje y potencia, todos estos en alterna, además de bloques RMS para obtener el valor real como se representó a continuación.



*Figura 16: Simulación de prueba en vacío
Fuente: Autor*

A partir de la simulación de la prueba en vacío, realizada y presentada en la Figura 16, se recolectaron los siguientes datos esenciales:

- Voltaje (ac): 119.7 V aproximadamente a 120 V
- Corriente: 7.432 A
- Potencia de 184 W.

2.2.2.3. Simulación de prueba en rotor bloqueado

La prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción monofásico presenta diferencias sustanciales con respecto a la prueba en vacío, a pesar de que ambas pruebas miden variables como el voltaje, la corriente y la potencia resultante. En la prueba de rotor bloqueado, el deslizamiento se fija en $s = 1$ durante la simulación. Para asegurar este valor, resulta crucial que el rotor del motor de inducción permanezca inmobilizado en la prueba real, evitando cualquier movimiento o rotación. Esta condición simula situaciones de máxima exigencia en las que el motor intenta arrancar bajo una carga máxima. Realizar este tipo de prueba es fundamental para comprender y caracterizar por completo el comportamiento del motor en condiciones extremas.

En la prueba de rotor bloqueado, el Subsystem se basa en el circuito equivalente ,adaptado para situaciones donde el rotor está inmobilizado. La disposición de este diseño se ilustra en la Figura 17, reflejando cómo están interconectados los componentes del circuito para simular estas condiciones.

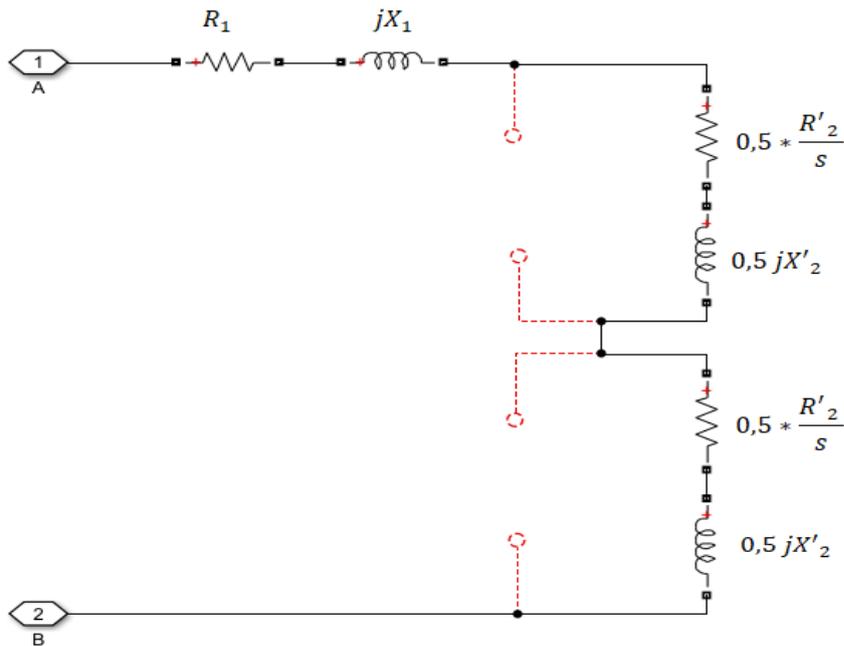


Figura 17: circuito equivalente de la prueba de rotor bloqueado
Fuente: Autor

Posteriormente, se emplearon los mismos elementos utilizados previamente, siguiendo los procedimientos de la prueba en vacío con la excepción de los puntos ya mencionados. Esta configuración se presenta en la Figura 18.

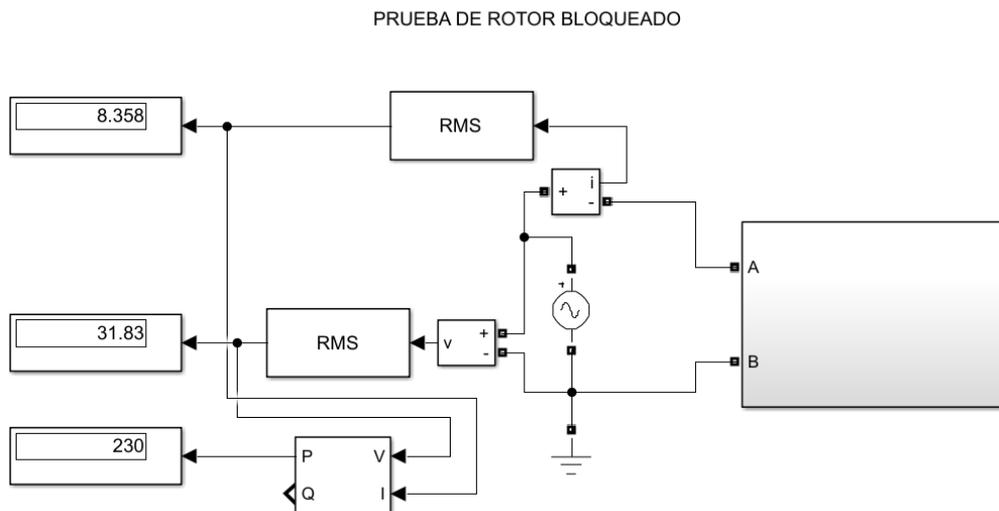


Figura 18: Simulación de prueba de rotor bloqueado
Fuente: Autor

En la simulación, se varió el voltaje aplicado al motor, midiendo simultáneamente la corriente, procurando acercarse al valor nominal de 8,40 amperios sin sobrepasarlo. A partir de la simulación de la prueba con rotor bloqueado, reflejada en la Figura 18, se registraron:

- Voltaje (ac): 31,83 V

- Corriente: 8,358 A
- Potencia: 230 W

2.2.3. Simulación de método de elementos finitos

El software FEMM de elementos finitos es una herramienta especializada en la realización de análisis magnéticos, electrostáticos, de flujo de calor y flujo de corriente. Su uso es fundamental para analizar el flujo magnético de la Máquina de Inducción Monofásica (Bargalló, 2014).

2.2.3.1. Dimensiones del motor de inducción

Al iniciar la simulación con FEMM, se analizó la estructura interna del Motor de Inducción Monofásico, tal como se presenta en la Figura 19. Posteriormente, se procedió a tomar medidas clave, considerando el diámetro y la longitud del estator, y el diámetro del rotor. Asimismo, se contabilizó el número de ranuras en cada componente, encontrándose 32 ranuras en el estator y 44 en el rotor.



*Figura 19: Parte Interna del motor de inducción a) Estator b) Rotor
Fuente: Autor*

Tras determinar las medidas internas del motor de inducción, se elaboraron los planos correspondientes en el software AutoCAD. Posteriormente, estos planos se exportaron a FEMM. La compatibilidad entre ambos programas facilitó este proceso, ya que FEMM tiene la capacidad de leer archivos en formato .dxf.

Al importar el dibujo, se tuvieron en cuenta consideraciones esenciales. Primero, el diseño debía estar representado en milímetros con medidas aproximadas. Además, debía estar centrado en el punto de coordenadas (x,y) en (0,0) en AutoCAD. Estas características

se evidencian en la Figura 20, donde también se destacan algunas de las dimensiones relevantes.

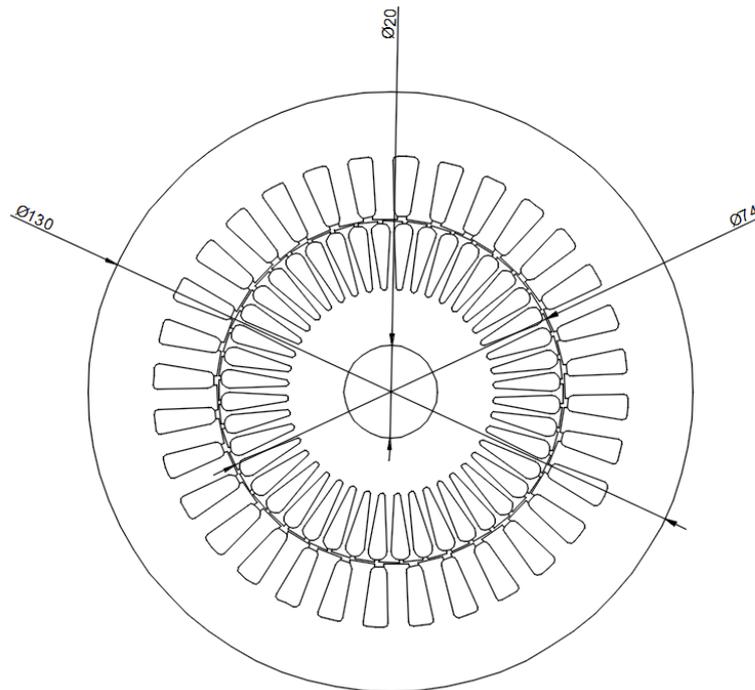


Figura 20: Dibujo del rotor, estator y carcasa en AutoCAD
Fuente: Autor

En la Figura 21, se detallan con valores aproximados las ranuras del estator de esta máquina de inducción, expresadas en milímetros (mm). Como se mencionó previamente, el estator cuenta con un total de 32 ranuras.

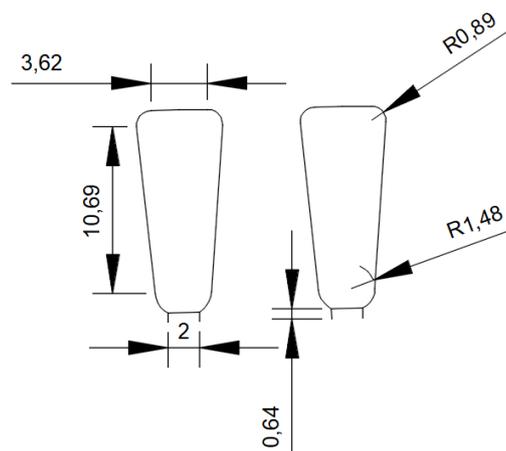


Figura 21: Dibujo de ranuras del estator en AutoCAD
Fuente: Autor

Las ranuras del rotor, según las estimaciones reflejadas en el dibujo de AutoCAD de la Figura 22, poseían dimensiones expresadas en milímetros y sumaban un total de 44 unidades.

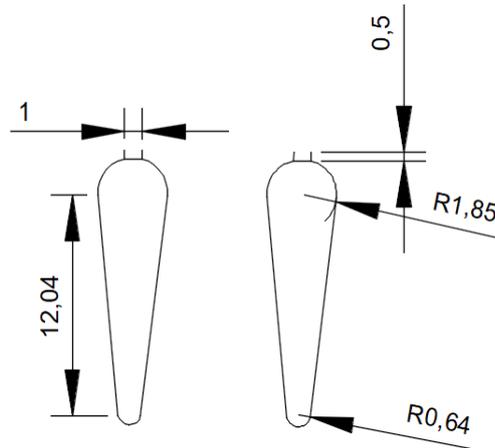


Figura 22: Dibujo de ranuras del rotor en AutoCAD
Fuente: Autor

A partir de la Figura 19, correspondiente a la parte del estator, se identificó la configuración de bobinado y el circuito del motor de inducción monofásico. Se determinó que el tipo de bobinado es concéntrico, organizado en grupos de tres bobinas por cada polo. Esta estructura posee dos pares de polos, de la misma como se evidenció en la Figura 23.

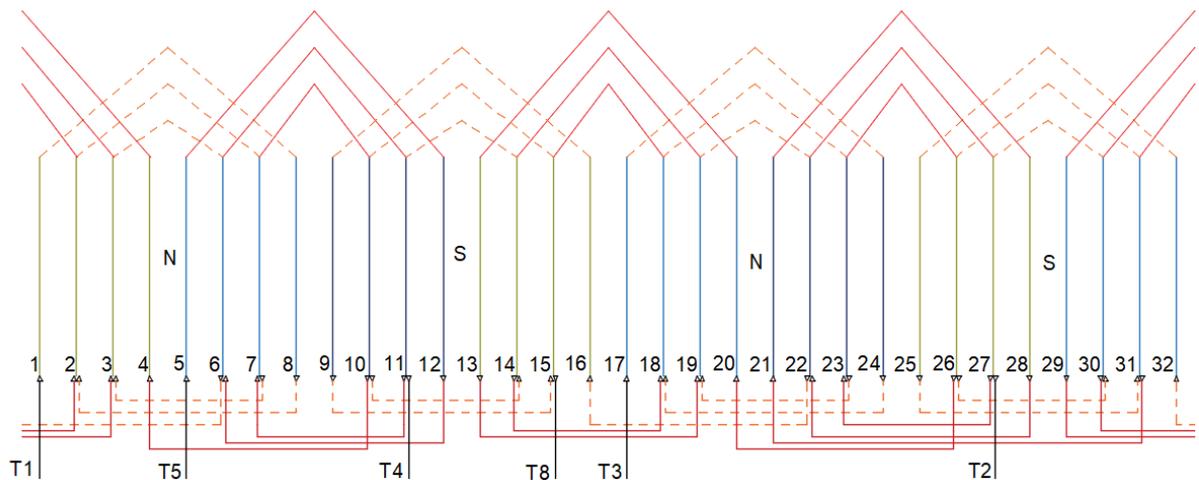


Figura 23: Diagrama del bobinado del motor de inducción monofásico 1/2 hp
Fuente: Autor

Adicionalmente, esta estructura está compuesta por cuatro bobinas principales o de trabajo, representadas en color rojo en la Figura 23, y cuatro bobinas de arranque o auxiliares, ilustradas en color naranja en la misma figura.

2.2.3.2. Configuración del motor de inducción

Al configurar el motor de inducción monofásico, es esencial tener en cuenta los siguientes datos específicos de la máquina de inducción, que se presentan detalladamente en la Tabla 1 y seguir el procedimiento de configuración y cálculos del motor de inducción descrito en (Bargalló, 2014, Cap 2, pp 18-21).

Tabla 1

Datos del Motor de Inducción Monofásico

Nomenclatura	Nombre	Valor
N_r	Número de ranuras	32
N_f	Número de Fase	1
p	Número de pares de polos	2
V	Voltaje de fase	110/220
L_s	Largo del Estator	6,4 cm
D_{is}	Diámetro interno estator	7,4 cm
B	Inducción	0,8 T

Nota. Fuente: Autor

Continuando con la configuración del motor de inducción monofásico, se recurrió también a diversas ecuaciones matemáticas para facilitar el cálculo de ciertos parámetros, tal como se detalla a continuación.

Número de ranuras que se obtuvo por medio de la ecuación (1).

$$q_T = \frac{N_r}{2p} \quad (1)$$

$$q = 8 \text{ por polo}$$

Para determinar el paso angular entre las ranuras, se empleó la ecuación detallada en (2).

$$\alpha = \frac{180 * 2p}{N_r} \quad (2)$$

$$\alpha = 22.5$$

Del total de ranuras por polo, solo se emplea el 2/3 para el devanado de trabajo y el 1/3 restante para la bobina de arranque, acorde a lo indicado en las ecuaciones (3) y (4).

$$q_T = \left(\frac{2}{3} * q \right) \quad (3)$$

$$q_T = 5,33 \approx 6$$

$$q_A = \left(\frac{1}{3} * q \right) \quad (4)$$

$$q_A = 2,66 \approx 3$$

El número de ranuras por fase, tanto para la bobina de arranque como para la de trabajo, fue calculado mediante las siguientes expresiones matemáticas presentadas en las ecuaciones (5) y (6)

$$K_{d(trabajo)} = \frac{\sin\left(\frac{q_T \alpha}{2}\right)}{q_T \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

$$K_{d(trabajo)} = 0,7892$$

$$K_{d(arranque)} = \frac{\sin\left(\frac{q_A \alpha}{2}\right)}{q_A \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (6)$$

$$K_{d(arranque)} = 0,9493$$

Para determinar el número total de espiras Z_f , se recurrió a las ecuaciones (7) y (8). En este cálculo, (C) representa una constante cuyo valor es 133 cuando se trabaja a 60 Hz. Es importante mencionar que, para el bobinado de trabajo, se tomó en cuenta un voltaje nominal de 220 V, mientras que para el bobinado auxiliar se consideró un voltaje de 110 V, dado que este último sólo se utiliza durante la fase de arranque.

$$Z_{f(trabajo)} = \frac{V_p}{C L_s D_{is} K_d B} \quad (7)$$

$$Z_{f(trabajo)} = 1106.400$$

$$Z_{f(arranque)} = \frac{V_p}{C L_s D_{is} K_d B} \quad (8)$$

$$Z_{f(arranque)} = 459.903$$

Para determinar el número de espiras por ranura Z_r , que se emplea en cada bobinado, ya sea de trabajo o de arranque, se recurrió a las ecuaciones (9) y (10). Es esencial señalar que Z_r es utilizado tanto en el bobinado principal como en el auxiliar.

$$Z_{r(trabajo)} = \frac{Z_{f(trabajo)}}{N_r} \quad (9)$$

$$Z_{r(trabajo)} = 46.100 \text{ espiras}$$

$$Z_{r(arranque)} = \frac{Z_{f(arranque)}}{N_r} \quad (10)$$

$$Z_{r(arranque)} = 38.325 \text{ espiras}$$

Luego de determinar todos estos valores a través de las distintas ecuaciones y expresiones matemáticas, se continuó con la importación del archivo en FEMM, incorporando todas las configuraciones previamente calculadas.

2.2.3.3. Importación del archivo y asignación de materiales en FEMM

En el proceso de exportación, se inició creando una nueva pestaña configurada para "Magnetics Problem", tal como se muestra en la Figura 24 como se describe en (Bargalló, 2014).

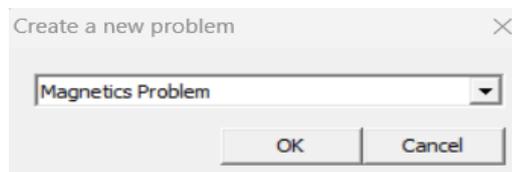


Figura 24: Configuración de la pestaña
Fuente: Autor

Después de establecer esta pestaña, se importó el archivo (.dxf) diseñado en AutoCAD en un formato 2D, tal como se ilustra en la Figura 25 del software FEMM.

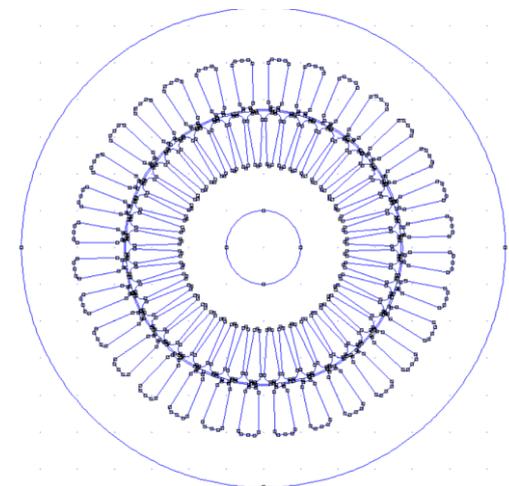


Figura 25: Archivo importado del diseño de la parte interna del motor
Fuente: Autor

Después de la importación, el primer paso consistió en especificar los datos del problema. En la Figura 26 se detallan los parámetros de configuración, incluyendo la escala en milímetros, la frecuencia y la profundidad del estator.

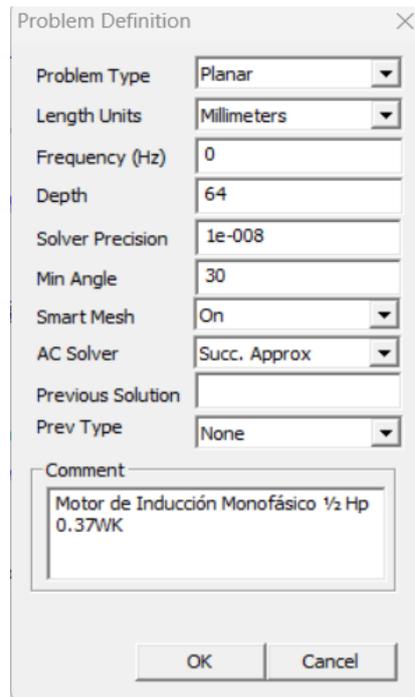


Figura 26: Definición de datos del problema
Fuente: Autor

Una vez finalizada la importación y definición de los parámetros básicos del diseño del motor de inducción en el software, se dio el siguiente paso fundamental: asignar materiales específicos a las distintas secciones que componen el motor. Esta tarea es esencial para asegurar la precisión en las simulaciones y análisis posteriores. El detalle de esta asignación es el siguiente:

- Aire: Se seleccionó específicamente para las zonas que representan condiciones de contorno, especialmente en el entrehierro y en los vacíos de hierro del rotor. Esta elección fue configurada tal y como se evidencia en la Figura 27.

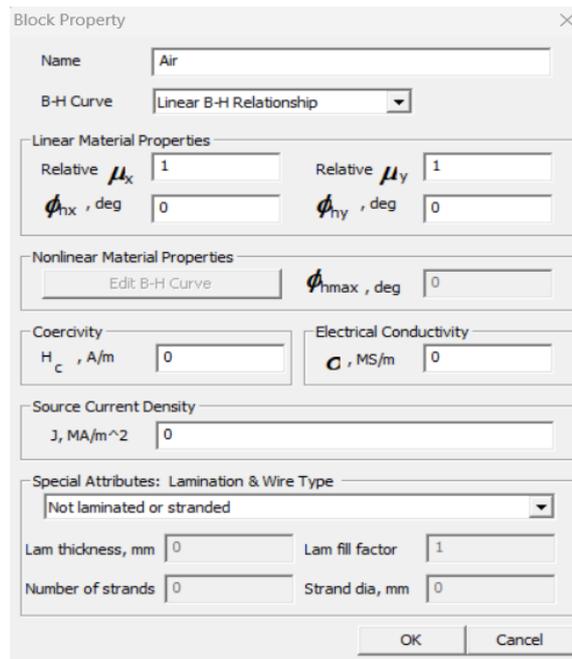


Figura 27: Propiedades del aire
Fuente: Autor

- Cobre: Dada su notable capacidad conductora, se seleccionó cobre de calibre 18 AWG para el devanado principal y de calibre 21 AWG para el devanado de arranque. La especificación detallada de este material se ilustra en la Figura 28.

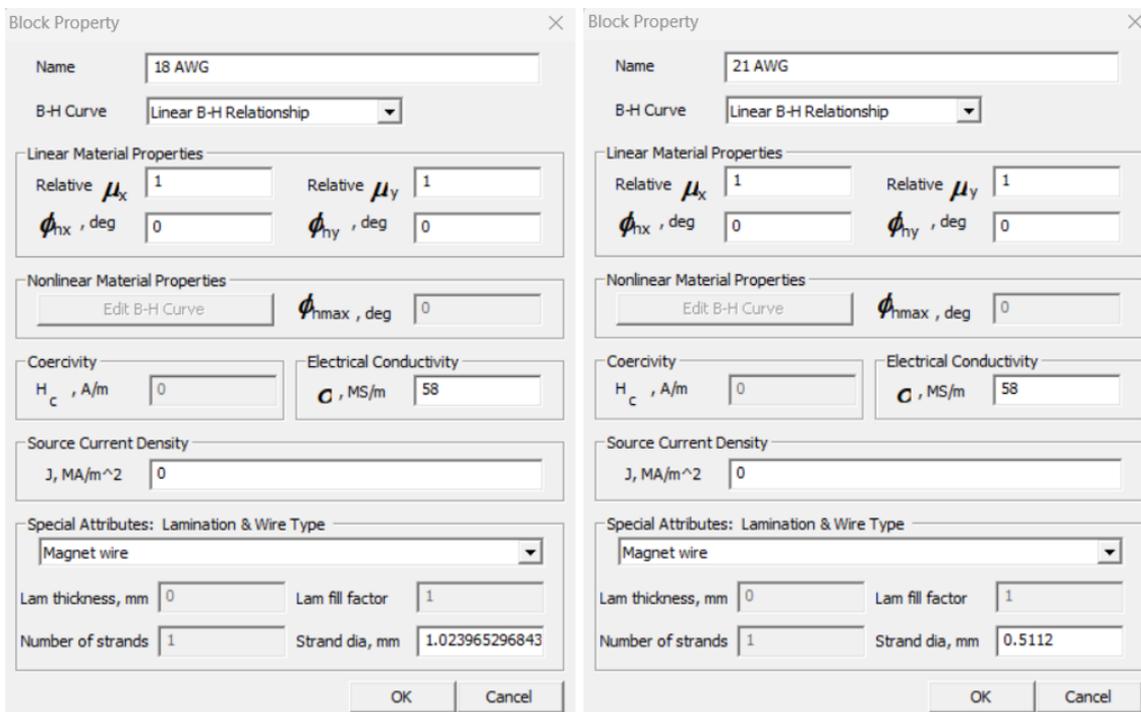


Figura 28: Propiedades de los conductores
Fuente: Autor

- Aluminio: Para las 44 ranuras del rotor se empleó aluminio, caracterizado por una conductividad eléctrica de 36 MS/m. Las propiedades específicas de este material están reflejadas en la Figura 29.

The screenshot shows the 'Block Property' dialog box for 'Aluminum, 1100'. The 'B-H Curve' is set to 'Linear B-H Relationship'. Under 'Linear Material Properties', 'Relative μ_x ' and 'Relative μ_y ' are both 1, and ϕ_{hx} , ϕ_{hy} are 0. Under 'Nonlinear Material Properties', there is an 'Edit B-H Curve' button and ϕ_{hmax} is 0. 'Coercivity' H_c is 0 A/m. 'Electrical Conductivity' σ is 36 MS/m. 'Source Current Density' J is 0 MA/m². Under 'Special Attributes: Lamination & Wire Type', the dropdown is 'Not laminated or stranded', 'Lam thickness' is 0 mm, 'Lam fill factor' is 1, 'Number of strands' is 0, and 'Strand dia' is 0 mm. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figura 29: Características del aluminio
Fuente: Autor

- Hierro: El material de hierro gray iron as cast, el cual se utilizó en el rotor y estator. Este material tiene una conductividad de electricidad de 3,3 MS/m como se mira en la Figura 30.

The screenshot shows the 'Block Property' dialog box for 'Gray iron, as cast'. The 'B-H Curve' is set to 'Nonlinear B-H Curve'. Under 'Linear Material Properties', 'Relative μ_x ' and 'Relative μ_y ' are both 1, and ϕ_{hx} , ϕ_{hy} are 0. Under 'Nonlinear Material Properties', there is an 'Edit B-H Curve' button and ϕ_{hmax} is 0. 'Coercivity' H_c is 0 A/m. 'Electrical Conductivity' σ is 3.3 MS/m. 'Source Current Density' J is 0 MA/m². Under 'Special Attributes: Lamination & Wire Type', the dropdown is 'Laminated in-plane', 'Lam thickness' is 0.5 mm, 'Lam fill factor' is 0.98, 'Number of strands' is 0, and 'Strand dia' is 0 mm. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figura 30: Características del hierro
Fuente: Autor

Adicionalmente, este material presenta un comportamiento no lineal, por lo que es necesario asignarle una relación B – H, evidenciada en la curva de la Figura 31.

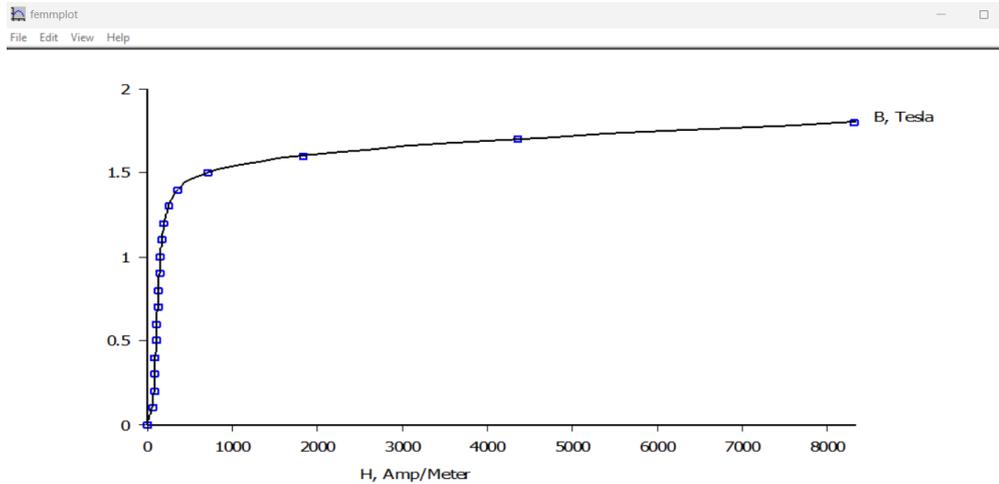


Figura 31: Propiedades del hierro
Fuente: Autor

- Acero Inoxidable: Se seleccionó el acero inoxidable 304 Stainles Steel, tal como se detalla en la Figura 32, para emplearse en el eje del rotor.

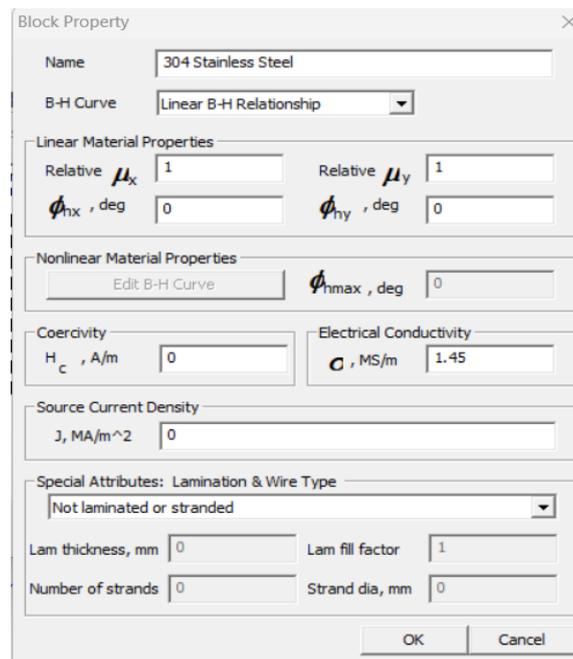


Figura 32: Propiedad del acero inoxidable.
Fuente: Autor

Adicionalmente, se diseñó una circunferencia en el exterior del motor, estableciéndola como condición de contorno que se refiere a cómo el modelo se comporta en sus límites o bordes. Por defecto, el software FEMM emplea la condición de contorno "Prescribid A", la cual se etiquetó como "A", junto con otras condiciones que se detallan en la Figura 33.

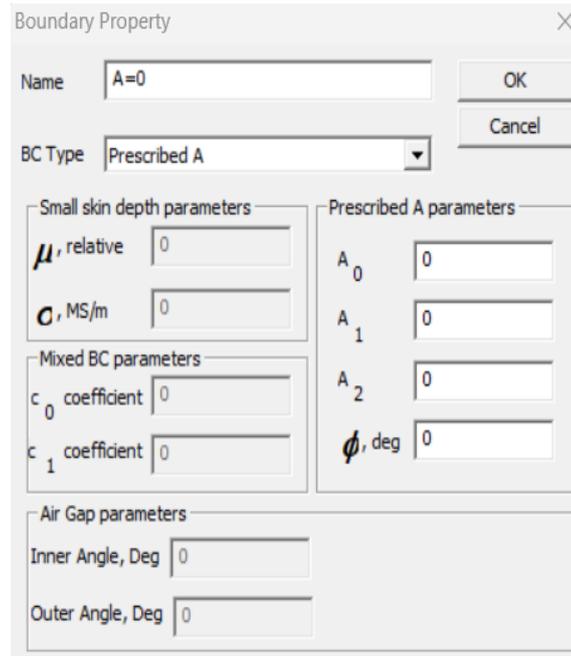


Figura 33: Propiedades de contorno.
Fuente: Autor

Luego de haber incorporado meticulosamente todos los materiales y definido las propiedades esenciales del motor de inducción monofásico en el software, se procedió a ejecutar la simulación para evaluar su comportamiento bajo diversas condiciones y escenarios.

2.2.3.4. Simulación con corriente de arranque

Al asignar los devanados, se determinó un número específico de espiras para cada ranura del estator, según los cálculos previamente realizados. La dirección de estas espiras se definió usando un signo positivo para denotar la entrada y un signo negativo para la salida.

Adicionalmente, se establecieron tres circuitos con una corriente de 40 amperios (A), valor correspondiente a la corriente de arranque del motor de inducción monofásico proporcionado por el datasheet. Dos de estos circuitos, denominados T y T2, fueron asignados al devanado principal y se conectaron en paralelo. Por otro lado, para el devanado auxiliar, se configuró un circuito nombrado Aux, al cual se le suministró una corriente con un desfase respecto a los circuitos principales. En la Figura 34 se muestra las condiciones de cada uno de los circuitos.

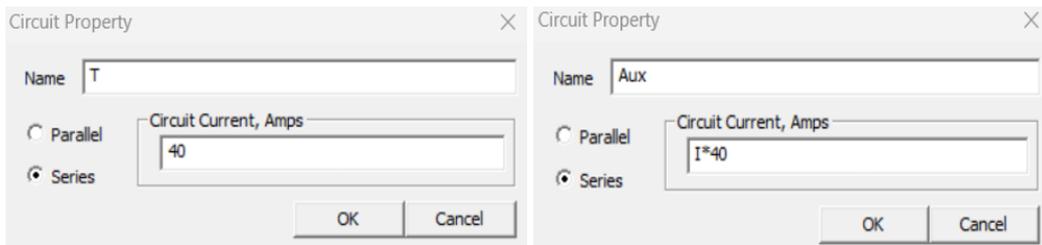


Figura 34: Circuitos principal y auxiliar en corriente de arranque
Fuente: Autor

El segundo paso, ilustrado en la Figura 35, implicó la asignación de tipo de conductor a cada ranura del estator, especificando además el total número de vueltas de la bobina y la dirección de la corriente.

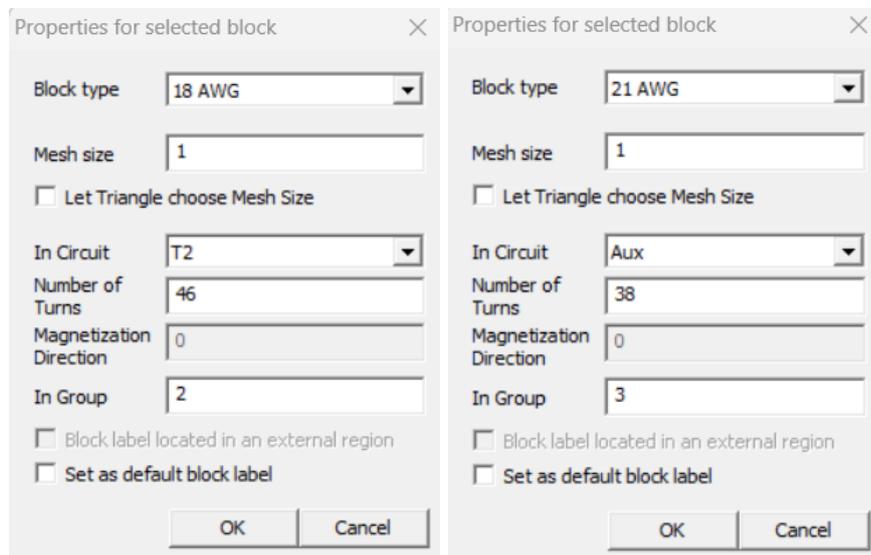


Figura 35: Propiedades del bloque
Fuente: Autor

Después de haber establecido todos los parámetros y materiales, se avanzó a la etapa de simulación del diseño, utilizando una malla como se muestra en la Figura 36. Esta fase de simulación resultó ser esencial, ya que proporcionó una visualización clara para asegurar que no hubiera elementos aislados o desconectados en el diseño.

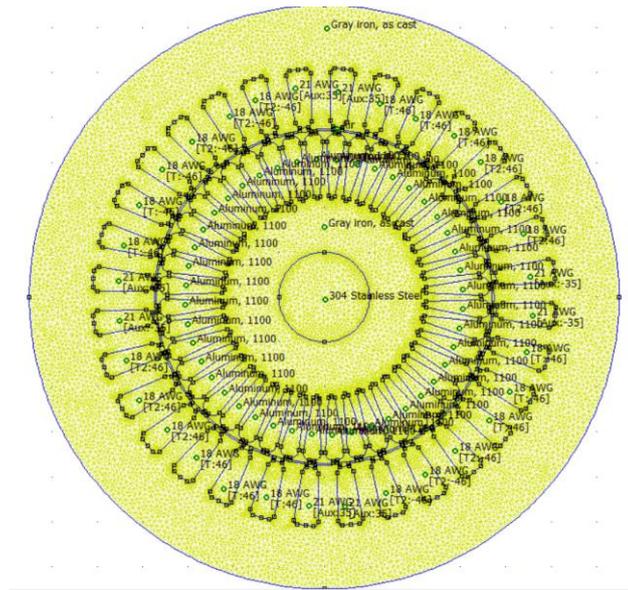


Figura 36: Simulación de malla de elementos finitos
Fuente: Autor

En la simulación que se llevó a cabo considerando la corriente de arranque, se desplegaron detalladamente las líneas de flujo del motor de inducción monofásico, tal y como se evidenció en la Figura 37. Esta representación gráfica no solo facilitó la identificación precisa de la dirección en la que se orientaban los vectores del campo magnético, sino que también proporcionó una visión clara sobre la densidad y distribución de este campo magnético en la estructura del motor. Fue esencial analizar estos aspectos para entender a fondo el comportamiento y rendimiento del motor en condiciones de arranque.

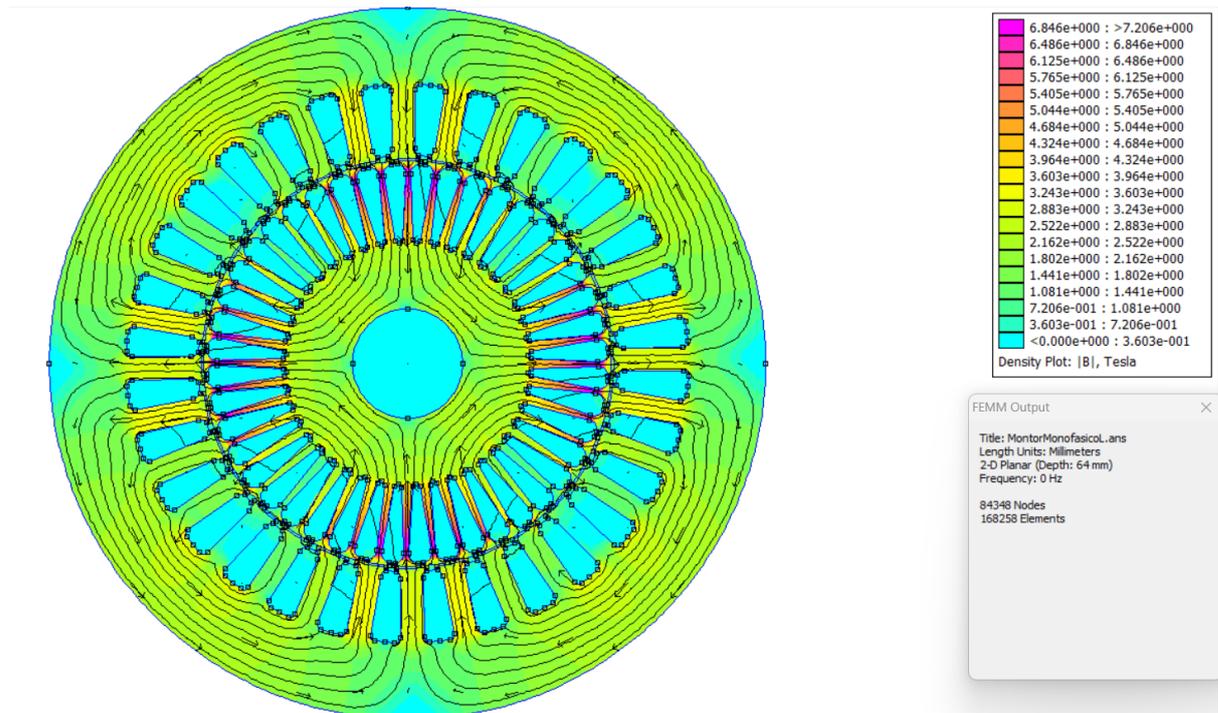


Figura 37: Distribución de densidad de la inducción magnética en arranque
Fuente: Autor

Como se ilustra en la Figura 37, la densidad de flujo del motor se concentra principalmente en las entradas y salidas de los polos. Una vez finalizada la simulación y tras observar los resultados obtenidos durante la corriente de arranque, se procedió con la simulación bajo condiciones de corriente en vacío, lo cual se expone detalladamente en el siguiente apartado.

2.2.3.5. Simulación con corriente de vacío

Al abordar la simulación en condiciones de corriente en vacío, es esencial hacer ajustes pertinentes en los valores del circuito. El circuito principal se modifica para que maneje un flujo de 7.5 amperios (A), mientras que, para el devanado auxiliar, se establece un valor de 0 amperios. La razón de este ajuste radica en la naturaleza funcional del devanado auxiliar: su actividad se restringe exclusivamente a la fase de arranque del motor. Dicha configuración, con los ajustes mencionados, se encuentra detallada y visualmente representada en la Figura 38.

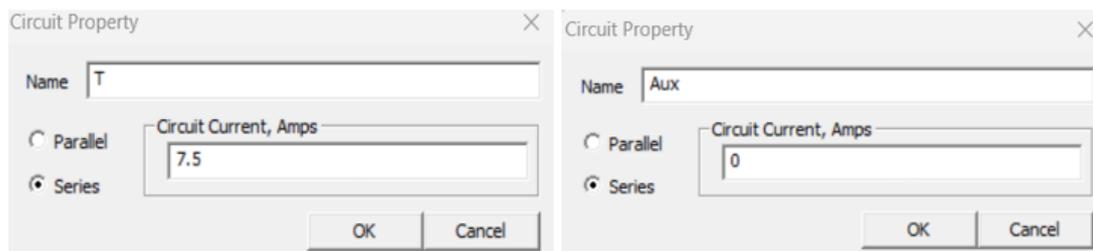


Figura 38: Circuitos principal y auxiliar en corriente de vacío
Fuente: Autor

Durante la simulación en condiciones de corriente en vacío, al igual que en el análisis anterior, es posible discernir detalladamente las líneas de flujo del motor de inducción monofásico. Esta representación, plasmada en la Figura 39, no solo evidencia la orientación exacta de los vectores del campo magnético, sino que también proporciona un panorama claro sobre la densidad de flujo magnético. Además, se acompaña de una tabla de datos que contextualiza y cuantifica la información representada gráficamente, facilitando así una comprensión integral de la dinámica del motor en estas condiciones.

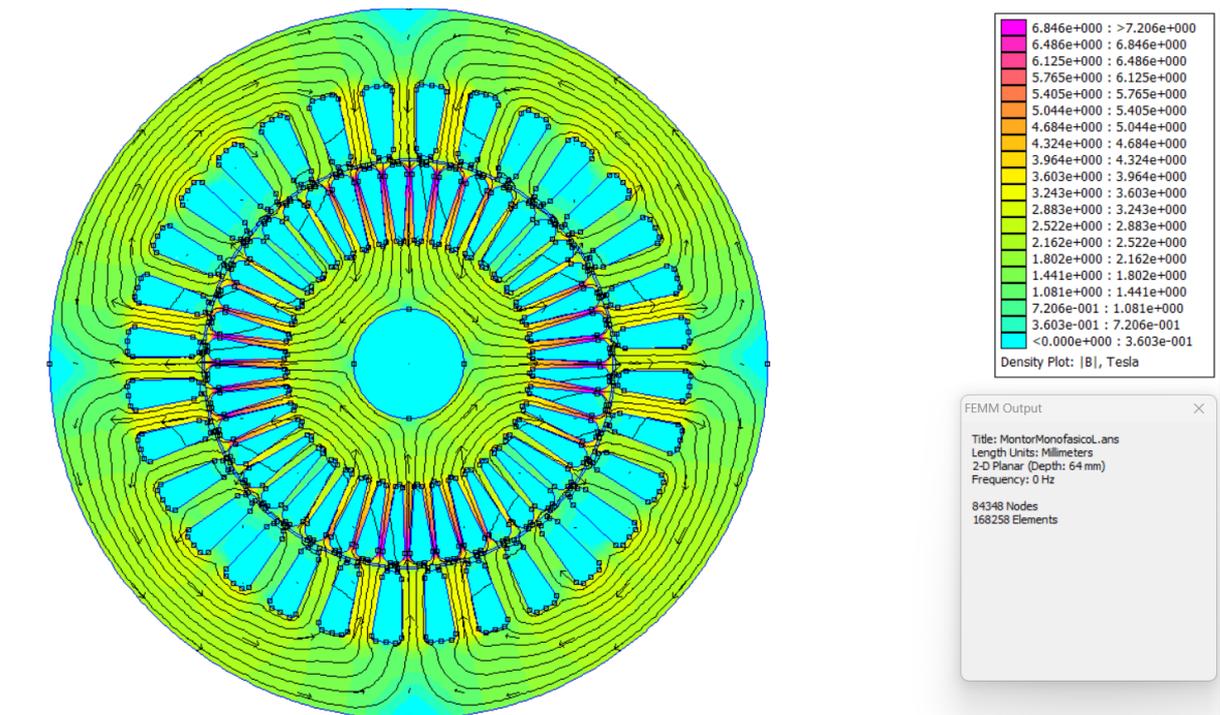


Figura 39: Distribución de densidad de la inducción magnética en Vacío
Fuente: Autor

Basándonos en los resultados obtenidos en las simulaciones de corriente en vacío y corriente de arranque, se destaca que la densidad de flujo se presenta adecuadamente distribuida en toda la estructura del motor. Esta distribución uniforme sugiere un diseño y funcionamiento eficiente del motor. Sin embargo, es notable que existen zonas con mayor concentración de flujo, específicamente en las entradas y salidas de los polos, lo cual es común en este tipo de máquinas. Esta observación es vital para garantizar que el motor opera dentro de sus límites seguros y mantiene su eficiencia en diversas condiciones de funcionamiento.

2.3. Selección dimensionamiento de materiales

Una vez realizadas las simulaciones pertinentes, incluyendo aquellas basadas del método de elementos finitos, se avanzó en la elección y dimensionamiento de los materiales. Esta fase fue esencial para garantizar una adecuada implementación y funcionamiento del módulo del motor de inducción monofásico. Se priorizaron aquellos materiales cuyas propiedades se alineaban con las necesidades y objetivos del proyecto.

2.3.1. Puente rectificador

El puente rectificador de diodos mostrado en la Figura 40 desempeña un papel fundamental en la conversión de corriente alterna a corriente continua. Este componente

resulta esencial al llevar a cabo la prueba en corriente continua del motor de inducción monofásico.

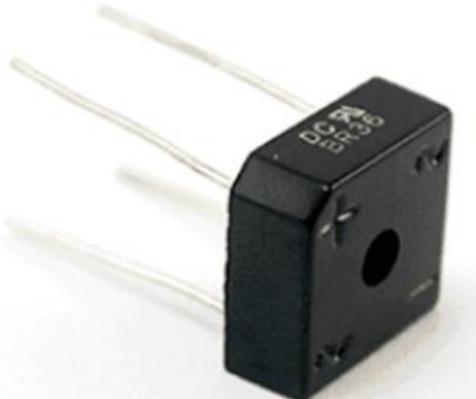


Figura 40: Rectificador KBPC 1008
Fuente: Fotografía Autor

Para dimensionar adecuadamente el dispositivo rectificador, es crucial considerar los voltajes de alimentación. La fórmula empleada para este cálculo se ilustra en la ecuación (11), en la cual V_{rms} representa el voltaje eficaz, establecido en 120 voltios (V), y V_p denota el voltaje pico.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

De donde se obtiene que el valor $V_p = 169.7 V$

Para determinar el voltaje de salida que el puente rectificador de diodos podría ofrecer, se aplicó la ecuación (12).

$$V_{pout} = V_p - 1.4V \quad (12)$$

De donde sale un valor de $V_{pout} = 168.3V$

Basándose en el voltaje de salida del rectificador, se calculó el voltaje DC de este, tal como se ilustró en la ecuación (13).

$$V_{DC} = \frac{2 * V_{pout}}{\pi} \quad (13)$$

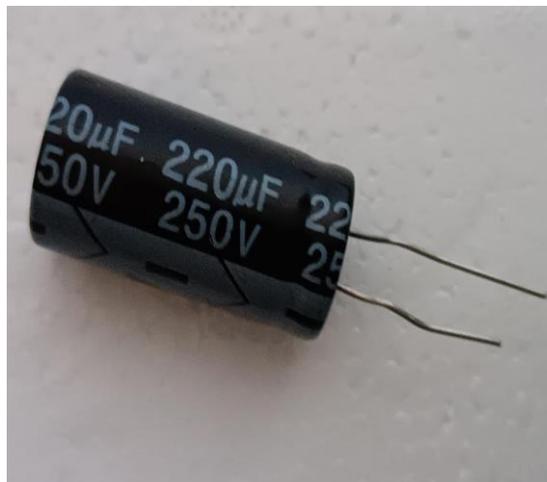
Dando como resultado $V_{DC} = 107.1 V$

A partir de los cálculos realizados, se eligió el rectificador comercial KBPC1008. Este capacitor presenta una tensión pico y una tensión DC de 800 V, mientras que el voltaje V_{rms}

es de 560 V. Estos valores se ajustan adecuadamente a los parámetros que se habían calculado previamente.

2.3.2. Capacitor

En el marco de la prueba en corriente continua (CD), se incorporó un componente clave: un condensador electrolítico de aluminio de la marca JAKEC, el cual se visualiza en la Figura 41. Este tipo de capacitor, conocido por su capacidad para almacenar y liberar energía eléctrica, fue esencial para suavizar las fluctuaciones en la señal de voltaje emergente del puente rectificador que se había descrito y dimensionado previamente. Su utilización garantizó una salida más estable y coherente, adecuada para los propósitos de la prueba.



*Figura 41: condensador electrolítico de aluminio
Fuente: Fotografía del Autor*

En el contexto de la prueba en corriente continua (CD), se optó por un condensador específico que cumplió con ciertas características esenciales. El capacitor seleccionado, específicamente un condensador electrolítico de aluminio presentó una capacidad de $220 \mu F$ y estaba calificado para soportar una tensión de hasta 250 voltios (V). Vale la pena destacar que este componente fue diseñado para operar en un rango de temperatura que varía desde los $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta un máximo de $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones y condiciones de operación.

2.3.3. Controlador de voltaje variable con medición

El controlador de voltaje variable, comúnmente conocido como variac, es un dispositivo eléctrico diseñado para ajustar de manera progresiva el voltaje en una línea eléctrica, según las necesidades del usuario.

Fundamentado en el principio de un autotransformador, el variac cuenta con un mecanismo ajustable que emplea escobillas de grafito. A medida que estas escobillas se desplazan, suman o restan espiras, lo que resulta en la variabilidad del voltaje de salida. El modelo específico de controlador de voltaje que se utilizó para este propósito se ilustra en la Figura 42.



Figura 42: Controlador de voltaje variable con medición
Fuente: Fotografía del Autor

En este contexto, el variac seleccionado presentó una potencia de 500 W y una capacidad de variación de voltaje de 0-130 voltios. Adicionalmente, este dispositivo incluye un fusible de 5A y un cable de alimentación, maniobrando a una frecuencia máxima de 60 Hz. Su principal función en el módulo de pruebas fue ajustar el voltaje conforme a las especificaciones requeridas en cada prueba efectuada

2.3.4. Monitor pantalla para la visualización de datos

El monitor seleccionado para la visualización de datos corresponde al modelo VA1931wm-LED de la marca ViewSonic. Este dispositivo, con un tamaño de 19 pulgadas, ofrece una resolución de 1366x768. De color negro, el equipo opera con una tensión de entrada que varía entre AC 100-240 y una frecuencia de entrada de 50-60 Hz. Sus dimensiones se detallan en 447 mm de ancho y 287 mm de alto. La representación gráfica del mismo se encuentra en la Figura 43.

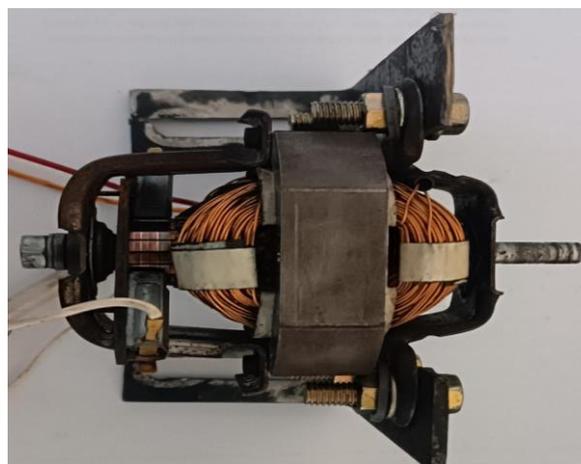


*Figura 43: Monitor ViewSonic
Fuente: Fotografía Autor*

Dentro del módulo de pruebas, el monitor tuvo la función esencial de visualizar los parámetros eléctricos proporcionados por el medidor eléctrico. Esto incluye indicadores como “voltaje, corriente, potencia, energía, frecuencia y factor de potencia (FP)”. Su uso facilitó una interpretación más cómoda y dinámica de estos datos cruciales.

2.3.5. Motor Universal de 700 watts

El motor universal recibe su nombre debido a su versatilidad excepcional, ya que puede funcionar tanto con corriente alterna como con corriente continua. Cuando se conecta este motor a una fuente de corriente continua y se mantiene una carga constante, se nota que su velocidad y potencia aumentan de manera proporcional al incremento del voltaje aplicado. Como ejemplo, en la Figura 44 se muestra un motor universal específico, pertenece a una licuadora de la marca Oster y tiene una capacidad operativa de 24,000 rpm con una potencia de 700 watts, el cual este motor será utilizado como generador



*Figura 44: Motor Universal 700 watts
Fuente: Fotografía Autor*

El motor de la Figura 44, el cual será utilizado como generador, con el propósito específico de aplicar carga. Una de las principales razones para esta elección radicó en la capacidad natural del motor universal de controlar la velocidad de manera precisa. Al acoplar mecánicamente los ejes del motor universal con un motor de inducción monofásico, se estableció una relación directa entre los dos motores: al girar el eje del motor universal, este generó determinados niveles de voltaje, corriente y potencia. Este comportamiento resultó ser especialmente útil para la aplicación en cuestión, ya que el objetivo principal era que el motor universal actuara como un freno regenerativo. Esto significó que, a medida que el motor universal generaba electricidad, también ejercía una resistencia al movimiento, reduciendo de manera controlada y progresiva la velocidad del sistema compuesto. Esta configuración ofreció una solución eficaz para el control preciso de la velocidad en el sistema que se estudió.

2.3.6. Regulador UM-715

El adaptador Universal modelo UM-715 de la Figura 45 está equipado con un indicador de voltaje. Este regulador cuenta con una corriente alterna de entrada que varía entre 90-264 VAC a 50/60 Hz. Ofrece una salida de 3V-24V con una capacidad de 3A en corriente continua. Es ampliamente utilizado en dispositivos tales como ordenadores portátiles, Netbooks, MID, monitores LCD, televisores LCD, productos LED, entre otros equipos electrónicos. Adicionalmente, este adaptador proporciona una protección del 130-150% contra sobrecargas, con una capacidad de recuperación automática ante variaciones de energía y corriente.



*Figura 45: Regulador Modelo: UM-715
Fuente: Fotografía Autor*

El regulador UM-715 la Figura 45, se emplea para la alimentación el campo del motor universal utilizado como generador.

2.3.7. Disyuntor

Con el propósito de salvaguardar el circuito y la Máquina de Inducción monofásico de 0,37 kW, se decidió emplear un interruptor termomagnético. Este dispositivo es esencial para proteger contra posibles cortocircuitos y sobrecargas que podrían dañar severamente los componentes del módulo de pruebas. Para determinar la capacidad adecuada de protección (C_p), se tomaron en cuenta los datos presentes en la placa del motor, específicamente la corriente nominal (8,40 A) y el factor de servicio (1,25 SF o FS) más la corriente de los demás dispositivos a conectar, y se aplicó la ecuación (14).

$$C_p = I_{nom} * SF + I_{total} \quad (14)$$

Dando como resultado $C_p = 10.5 A + 6A = 16.5A$

Luego de realizar los cálculos correspondientes, se seleccionó un disyuntor electromagnético con el valor comercial más cercano al obtenido. Para este caso específico, el interruptor elegido es de 16 A y 4,5kVa de dos polos. Adicionalmente, se incorporó un fusible, también de 16 A, como se muestra en la Figura 46.



Figura 46: Disyuntor Electromagnético y fusible de 10 amperios
Fuente: Fotografía Autor

Ambas protecciones, el disyuntor electromagnético y el fusible, son esenciales ya que, ante cualquier sobrecarga, interrumpen el flujo de corriente. De esta manera, se garantiza que ningún componente del módulo de prueba sufra daños o deterioros a causa de anomalías eléctricas.

2.3.8. Sistema operativo Arduino

El desarrollo e implementación del dispositivo de mediciones se efectuó utilizando herramientas de software y hardware libre. En particular, se empleó Arduino, plataforma de código abierto, que permitió la integración efectiva con el módulo PZEM004. Gracias a esta combinación, se logró medir con precisión parámetros tales como tensión, intensidad, potencia y energía. Además, el sistema también fue capaz de registrar valores de frecuencia

y factor de potencia, garantizando así un monitoreo integral y detallado de las variables eléctricas.

Arduino, ampliamente reconocido en la comunidad de la electrónica y programación, como plataforma de hardware libre que se centra en un microcontrolador versátil y fácil de usar. Su entorno de desarrollo, que también es de código abierto, está diseñado específicamente para simplificar el proceso de creación, desarrollo y despliegue de proyectos electrónicos. Esto lo hace especialmente valioso para aquellos proyectos que abarcan múltiples disciplinas, permitiendo a los innovadores incorporar funciones electrónicas de forma sencilla y efectiva en sus diseños. Es esta flexibilidad y facilidad de uso lo que ha llevado a Arduino a ser una herramienta predilecta en una amplia variedad de aplicaciones, desde proyectos educativos hasta desarrollos industriales avanzados (Vital, 2021).

Arduino es una tecnología que utiliza tanto hardware como software. A nivel de hardware, consta de varias partes e interfaces integradas en una placa de circuito. A lo largo del tiempo, han surgido diferentes tipos de placas de Arduino para adaptarse a diversas necesidades y aplicaciones, hoy en día, Arduino ha introducido al mercado una diversidad de placas y sensores que varían según el número de pines digitales, analógicos o PWM, la capacidad de memoria del programa y la frecuencia del reloj del microcontrolador. (Vital, 2021).

2.3.9. Placas de Arduino

Las placas de Arduino fueron diseñadas como placas de desarrollo electrónicas que constituyen un componente esencial de la plataforma Arduino. Esta última se desarrolló como una plataforma de código abierto con el objetivo de simplificar la creación de proyectos electrónicos interactivos. Estas placas proporcionaban un entorno de programación integrado, una variedad de pines de entrada/salida y componentes electrónicos incorporados que posibilitaban a los usuarios ejercer control y establecer comunicación con el entorno físico.

Para el desarrollo de los medidores en el módulo de pruebas del motor se empleó la placa Arduino Mega.

La placa Arduino Mega, representada en la Figura 47, estaba equipada con un microcontrolador ATmega2560 y ofrecía una velocidad de reloj de 16 MHz. Poseía 256 KB de memoria flash destinados al almacenamiento del programa, 8 KB de memoria RAM y 4 KB de memoria EEPROM para el almacenamiento de datos no volátiles. Adicionalmente, este modelo proporcionaba un mayor número de pines de entrada/salida, tanto digitales como

analógicos, lo cual la hacía idónea para proyectos de mayor envergadura y complejidad (Tienda Arduino, n.d.).



Figura 47: Placa Arduino Mega 2560
Fuente: Fotografía Autor

De manera similar a otros modelos de la serie Arduino, la placa Arduino Mega, al igual que la Arduino estándar, fue programada mediante el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) específico de Arduino.

2.3.10. Medidores de corriente alterna

Los instrumentos seleccionados para la medición de Corriente Alterna incluyen el módulo PZEM-004T y el Medidor Digital Multifunción D52-2066.

El medidor de Corriente Alterna PZEM-004T, ilustrado en la Figura 48, ha sido concebido para supervisar y controlar variables eléctricas. Integra un transformador de corriente y se utiliza frecuentemente para registrar parámetros eléctricos esenciales como: voltaje de CA, corriente, potencia, frecuencia, factor de potencia (fp) y energía activa. En este contexto, estos parámetros son fundamentales para evaluar adecuadamente el rendimiento del motor de Inducción Monofásico.

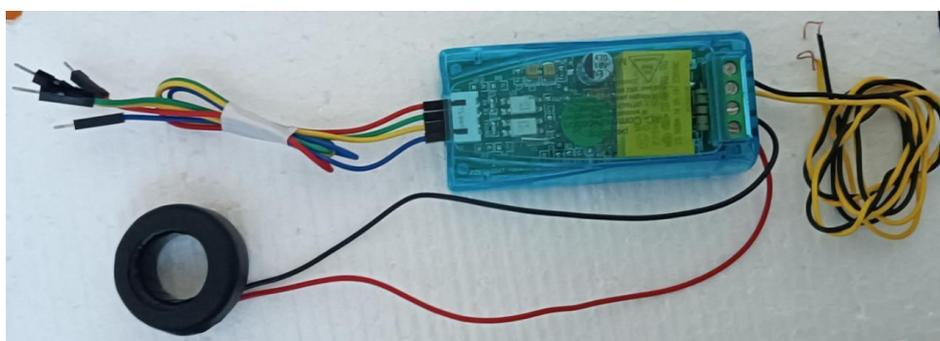


Figura 48: Medidor Eléctrico Monofásico Pzem-004t 3.0 Ttl Modbus 100A
Fuente: Fotografía Autor

Las lecturas obtenidas del medidor eléctrico PZEM-004T se transmiten a un microcontrolador, ya sea Arduino o PIC. Posteriormente, estos datos se muestran en una computadora o en otros dispositivos de visualización, como pantallas LCD. La implementación de este medidor tiene como objetivo primordial adquirir datos específicos del motor de inducción cuando opera en vacío. Estos datos, una vez recopilados, son procesados matemáticamente para deducir los parámetros del circuito equivalente.

Cabe destacar que el módulo PZEM-004T carece de función de visualización propia. Por lo tanto, la lectura de datos se efectúa mediante una interfaz TTL. La configuración adecuada para conectar este medidor al Arduino y, a su vez, al ordenador se ilustra en la Figura 49. Para asegurar la correcta adquisición de datos, es esencial cargar en el Arduino un código previamente desarrollado.

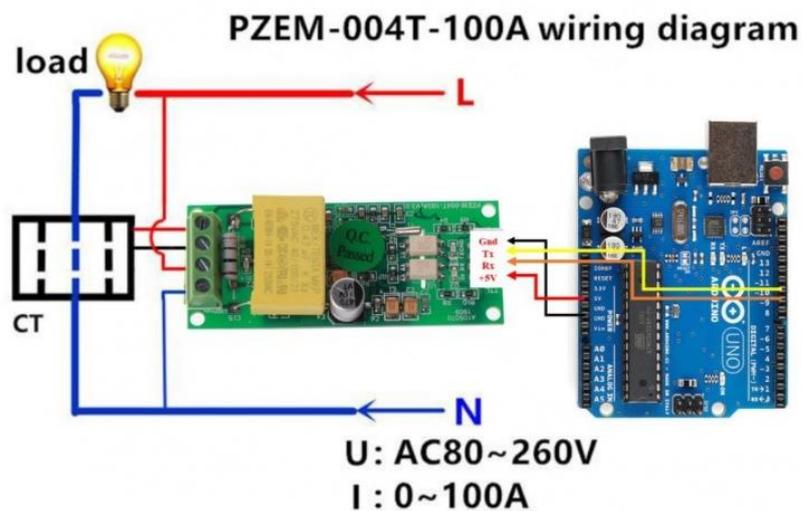


Figura 49: Diagrama de conexión del pzem-004t
Fuente: (Watkins, 2020)

Adicionalmente, de acuerdo con la hoja de datos (DataSheet) proporcionada por (Watkins, 2020) , el módulo presenta las siguientes especificaciones:

- Voltaje de funcionamiento: 80 ~ 260 VCA
- Prueba de voltaje: 80c 260 VCA
- Potencia nominal: 100 A / 22000W
- Frecuencia de funcionamiento: 45-65 Hz
- precisión en la medición: 1,0
- Función de medición de parámetros eléctricos (voltaje, corriente, potencia activa, potencia).

El Medidor digital multifunción D52-2066, ilustrado en la Figura 50, presenta una conexión que guarda semejanza con la del PZEM-004T. No obstante, destaca por su rango de precisión, situado en el 1%. Este equipo maneja un rango de voltaje desde los 40 hasta los 300 V y opera con una frecuencia que oscila entre los 45 y 65 Hz. Su capacidad de medición de potencia se extiende desde 0 hasta 9999,99 W.



Figura 50: Medidor Digital Multi-Función D52-2066
Fuente: Fotografía Autor

Se empleó principalmente este medidor para la prueba de rotor bloqueado. En dicha prueba, la medición de voltaje y otros parámetros relacionados no pudo realizarse con el PZEM-004T.

2.3.11. Medidor de medición corriente directa

El medidor PZEM-0017, claramente representado en la Figura 51, fue el instrumento escogido para llevar a cabo las mediciones durante la prueba de corriente continua, también conocida como DC. Este avanzado dispositivo cuenta con una notable capacidad de medición. En términos de voltaje, su rango se extiende desde un mínimo de 0,05 hasta un máximo de 300 VDC. Para la corriente, puede registrar valores que fluctúan entre 0 y 300 A. En cuanto a la potencia, su espectro de medición va desde los 0,2 hasta los 90 kW. Uno de los atributos más destacados de este medidor es su precisión, ya que garantiza una exactitud del 1,0 en sus mediciones, lo que proporciona una alta confiabilidad en los datos recopilados durante las pruebas. Es esta precisión y confiabilidad lo que lo convierte en un dispositivo esencial para evaluar adecuadamente las características del motor en condiciones de corriente continua.



Figura 51: Medidor PZEM-017
Fuente: Fotografía Autor

En la zona trasera del medidor, se destaca claramente un esquema o diagrama de conexión, el cual está ilustrado en la Figura 52. Este diagrama proporciona las pautas esenciales para garantizar una conexión adecuada y, por ende, el óptimo desempeño del dispositivo. Además de este diagrama, se pueden identificar otras características notables en la parte posterior del módulo. Por ejemplo, hacia el lado derecho, se halla la entrada de alimentación del dispositivo. Asimismo, se distinguen claramente sus pines de comunicación, que son vitales para establecer una interacción eficiente con otros dispositivos o sistemas. Es crucial seguir estas indicaciones con precisión para asegurar la integridad del módulo y la exactitud de sus mediciones



Figura 52: Diagrama de conexión del PZEM-017
Fuente: Fotografía Autor

Para establecer una comunicación efectiva entre el PZEM-017 y el Arduino, es esencial seguir el esquema de conexión que se detalla en la Figura 53. Este diagrama destaca la inclusión de un convertidor serial RS485, un componente crítico en este arreglo. El propósito primordial de este convertidor es adaptar los niveles de señal del Arduino, que generalmente operan bajo niveles lógicos TTL (Transistor-Transistor Logic), a niveles de señal que son compatibles con RS485. Esta adaptación es crucial ya que asegura una transmisión y recepción de datos coherente y sin errores, aprovechando las ventajas del

protocolo RS485. Es vital que, durante la instalación y configuración, se sigan las indicaciones del esquema con meticulosidad para garantizar un desempeño óptimo del sistema.

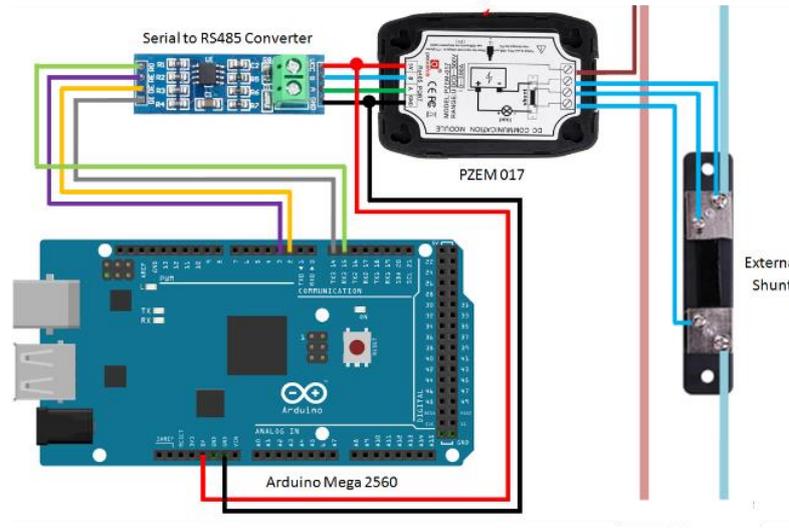


Figura 53: Conexión del PZEM-017 con Arduino Mega
Fuente: Watkins, 2020)

Conforme se puede apreciar en la Figura 53, es esencial incorporar un adaptador RS485, un estándar reconocido en comunicaciones serie. El propósito principal de este adaptador es actuar como un puente que facilita la comunicación entre el Arduino y el PZEM-017. Una vez establecida esta conexión, es posible enlazar el Arduino al computador. Esto habilita la capacidad de monitorear y registrar los datos de medición de energía en tiempo real, ofreciendo una visión detallada y actualizada del desempeño del sistema. La correcta implementación de este adaptador es crucial para garantizar una comunicación fluida y precisa entre los distintos componentes del sistema.

2.4. Modelos matemáticos

Basándose en el trabajo de (Bianchi et al., 2013), se identifican ecuaciones esenciales para determinar los diversos parámetros resultantes de las pruebas de los métodos implementados.

Una de las variables esenciales es la resistencia del estator (R_1). Para determinar este valor a partir de la prueba en corriente continua (DC), es necesario recurrir a la ley de Ohm. Sin embargo, es crucial recalcar que, debido a que la medición no se realiza en corriente alterna (AC), se debe multiplicar el resultado obtenido por un factor de corrección de 1,15 debido a los efectos de proximidad del hierro y la piel. Esta corrección se introduce para

ajustar las diferencias inherentes entre las características de la corriente continua y alterna como se presenta en la ecuación siguiente.

$$R_1 = \frac{V_{CD}}{I_{CD}} * 1.15 \quad (15)$$

Para la prueba de rotor bloqueado donde es necesario medir la corriente, voltaje y potencia de entrada se debe de aplicar las siguientes ecuaciones para el cálculo de los parámetros de las reactancias y resistencia son (X_1, X'_2, R'_2) los cuales vienen dados por:

$$R'_2 = \frac{P_{BL}}{I_{BL}^2} - R_1 \quad (16)$$

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{BL}}{I_{BL}} \quad (17)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (18)$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{1}{2} X_{eq} \quad (19)$$

Para la prueba sin carga o en vacío se aplica las siguientes expresiones matemáticas o ecuaciones presentadas a continuación.

Ecuación (20) para la potencia de perdidas.

$$P_{core+mech} = P_{NL} - I_{NL}^2 \left(R_1 + \frac{R'_2}{4} \right) \quad (20)$$

La corriente nominal en fasores está dada por la ecuación (21).

$$I_{NL} = I_{NL} e^{-j\Phi}, \Phi = \cos^{-1} \left(\frac{P_{NL}}{V_{NL} * I_{NL}} \right) \quad (21)$$

El voltaje inducido por la ecuación (22).

$$E_F = V_{NL} - I_{NL} \left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{4} \right) + j \left(X_1 + \frac{X'_2}{2} \right) \right) \quad (22)$$

En el cálculo de la resistencia y corriente magnética se utilizó las ecuaciones siguientes (23), (24) y (25)

$$R_m = 2 \frac{|E_F|^2}{P_{core+mech}} \quad (23)$$

$$I_{Rm} = 2 \frac{|E_F|}{R_m} \quad (24)$$

$$I_m = \sqrt{I_{NL}^2 - I_{Rm}^2} \quad (25)$$

Finalmente, la ecuación (26) para la reactancia magnética

$$X_m = 2 \frac{|E_F|}{I_m} \quad (26)$$

Para el método Suhr no es necesario calcular el voltaje inducido solo se debe de aplicar las siguientes ecuaciones.

$$X_Q + X_0 = X_1 + X_m \quad (27)$$

X_1 puede determinarse realizando la prueba de rotor bloqueado, para X_Q y X_0 es necesaria la prueba en vacío. Para determinar X_0 debe calcularse la potencia reactiva en vacío Q_0 :

$$Q_0 = \sqrt{(V_{NL} * I_{NL})^2 - P_{NL}^2} \quad (28)$$

Finalmente, para las reactancias

$$X_0 = X_Q = \frac{Q_0}{I_{NL}^2} \quad (29)$$

Al comenzar la descripción de los modelos matemáticos empleados en la prueba con carga, fue crucial tener en cuenta que la representación del circuito equivalente del motor de inducción monofásico era semejante a la del circuito equivalente trifásico, con la única variación de la inclusión de componentes de potencia y par, tanto directos como inversos. Las mismas relaciones que regían la potencia general y el par en los motores trifásicos también se aplicaron a los componentes directos e inversos del motor monofásico. La potencia y el par netos de la máquina surgieron de la diferencia entre estos componentes directos e inversos. (Chapman, 2012, Cap 9, pp 432-434).

Con el propósito de simplificar el cálculo del flujo de corriente que ingresa al motor, se suelen establecer las impedancias (Z_F) y (Z_B). Aquí, (Z_F) representa una impedancia

equivalente simple para todos los elementos de impedancia del campo magnético que se dirigen hacia adelante, mientras que (Z_B) es una impedancia equivalente simple para todos los elementos de impedancia del campo magnético que se dirigen en sentido inverso (Chapman, 2012, Cap 9, pp 432).

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX'_2\right)(jX_m)}{\left(\frac{R_2}{s} + jX'_2\right) + jX_m} \quad (30)$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{\left(\frac{R_2}{2-s} + jX'_2\right)(jX_m)}{\left(\frac{R_2}{2-s} + jX'_2\right) + jX_m} \quad (31)$$

Donde s es el deslizamiento que se obtiene con:

$$s = \frac{1800 \text{ rpm} - \#rpm(\text{medidos})}{1800 \text{ rpm}} \quad (32)$$

Mientras que para el cálculo de que atraviesa el devanado del estator en un motor de inducción, en términos de (Z_F) y (Z_B) es:

$$I = \frac{V}{R_2 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} \quad (33)$$

De igual manera que las impedancias se calcula la potencia del entrehierro hacia delante e inversa y potencia total:

$$P_{EH,F} = I^2(0.5 * R_F) \quad (34)$$

$$P_{EH,B} = I^2(0.5 * R_B) \quad (35)$$

$$P_{EH} = P_{EH,F} - P_{EH,B} \quad (36)$$

Finalmente, el par inducido en un motor de inducción monofásico se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EH}}{w_{sinc}} \quad (37)$$

Donde :

$$w_{sinc} = \#rpm * \frac{2\pi}{60} \quad (38)$$

2.5. Diseño del módulo de pruebas.

En la fase de diseño del módulo de pruebas, posterior a la etapa de dimensionamiento, selección de materiales y equipos, se procedió a la elaboración de diversos diagramas de flujos, de control, arranque, general y proceso. Además, se llevó a cabo un diseño de distribución que abarcó todos los componentes del módulo.

2.5.1. Diagrama de flujo de arranque y control

Los primeros diagramas de flujo representados fueron los de arranque y control, tal y como se puede apreciar en la Figura 54. Estos diagramas sirvieron como referencia para establecer una conexión segura y adecuada durante la implementación del módulo de pruebas.

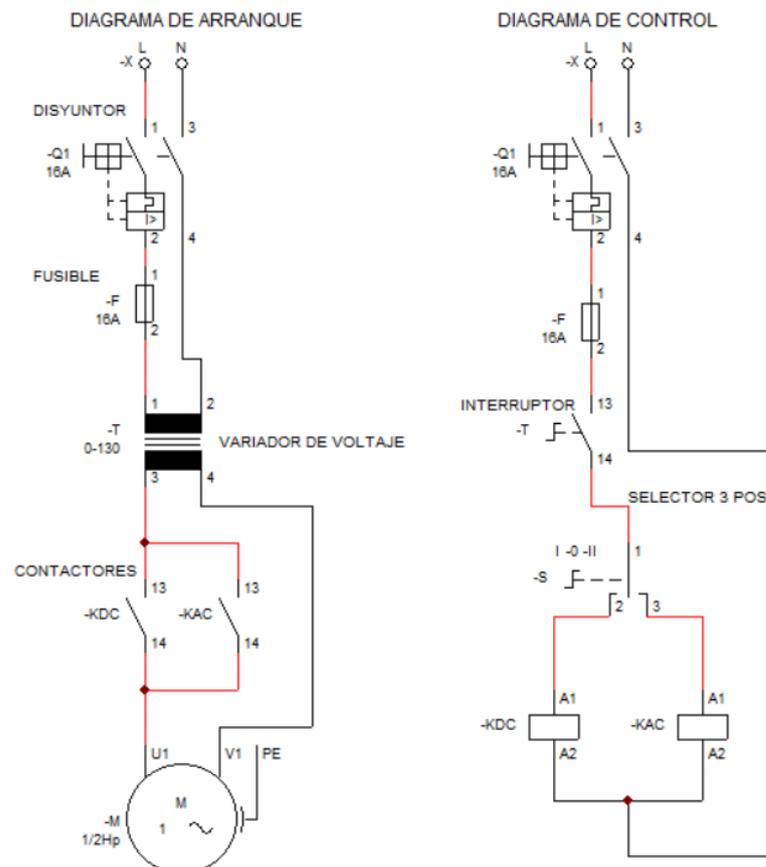


Figura 54: Diagrama de flujo de arranque y control
Fuente: Autor

En la sección del diagrama de arranque de la Figura 54, se encontró compuesta por un disyuntor termomagnético, un fusible de 16A para su protección y un variador de voltaje de 0-130V representado por un transformador. En la parte del diagrama de control, además de los componentes ya mencionados anteriormente, se encontraron el interruptor del VARIAC y un selector de tres posiciones para la selección de la salida de voltaje según la prueba requerida.

2.5.2. Diagrama de flujo general

EL diagrama de flujos general realizado contuvo todos los componentes y conexiones internas que conlleva el módulo de pruebas tal y como en la Figura 55.

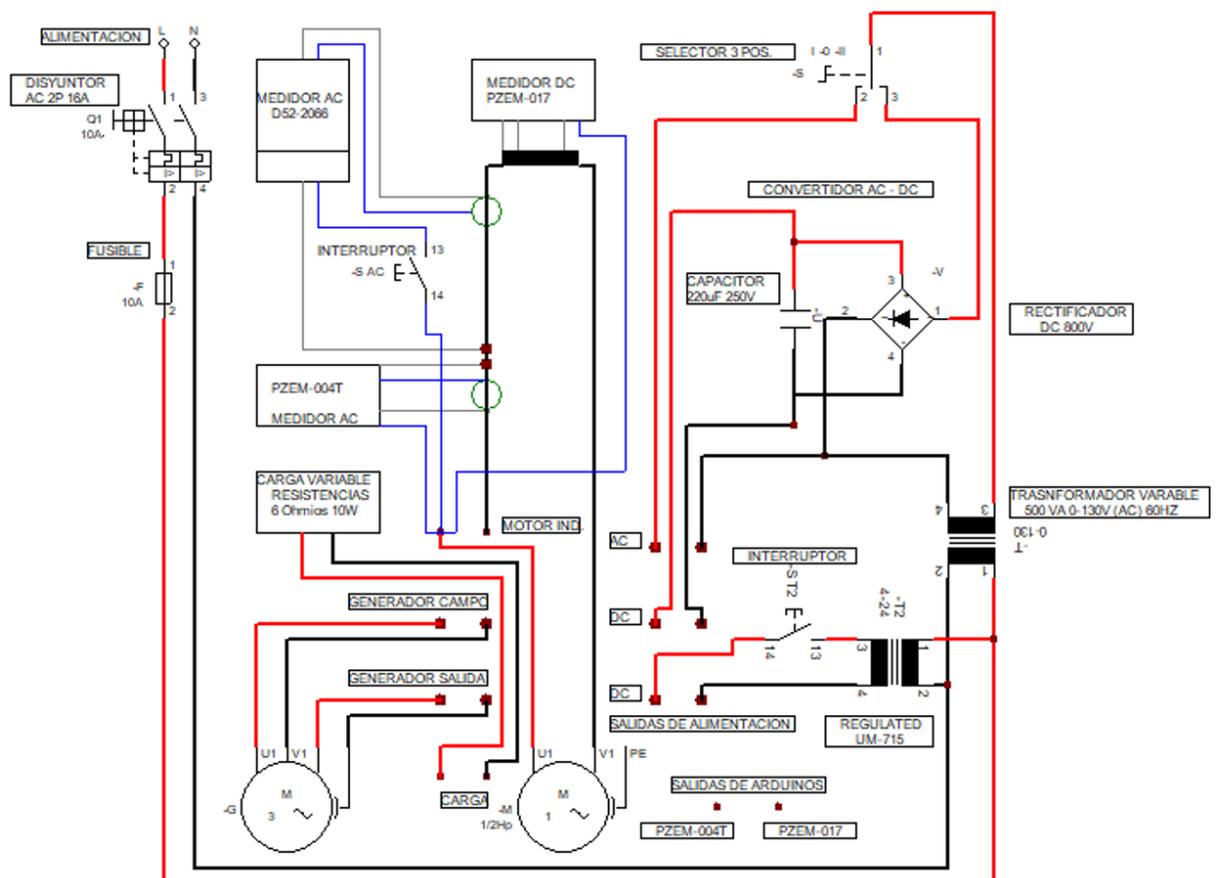


Figura 55: Diagrama unifilar general del módulo de pruebas
Fuente: Autor

En el diagrama de flujo de la Figura 55, se observa que el sistema operó con una alimentación de 120 voltios. El diagrama destacó las conexiones entre los componentes seleccionados, que incluyeron las salidas de alimentación del motor. Estas salidas variaron en un rango de 0 a 130 voltios en corriente alterna (AC) y corriente continua (DC). Para lograr esta variación, se utilizó un variador de voltaje (VARIAC). En el caso de la salida de alimentación en corriente continua (DC), primeramente, pasó a través de un rectificador para

convertirla de AC a DC. Además, se empleó un condensador para suavizar las fluctuaciones y proporcionar una señal de corriente continua más estable. La elección entre estas salidas se efectuaba a través de un selector de tres posiciones, que facilitaba la determinación del tipo de salida necesaria.

El diagrama también incluye las conexiones de los medidores utilizados para las mediciones en corriente continua (DC). Se empleó el medidor PZEM-017 para estas mediciones. En cuanto a las mediciones en corriente alterna (AC), se optó por el medidor PZEM-004T y se utilizó el medidor D52-2066.

En la alimentación del campo del motor universal utilizado como generador, se empleó el Regulador UM-715, con un rango de operación de salida de 4 a 24 voltios. En cuanto a la carga, se utilizaron resistencias en paralelo con una resistencia nominal de 2 ohmios y una potencia de 10 vatios.

Es importante destacar que los componentes, tales como la carga, los medidores, variador de voltaje, regulador y el generador, representados en el diagrama general de la Figura 56, se emplearon únicamente como referencia para ilustrar las conexiones correspondientes de cada uno.

2.5.3. Diseño de distribución de los componentes

El diseño de la disposición de los componentes dentro del módulo de pruebas se concretó mediante el uso del software AutoCAD, permitiendo una representación gráfica precisa que refleja de manera casi exacta a la configuración real del proyecto.

En la Figura 56 del diseño del módulo de pruebas, se presentó la disposición de los componentes en el interior del gabinete. Se destacaron varios elementos esenciales, incluyendo el sistema de protección conformado por un disyuntor termomagnético (breaker) y un fusible. Además, se observaron los sistemas de medición, tanto en corriente continua (DC), que incluían un módulo PZEM-17, un Arduino Mega y un módulo de comunicación RS-485, como en corriente alterna (AC), que comprendían con un módulo PZEM-004T y un Arduino Mega. Asimismo, se identificó el sistema de carga conformado por resistencias dispuestas en paralelo. También se visualizó el sistema de transformación de señal de alterna a continua, junto con el variador de voltaje.

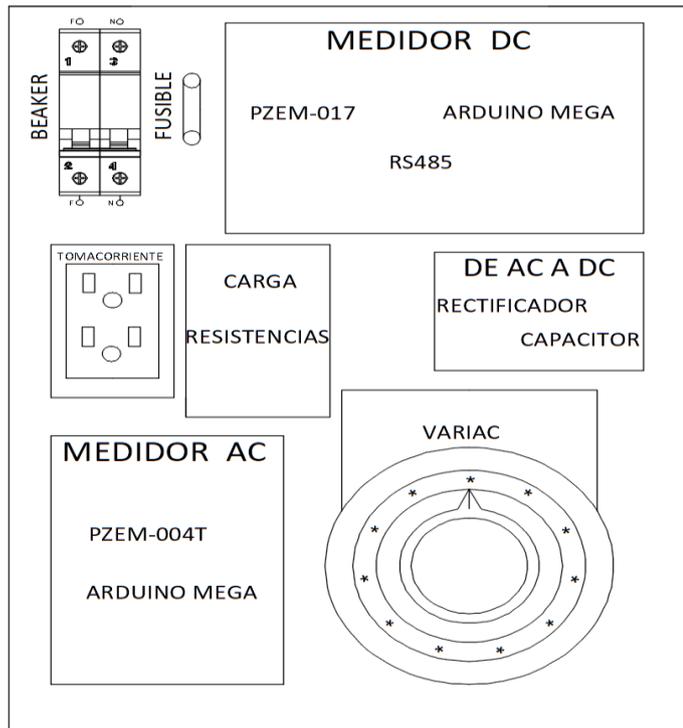


Figura 56: Distribución de los componentes del interior gabinete
Fuente: Autor

Luego de completar la disposición interna del gabinete, se procedió con la configuración de la parte externa del mismo, como en la Figura 57. En esta representación gráfica, se pudo examinar minuciosamente todas las salidas disponibles y las opciones de selección entre alimentación AC y DC variables. Esto se logra mediante el uso de los variadores de voltaje, como el VARIAC y el Regulated UM-715, que ofrecen una amplia gama de voltajes ajustables. La versatilidad de estos variadores desempeña un papel esencial en la capacidad de adaptar el suministro eléctrico a las necesidades específicas de cada experimento.

Además, en este contexto, se destacó la activación y salida de la carga resistiva variable. Esta carga, compuesta por resistencias o un freno mecánico, juega un papel primordial en la realización de la prueba con carga que requiere la simulación de diferentes niveles de resistencia en el circuito. La capacidad de ajustar y controlar esta carga agrega un componente crucial a la experimentación, permitiendo evaluar el rendimiento de los sistemas bajo diferentes condiciones de carga.

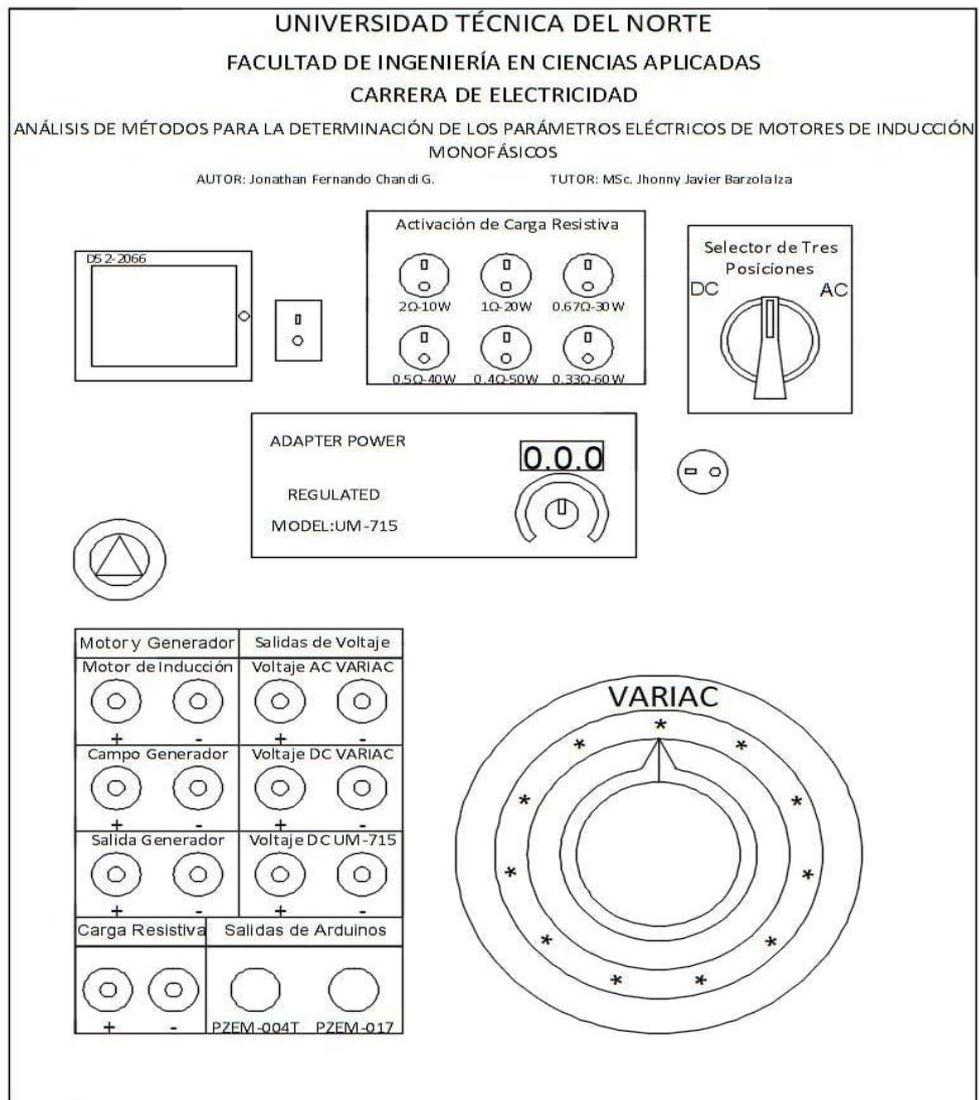


Figura 57: Distribución de los componentes del exterior del gabinete
Fuente: Autor

En la Figura 57, además de la configuración externa del gabinete y los componentes mencionados, se incluyen datos relevantes del módulo. Esto abarca detalles como el nombre de la institución universitaria a la que está asociado, el proyecto, la carrera o programa académico específico, entre otros datos clave. Esta información contextual aporta una comprensión completa y precisa del entorno en el que se llevarán a cabo las pruebas o experimentos.

Finalmente, como culminación de este proceso de diseño y planificación, se elaboró un esquema del diseño final que representa cómo quedaría ensamblado el módulo de pruebas con todos los dispositivos. Esta representación se presenta en la Figura 58 y ofrece una visión general de cómo se integran todos los elementos en el módulo. Desde la disposición de los medidores hasta la ubicación de los motores y las conexiones de entrada y salida.

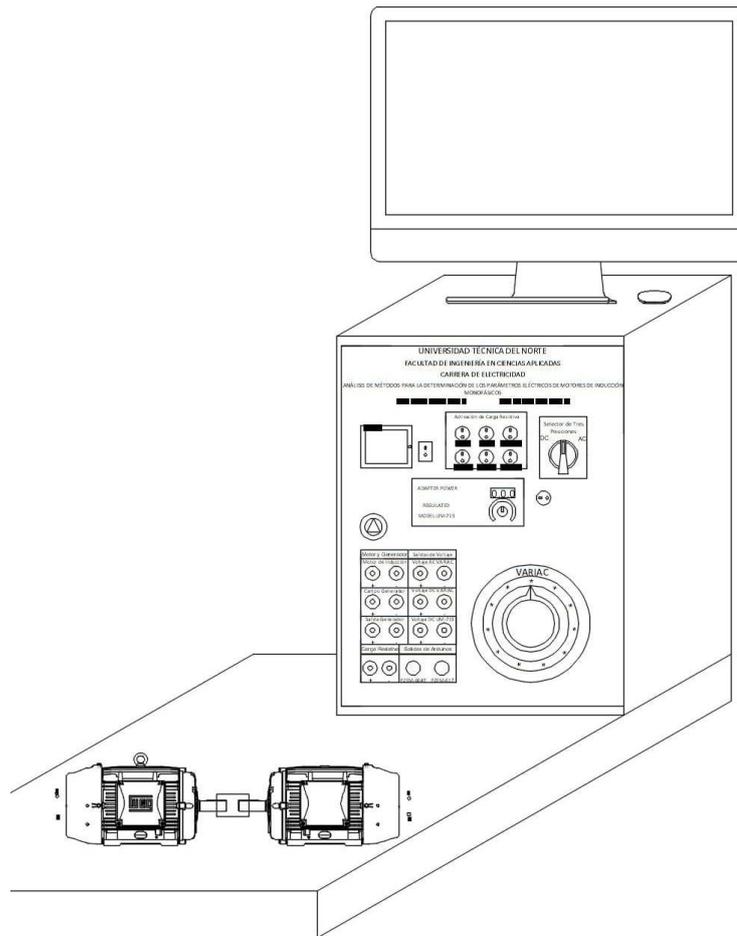


Figura 58: Diseño final del módulo de pruebas
Fuente: Autor

En este esquema, también se pueden apreciar los motores conectados a través de un tornillo y la inclusión de una pantalla o monitor en la parte superior del gabinete para la visualización de los datos de las pruebas.

2.5.4. Diagrama de flujo de procesos

El diagrama de flujo de procesos presentado en la Figura 59 detalló el proceso de funcionamiento del módulo durante la realización de las pruebas propuestas. Este esquema visual sigue cada paso, desde la activación del módulo hasta la recolección de datos durante las evaluaciones. Proporcionando así una guía clara y sistemática para comprender la secuencia de operaciones y las operaciones a seguir en la realización de las pruebas.

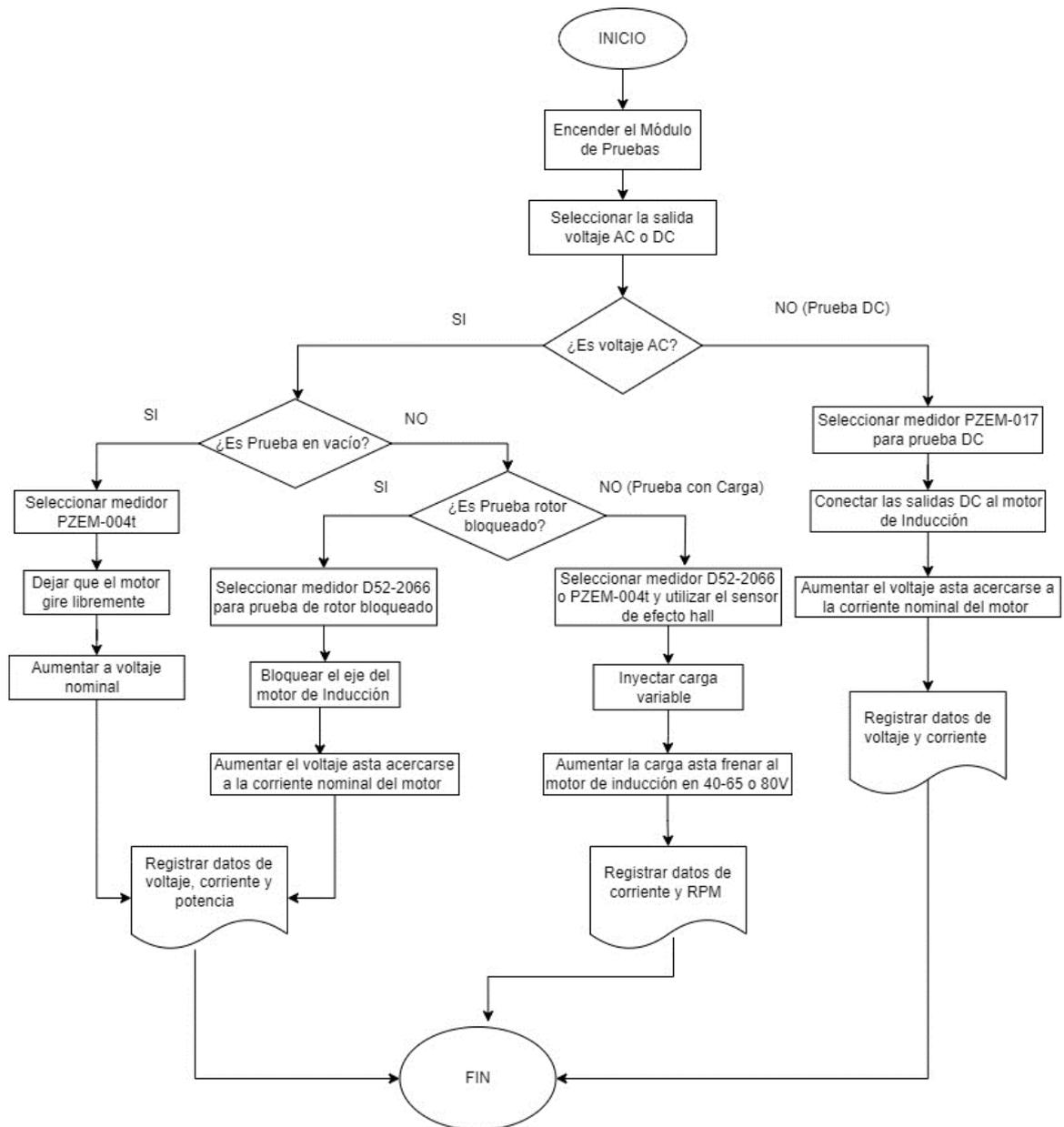


Figura 59: Diagrama de Flujo de funcionamiento
Fuente: Autor

Tal como se ilustró en el diagrama de la Figura 59, el primer paso consistió en encender el módulo de pruebas. Tras ello, se procedió a seleccionar y verificar el tipo de voltaje de salida, ya fuera en alterna o directa, si el voltaje seleccionado es en corriente directa se procederá a seleccionar el medidor PZEM-17 y a realizar la prueba en DC, caso contrario si el voltaje es AC se utilizó una condición para verificar el tipo de prueba a realizarse ya sea en vacío con el medidor PZEM-004t o en rotor bloqueado con el medidor D52-2066, o al no ser ninguna de estas dos opciones se procede con la prueba con carga en la cual se puede utilizar cualquiera de los dos medidores junto un sensor de efecto hall para el registro de las revoluciones por minuto del motor de inducción. Finalmente, se registran los valores medidos en cada prueba.

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE MÉTODOS

El capítulo tres se dedicó a la implementación del módulo de pruebas y a la toma de datos para el cálculo de los parámetros. Este proceso se llevó a cabo empleando todos los materiales y siguiendo el diseño del esquema y conexiones del módulo detallado en el capítulo previo, en los cuales se encontraron incluidos todos los componentes, además se aplicaron las ecuaciones matemáticas previamente detalladas, que simplificaron el proceso de obtención de los parámetros específicos para cada método, basándose en los datos recopilados durante estas pruebas.

En última instancia, se efectuó una comparación de los resultados de los parámetros que se consiguieron tanto a partir de los datos de las simulaciones de las pruebas, como de los datos conseguidos en cada una de las pruebas físicas realizadas. Estas pruebas englobaron los métodos de Suhr y el Clásico, que abarcan la prueba en vacío, el rotor bloqueado y corriente continua, además de una prueba extra la cual es la prueba con carga para la obtención de la curva característica del motor de inducción.

3.1. Construcción del módulo de pruebas

La construcción del módulo de pruebas está constituida por una parte de medidores donde se incluyeron sensores de medición AC, DC y de velocidad en RPM, un sistema de protección para el circuito de alimentación que consta de un breaker y un fusible, un sistema de salida de voltaje DC o AC y una carga variable constituida por resistencias y además de un freno mecánico.

3.1.1. Programación e implementación de los módulos de medición

La programación e implementación de los medidores se efectuó utilizando el software Arduino. En este entorno, se desarrollaron satisfactoriamente las líneas de código para el PZEM-004T, encargado de medir la corriente alterna, y el PZEM-017, responsable de las mediciones en corriente continua. Paralelamente, se incorporó un sensor de Efecto Hall con el objetivo de llevar a cabo una prueba adicional con carga, permitiendo así registrar las revoluciones por minuto del motor de inducción monofásico. Cabe destacar que todas estas operaciones se llevaron a cabo empleando placas de Arduino Mega.

3.1.1.1. Medidor de corriente alterna

En el desarrollo del proyecto, el medidor PZEM-004T fue seleccionado para efectuar las mediciones en corriente alterna (AC). La conexión de este dispositivo se realizó siguiendo las directrices establecidas por defecto de la Figura 49. Se emplearon cuatro cables jumper de tipo macho-hembra para enlazar el medidor tanto a la alimentación como a la transmisión de datos. Estos, a su vez, se vincularon con la placa Arduino en los pines digitales 8 y 9, como se pudo evidenciar en la Figura 60. Una vez establecida dicha conexión, se procedió a la programación del Arduino. Para ello, se hizo uso de una biblioteca proporcionada por el fabricante, cuyos detalles se encuentran en el Anexo 1. Este procedimiento facilitó la recolección de datos pertinentes al voltaje, corriente y potencia durante las pruebas en vacío.

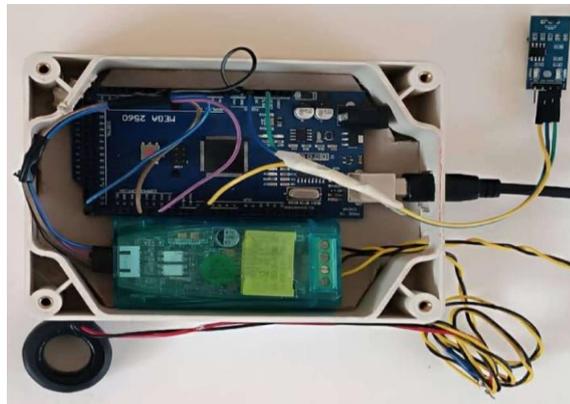


Figura 60: Módulo del Medición de corriente alterna y sensor de Efecto Hall
Fuente: Autor

El medidor de corriente alterna resultó ser esencial para el desarrollo del proyecto. Este dispositivo facilitó la obtención de valores cruciales de corriente, potencia y voltaje, los cuales fueron necesarios para determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción.

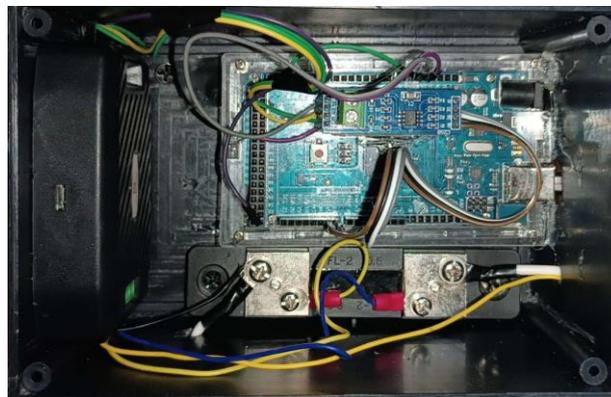
Al medidor de corriente alterna adicionalmente se agregó el sensor de Efecto Hall necesario para la medida de velocidad de los rpm del motor de inducción en la prueba con carga, ya que este dispositivo semiconductor, se seleccionó por su habilidad de detectar variaciones en el campo magnético y generar una señal eléctrica proporcional a estas variaciones. Este fenómeno se fundamenta en el reconocido efecto Hall, que ocurre cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor expuesto a un campo magnético perpendicular.

3.1.1.2. Medidor de corriente continua

El módulo PZEM-017 se seleccionó para las mediciones en corriente continua. Este dispositivo, especializado en medición de energía, proporcionó información decisiva sobre

tensión, corriente, potencia y energía consumida. Su incorporación en el módulo de pruebas se centró en las evaluaciones vinculadas a la corriente continua.

La configuración adoptada para este medidor involucró el uso del módulo de comunicación RS485, que facilitó la comunicación entre la placa Arduino y el computador. Este módulo transformó la señal del medidor en una lógica TTL (Transistor-Transistor Logic), compatible con Arduino, optimizando así la lectura y el procesamiento de datos. Esta integración garantizó mediciones precisas y fidedignas del voltaje, potencia y corriente continua circulante en el circuito durante la ejecución de las pruebas. Los datos recolectados fueron presentados y analizados en la computadora, proporcionando el monitoreo y control esencial para el óptimo desempeño del sistema. La conexión que se implementó entre el medidor y el RS485 se detalla en la Figura 61.



*Figura 61: Medidor de medición de corriente continua
Fuente: Autor*

Como se evidenció en la Figura 61, la configuración se llevó a cabo siguiendo el modelo presentado en la Figura 53. Una vez finalizada la conexión de este dispositivo, se avanzó con la configuración del código para su operación, detallado en el Anexo 2.

3.1.2. Implementación de las salidas de alimentación del módulo

En la ejecución del módulo de pruebas, las salidas de alimentación de tensión jugaron un papel fundamental en la operación del motor de inducción monofásico durante sus respectivos ensayos. En primera instancia se procedió a establecer la conexión del puente rectificador junto al capacitor, tal como se muestra en la Figura 62. Esta configuración tuvo como principal objetivo convertir la señal de la corriente alterna en corriente continua dentro del módulo. La integración del capacitor tuvo el propósito de suavizar la señal de la corriente continua, optimizando así la eficacia de la corriente suministrada.

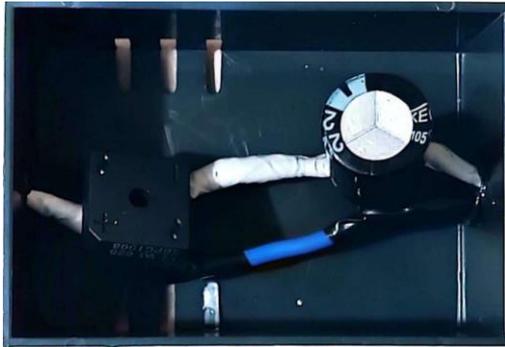


Figura 62: Transformador de Corriente alterna a continua
Fuente: Autor

Después de haber completado la conexión para la conversión de corriente alterna (CA) a corriente continua (DC), como se muestra en la Figura 62, se procedió a la configuración integral de las salidas de alimentación, abarcando tanto la corriente alterna como la corriente continua. Esta configuración siguió el esquema establecido en el diagrama unifilar de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y el diseño del esquema final.

El circuito de alimentación constó de un disyuntor termomagnético y un fusible de 16 amperios, que garantizaban la seguridad y protección del sistema. A continuación, se incluyó un variador de voltaje con capacidad de ajuste en un rango de 0-130 voltios, lo que permitía adaptar el voltaje según los requisitos específicos de cada prueba. Además, se incorporó un selector de tres posiciones en el circuito: la posición central representaba el apagado, la posición a la izquierda correspondía a la selección de corriente continua, y la posición a la derecha se utilizaba para corriente alterna. También se empleó un regulador de voltaje DC UM-715 para la alimentación del campo del generador. Esta configuración detallada se pudo apreciar en la Figura 63.



Figura 63: Conexión de las salidas de alimentación
Fuente: Autor

Después de finalizar las conexiones para las salidas de alimentación del módulo destinado al motor de inducción y tras asegurar que tanto las conexiones como la programación de los medidores estuvieran adecuadas, se procedió a ubicar todos estos componentes en el gabinete eléctrico.

3.1.3. Implementación de la carga variable

La implementación de la carga variable para la obtención y el análisis de la curva característica del motor de inducción monofásico se la realizo mediante un freno mecánico de disco y resistencias en paralelo de 2 Homs 10 Watts como se lo represento en la Figura 64.

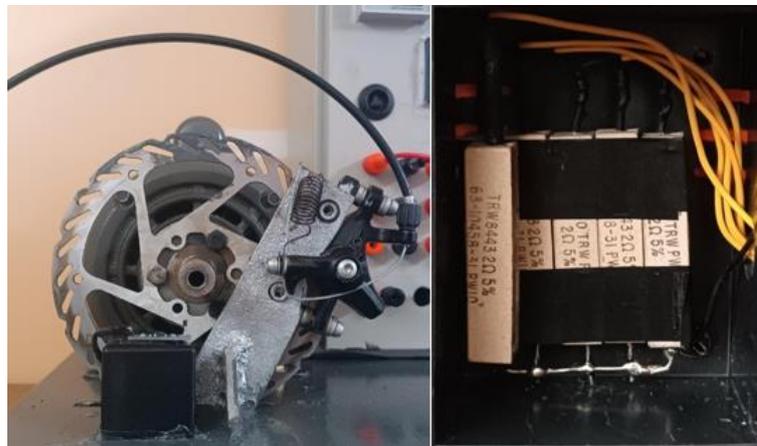


Figura 64: implementación de la carga variable
Fuente: Autor

Los datos obtenidos mediante la conexión de 6 resistencias en paralelo a las cuales se las debe de conectar a la salida de los terminales del motor generador y al ir activando una por una dan como resultados los siguientes:

- Para 1 resistencias: $R_{total} = 2 \text{ ohms } (\Omega)$ y $P_{total} = 10 \text{ vatios } (W)$
- Para 2 resistencias en paralelo: $R_{total} = 1 \text{ ohms } (\Omega)$ y $P_{total} = 20 \text{ vatios } (W)$
- Para 3 resistencias en paralelo: $R_{total} = 0.6 \text{ ohms } (\Omega)$ y $P_{total} = 30 \text{ vatios } (W)$
- Para 4 resistencias en paralelo: $R_{total} = 0.5 \text{ ohms } (\Omega)$ y $P_{total} = 40 \text{ vatios } (W)$
- Para 5 resistencias en paralelo: $R_{total} = 0.4 \text{ ohms } (\Omega)$ y $P_{total} = 50 \text{ vatios } (W)$

Para aumentar más carga y el voltaje de alimentación del motor de inducción se acoplo un freno mecánico de disco de bicicleta al eje del motor como en la Figura 64.

3.1.4. Implementación completa del Módulo

La implementación completa del módulo se la realizó luego de completar todas las etapas de construcción y programación de los sistemas de medición, protección, salidas de voltaje e implementación de carga como se lo observó en la Figura 65.



*Figura 65: implementación completa del módulo
Fuente: Autor*

La Figura 65 del módulo de pruebas completo además muestra la incorporación del freno, generador acoplado al motor de inducción y una pantalla o monitor en la parte superior del gabinete para la lectura de los datos de las evaluaciones.

3.2. Análisis de métodos para la obtención de parámetros.

El análisis de métodos para la adquisición de parámetros eléctricos del motor de inducción monofásico involucró la realización de pruebas experimentales en el módulo, así como la aplicación de modelos matemáticos que contribuyeron a la obtención de los parámetros del circuito equivalente del motor.

3.2.1. Toma de datos del módulo de pruebas

La toma de datos del módulo se llevó a cabo mediante la ejecución de las diversas pruebas vinculadas a cada uno de los métodos. Estas se realizaron mediante el uso de medidores especializados para la recolección de datos, ya sea de corriente alterna (AC) o corriente continua (DC).

3.2.1.1. Datos de prueba de corriente directa

Los valores obtenidos mediante la prueba de corriente continua con el medidor PZEM-017 se presentaron en la pantalla del computador, tal y como se evidencia en la Figura 66. En dicha representación visual, se destacaron mediciones como el voltaje y la corriente que se consideraron esenciales para esta prueba.

```
7.6 V  8.280 A  62.6 W  5 Wh
7.6 V  8.380 A  63.7 W  5 Wh
7.6 V  8.350 A  63.4 W  5 Wh
7.6 V  8.340 A  63.3 W  5 Wh
7.6 V  8.320 A  62.9 W  5 Wh
7.6 V  8.310 A  62.8 W  5 Wh
```

Figura 66: Medidas de la prueba en corriente directa
Fuente: Autor

A partir de la información recolectada en la prueba de corriente continua (DC), se eligieron cinco valores representativos. Estos fueron utilizados para determinar un valor promedio tanto de la corriente como de voltaje como se muestra de manera más detallada en la Tabla 2.

Tabla 2
Medidas de la Prueba CD

Medida #	Voltaje (V)	Corriente (A)
1	7,6	8,28
2	7,6	8,38
3	7,6	8,35
4	7,6	8,34
5	7,6	8,32
Promedio	7,6	8,334

Nota. Fuente: Autor

El objetivo principal de calcular un valor promedio a partir de estos datos fue obtener una estimación más precisa y confiable. Dicho valor promedio se destinó posteriormente al cálculo de parámetros asociados a la prueba en corriente continua, la cual abarca parte del método clásico.

3.2.1.2. Datos de prueba de rotor bloqueado

Los datos de la prueba de rotor bloqueado se realizó inmovilizando el rotor con el freno mecánico y alimentado con voltaje AC hasta acercarse a la corriente nominal. Durante esta prueba, se buscó obtener los valores clave como el voltaje, corriente y potencia de entrada

del motor de inducción monofásico, para lograr tal propósito, se empleó el medidor de energía D52-2066 de la Figura 67.



Figura 67: Pieza y medidas de la prueba en rotor bloqueado
Fuente: Autor

De manera similar al procedimiento efectuado en la prueba previa, se recopilaron cinco registros de datos del medidor D52-2066, abarcando datos como voltaje, corriente y potencia. Dicha información se presenta en la Tabla 3, en la cual se incluyen, además, los valores promedio correspondientes a cada parámetro.

Tabla 3
Datos de medidas de la Prueba en Rotor Bloqueado

Medida #	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	32	7,62	187,1
2	32	8,32	231,2
3	32	8,32	231,1
4	31,9	8,31	230,05
5	31,8	8,3	229,9
Promedio	31,94	8,314	230,71

Nota. Fuente: Autor

Siguiendo la misma metodología empleada en el procedimiento anterior, se procedió a calcular los valores promedio de las cinco mediciones recogidas para cada uno de los datos. Esto con la finalidad de asegurar una mayor precisión en los resultados obtenidos. Los valores promedio obtenidos de este proceso desempeñaron un papel fundamental en la siguiente fase del estudio, siendo utilizados en el cálculo de los parámetros de la prueba en rotor bloqueado.

3.2.1.3. Datos de prueba en vacío

Los valores de la prueba en vacío se los obtuvieron mediante el proceso de dejar que el motor gire libremente sin ejercer ningún trabajo y alimentando con un voltaje nominal de 120 voltios AC. Para este proceso, se utilizó el medidor PZEM-004T, programado con Arduino, Al

igual que en la prueba anterior, se tomaron datos como el voltaje, la corriente y la potencia del motor como se logra observar en la Figura 68.

```

Custom Address:1
Voltage: 117.20V
Current: 7.41A
Power: 174.60W
Energy: 0.061kWh
Frequency: 60.0Hz
PF: 0.20

Custom Address:1
Voltage: 117.20V
Current: 7.43A
Power: 174.80W
Energy: 0.061kWh
Frequency: 60.0Hz
PF: 0.20

```

Figura 68: Medidas de la prueba en vacío
Fuente: Autor

De igual manera a los dos procedimientos anteriores, se tomaron cinco medidas posibles para voltaje, corriente y potencia, las cuales posteriormente fueron registradas en la Tabla 4, donde se procedió a calcular su promedio.

Tabla 4
Datos de medidas de la Prueba en Vacío

Medida #	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	117,20	7,41	174,60
2	117,20	7,43	174,80
3	117,40	7,42	174,90
4	117,50	7,43	177,40
5	117,30	7,42	178,00
Promedio	117,32	7,422	175,94

Nota. Fuente: Autor

Los valores promedio obtenidos de las mediciones de voltaje, corriente y potencia durante la prueba en vacío jugaron un papel esencial en este estudio. Estos valores fueron utilizados para calcular los parámetros del circuito equivalente, que es crucial para entender el comportamiento del motor. Estos cálculos se realizaron aplicando dos diferentes métodos.

3.2.2. Cálculos mediante datos del módulo

El cálculo de los parámetros se realizó con la finalidad de obtener los datos del circuito equivalente del motor de inducción monofásico, tales como las resistencias y reactancias tanto del estator como del rotor. Además, se buscaba encontrar la resistencia y reactancia magnética. Para lograr esto, se aplicaron los métodos de cálculo Clásico y Suhr, para esto se

utilizaron los valores promedio de cada una de las pruebas realizadas. El empleo de estos valores promedio tuvo el objetivo de obtener una estimación más precisa en los datos.

3.2.2.1. Método Clásico

El método clásico, una estrategia ampliamente aceptada en este tipo de análisis, se basa en los datos obtenidos de las tres pruebas realizadas. Su objetivo principal es identificar y calcular los parámetros que definen el circuito equivalente del motor de inducción monofásico. Para simplificar este proceso, se utiliza una variante específica del circuito equivalente principal para cada prueba individual. Estas variantes permiten segmentar el análisis y facilitan la determinación de los parámetros de manera organizada y sistemática. Como se detalla en los procedimientos a continuación, este enfoque segmentado proporciona una ruta clara y eficiente para obtener los parámetros del circuito.

3.2.2.1.1. Parámetros de prueba en corriente continua

Los datos de la prueba de corriente continua se utilizaron para determinar la resistencia del devanado principal o del estator (R_1). Los datos empleados fueron los de las mediciones promedio presentadas en la Tabla 2, los cuales están representados en la Tabla 5 que se muestra a continuación:

Tabla 5
Datos de prueba DC

Voltaje V_{CD} (V)	Corriente I_{CD} (A)
7,6	8,334

Nota. Fuente: Autor

Con los datos obtenidos de la Tabla 6 se aplicó la ecuación (15), a través de la cual se obtuvo el resultado correspondiente al parámetro de la prueba CD.

Respuesta:

$$R_1 = \frac{7,6 V}{8,334 A} * 1,15 = 1.0487 \Omega$$

3.2.2.1.2. Parámetros de prueba en rotor bloqueado

Para determinar los parámetros de la prueba de rotor bloqueado, se recurrió a los valores promedio derivados de las mediciones que se encuentran en la Tabla 3. Estos datos

proporcionaron la información esencial requerida para resolver el circuito equivalente de la Figura 69 correspondiente a esta prueba.

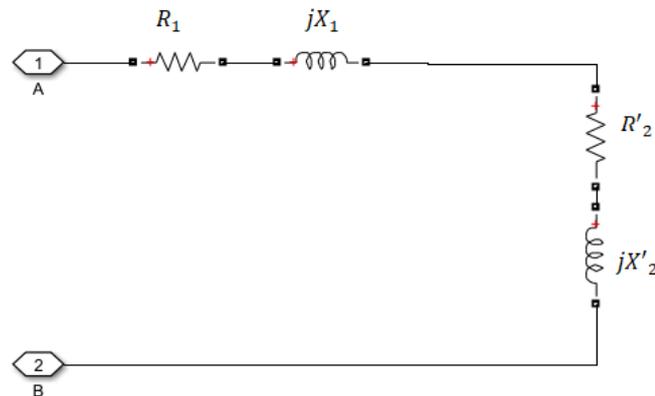


Figura 69: Circuito reducido de la prueba de rotor bloqueado
Fuente: Autor

Los datos empleados para determinar los parámetros del circuito equivalente por medio de cálculos de ecuaciones están presentados en la Tabla 6. En dicha tabla se encuentran registrados los valores de voltaje, corriente y potencia de entrada del motor.

Tabla 6
Datos de prueba Rotor Bloqueado

Voltaje V_{BL} (V)	Corriente I_{BL} (A)	Corriente P_{BL} (W)
31,94	8,314	230,71

Nota. Fuente: Autor

Basándose en los datos de la Tabla 6 y del circuito equivalente de la Figura 69 se buscó calcular la resistencia del rotor (R'_2) y las reactancias del estator y rotor (X_1 , X'_2) aplicando las ecuaciones de la (16) a la (19).

Mediante la aplicación de la ecuación (16), se obtiene la resistencia del rotor.

Respuesta:

$$R'_2 = \frac{230,71 \text{ W}}{(8,314)^2 \text{ A}} - 1,0487 = \mathbf{2,2889 \Omega}$$

La inductancia equivalente se obtuvo a partir de los datos de voltaje y corriente. Estos datos fueron útiles para calcular la reactancia equivalente, a partir de la cual se pudieron obtener la reactancia del estator y del rotor. Para realizar estos cálculos, se emplearon las ecuaciones (17), (18) y (19).

Respuestas:

$$|Z_{eq}| = \frac{31,94 \text{ W}}{8,314 \text{ A}} = \mathbf{3,8417 \Omega}$$

$$X_{eq} = \sqrt{(3,8417)^2 - (1,0487 + 2,2889)^2} = \mathbf{1,9023 \Omega}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{1,9023 \Omega}{2} = \mathbf{0,9511 \Omega}$$

La obtención de estos parámetros a partir de la prueba de rotor bloqueado y de la prueba anterior proporcionó datos valiosos para determinar los parámetros restantes del circuito equivalente.

3.2.2.1.3. Parámetros con la prueba en vacío

La determinación de los parámetros correspondientes a la reactancia (X_m) y resistencia (R_m) magnética se llevó a cabo empleando los valores promedio derivados de las mediciones obtenidas en la prueba en vacío. Estos datos, que se representan en la Tabla 7, contribuyeron significativamente al hallazgo de parámetros adicionales. Entre estos parámetros se incluyen la pérdida de potencia, el voltaje inducido y la corriente magnética. El proceso empleado para estos cálculos se detalla en las secciones subsiguientes.

Tabla 7
Datos de prueba en Vacío

Voltaje V_{NL} (V)	Corriente I_{NL} (A)	Corriente P_{NL} (W)
117,32	7,422	175,94

Nota. Fuente: Autor

Para la determinación de los parámetros previamente mencionados, se emplearon las ecuaciones desde la (20) hasta la (26) Asimismo, para estos cálculos, se tomó como referencia el circuito equivalente que se presenta en la Figura 15.

Respuestas:

$$P_{core+mech} = 175,94 \text{ W} - (7,422 \text{ A})^2 * \left(1,0487 \Omega + \frac{2,2889 \Omega}{4}\right) = \mathbf{86,6495 \text{ W}}$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{175,94 \text{ W}}{117,32 \text{ V} * 7,422 \text{ A}} \right) = \mathbf{78,3427^\circ}$$

$$I'_{NL} = 7,422 e^{-j78,3427} = 7,422 \angle -78,3427^\circ = \mathbf{1,4996 - j7,2689}$$

$$E'_F = 117,32 - (1,4996 - j7,2689) \left[\left(1,0487 + \frac{2,2889}{4}\right) + j \left(0,9511 + \frac{0,9511}{2}\right) \right]$$

$$E'_F = 104,9629 \angle 5,2711^\circ$$

$$R_m = 2 * \frac{(104,9629)^2 V}{86,6495 W} = 254,2936 \Omega$$

$$I_{Rm} = 2 * \frac{104,9629 V}{254,2936 \Omega} = 0,8255 \Omega$$

$$I_m = \sqrt{(7,422)^2 - (0,8255)^2} = 7,3760 A$$

$$X_m = 2 * \frac{104,9629}{7,3760} = 28,4606 \Omega$$

3.2.2.2. Método Suhr

En el método Suhr, no fue necesario realizar el cálculo de la tensión inductiva. Dicho que este método se basó primeramente en la aplicación de la ecuación (27), cuyo objetivo principal residía en la determinación de la reactancia magnética.

$$X_Q + X_0 = X_1 + X_m$$

La reactancia X_1 se determinó realizando la prueba de rotor bloqueado, de manera similar a como se lleva a cabo en el método clásico, a partir de la cual se obtuvo el valor de:

$$X_1 = 0,9600 \Omega$$

Mientras que para determinar X_0 y X_Q se llevó a cabo la prueba en vacío. De acuerdo con los datos obtenidos, presentados en la Tabla 7, se pudo calcular la potencia reactiva empleando la ecuación (28).

$$Q_0 = \sqrt{(117,32 * 7,422)^2 - (175,94)^2} = 852,7889 VAR$$

Al aplicar la ecuación (29), se obtuvieron los valores correspondientes a las reactancias.

$$X_0 = X_Q = \frac{852,789}{(7,422)^2} = 15,4810 \Omega$$

Una vez obtenidos estos valores, se procedió a despejar X_m de la ecuación (27), lo que condujo a obtener el siguiente resultado para la reactancia magnética:

$$X_m = 15,4810 + 15,4810 - 0,9600 = 30,002 \Omega$$

3.2.3. Cálculos mediante datos de las simulaciones

Para los cálculos basados en las simulaciones para la verificación de los parámetros, se emplearon los valores obtenidos de voltaje, corriente y potencia para las pruebas en rotor bloqueado y en vacío, mientras que, para la prueba de corriente continua, se utilizaron los valores de corriente y voltaje provenientes de las simulaciones realizadas anteriormente, tal como se presentaron en el Capítulo 2.

3.2.3.1. Método Clásico

El método clásico con los datos de simulación se sigue el mismo procedimiento anterior en el cual se utilizaron los datos de medidas del módulo, de igual manera trata de encontrar los parámetros del circuito equivalente de cada una de las simulaciones de cada prueba, las cuales se presentan a continuación:

3.2.3.1.1. Parámetros con simulación de prueba en corriente continua

Los valores obtenidos de la simulación de corriente continua de la Figura 14 del capítulo 2 se los presenta en la Tabla 8.

Tabla 8

Datos de la Simulación de prueba DC Simulación

Voltaje V_{CD} (V)	Corriente I_{CD} (A)
7,6 V	8,3 A

Nota. Fuente: Autor

Como se sabe este método se utiliza para la obtención de la resistencia del estator aplicando la ecuación (15).

Respuesta:

$$R_1 = \frac{7,6 V}{8,3 A} * 1,15 = 1,0530 \Omega$$

3.2.3.1.2. **Parámetros con simulación de prueba en rotor**

bloqueo

Los datos obtenidos luego de realizar la simulación de la prueba en rotor bloqueado de la Figura 18 son los de la Tabla 9 siguiente.

Tabla 9
Datos de la Simulación de prueba Rotor Bloqueado

Voltaje V_{BL} (V)	Corriente I_{BL} (A)	Corriente P_{BL} (W)
31,83 V	8,358 A	230 W

Nota. Fuente: Autor

Para la solución de los parámetros del circuito equivalente de la Figura 17 o representado de manera simplificada en la Figura 69 se utiliza las ecuaciones de la (16) a la (19).

Respuestas:

$$R'_2 = \frac{230 W}{(8,358 A)^2} - 1,0530 = \mathbf{2,2389 \Omega}$$

$$|Z_{eq}| = \frac{31,83 W}{8,358 A} = \mathbf{3,8083 \Omega}$$

$$X_{eq} = \sqrt{(3,8083 \Omega)^2 - (1,0530 \Omega + 2,2389)} = \mathbf{1,9148 \Omega}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{1,9148 \Omega}{2} = \mathbf{0,9574 \Omega}$$

3.2.3.1.3. **Parámetros con simulación prueba en vacío**

Para esta prueba con los datos de simulación de la Tabla 10 se debe de seguir el mismo procedimiento y ecuaciones utilizadas (20) a la (26) con los datos del módulo de pruebas.

Tabla 10
Datos de la simulación de prueba en Vacío

Voltaje V_{NL} (V)	Corriente I_{NL} (A)	Corriente P_{NL} (W)
119,7	7,432	184

Nota. Fuente: Autor

Respuestas:

$$P_{core+mech} = 184 \text{ W} - (7,432 \text{ A})^2 * \left(1,0530 \Omega + \frac{2,2389 \Omega}{4} \right) = \mathbf{94,9217 \text{ W}}$$

$$\Phi = \cos^{-1} \left(\frac{184 \text{ W}}{119,7 \text{ V} * 7,432 \text{ A}} \right) = \mathbf{78,0632^\circ}$$

$$I'_{NL} = 7,432 e^{-j78,0632} = 7,432 \angle -78,0632^\circ = \mathbf{1,5371 - j7,2712}$$

$$E'_F = 119,7 - (1,5371 - j7,2712) \left[\left(1,0530 + \frac{2,2389}{4} \right) + j \left(0,9574 + \frac{0,9574}{2} \right) \right]$$

$$E'_F = \mathbf{106,2023 \angle 5,0942^\circ}$$

$$R_m = 2 * \frac{(106,2023)^2 \text{ V}}{94,9217 \text{ W}} = \mathbf{237,6469 \Omega}$$

$$I_{Rm} = 2 * \frac{106,2023 \text{ V}}{237,6469 \Omega} = \mathbf{0,8937 \Omega}$$

$$I_m = \sqrt{(7,432)^2 - (0,8937)^2} = \mathbf{7,3780 \text{ A}}$$

$$X_m = 2 * \frac{106,2023}{7,3780} = \mathbf{28,7889 \Omega}$$

3.2.3.2. Método Suhr

El método Suhr como se menciona ya anteriormente este método es utilizado para encontrar la reactancia magnética en la cual se utiliza las ecuaciones de las (27) a la (29).

$$X_Q + X_0 = X_1 + X_m$$

De la prueba en vacío de la simulación se obtiene que:

$$X_1 = \mathbf{0,9568 \Omega}$$

Con los datos de la simulación en vacío de la Tabla 10 se obtiene la potencia reactiva

$$Q_0 = \sqrt{(119,7 * 7.432)^2 - (184)^2} = \mathbf{870,3738 VAR}$$

Y posteriormente se calcula las siguientes reactancias

$$X_0 = X_Q = \frac{870,3738}{(7,432)^2} = \mathbf{15,7577 \Omega}$$

Con todos estos valores se despeja X_m para encontrar el valor de la reactancia magnetizante.

$$X_m = 15,7577 + 15,7577 - 0,9568 = \mathbf{30,5586 \Omega}$$

3.2.4. Prueba con carga

La prueba con carga para el motor de inducción monofásico se la empleo con el propósito de determinar la operatividad y eficiencia del motor cuando se encuentra alimentado con un voltaje específico bajo una carga determinada. El propósito es evaluar su rendimiento y comportamiento en condiciones reales de trabajo o simulaciones que emulan escenarios prácticos, a diferencia de las pruebas sin carga en las cuales el motor está en marcha, pero sin realizar ningún trabajo mecánico.

Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizó un freno mecánico y un motor universal, que actuó como generador. Para ello, se conectaron los ejes de ambos motores mediante un acoplamiento apropiado (torno). El movimiento rotacional generado por el motor de inducción, en combinación con la excitación del campo del motor universal alimentado con corriente continua, permitió que el voltaje inducido en el rotor o armadura se midiera en sus terminales.

Los datos que se obtuvieron mediante el uso del motor universal como generador excitándolo con un voltaje de corriente continua al campo de 20 voltios (V) fueron de 14.87 voltios (V) y una corriente de 2.43 amperios (A), obteniendo como resultado una potencia de 36.13 vatios (W).

El freno mecánico sirvió para aumentar la carga al motor de inducción monofásico mientras trabaja con voltajes de un rango de 65 a 80 voltios.

3.2.4.1. Parámetros de la prueba con resistencias

La realización de la prueba con carga primeramente se la puso en marcha aplicando las diferentes cargas que ofrecieron las resistencias, y alimentado al motor de inducción a 39 voltios, donde los valores obtenidos en la Figura 70 corresponde a la corriente de entrada y a las revoluciones por minuto (rpm).

	A	B	C	D	E
1	Voltaje	Voltaje De Campo	Resistencias	Corriente	RPM
2	39	0	0	2,83	1770
3	39	20	1	2,85	1740
4	39	20	1	2,88	1710
5	39	20	1	2,9	1680
6	39	20	1	3	1670
7	39	20	2	3,15	1650
8	39	20	2	3,4	1600
9	39	20	2	3,5	1590
10	39	20	2	3,9	1530
11	39	20	3	4,1	1500
12	39	20	3	4,6	1450
13	39	20	4	5,3	1320
14	39	20	4	5,75	1140
15	39	20	5	5,8	1080
16	39	20	5	5,95	900

Figura 70: Datos de la prueba con carga con resistencias en Excel
Fuente: Autor

Con los valores de la Figura 70, se calcularon datos adicionales. Estos resultaron ser necesarios para determinar el par del motor de inducción monofásico. Durante este proceso, las revoluciones por minuto (RPM) fueron transformadas a velocidad angular con la ecuación (38), también se obtuvo el deslizamiento utilizando la ecuación (32) tal como se evidencia en la tabla de la Figura 71.

	F	G
1	Velocidad Ang. (w)	Deslizamiento (s)
2	185,3540	0,0167
3	182,2124	0,0333
4	179,0708	0,0500
5	175,9292	0,0667
6	174,8820	0,0722
7	172,7876	0,0833
8	167,5516	0,1111
9	166,5044	0,1167
10	160,2212	0,1500
11	157,0796	0,1667
12	151,8436	0,1944
13	138,2301	0,2667
14	119,3805	0,3667
15	113,0973	0,4000
16	94,2478	0,5000

Figura 71: Cálculo de velocidad angular y deslizamiento en Excel
Fuente: Autor

Una vez ya con los datos de la Figura 71 y con los datos de resistencia del estator y reactancia magnética previamente obtenidos en las anteriores pruebas físicas del motor de inducción monofásico, se procedió a calcular la impedancia equivalente tanto en secuencia positiva como inversa con las ecuaciones (30) y (31) representadas en la Figura 72.

	H	I	J	K
1	R2/s	R2/2-s	Zf	Zb
2	137,3340	1,1541	5,63941798253741+27,2528519559833i	1,07897357609867+0,962680997795319i
3	68,6670	1,1638	9,96749494650205+24,1912861939791i	1,08808894897547+0,963400490856947i
4	45,7780	1,1738	12,5243275975243+20,413901454845i	1,09735940234631+0,964138472070298i
5	34,3335	1,1839	13,606920784847+16,8042680778923i	1,10678892120993+0,9648955799860i
6	31,6925	1,1873	13,7318119653457+15,7170037510618i	1,10996815050563+0,96515231401174i
7	27,4668	1,1942	13,737964920243+13,7498618417613i	1,11638162804526+0,965672480947309i
8	20,6001	1,2118	12,9409348542611+9,98423854286775i	1,13274376676497+0,967013203608518i
9	19,6191	1,2153	12,7137132562967+9,40105581384402i	1,13607381908035+0,967288475214165i
10	15,2593	1,2372	11,2580381815633+6,76122202905198i	1,15647193972933+0,968992399399916i
11	13,7334	1,2485	10,5576679510137+5,85010569597989i	1,16694767139908+0,969879341184854i
12	11,7715	1,2677	9,5006171690181+4,7227890921638i	1,18483463539568+0,971412387059184i
13	8,5834	1,3205	7,40643128600816+3,08180260915011i	1,2340080849869+0,975748020928743i
14	6,2425	1,4014	5,5932884078613+2,10748529686118i	1,30922721638227+0,982724049638806i
15	5,7223	1,4306	5,16272607386514+1,92478795636345i	1,33637534607009+0,985344101701445i
16	4,5778	1,5259	4,18513107106482+1,57174082685192i	1,42500365041367+0,994275653236225i

Figura 72: Cálculo de las impedancias directa e inversa en Excel
Fuente: Autor

Posteriormente se procede a calcular la potencia del entrehierro con las ecuaciones (34),(35) y (36) con los datos obtenidos en Figura 72 y por ende la obtención del par inducido con la ecuación (37), todo esto se aprecia en la Figura 73.

	L	M	N	O
1	PAGF	PAGB	Pag	Tind
2	22,5827673401719	4,32069573680832	18,2620716	0,098525
3	40,4804888514815	4,41900124402663	36,06148761	0,197909
4	51,9408914124528	4,55096891341062	47,3899225	0,264644
5	57,2171019002816	4,65404741368776	52,56305449	0,298774
6	61,7931538440557	4,99485667727533	56,79829717	0,324781
7	68,1574784605556	5,53864835213955	62,61883011	0,362404
8	74,7986034576291	6,54725897190153	68,25134449	0,407345
9	77,8714936948173	6,95845214186714	70,91304155	0,425893
10	85,6173803707889	8,79496910164155	76,82241127	0,479477
11	88,7371991282701	9,80819517810927	78,92900395	0,502478
12	100,516529648211	12,5355504424863	87,98097921	0,579418
13	104,023327411985	17,331643553641	86,69168386	0,627155
14	92,4640489924571	21,6431624208194	70,82088657	0,593237
15	86,8370525624117	22,4778333208989	64,35921924	0,569060
16	74,0820513716861	25,224345866885	48,8577055	0,518396

Figura 73: Cálculo del Par inducido del motor de Inducción en Excel
Fuente: Autor

Finalmente, una vez obtenidos los valores de par inducido y con los datos de revoluciones por minuto RPM, se procedió a realizar la gráfica de par-velocidad.

3.2.4.2. Gráfica par-velocidad con resistencias

La curva de par-velocidad del motor de inducción monofásico, que se mostró a continuación en la Figura 74, describió la relación entre el par (también conocido como torque) desarrollado por el motor y la velocidad del rotor. Esta curva fue esencial para comprender el comportamiento y el rendimiento del motor bajo diferentes condiciones de carga.

En el gráfico de la curva par-velocidad, que se aprecia en la Figura 74, se representaron los valores medidos de los RPM para cada carga en el eje x; en el eje y, por

su parte, se plasmaron los valores calculados del torque o par del motor de inducción monofásico.

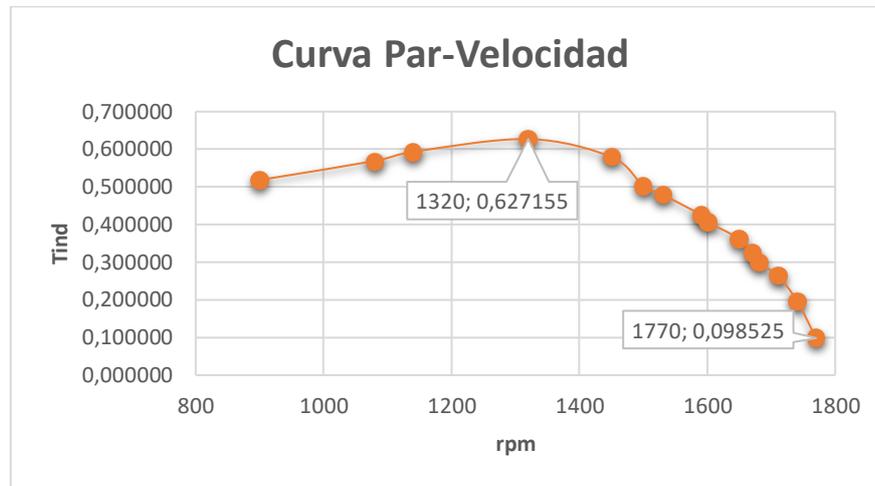


Figura 74: Gráfica de la curva par-velocidad en Excel 37V
Fuente: Autor

De la curva par-velocidad del motor de inducción monofásico operado a 38 voltios se puede observar que su velocidad de sincronismo que comienza en este caso en 1770 RPM y con un torque de 0,0988525 T , y el toque máximo para este caso es alcanzado cuando su velocidad es de 1320 RPM con un torque de 0,627155 T y teniendo un desplazamiento máximo de 0,2667.

A partir de la gráfica presentada en la Figura 74, se dedujo que la región estable se ubicaba desde el punto donde se encuentra la velocidad de sincronismo de 1770 RPM hasta justamente antes de los 1320 RPM. En dicha zona, el motor trabajaría con normalidad. Cuando el par de carga aumentara, la velocidad del motor disminuiría y viceversa. Por otro lado, la región inestable del motor de inducción se identificó a partir del punto de los 1600 RPM. En esta área, cualquier perturbación mínima podría llevar al motor a un estado de funcionamiento no deseado. Si el par de carga aumentara ligeramente, no solo la velocidad del motor disminuiría, sino que, al reducirse la velocidad, el par del motor también decrecería, lo que a su vez reducirá aún más la velocidad.

Para realizar una comprobación de la curva característica de par-velocidad se procedió a realizar una simulación en Matlab con los datos obtenidos en el método clásico y método Suhr y con las ecuaciones plateadas para esta prueba, las curvas se las apreciar en la Figura 75.

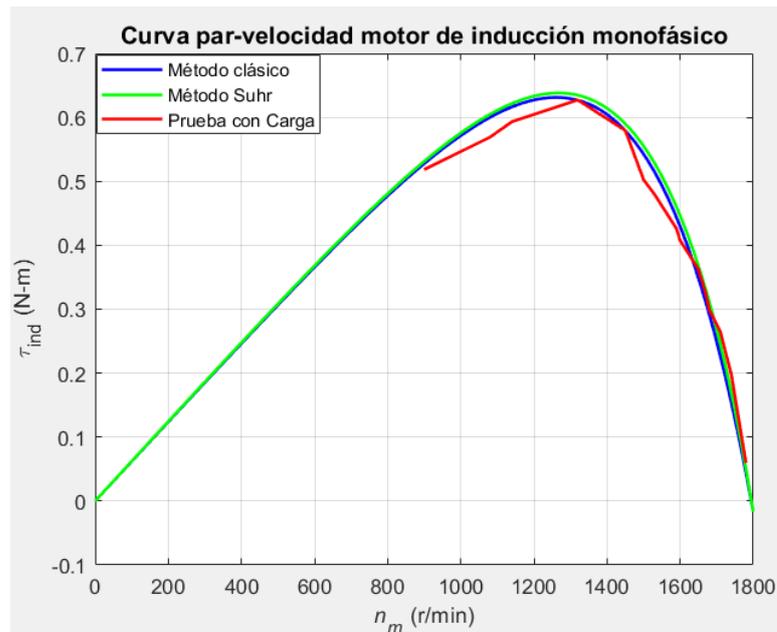


Figura 75: Gráfica de la curva par-velocidad simulada y calculada en Matlab 37V
Fuente: Autor

En la Figura 75 de curva par-velocidad del motor de inducción monofásico se pudo observar que las gráficas son exactamente casi iguales, teniendo de color azul la gráfica con el método clásico de verde el método Suhr y con rojo la gráfica con los datos calculados de la prueba con carga.

3.2.4.3. Parámetros de la prueba con freno

La prueba con carga aplicando el freno mecánico se la realizo a voltajes de alimentación al motor de inducción con 65 y 80 voltios, de los cuales los valores obtenidos son los apreciados en la Figura 76.

	A	B	C		A	B	C
1	Voltaje	Corriente	RPM	1	Voltaje	Corriente	RPM
2	65	3,45	1790	2	80	4,3	1790
3	65	4,81	1680	3	80	4,59	1770
4	65	5,2	1600	4	80	5,31	1710
5	65	7	1400	5	80	6,9	1600
6	65	7,5	1350	6	80	7,8	1540
7	65	8,3	1230	7	80	8,8	1450
8	65	8,5	1200	8	80	9,6	1400
9	65	8,8	1100	9	80	10,81	1300
10	65	9	1000	10	80	11,52	1200
11	65	9,12	920	11	80	12,33	900

Figura 76: Datos de la prueba con carga con freno en Excel
Fuente: Autor

Una vez se registró los datos de la prueba con carga realizada con el freno mecánico se procedió a realizar el mismo procedimiento anterior para la obtención del par inducido como en la Figura 77.

P		P	
1	Tind	1	Tind
2	0,028037	2	0,043553
3	0,821934	3	0,259180
4	0,952821	4	0,899633
5	1,234590	5	1,677656
6	1,311711	6	1,951713
7	1,367097	7	2,120517
8	1,383974	8	2,322036
9	1,335072	9	2,537481
10	1,278007	10	2,542114
11	1,234991	11	2,226149

Figura 77: Resultado del par inducido en Excel
Fuente: Autor

En la Figura 77 se observó los resultados del par inducido tanto para la prueba con carga alimentado con 65 voltios (parte izquierda) y 80 voltios (parte derecha), los cuales fueron necesarios para la realización de la curva para velocidad.

3.2.4.4. Gráfica par-velocidad con freno

La Gráfica par-velocidad realizada en Excel se la realizo mediante la toma de datos de las revoluciones por minuto y el cálculo del par inducido, tal y como en la Figura 78, la cual está realiza a un voltaje de alimentación de 65 voltios.

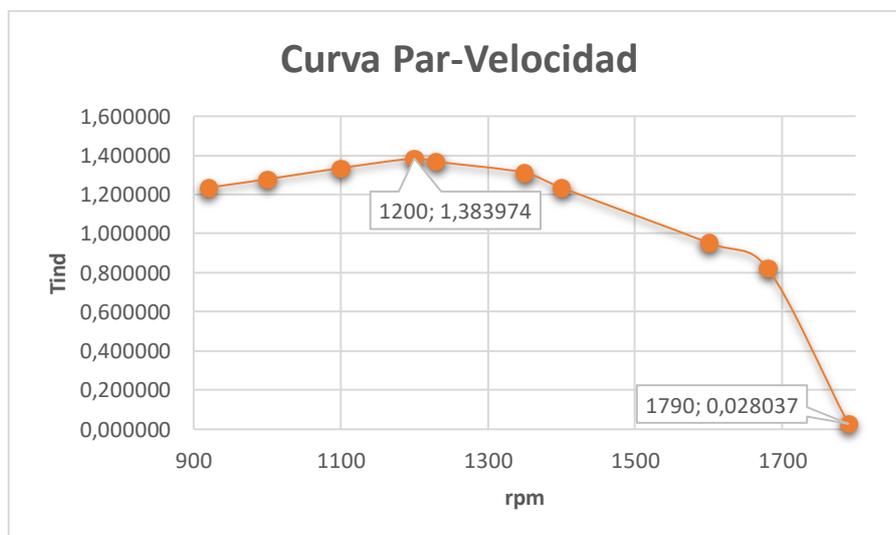


Figura 78: Gráfica de la curva par-velocidad en Excel 65V
Fuente: Autor

Al analizar la gráfica par-velocidad del motor de inducción a 65 voltios, se notó que su velocidad sincrónica inicia en 1790 RPM con un torque de 0,028037 T . El torque máximo se logra a 1200 RPM con 1,383974 T . Según la Figura 78, la zona estable del motor se sitúa desde los 1790 RPM hasta poco antes de los 1200 RPM; en esta región, el motor opera adecuadamente, y si el torque de carga aumenta, su velocidad disminuye y viceversa. Sin embargo, a partir de los 1600 RPM, el motor entra en una fase inestable donde cualquier alteración menor podría desencadenar un comportamiento indeseable del motor.

Para la comprobación de la curva se procedió con una simulación en Matlab tal y como en el proceso anterior, utilizando los datos tomados y calculados vs valores únicamente simulados.

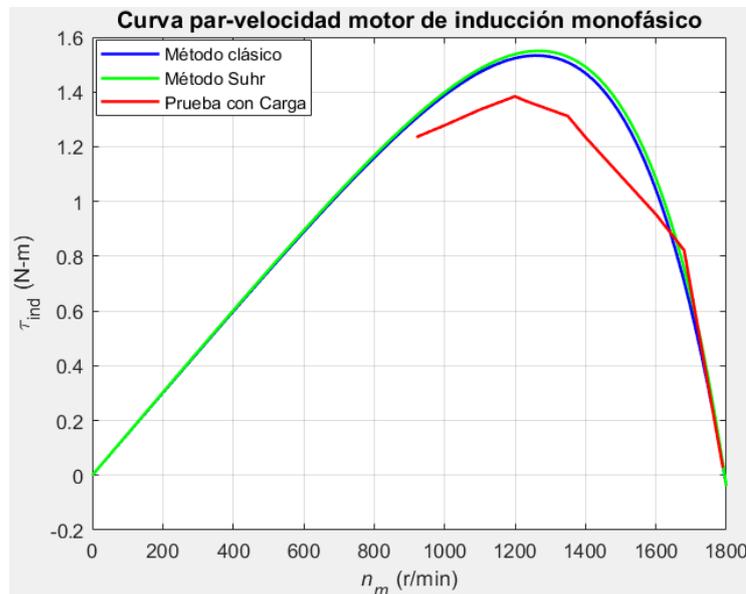


Figura 79: Gráfica de la curva par-velocidad simulada y calculada en Matlab 65V
Fuente: Autor

En la Figura 79, que muestra la curva par-velocidad del motor, se aprecia que ambas gráficas son prácticamente idénticas. La gráfica azul y verde representa los métodos clásico y Suhr, mientras que la roja refleja los datos calculados.

La curva-par velocidad de la Figura 80 con alimentación de 80 voltios siguió el mismo proceso de los dos anteriormente realizado tanto con 39 y 65 voltios.

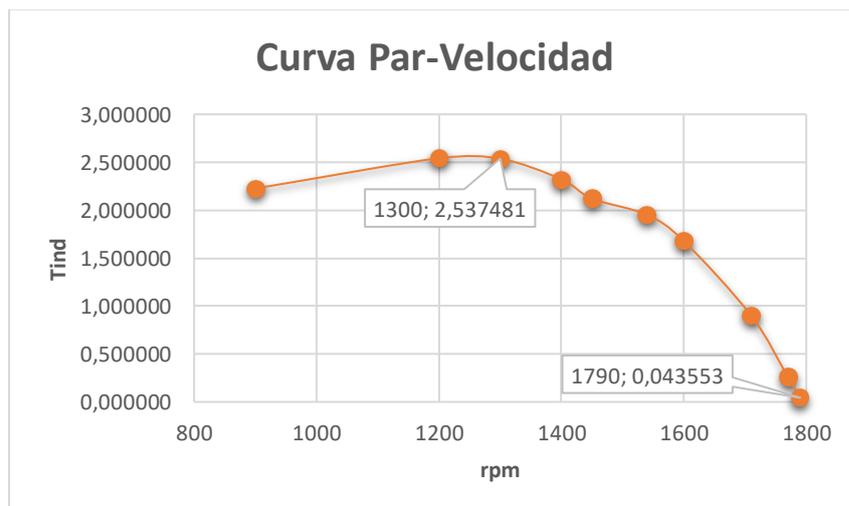


Figura 80: Gráfica de la curva par-velocidad en Excel 80V
Fuente: Autor

Luego de realizar el mismo análisis echo con anterioridad se notó que su velocidad sincrónica inicia en 1790 RPM con un torque de 0,043553 T. El torque máximo se logra

alcanzar a 1300 RPM con 2,537481 T. Mediante la Figura 80 la zona estable del motor se sitúa desde los 1790 RPM hasta poco antes de los 1200 RPM, en esta región, el motor opera adecuadamente, y si el torque de carga aumenta, su velocidad disminuye y viceversa. Sin embargo, a partir de los 1600 RPM, el motor no funcionaría correctamente.

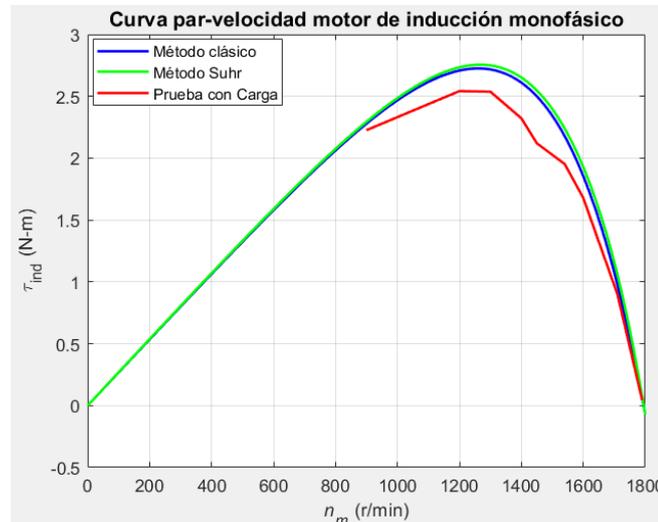


Figura 81: Gráfica de la curva par-velocidad simulada y calculada en Matlab 80V
Fuente: Autor

En la Figura 81, similar a situaciones previas, se presenta una comparación entre la simulación de la curva y la curva con datos calculados, siendo notorio que ambas líneas son casi idénticas. La línea azul y verde corresponde a los datos simulados con el método clásico y Suhr, mientras que la línea roja muestra los datos calculados.

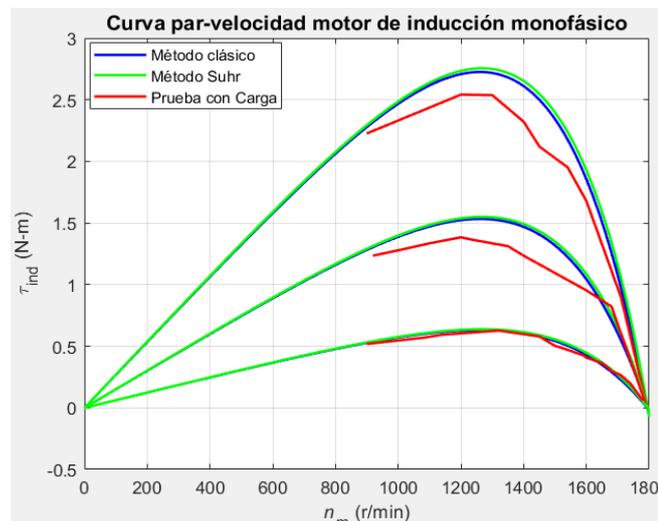


Figura 82: Gráfica de la curva par-velocidad a diferentes voltajes
Fuente: Autor

En la Figura 82 de la curva par velocidad realizada en Matlab se puede observar la simulacion de los métodos clásico y Suhr y la prueba con carga, realizada a los diferentes voltajes ya mencionados y descritos anteriormente.

3.3. Comprobación los resultados de los parámetros de los métodos Suhr y Clásico

Luego de la realización de los cálculos de los parámetros, utilizando tanto los datos de las pruebas del módulo como los de las simulaciones, se procedió a su análisis. Además, se llevó a cabo una comprobación y comparación de las respuestas obtenidas primeramente con el método clásico, tal como se ilustra en las tablas siguientes.

Tabla 11
Resultados de Corriente Directa

Resultados de datos en CD	Resistencia del Estator
Módulo de Pruebas	1,0487 Ω
Simulaciones de Prueba	1,0530 Ω

Nota. Fuente: Autor

En la Tabla 11 de los resultados de corriente Directa del método clásico tanto de las simulaciones como del módulo de pruebas se observa que los valores son similares, teniendo un porcentaje de variación de tan solo 0,41% aproximadamente.

Tabla 12
Resultados de Rotor Bloqueado

Resultados de datos en Rotor Bloqueado	Resistencia del Rotor	Reactancias del Estator y Rotor
Módulo de Pruebas	2,2889 Ω	0,9511 Ω
Simulacion de Prueba	2,2389 Ω	0,9574 Ω

Nota. Fuente: Autor

La Tabla 12 muestra las respuestas del rotor bloqueado, tanto la resistencia del rotor con una variación del 2,18% y las reactancias del estator y rotor con una variación de un 0,662%, obteniendo así valores muy cercanos y aceptables para los dos casos.

Tabla 13
Resultados en Vacío

Resultados de datos en Vacío	Resistencias Magnética	Reactancias Magnética
Módulo de Pruebas	254,2936 Ω	28,4606 Ω
Simulación de Prueba	237,6469 Ω	28,7889 Ω

Nota. Fuente: Autor

De la Tabla 13 donde se puede apreciar un 2.7786% de variación para los resultados de la resistencia y un 2.2099% para la reactancia observando así que los valores para los dos casos no varían significativamente teniendo así unos valores así casi similares.

Tabla 14
Resultados de Método Suhr

Resultados de método Suhr	Reactancia Magnética
Módulo de Pruebas	30,002 Ω
Simulaciones de Pruebas	30,5586 Ω

Nota. Fuente: Autor

En la Tabla 14, que comprende el Método de Suhr utilizado para el cálculo de las reactancias, se observó que la variación solamente es del 1,862% en los resultados.

La comparación de los resultados obtenidos en los cálculos de los parámetros se efectuó a través de tablas de resultados. Estas tablas facilitaron una visión más clara y comprensible de todos los datos resultantes referentes al circuito del motor de inducción. En las tres primeras tablas (Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13), de la prueba CD, rotor bloqueado y vacío que abarcaron el método clásico se observó pequeñas variaciones tanto de la parte del módulo de pruebas como de las simulaciones, esto se da debido a que existió variaciones en la toma de medidas, una de la principales causas por las que existen estas variaciones es porque los valores ingresados al circuito equivalente de cada prueba no pueden ser exactamente iguales a los valores reales. Estas fallas pueden llevar a pequeñas diferencias en los resultados.

Las pruebas físicas además están sujetas a condiciones ambientales, como temperatura y humedad, además de fricción y perdidas mecánicas, también pueden verse afectadas por el sobrecalentamiento de la maquina en la prueba de rotor bloqueado ya que el motor estuvo sujeto a una gran carga.

Finalmente, el Método de Suhr, también aplicado tanto a los datos de simulaciones como a los del módulo de pruebas, se utilizó con el objetivo de encontrar la reactancia magnética. En ambos casos, se obtuvieron valores muy cercanos y aceptables esto se debe a que este método está conformado por la prueba en vacío y rotor bloqueado y al igual que el anterior método también puede presentar las mismas fallas dichas anteriormente.

CONCLUSIONES

- Se optó por los métodos clásico y Suhr para analizar los parámetros en motores de inducción, dada su confiabilidad en pruebas de vacío, rotor bloqueado y corriente continua. Adicionalmente, se emplea el método FEMM, basado en elementos finitos, para simular el flujo magnético, ofreciendo una perspectiva complementaria.
- El diseño del módulo de pruebas resultó crucial para la adquisición, distribución y dimensionamiento eficiente de los equipos, medidores, sensores y demás materiales esenciales en la implementación del dispositivo. La optimización de estas decisiones se vio significativamente beneficiada por las simulaciones realizadas en Simulink.
- La implementación del módulo fue específicamente diseñada para recopilar datos de pruebas y calcular los parámetros del circuito equivalente del motor. Esto permitió un análisis detallado de factores influyentes en las respuestas del módulo y las simulaciones, validando los resultados mediante una comparación entre ambos casos.

RECOMENDACIONES

- Para futuras realizaciones de pruebas con carga, resulta crucial explorar la opción de utilizar un motor generador de menor velocidad (rpm) que se ajuste de manera significativa a los 1800 rpm del motor de inducción monofásico. Esto permitirá una comparación más precisa y efectiva de los resultados, asegurando una evaluación más adecuada de su rendimiento en condiciones de carga variadas.
- Se sugiere continuar el estudio explorando otros enfoques con el motor de inducción monofásico, considerando la variación de capacitores y realizando mediciones transitorias para comprender mejor su comportamiento. Esto ampliará la comprensión sobre el rendimiento del motor en condiciones diversas y permitirá obtener datos más detallados para un análisis exhaustivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Armanz, R., García, J., & Luis, J. M. (2016). *Métodos de control de motores de inducción: síntesis de la situación actual*. 13, 381–392.
- Bargalló, R. (2014). *Diseño de un Motor de Inducción Monofásico*. 14–15. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22836/TFG.pdf?sequence=1>
- Bianchi, I., Schwarzer, D., & Bonfim, J. A. (2013). *Accurate Analysis of a Single-phase Induction Motor for Determining its Parameters and the Self-excitation Capacitance to Operate as a Single-phase Induction Generator*. October. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1991.8487>
- Cabezas, M., & Bermejo, P. (2016). *Revista ElectroIndustria - PRUEBAS ELÉCTRICAS EN MOTORES: Pruebas en corriente alterna v/s corriente continua*. Abril 2016. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2741&ni=pruebas-electricas-en-motores-pruebas-en-corriente-alterna-v/s-corriente-continua>
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas* (B. S. Australia (ed.); Quinta Edi). 2012.
- Chen, H., & Bi, C. (2020). An effective method for determination and characteristic analysis of induction motor parameters. In *IET Electric Power Applications* (Vol. 16, Issue 5, pp. 605–615). <https://doi.org/10.1049/elp2.12180>
- Díaz, F., & Castillo. (2018). *MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO Y AutoFEM*. 44.
- García, J., Gonzáles, A., & Bosh-Tous, R. (2016). Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción. *Artículo Revista de Sistemas Experimentales* Septiembre, 3(8), 8–17. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num8/Rvista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N8_2.pdf
- Gómez, A. A., Montoya, J. A. O., & Orozco, A. R. H. (2010). Determinación de los parámetros de un motor de inducción utilizando un algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO). *Tecnura*, 14(26), 15–26.
- Hrabovcova, V., Kalamen, L., Sekerak, P., & Rafajdus, P. (2010). Determination of single phase induction motor parameters. *SPEEDAM 2010 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 1, 287–292. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545087>
- JuhaPyrhönen, V., & Semken, H. S. (2016). *Electrical Machine Drives Control*. In Wiley (Ed.), 2016 (first edit). 2016.

- MathWorks. (n.d.-a). *Simscape Electrical Documentation - MathWorks América Latina*. Retrieved March 4, 2023, from <https://la.mathworks.com/help/sps/index.html>
- MathWorks. (n.d.-b). *Simulación y diseño basado en modelos con Simulink*. Retrieved March 4, 2023, from <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>
- Mora, J. F. (2008). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS* (McGRAW-HILL (ed.); 6 edición). <https://scholar.google.com/scholar?hl=es&q=jesus+fraile+mora+maquinas&btnG=&lr=>
- Pacheco, W., & Santos, K. (2020). *Technological analysis of three-phase squirrel cage induction motor Análise*. 6, 291–303.
- Poudel, B., & Field, T. E. (2019). *Aggregate Model of Single Phase Induction Motors*. 1373–1378.
- Rincón, A. F., & Jaramillo, A. O. (2013). *Determinación De Parámetros Para El Motor De Inducción Trifásico De Jaula De Ardilla Con La Norma Ntc 5642-2008* [UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA FACULTAD DE TECNOLOGÍA]. <https://core.ac.uk/download/pdf/71397704.pdf>
- Soto, D. R. (2014). *Caracterización de motores de inducción Trifásicos En Aplicaciones De Tracción*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23255/Resum.pdf>
- Tienda Arduino. (n.d.). *Datasheet de Arduino UNO ¡2c ATmega 328*. Retrieved November 18, 2022, from https://www.kitelectronico.com/datasheet/arduino-uno_atmega328.htm
- Torre, F. de la. (2019). *Motor de Inducción Monofásico*. 0–17. [https://rehip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/16748/21506-19 ACCIONAMIENTOS ELECTROMECA%CC%81NICOS Motor de Inducci%CC%81n_monof%CC%81sico.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://rehip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/16748/21506-19_ACCIONAMIENTOS_ELECTROMECA%CC%81NICOS_Motor_de_Inducci%CC%81n_monof%CC%81sico.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Vital, M. (2021). *Introducción de Arduino*. 9(4), 4–8.
- Watkins, A. J. (2020). Power factor. *Electrical Installation Calculations: Basic*, 86–88. <https://doi.org/10.4324/9780080953953-15>

Anexo 1: Código de programación del medidor PZEM-004T y sensor de Efecto Hall

/*

Archivo de : Sensor PZEM-004T y Modulo de Efecto HALL

Mediciones de energia y RPM

*/

// Se incluye la biblioteca específica para el módulo PZEM-004T v3.0

#include <PZEM004Tv30.h>

```

// Se definen las constantes para los pines RX y TX del módulo PZEM
#if !defined(PZEM_RX_PIN) && !defined(PZEM_TX_PIN)
#define PZEM_RX_PIN 16
#define PZEM_TX_PIN 17
#endif

// Se define el puerto serial a utilizar con el módulo PZEM
#if !defined(PZEM_SERIAL)
#define PZEM_SERIAL Serial2
#endif

// Se crea una instancia del módulo PZEM-004T
PZEM004Tv30 pzem(PZEM_SERIAL);

// Se definen constantes y variables para trabajar con un sensor de efecto Hall
const int hallPin = 2; // Pin al que está conectado el sensor de efecto Hall
volatile unsigned int rpm; // Variable para almacenar las revoluciones por minuto
unsigned long lastTime; // Marca de tiempo del último cálculo de RPM
volatile byte pulse; // Contador de pulsos del sensor de efecto Hall
void setup() {
    // Inicialización del puerto serial para debug y comunicación
    Serial.begin(9600);

    // Configuración del pin del sensor como entrada y habilitación del pull-up interno
    pinMode(hallPin, INPUT_PULLUP);

    // Configuración de interrupción en el pin del sensor para contar pulsos
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(hallPin), countPulse, RISING);

    // Inicialización de variables
    rpm = 0;
    lastTime = millis();
    pulse = 0;

    // Línea opcional para reiniciar el contador interno de energía del PZEM

```

```

    // pzem.resetEnergy()
}

void loop() {
    // Comprobación si ha pasado un segundo desde el último cálculo de RPM
    if (millis() - lastTime >= 1000) {
        // Cálculo de las RPM basado en los pulsos detectados en el último segundo
        rpm = (pulse * 60) / 2;

        // Lectura de datos del módulo PZEM

        float voltage = pzem.voltage();
        float current = pzem.current();
        float power = pzem.power();
        float energy = pzem.energy();
        float frequency = pzem.frequency();
        float pf = pzem.pf();

        // Validación de los datos leídos
        if(isnan(voltage)){
            Serial.println("Error al leer el voltaje ");
        } else if (isnan(current)) {
            Serial.println("Error al leer la corriente");
        } else if (isnan(power)) {
            Serial.println("Error al leer la potencia");
        } else if (isnan(energy)) {
            Serial.println("Error al leer la energía");
        } else if (isnan(frequency)) {
            Serial.println("Error al leer la frecuencia");
        } else if (isnan(pf)) {

```

```

        Serial.println("Error al leer el factor de potencia");
    } else {
        // Si los datos son válidos, se muestran por el puerto serial
        Serial.print(voltage);    Serial.print("V ");
        Serial.print(current);    Serial.print("A ");
        Serial.print(power);      Serial.print("W ");
        Serial.print(energy,3);   Serial.print("kWh ");
        Serial.print(frequency, 1); Serial.print("Hz ");
        Serial.print(pf);         Serial.print("pf ");
    }

    // Impresión de las RPM en el puerto serial
    Serial.print(rpm);
    Serial.println();

    // Reinicio de las variables de conteo
    pulse = 0;
    lastTime = millis();
}
}

// Función de interrupción que se ejecuta con cada pulso detectado por el sensor de efecto
Hall
void countPulse() {
    pulse++;
}

```

Anexo 2: Código de programación del medidor PZEM-017

/*

Archivo de : Sensor PZEM-017

Mediciones de energia

*/

```
#include <ModbusMaster.h> // Biblioteca para el módulo PZEM-017
```

```
#define MAX485_DE 2 // Pines para el convertidor RS485
```

```
#define MAX485_RE 3
```

```
static uint8_t pzemSlaveAddr = 0x01; // Dirección del dispositivo (medidor)
```

```
static uint16_t NewshuntAddr = 0x0003; // Valor del shunt externo
```

```
ModbusMaster node;
```

```
float PZEMVoltage = 0; // Variables para las mediciones
```

```
float PZEMCurrent = 0;
```

```
float PZEMPower = 0;
```

```
float PZEMEnergy = 0;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600); // Inicializa la comunicación Serie para el Monitor Serie
```

```
    setShunt(0x01); // Configura la clasificación del shunt (opcional)
```

```
    // resetEnergy(0x01); // Restablece el valor de energía (opcional)
```

```
    startMillisPZEM = millis(); // Iniciar el conteo de tiempo
```

```
    Serial3.begin(9600, SERIAL_8N2); // Configura el puerto de comunicación para el  
medidor
```

```
    node.begin(pzemSlaveAddr, Serial3); // Inicia la comunicación Modbus RTU
```

```

pinMode(MAX485_RE, OUTPUT); // Configura el pin RE como salida
pinMode(MAX485_DE, OUTPUT); // Configura el pin DE como salida
digitalWrite(MAX485_RE, 0); // Pone el pin RE en estado BAJO
digitalWrite(MAX485_DE, 0); // Pone el pin DE en estado BAJO
node.preTransmission(preTransmission); // Configura las devoluciones de llamada
node.postTransmission(postTransmission);

changeAddress(0xF8, 0x01); // Establece la dirección del medidor como 0x01
(opcional)

delay(1000); // Espera 1 segundo después de la configuración
}

void loop() {
  currentMillisPZEM = millis();
  if (currentMillisPZEM - startMillisPZEM >= periodPZEM) {
    uint8_t result;

    result = node.readInputRegisters(0x0000, 6); // Lee los registros del PZEM-014/016

    if (result == node.ku8MBSuccess) {
      PZEMVoltage = node.getResponseBuffer(0x0001) / 100.0;
      PZEMCurrent = node.getResponseBuffer(0x0001) / 100.0;
      PZEMPower    = (node.getResponseBuffer(0x0003) << 16 +
node.getResponseBuffer(0x0002)) / 10.0;
      PZEMEnergy   = (node.getResponseBuffer(0x0005) << 16 +
node.getResponseBuffer(0x0004));

      // Imprime las mediciones en el Monitor Serie
      Serial.print(PZEMVoltage, 1);

```

```

Serial.print(" V ");
Serial.print(PZEMCurrent, 3);
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("Error al leer Modbus");
}
startMillisPZEM = currentMillisPZEM;
}
}

```

```

void preTransmission() {
    digitalWrite(MAX485_RE, 1);
    digitalWrite(MAX485_DE, 1);
    delay(1);
}

```

```

void postTransmission() {
    delay(3);
    digitalWrite(MAX485_RE, 0);
}

```

```

digitalWrite(MAX485_DE, 0);
}

void setShunt(uint8_t slaveAddr) {
    // Cambiar la dirección del registro de shunt (opcional)
}

void changeAddress(uint8_t OldslaveAddr, uint8_t NewslaveAddr) {
    // Cambiar la dirección del esclavo (opcional)
}

```

Anexo 3: Código de programación de la simulación de la curva característica

```

% Archivo M: Curva Par-Velocidad
% motor de inducción monofásico de 1/2 hp

% Inicialización (Datos)
r1 = 1.0487; % Resistencia del estator (devanado principal)
x1 = 0.9511; % Reactancia del estator (devanado principal)
r2 = 2.2889; % Resistencia del rotor
x2 = 0.9511; % Reactancia del rotor
xm = 28.4606; % Reactancia de la rama de magnetización (método clásico)
xm1 = 30; % Reactancia de la rama de magnetización (método Suhr)
v = 38.5; % Voltaje monofásico (Variar de acuerdo con la alimentación)
n_sync = 1800; % Velocidad síncrona (r/min)
w_sync = 188.5; % Velocidad síncrona (rad/s)
C = 260e-6; % Valor del condensador en Faradios
f = 60; % Frecuencia (asumiendo 60Hz para Norteamérica)
Xc = -1 / (2 * pi * f * C); % Reactancia capacitiva

```

```

% Asumiendo que el devanado auxiliar tiene la misma resistencia y reactancia
% que el devanado principal.

ra = r1;

xa = x1 + Xc; % El efecto del condensador es reducir la reactancia efectiva
% Impedancia del devanado principal
z_main = r1 + 1j * x1;

% Impedancia del devanado auxiliar con condensador
z_aux = ra + 1j * (xa + Xc);

% Impedancia total del estator (combinación en paralelo de los devanados
% principal y auxiliar)
z_stator = 1 / ((1/z_main) + (1/z_aux));

% Especificar rangos de deslizamiento para Gráficar
s = 0:0.01:1;

s(1) = 0.0001;

s(201) = 0.9999;

% Calcular velocidades correspondientes en rpm
nm = (1 - s) * n_sync;

% Con el Método clásico

% Impedancias para rotación directa e inversa en función del deslizamiento
zf = (r2 ./ s + j * x2) * j * xm ./ (r2 ./ s + j * x2 + j * xm);
zb = (r2 ./ (2 - s) + j * x2) * j * xm ./ (r2 ./ (2 - s) + j * x2 + j * xm);

% Calcular corriente que fluye a través del estator

```

```

i1 = v ./ (z_stator + 0.5 * zf + 0.5 * zb);

% Calcular potencia en el entrehierro
p_ag_f = abs(i1).^2 .* 0.5 .* real(zf);
p_ag_b = abs(i1).^2 .* 0.5 .* real(zb);
p_ag = p_ag_f - p_ag_b;

% Calcular par en N-m.
t_ind = p_ag ./ w_sync;

%Con Método Surh
% Impedancias para rotación directa e inversa en función del deslizamiento
zf1 = (r2 ./ s + j * x2) * j * xm1 ./ (r2 ./ s + j * x2 + j * xm1);
zb1 = (r2 ./ (2 - s) + j * x2) * j * xm1 ./ (r2 ./ (2 - s) + j * x2 + j * xm1);

% Calcular potencia en el entrehierro
p_ag_f1 = abs(i1).^2 .* 0.5 .* real(zf1);
p_ag_b1 = abs(i1).^2 .* 0.5 .* real(zb1);
p_ag1 = p_ag_f1 - p_ag_b1;

% Calcular par en N-m.
t_ind1 = p_ag1 ./ w_sync;

% Gráficar la curva par-velocidad
figure(1)
plot(nm, t_ind,'Color', 'b', 'LineWidth', 1.5);%(Método Clásico)
%Titulos de los ejes
xlabel('\itn_{m} \rm(r/min)');

```

```

ylabel('\tau_{ind} \rm(N-m));
%Título de la gráfica
title('Curva par-velocidad motor de inducción monofásico','FontSize',12);
hold on
plot(nm, t_ind1, 'Color', 'g', 'LineWidth', 1.5);%(Metodo Suhr)
hold on
% Exportacion de datos de Excel
data = xlsread('Gráfica38.xlsx');%Nombre del archivo excel
x = data(:,6); % número de columna en excel para el eje x
y = data(:,16); % número de columna en excel para el eje y
plot(x, y, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5);%(Prueba con carga)
grid on;
% Añadir la leyenda
legend('Método clásico', 'Método Suhr', 'Prueba con Carga');

```