

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**DETERMINACION DE LA EFICIENCIA EN MOTORES
ELECTRICOS APLICANDO METODOS INDIRECTOS**

PRESENTADO POR:

EDWIN JOSE ALEMAN CRUZ

YURI ABIGAIL CRUZ MORENO

CRISTIAN DANIEL RODRIGUEZ GOMEZ

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DOCTOR EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

DIRECTOR:

ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**DETERMINACION DE LA EFICIENCIA EN MOTORES
ELECTRICOS APLICANDO METODOS INDIRECTOS**

Presentado por:

EDWIN JOSE ALEMAN CRUZ

YURI ABIGAIL CRUZ MORENO

CRISTIAN DANIEL RODRIGUEZ GOMEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. LUIS ROBERTO CHEVEZ

SAN SALVADOR, OCTUBRE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

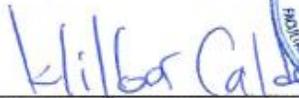
ING. LUIS ROBERTO CHEVEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha viernes 14 de octubre de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma


Firma



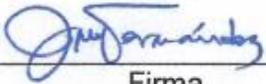
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

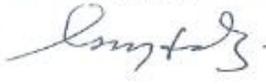
- MSc. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ


Firma

- ING. MARVIN GERARDO JORGE HERNANDEZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS APLICANDO
MÉTODOS INDIRECTOS

A cargo de los Bachilleres:

- ALEMÁN CRUZ EDWIN JOSÉ
- CRUZ MORENO YURI ABIGAIL
- RODRIGUEZ GOMEZ CRISTIAN DANIEL

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.7
(ocho punto siete)

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer primero a DIOS, por permitir que este momento llegara, desde que inicie mi carrera me encomendé a él, siempre le pedí que me guiara por el buen camino; que me diera sabiduría, fuerzas para luchar, y levantarme día con día con ánimo para salir adelante con mis estudios; le pedí por mi familia, mi papá Edwin Alemán Rodríguez y mi mamá Luciana Cruz, que me les colmara de salud, que me los cuidara, y bendijera siempre en sus humildes trabajos, estoy orgulloso de ellos, porque con mucho esfuerzo me dieron el mejor regalo; el tiempo para terminar mi carrera, de corazón les estoy muy agradecido, reconozco todo el esfuerzo y el sacrificio que hicieron por mí, por lo que ahora quiero gratificarlos al dedicarles este triunfo, prometo que siempre estaré para ellos, los cuidare y compartiré los frutos, de aquella semilla que un día con mucha esperanza sembraron, amor, y buenos consejos, es lo que sembraron en mí, y a mi mente y corazón se trasformo en fuerza, poder, ganas, hoy DIOS nos permite cosechar los frutos con este momento, nos ha premiado por tal esfuerzo y dedicación, es un logro para mi familia, un logro de equipo, han sido un pilar importante, pido a DIOS que me ayude a seguir mejorando como persona y como profesional cada día, seguir aprendiendo cosas buenas de la vida, y que este momento tan indescriptible no sea el ultimo ,sino más bien, el primero de muchas bendiciones que vendrán.

Agradecer a mis hermanas, Rosa Luciana Alemán Cruz y Fátima Edith Alemán Cruz, que me brindaron el apoyo, y me animaron cuando las cosas no marchaban bien, agradezco toda la fe que mi familia tubo en mí, y es a ellos que hoy dedico este logro.

Agradecer a mi abuelita Rosa Cruz, y a mi tío Roberto Cruz que en paz descansen, y que siempre llevo sus recuerdos y cariño en mi mente y corazón, ya no pudieron presenciar este momento especial, pero sé que desde el cielo me ven orgullosos de lo que ahora he alcanzado.

Agradecer especialmente al Ing. Armando Martínez Calderón que es paz descanse y que dios en gloria lo tenga, agradezco por el tiempo prestado, la paciencia con mi grupo, la orientación y los buenos consejos que nos brindó muchísimas gracias por todo, y más aún por poner a nuestra disposición sus conocimientos, criterios, recomendaciones gracias por mostrarnos el camino para desarrollar de la mejor manera el tema de nuestro trabajo de graduación.

También un agradecimiento especial a nuestro asesor Ing. Luis Roberto Chevez, por retomar y dar continuidad a nuestro trabajo de graduación, gracias por sacar adelante al grupo, por compartirnos

de su experiencia profesional, por las buenas experiencias en el laboratorio que nos compartieron ambos, son excelentes maestros, y un agradecimiento general a todos los maestros de la escuela de ingeniería eléctrica, me siento orgullo de representar a la escuela de eléctrica por medio de este trabajo.

Agradecimientos especiales al Sr. Salvador Posada, Sr. Juan Carlos Olano, Sra. Reina Vides y Br. Noe Díaz, Br. Diego Escobar por brindarnos su ayuda, colaboración, sus buenos consejos de forma personal, muchísimas gracias por los años de amistad que hemos compartido y que vamos a seguir compartiendo en el futuro gracias los recordare siempre.

Quiero agradecer, a todos mis amigos que hice a lo largo de mis estudios en la universidad; Kevin Argueta, Carlos Argueta, Carlos Palacios, Geovanella Ramírez, Luis Alarcón, Daniel Grande, Josué Arias, Marvin López, Francisco Argueta, Rene Granados, Mildred López, Pablo Chafoya, Manuel Diaz, Yuri Cruz, Cristian Rodríguez y a mi buen amigo Javier Cruz, que en paz descansé y del cual aprendí muchas cosas; siempre te recordare amigo con mucho cariño, fueron excelentes compañeros de estudio, ahora muy buenos profesionales y personas de bien.

A mis buenos amigos de infancia, Oscar, Alex, Beatriz, Julio, Cesar, Fran, Gaby, Gerardo, Rodrigo, Josué, Luis, Carlos, José, Joaquín, Carlos Portillo.

EDWIN JOSE ALEMAN CRUZ

AGRADECIMIENTOS.

Primeramente, agradecer a Dios por guiarme y cuidarme siempre en todos los proyectos y metas de mi vida, agradecida con el apoyo de mi familia, de mis padres, mis hermanos y hermana, agradecida con el apoyo de mi esposo, mi princesita y demás familia.

Mis agradecimientos al Ing. Armando Calderón (QEPD) por el tema de proyecto que nos entregó, también a nuestro asesor Ing. Roberto Chévez por sus consejos y apoyo, igualmente a niña Reinita que nos brindó su apoyo, y así muchos otros miembros de la EIE que nos apoyaron y guiaron siempre.

YURI ABIGAIL CRUZ MORENO

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad de lograr alcanzar esta meta que fue un proyecto de vida a largo plazo. A mi mamá Marta Rosa Gómez que es uno de los motivos para no rendirme que tenía siempre presente a lo largo de la carrera. Agradezco a León Gómez hermano de mi mamá quien fue como un padre para mí desde que nací y que a sido una guía para formarme como persona y estudiante recordándome que el estudio es la mejor forma de superarse y salir adelante. A mi familia que me apoyo y animo a terminar este reto. Agradezco también a cada uno de mis compañeros de universidad que representaron un pilar de ayuda para sobrellevar la carga del estudio junto a la vida laboral que parecía imposible a veces de llevar en conjunto. A Gabriela Cardona y sus padres que me trataron como un hijo cuando empezaba la carrera siempre animándome a que debía dar el todo en ello para salir titulado. A mis compañeros y amigos de estudio de la universidad que se quedaban las noches en vela estudiando para prepararnos para las evaluaciones y trabajos Francisco Martínez, José Araujo, Aguirre Andasol Christian Sánchez, Ariel Rivera, Miguel Pérez, Jorge López, Rafael Civi, Enrique Vásquez, Fidel Castro, Jorge Rivera y Harold Romero, Samuel Gutiérrez y Cristian Aguilar. También agradeciendo a mi compañero de trabajo estudio y casi hermano Harold Romero por ayudarme apoyándome y dándome ánimos y el tiempo para finalizar el trabajo de graduación que por ratos parecía una tarea titánica que no terminaba. A mi jefa de área y amiga Ana Castro por darme la oportunidad de llevar ambas actividades a la vez como lo era el desarrollo del trabajo de graduación y las actividades laborales. Agradezco también a cada uno de los docentes de la escuela de ingeniería eléctrica por haber compartido parte de su conocimiento el cual fue vital para la formación profesional que e podio concluir. Agradezco al ingeniero Armando Calderón quien fue nuestro asesor inicial de trabajo de graduación y a la vez lamento el saber que ya no se encuentra con nosotros pero que a pesar de ello dejo su legado en cada uno de los estudiantes de la escuela eléctrica que tuvieron la oportunidad de recibir clases con él.

Agradezco a mis compañeros y amigos de trabajo de graduación José Alemén y Yuri Cruz quienes fueron un gran equipo de trabajo y que su incansables determinación y dedicación permitió el llegar a los resultados que se esperaban conseguir en nuestro proyecto de graduación. Agradecimiento al Sr. Juan Olano, Sr. Salvador Posada, Br Diego Escobar y al Ing. Noe Diaz por ayudarnos en el desarrollo de las pruebas en la carrera y el trabajo final de graduación. Agradezco a la Sra. Reina Vides por su apoyo y ánimos para con nosotros estando al pendiente siempre y

asesorándonos en los procesos y tramites académicos al igual que por su amistad para con cada uno de nosotros los estudiantes que formamos parte de la EIE.

Agradezco a nuestro asesor de trabajo de graduación el Msc Ing. Luis Roberto Chevez quien nos apoyó para darle continuidad y finalización al trabajo de graduación compartiendo sus conocimientos y experiencias para apoyarnos en el correcto desarrollo y guía de este proyecto de investigación y titulación.

CRISTIAN DANIEL RODRIGUEZ GOMEZ

INDICE.

AGRADECIMIENTOS.

GLOSARIO TECNICO.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
DESCRIPCIÓN DEL TEMA.	1
ALCANCES.	1
ANTECEDENTES.	2
JUSTIFICACIÓN.	2
INTRODUCCION.	3
OBJETIVOS.	4
Objetivo General:.....	4
Objetivos Específicos.....	4
CAPITULO I: MOTOR DC.	5
1.1 Partes de un motor eléctrico.	7
1.2 Aspectos generales de los motores de corriente continua.	8
1.3 Motor de CC con excitación independiente.	9
1.4 Motor de CC en derivación.	10
1.5 Motor de CC de imán permanente (PMDC).....	10
1.6 Motor de CC en serie.....	11
1.7 Motor de CC compuesto.....	12
1.8 Métodos de arranque y control de velocidad del motor DC.....	12
CAPITULO II: El alternador.	17
2.1 Funcionamiento del alternador	17
2.2 Aspectos constructivos.	18
2.3 Aplicación de los alternadores.....	25
2.4 Sistemas de excitación.....	27
2.5 Tipos de sistemas de excitación.....	27
CAPITULO III: Eficiencia del motor trifásico de inducción.	35
3.1 Determinación de la eficiencia mediante el método directo del deslizamiento según la norma STD IEEE STD 739 ¹	35
3.2 Determinación de la eficiencia según la normativa de IEEE STD 112-2004.....	36
3.3 Métodos de prueba de eficiencia. ²	39

3.4	Clasificación de métodos para la estimación de la eficiencia de motores de inducción.....	40
3.5	Definición de pérdidas y eficiencia del motor.....	41
3.6	Métodos de estimación de la eficiencia.....	42
3.7	Pruebas de motor trifásico de inducción.....	49
CAPITULO IV: Implementación del sistema motogenerador de la MUH como fuente de voltaje y frecuencia, para el desarrollo de la prueba a rotor bloqueado en motores trifásicos de inducción.....		55
4.1	Adecuando el ambiente del laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE.....	55
4.2	Maquinas HAMPDEN.....	57
4.3	Descripción de la maquina universal HAMPDEN modelo H-REM-120-MP.....	57
4.4	Especificaciones e instrucciones de la maquina universal de pruebas HAMPDEN...	63
4.5	Reparación de cables de conexión de la MUH.....	73
4.6	Mantenimiento de la MUH (H-REM-120C-MP).....	78
4.7	Modelo estructural para bloquear el eje del motor.....	83
4.8	Datos de placa del motor a ensayar WEG W22 modelo TE1BF0X0!.....	94
4.9	Practica de laboratorio para la prueba DC.....	96
4.10	Desarrollo de la práctica de laboratorio de la prueba DC.....	107
4.11	Practica de laboratorio para la prueba de vacío.....	112
4.12	Desarrollo de la práctica de laboratorio de la prueba de vacío.....	128
4.13	Practica de laboratorio para la prueba a rotor bloqueado modelo a baja frecuencia.	172
4.14	Desarrollo de la práctica de laboratorio de la prueba a rotor bloqueado a 21.8Hz...	187
CAPITULO V: Análisis de resultados.....		217
5.1	Análisis de resultados.....	217
5.2	Prueba de DC.....	217
5.3	Prueba de vacío.....	220
5.4	Prueba de rotor bloqueado modelo a baja frecuencia.....	241
5.5	Solución del circuito equivalente.....	245
LIMITACIONES.....		255
CONCLUSIONES.....		256
RECOMENDACIONES.....		257
BIBLIOGRAFÍA.....		258
ANEXOS.....		259

CONTENIDO DE FIGURAS.

Figura 1.1 Motor Eléctrico (Chiarena, Sf)	7
Figura 1.2 a) Circuito equivalente de un motor de cd de excitación separada. b) Circuito equivalente de un motor de cd en derivación. (Chapman, Quinta edición)	10
Figura 1.3 Diagrama del circuito PMDC. (Anonimo, 2021)	10
Figura 1.4 Esquemas de los circuitos de control de la carga monofásica	13
Figura 1.5 Esquemas de circuito de control de potencia trifásico.	13
Figura 2.1 Estator de un alternador en construcción. (De la torre, Sf)	19
Figura 2.2 Esquema de conexión de la fuente al bobinado del rotor. (De la torre, Sf).....	20
Figura 2.3 Escobillas de grafito y anillos deslizantes. (De la torre, Sf).....	21
Figura 2.4 Máquina síncrona, para capacidades menores a 10KVA con inductor en el rotor. (Fraile Mora, Sexta edición)	23
Figura 2.5 Rotor de polos salientes. (De la torre, Sf)	25
Figura 2.6 Central hidroeléctrica, sistema conformado por el acople de un generador síncrono y turbina. (De la torre, Sf).....	25
Figura 2.7 a) Laminadora. b) Trituradora. (De la torre, Sf).....	27
Figura 2.8 Sistema de excitación, con dinamo excitatriz. (Fraile Mora, Sexta edición)	28
Figura 2.9 Sistema de excitación con diodos. (Fraile Mora, Sexta edición)	30
Figura 2.10 Sistemas de excitación estático, alimentado por transformador. (Kundur, Sf)	32
Figura 2.11 Sistema de excitación, de rectificador de fuente compuesta. (Kundur, Sf).....	33
Figura 2.12 GENERREX sistema de excitación, con rectificador controlado-compuesto. (Kundur, Sf)	34
Figura 3.1 Diagrama de conexiones para la prueba de rotor bloqueado. (Chapman, Quinta edición)	50
Figura 3.2 Circuito equivalente del motor. (Chapman, Quinta edición)	51
Figura 4.1 Edificio de potencia de la escuela de ingeniería eléctrica (EIE) UES – Fuente propia.	55
Figura 4.2 Laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE – Fuente propia.	56
Figura 4.3 Máquina universal Hampden H-REM-120C-MP.....	57
Figura 4.4 Panel lateral de la MUH.	60
Figura 4.5 Panel frontal de la MUH.....	61
Figura 4.6 Panel de terminales y panel de instrumentos de la MUH.....	61

Figura 4.7 Diagrama unifilar del interruptor principal de la MUH	63
Figura 4.8 Tomacorriente dúplex 120VAC y breaker principal instalados en el panel frontal. (System Hampden, Sf)	63
Figura 4.9 Diagrama unifilar de la fuente DC – Console Instructions for Universal Laboratory Machine. (System Hampden, Sf)	64
Figura 4.10 a) Breaker y luz piloto instalados en panel frontal, b) Conectores de salida de la fuente DC ubicados en el panel lateral. (System Hampden, Sf).....	64
Figura 4.11 a) Breaker, luz piloto y botonera de control instalados en panel frontal, b) Conectores de carga y de línea más conector de bobina de protección de campo instalados en panel lateral. (System Hampden, Sf)	65
Figura 4.12 Rangos de corriente de campo detectables por el relé. (System Hampden, Sf)	66
Figura 4.13 Gráfico de velocidad vs Corriente de campo del dinamómetro. (System Hampden, Sf).....	67
Figura 4.14 Gráfico de velocidad vs corriente de campo de la maquina universal. (System Hampden, Sf)	67
Figura 4.15 Arreglo de componentes del arrancador DC. (System Hampden, Sf).....	68
Figura 4.16 Diagrama unifilar del arrancador DC. (System Hampden, Sf)	69
Figura 4.17 a) Perilla de control de la fuente trifásica variable, breaker y luz piloto instaladas en panel frontal b) Conectores de salida instalados en panel lateral (System Hampden, Sf).....	70
Figura 4.18 Diagrama unifilar de la fuente trifásica variable. (System Hampden, Sf).....	70
Figura 4.19 Diagrama unifilar del reóstato de campo del dinamómetro. (System Hampden, Sf) 71	
Figura 4.20 a) Perilla de control del reóstato de campo del dinamómetro, más resistor auxiliar instalados en panel frontal b) conectores del reóstato instalados en panel lateral. (System Hampden, Sf)	72
Figura 4.21 Diagrama unifilar del reóstato de campo de la maquina universal. (System Hampden, Sf).....	73
Figura 4.22 a) Perilla de control del reóstato de campo de la maquina universal instalada en panel frontal b) Conectores del reóstato instalados en panel lateral (System Hampden, Sf)	73
Figura 4.23 a) Cables de conexión en panel de terminales, b) Panel de terminales. (System Hampden, Sf)	73
Figura 4.24 a) Cables de conexión del panel lateral. b) panel lateral derecho. (System Hampden, Sf).....	74
Figura 4.25 Cables para conexiones entre diferentes paneles. (System Hampden, Sf)	74
Figura 4.26 Cables para conexionado entre el panel de terminales, medidores y banco de cargas. (System Hampden, Sf)	74
Figura 4.27 Revisión del estado actual de los cables de conexión.	75

Figura 4.28 Cables, conector tipo gancho y hembra en mal estado.....	76
Figura 4.29 Conector gancho - banana, y su respectivo protector aislante separado previo al procedimiento limpieza.....	77
Figura 4.30 Conectores tipo gancho, banana, hembra después del procedimiento de limpieza. ..	77
Figura 4.31 Ensamblando conector banana.	78
Figura 4.32 El mal estado del Interior de la MUH.	79
Figura 4.33 Secciones de la MUH.	80
Figura 4.34 Lijando partes del reóstato.....	81
Figura 4.35 Proceso de engrase MUH.	82
Figura 4.36 Solicitud de fabricación del freno mecánico dirigida a Escuela de Mecánica.	85
Figura 4.37 Esquema de sistema de freno L-02.....	86
Figura 4.38 Esquema de sistema de freno L-04.....	87
Figura 4.39 Esquema de sistema de freno L-03.....	88
Figura 4.40 Esquema de sistema de freno L-01.....	89
Figura 4.41 Formas material. (Normas ISO, Sf).....	89
Figura 4.42 Fabricación freno mecánico.	92
Figura 4.43 Proceso final freno mecánico.	93
.....	95
Figura 4.44 placa característica del motor WEG W22.	95
Figura 4.45 Esquema eléctrico para el ensayo de DC para un motor en Y.	97
Figura 4.46 Diagrama de conexión estrella-estrella para motor de nueve puntas.	99
Figura 4.47 Conexión estrella – estrella para motor de nueve puntas visto desde las terminales.	100
.....	100
Figura 4.48 Interruptor principal del módulo DL180C DE LORENZO.	101
Figura 4.49 Fuente de alimentación 2 del módulo DL180C de LORENZO.	102
Figura 4.50 Conexión práctico para el ensayo tensión – corriente aplicado entre los terminales T1T3.	103
Figura 4.51 Medición de la temperatura ambiente del laboratorio.	108
Figura 4.52 Medición de la temperatura final en el neutro.....	109
Figura 4.53 Montaje práctico de la prueba DC.....	110
Figura 4.54 Esquema eléctrico para el ensayo de vacío.	114
Figura 4.55 Alimentador y protección principal de la maquina universal de pruebas Hampden.	115
.....	115

Figura 4.56 Main principal de la MUH, breaker de activación de la fuente 3 ϕ y su perilla de control.	115
Figura 4.57 Conexionado practico para el ensayo de vacío.....	116
Figura 4.58 sonda de voltaje para osciloscopio.	117
Figura 4.59 sonda de corriente FR100RA para osciloscopio.	118
Figura 4.60 archivos que debe obtener para el primer nivel de voltaje de vacío ensayado de 230V.....	120
Figura 4.61 Cantidad de archivos a obtener en el ensayo de vacío.	121
Figura 4.62 Hoja de cálculo en Excel, las nuevas hojas creadas están nombradas con el valor de los niveles de voltajes escogidos para la prueba.	128
Figura 4.63 a) Control de encendido y de regulación de la fuente trifásica variable b) Terminales de salida de la fuente.	129
Figura 4.64 Transformador trifásico a utilizar en la prueba de vacío.	131
Figura 4.65 Placa característica del transformador trifásico 5KVA.	131
Figura 4.66 protección SIEMENS 3VU1300-0MK00 de 400V, 72A.	133
Figura 4.67 Autómato CHINT C16 de 400V, 16A.....	134
Figura 4.68 Autómato CHINT C10 de 400V, 10A.....	134
Figura 4.69 Montaje parcial para el ensayo de vacío, utilizando el analizador de redes eléctricas aemc instrument modelo 8336 como el único instrumento de medición.....	139
Figura 4.70 Voltaje línea a línea a la entrada del motor.	140
Figura 4.71 Corriente de fase del motor.	141
Figura 4.72 Montaje definitivo para el ensayo de vacío, utilizando el osciloscopio Agilent Technologies modelo DS01012A como el único instrumento de medición.	144
Figura 4.73 a) Voltaje de línea a línea, b) Corriente de fase, para la FASE S a 230V.	147
Figura 4.74 Señal de voltaje, señal de corriente, y señal de la potencia instantánea en la FASE S para 230V.....	149
Figura 4.75 Archivo CSV, y captura de pantalla para la FASE S al nivel de tensión nominal 230V guardadas en el pendrive.....	150
Figura 4.76 Señal real de voltaje $V_{SN}(t)$, señal real de corriente $I_S(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_S(t)$ para la FASE S al nivel de voltaje 230V.	155
Figura 4.77 Voltaje de línea a línea, corriente de fase, para la FASE R a 230V.....	156
Figura 4.78 Señal de voltaje, señal de corriente, y señal de la potencia instantánea en la FASE R para 230V.....	157
Figura 4.79 Señal real de voltaje $V_{RN}(t)$, señal real de corriente $I_R(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_R(t)$ para la FASE R al nivel de voltaje 230V.	160

Figura 4.80 Voltaje de línea a línea, corriente de fase, para la FASE T a 230V.	160
Figura 4.81 Señal de voltaje, señal de corriente, y señal de la potencia instantánea en la FASE T para 230V.	161
Figura 4.82 Señal real de voltaje $V_{TN}(t)$, señal real de corriente $I_T(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_T(t)$ para la FASE T al nivel de voltaje 230V.	164
Figura 4.83 Señal de la potencia instantánea para elementos resistivos.	165
Figura 4.84 Señales de todas las potencias asociadas al nivel de voltaje nominal 230V.	169
Figura 4.85 Esquema eléctrico para el ensayo a rotor bloqueado.	175
Figura 4.86 Protección principal de la maquina universal de pruebas Hampden.	177
Figura 4.87 Diagrama eléctrico de la fuente de generación de voltaje utilizando la MUH.	178
Figura 4.88 Esquema practico de las conexiones del motor DC shunt o paralelo utilizando la MUH.	179
Figura 4.89 Esquema practico de las conexiones del alternador utilizando la MUH.	180
Figura 4.90 Esquema practico de las conexiones del motor hacia el alternador.	181
Figura 4.91 Archivos que debe obtener para el ensayo a rotor bloqueado.	184
Figura 4.92 motor universal (figura de la izquierda), muñón se acoplamiento y conexiones eléctricas (figura al medio), Generador de corriente continua (figura de la derecha).	188
Figura 4.93 Control para seleccionar el modo de funcionamiento.	188
Figura 4.94 Circuito equivalente del motor DC paralelo.	190
Figura 4.95 Medición de la inductancia del bobinado de campo del motor DC con el RCL meter.	192
Figura 4.96 Circuito equivalente del motor DC paralelo con todos los parámetros medidos. ...	193
Figura 4.97 Diagrama de conexiones eléctricas para configurar el motor DC shunt de control de velocidad por corriente de campo en la MUH.	193
Figura 4.98 Montaje práctico del motor DC shunt con control de velocidad por corriente de campo.	194
Figura 4.99 Diagrama de conexiones eléctricas para configurar el motor DC shunt de control de velocidad por reóstato de armadura en la MUH.	196
Figura 4.100 Reóstato marca OHMITE de 20Ω disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE-UES.	197
Figura 4.101 Montaje práctico del motor DC shunt de control de velocidad por reóstato de armadura.	198
Figura 4.102 Diagrama de conexiones eléctricas para excitar el campo del alternador.	200
Figura 4.103 Montaje práctico de todas las conexiones hechas en el estator del motor universal.	201

Figura 4.104 Protección CHINT C10 400V, 10A para proteger la armadura del alternador.	201
Figura 4.105 Dibujo 3D del freno mecánico metalúrgico.	202
Figura 4.106 Acabado final del freno mecánico metalúrgico.....	202
Figura 4.107 Montaje completo de la fuente de generación para la prueba de rotor bloqueado.	203
Figura 4.108 Medición de la resistencia y la temperatura inicial del reóstato de armadura del motor DC.	206
Figura 4.109 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase S.	207
Figura 4.110 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase S.	207
Figura 4.111 Señal real de voltaje $V_{SN}(t)$, señal real de corriente $I_s(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_S(t)$ para la FASE S de la prueba de rotor bloqueado.	209
Figura 4.112 Medición de la corriente de excitación del campo del alternado durante la prueba, y medición de la temperatura del reóstato al final de la prueba.....	209
Figura 4.113 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase R.....	210
Figura 4.114 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase R.....	211
Figura 4.115 Señal real de voltaje $V_{RN}(t)$, señal real de corriente $I_R(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_R(t)$ para la FASE R de la prueba de rotor bloqueado.	212
Figura 4.116 Medición de la corriente de excitación del campo del alternador durante la prueba, y medición de la temperatura del reóstato al final de la prueba.....	212
Figura 4.117 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase T.....	213
Figura 4.118 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase T.....	214
Figura 4.119 Señal real de voltaje $V_{TN}(t)$, señal real de corriente $I_T(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_T(t)$ para la FASE R de la prueba de rotor bloqueado.	215
Figura 4.120 Medición de la corriente de excitación del campo del alternador durante la prueba, y medición de la temperatura del reóstato al final de la prueba.....	215
Figura 4.121 Medición de la corriente total consumida por el alternador.	216
Figura 4.122 Medición de la corriente total consumida por el motor DC.	217
Figura 5.1 Gráfico de perdidas vs tensión para doce mediciones.....	225
Figura 5.2 Gráfico de perdidas vs tensión para nueve mediciones.....	227
Figura 5.3 Repartición de las perdidas en el ensayo de vacío.	228
Figura 5.4 Curva de ajuste de los datos en vacío.....	233

Figura 5.5 Listado de los nueve puntos a plotear en el entorno gráfico de GeoGebra.	236
Figura 5.6 Gráfico de $(P_{Fe} + P_m)$ vs V_o^2 plotado en GeoGebra.	237
Figura 5.7 Representación gráfica de la suma de pérdidas $(P_{Fe} + P_m)$ vs V_o^2	238
Figura 5.8 Diagrama fasorial de la tensión y la corriente en vacío.....	240
Figura 5.9 Circuito de la rama paralela de vacío.	241
Figura 5.10 Diagrama fasorial de la tensión y corriente de la prueba de rotor bloqueado.	243
Figura 5.11 Circuito equivalente del motor trifásico de inducción.	245
Figura 5.12 Circuito equivalente para un deslizamiento del 6.39%	247
Figura 5.13 Impedancias de cada rama del circuito equivalente.	249
Figura 5.14 Circuito equivalente del motor trifásico representado en una sola impedancia total.	249
Figura 5.15 Solución del circuito equivalente mediante Octave.	253
Figura 5.16 Eficiencia vrs. Deslizamiento.....	254
Figura 5.17 Par de salida vs. Deslizamiento.	254

CONTENIDO DE TABLAS.

Tabla 1.1 Elementos de control para motores.....	12
Tabla 1.2 Secuencia de control por resistencias de armadura utilizando contactores.	16
Tabla 1.3 Secuencia de control por tensión de armadura utilizando contactores.	17
Tabla 2.1 Velocidad de sincronismo, a diferente número de polos a 60Hz. (Rodriguez Pozueta, Sf).....	21
Tabla 2.2 Aplicaciones y características de rotor cilíndrico o polos lisos, y rotor de polos salientes. (Fraile Mora, Sexta edición)	24
Tabla 2.3 Características de los sistemas de excitación de DC. (Kundur, Sf).....	29
Tabla 2.4 Características de los sistemas de excitación AC. (Kundur, Sf).....	31
Tabla 3.1 porcentaje de las pérdidas por carga parasita de acuerdo a la potencia del motor.	47
Tabla 3.2 Comparación de cada método de acuerdo al nivel de intrusión.	49
Tabla 3.3 Regla practica para dividir la reactancia del estator y rotor. (Chapman, Quinta edición)	54
Tabla 3.4 Rango de valores normales de los parámetros del motor obtenidos a partir de los ensayos. (Fraile Mora, Sexta edición).....	54
Tabla 4.1 Posición de las escobillas de acuerdo al modo de operación.....	58

Tabla 4.2 Parámetros nominales y modos de funcionamiento de la MUH. (System Hampden, Sf)	62
Tabla 4.3 Lista de materiales para rehabilitación de los cables de la MUH.	76
Tabla 4.4 Referencia de composición química. (Normas ISO, Sf)	90
Tabla 4.5 Propiedades mecánicas. (Normas ISO, Sf)	90
Tabla 4.6 Tratamientos térmicos. (Normas ISO, Sf)	90
Tabla 4.7 Resumen de conexiones representadas con nomenclatura americana.	100
Tabla 4.8 Mediciones de la temperatura ambiente y la temperatura del bobinado a tomar durante la prueba DC.	101
Tabla 4.9 Mediciones a tomar en las terminales $T1T3$.	105
Tabla 4.10 Mediciones a tomar en los terminales $T1T2$.	105
Tabla 4.11 Mediciones a tomar en las terminales $T2T3$.	106
Tabla 4.12 Resultados de las mediciones de temperatura.	109
Tabla 4.13 Resultado de las mediciones realizadas entre ($T1T3$)	111
Tabla 4.14 Resultado de las mediciones realizadas entre ($T1T2$)	111
Tabla 4.15 Resultado de las mediciones realizadas entre ($T2T3$)	111
Tabla 4.16 Parámetros a calcular para obtener los valores RMS de V_{SN} y I_s para la FASE S a 230V.	123
Tabla 4.17 Parámetros a calcular para obtener los valores RMS de VR_N y IR para la FASE R a 230V.	124
Tabla 4.18 Parámetros a calcular para obtener los valores RMS de VT_N y IT para la FASE T a 230V.	124
Tabla 4.19 Potencia monofásica y trifásica para el nivel de voltaje 230V	125
Tabla 4.20 Voltajes, corrientes, y potencias trifásicas a obtener, para todos los niveles de tensión escogidos para el ensayo de vacío.	126
Tabla 4.21 Corriente de vacío como porcentaje de la corriente nominal para motores clase B.	136
Tabla 4.22 Corriente de vacío como porcentaje de la corriente nominal para el motor ensayado.	136
Tabla 4.23 Voltaje de línea – línea, corriente de fase obtenidos con el analizador de redes eléctricas Aemc Instrument Modelo 8336 para el ensayo de vacío.	142
Tabla 4.24 Listado de los niveles de voltaje escogidos para ensayar el motor en vacío.	145
Tabla 4.25 Análisis de muestras para la FASE S al nivel de voltaje nominal 230V.	151
Tabla 4.26 Análisis de muestras para la FASE R al nivel de voltaje nominal 230V.	157
Tabla 4.27 Análisis de muestras para la FASE T al nivel de voltaje nominal 230V.	161

Tabla 4.28 Potencia promedio trifásica para el nivel de voltaje nominal 230V.	168
Tabla 4.29 Resultados finales de todas las mediciones obtenidas del ensayo de vacío.....	171
Tabla 4.30 Resultados de los análisis CSV.....	185
Tabla 4.31 Mediciones realizadas al motor DC shunt.	194
Tabla 4.32 Resultados finales de las mediciones del ensayo de rotor bloqueado.....	217
Tabla 5.1 Resultado de las mediciones realizadas entre T7T9.....	218
Tabla 5.2 Resultado de las mediciones realizadas entre (T7T8).....	219
Tabla 5.3 Resultado de las mediciones realizadas entre (T8T9).....	219
Tabla 5.4 Resultados de la prueba de vacío, representados con valores de tensión de línea - neutro para cada fase, y para cada corriente de fase.	221
Tabla 5.5 Resultados de la prueba de vacío, con valores de tensión de vacío, corriente de vacío y potencia de vacío representados en valores promedio.	222
Tabla 5.6 Cálculo de las Pérdidas del cobre del estator P_{cu0} y cálculo de la sumatoria de pérdidas del hierro y mecánicas $P_{Fe} + P_m$, para doce mediciones de tensión ensayadas.	224
Tabla 5.7 Cálculo de las Pérdidas del cobre del estator P_{cu0} y cálculo de la sumatoria de pérdidas del hierro y mecánicas $P_{Fe} + P_m$, para nueve mediciones de tensión ensayadas.	227
Tabla 5.8 Tabla de datos para el análisis de la regresión exponencial.	231
Tabla 5.9 Valores de la suma de $P_{Fe} + P_m$ reales y valores calculados con la ecuación de regresión.....	233
Tabla 5.10 Representación de todos los valores de la tensión V_o al cuadrado.	234
Tabla 5.11 Tabla de datos para el análisis de la regresión lineal.	237
Tabla 5.12 Mediciones de tensión, corriente y potencia del ensayo de rotor bloqueado.	242
Tabla 5.13 Representación de las mediciones de corriente y tensión en valores promedio.	242

GLOSARIO TÉCNICO

Carcasa: Cubierta de las máquinas eléctricas, sirve como soporte mecánico de todas las partes componentes de unidad de máquina.

Excitatriz: Es la máquina encargada de suministrar la corriente de excitación a las bobinas del estátor, parte donde se genera el campo magnético.

Inducción: Un motor de inducción es un dispositivo que suministra energía. El nombre de inducción se debe a su forma de operar.

Transformador: Consiste en dos o más bobinas colocadas de tal forma que están enlazadas por el mismo flujo magnético.

Transformador de potencia: En este tipo de transformador de potencia las bobinas se colocan sobre un núcleo de acero con el propósito de confinar el flujo de manera que el que enlace una bobina también enlace a las demás.

Corriente de excitación: Cuando se aplica un voltaje sinusoidal al devanado primario de un transformador real que está sobre un núcleo de acero con el devanado secundario abierto fluye una pequeña corriente, llamada corriente de excitación (I_E), básicamente es una representación de la energía necesaria para crear y mantener la acción del transformador.

Regulación de voltaje: Se define como la diferencia entre la magnitud del voltaje a plena carga y la magnitud del voltaje sin carga en por ciento del voltaje a plena carga, medido en las terminales en que se coloca la carga y conservando el voltaje de entrada constante.

Motor eléctrico: Es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica a través de interacciones electromagnéticas.

Motor de inducción: Es un motor eléctrico del cual solamente una parte (estator), se conecta a la fuente de energía, la otra (rotor) funciona por inducción magnética.

Devanados de máquinas síncronas polifásicas: Constituyen un grupo de circuitos eléctricos acoplados inductivamente, algunos de los cuales se encuentran en rotación relativa con respecto a otros, por lo que las inductancias mutuas son variables. Estos devanados llevan la corriente suministrada a la carga eléctrica por el generador, o la corriente recibida por un motor desde una fuente de CA.

Estator o armadura: La parte estacionaria, que es esencialmente un cilindro hueco, y tiene ranuras longitudinales en las que hay bobinas del devanado de armadura.

Rotor: Es la parte de la máquina que se monta sobre una flecha y rota dentro del estator hueco.

Sobretensión: Es una magnitud de tensión que está por encima del valor nominal.

Tensión nominal: Se define como el valor diferencial de la potencia que se presenta en un aparato o instalación eléctrica. De este modo, es el tope de corriente energética que soporta un equipo o sistema, el cual puede ser de 120, 240, 480 voltios.

Temperatura ambiente: Es la temperatura del medio que rodea el motor, generalmente aire y que está en contacto con sus partes externas, enfriándolo.

Siglas.

ANSI: American National Standards Institute.

AIEE: American Institute of Electrical Engineers.

IEC: International Electrotechnical Commission.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

NEMA: National Electrical Manufacturers Association

Acrónimos.

AC: Corriente Alterna.

DC: Corriente Directa.

EIE: Escuela de Ingeniería Eléctrica.

FP: Factor de Potencia.

MUH: Maquina Universal Hampden.

PMDC: Motor DC de Imán Permanent

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El estudio de cómo se afecta el rendimiento en motores luego de una reparación, aún no se ha planteado para la escuela de tecnificación, aunque existen muchos métodos propuestos y recomendaciones por la normativa IEEE std112, algunos métodos requieren equipo con buena precisión y bancos de pruebas con altos costos de inversión, debido a la falta de recursos y financiamiento surge la necesidad de buscar alternativas de medición, una de ellas es adoptar metodologías basadas en las pruebas óhmicas, vacío y rotor bloqueado, siendo esta última prueba en la que se tiene dificultades para su desarrollo experimental, por dos requerimientos principales una de ellas es que la prueba se debe realizar con una fuente de tensión dedicada y de baja frecuencia de preferencia entre valores de 15Hz a 25Hz como lo establece la normativa americana, la otra dificultad depende de mantener el eje fijo, por lo que se necesita de una estructura para estabilizar el eje del motor, de acuerdo a la problemática observada, surge la propuesta de nuestro trabajo.

DESCRIPCIÓN DEL TEMA.

El trabajo de graduación consiste en la investigación de diferentes métodos que se emplean para la determinación del parámetro rendimiento en motores de inducción, considerando además dentro de la investigación el análisis de la normativa que la respalda, el trabajo va orientado a la búsqueda de un método alternativo de medición de la eficiencia mediante la realización de ensayos básicos de laboratorio, que permitan determinar el rendimiento de la maquina sin requerir de una inversión económica para adquirir un banco profesional de pruebas, la metodología que se pretende emplear se vale de los ensayos de circuito abierto y de rotor bloqueado, siendo esta última ensayo, el principal objeto de estudio del trabajo de graduación, ya que para desarrollarlo a nivel de laboratorio presenta muchas dificultades.

ALCANCES.

En el trabajo de graduación, se pretende desarrollar un procedimiento experimental, para medir la eficiencia de forma indirecta en motores de inducción, evaluando la posible implementación en condiciones de ambiente controlado durante el desarrollo de la prueba en el laboratorio, con la estimación que se logre del parámetro rendimiento se pretende emitir un documento, que respalde la buena reparación al motor.

ANTECEDENTES.

Desde hace algunos años la escuela de ingeniería eléctrica de la universidad de El Salvador se encuentra trabajando en el planteamiento de una escuela de tecnificación de reparadores de motores, los estudios respecto a la propuesta están muy bien desarrollados y se han obtenidos buenos resultados, faltaría encontrar únicamente las formas de financiamiento para implementar el proyecto, ahora bien, con el planteamiento de nuestro trabajo de graduación va contribuir al fortalecimiento de la escuela de tecnificación abonando con una propuesta sobre la determinación del rendimiento de máquinas reparadas, este parámetro se ve afectado directamente cuando el motor ha sido rebobinado, dentro del planteamiento de la escuela de tecnificación se siguen procedimientos estrictos para la reparación de motores, pero la reparación al final debe ser probada por lo que se debe recopilar parámetros, entre ellos el más importante el rendimiento. Por lo que con el trabajo se busca poder hacer una prueba de certificación de calidad de la reparación con la determinación de la eficiencia.

JUSTIFICACIÓN.

Es necesario definir una metodología alternativa al uso de un banco de pruebas para la determinación directa del parámetro de rendimiento, los costos de un equipamiento de esta naturaleza son altos y se pretende con el estudio plantear forma alternas indirectas para definir la característica del rendimiento que nos lleven a resultados aceptables y que cumplan con la normativa aceptada para este tipo de evaluación, además que se amplía la cantidad de pruebas experimentales que se le pueden hacer a los motores de inducción.

INTRODUCCION.

La eficiencia de los motores eléctricos es importante, se estima que un 60% de la energía eléctrica que usan las industrias es consumida por motores eléctricos, motores en mal estado o incluso que fueron rebobinado presentan cambios en la eficiencia, por lo que conocer el valor del parámetro rendimiento es muy relevante para tomar decisiones como de mantenerlo o de sacarlo de operación, un motor ineficiente trae pérdidas económicas.

Existe una variedad de métodos que pueden determinar la eficiencia, y han sido resumidos dentro de la norma IEEE Std 112-1996, son muchos los métodos que existen que incluso han sido separados por clasificaciones, algunas metodologías determinan la eficiencia de forma directa midiendo las potencias a la entrada y salida del motor, y con una relación directa definen la eficiencia generalmente son los métodos más rápidos y con un alto grado de precisión, mientras que otras metodologías la determinan mediante las pérdidas que experimenta el motor pero requieren de pruebas adicionales, que luego concluyen con la resolución del circuito del motor de inducción estos métodos son más laboriosos y son considerados métodos indirectos.

En ese sentido el trabajo desarrolla una investigación de metodologías en busca de considerar la metodología más adecuada, el método debe utilizar solo el recurso disponible y debe hacer uso de la prueba óhmica y vacío y rotor bloqueado, además debe de poder desarrollarse experimentalmente en el laboratorio de máquinas eléctrica, de la escuela de ingeniería eléctrica, de la universidad de El salvador.

Esta investigación desarrolla en los primeros capítulos de manera general e introductoria teoría de máquinas eléctricas, luego se desarrolla una investigación de métodos para determinar la eficiencia, y el trabajo finaliza con la aplicación experimental del método para determinar la eficiencia del motor WEG W22 MODELO TE1BFOXO! que tiene las siguientes especificaciones nominales 1/4 hp, 230/460V, 0.937/0.469, para lo cual el desarrollo experimental inicia con la elaboración de 3 pruebas de laboratorio, prueba óhmica, prueba de vacío, prueba de rotor bloqueado modelo a baja frecuencia, que luego serán desarrolladas y analizadas, para concluir el trabajo con el análisis eléctrico del modelo del circuito equivalente del motor ensayado.

OBJETIVOS.

Objetivo General:

Desarrollar una investigación y recopilación de información, referente a las metodologías para la determinación experimental de la eficiencia energética en motores de inducción trifásicos.

Objetivos Específicos

- Proponer un método de medición indirecto de eficiencia, para ser desarrollado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la escuela de ingeniería eléctrica de la universidad de el salvador, el método debe implementarse únicamente con el recurso disponible en el laboratorio.
- Proponer una fuente de baja frecuencia, para el desarrollo del ensayo de rotor bloqueado al motor trifásico de inducción utilizando un sistema motogenerador.
- Establecer las limitaciones especificaciones técnicas del sistema motogenerador, para definir la máxima capacidad para la cual el sistema propuesto, es capaz de ensayar motores eléctricos.
- Plantear un modelo estructural para bloquear el eje del motor durante el ensayo de rotor bloqueado, la estructura debe cumplir el requerimiento de soportar el par desarrollado por la máquina.

CAPITULO I: MOTOR DC.

¿Qué es un motor?

Motor eléctrico se toma cualquiera de una clase de dispositivos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica, generalmente mediante el empleo de fenómenos electromagnéticos.

La mayoría de los motores eléctricos desarrollan su par mecánico por la interacción de conductores que transportan corriente en una dirección en ángulo recto con un campo magnético. Los diversos tipos de motores eléctricos difieren en la forma en que se disponen los conductores y el campo, también en el control que se puede ejercer sobre el par de salida mecánico, la velocidad y la posición.

Según Steven Chapman una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador, y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se llama motor. Puesto que puede convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa, una máquina eléctrica se puede utilizar como generador o como motor. Casi todos los motores y generadores útiles convierten la energía de una a otra forma a través de la acción de campos magnéticos.

En general cualquier máquina eléctrica puede usarse para transformar energía en cualquier dirección y cualquier máquina puede usarse como generador/motor. Casi todas las máquinas eléctricas prácticas convierten la energía de una forma a otra a través de la acción de un campo magnético que afecta su comportamiento y propósito.

Según la dirección de la potencia, los motores se dividen en:

Motores CA.

En un motor de CA, la energía proviene de campos magnéticos generados a través de bobinas envueltas alrededor del eje de salida, estos motores constan de varias partes, incluido un estator y un rotor. Los motores de CA son eficientes, duraderos, silenciosos y flexibles.

Los motores de CA son de dos tipos, los cuales se presentan a continuación:

Síncrono: El motor síncrono gira a la misma velocidad que la frecuencia de la corriente de alimentación, hecho que le da nombre al motor. Los motores síncronos están contruidos con un estator, un rotor y los motores síncronos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones.

Inducción: Los motores de inducción son los motores eléctricos más simples y resistentes disponibles. Estos motores eléctricos de CA constan de dos conjuntos eléctricos: el estator bobinado y el conjunto del rotor. La corriente eléctrica necesaria para hacer girar el rotor se crea por inducción electromagnética creada por el devanado del estator. Los motores de inducción se encuentran entre los tipos de motores más utilizados en el mundo.

Motores CC.

La energía utilizada por un motor de CC proviene de baterías u otra fuente de energía generada que ofrece un voltaje constante. Los motores de corriente continua se componen de varias partes, las más notables incluyen cojinetes, ejes y una caja de cambios o engranajes. Estos motores ofrecen una mejor variación y control de la velocidad y producen más par que los motores de CA.

Los motores de CC son de dos tipos, los cuales se presentan a continuación:

Con escobillas: Uno de los tipos de motor más antiguos, los motores con escobillas son motores eléctricos conmutados internamente alimentados por corriente continua. Los motores con escobillas están contruidos con un rotor, escobillas, un eje y La carga y la polaridad de las escobillas controlan la dirección y la velocidad del motor.

Sin escobillas: En los últimos años, los motores sin escobillas han ganado popularidad para muchos usos, en gran parte debido a su eficiencia. Los motores sin escobillas se construyen de la misma manera que los motores con escobillas, pero, sin las escobillas. Los motores sin escobillas también incluyen circuitos especializados para controlar la velocidad y la dirección. En los motores sin escobillas, los imanes se montan alrededor del rotor, una configuración que mejora la eficiencia.

Los motores de CC se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluidas sillas de ruedas eléctricas, rociadores y bombas portátiles, máquinas de café, equipos todoterreno y muchas más.

Existen muchas diferencias entre los motores de CA y CC. La diferencia más obvia es el tipo de corriente que cada motor convierte en energía, corriente alterna en el caso de los motores de CA y

corriente continua en el caso de los motores de CC. Los motores de CA son conocidos por su mayor potencia de salida y eficiencia, mientras que los motores de CC son apreciados por su control de velocidad y rango de salida.

1.1 Partes de un motor eléctrico.

Un motor simple tiene las siguientes partes:

- ❖ Una fuente de alimentación, principalmente CC para un motor simple
- ❖ Imán de campo: podría ser un imán permanente o un electroimán
- ❖ Una armadura o rotor
- ❖ Conmutador
- ❖ cepillos
- ❖ Eje

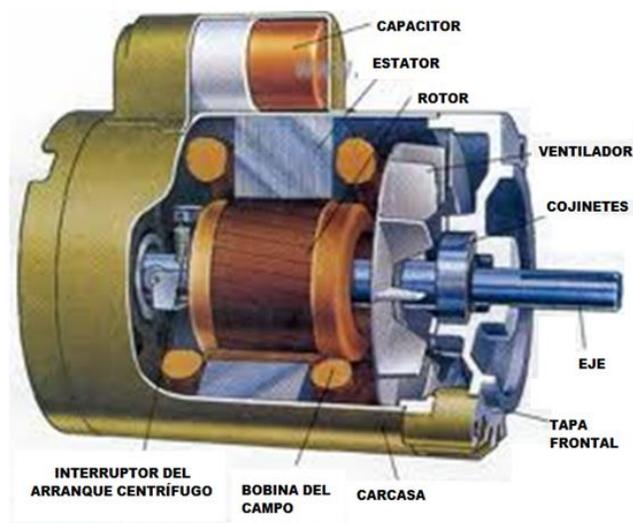


Figura 1.1 Motor Eléctrico (Chiarena, Sf)

1. **Fuente de alimentación:** un motor simple generalmente tiene una fuente de alimentación de CC. Suministra energía a la armadura del motor o a las bobinas de campo.
2. **Conmutador:** Es la interfaz giratoria de la bobina del inducido con un circuito estacionario.
3. **Imán de campo:** el campo magnético ayuda a producir un par en la bobina del inducido giratorio en virtud de la regla de la mano izquierda de Fleming.

4. **Núcleo del inducido:** Sostiene la bobina del inducido en su lugar y proporciona soporte mecánico.
5. **Bobina de armadura:** ayuda al motor a funcionar.
6. **Escobillas:** Es un dispositivo que conduce la corriente entre los cables estacionarios y las partes móviles, más comúnmente el eje giratorio.

1.2 Aspectos generales de los motores de corriente continua.

Un motor de corriente continua transforma la energía eléctrica de entrada en energía mecánica de salida transmitida directamente al eje del motor, los motores de CC o DC se han vuelto muy populares hoy en día por la amplia variedad de características volt - ampere y velocidad - par que se pueden obtener producto de varias combinaciones de excitación del devanado de campo, un motor DC presenta ser una máquina muy versátil, por la cantidad de aplicaciones en las que se puede utilizar, en la actualidad es común encontrarlos en aplicaciones pequeñas de sistemas de potencia de dc de los automóviles livianos y camiones de carga, se encuentran en los sistemas de dc de las aeronaves, también son utilizados en algunos aparatos eléctricos de uso doméstico como ventiladores, licuadoras, batidoras, y taladros.

Las industrias están utilizando cada vez más los motores eléctricos de dc por las ventajas que presentan estos, son fácilmente controlados con suavidad en su velocidad incluso con un simple cambio de polaridad se puede cambiar el sentido de giro del motor, los motores dc son útiles en aplicaciones donde el requisito es un control estricto y amplias variaciones de velocidad, entre otras ventajas se puede mencionar la fácil puesta en marcha y frenado dinámico del motor, con las ventajas mencionadas es por ello que se vuelven populares y usados hoy en día por la industria en aplicaciones más sofisticadas y de mayor tamaño, por ejemplo son utilizados en mecanismos que impulsan trenes, ascensores, escaleras mecánicas, en sistemas de bandas de transporte.

Los motores de corriente continua son en esencia generadores de corriente continua o dinamos como también son conocidas operando en régimen inverso, las dinamos obedecen al principio de reciprocidad electromagnética formulada por Faraday y Lenz, en general la máquina dc físicamente puede operar como motor o generador, el régimen de trabajo estaría definido por el sentido del flujo de potencia que circule a través de la máquina.

Otro uso de los motores de corriente continua era una situación en la que se necesitaban amplias variaciones de velocidad, donde antes del uso generalizado de rectificadores/inversores electrónicos de potencia, los motores CC eran insuperables en aplicaciones de control de velocidad. Incluso si la fuente de alimentación CC no se encuentra disponible, se pueden usar circuitos rectificadores y chopper basados en estado sólido para crear la energía necesaria, y los motores se pueden usar para proporcionar la velocidad deseada que se va controlar.

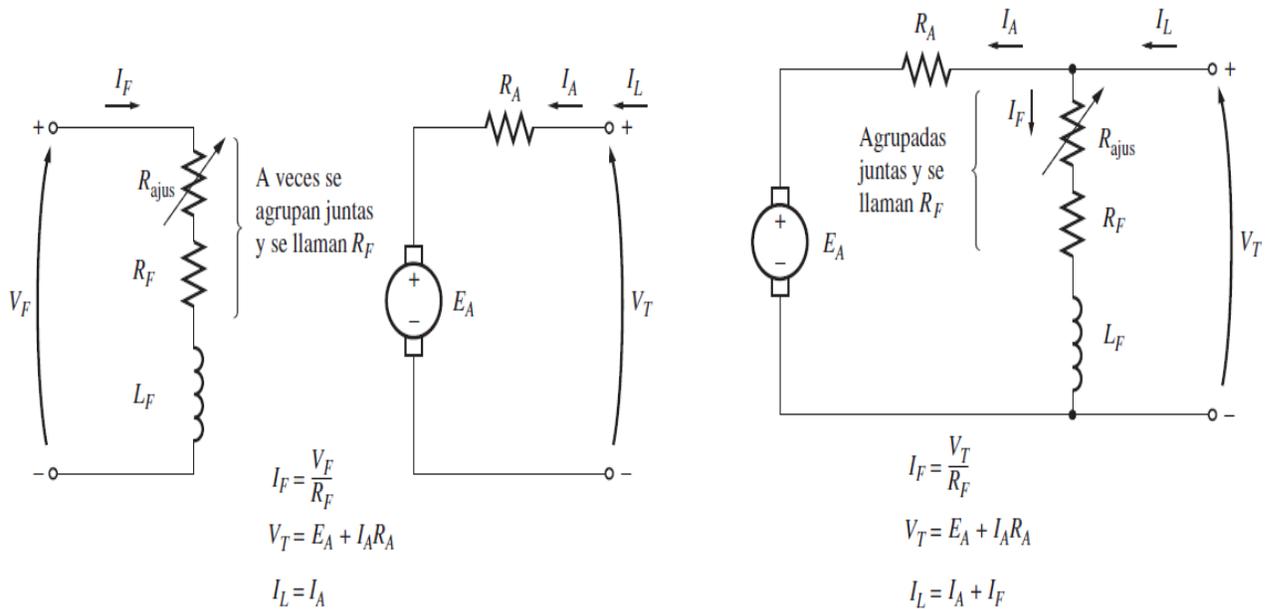
Hay 5 tipos principales de motores CC de uso general:

- 1) Motor de CC con excitación independiente.
- 2) Motor de CC en derivación.
- 3) Motor de CC de imán permanente.
- 4) Motor de CC en serie.
- 5) Motor de CC compuesto.

1.3 Motor de CC con excitación independiente.

Un motor de CC con excitación independiente también conocido por motor excitado por separado, el rotor y estator están conectados cada uno desde una fuente de alimentación diferente. Esto da otro grado de libertad para controlar el motor sobre la de derivación.

A continuación se muestra el circuito equivalente de un motor de cd de excitación independiente o separada en literal a) y en el literal b) se ilustra el circuito equivalente de un motor de CC en derivación.



a)

b)

Figura 1.2 a) Circuito equivalente de un motor de cd de excitación separada. b) Circuito equivalente de un motor de cd en derivación. (Chapman, Quinta edición).

Para el análisis de los circuitos Stephen Chapman sugiere tener en cuenta la ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff (KVL), del circuito del circuito inducido de estos motores es

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (1.1)$$

1.4 Motor de CC en derivación.

Un motor de bobinado en derivación es un tipo de motor de CC en el que el devanado de campo está conectado en paralelo con la armadura.

La corriente a través del devanado de campo en derivación no es la misma que la corriente del inducido. Los devanados de campo en derivación están diseñados para producir la fuerza magnetomotriz necesaria por medio de un número relativamente grande de vueltas de alambre con alta resistencia. Debido a esto la corriente del campo de derivación es relativamente pequeña en comparación con la corriente del inducido.

1.5 Motor de CC de imán permanente (PMDC)

Este tipo de máquinas de CC de imán permanente se utilizan mucho en una amplia gama de aplicaciones de baja potencia. El estator es un imán permanente, por lo que el motor es de menor tamaño, una desventaja es que estos motores solo se usan para aplicaciones de par bajo.

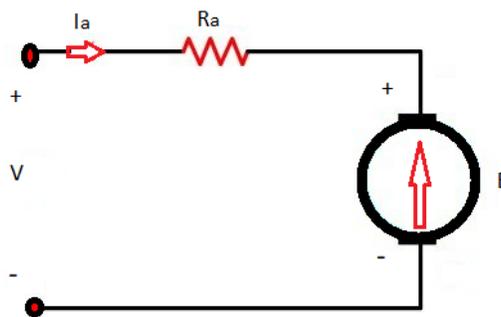


Figura 1.3 Diagrama del circuito PMDC. (Anonimo, 2021)

En un motor de CC convencional, la FEM generada o contraria viene dada por la ecuación que se muestra a continuación.

$$E = k \phi N \quad (1.2)$$

El par electromagnético se da como

$$\tau_e = k \phi I_a \quad (1.3)$$

En el motor de CC de imán permanente, el valor del flujo ϕ es constante. Por lo tanto, la ecuación

$$E = k_1 N \quad (1.4)$$

$$T_e = k_1 I_a \quad (1.5)$$

anterior (1) y (2) se convierte en

Teniendo en cuenta el diagrama de circuito anterior, se expresan las siguientes ecuaciones.

$$V = E + I_a R_a \quad (1.6)$$

Poniendo el valor de E de la ecuación (3) en la ecuación (5) obtenemos

$$V = k_1 N + I_a R_a \quad (1.7)$$

O si no se puede representar con respecto al número de vueltas

$$N = \frac{V - I_a R_a}{k_1} \quad (1.8)$$

Donde $k_1 = k \phi$ y se conoce como constante de velocidad-voltaje o constante de par. Su valor depende del número de polos de campo y conductores de armadura.

El control de velocidad del motor PMDC no se puede controlar mediante el método de control de flujo, ya que el flujo permanece constante en este tipo de motor. Tanto la velocidad como el par pueden controlarse mediante métodos de control de voltaje de armadura, control de reóstato de armadura y control de chopper. Estos motores se utilizan cuando se requiere una velocidad del motor por debajo de la velocidad base, ya que no pueden funcionar por encima de la velocidad base.

1.6 Motor de CC en serie.

Un motor de CC de bobinado en serie es un tipo de motor en el que el devanado de campo está conectado en serie con la armadura.

El devanado de campo en serie lleva la corriente de armadura. Dado que la corriente que pasa a través de un devanado de campo en serie es la misma que la corriente de armadura, los devanados de campo en serie deben diseñarse con muchas menos vueltas que los devanados de campo en derivación para la misma fuerza magnetomotriz.

Por lo tanto, un devanado de campo en serie tiene un número relativamente pequeño de vueltas de alambre grueso y por lo tanto poseerá una resistencia de baja.

1.7 Motor de CC compuesto.

Un motor compuesto de CC es una combinación de motores en serie y en derivación de CC. Consiste en dos devanados de campo, una parte conectada en serie y una parte en paralelo con la armadura. Tiene las características combinadas de una derivación de CC y motores en serie. En un motor compuesto, el devanado de campo en derivación (paralelo) se puede conectar además de dos maneras, en paralelo solo con el devanado del inducido, o en paralelo con los devanados del inducido y del campo en serie.

Los motores compuestos de CC se clasifican además como:

- ❖ Motor compuesto de derivación corta de CC.
- ❖ Motor compuesto de derivación larga de CC.

1.8 Métodos de arranque y control de velocidad del motor DC.

Estos son algunos de los elementos de control que se utilizan en los circuitos siguientes.

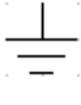
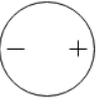
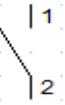
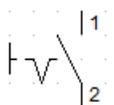
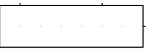
	Fuente		Tierra
	Termomagnético		Fuente
	Contactor		Interruptor
	Carga		Fusible

Tabla 1.1 Elementos de control para motores.

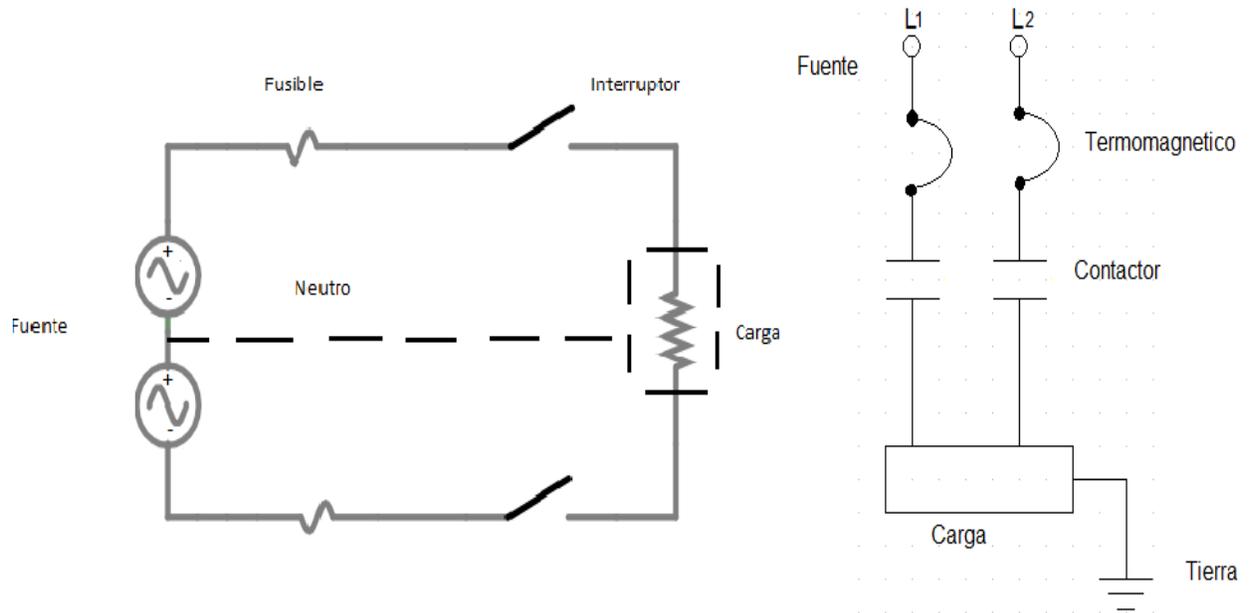


Figura 1.4 Esquemas de los circuitos de control de la carga monofásica.

Circuito convencional.

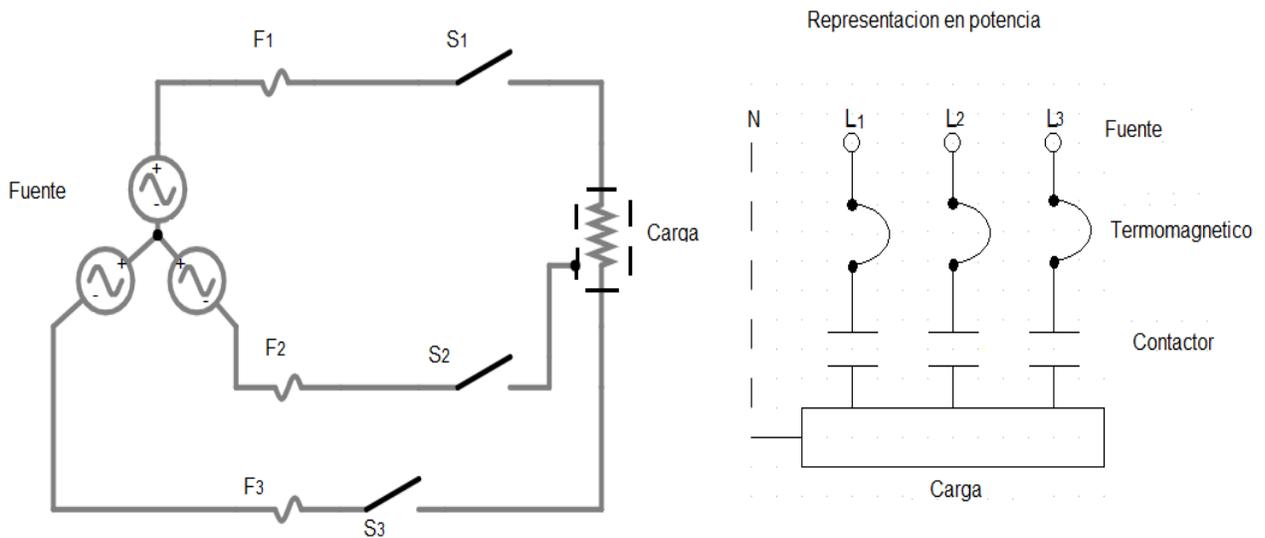


Figura 1.5 Esquemas de circuito de control de potencia trifásico.

A los motores de corriente continua se alimentan con corriente alterna que luego se rectifica y mediante un filtro se debe bajar el rizado y luego manejarla por medio de un contactor que a su

vez debe manejar el motor, a los motores DC se les debe implementar un arranque para bajar las corrientes, además de incorporarse un sistema de control, para frenarlo se le debe quitar la velocidad.

a) Arranque con resistencias en serie con la armadura.

Este método consiste en agregarle una o más resistencias que deberán ser cortocircuitadas a medida que el motor vaya adquiriendo velocidad. El circuito de potencia se muestra en la figura. Se puede ver por separado los devanados de armadura y campo que tienen una baja y alta resistencia óhmica respectivamente.

Circuitos faltan

Para que este arranque pueda funcionar se debe mantener energizado el contactor de 4M durante todo el funcionamiento, luego ir sacando la resistencia paulatinamente energizando 1M, 2M, 3M este encendido. Se puede realizar por medio de tiempo o por medio de unos sensores de velocidad que se conectan al eje del motor.

Características:

- Las resistencias son de bajo valor y de alta potencia.
- El funcionamiento puede resultar antieconómico por la potencia disipada en las resistencias.
- Se necesitan instalaciones grandes y bien ventiladas para alojar las resistencias.
- La velocidad puede ser bastante influenciada por la corriente de la carga.
- La conmutación de las resistencias se puede hacer por medio de tiempo o por medio de tiempos o por medio de los sensores.
- El arranque por medio de tiempo puede ser impreciso y depende de la carga conectada al eje en el momento del arranque
- En el arranque por sensores se necesita uno por cada contacto y este método es más preciso que el anterior.

b) Arranque por medio de la tensión de armadura.

En este método de arranque es preciso tener un transformador con varias tomas de tensión, también debe tener un rectificador para cambiar la tensión de CA proveniente del transformador en tensión continua y poderse la aplicar al motor el mostrado.

Circuito falta

Para hacer un arranque se debe energizar 4M para mantener el campo energizado, para reducir la corriente de arranque es preciso alimentarlo a una tensión baja en la armadura por medio de 1M, luego se debe abrir 1M para evitar cortocircuitos al energizar 2M. mantener este contacto hasta que el motor alcance una velocidad estable y luego el motor a la tensión normal con 3M sin olvidar abrir 2M con anterioridad.

Características:

- En el momento de la compra, este tipo de arranque es más costoso que el arranque por resistencias, pero es más versátil debido a que con este mismo se puede controlar la velocidad.
- El circuito de campo de estar siempre energizado.
- El transformador de potencia debe tener tantos taps o derivaciones como velocidades necesita un motor.
- La velocidad adquirida por medio de este método es bastante estable y resulta poco influenciada por la corriente de la carga.
- La potencia disipada en los elementos es pequeña.
Nota: Se recomienda arrancar el motor con un máximo de dos veces la corriente nominal.
- La operación es costosa porque necesita disipar potencia en forma de calor en dos resistencias.
- Las instalaciones donde se alojan las resistencias, deben ser bien ventiladas.
- No se aconseja este tipo de control de la velocidad en máquinas de precisión.
- Cuando se utilizan servomotores, motores con solo dos terminales el circuito de campo no se conecta y está formada por un imán permanente.
- Con este circuito se puede conseguir 2^{n+1} posibles velocidades en donde "n" es el número de resistencias.

c) Control de velocidad por medio de la corriente de campo.

Este control de velocidad no es muy útil en la industria, ya que la velocidad no varía de forma lineal, la corriente de armadura se incrementa gradualmente y solo se puede usar, para variar la velocidad por arriba de la nominal, no se puede dejar nunca el campo sin corriente, ya que la velocidad crece sin control. La potencia máxima que puede entregar la maquina decrece a medida que a velocidad aumenta entre sí y se supera 2 veces la corriente nominal entre taps es necesario implementar un taps central (intermedio) o usar resistencias de arranque.

A. Regulación de velocidad por medio de resistencias en la armadura.

El circuito es el mismo que el de arranque.

Velocidad del contactor	1M	2M	3M	4M
1	ON	OFF	OFF	ON
2	OFF	ON	OFF	ON
3	OFF	OFF	ON	ON
4	ON	ON	OFF	ON
5	ON	OFF	ON	ON
6	OFF	ON	ON	ON

Tabla 1.2 Secuencia de control por resistencias de armadura utilizando contactores.

Nota: la máxima velocidad es cuando no se encuentran resistencias en la serie con la armadura

Características:

- La resistencia de arranque es de pequeño valor óhmico y de gran potencia.
- La velocidad se hace muy sensible a los cambios de la carga.

B. Regulación de velocidad por tensión de armadura.

Velocidad del contactor	1	2	3
1M	ON	OFF	OFF

2M	OFF	ON	OFF
3M	OFF	OFF	ON
4M	ON	ON	ON

Tabla 1.3 Secuencia de control por tensión de armadura utilizando contactores.

El circuito para regular la velocidad es el mismo del que tiene el arranque, solo que aquí a una velocidad estable, se logra encendiendo un contactor a la vez. Es importante mantener el contactor del campo energizado a la tensión nominal para que el motor no sufra de calentamientos innecesarios.

Nota: Antes de llegar a una velocidad de funcionamiento, se debe pasar por las velocidades más bajas para evitar cometer al motor a las altas corrientes.

Características

- Se tiene la forma más económica en funcionamiento de todas las regulaciones de velocidad.
- La carga influye poco en la velocidad.
- La velocidad se puede controlar siempre por debajo de la velocidad nominal.
- Cuando los valores de tensión son muy diferentes.

CAPITULO II: El alternador.

2.1 Funcionamiento del alternador

La máquina síncrona en la mayoría de casos se usan más como generadores, a los generadores síncronos de corriente alterna se les llama alternadores, y en el régimen de motor sus aplicaciones son muy limitadas, utilizándose únicamente cuando el requerimiento es la velocidad constante.

El funcionamiento de la máquina se basa en el principio de hacer rotar una espira dentro de un campo magnético fijo, para que se induzca una fuerza electromotriz, otra manera es dejar fija la espira y girar el campo, campo que es producido por electroimanes esta última presenta mayor circulación de corriente en la espira, y se podrá suministrar a la red por lo que resulta ser más conveniente, el electroimán se alimenta de corriente continua auxiliar y de magnitud pequeña. Hasta aquí se ha explicado el funcionamiento con una sola espira, pero en realidad las maquinas no se construyen con una sola, sino más bien, con un bobinado trifásico.

En cuanto al funcionamiento del alternador, este requiere del uso de un primotor que se encarga de girar los electroimanes y producir el campo magnético, el primotor es un tipo de motor que se acopla mecánicamente al eje del alternador, y que en la práctica se utilizan las turbinas de vapor o de gas, motores de combustión de petróleo o de gasolina. Los alternadores requieren de un control sobre la tensión generada a la salida, para hacen uso de los generadores de corriente continua (dinamos) a este control de excitación se le conoce como excitatriz de alimentación, que es la encargada de alimentar los electroimanes inductores, es común que la dinamo este acoplado directamente al eje del alternador, o por medio de poleas y correas.

La corriente suministrada por la excitatriz, pasa por los bobinados inductores; por medio de un contacto deslizante que lo forman dos escobillas, y se mantienen rozando con los anillos conductores aislados del eje, los anillos están unidos al principio y al fin del bobinado de los electroimanes, la excitatriz es un generador de corriente continua con excitación shunt, que generalmente es el modelo más común usado en la excitación de la máquina. Para regular la corriente de excitación se utilizan reóstatos conectados al circuito del inductor e inducido.

2.2 Aspectos constructivos.

El alternador está formado por dos devanados independientes.

a) Devanado inductor.

El devanado inductor se construye en forma de arrollamiento, o en ranuras y se alimenta de corriente continúa, dando lugar a los polos de la máquina.

b) Devanado inducido.

El devanado inducido se distribuye en forma de arrollamiento trifásico, la corriente circulante por este devanado es alterna.

El alternador está formado por las siguientes partes:

- 1) Estator
- 2) Rotor
- 3) Excitatriz
- 4) Carcasa

El estator.

El estator es un núcleo formado por chapas de acero al silicio que están sujetas mediante elementos de fijación como pernos, todas las chapas se encuentran aisladas, es decir no existe contacto entre ellas, en este caso el aislamiento sirve para disminuir las pérdidas por corrientes parasitas, estas pérdidas provocan calentamiento en el núcleo de hierro por el sometimiento a campos magnéticos externos, entre las chapas se encuentran las ranuras donde se coloca el conductor que formara el bobinado del estator, y se ocupa cartón con longitud un poco mayor a la longitud de las ranuras, para aislar cada bobinado del núcleo de hierro.



Figura 2.1 Estator de un alternador en construcción. (De la torre, Sf)

El Rotor.

El rotor se construye de una sola pieza con chapas apiladas que forma un cilindro, como está sujeto a campos magnéticos variables está construido con láminas delgadas para disminuir pérdidas por corrientes parasitas, en el rotor se encuentra el bobinado inducido que se excita por corriente continua producida por la excitatriz, antiguamente la excitatriz era independiente, y la transmisión se movía por medio de engranes y poleas. Existen dos formas clásicas de suministrar la corriente continua:

- 1) Suministro de corriente cd por medio de una fuente externa a los anillos deslizantes y escobillas.
- 2) Suministrar corriente cd desde una fuente especial montada directamente en el eje del generador.

En la siguiente figura 2.2 se muestra el diagrama de conexión de la fuente de excitación externa, por medio de los anillos deslizantes y escobillas.

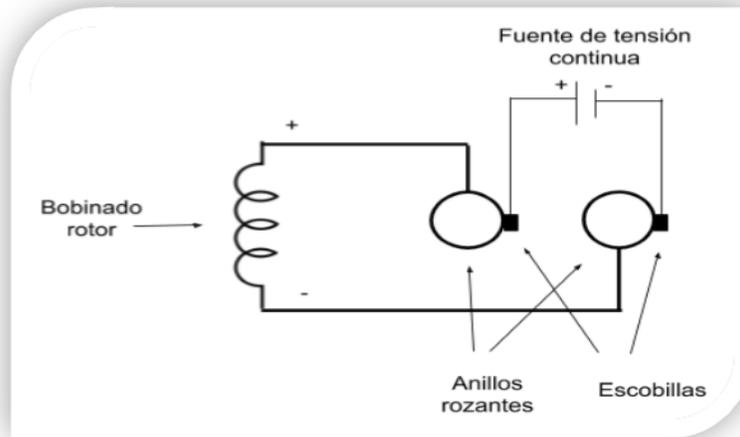


Figura 2.2 Esquema de conexión de la fuente al bobinado del rotor. (De la torre, Sf)

En la figura 2.2 se observa que la bobina del rotor está conectada directamente a los extremos de los anillos deslizantes, y que para inducir corriente se debe conectar una fuente por medio de las escobillas, este sistema permite conectar eléctricamente la bobina móvil del rotor con la parte fija que sería la fuente continua, la fuente de tensión como se ha dicho se le llama excitatriz y hay diferentes maneras para excitar esta bobina, y serán estudiados con mayor detalle en la sección 2.6 del presente capítulo.

Las escobillas están fabricadas de bloques de grafito y se apoyan en los anillos deslizantes como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Escobillas de grafito y anillos deslizantes. (De la torre, Sf)

Uno de los parámetros importantes del alternador es la velocidad síncrona n en r.p.m a la cual debe rotar, está directamente relacionada con la frecuencia f de salida, la velocidad y la frecuencia se relacionan entonces, con la siguiente expresión:

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad 2.1$$

p : representa el numero de polos de la maquina.

La frecuencia siempre será un dato conocido generalmente 60Hz para El Salvador, la velocidad de giro del rotor del alterador depende del primotor elegido, el número de polos del rotor resulta ser pequeño cuando se utiliza como primotor las turbinas de vapor, mientras que se utilizan un numero de polos más grande en el rotor, cuando son utilizadas las turbinas hidráulicas y motores de combustión interna.

En la tabla 2.1 se detallan velocidades requeridas para la generación de potencia a una frecuencia de 60Hz para diferentes números de polos.

N° De polos	Velocidad (r.p.m)	N° De polos	Velocidad (r.p.m)
2	3600	18	400
4	1800	20	360
6	1200	22	327
8	900	24	300
10	720	26	277
12	600	28	257
14	514	30	240
16	450	60	120

Tabla 2.1 Velocidad de sincronismo, a diferente número de polos a 60Hz. (Rodriguez Pozueta, Sf)

Mediante la tabla 2.1 se puede escoger la velocidad síncrona requerida por el rotor del alternador, para establecer la frecuencia a la que se quiere generar, el número de polos de la máquina es un dato conocido y es fijo, por aspectos constructivos de la máquina, por ejemplo, para generar

potencia a 60Hz (frecuencia de trabajo en El Salvador) utilizando una máquina de cuatro polos el rotor debe girar a 1800 rpm, en el caso de máquinas de dos polos entonces la velocidad requerida es 3600 rpm.

La velocidad del rotor requerida a una frecuencia establecida siempre se puede calcular a partir de la ecuación:

$$f = \frac{n \times p}{120} \quad 2.2$$

Donde:

f = frecuencia electrica en Hz

n = velocidad mecanica en rpm

p = numero de polos

Para la generación de potencia a 50Hz en máquinas de 2 polos el rotor debe girar a 3000rpm, hay aplicaciones en las que se necesita generar energía a una frecuencia específica, de acuerdo a las aplicaciones donde el requisito podrían ser las altas o bajas frecuencias, un ejemplo de una aplicación es la unidad motogenerador del cual está compuesta la máquina universal de pruebas HAMPDEN que se estudiada con mayor detalle en el capítulo cuatro de este trabajo de graduación, una forma de operación que posee la máquina; es poder utilizar como fuente de generación aislada de potencia, en este caso, la configuración interna de la máquina estaría gobernada, por un alternador accionado mecánicamente por un primotor (motor DC), y a ese conjunto de máquinas, es que se utiliza como fuente dedicada para desarrollar pruebas a motores trifásicos de inducción.

Para el caso, de utilizar la unidad motogenerador para desarrollar específicamente la prueba de rotor bloqueado la fuente debe ser capaz de simular las condiciones de operación normal del motor, tales condiciones son cumplidas, si la fuente usada durante la prueba, entrega al motor ensayado, una tensión y frecuencia reducida, como lo sugiere la norma IEEE Std 112-1996 en ella se describe, que el ensayo de rotor bloqueado debe ejecutarse a un 25% de la frecuencia nominal del motor.

Entonces, los requerimientos de la baja frecuencia en una fuente de pruebas para ensayos de motores eléctricos, es un buen ejemplo de aplicación para entender la importancia que tiene el

control del sistema, es decir, mantener el control de la velocidad del primotor para definir una frecuencia fija, y el control de la tensión variable generada a la salida por el alternador.

Para el caso particular de ensayar con la prueba de rotor bloqueado, un motor trifásico de inducción de frecuencia nominal 60Hz, en términos generales con cualquier unidad motogeneradora, de acuerdo a la norma IEEE Std. 112 la tensión generada por el alternador del sistema, debe de ser una tensión variable de 15Hz, suponiendo que alternador del sistema es de dos polos, utilizando la ecuación 1.2 la velocidad de sincronismo sería de 900 rpm, la interpretación sería que el primotor escogido debe ser capaz de proporcionar 900 rpm al eje del generador.

También se tienen alternadores pequeños considerados para cuando son inferiores a los 10KVA, el devanado inductor es colocado en el estator de forma concentrada; y con expansiones magnéticas que se les conoce como polos salientes, formando tres fases que salen al exterior mediante tres anillos, en la figura 2.4 se muestra la máquina síncrona de polos salientes.

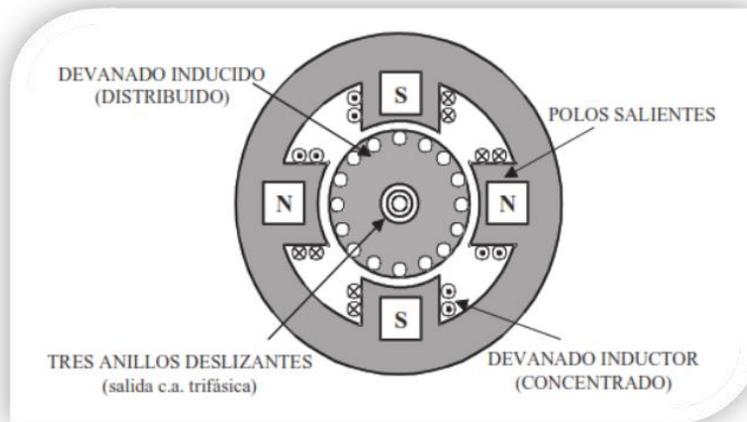


Figura 2.4 Máquina síncrona, para capacidades menores a 10KVA con inductor en el rotor. (Fraile Mora, Sexta edición)

Para máquinas grandes con capacidades entre los 1.000 a 1.500 MVA, los devanados se colocan de forma inversa a como se sitúan en máquinas pequeñas, es decir los polos de la máquina quedan ubicados en el rotor y el devanado trifásico en el estator.

Esto da lugar, a las dos formas de fabricación del rotor:

- 1) Polos salientes
- 2) Polos lisos o rotor cilíndrico

Para el caso de polos salientes, todos los devanados de los polos se ubican de forma concentrada, mientras que para el rotor cilíndrico los devanados se colocan en los polos, es usual encontrar maquinas con 2 a 4 polos y distribuidos en ranuras. También hay criterios para seleccionar la forma constructiva del rotor, el criterio se basa de acuerdo a la velocidad de rotación de la máquina, para altas velocidades de rotación se utilizan rotores cilíndricos, mientras que para bajas velocidades se utiliza rotor de polos salientes, en la figura 1.5 se muestra un rotor de polos salientes en el que se puede observar los anillos deslizantes ubicados cerca del eje y cada uno de los bobinados.

	Rotor de polos lisos o rotor cilíndrico.	Rotor de polos salientes.
Aplicaciones/ Características	Alta velocidad, debido a que son de tipo bipolares o tetrapolares, utilizando en turbogeneradores, es decir un generador eléctrico movido por una turbina de vapor o de gas.	Bajas velocidades de giro, debido al número de polos que contiene la máquina, mayor a cuatro polos, utilizadas en generadores hidráulicos.

Tabla 2.2 Aplicaciones y características de rotor cilíndrico o polos lisos, y rotor de polos salientes. (Fraile Mora, Sexta edición)

En la tabla 2.2 se presenta un resumen de las características de acuerdo a la forma constructiva del rotor, para el caso de rotores de polos salientes son utilizados en generadores de baja y media velocidad, en cambio para los rotores fabricados lisos son aprovechados en los turbogeneradores, diseñados para las altas velocidades de rotación, cabe destacar que la selección del rotor viene impuesta por la velocidad de rotación de la máquina, la cual a su vez depende del tipo de primotor que le hace girar.



Figura 2.5 Rotor de polos salientes. (De la torre, Sf)

2.3 Aplicación de los alternadores

Todos los alternadores son máquinas convertidoras de energía electromecánica, y obedecen a la reciprocidad, es decir, pueden operar en el régimen de motor y generador teniendo diversas aplicaciones en campo, entre la que se destaca su aplicación como generadores para producir energía eléctrica, la máquina operando en el régimen de generador se le conoce también como alternador. La máquina es de gran utilidad en las centrales hidroeléctricas aprovechando el agua de los ríos y lagos como fuente primaria en la generación de energía, también se puede utilizar otras fuentes primarias, como lo son la térmica y nuclear.



Figura 2.6 Central hidroeléctrica, sistema conformado por el acople de un generador síncrono y turbina. (De la torre, Sf)

Una de las ventajas de los alternadores es su fácil control de frecuencia durante el proceso de generación, esto es importante porque la frecuencia de trabajo cambia según las aplicaciones para lo que se requiera la máquina, algunos países adoptan normativas para estandarizar la frecuencia de trabajo. En El Salvador la frecuencia de trabajo es de 60Hz, como en la mayoría de países de América latina, mientras que los países del continente europeo utilizan 50Hz. En la industria aeronáutica se requieren diseños de equipos livianos para llevar a bordo durante un vuelo, por lo que se utilizan frecuencias de trabajo en el orden de los 400Hz.

Hasta el momento se ha referido a la utilización de alternadores en aplicaciones que requieren la generación a gran escala, pero también es común utilizar alternadores a pequeña escala, a este grupo se le denominan electrógenos y son utilizados en plantas de emergencia, para los cuales se

citan algunos ejemplos, en los hospitales es un requerimiento que la energía eléctrica debe ser suministrada al equipo médico en todo momento, una desconexión o falla en el sistema eléctrico puede terminar con la vida del paciente. Otras aplicaciones importantes, donde es indispensable el suministro de energía son en centrales telefónicas, aeropuertos, centros de cómputos, para todos los ejemplos mencionados el eje del alternador en el equipo de emergencia se copla mecánicamente a motores de combustión, el principio del funcionamiento del acople, es activarse, cuando se detecta la falta de tensión en la red eléctrica, entonces al acople mencionado más todos los dispositivos de protección y de control que requiere, es a lo que hoy en día se le conoce como planta de emergencia. El sistema tiene aún más aplicaciones es utilizado cuando se ejecutan proyectos eléctricos en lugares remotos, o de difícil acceso como zonas rurales, utilizado en los sistemas de riego en la producción agrícola y granjas.

En el régimen de motor la máquina convierte energía eléctrica en mecánica, comportándose como motor síncrono y a diferencia del régimen anterior, este se utiliza en aplicaciones donde se requieran velocidades constantes, se aplica en accionamiento industrial. Algunos ejemplos se citan a continuación:

- ❖ Compresores, ventiladores de alta capacidad en las industrias químicas.
- ❖ Trituradoras, molinos, cintas transportadoras en la minería.
- ❖ Accionamiento de bombas en el tratamiento de aguas residuales.
- ❖ Compresores en la siderurgia.



a)



b)

Figura 2.7 a) Laminadora. b) Trituradora. (De la torre, Sf)

la principal ventaja frente a los motores asíncronos es la regulación del factor de potencia de trabajo evitando también la instalación de condensadores en la reducción de la potencia reactiva que absorbe la instalación.

Cuando se configura bajo un factor de potencia capacitivo, se suele asociar al funcionamiento de un condensador y es aprovechado en las centrales eléctricas de bombeo trabajando en dos modos de funcionamiento, durante el día funciona como alternador aprovechando el agua de los ríos, y durante la noche como generalmente se tiene menor demanda de energía, y es precisamente que el menor consumo de esta coincide con el valle de la curva de demanda, la máquina síncrona durante horas nocturnas funciona como motor, aprovechando energía eléctrica que sobra de centrales nucleares y térmicas, en las centrales hidroeléctricas en horarios nocturnos se suele bombear agua a embalses superiores, de manera de tener excedente de energía que serán aprovechados durante el día, como se ha mencionado el motor en este modo se asemeja su función al de un condensador, mejorando el factor de potencia de la red.

2.4 Sistemas de excitación

Es el encargado del suministro de corriente continua que necesita el alternador para regular la tensión de salida a niveles deseados, generalmente todo generador necesita un sistema de control mediante una corriente de excitación, que permita el ajuste de la tensión alterna generada. La evolución de los sistemas de excitación ha venido a mejorar el control de los alternadores, antiguamente estos sistemas eran controlados manualmente y la regulación de tensión de los alternadores se realizaba por medio de reóstatos conectados en el circuito de la excitatriz principal.

2.5 Tipos de sistemas de excitación

En base a la fuente de excitación utilizada, y se clasifican en:

- ❖ Sistemas de excitación rotativo, de corriente continua.
- ❖ Sistemas de excitación rotativo, de corriente alterna.
- ❖ Sistema de excitación estático.

Sistema de excitación rotativo de corriente continua (DC)

Este método de excitación es el más clásico y se muestra en la figura 1.8, la excitatriz es una fuente de corriente continua (dinamo con excitatriz tipo shunt), es decir un generador dc acoplado al mismo eje del alternador y que al motor de accionamiento, las tres máquinas acopladas al mismo eje mecánico están representadas en la figura 1.8 por medio de líneas punteadas, la salida se aplica al rotor del alternador por medio de los anillos deslizantes con sus correspondientes escobillas, a veces suele sustituirse todo o una parte de su excitación, por una excitatriz piloto con la finalidad de mejorar la rapidez de respuesta.

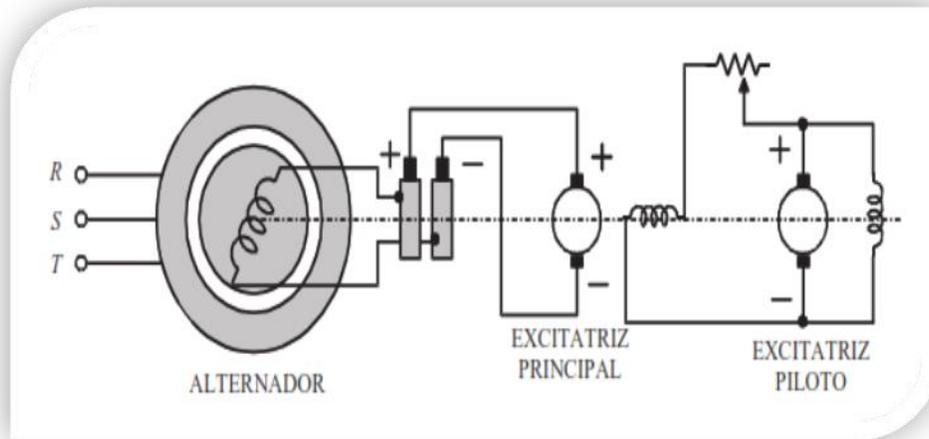


Figura 2.8 Sistema de excitación, con dinamo excitatriz. (Fraile Mora, Sexta edición)

La excitatriz principal necesita que el inductor se alimente de corriente continua por una segunda excitatriz más pequeña, por lo que se tiene una excitatriz principal y la excitatriz piloto también conocida como auxiliar, la excitatriz piloto es una máquina de corriente continua shunt y su inductor está conectado en paralelo con su inducido, por lo que se dice, que la máquina es autoexcitada ya que el inductor está alimentado por la tensión que se genera en su propio inducido y no necesita de ningún generador externo.

En máquinas pequeñas no se acostumbra a utilizar excitatriz piloto, y la excitación principal trabaja en forma de derivación shunt, alimentando directamente el inductor o campo del alternador, este sistema que utiliza excitatrices de corriente continua tiene dificultades, en primer lugar por el uso de las dinamos y los problemas de conmutación que tienen cuando el eje gira a grandes velocidades

luego, por requerir el uso del colector de anillos de la máquina síncrona y delgas, para las excitatrices de corriente continua los colectores delgas son delicados, es usual que fallen por lo que este sistema necesita mayor mantenimiento.

Este sistema es el más antiguo utilizado entre los años de 1920 y 1960 que luego fueron sustituidos por sistemas de excitación de corriente alterna a mediados de los años 60, pero que en la actualidad hay pocos generadores utilizando este sistema de excitación. En la tabla 2.3 se muestra un listado de características que tiene el sistema.

Sistema de excitación de corriente continua	
Características	<ul style="list-style-type: none"> ● Utiliza generadores de corriente continua (dinamos) como fuentes de excitación. Provee la corriente del rotor, a través de anillos deslizantes. ● La excitatriz, es impulsada por un motor o por el mismo eje del generador. ● La excitatriz puede ser, autoexcitada o con excitación separada. ● Con excitatriz autoexcitada, la salida de la excitatriz provee su propia tensión de campo. ● Con excitación separada, el campo de la excitatriz, es provisto por una excitatriz piloto (generador de imanes permanentes). ● Los reguladores de tensión para este sistema, utilizan desde reóstatos, hasta varias etapas de amplificación magnética o rotativa. ● Una máquina de corriente continua, provee cambios incrementales al campo de la excitatriz en una configuración reductor-elevador. ● Excitatriz autoexcitada, su salida provee el resto de su propio campo. ● Si el regulador esta fuera de servicio, la excitatriz es autoexcitada en forma manual a través de reóstatos de campo.

Tabla 2.3 Características de los sistemas de excitación de DC. (Kundur, Sf)

Excitación mediante excitatrices de corriente alterna (AC) con rectificador

Debido a los problemas en el sistema de excitación anterior, se desarrollaron nuevas alternativas en las que se utilizan excitatrices de corriente alterna con rectificador, una de las ventajas con respecto al sistema de excitación continuo es que este evita el uso de colectores delgas, en este sistema la excitatriz principal es un alternador síncrono con el inducido conectado a un rectificador de diodos no controlado, y la excitatriz piloto es una máquina síncrona de imanes permanentes, por lo que carece de colector de anillos y cuyo inducido está conectado a un rectificador controlado, generalmente las excitatrices piloto producen corriente alterna a frecuencias cerca de

los 400Hz, y la excitatriz principal a 50Hz. El sistema es mostrado en la figura 2.9. El rectificador mostrado en el sistema es un elemento de la electrónica moderna, que permite rectificar la tensión alterna transformándola a tensión continua, cuando se refiere a rectificador no controlado significa que no puede regular la tensión continua producida a la salida, mientras que es controlado cuando si es posible la regulación de la tensión que suministra, los rectificadores no controlados son fabricados con diodos, y los controlados utilizan elementos como tiristores, transistores.

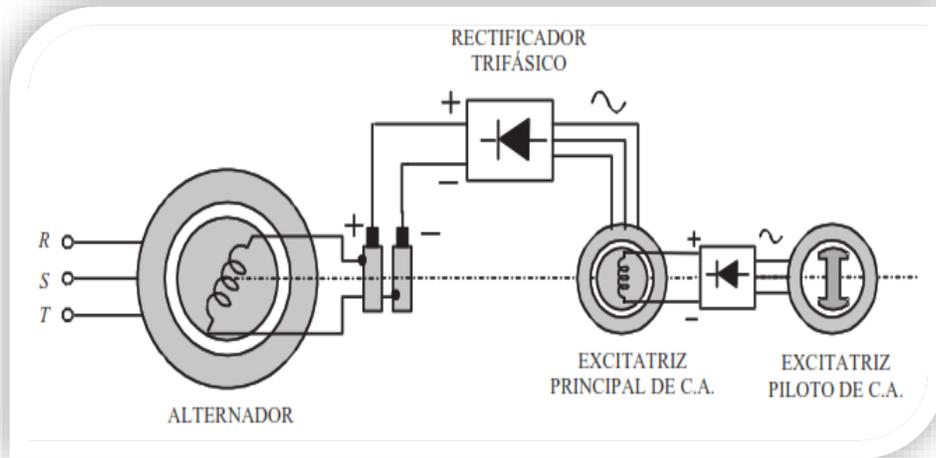


Figura 2.9 Sistema de excitación con diodos. (Fraile Mora, Sexta edición)

Para regular la corriente de excitación del alternador, se actúa sobre el rectificador controlado por la excitatriz piloto, este regula la tensión continua con que se alimenta el inductor de la excitatriz principal, a su vez controla la tensión alterna que esta última produce. La tensión continua con que se alimenta el inductor del alternador, controla su corriente de excitación y es proporcional a la tensión alterna que procede de la excitatriz principal, por lo tanto con el rectificador controlado de la excitatriz piloto se consigue un control electrónico de la excitación del alternador, que presenta varias ventajas respecto al sistema anterior, entre ellas mejor rendimiento un control más fino sobre la regulación de tensión, y la posibilidad de incorporar un sistema de control electrónico.

El sistema solo usa dos colectores de anillos los del alternador y los de la excitatriz principal ya no intervienen el colector de delgas, aunque se sigue utilizando colectores presenta ser un sistema más confiable que el anterior, el cual empleaba generadores de corriente continua (dinamos) y por consiguiente el uso de colectores delgas.

Como se ha dicho, los anillos rozantes, las escobillas, causan muchos problemas cuando son utilizados como medios por el cual se suministra la corriente continua hacia los devanados de campo, esto genera mayor cantidad de mantenimientos de la máquina por desgaste de las escobillas y la acumulación de suciedad, pueden causar pérdida de potencia en la máquina que tienen corrientes de campo muy grandes, a pesar de ello siguen siendo utilizados en todos los alternadores pequeños, por no haber otro método para suministrar corriente continua de campo que sea eficiente en cuanto a costos.

Un resumen de características, es mostrado en la tabla 2.4

sistema de excitación de corriente alterna	
Características	<ul style="list-style-type: none"> ● Utilizan maquinas rotativas AC (alternadores) como fuentes de excitación. ● Usualmente la excitatriz se encuentra, en el mismo eje del generador. ● La salida AC de la excitatriz es rectificada, para producir la corriente continua de campo del generador. ● El puente rectificador, puede ser controlado o no controlado. ● Los rectificadores, pueden ser estacionarios o rotativos. ● Las primeras implementaciones del regulador de tensión, utilizaban una combinación de amplificadores rotativos y magnéticos. ● Los sistemas más nuevos, utilizan reguladores de tensión con amplificadores electrónicos.

Tabla 2.4 Características de los sistemas de excitación AC. (Kundur, Sf)

Sistema de excitación estático

Para el caso de los sistemas descritos anteriormente se les denomina clásicos, y han sido sustituidos modernamente por los sistemas de excitación estáticos que utilizan varios dispositivos electrónicos como:

- ❖ Tiristores
- ❖ Diodos (Rectificadores)
- ❖ Amplificadores magnéticos
- ❖ Fusibles (como protección de diodos)

Los sistemas de excitación estáticos son utilizados en la actualidad por permitir el control de las excitatrices de los alternadores mediante la incorporación de reguladores electrónicos, se le llama

estático o estacionarios por utilizar únicamente dispositivos fijos, y no maquinas rotativas como alternadores y las dinamos que se usan en los sistemas de excitación que se mencionaron con anterioridad, esto sistemas han logrado ventajas significativas como menor oscilación en la tensión del alternador, y mayor velocidad de respuesta.

La energía es suministrada a los rectificadores y se hace desde el alternador principal, generalmente se acostumbra a conectar un transformador a la salida de las terminales del alternador, con el fin de reducir la tensión a aun nivel apropiado para los componentes electrónicos, el rectificador puede ser controlado o no controlado, y será el encargado de suministrar la corriente de excitación de forma directa a la bobina de campo del alternador por medio de anillos colectores.

Los sistemas que más se utilizan son:

1) Sistemas con rectificadores controlados, por fuente de potencia.

En este sistema la potencia se suministra a través de un transformador desde los terminales del alternador o bus auxiliar, y se regula por medio de rectificadores controlados, la tensión de salida máxima de la excitatriz depende del voltaje de entrada de corriente alterna, el sistema es mostrado en la figura 2.10, si durante una condición en la que haya una reducción de tensión en las terminales de salida del generador (una falla), entonces como el sistema es retroalimentado provoca una disminución en la tensión de la excitatriz, esto representa una limitante del sistema hay una respuesta instantánea en la corriente inducida en la bobina de campo posterior a la falla, entre las ventajas que presenta el sistema son la facilidad de mantenimientos, y que el sistema presenta ser bastante económico y eficiente para aquellos alternadores conectados a grandes sistemas de potencia.

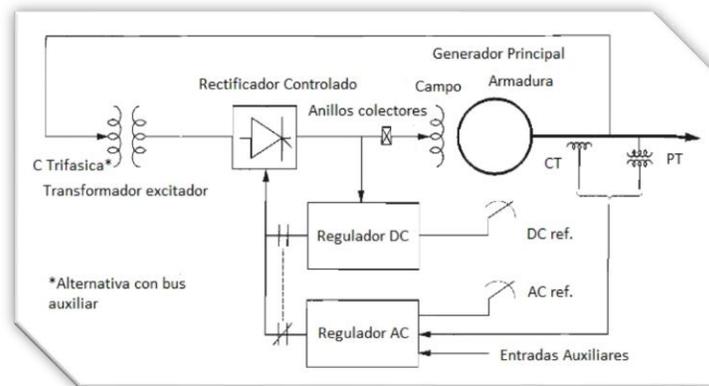


Figura 2.10 Sistemas de excitación estático, alimentado por transformador. (Kundur, Sf)

2) Sistema rectificador, de fuente compuesta.

La potencia en el sistema de excitación se forma usando la corriente y tensión del alternador principal, esto es logrado por medio de un transformador de potencial (PPT) y un transformador de corriente saturable (SCT). De forma alternativa se puede combinar estas fuentes de tensión y corriente en un solo transformador de excitación, al que se denomina como transformador de potencial de corriente saturable (SCPT), el sistema es mostrado en la figura 2.11.

A través de la saturación controlada del transformador de excitación, es como el regulador mantiene un control de la salida del excitador, si el alternador no suministra ninguna carga la corriente en el bobinado inducido será de cero, y la fuente de potencial será la que suministra toda la potencia de excitación, pero bajo cargas parte de la potencia de excitación se deriva de la corriente del alternador. Para el caso de presentarse una falla donde la tensión del alternador sea muy pequeña, la entrada de corriente permite que el excitador le proporcione una alta capacidad de potencia de campo.

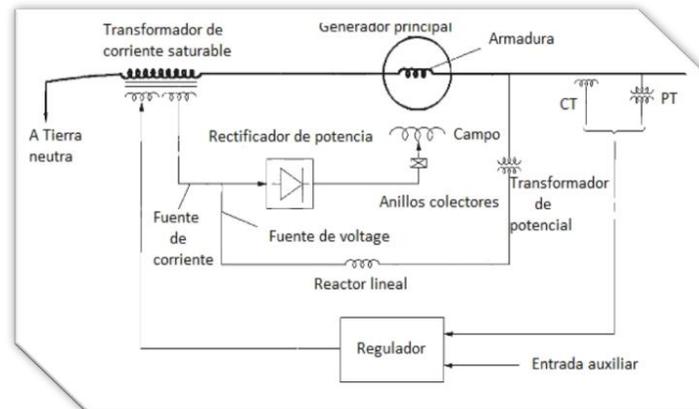


Figura 2.11 Sistema de excitación, de rectificador de fuente compuesta. (Kundur, Sf)

3) Sistemas de excitación, con rectificador controlado-compuesto.

Los rectificadores son controlados a la salida del circuito excitador, y la combinación de las fuentes derivadas de tensión y corriente dentro del estator del generador proporcionan potencia de excitación, como resultado de esto se tiene un sistema estático de excitación con mejoras significativas en la respuesta inicial, con capacidad de responder de forma forzada ante fallas. Un ejemplo es el sistema de excitación GENERREX de fuente compuesta, en la figura 2.12 se muestra el diagrama unifilar del sistema.

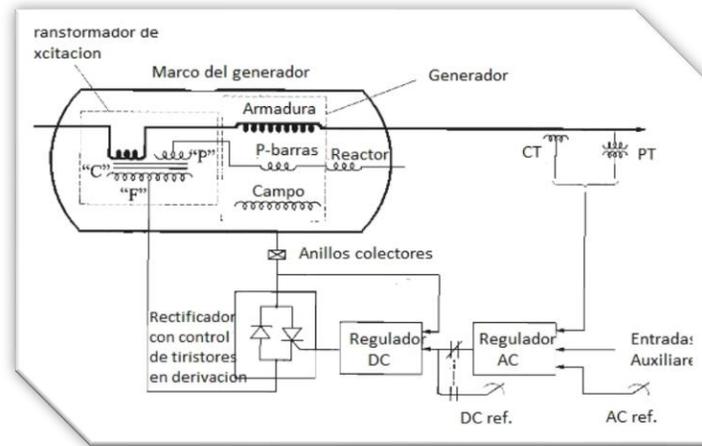


Figura 2.12 GENERREX sistema de excitación, con rectificador controlado-compuesto. (Kundur, Sf)

La fuente de tensión está compuesta por un conjunto de devanados trifásicos, que además están colocados en tres ranuras en el estator del alternador y un reactor lineal en serie, la fuente de corriente es obtenida a través del transformador de corriente que está montado a un extremo neutro del devanado del estator, las fuentes se combinan con la acción del transformador y la salida de CA resultante es rectificadas con los dispositivos semiconductores estacionarios de potencia, el control del sistema se realiza por medio de tiristores con diodos conectados formando un puente de derivación. El regulador estático de voltaje AC es el encargado de controlar a los tiristores y así regular la excitación de la bobina de campo del alternador, en cuanto al transformador este estaría constituido por tres bobinados monofásicos un devanado primario de corriente (C) y potencial (P) y un devanado secundario de salida (F). Cuando el sistema está en presencia de una falla la corriente producida por la falla fluirá a través del devanado 'C' del transformador de excitación, que a su vez proporcionará la potencia en la bobina de campo necesaria cuando la tensión del generador se vea disminuida.

FIELD-FLASHING de sistema de excitación estática

Debido a que la fuente de potencia del sistema de excitación estático es el alternador este es en efecto auto-excitado, el alternador no puede producir ninguna tensión a la salida hasta que haya corriente en la bobina de campo, será necesario utilizar otra fuente de potencia (fuente externa) durante unos pocos segundos, esto para inicializar la provisión de corriente de campo y energizar el alternador, a este proceso se le conoce como Field-Flashing también es usual usar como fuente Field-Flashing un sistema de baterías, también los tiristores continúan siendo utilizados en la etapa

de potencia, las ventajas que se destacan en los sistemas de excitación estáticos es la introducción de nuevas tecnologías digitales en las funciones de control y protección, la lógica en el sistema es confiable y de menor costo frente a los antiguos sistemas de excitación mayor flexibilidad permitiendo implementar estrategias de control más complejas, y a interconexión con otros sistemas de control y de protección del alternador.

CAPITULO III: Eficiencia del motor trifásico de inducción.

Normativas internacionales para la medición y determinación de la eficiencia en motores trifásicos de inducción.

Los fabricantes de motores proporcionan un valor de eficiencia (rendimiento) del motor, que son determinados de acuerdo a normativas internacionales, a continuación, se mencionan las normas más utilizadas:

- ❖ **IEC 60034-2 (Normativa Europea)**
- ❖ **IEC 61972 (Normativa Europea)**
- ❖ **IEEE Std.112 (Normativa Americana)**

En el presente trabajo de graduación, solo hace uso de la normativa americana IEEE Std.112.

3.1 Determinación de la eficiencia mediante el método directo del deslizamiento según la norma STD IEEE STD 739¹

Un método rápido y efectivo para determinar un valor aproximado y aceptable de eficiencia en motores trifásicos de inducción, es el método de deslizamiento, método que regularmente utilizan los auditores de energía para evaluar el parámetro eficiencia de un motor bajo carga o en operación instalado en el sitio de trabajo, esta metodología se aplica cuando no resulta factible desmontar el motor del sitio de trabajo, es decir para evitar pérdidas económicas en la producción industrial o dejar de prestar algún servicio a causa de la desconexión del motor, este método es considerado directo para obtener eficiencia y lo respalda la norma IEEE Std. 739.

Esta metodología es válida bajo las condiciones de tensión y frecuencia nominales y el desbalance de la tensión no supere el 0.5% a una temperatura de 25°C. Con el cumplimiento de las condiciones mencionadas, inicialmente se toma la medición de la velocidad de operación del motor a la carga real a la cual se ve sometido el motor, de tal manera de obtener el valor del deslizamiento en

operación para luego dividirlo con el valor del deslizamiento a plena carga, que se especifica siempre como un dato conocido en la placa de característica del motor, con la relación de los deslizamientos se establece un porcentaje de carga de operación, al cual se debe conocer la potencia en el eje del motor que está desarrollando a la salida, basados en linealidad que presenta el deslizamiento respecto al porcentaje de carga, como dato adicional se considera el deslizamiento lineal en los motores desde el 10% hasta 110% de la carga, luego con equipo de medición se debe muestrear la potencia, tensión y corriente en las terminales de entrada del motor, con las mediciones efectuadas ya es posible calcular la eficiencia de la máquina, haciendo la relación directa de la potencia activa de la salida, entre la potencia activa de la entrada, debido a la sencillez del método a su gran aplicación práctica y a la relación de potencias que es la forma en como el método determina la eficiencia, es la razón por la cual es considerada una metodología directa para definir el valor aproximado de la eficiencia de un motor trifásico de inducción.

Los métodos directos para determinar eficiencia no son estudiados en este trabajo de graduación por lo que no se entrara en mayores detalles, sin embargo, se menciona el método por su gran aplicación práctica que tiene en el campo industrial, si se tiene interés de estudiar la eficiencia pero obtenida a través de métodos directos, y particularmente estudiar el método de deslizamiento para motores ya instalados en zonas de trabajo, que incluso su velocidad puede estar siendo controlada por medio de variadores de frecuencia, recomendamos al lector remitirse a la norma IEEE Std. 739.

3.2 Determinación de la eficiencia según la normativa de IEEE STD 112-2004.

Existen una variedad de métodos para determinar la eficiencia de un motor, pero no es sencillo la aplicación de estos a nivel experimental. Existe el (IEEE STD112, 2004), método y prueba, la cual describe los métodos para la determinación de la eficiencia en motores eléctricos. Estos métodos se utilizan para diagnósticos energéticos o evaluación de motores, es necesario saber el desempeño de los motores, pero dependiendo la metodología escogida, habrá que valorar si es la más adecuada, por ejemplo, algunos métodos requieren de sacar al motor de operación y trasladarlo hacia un laboratorio de pruebas, lo que es poco práctico y trae pérdidas económicas. Sin embargo,

¹ Norma STD IEEE STD 739-1995 (Revisión IEEE Std 739-1989)

hay metodologías directas que pueden determinar la eficiencia incluso si el motor está en operación.

La norma IEEE Std.112 proporciona el procedimiento de prueba básico para evaluar el rendimiento de un motor o generador de inducción polifásico de cualquier tamaño.

A continuación, algunos aspectos importantes que recalcar de la norma porque son aspectos que se tomarán en cuenta más adelante en la toma y análisis de resultados:

❖ **Desequilibrio de tensión.**

El desequilibrio de voltaje no debe exceder el 0,5%. El porcentaje de desequilibrio de voltaje es igual a 100 veces la desviación máxima de voltaje del voltaje promedio dividido por el voltaje promedio.

Ejemplo: Con voltajes de línea de 220 V, 215 V y 210 V, el voltaje promedio es 215 V, la desviación máxima del promedio es 5 y el desequilibrio es igual a $(100 \times 5) / 215 = 2,3\%$.

No se pueden tolerar cambios rápidos en la frecuencia durante la prueba porque tales variaciones afectan no solo a la máquina que se está probando, sino también a los dispositivos de medición de salida. Las variaciones de frecuencia durante un ensayo no deberán superar el 0,33 % de la frecuencia media.

❖ **Frecuencia.**

Para pruebas generales, la frecuencia debe estar dentro de $\pm 0,5\%$ del valor requerido para la prueba que se está realizando, a menos que se especifique lo contrario. Cualquier desviación de la frecuencia especificada durante la prueba afecta directamente la eficiencia obtenida con los métodos de prueba de eficiencia A, B y B1. Cuando se utilizan estos métodos, la frecuencia debe estar dentro de $\pm 0,1\%$ del valor de prueba especificado.

❖ **Voltaje.**

Cada uno de los voltajes de línea a línea se medirá con los cables de señal conectados a los terminales de la máquina. Si las condiciones locales no permiten tales conexiones, se evaluará la diferencia entre el voltaje en las terminales de la máquina y el punto de medición y se corregirán

las lecturas. El promedio aritmético se utilizará para calcular el rendimiento de la máquina a partir de los datos de prueba.

❖ **Corriente.**

Se medirán las corrientes de línea a cada fase del motor y se utilizará el valor promedio aritmético para calcular el rendimiento de la máquina a partir de los datos de prueba.

Tipos de pruebas.

- 1) **Pruebas de marcha en vacío:** en cuales se realizan pruebas de funcionamiento sin carga para determinar las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por efecto del viento y por fricción.
- 2) **Pruebas con carga:** Se realizan pruebas con carga para la determinación de eficiencia, factor de potencia, velocidad, corriente y aumento de temperatura. Para todas las pruebas con carga, la máquina debe estar correctamente alineada y bien sujeta. Para que las lecturas se utilicen en las determinaciones de rendimiento, el aumento de temperatura de la máquina debe tener un valor entre el 50 % y el 120 % del aumento de temperatura nominal. El procedimiento habitual es tomar lecturas con cargas más altas primero y luego seguir con lecturas con cargas más bajas.
- 3) **Ensayos con rotor bloqueado:** Debe reconocerse que la prueba de máquinas de inducción en condiciones de rotor bloqueado con potencia polifásica implica esfuerzos mecánicos elevados y altas tasas de calentamiento.

Por lo tanto, es necesario que:

- a) Los medios mecánicos para asegurar la máquina y bloquear el rotor tienen la resistencia adecuada para evitar posibles lesiones al personal o daños al equipo.
- b) El sentido de giro se establece antes de la prueba.
- c) La máquina está aproximadamente a temperatura ambiente antes de comenzar la prueba.
- d) Las lecturas de corriente y torque deben tomarse lo más rápido posible y, para obtener valores representativos, la temperatura de la máquina no debe exceder el

aumento de temperatura nominal más 40°C. Las lecturas para cualquier punto se tomarán dentro de los 5 segundos posteriores a la aplicación del voltaje.

3.3 Métodos de prueba de eficiencia. ²

Los múltiples métodos de determinación de la eficiencia y las pérdidas se identifican a continuación:

- 1) **Método A:** De entrada y salida.
- 2) **Método B:** Entrada-salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de perdidas por cargas dispersas.
- 3) **Método B1:** Entrada-salida con segregación de perdidas, medición indirecta de perdidas por carga parasita y temperatura supuesta.
- 4) **Método C:** Duplicado de máquinas con segregación de pérdidas y medición indirecta de perdidas por cargas dispersas.
- 5) **Método E:** Medida de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medida directa de perdidas por carga parasita.
- 6) **Método E1:** Medida de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y valor asumido de perdida por carga parasita.
- 7) **Método F:** Circuito equivalente con medición directa de perdida por carga parasita.
- 8) **Método F1:** Circuito equivalente con valor asumido de perdida por carga parasita.
- 9) **Método C/F:** Circuito equivalente calibrado según el punto de carga del Método C con medición indirecta de perdida por carga parasita.
- 10) **Método E/F:** Circuito equivalente calibrado según el punto de carga del Método E con medición directa de la perdida por carga parasita.
- 11) **Método E1/F1:** Circuito equivalente calibrado según el punto de carga del Método E con un valor supuesto de dispersión.

Guía para escoger el método de la prueba para encontrar la eficiencia. ²

Generalmente el método de entrada y salida (método A) se limita a las maquinas con caballos de potencia fraccionarios. A menos que se especifique lo contrario, motores horizontales, polifásicos, jaula de ardilla con valores de 1-250 Hp, (1-190 kilovatios) se deben probar por el método de entrada y salida con la separación de las perdidas (método B).

El método B se debe seleccionar cuando el valor para cada uno de los componentes de las perdidas en el motor está dado o cuando la precisión y la capacidad de repetición de este método se requiere. Los motores verticales en el rango de 1-250 Hp, (1-190 kilovatios) se deben también probar por el método B.

Si por la construcción de los cojinetes no se permite los motores verticales en este rango de Hp se pueden probar por los métodos E, E1, F o F1. Los motores polifásicos en su mayoría son de 250 Hp, se pueden probar por los métodos B, C, E, E1, F, o F1 dependiendo de la disponibilidad y la facilidad de prueba requerida.

3.4 Clasificación de métodos para la estimación de la eficiencia de motores de inducción.

Para evitar pérdidas económicas por fallas inesperadas en los motores eléctricos es necesario realizar monitoreos del estado de operación de los motores, además de mantenimientos de sus sistemas de control, la monitorización y mantenimientos de forma regular genera un alto grado de fiabilidad, la estimación de la eficiencia forma parte de los monitoreos más comunes, aunque se debe tomar en cuenta las condiciones en las que se encuentra el motor es decir si está en servicio o no, esto para seleccionar el método y una adecuada recopilación de datos y así poder obtener un valor más preciso de la eficiencia del motor, hay más de 20 métodos que se consideran lo más utilizados y se clasifican en nueve categorías según sus propiedades físicas, seis categorías de estos métodos están más relacionadas con las pruebas cuando los motores están en servicio, la dificultad de aplicación del método generalmente depende de las pruebas y mediciones requeridas, el nivel de intrusión y la precisión promedio, y hay consideraciones adicionales para seleccionar el método de estimación de la eficiencia en motores reparados por ejemplo hay aplicaciones que detectan fallas de giro del devanado del estator, barras rotas del rotor y cojinetes desgastados, en estos casos se escogen técnicas de análisis espectrales basadas en la corriente, que requieren que las formas

de onda de la corriente del estator sean muestreadas y recogidas, teniendo los datos de corriente registrados el método más adecuado sería uno que utilice la corriente del estator.

Las mediciones requeridas o pruebas adicionales para cada método son diferentes, pero la mayoría requieren mediciones de la tensión de línea de entrada y corriente de línea, algunos métodos requieren de la placa de identificación (voltaje nominal, corriente, potencia, velocidad etc.), otros requieren la medición de la resistencia del estator o la velocidad del rotor, son considerados como obstáculos para varios métodos.

3.5 Definición de pérdidas y eficiencia del motor.

Las pérdidas totales en el motor son de interés aquí, ya que encontrar la eficiencia es equivalente a encontrar las pérdidas totales. IEEE Std-112 parte 5 define cinco tipos de pérdidas en motores de inducción.

$$\begin{aligned} W_{Losses} &= P_{input} - P_{output} \\ &= W_S + W_r + W_{core} + W_{fw} + W_{LL} \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde P_{input} y P_{output} son las potencias de entrada y salida del motor, respectivamente, y W_{Losses} es la pérdida total en el motor. La pérdida de cobre del estator W_S es la pérdida en los devanados del estator. Equivale a $3 \times I^2 R$ para un motor trifásico, donde I es la corriente rms medida o calculada por terminal de línea a una carga especificada; y R es la resistencia de CC promedio entre dos terminales de línea cualesquiera corregidos a la temperatura especificada. Para un perfecto motor equilibrado, R es el doble de R_s . La pérdida de cobre del rotor W_r es la pérdida en los devanados del rotor. incluidas las pérdidas por contacto de las escobillas para motores de rotor bobinado. Eso debe determinarse a partir del deslizamiento por unidad utilizando.

$$W_r = (P_{input} - W_S + W_{core}) \times S \quad (3.2)$$

donde S es el deslizamiento. La pérdida de núcleo W_{core} se debe a la histéresis de magnetización y las corrientes parásitas en el hierro. Varía aproximadamente con el cuadrado del voltaje de entrada, pero para el voltaje de entrada fijo, permanece aproximadamente constante desde sin carga hasta la carga completa. Por lo general, se mide a partir de la prueba sin carga.

Pérdida por fricción y viento W_{fw} es la pérdida de rotación mecánica debida a la fricción y al viento. También es casi constante desde sin carga hasta carga completa y generalmente se mide a partir de la prueba sin carga.

La pérdida de carga parásita W_{LL} es la pérdida en un motor que no se toma en cuenta por la suma de W_S , W_r , W_{core} y W_{fw} . Se puede dividir en dos partes: W_{LL} de pérdida de carga parásita del estator y W_{LLr} de pérdida de carga parásita del rotor.

La eficiencia del motor η se define entonces como:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% = 100\% - \frac{W_{losses}}{P_{input}} \times 100\% \quad (3.3)$$

3.6 Métodos de estimación de la eficiencia.

Los métodos se clasifican de acuerdo a sus niveles de intrusión y precisión, el nivel de intrusión está determinado por el tipo de datos requeridos por cada método, el costo asociado con la instalación de equipo y el proceso de recopilación de datos, y la planificación de la operación del motor, la precisión del método se puede evaluar comparándola con una medición de eficiencia directa.

A. METODOS DE PLACA DE IDENTIFICACION.

Esta clasificación se considera la menos intrusiva y consiste en obtener la información del motor directamente de la placa característica. En esta clasificación se tienen dos métodos:

1. Método estándar de la placa de identificación.

En el que se supone que la eficiencia es constante e igual al valor de la placa característica, sin embargo, este método tiene bien poca precisión, el problema se presenta cuando en los datos de placa del motor no se proporcionen de acuerdo con el método B de la IEEE Std 112, los métodos de estimación por placa característica fallan cuando el motor se ha rebobinado ya que dejan de ser válidos.

2. Método I, II de Volgelsang y Benning (V&B).

Los métodos I, II de V&B son variaciones del método estándar de la placa de identificación y se utilizan en instrumento comercial dedicado al análisis de motores, el método I produce ($\pm 1\%$ de error) y requiere de tres pruebas, sin carga, carga normal y sin alimentación. El método

II produce ($\pm 3\%$ de error) no requiere la prueba sin carga, si no que utiliza los datos de la placa de identificación del motor, en consecuencia, se reduce la precisión del método.

B. METODOS DE DESLIZAMIENTO.

Los métodos de deslizamiento se basan en la medición de la velocidad del motor, y resultan ser los más sencillos, considerados métodos directos por su fácil aplicación ya que estima rápidamente la eficiencia del motor en operación, en esta clasificación existen tres métodos:

1. Método de deslizamiento estándar.

Se basa en suponer que el porcentaje de carga es proporcional a la relación entre el deslizamiento medido y el deslizamiento a plena carga. Por tanto, la eficiencia del motor se aproxima utilizando la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{Slip}{Slip_{rated}} \times \frac{P_{out,rated}}{P_{input}} \quad (3.4)$$

Sin embargo, el error proviene del hecho de que la relación de deslizamiento representa el porcentaje de carga y la eficiencia no es igual al porcentaje de carga.

2. Método de deslizamiento modificado de Ontario Hydro.

El método de deslizamiento estándar se mejora corrigiendo la velocidad nominal de la placa de características del motor para variaciones de voltaje, especialmente cuando la curva de eficiencia – carga no es plana, sin embargo, la estimación aún podría tener un error relativamente grande, ya que se permite que la velocidad de la placa de identificación se desvíe hasta un 20% de la velocidad nominal real.

$$\eta = \frac{Slip}{Slip_{rated}} \times \frac{P_{output,rated}}{P_{input}} \times \left(\frac{V}{V_{rated}} \right)^2 \quad (3.5)$$

3. Método de deslizamiento del límite superior.

Como el método de estimación de la eficiencia más simple, el método de deslizamiento del límite superior original asume que W_s es cero.

$$\eta = (1 - Slip) \quad (3.6)$$

Se ha observado que W_s cuenta alrededor del 40% de las pérdidas totales en un motor típico. Por lo tanto, este método puede ser mejorado al incluir W_s .

$$\eta \leq (1 - slip) \left(1 - \frac{3I^2 R_s}{P_{input}} \right) \quad (3.7)$$

La estimación de la eficiencia resultante es siempre mayor que la eficiencia real, ya que ignora W_r , W_{core} , W_{fw} y W_{LL} .

C. METODOS ACTUALES.

Al igual que los métodos de deslizamiento, los métodos actuales utilizan mediciones mínimas y datos del fabricante para estimar la eficiencia, su principal ventaja es la sencillez.

1. Método de corriente estándar.

En este caso, la eficiencia del motor se aproxima con la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{I}{I_{rated}} \times \frac{P_{output,rated}}{P_{input}}$$

$$\eta = \frac{2I - I_{no\ load}}{2I_{rated} - I_{no\ load}} \times \frac{P_{output,rated}}{P_{input}} \quad (3.8)$$

Asumiendo que el porcentaje de carga es proporcional a la relación entre la corriente medida y la corriente a plena carga. En realidad, la curva de carga de corriente es ligeramente no lineal. Esto se considera en un método actual mejorado.

D. METODOS DE CIRCUITO EQUIVALENTE.

La eficiencia de un motor de inducción se puede calcular a partir de su circuito eléctrico equivalente. Estos métodos pueden proporcionar una estimación de la eficiencia para un motor que funciona en condiciones de carga distintas de aquellas en las que se realizan las mediciones.

1. Método de circuito equivalente estándar (IEEE Std 112 Método F/F1).

El método IEEE Std-112 F / F1 es el método estándar de circuito equivalente. Requiere del cálculo de la impedancia.

2. Método F modificado de Ontario Hydro (OHMF).

Ontario Hydro propone una versión modificada del método F1 IEEE Std-112. Utiliza un circuito equivalente ligeramente diferente: la impedancia de magnetización se toma como una combinación en serie de resistencia e inductancia en lugar de la combinación en paralelo estándar. No se requiere una prueba de voltaje variable, pero se deben ejecutar pruebas de carga completa y sin carga a voltaje nominal. El voltaje de línea, la potencia de entrada, la corriente de línea, el factor de potencia y la resistencia del estator se miden mientras se opera sin carga y a la máxima carga. El deslizamiento también se mide a plena carga.

3. Método de circuito equivalente de placa de identificación (ORMEL96).

Este método deriva el circuito equivalente del motor de la de los datos de la placa de características y el valor de la resistencia del estator. Se inserta una resistencia parásita en el circuito del rotor para tener en cuenta la pérdida de carga parásita. Solo se mide en línea la velocidad del rotor. La resistencia del estator puede estimarse a partir de los datos de la placa de identificación, aunque la precisión de la estimación de la eficiencia podría aumentarse sustancialmente si se puede determinar con precisión. El método ORMEL96 también tiene un modo avanzado, que permite al usuario ajustar ciertos "parámetros ajustables".

Es un método de baja intrusión, sin embargo, los parámetros o el circuito equivalente se resuelve a partir de la condición de carga nominal imaginaria y la condición de rotor bloqueado, que dependen completamente en la información de la placa de identificación del motor y puede tener hasta un 20% inexactitud. Debido a su inherente bajo nivel de intrusión y buena precisión (dentro de $\pm 4\%$ de error), el método ORMEL96 es considerado como uno de los cuatro métodos candidatos para aplicaciones de estimación de eficiencia de motores en operación y monitoreo de condiciones.

4. Método del asistente de eficiencia del motor de Rockwell (RMEW).

Rockwell Reliance propone otro método interesante basado en circuitos equivalentes y lo utiliza como estimador de eficiencia en su producto "Motor Efficiency Wizard". Este método calcula los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción estándar utilizando datos de dos puntos de operación de carga diferentes. Requiere mediciones de la resistencia del estator y la temperatura del devanado del estator. Además, la solución de los parámetros del motor requiere el valor real de la reactancia de fuga del estator, que no está disponible para pruebas en servicio. Además, Los

parámetros del motor se calculan utilizando la tensión y la corriente del estator. los armónicos en la fuente de alimentación no son considerados.

Los resultados experimentales demuestran una alta precisión de $\pm 1\%$ de errores. Aunque esta precisión parece ser excesiva las pruebas de medición, sin carga, de voltaje variable, de rotor extraído y de rotación inversa. Estas pruebas son demasiado intrusivas y poco prácticas para el monitoreo en servicio, aunque el método puede ser bastante preciso. Este método se menciona aquí principalmente como base para otros métodos modificados de acuerdo con su naturaleza física, este método todavía se considera un candidato para la estimación de la eficiencia del motor en operación.

5. Método de rotor bloqueado.

Este método utiliza un circuito equivalente para calcular la eficiencia. Los parámetros del circuito se obtienen a partir de pruebas de rotor bloqueado. También se deben desarrollar pruebas adicionales, una prueba sin carga, y una prueba óhmica. Estas pruebas hacen de este un método muy intrusivo.

6. Método de respuesta de frecuencia en reposo.

El circuito equivalente de este método tiene dos bucles de rotor. Los parámetros del circuito se obtienen midiendo la impedancia del motor en un rango de frecuencia de 0.01 Hz a 500 Hz, con su rotor estacionario. La principal ventaja de este método es que no se requiere la prueba sin carga de bajo voltaje. Sin embargo, sigue siendo inherentemente un método de alta intrusión.

E. METODOS DE PERDIDAS SEGREGADAS.

Estos métodos son más sencillos porque simplemente estiman (segregan) cada componente de pérdida (W_s , W_r , W_{core} , W_{fw} y W_{LL}). Estos métodos son generalmente muy precisos (dentro de $\pm 2\%$ de error), aunque algunos de ellos también son bastante complejos e intrusivos, mientras que otros se basan en valores empíricos para estimar algunas de las pérdidas.

1. Método de pérdida segregada (IEEE Std 112 Método E1).

El método IEEE Std-112 E1 es el método estándar de pérdida segregada. El método E1 especifica un valor asumido para la pérdida por carga parásita a carga nominal para motores de diferentes tamaños, como se muestra en la Tabla 3.1. Al igual que con el método F1 de IEEE Std-112, no

está diseñado para pruebas en operación, ya que se requieren pruebas sin carga, de voltaje variable, de rotor extraído y de rotación inversa. Se enumera aquí principalmente como base para otros métodos modificados.

Machine Rating		Stray load loss percent of rated output
1-125 hp	1-90 kW	1.8%
126-500 hp	91-375 kW	1.5%
501-2499 hp	376-1850 kW	1.2%
2500 hp and up	1851 kW and up	0.9%

Tabla 3.1 porcentaje de las perdidas por carga parasita de acuerdo a la potencia del motor.

2. Método E modificado Ontario Hydro (OHME).

El método IEEE Std-112 E1 se simplifica asumiendo que las pérdidas combinadas de viento, fricción y núcleo ($W_{fw} + W_{core}$) son 3,5% -4,2% de la potencia de entrada nominal. La pérdida por carga parásita también se estima a partir de la Tabla 3.1. Este método se puede simplificar aún más utilizando un valor supuesto de 0,8 para el factor de potencia nominal. La resistencia del estator se estima en base a una aproximación simple, usando la corriente del motor para estimar el aumento de temperatura. Las únicas otras medidas necesarias son la potencia de entrada y la velocidad del rotor. Debido a su bajo nivel de intrusión y buena precisión (dentro de $\pm 2\%$ -3% de error), se sugiere el método OHME como otro candidato para la estimación de la eficiencia que se encuentren en operación.

F. METODOS DE TORSION.

La eficiencia del motor se puede definir con la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{T_{shaft} \times \omega_r}{P_{input}} = \frac{T_{air\ gap} \times \omega_r - W_{fw} - W_{LLr}}{P_{input}} \quad (3.9)$$

En términos del par del eje T_{shaft} , el par de entrehierro (AGT) $T_{air\ gap}$ y la velocidad del rotor ω_r . Con P_{input} y ω_r medidos o estimados, la eficiencia se puede determinar fácilmente si se conoce T_{shaft} . Este es el principio básico de todos los métodos de torque.

1. Método AGT.

El método AGT calcula el AGT usando la siguiente ecuación.

$$T_{air\ gap} = \frac{poles}{2\sqrt{3}} \left\{ (i_A - i_B) \times \int [v_{CA} - R_s(i_C - i_A)] dt - (i_C - i_A) \times \int [v_{AB} - R_s(i_A - i_B)] dt \right\} \quad (3.10)$$

donde *poles* es el número de polos, i_A , i_B e i_C son las tres corrientes de línea, y v_{CA} y v_{AB} son los dos voltajes de línea. Una ventaja significativa de este método es que considera las pérdidas asociadas a los desequilibrios en las tensiones y corrientes, lo que refleja la realidad de una planta industrial. Sin embargo, requiere una prueba sin carga. Debido a su precisión extremadamente alta (dentro de un error de $\pm 0.5\%$), este método es bueno para el monitoreo en línea. El alto nivel de intrusión es el principal inconveniente del método AGT original.

El método calcula a partir de los voltajes instantáneos de línea de entrada del motor y las corrientes de línea. Las pérdidas W_{fW} y W_{LLr} se obtienen de la prueba sin carga. Finalmente, la eficiencia del motor se calcula usando la ecuación 3.9.

2. Método de torsión del eje.

Como el más sencillo de estos enfoques, este método mide el par del eje y la velocidad del rotor (y, por tanto, la potencia de salida) directamente desde el eje, sin necesidad de calcular las pérdidas. Ofrece la evaluación de eficiencia de campo más precisa, pero también es muy intrusivo. Además, el alto costo de los transductores de par hace que este método no sea aceptable para la mayoría de las aplicaciones industriales.

Los detalles de las otras tres categorías de métodos de estimación de la eficiencia se omiten aquí para simplificar, ya que son combinaciones de los métodos discutidos anteriormente o métodos específicos de producto que no son de interés aquí.

finalmente, resumido y comparado en la Tabla 3.2 se encuentran todos los métodos estudiados. En general, Cuanto más intrusivo es el método, más precisa es la estimación de la eficiencia.

Motor Efficiency Estimation Methods	Tests and Measurements/Estimations Required								Performance	
	No Load	Full Load	Un-power	Variable Volt/Freq	Speed	Torque	Nameplate Info	Stator Resistance	Intrusion Level	Anticipated Error
Standard Nameplate Method	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Low	10% [3]
V&B Method I	Yes	No	Yes	No	Measure	No	No	Measure	High	N/A
V&B Method II	No	No	Yes	No	Measure	No	Yes	Measure	Medium	2.5% [5]
Standard Slip Method	No	No	Yes	No	Measure	No	Yes	Measure	Low	7% [3]
Upper Bound Slip Method	Yes	No	Yes	No	Measure	No	Yes	Measure	Medium	8% [5]
Standard Current Method	Yes	No	No	No	No	No	Yes	No	Medium	6% [3]
IEEE Std-112 Method F1	Yes	No	Yes	Yes	Measure	No	Yes	Measure	High	5% [3]
ORMEL96 Method	No	No	Optional	No	Measure	No	Yes	Optional	Low	4% [4]
Rockwell Eff. Wizard Method	Optional	No	No	No	Measure	No	Yes	Measure	Medium	1% [14]
Locked Rotor Method	Yes	No	No	Yes	Measure	No	Yes	No	High	N/A
Standstill Freq. Resp. Method	Yes	No	Yes	Yes	Measure	No	No	Measure	High	N/A
IEEE Std-112 Method E1	Yes	Yes	Yes	Yes	Measure	No	Yes	Measure	High	3% [3]
OHME Method	No	No	No	No	Measure	No	Yes	Measure	Medium	2-3% [4]
Air-gap Torque Method	Yes	No	No	No	Measure	Estimate	Yes	Measure	High	0.5% [4]
Shaft Torque Method	No	No	No	No	Measure	Measure	No	No	High	< 0.5% [3]

Tabla 3.2 Comparación de cada método de acuerdo al nivel de intrusión.

3.7 Pruebas de motor trifásico de inducción.

Prueba de rotor bloqueado

El ensayo de rotor bloqueado es otra prueba complementaria a la prueba óhmica y de vacío que se mencionaron con anterioridad, en general todas las pruebas son importantes y necesarias para determinar los parámetros del circuito equivalente, el análisis de la máquina a través del circuito equivalente, es desarrollado cuando se busca determinar el desempeño del motor de inducción, y la prueba de rotor bloqueado provee información sobre las impedancias de dispersión, las conexiones para llevar a cabo la prueba se muestran en la figura 3.1 en cuanto a la descripción de la prueba, inicialmente consiste en bloquear el rotor mediante un sistema de freno, de tal manera que el motor no pueda desarrollar su par mecánico, es decir, el eje del motor permanezca sin movimiento ($n=0$), generalmente para bloquear el rotor se usa un freno magnético, posterior a esto se conecta una fuente de voltaje variable de CA del tipo trifásico y de fases balanceadas y se conecta en las terminales del estator, luego se varía la tensión de forma creciente partiendo de cero, mediante equipo de medición se registra a la entrada del motor los valores de voltaje, corriente y potencia, tomar en consideración de bloquear el rotor por un corto periodo de tiempo, ya que la corriente excesiva sobrecalienta los bobinados. En términos prácticos, se debe variar la tensión de la fuente, de tal manera de ajustar de forma aproximada la corriente de plena carga, simulando así las condiciones de operación a plena carga del motor.

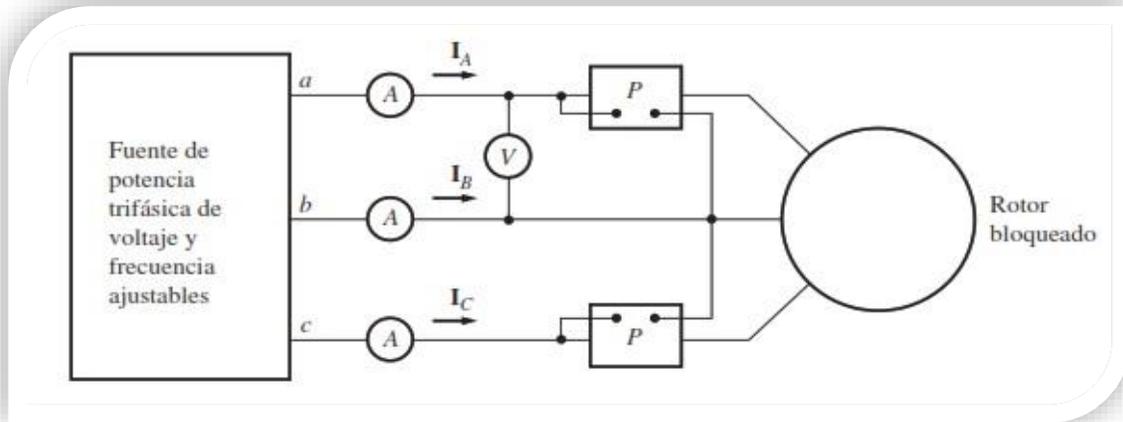


Figura 3.1 Diagrama de conexiones para la prueba de rotor bloqueado. (Chapman, Quinta edición)

La frecuencia de la fuente de voltaje coincide durante la prueba, con la frecuencia del estator y a su vez con la del rotor:

$$(f_e = f_r = f_{\text{prueba}})$$

Como el motor se alimenta de una fuente trifásica, la corriente de línea I_L se calcula:

$$I_L = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \approx I_{L \text{ nominal}}$$

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama eléctrico de la prueba a rotor bloqueado, las condiciones que se cumplen son: $n = 0$; $S = 1$; $f_e = f_r$

Entonces; la resistencia del rotor $\frac{R_2}{S}$ es igual a R_2 y de valor pequeño. Debido a que R_2 y X_2 son pequeños, la mayor cantidad de corriente fluye a través del ramal serie, en lugar de la reactancia de magnetización X_M que es mucho mas grande, el circuito en estas condiciones se ve como una combinación en serie de $X_1 R_1 X_2 R_2$.

$$X_M \gg |R_2 + jX_2|$$

$$R_C \gg |R_2 + jX_2|$$

Por lo tanto X_M y R_C se consideren despreciables.

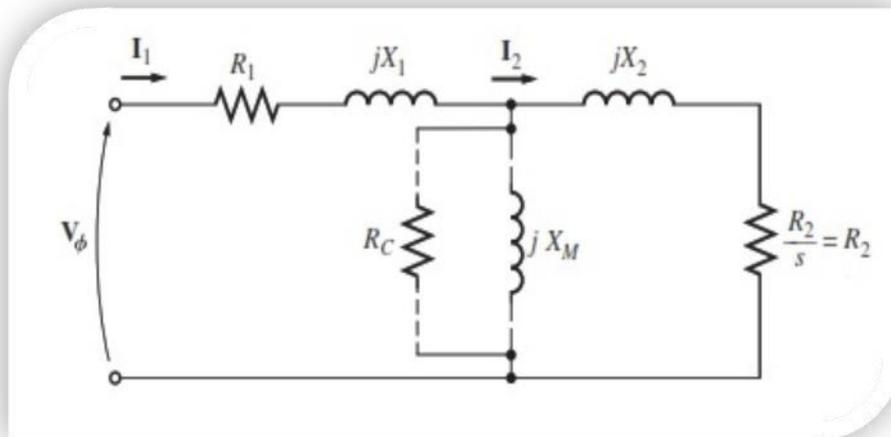


Figura 3.2 Circuito equivalente del motor. (Chapman, Quinta edición)

Como el rotor no gira, el deslizamiento que presenta la máquina es el máximo ($S=1$) y la frecuencia impuesta al estator será la misma del rotor y es precisamente en estas condiciones en que la prueba presenta un problema, porque cuando la máquina tiene una operación normal, casi todos los motores presentan deslizamientos pequeños, aproximadamente entre el 2% al 4% además de que la frecuencia del rotor también resulta ser pequeña en el rango entre 1 a 3 Hertz, entonces es ahí donde se observa la dificultad en el cumplimiento de estas condiciones, el problema radica principalmente en la fuente de potencia escogida para la prueba, si se escoge un procedimiento experimental en que la fuente de potencia provenga de la red eléctrica, la prueba de rotor bloqueado sería desarrollada a la frecuencia industrial de trabajo que ya está establecida, en este caso para EL Salvador la frecuencia de trabajo es de 60 Hertz como en la mayoría de países de Latinoamérica.

Como la frecuencia industrial de la red eléctrica no presenta las condiciones normales de operación del rotor, la prueba no cumple que el deslizamiento sea pequeño, ya se mencionó que es unitario; y tampoco se cumple que la frecuencia del rotor sea pequeña, sino más bien será la misma frecuencia del estator, y como es alimentado por un voltaje alterno de 60 Hertz, por lo tanto ninguna de las condiciones cumple, se debe tomar en consideración que el uso de esta frecuencia errónea inducida al rotor, llevara a resultados errados en la prueba. Una solución típica a este problema, es aplicar las recomendaciones de la normativa IEEE Std 112 - 1996 titulada “Procedimiento de prueba estándar para motores y generadores de inducción polifásicos” la cual

recomienda desarrollar la prueba de rotor bloqueado a una frecuencia de prueba menor o igual a 25% de la frecuencia nominal, es decir a unos 12 a 15 Hertz.

Hasta aquí ya se debe identificar dos modelos de análisis de acuerdo al estudio de interés en el motor, el primer modelo es cuando se tiene el interés de estudiar las características del motor cuando el deslizamiento es cercano a la unidad, es decir, cuando se tiene interés en estudiar el arranque de la máquina, la prueba de rotor bloqueado se debe desarrollar a frecuencia nominal y con la corriente ajustada a valores muy cercanos al que presenta en el arranque, y por otra parte se tiene un segundo modelo, cuando se tiene interés en las características del funcionamiento normal del motor, en este caso la prueba se debe desarrollar a tensión y frecuencia de prueba reducida a un 25% de la frecuencia nominal, como lo sugiere la normativa americana.

Si se desarrolla la prueba de rotor bloqueado bajo estas condiciones controladas en un laboratorio experimental, producirá información más confiable de la prueba y un cálculo más preciso de los valores de la reactancia de dispersión total, la resistencia e inductancia de dispersión a baja frecuencia del rotor, otra consideración a tomar es con la reactancia, esta varía de forma proporcional a los cambios de frecuencia, entonces es común despreciar los efectos de la frecuencia y se consideran insignificantes para motores menores de 25 HP, entonces la impedancia con el rotor bloqueado se puede medir de forma directa a la frecuencia de prueba.

Una vez establecida la tensión y la frecuencia de prueba, es importante mantener el corriente muy próximo a su valor nominal, porque la saturación magnética que experimenta el motor afecta significativamente las reactancias de dispersión.

La potencia a la entrada del motor se calcula como:

$$P = \sqrt{3} \times V_T \times I_L \times \cos \theta$$

El factor de potencia a rotor bloqueado:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3} \times V_T \times I_L}$$

El ángulo de la impedancia es:

$$\theta = \cos^{-1} FP$$

La magnitud de la impedancia total en el circuito del motor es:

$$|Z_{RB}| = \frac{V_{\phi}}{I_1} = \frac{V_T}{\sqrt{3} \times I_L}$$

Por lo tanto, la impedancia total expresada en componentes rectangulares es:

$$Z_{RB} = R_{RB} + jX'_{RB}$$

$$|Z_{RB}| \cos \theta + j|Z_{RB}| \sin \theta$$

La resistencia del rotor bloqueado R_{RB} es:

$$R_{RB} = R_1 + R_2$$

La reactancia del rotor bloqueado es:

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2$$

Donde:

X'_1 y X'_2 son las reactancias del estator y del rotor respectivamente, con respecto a la frecuencia de prueba.

Ahora se puede calcular la resistencia del rotor R_2 :

$$R_2 = R_{RB} - R_1$$

Donde:

R_1 : ya se determinó de la prueba óhmica o DC.

La reactancia de dispersión total del rotor referida al estator también se puede calcular, debido a que la reactancia es proporcional a la frecuencia.

La reactancia de dispersión total equivalente a la frecuencia normal de operación se calcula así:

$$X_{RB} = \frac{f_{\text{nominal}}}{f_{\text{prueba}}} \times X'_{RB} = X_1 + X_2$$

Resulta ser complicado separar las contribuciones que aporta cada una de las reactancias de dispersión, tanto del estator X_1 como el rotor X_2 , incluso no es posible hacer mediciones

adicionales de la prueba para definir estos valores, se suele utilizar una regla muy practica que se resume en la tabla 3.1 Estos valores mostrados, son el resultado de múltiples estudios que demuestran que los motores, de acuerdo a su diseño particular, presentan reactancias de estator y rotor en proporciones definidas, además el desempeño del motor, se ve poco afectado por como la reactancia de dispersión total se distribuye en el estator y rotor. La normativa IEEE Std 112 recomienda asumir que X_1 y X_2 sean iguales, en el caso de desconocer la clase del motor.

Diseño del rotor	X_1 y X_2 en función de X_{RB}	
	X_1	X_2
Rotor devanado	$0.5X_{RB}$	$0.5X_{RB}$
Diseño A	$0.5X_{RB}$	$0.5X_{RB}$
Diseño B	$0.4X_{RB}$	$0.6X_{RB}$
Diseño C	$0.3X_{RB}$	$0.7X_{RB}$
Diseño D	$0.5X_{RB}$	$0.5X_{RB}$

Tabla 3.3 Regla practica para dividir la reactancia del estator y rotor. (Chapman, Quinta edicion)

La tabla 3.2 muestra los valores en por unidad, que suelen tener los parámetros del motor, cuando han sido calculados a partir de los datos de medición que proporciona la prueba, para motores con potencias mayores a 10 KW las magnitudes de las impedancias y resistencias, suelen encontrarse entre los siguientes rangos:

R_1 (p. u)	R'_2 (p. u)	R_{Fe} (p. u)	X_1 (p. u)	X'_2 (p. u)	X_μ (p. u)
0.01 – 0.03	0.01 – 0.03	7 – 12	0.08 – 0.12	0.08 – 0.10	2.5 – 4

Tabla 3.4 Rango de valores normales de los parámetros del motor obtenidos a partir de los ensayos. (Fraile Mora, Sexta edicion)

CAPITULO IV: Implementación del sistema motogenerador de la MUH como fuente de voltaje y frecuencia, para el desarrollo de la prueba a rotor bloqueado en motores trifásicos de inducción.

4.1 Adecuando el ambiente del laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE.

Antes de desarrollar el calendario de actividades de laboratorio, se tomó la decisión de coordinar y solicitar al director de la escuela de eléctrica Ing. Armando Martínez Calderón; la autorización para realizar una visita al laboratorio de máquinas eléctricas. El laboratorio de máquinas actualmente está ubicado en el edificio de potencia de la EIE. Se informó del motivo de la visita al laboratorio, al asesor de este trabajo de graduación Ing. Luis Roberto Chevez, la visita se organizó, con el fin de verificar las condiciones, en las que se encuentra el laboratorio, y más específicamente, a evaluar el estado actual que presenta la máquina universal de pruebas Hampden (MUH), que es la máquina de mayor importancia para realizar los experimentos del presente trabajo de graduación.



Figura 4.1 Edificio de potencia de la escuela de ingeniería eléctrica (EIE) UES – Fuente propia.

El permiso fue otorgado, para la visita, y para utilizar el laboratorio en la ejecución de pruebas experimentales cuando se requieran; esto de acuerdo con el progreso de la investigación que se haya alcanzado, por lo que se acordó hacer uso del laboratorio, cuando el trabajo de graduación

así lo requiera, y bajo la supervisión de nuestro asesor, en todas las actividades prácticas de laboratorio que se realicen.



Figura 4.2 Laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE – Fuente propia.

Se realizó la visita, cumpliendo todas las medidas de bioseguridad, impuestas por la pandemia del COVID19 y cumpliendo, además, las normas de seguridad del laboratorio, en presencia del asesor.

En cuanto a las condiciones actuales que presenta el laboratorio, mencionar, que todas las máquinas eléctricas del cual dispone el laboratorio, como transformadores, generadores, motores, la MUH, banco de pruebas y demás; también como algunos instrumentos de medición presentan buenas condiciones, y permanecen en estantes guardados, y las máquinas completamente tapadas, protegidas del polvo y la humedad.

Sin embargo, como las clases y actividades de laboratorio continúan suspendidas, desde hace aproximadamente dos años y medio; medida establecida por las autoridades universitarias debido a la pandemia, es normal que el paro de las actividades, y la falta de uso del laboratorio, como también en general el uso del edificio de potencia, es notable que la situación no ha sido favorable, y ha provocado el descuido en el mantenimiento de las máquinas, limpieza del laboratorio, y del edificio de potencia, ya que se observó bastante acumulación de partículas de polvo.

Por lo que se realizó una jornada de limpieza, para mantener un ambiente adecuado dentro del laboratorio.

4.2 Maquinas HAMPDEN

La corporación estadounidense de ingeniería Hampden, con sede en el estado de Massachusetts, es una de las primeras corporaciones que se encargan de fabricar equipos tecnológicos; y sistemas orientados a fines educativos, con más de 50 años de experiencia en el diseño de equipo de pruebas para ingeniería; los equipos Hampden, son utilizados por más de 60 países, y la mayor parte de los equipos eléctricos que ofrecen, son adquiridos por institutos tecnológicos vocacionales y universidades.

La corporación Hampden, es la pionera en el diseño y fabricación de esta clase de equipos, además de fabricar equipos educacionales, también ofrecen equipo experimentado para capacitadores empresariales; muchas empresas adquieren equipos Hampden, con el objetivo de aumentar los conocimientos técnicos de los trabajadores y así, incrementar la eficiencia de los mismos, los equipos sirven, en el entrenamiento a trabajadores en el campo industrial, también ofrecen un amplio catálogo de controles eléctricos, entrenadores de tecnología inteligente; Instrumentación de control, PLC, transformadores, maquinas rotativas, maquinaria para aplicaciones de tierra equipotencial, y una variedad de componentes para instalaciones eléctricas hospitalarias.

4.3 Descripción de la maquina universal HAMPDEN modelo H-REM-120-MP.

En esta sección se presenta un resumen de la descripción de los parámetros eléctricos nominales de la MUH, además se mencionan los modos de funcionamiento que demuestran la versatilidad que presenta tener esta máquina al realizar experimentos en ella, esto por los múltiples modos de operación que pueden configurarse.



Figura 4.3 Maquina universal Hampden H-REM-120C-MP.

La máquina universal de pruebas HAMPDEN del cual se dispone en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE es el modelo H-REM-120C-MP mostrada en la figura 4.3 está formada por el acople de dos máquinas eléctricas rotativas, un motor universal de dos polos, donde el estator está compuesto por 12 bobinas que llegan directamente al panel de terminales, cada bobina tiene un par de conectores, lo que da un total de 24 conectores, permitiendo así la interconexión entre las bobinas para formar una variedad de devanados de tensión y de fase, esto para el caso de operar el motor universal en los modos de CA. En los modos de CC se puede configurar en serie, en derivación, también como devanados de compensación. En cuanto al rotor tiene tomas de salidas bifásicos y trifásicos, que se conectan por medio de anillos rozantes con el panel de terminales, los bobinados del rotor van conectados al conmutador que consta de cuatro escobillas, y para evitar cortocircuitos cuando la máquina opera en los modos alternos debido a la misma naturaleza de la conmutación, es decir cuando las escobillas cortocircuitan la bobina del rotor, entonces la máquina viene provista con una palanca de control que básicamente es un mecanismo de elevación de las escobillas a tres posiciones, de manera que las escobillas se levanten del conmutador cuando no son necesarios.

Posición de las escobillas	Modo de operación
4 UP	Todas las escobillas levantadas, para cuando la MUH funciona como máquina de inducción o síncrona.
2 DOWN	Se utilizan las escobillas Q1 y Q2 para el funcionamiento de máquinas de corriente continua.
4 DOWN	Todas las escobillas abajo, para el funcionamiento de máquinas de campo cruzado.

Tabla 4.1 Posición de las escobillas de acuerdo al modo de operación.

El motor universal tiene una potencia de 1.5 a 2KVA, a 208/120 V, 3 ϕ , 60Hz, estos valores nominales son válidos, para el régimen de motor trifásico de inducción, y 1KVA a 120V en el rango de 1800 a 2400 rpm para los modos de funcionamiento de corriente continua, el motor universal tiene un entrehierro constante, acoplado mecánicamente a través de un muñón, con una máquina de corriente continua (dinamo) de cuatro polos, con potencia nominal de 3KW en el rango de velocidad de 2400 a 3600 rpm, los conectores de la bobina de campo y armadura llegan directamente al panel de terminales. El par mecánico generado por la dinamo, es medible en ambos

regímenes, tanto como motor o generador por medio de una balanza de resorte; el torque es medido directamente en la balanza en unidades del sistema internacional (newton – metro) y en el sistema inglés (Libra – pie), el motor universal, puede operar como motor monofásico asíncrono, bifásico, trifásico; también puede operar como alternador, sin embargo la MUH también puede operar como motor shunt (Motor DC) de control de campo, o como generador de corriente continua con excitación independiente o serie entre otras. Como se ha detallado la máquina universal Hampden, puede operar en una variedad de modos de CA y CD.

Además, al extremo derecho de la consola se encuentra el panel lateral ver figura 4.4 donde se localizan todas los conectores de las fuentes de alimentación, bancos de carga resistivos, y los contactores que forman parte del sistema de arranque de las maquinas en los modos AC y DC, también cuenta con una bobina de protección de campo que siempre debe conectarse en serie con el reóstato de campo del dinamómetro, esta bobina protege el campo en caso de embalamiento y de conexiones erróneas, esto para el caso de operar la máquina en la configuración de motor DC, en este panel también están los conectores de los reóstatos de control, la máquina viene provista con una variedad de fuentes alimentación, aunque cabe destacar que algunas son fuentes de tipo fijas.

A continuación, se presenta una lista de los elementos y sus conectores que llegan directamente al panel lateral de la consola.

- ❖ 3 conectores (A, B, C) para fase, 1 conector neutro (N), para la fuente trifásica regulable de 0 – 208V, 4W, 13A. Esta fuente también se puede utilizar de fase-neutro con regulación de 0 – 120V, 3W, 15A
- ❖ 3 conectores (A, B, C) para fase, 1 conector neutro (N) para la fuente trifásica fija a 208/120V, 20A, 4W.
- ❖ 2 pares de conectores para la fuente fija de corriente continua 110VDC, 30A.
- ❖ 2 conectores de línea (L1, L2) + 1 conector neutro (N) para la fuente bifásica 115V, 2 Φ , 15A, 3W
- ❖ 3 conectores de línea + 3 conectores de fases (A, B, C) para los contactores del sistema de arranque AC (208V, 30A/115V, 20A, 3W)
- ❖ 2 conectores de línea + 2 conectores (+-) de carga + 1 conector para la bobina de protección de campo, esto para los contactores del sistema de arranque DC,

- ❖ 1 par de conectores para el reóstato de campo para la dinamo 250Ω.
- ❖ 3 conectores para el reóstato de campo del motor universal 173Ω.
- ❖ 3 conectores para el reóstato de rotor, para control de velocidad del motor universal cuando opera como motor trifásico asíncrono. 0 - 3Ω, conexión en estrella.
- ❖ 2 conectores para las resistencias de cargas monofásicas y 3 conectores para las cargas trifásicas 115V,1Φ,3Φ,3KW.

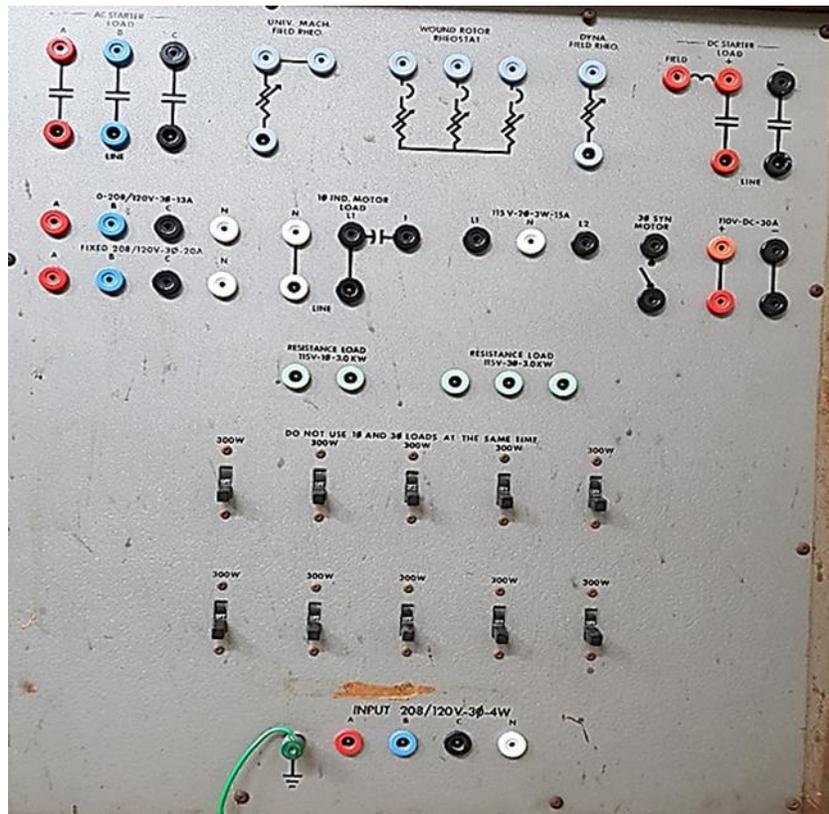


Figura 4.4 Panel lateral de la MUH.

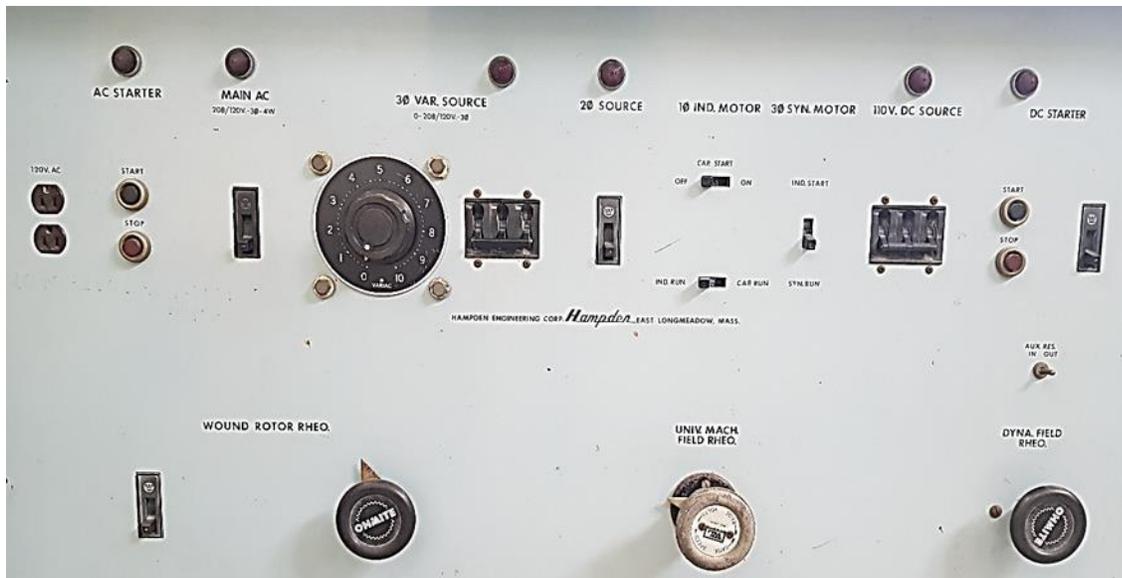


Figura 4.5 Panel frontal de la MUH.

El MAIN principal AC de la MUH se encuentra instalado en el panel frontal ver figura 4.5. A la izquierda del panel se encuentra un tomacorriente, y la botonera de INICIO/PARADA del arrancador AC, en el panel frontal también se encuentran instalados todos los breaker de protección, que a su vez funcionan como interruptores de ENCENDIDO/APAGADO de todas las fuentes de alimentación, también se encuentra instalado el breaker del arrancador DC con su respectiva botonera de INICIO/PARADA además de encontrarse instalada la perilla de control de regulación de la fuente trifásica-bifásica, y todos los reóstatos para control de campo del motor universal y la dinamo.

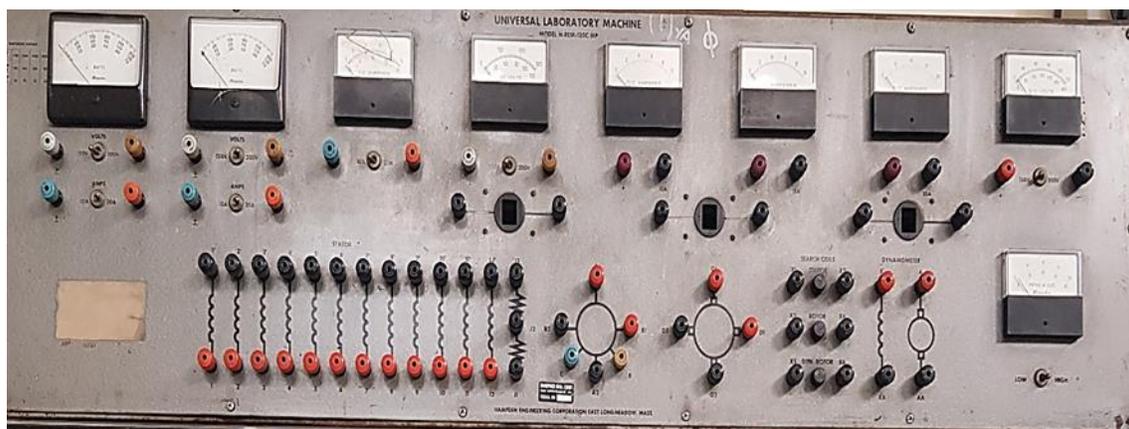


Figura 4.6 Panel de terminales y panel de instrumentos de la MUH.

En la parte superior del panel de terminales, se encuentran el panel de instrumentos, que lo forman nueve medidores analógicos, en el orden de izquierda a derecha se encuentran los siguientes medidores:

- ❖ 2 vatímetro, 0-750/1500/3000W
- ❖ 1 amperímetro AC, 0-10/20A
- ❖ 1 voltímetro AC, 0-150/300V
- ❖ 1 amperímetro DC, 0-10A
- ❖ 1 amperímetro DC, 0-15A
- ❖ 1 amperímetro DC, 0-20A
- ❖ 1 voltímetro DC, 0-150/300V
- ❖ 1 tacómetro, 0-2000/4000 RPM

El resumen de parámetros nominales de la MUH, es mostradas en la tabla 4.2

Régimen de maquina universal	Régimen de máquina de corriente continua
Tensión nominal: 208/120 V	Tensión nominal: 120 V
# de polos: 2	# de polos: 4
Frecuencia: 60 Hz	Rango de velocidad: (2400 – 3600) RPM
Potencia 3 ϕ nominal: (1.5 – 2) KVA	Potencia nominal: 3KW
Puede operar como: Motor DC, motor monofásico asíncrono, bifásico, trifásico, también puede operar como alternador. Rango de velocidad para los modos DC: (1800 – 2400) RPM Rango de velocidades para los modos AC: (2400 – 3600) RPM	Puede operar como: generador de excitación independiente o como motor shunt con control de campo.

Tabla 4.2 Parámetros nominales y modos de funcionamiento de la MUH. (System Hampden, Sf)

4.4 Especificaciones e instrucciones de la maquina universal de pruebas HAMPDEN.

Main AC.

La MUH proporciona un breaker como control principal de encendido/apagado, en la posición de encendido, se activa una luz piloto, indicando que se está suministrando la potencia requerida a la entrada de la consola para funcionar con normalidad, la consola viene especificada para ser alimentada con 120/208V-3Φ-20A-4W, al extremo izquierdo del panel lateral se proporciona un tomacorriente dúplex de 120VAC. Antes de encender cualquier breaker de las fuentes de alimentación, verificar que el main principal este activo, el diagrama unifilar del main es el mostrado en la figura 4.7

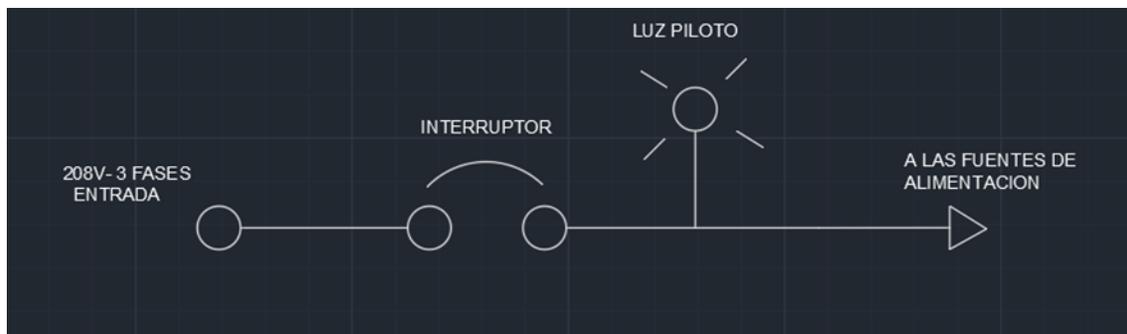


Figura 4.7 Diagrama unifilar del interruptor principal de la MUH

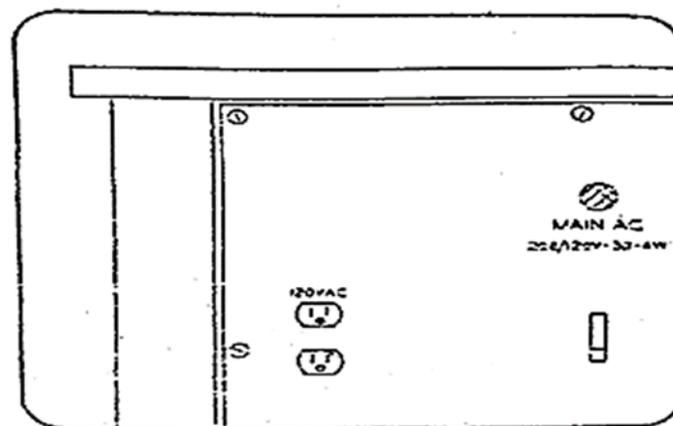


Figura 4.8 Tomacorriente dúplex 120VAC y breaker principal instalados en el panel frontal. (System Hampden, Sf)

Fuente DC.

La máquina universal de pruebas cuenta con una fuente de tensión de 110VDC, con una capacidad de corriente nominal de 30A, este suministro se obtiene producto de la rectificación de voltaje a

las salidas de un transformador trifásico, que se encuentra montado al interior de la máquina, en cuanto a la rectificación los diodos utilizados por la máquina son de selenio y rectifican a onda completa, la fuente viene provista de un breaker y una luz piloto, el breaker es el encargado de encender y por consiguiente energizar al conjunto de conectores de salida que están ubicados en el extremo derecho de la consola (panel lateral), cuando el breaker se encuentra en la posición de encendido se ilumina la luz piloto, indicado así el suministro activo de la fuente.

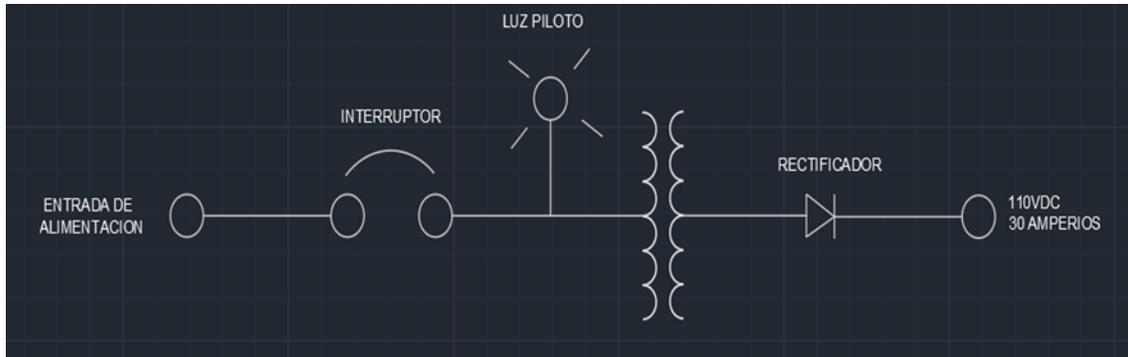


Figura 4.9 Diagrama unifilar de la fuente DC – Console Instructions for Universal Laboratory Machine. (System Hampden, Sf)

Para el caso de exceder los 30A el breaker se dispara automáticamente a la posición de apagado, si esto ocurre, se recomienda al usuario revisar las conexiones que se encuentren conectadas a la salida de la fuente, verificar la causa que provoca la sobrecarga y eliminarla antes de encender nuevamente el breaker.

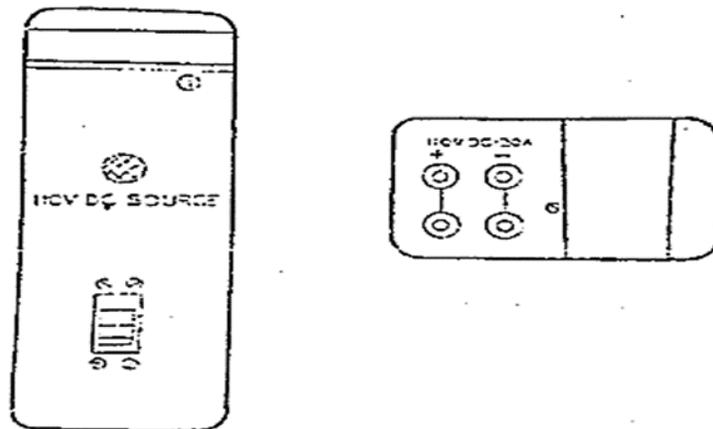


Figura 4.10 a) Breaker y luz piloto instalados en panel frontal, b) Conectores de salida de la fuente DC ubicados en el panel lateral. (System Hampden, Sf)

Arrancador DC.

Para operar de forma correcta el arrancador, primero se debe alimentar con los conectores de salida de la fuente de 110VDC a los conectores de línea del arrancador, importante verificar que la conexión tenga la polaridad correcta, luego se debe conectar los bornes de la bobina de armadura del dinamómetro a los conectores de carga (+) y (-) del arrancador, los conectores de carga y de línea, están ubicados en el panel lateral de la máquina y los bornes de la bobina de armadura en el panel de terminales.

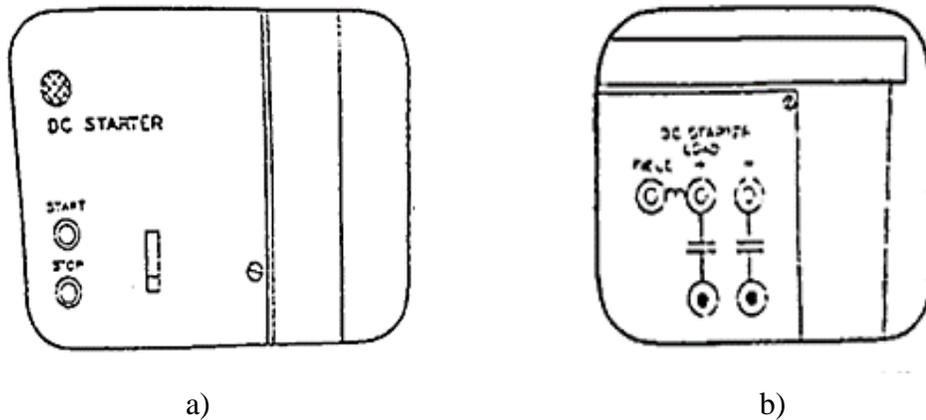


Figura 4.11 a) Breaker, luz piloto y botonera de control instalados en panel frontal, b) Conectores de carga y de línea más conector de bobina de protección de campo instalados en panel lateral. (System Hampden, Sf)

El arrancador es automático y de dos puntos, además incluye una bobina de protección de campo (FIELD COIL) con un fusible en serie (tipo BUS AGC de 10 Amperios) que protege de sobrecargas y conexiones erróneas, la bobina de protección de campo tiene un solo conector en el panel lateral, el cual debe conectarse en serie con el reóstato de campo del dinamómetro, para luego conectar el campo de la máquina, con estas conexiones hechas, ya se garantiza el buen funcionamiento del arrancador.

La bobina de protección (FIELD COIL) protege la máquina en el caso más crítico, que se presenta cuando se abre de forma accidental el circuito de campo, lo que se interpreta en el desbocamiento de la máquina, si el campo se interrumpe automáticamente el arrancador se apagará, la MUH tiene una red de diodos y resistencias que energizan un relé sensible que permanece activo cuando detecta que la corriente de campo está en los rangos seguros de operación, y se desactiva cuando la corriente de campo se encuentra por debajo de los valores seguros, como el arrancador se puede

utilizar tanto con en el dinamómetro, como con la máquina universal, el relé debe responder a dos rangos definidos de corrientes de campo 0.2A a 1A y 2.6A a 10A como se muestra en la figura 4.12.

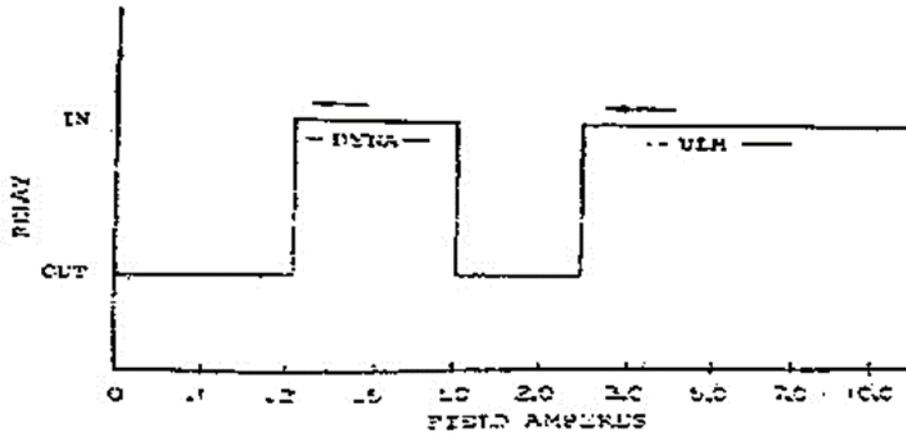


Figura 4.12 Rangos de corriente de campo detectables por el relé. (System Hampden, Sf)

El primer rango de 0.2A a 1A corresponde a los valores de corrientes de excitación de campo del dinamómetro, si se activa el arrancador con el reóstato de campo del dinamómetro en la posición de resistencia mínima, producirá que la resistencia en derivación limite la corriente al valor máximo seguro de 0.9A, esto ara funcionar al dinamómetro aproximadamente a 2300 RPM.

Para alcanzar la velocidad nominal de la máquina, se debe variar el reóstato de campo de la dinamo hasta la posición de máxima resistencia, luego se debe activar el interruptor del reóstato auxiliar de 100Ω , el cual se encuentra ubicado arriba de la perilla de control del reóstato de campo de la dinamo, el interruptor está inicialmente en la posición IN, para activar colocar en la posición OUT esto provoca una disminución de la corriente de campo, hasta alcanzar el valor mínimo de operación de aproximadamente 0.25A, con esto el dinamómetro funcionara a 3600 RPM, si la corriente cae por debajo del valor mínimo de operación, o el circuito de campo se abre, automáticamente el relé se desactiva y el arrancador se apaga. A continuación, en la figura 4.13 se muestra el grafico de la velocidad (RPM) Vs la corriente (A) de excitación de campo en derivación para el dinamómetro.

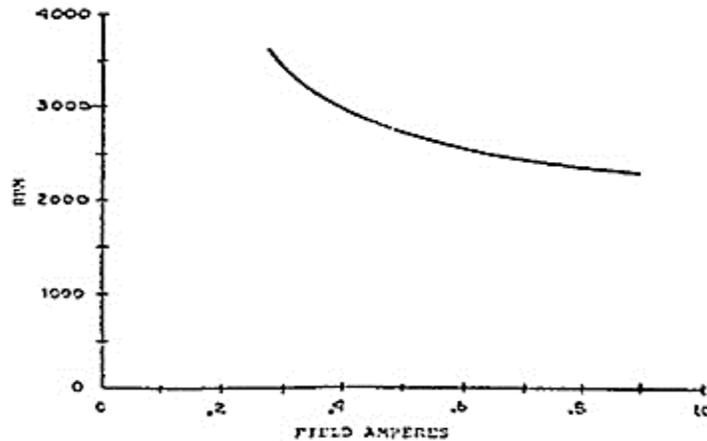


Figura 4.13 Gráfico de velocidad vs Corriente de campo del dinamómetro. (System Hampden, Sf)

El segundo rango, corresponde a los valores de corriente de campo de la máquina universal cuando funciona como motor DC, este rango comprende de 2.6A a 10A, si se arranca la maquina universal, con el reóstato de campo adecuado en la posición de mínima resistencia, la corriente se ve limitada por la resistencia de campo hasta aproximadamente 8A, lo que ara funcionar a la maquina universal aproximadamente a 1800 RPM, pero si se incrementa gradualmente el reóstato de campo, la corriente de campo disminuye cerca de los 2.6A alcanzando así una velocidad de 2400 RPM, si se supera esta velocidad la corriente cae por debajo de 2.6A lo que provoca que el arrancador se apague, el relé detecta que se sale del rango seguro de operación, ya que la máquina está diseñada específicamente para funcionar en los modos de DC en este rango de velocidades, en la figura 4.14 se muestra el grafico de la velocidad vs la corriente de campo de derivación para la maquina universal.

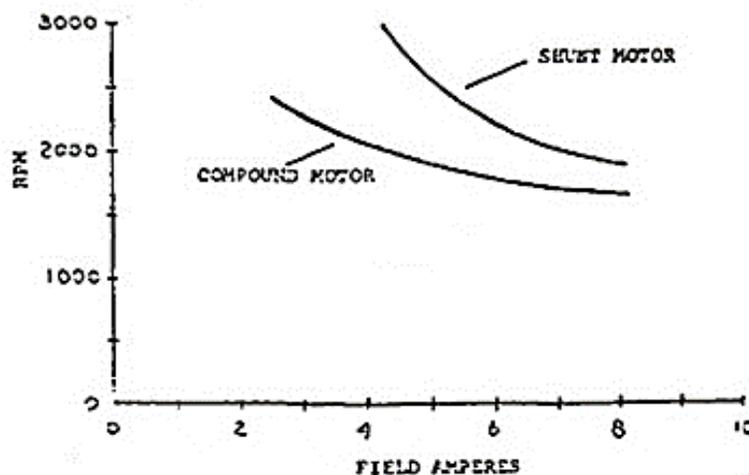


Figura 4.14 Gráfico de velocidad vs corriente de campo de la maquina universal. (System Hampden, Sf)

El arrancador DC está formado por los siguientes elementos:

- ❖ 1 resistor de arranque
- ❖ 1 resistor ajustable
- ❖ 2 etapas de contactores de paso
- ❖ 1 relé de protección de campo
- ❖ 1 relé de retardo de tiempo
- ❖ Diodos

Todos los elementos se encuentran instalados en la parte trasera de la MUH, y se puede acceder a ellos al abrir las dos puertas con bisagras la orientación de los elementos son mostrados en la figura 4.15.

Para arrancar la máquina, verificar que el reóstato de campo de la dinamo se encuentre en la posición mínima, luego encender el breaker y presionar el botón de inicio, cuando el arrancador corte automáticamente la resistencia de arranque, la máquina comienza a aumentar la velocidad, esperar unos segundos mientras la maquina se estabilice luego trabaja con normalidad, para controlar la velocidad se debe variar el rango del reóstato de campo el diagrama unifilar del arrancador es mostrado en la figura 4.16.

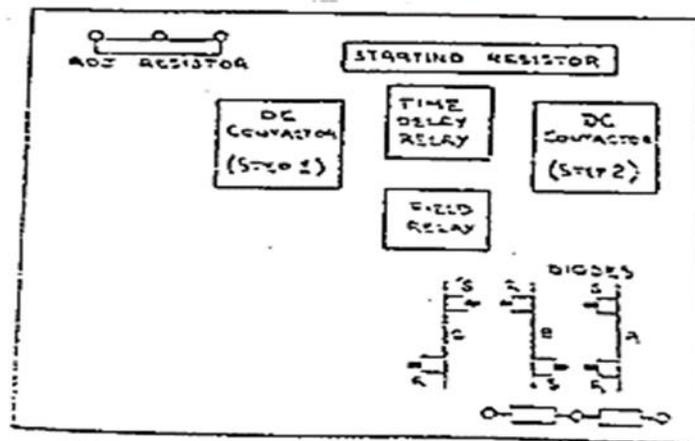


Figura 4.15 Arreglo de componentes del arrancador DC. (System Hampden, Sf)

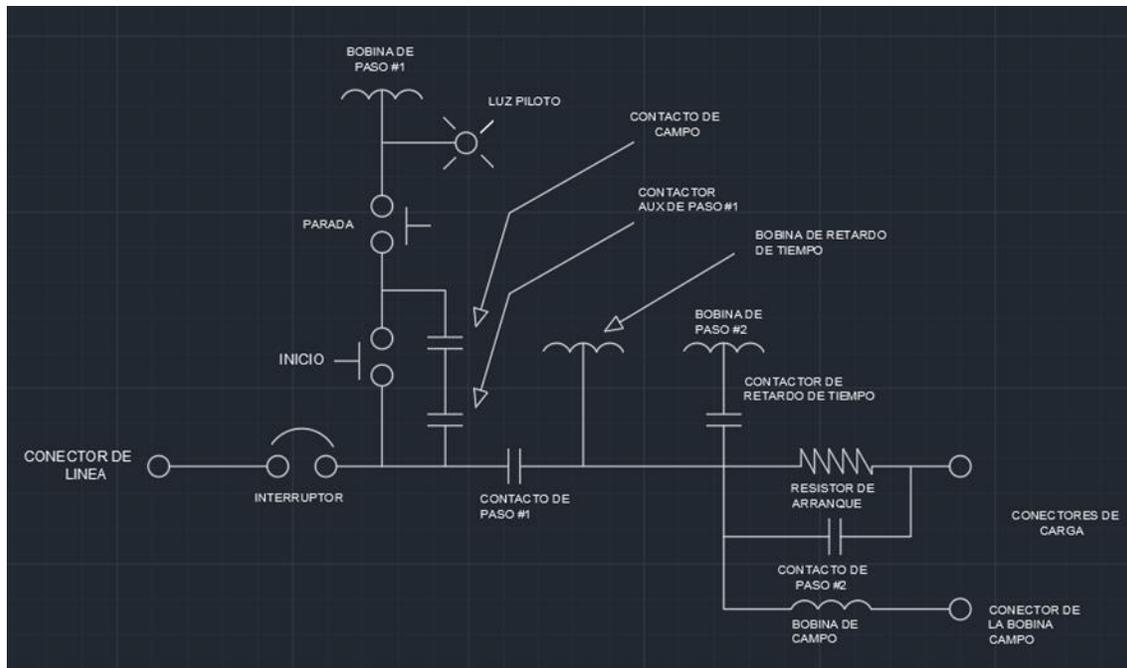


Figura 4.16 Diagrama unifilar del arrancador DC. (System Hampden, Sf)

Fuente trifásica fija- variable.

La máquina universal dispone de una fuente trifásica FIJA 208/120V, con capacidad nominal de 20A y una fuente VARIABLE 208/120V, 4W, con capacidad nominal de 13A, la fuente proviene de la derivación a la salida de un autotransformador variable de tres elementos que se encuentra instalado al interior de la consola, la regulación de voltaje se realiza por medio de una perilla instalada en el panel frontal, junto a la perilla un breaker del tipo hidráulico – magnético que permite el apagado/encendido y una luz piloto que indica la operatividad de la fuente, la regulación de voltaje de línea a línea es de 0- 208V, y de línea a neutro de 0 – 120V.

Para operar la fuente de forma correcta se debe conectar una carga de tipo trifásica, bifásica o monofásica en los conectores de salida de la fuente marcados con A, B, C, N, que se encuentran ubicados en el panel lateral, se proporcionan dos pares de cuatro conectores de salida, los primeros cuatro conectores superiores corresponden a la fuente variable y los inferiores a la fuente fija.

Con las conexiones hechas, encender el main principal, luego colocar el breaker de la fuente en la posición de ENCENDIDO, se ilumina la luz piloto, indicando que la fuente se encuentra lista para suministrar energía a la carga, ahora bien, para ajustar alguna tensión, se debe girar la perilla de control en sentido horario esto ara que el voltaje aumente, la perilla de control tiene un dial en el

rango de 0 a 10 que no indica directamente el valor de la tensión de salida, sin embargo se puede calcular de forma aproximada. Por ejemplo, si la perilla de control apunta en la posición 5 del dial el valor aproximado de tensión se calcula así:

$$V_{\text{Salida}} \approx \frac{\text{Posicion del DIAL}}{10} \times V_{\text{nominal}} = \frac{5}{10} \times 208V$$

$$V_{\text{Salida}} \approx 104V$$

Por lo tanto, la salida sería de 104V de línea a línea, y 60V de línea a neutro, tener en cuenta que si la carga demanda mayor corriente que la nominal, el breaker se dispara automáticamente a la posición de apagado, si esto ocurre retire la carga antes de volver a encender la fuente.

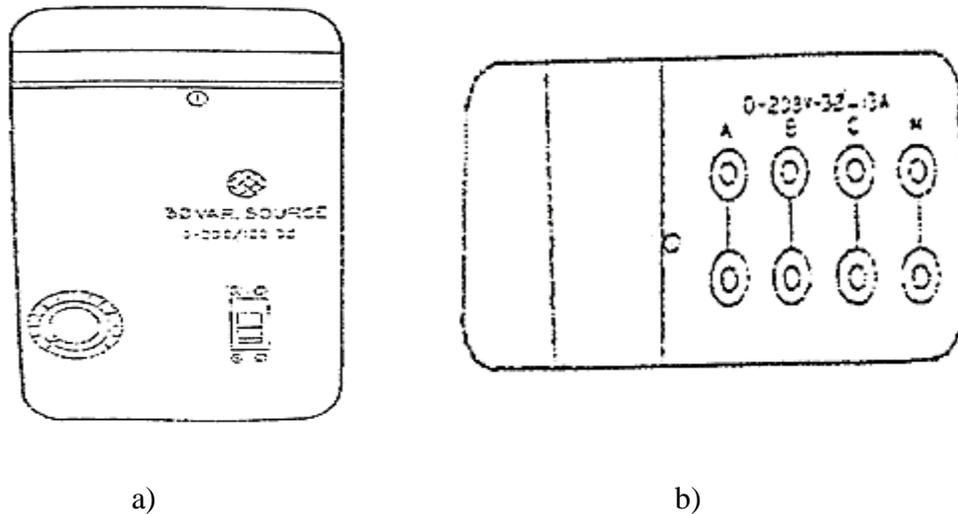


Figura 4.17 a) Perilla de control de la fuente trifásica variable, breaker y luz piloto instaladas en panel frontal b) Conectores de salida instalados en panel lateral (System Hampden, Sf).

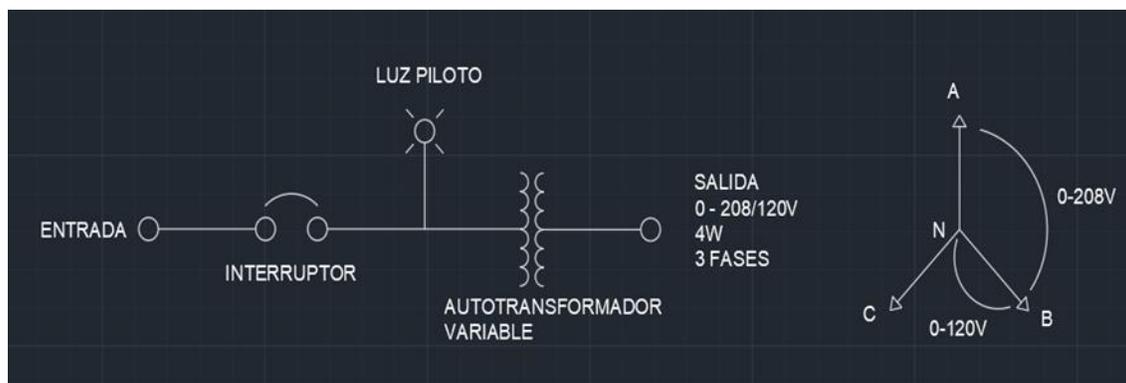


Figura 4.18 Diagrama unifilar de la fuente trifásica variable. (System Hampden, Sf)

Reóstato de campo del dinamómetro.

El reóstato permite controlar la corriente de excitación que se suministra al bobinado de campo del dinamómetro, la perilla de control está ubicada en la esquina inferior derecha del panel frontal, y tiene dos conectores que se encuentran en el panel lateral, el reóstato bajo la configuración de resistencia más alta 250Ω tiene una capacidad nominal de $0.78A$, y en la configuración de resistencia más baja soporta una capacidad de $20A$, para evitar sobrecargas cuando se controla, de una posición de resistencia mayor a una posición de baja resistencia, la forma correcta de conexión es en serie con el campo en derivación del dinamómetro.

El reóstato viene incorporado con un resistor auxiliar interno a la consola, que se puede conectar en serie con el reóstato de campo del dinamómetro, este resistor se puede activar y desactivar, por medio de un interruptor que se encuentra ubicado arriba de la perilla de control del reóstato en el panel frontal, si el resistor se encuentra activo proporciona al dinamómetro su rango completo de velocidad, el resistor auxiliar es variable de 0 a 100Ω y esta internamente a la consola con una capacidad nominal de 1^a

El reóstato incorpora un fusible de protección Bussmann tipo AGC-2, clasificado a $2A$, este se encuentra en la hilera de fusibles, en la parte trasera de la consola. El diagrama unifilar es el mostrado en la figura 4.19.

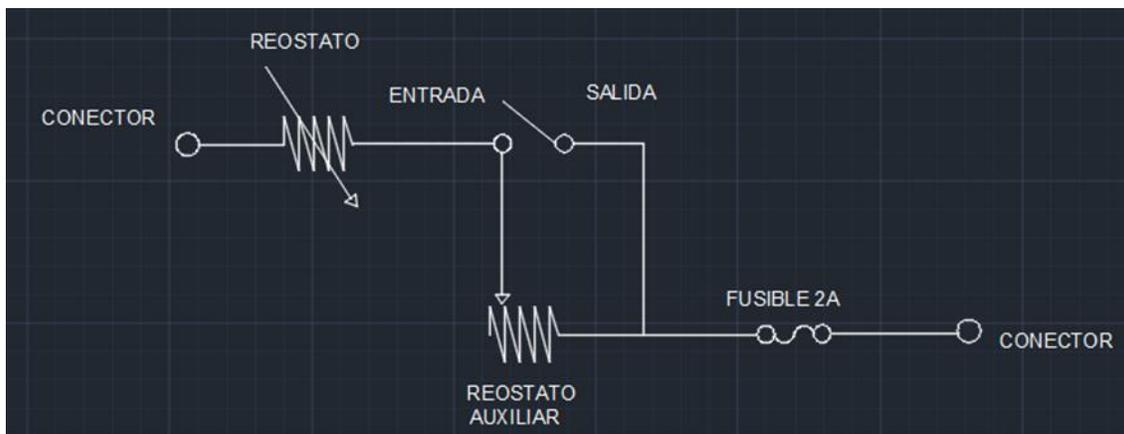


Figura 4.19 Diagrama unifilar del reóstato de campo del dinamómetro. (System Hampden, Sf)

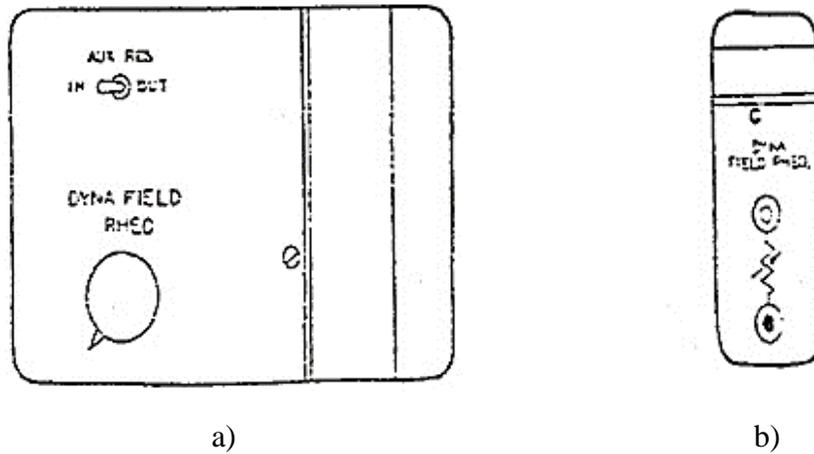


Figura 4.20 a) Perilla de control del reóstato de campo del dinamómetro, más resistor auxiliar instalados en panel frontal b) conectores del reóstato instalados en panel lateral. (System Hampden, Sf)

Reóstato de campo de la maquina universal.

Se recomienda utilizar únicamente para alimentar el campo de la maquina universal, por la capacidad que tiene de soportar las altas corrientes de campo; que se generan por las diferentes configuraciones que se realizan en el bobinado estático de la máquina, la perilla de control del reóstato se ubica exactamente al centro y parte inferior del panel frontal, además de contar con los dos conectores que llegan al panel lateral, en la configuración de resistencia más alta 173Ω tiene una capacidad nominal de 1A y en su defecto en la más baja 10A.

En serie con el reóstato se encuentra conectado un resistor de 10.8Ω con capacidad nominal de 11A, que se encarga de limitar la corriente que circula por el reóstato y por el bobinado estático de la maquina universal a valores de corrientes seguros; cuando el reóstato se encuentra en valores mínimos de resistencia, lo que permite realizar una conexión directa con la fuente 110VDC sin peligro que el reóstato sufra algún daño. Para proteger el circuito del reóstato se proporciona un fusible de protección del tipo Bussmann AGC-10 con capacidad de 10A ubicado en la hilera de fusibles en la parte trasera de la consola, el diagrama unifilar es el mostrado en la figura 4.21



Figura 4.21 Diagrama unifilar del reóstato de campo de la maquina universal. (System Hampden, Sf)

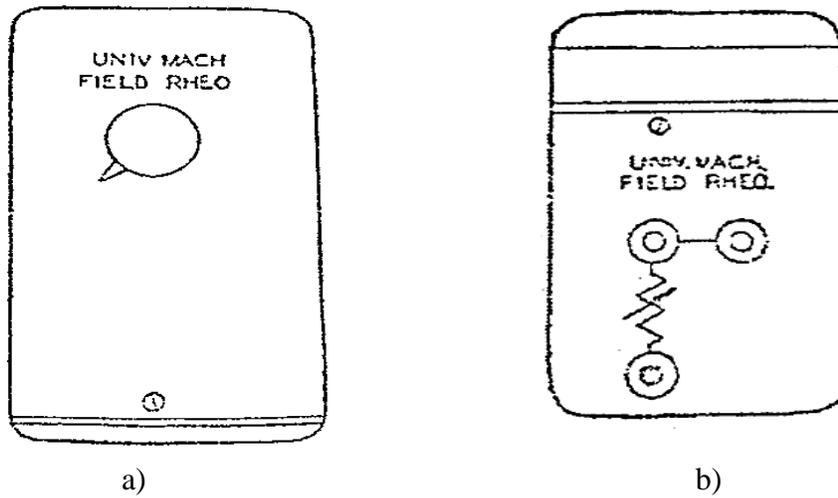


Figura 4.22 a) Perilla de control del reóstato de campo de la maquina universal instalada en panel frontal
b) Conectores del reóstato instalados en panel lateral (System Hampden, Sf)

4.5 Reparación de cables de conexión de la MUH.

La MUH está equipada con un kit completo de cables, que son necesarios para realizar las conexiones de las prácticas y experimentos, la máquina dispone de 15 cables del tipo banana-banana de 8.5 pies de longitud, cables tipo gancho-gancho en longitudes de 2 pies y 2.5 pies, los cuales son mostrados en la figura 4.23a son utilizados para realizar cualquier tipo de conexión en el panel de terminales (panel frontal superior) de la MUH.

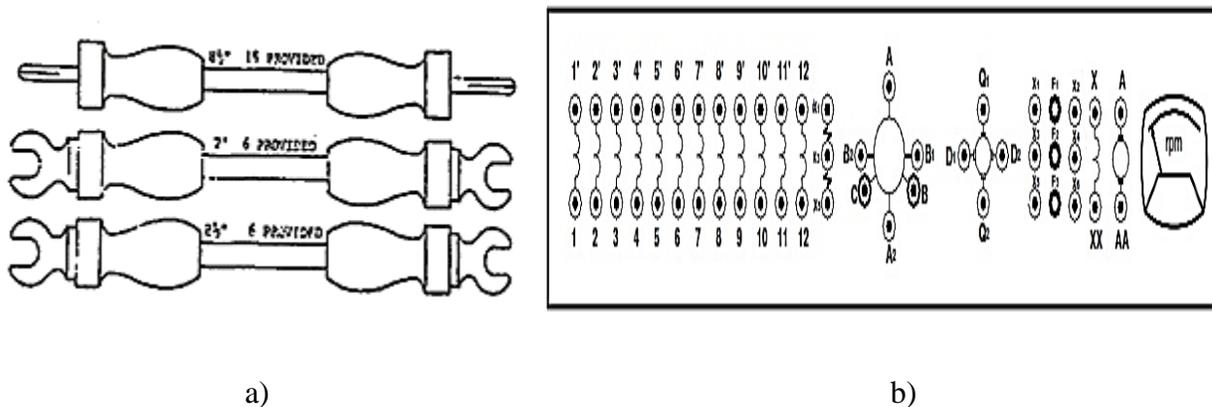


Figura 4.23 a) Cables de conexión en panel de terminales, b) Panel de terminales. (System Hampden, Sf)

Para conexiones entre los conectores en el extremo derecho de la consola (panel lateral), la máquina viene provista con 12 cables de 2 pies de longitud del tipo banana-hembra, son los mostrados en la figura 4.24a.

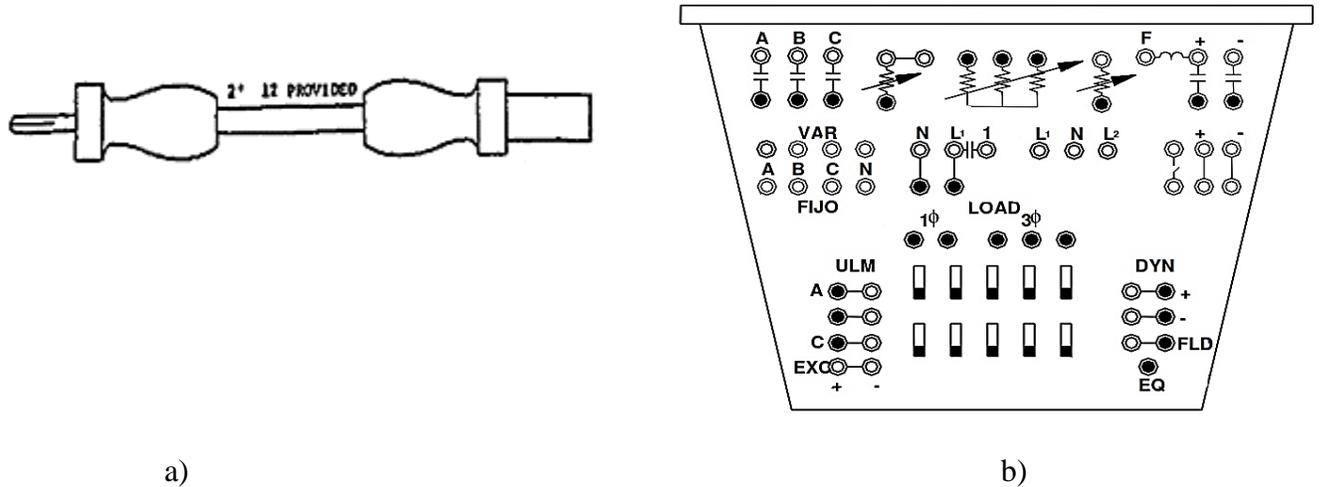


Figura 4.24 a) Cables de conexión del panel lateral. b) panel lateral derecho. (System Hampden, Sf)

Para hacer conexiones desde el panel lateral, hacia el panel frontal y panel de medidores se tiene provisto 7 cables de 6 pies de longitud del tipo gancho-banana mostrados en la figura 4.25

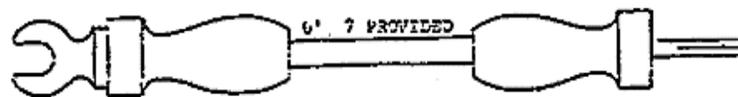


Figura 4.25 Cables para conexiones entre diferentes paneles. (System Hampden, Sf)

Para las conexiones de la máquina y terminales de medidores, hacia el banco de cargas de pruebas, la máquina viene provista con 3 cables de 6 pies de longitud del tipo gancho-hembra el cable es mostrado en la figura 4.26.

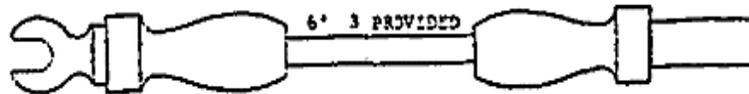


Figura 4.26 Cables para conexionado entre el panel de terminales, medidores y banco de cargas. (System Hampden, Sf)

Luego de conocer todos los cables de la máquina, características como su longitud, el tipo de conector a los extremos de cada cable, así como también al panel que pueden conectar, y aquellos

cables que pueden interconectar uno o más paneles, se procedió a realizar una revisión del estado de los cables.



Figura 4.27 Revisión del estado actual de los cables de conexión.



Figura 4.28 Cables, conector tipo gancho y hembra en mal estado.

Se verifico que están disponibles todos los cables para conexión, pero se observó que la mayoría se encuentran en mal estado, el deterioro esta más en el aislante del cable y en el conector, ya que la mayoría presentan forros agrietados y conectores sulfatados, algunos cables también se encontraron reventados porque solo se encontraron sus conectores. Por lo que es necesario una rehabilitación, que consiste en sustituir todo el cable dañado y dar tratamiento a los conectores con oxido, los materiales y herramientas necesarias para esta actividad son los mostrados en la tabla 4.3.

Materiales	Herramientas
7 Mts de cable TSJ calibre #10 de 2 hilos	Soldador 220V, 150W
Lija mediana 120 para metal	Guantes de cuero para soldar
Lija fina 1000 para metal	Tenaza pela cable 6-1/2 Pulg
Carrete de Estaño	Tenaza, Pinza, Martillo, Cuchilla, Punzón
750ml de coilux	Lima redonda, cepillo de alambre
W40	Cinta métrica

Tabla 4.3 Lista de materiales para rehabilitación de los cables de la MUH.

Procedimiento para la rehabilitación de un cable tipo gancho – banana.

- **Paso 1:** Cortar el cable dañado para dejar solamente los dos protectores aislantes que contiene en la parte de en medio los conectores metálicos, ahora para separar el conector se tiene que remover el pin de seguridad con ayuda del punzón y el martillo. Con esto ya se tienen los conectores metálicos separados de su protector.



Figura 4.29 Conector gancho - banana, y su respectivo protector aislante separado previo al procedimiento limpieza.

- **Paso 2:** Remover el óxido del conector. Para esto se tomó un pedazo lija 120 mediana para metal, y se froto suavemente a toda la superficie plana, para limpiar las superficies curvas fue útil la lima redonda, y para la rosca el cepillo de alambre. Luego los conectores fueron colocados en un recipiente plástico en el que se vertió 100ml de limpiador liquido Coilux, la aplicación de este tratamiento fue de 5 minutos, el uso de este limpiador fue necesaria para dar por terminada la limpieza total al material, la solución limpiadora es fabricado a base de ácidos

que permite quitar toda suciedad, oxido, manchas, residuos, además de devolver el brillo al material.



Figura 4.30 Conectores tipo gancho, banana, hembra después del procedimiento de limpieza.

- **Paso 3:** Quitar los residuos de cable y estaño que queda al interior del conector metálico. Para esto se utilizó el soldador de 220V, 150W y un poco de estaño nuevo para ablandar el estaño de residuo y poder retirar de manera sencilla.
- **Paso 4:** La longitud que viene de fabrica para el tipo de cable a reparar es de 6 pulg aproximadamente unos 15.2 cm, por lo que ahora se debe medir y cortar 17.2 cm de cable nuevo TSJ, y luego con la tenaza pela cable de 6-1/2 pulg quitar 1 cm de forro a cada extremo.
- **Paso 5:** Con los conectores limpios de residuos, y el cable cortado a la longitud correcta, se procede a soldar cada conector a cada extremo del cable TSJ nuevo, para este último paso fue necesario utilizar guantes de cuero para protección ante quemaduras por la alta temperatura que alcanza el soldador. Luego se procede al ensamble del protector aislante con el conector metálico y a la colocación del pin de seguridad como se muestra en la figura 4.31.



Figura 4.31 Ensamblando conector banana.

4.6 Mantenimiento de la MUH (H-REM-120C-MP).

Como se puede observar en la figura 4.32 tanto en el exterior como el interior se encontró bastante polvo y suciedad más en los elementos de control (reóstatos), también se encontró acumulación de suciedad en el acople de las maquinas la cual produjo sobrecalentamiento en la máquina.

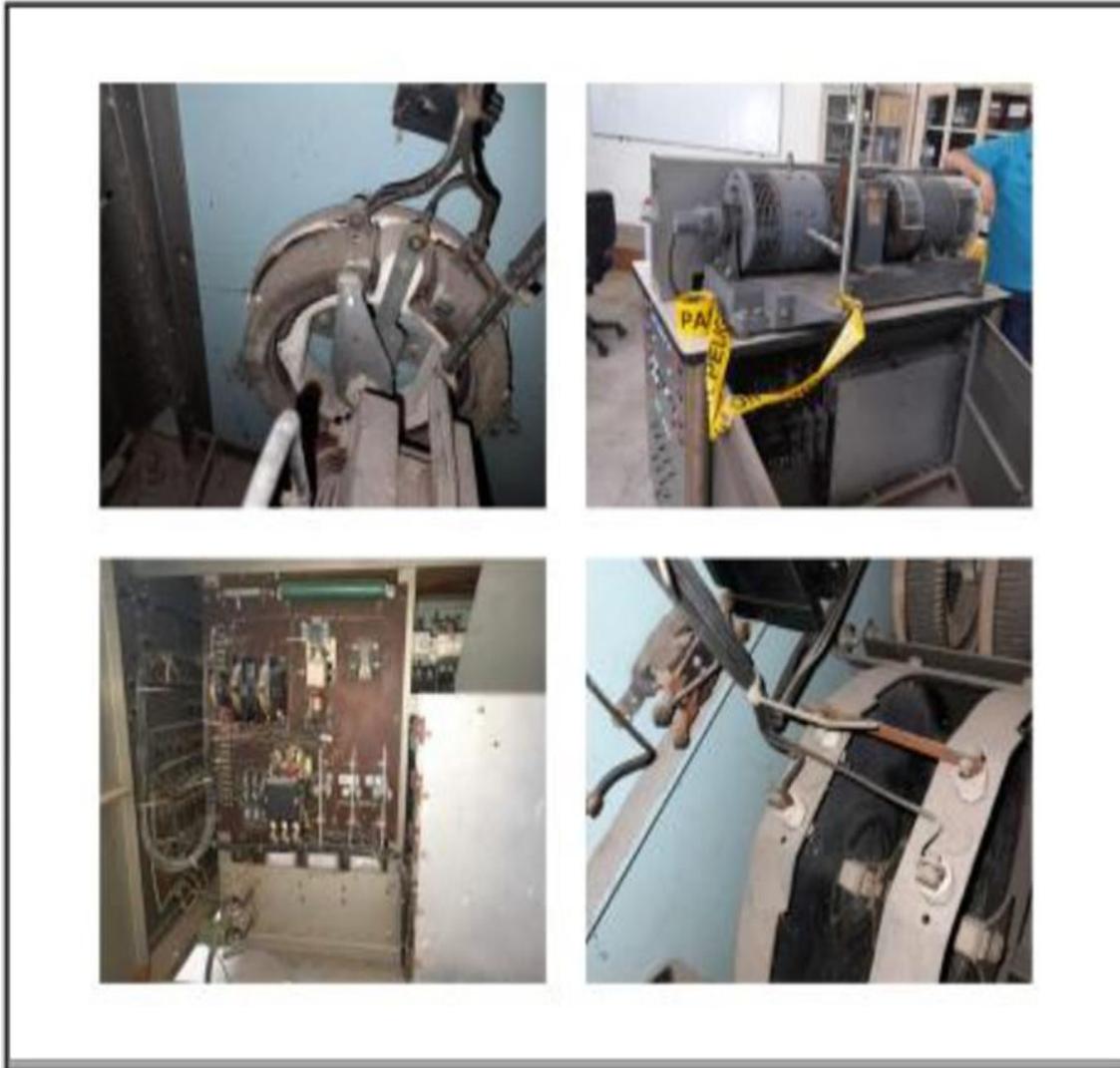


Figura 4.32 El mal estado del Interior de la MUH.

Las consecuencias de la falta de uso y de mantenimientos han provocado que el reóstato del motor universal este averiado, ya que la misma acumulación de suciedad en los contactos de bronce no permitía la variación completa de la resistencia, la regulación era de aproximadamente 80 ohm cuando la capacidad del reóstato esta especificada a 173 ohm, por lo que se procedió a desmontar y a darle el mantenimiento respectivo.

Desmante del reóstato del motor universal de la MUH.

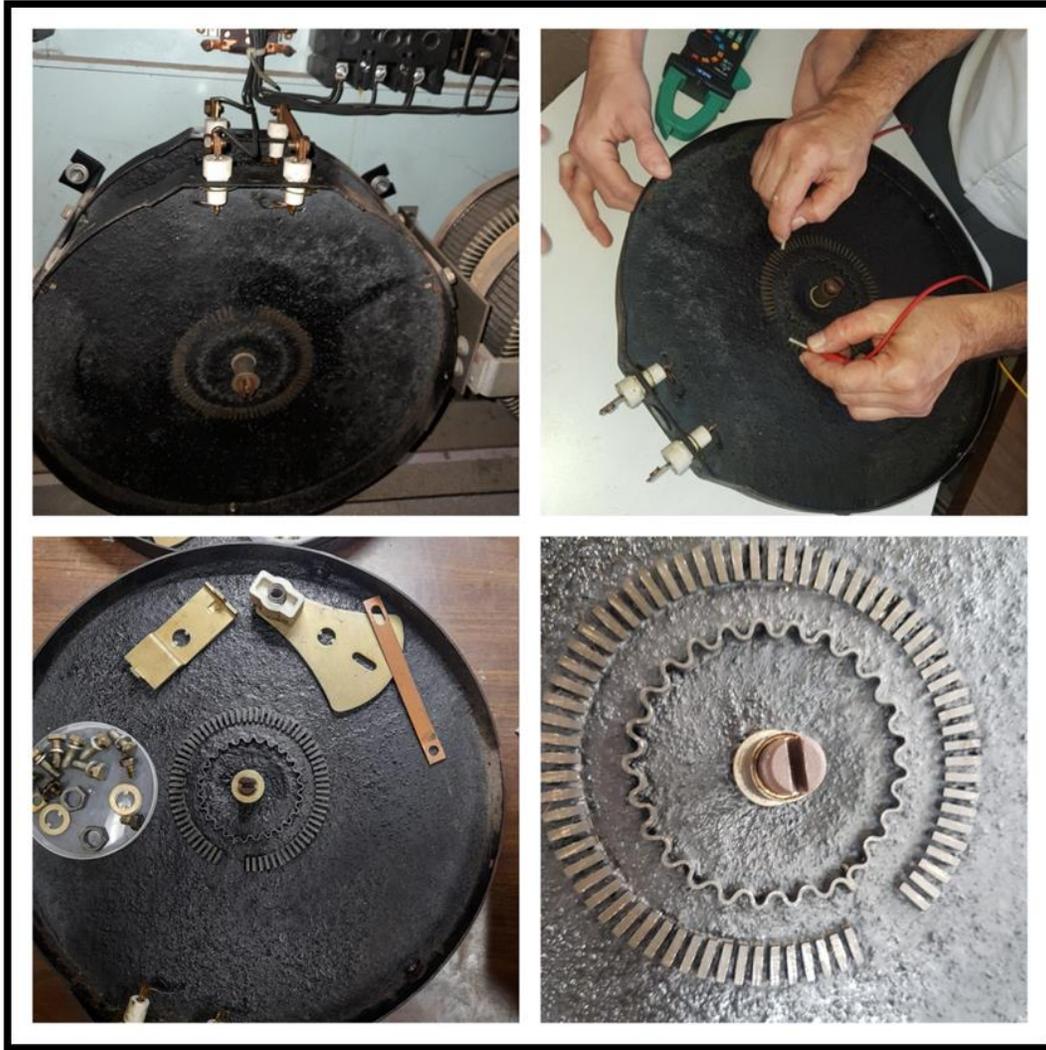


Figura 4.33 Secciones de la MUH.

Limpieza de elementos del réostato:

La limpieza consistió en lijar suavemente todo el recorrido de contactos de bronce hasta retirar todo exceso de suciedad, como se puede observar en la figura 4.34 se le retiro una buena cantidad de moho y luego se verifico la regulación de la resistencia con un multímetro, y efectivamente la variación medida fue desde 0 ohm hasta 173 ohm.



Figura 4.34 Lijando partes del reóstato.

Engrasado de las partes móviles de la maquina universal de pruebas Hampden:



Figura 4.35 Proceso de engrase MUH.

Se tuvo que calentar la grasa para poder manipular más fácil, y que esta fluyera por todas las partes móviles de la maquina y facilitara el proceso de distribución correctamente, el proceso es simple la grasa fue inyectada por medio de una jeringa, se ejercía presión con la jeringa para que la grasa quemada fuera desplazada y a su vez fuera saliendo de las partes móviles.

Es importante mantener lubricadas todas las piezas móviles, generalmente se revisa el aceite o grasa cada 3 a 6 meses para tener la seguridad de que los rodamientos tienen el suministro adecuado para su funcionamiento, así evitar el desgaste y futuros daños a piezas u equipos.

4.7 Modelo estructural para bloquear el eje del motor.

Teoría del frenado de motores.

Muchas veces es necesario e imprescindible hacer un paro instantáneo de elementos de rotación, como lo son los motores que mueven maquinarias y herramientas, elevadores, cilindros laminados, etc.

Existen diferentes clases de frenados de los cuales podemos distinguir los 3 más importantes:

1. Frenos mecánicos

A este grupo de frenos pertenecen todos los electrofrenos y de piezas metalúrgicas.

2. Frenado por cortacorriente

Se le conoce como una inversión brusca o inversión suavizada por resistencias.

3. Frenado por corriente continua

Este sistema de frenado consiste en desconectar el motor de la línea de alimentación y conectar inmediatamente dos bornes del estator a una fuente de corriente continua; en estas condiciones, el rotor gira con relación a un campo magnético fijo y su deslizamiento crea un par de frenado.

Una vez que el rotor del motor está frenado, se deja de suministrar la tensión continua al estator. La tensión continua de alimentación ha de ser siempre de valor bajo y se determina únicamente con la resistencia de los devanados estáticos. Generalmente, la fuente de alimentación es la propia línea de corriente alterna, a través de un transformador reductor y de un equipo rectificador de baja tensión.

Las fases del frenado se toman en periodos y se tienen dos, los cuales se citan a continuación:

a) Tiempo de entrada del frenado

Durante este periodo de tiempo, la velocidad se mantiene casi constante, e incluso puede aumentar cuando se trata, por decir un ejemplo de aparatos de elevación.

b) Tiempo de frenado mecánico

Durante este segundo periodo de tiempo decrece la velocidad del motor, realizándose el proceso de frenado.

La presente es una solicitud de fabricación de un freno metalúrgico que servirá para bloquear el eje de un motor eléctrico, la solicitud fue dirigida a la escuela de Ingeniería Mecánica, específicamente al director Interino Ing. Francisco Alfredo De León, el freno es necesario para el desarrollo experimental de este trabajo de graduación ya que es un requerimiento para desarrollar la prueba de rotor bloqueado (ver capítulo 4), el proceso de fabricación no puede realizarse en la escuela de ingeniería eléctrica debido a que no se cuenta con equipo como el torno, y taladro industrial para poder elaborar la pieza.

El encargado y ejecutor de la fabricación del freno metalúrgico fue el Licenciado julio Quintanilla jefe del taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ciudad Universitaria, 27 de mayo de 2022.
Ref. EIE-058-2022.

Ing. Francisco Alfredo De León
Director Interino
Escuela de Ingeniería Mecánica FIA-UES.
Presente.

Estimado Ing. De León:

Aprovecho la presente para saludarle y desearle éxitos en sus actividades profesionales.

Actualmente la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, se encuentra desarrollando el trabajo de graduación: DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS APLICANDO MÉTODOS INDIRECTOS, siendo desarrollado por los Bses: Alemán Cruz, Edwin José, Cruz Moreno Yuri Abigail y Rodríguez Gómez Cristian Daniel, siendo asesorado por el Msc. Luis Roberto Chávez Paz.

Y como parte del desarrollo experimental de la tesis se requiere de la fabricación de una pieza mecánica sólida, que cumpla la función de mantener el eje de un motor eléctrico sin movimiento durante la prueba de rotor bloqueado, es decir se necesita un freno mecánico, específicamente para frenar un motor eléctrico de ¼ HP.

Los materiales recomendados para fabricar el freno son:

- ✓ AISI 1020
- ✓ Uso de Electrodo E6013
- ✓ Brocas
- ✓ Lima redonda, plana

Aparatos eléctricos que se utilizan en el proceso:

- ✓ Pulidora
- ✓ Soldador
- ✓ Taladro
- ✓ Torno

La dificultad está en fabricar el soporte de cuñero y cuñero en el torno, por carecer del equipo y los conocimientos en la manipulación de los aparatos, por lo que solicitamos la ayuda de la escuela de ingeniería mecánica en la fabricación de la pieza.
Se anexa el plano con las dimensiones en mm, de la pieza a fabricar.

Agradeciendo la atención a la presente, aprovecho la oportunidad de saludarle.

Atentamente,

"HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA"

V.B. Ing. Armand Martínez Calderón
Director

Msc. Luis Roberto Chávez Paz
Asesor

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.
Apartado Postal 740, Tel.: (503) 2226 1683 Fax: (503) 2225 2506

Figura 4.36 Solicitud de fabricación del freno mecánico dirigida a Escuela de Mecánica.

Diseño del freno mecánico.

- Vista frontal.

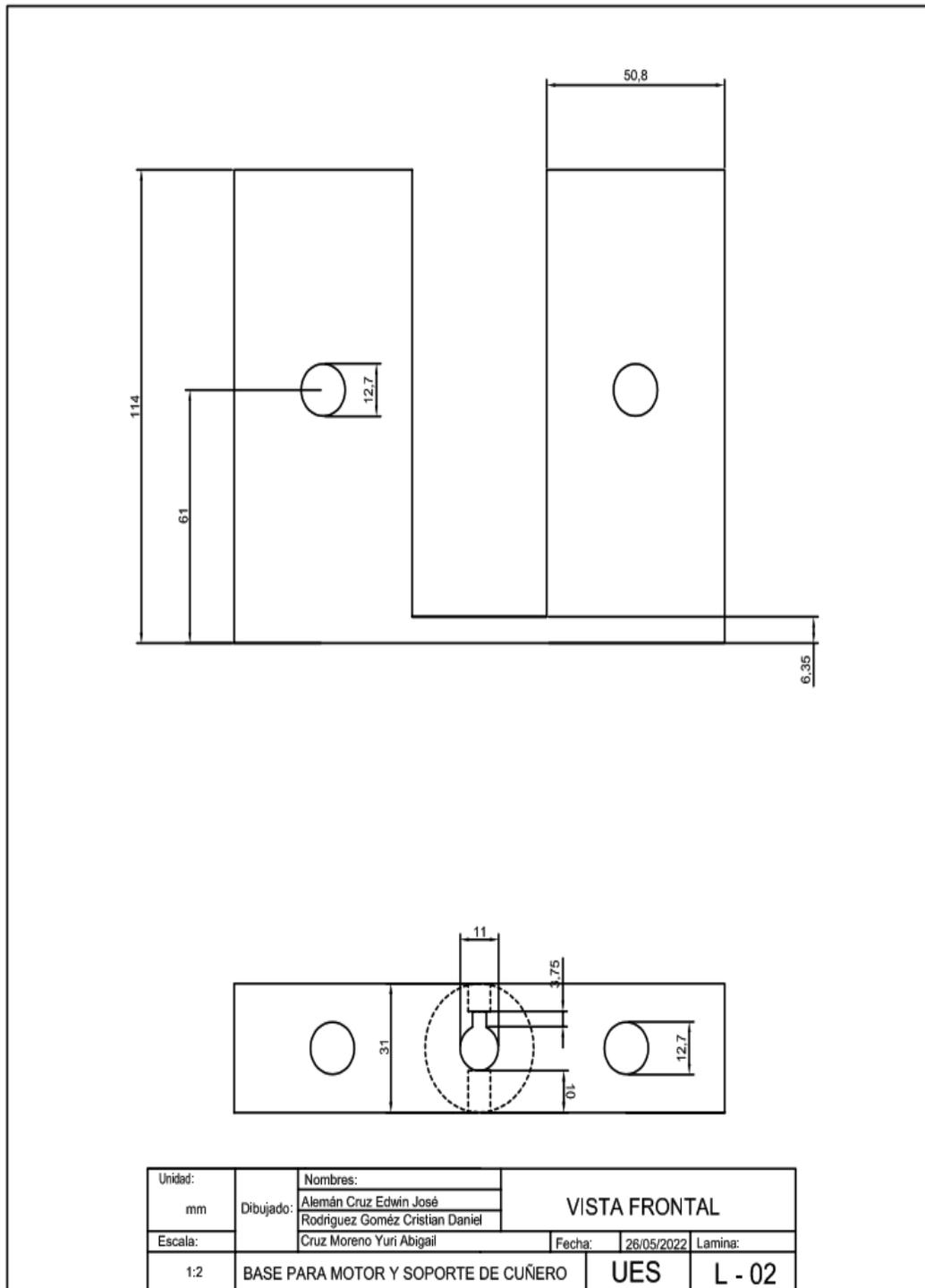


Figura 4.37 Esquema de sistema de freno L-02.

- Vista lateral derecha.

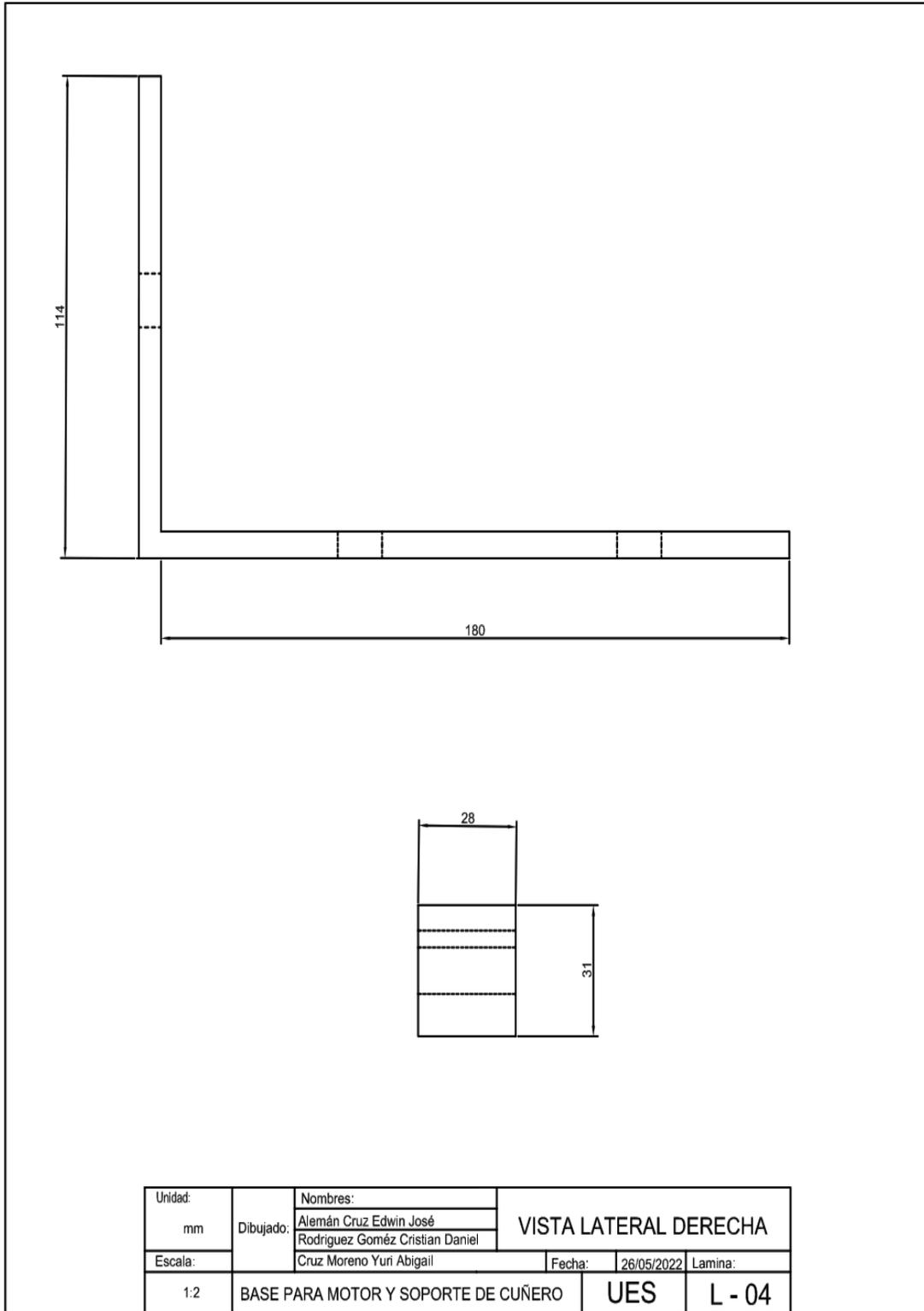


Figura 4.38 Esquema de sistema de freno L-04.

- Vista superior.

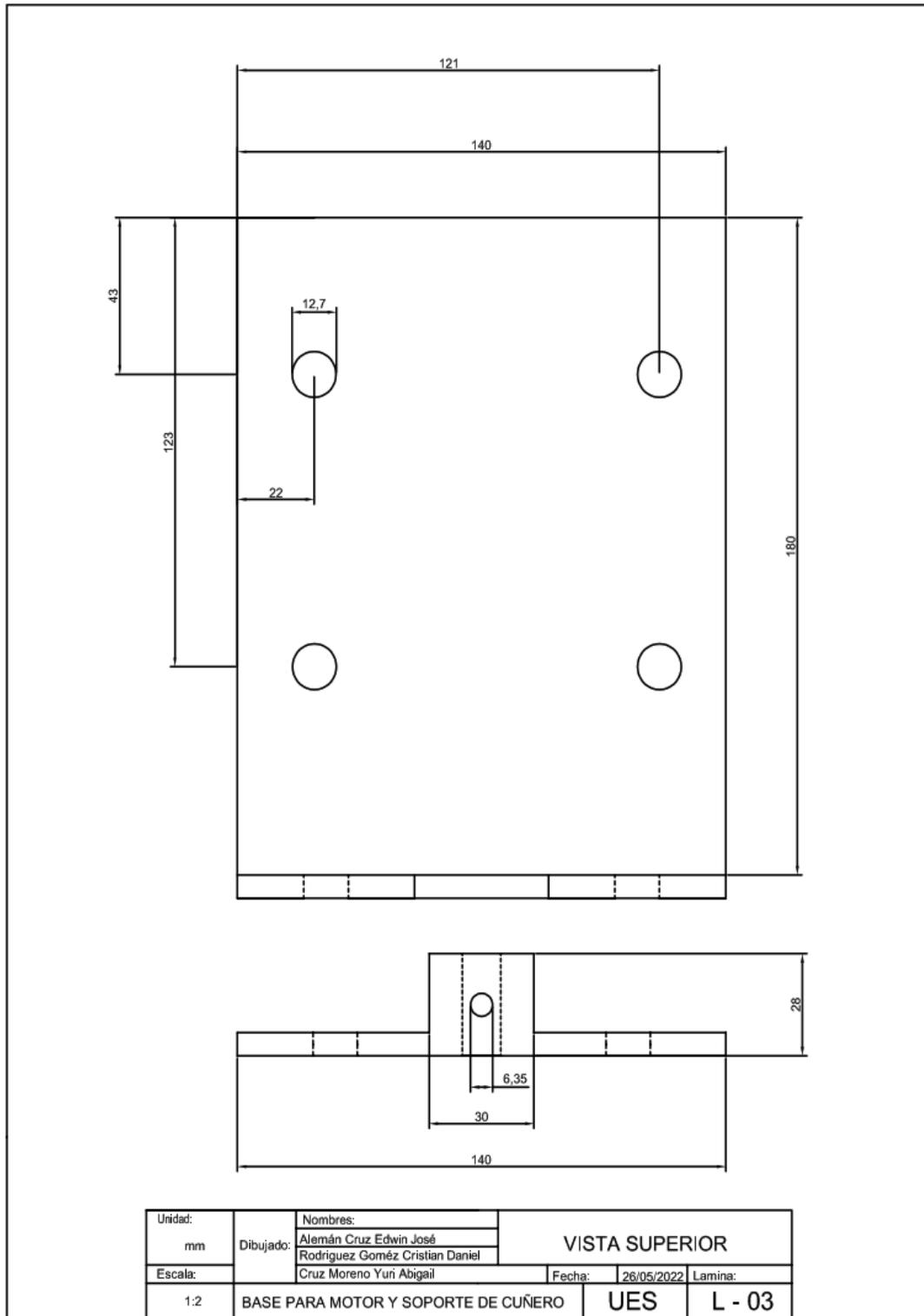


Figura 4.39 Esquema de sistema de freno L-03.

- Diseño 3D del freno metalúrgico.

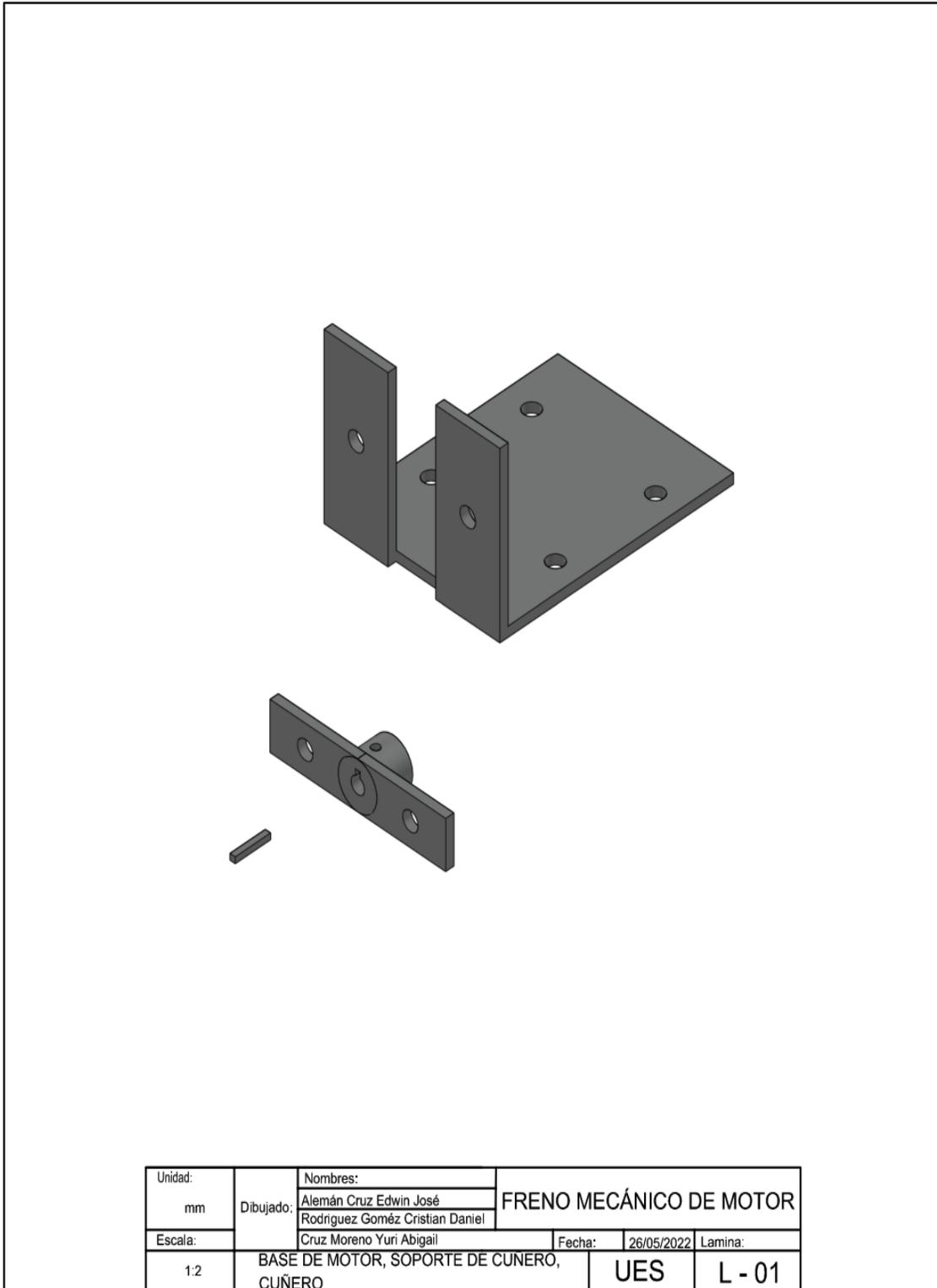


Figura 4.40 Esquema de sistema de freno L-01.

Material y equipo

- 1) AISI 1020
- 2) Electrodo E6013
- 3) Broca
- 4) Torno
- 5) Limas redondas, planas, cuadradas, triangulares, etc.
- 6) Soldadura.
- 7) Pulidora.
- 8) Taladro

Algunas especificaciones técnicas:

1) AISI 1020

Acero 1020 de baja dureza para usos convencionales de baja exigencia. Cuando se requiere una superficie muy dura pero un centro tenaz, este acero cementado cumple perfectamente.

Estirado en frío mejora sus valores de resistencia mecánica y su maquinabilidad.

Formas y color:

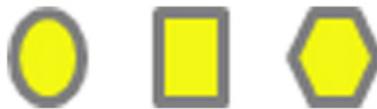


Figura 4.41 Formas material. (Normas ISO, Sf)

Estado de Suministro Acero 1020:

- Forjado
- Laminado con tolerancia DIN 1013
- Trefilado con tolerancia ISO 266-2 h11

Composición química (% en peso).

Tabla 4.4 Referencia de composición química. (Normas ISO, Sf)

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0.43	0.15	0.60	-	-
0.50	0.35	0.90	0.040	0.50

Densidad: 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

Propiedades Mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397

Tabla 4.5 Propiedades mecánicas. (Normas ISO, Sf)

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alargamiento en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)	Relación de maquinabilidad EF =100%
	PSI	MPa	PSI	MPa				
Caliente y maquinado	58000	400	32000	220	25	50	116	70
Estirado en frío	64000	440	53600	370	15	40	126	

Tratamientos Térmicos recomendados (Valores en °C)

Tabla 4.6 Tratamientos térmicos. (Normas ISO, Sf)

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	°T Crítica aprox.	
		Ablanda/. Enfriar al aire	Regeneración Enfriar en horno			Ac1	Ac3
1100-1250	870 - 900	850 - 890	850 - 890	Cementar 925	150 - 250	724	840

Aplicaciones.

Bases de matrices, soportes, engranajes, franges, pernos de anclaje, ejes, cadenas, bujes, tornillería corriente y pasadores de baja resistencia. Por su ductilidad es ideal para procesos de transformación en frío como doblar, estampar, recalcar, entre otros.

2) SMAW / Electrodo de varilla E6013.

Según AWS SFA 5.1 o E4313 según SFA 5.1M o CSA W48 es el electrodo de varilla de soldadura más utilizado para chapas metálicas, fabricación general y trabajos de soldadura estructural. Los electrodos E6013 [E4313] son muy similares a los electrodos E6012 [E4312] pero el E6013 tiene diferencias claras en el recubrimiento, la formación de escoria y la polaridad de soldadura.

El arco de los electrodos E6013 [E4313] es más silencioso y la superficie del cordón más suave con un perfil de ondulación más fino. Las características de usabilidad de los electrodos E6013 [E4313] varían ligeramente de una marca a otra.

Los electrodos E6013 tienen un poder de penetración bajo, escoria de congelación rápida y esto puede resultar en una penetración incompleta en uniones soldadas con filete.

Algunas marcas se recomiendan para aplicaciones de chapa donde su capacidad para soldar satisfactoriamente en la posición de soldadura vertical con progresión hacia abajo es una ventaja.

El tipo de recubrimiento de electrodo E6013 está compuesto por el revestimiento de fundente para electrodos E6013 contiene rutilo, celulosa, ferromanganeso, silicato de potasio como aglutinante y otros materiales silíceos.

Los compuestos de potasio permiten que los electrodos funcionen con corriente alterna a amperajes bajos y voltajes de circuito abierto bajos.

Proceso de fabricación.

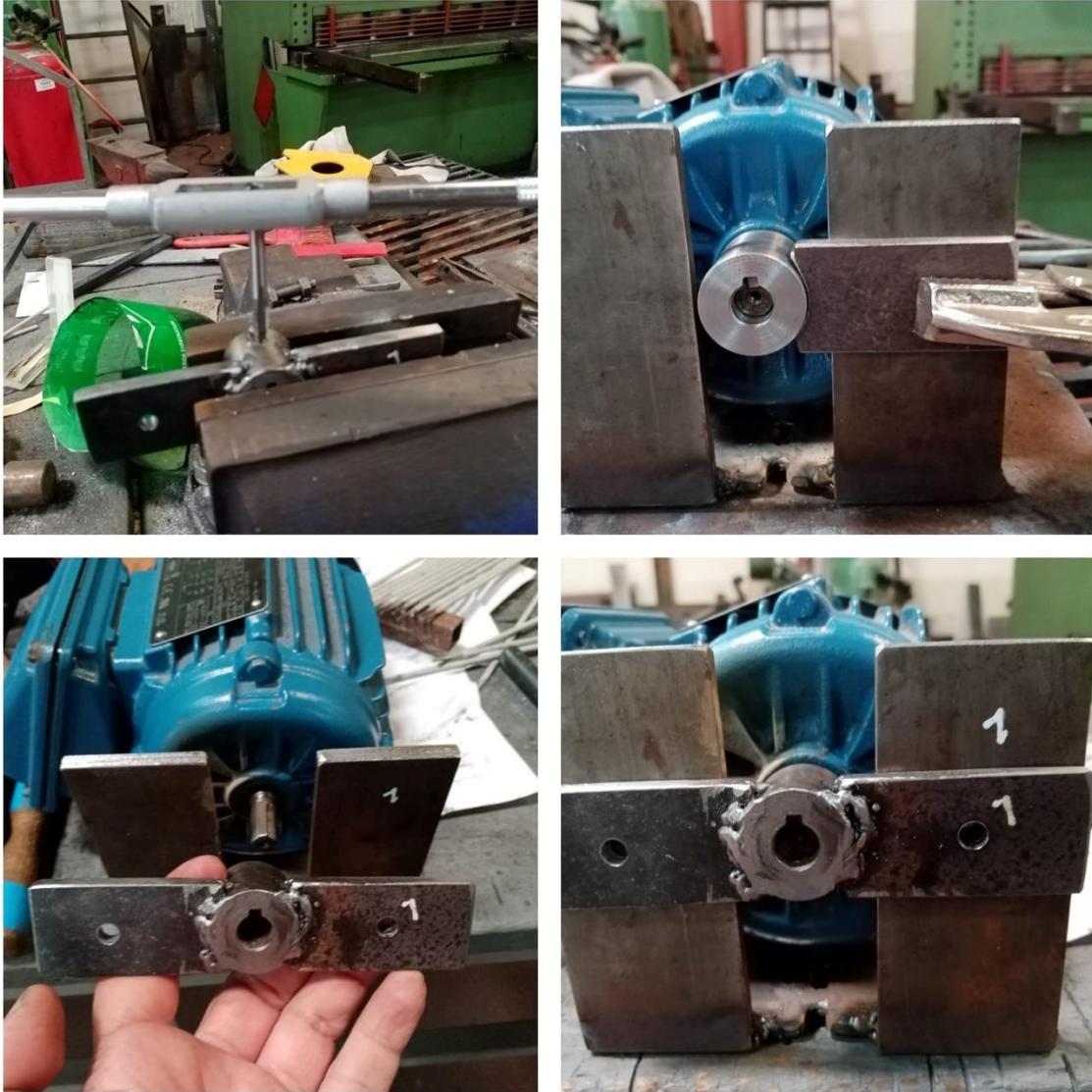


Figura 4.42 Fabricación freno mecánico.

Proceso de acabado.

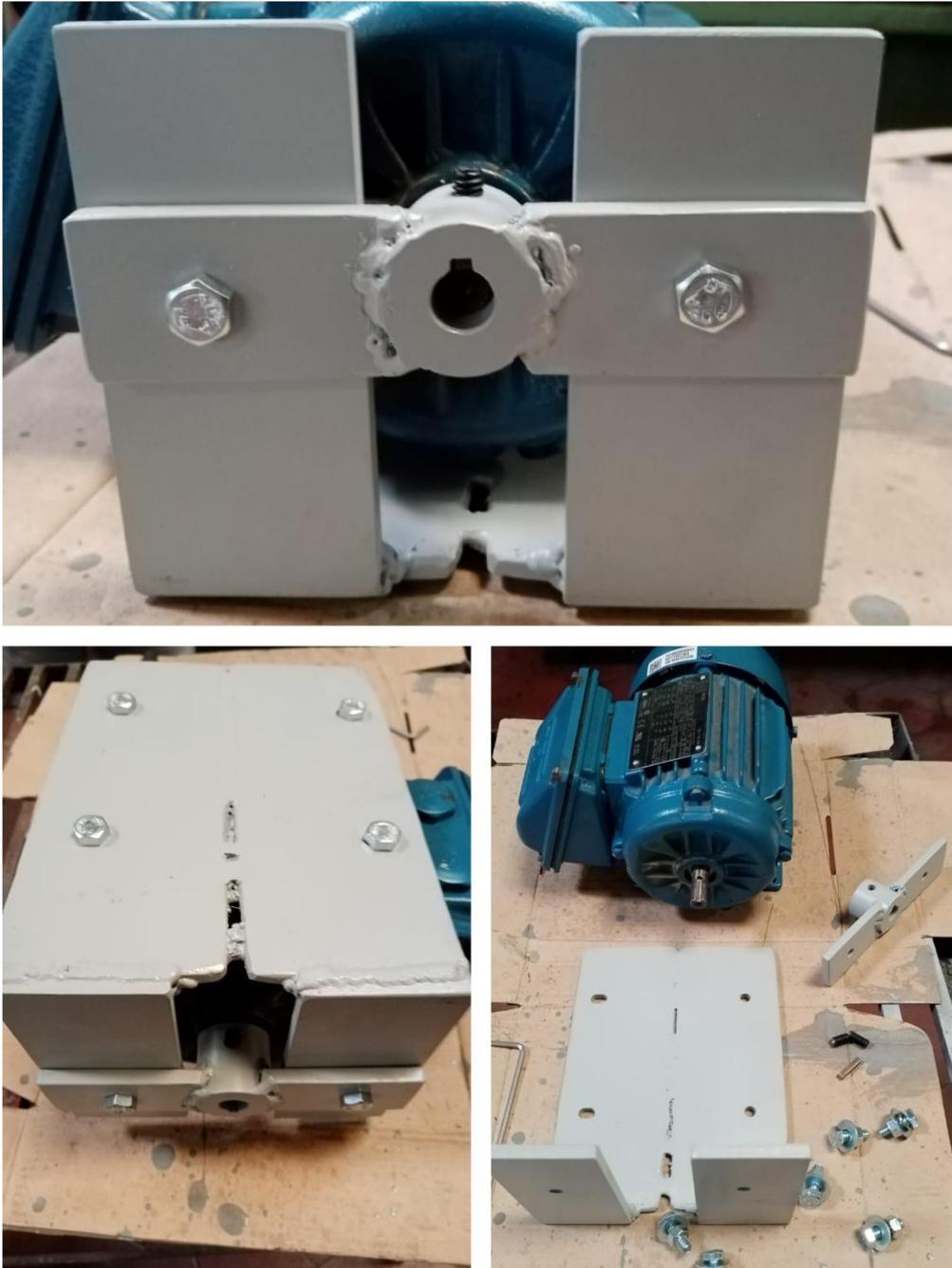


Figura 4.43 Proceso final freno mecánico.

4.8 Datos de placa del motor a ensayar WEG W22 modelo TE1BF0X0!

La placa característica mostrada en la figura 4.44 indica, además del nombre comercial del fabricante, tipo de motor (aquí suele indicar el tipo de ventilación la altura del centro del eje del motor sobre la base del mismo, así como también el número de polos) y número de fabricación, todos los datos nominales de funcionamiento que sean importantes.

Los datos de placa generalmente son los siguientes:

- a. Potencia (S), potencia mecánica (S) o (KW) entregada por el motor en el eje cuando trabaja a plena carga.
- b. Configuración de las bobinas del estator (y del rotor en el caso del motor de anillos).
- c. Tensión (V) de la red de suministro o de la fuente de energía eléctrica que se debería aplicar en cada configuración.
- d. Corriente (A) absorbida por el motor a plena carga para la respectiva configuración de las bobinas (además, la corriente del rotor en el caso de motores de anillos).
- e. Factor de potencia o $\cos \varphi$, que expresa el desfase que se produce a potencia nominal entre la tensión y la corriente.
- f. Frecuencia (Hz) de la red de alimentación.
- g. La velocidad de giro en (rpm) del rotor con el motor funcionando a plena carga.
- h. La clase de protección del motor. Se indica con una letra código.
- i. La clase de aislamiento. Este dato es una letra código y se indica solo para devanados con aislamiento especial, es decir, en caso de mayores exigencias térmicas.

La placa característica del motor a ensayar en este trabajo de graduación proporciona la siguiente información:

Marca: WEG W22

Modelo: TE1BFOXO!

Numero de fases: 3

Potencia: 0.25HP o 0.18KW

Eficiencia: IE1 – 62%

Velocidad rotorica: 3370 rpm

Voltaje nominal: 230V en estrella paralelo/460V en una sola estrella

Corriente nominal: 0.937A en estrella paralelo/ 0.469A en una sola estrella

Factor de potencia: 0.78

Frecuencia: 60Hz

Clase de protección: F

de puntas: 9

Conexiones: admite dos tipos de conexiones ESTRELLA-ESTRELLA-230V y ESTRELLA – 460V

Temperatura ambiente normal: 40C°

Grado de protección: IP55

Factor de sobrecarga: 1.15

Altitud: 1000 mts

Rodamiento delantero: 6201 – ZZ

Rodamiento posterior: 6201 - ZZ

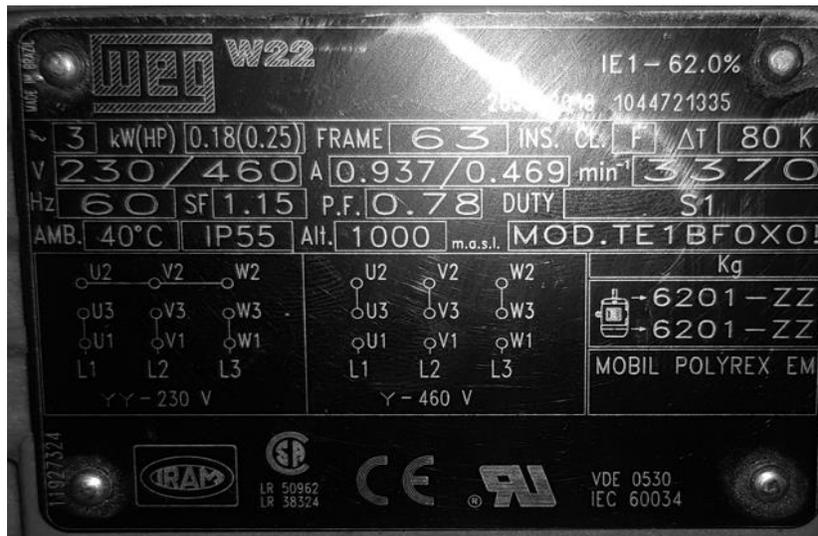


Figura 4.44 placa característica del motor WEG W22.

4.9 Practica de laboratorio para la prueba DC.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



TRABAJO DE GRADUACION

“DETERMINACION DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELECTRICOS APLICANDO METODOS INDIRECTO”

DIRECTOR EIE: Ing. Werner David Meléndez Valle

ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACION: Msc. Ing. Luis Roberto Chevez

COORDINADOR DE LABORATORIO: Br. Diego Alberto Escobar Marín

PRACTICA ELABORADA POR:

Br. Edwin José Alemán Cruz

Br. Cristian Daniel Rodríguez Gómez

Br. Yuri Abigail Cruz Moreno

PRACTICA DE LABORATORIO 1: DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DEL ESTATOR DE UN MOTOR TRIFASICO DE INDUCCION, MEDIANTE EL ENSAYO TENSION-CORRIENTE.

OBJETIVO:

- ✚ Obtener de manera experimental el valor de la resistencia del estator de un motor trifásico de inducción.

UTILIDAD DE LA PRACTICA: Esta práctica es importante ya que brinda información del primer parámetro del circuito equivalente del motor de inducción, el cual es el valor de la resistencia R_1 del estator, determinar este valor es necesario también para el

análisis de la prueba de vacío ya que con la resistencia R_1 conocida se pueden establecer las pérdidas del cobre en condiciones de vacío P_{cu0} , también es requerido para el análisis de la prueba de rotor bloqueado en el cálculo del valor de la resistencia del rotor R_2 .

En resumen, la prueba DC es una prueba indispensable y complementaria a la prueba de vacío y de rotor bloqueado.

La prueba DC, prueba de vacío y rotor bloqueado deben ser realizadas en el afán parametrizar un motor en particular y poder definir su circuito equivalente.

DESCRIPCION GENERAL DEL ENSAYO.

Para determinar el valor de la resistencia de fase del bobinado del estator se debe desarrollar un ensayo de rutina que se basa en tomar una serie de mediciones de tensión y corriente, y que luego mediante la "ley de ohm" se determina la resistencia del estator, a este ensayo generalmente se le conoce como **PRUEBA DC** o **PRUEBA OHMICA**. Esta prueba consiste en aplicar un voltaje de corriente continua al devanado del estator de tal manera de hacer circular una corriente, se utiliza la corriente DC por que esta no va producir ningún efecto de inducción electromagnético hacia el devanado del rotor además de que la reactancia es de cero en estas condiciones, en resumen la naturaleza de la corriente DC evita que no exista corriente circulante en el bobinado rotorico, lo que se trasmite en que el eje del motor permanezca sin movimiento durante la ejecución de la prueba, por lo tanto el único elemento de potencia que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del bobinado del estator.

Esquema eléctrico básico para un motor conectado en estrella.

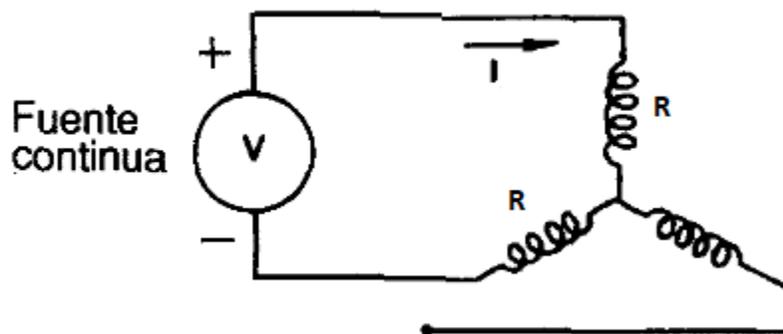


Figura 4.45 Esquema eléctrico para el ensayo de DC para un motor en Y.

Como se muestra en la figura 4.45 la prueba requiere de una fuente de potencia regulable que se conecta directamente a dos de las bobinas del estator, luego se debe variar la tensión producida por la fuente hasta hacer circular la corriente nominal por los dos bobinados, como la resistencia eléctrica varía con la temperatura, lo que se intenta es calentar las bobinas para alcanzar la temperatura que tendría el motor durante operación

normal, una vez alcanzado ese punto medir la caída de tensión entre los extremos de las bobinas.

CALCULO DE LA RESISTENCIA DEL ESTATOR.

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{2R_{DC1}}$$

$$2R_{DC1} = \frac{V_{DC}}{R_{DC}}$$

$$R_{DC1} = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$$

La resistencia obtenida tiene un error involucrado, y es debido a que la corriente continua no produce el efecto pelicular, sin embargo, la corriente alterna si produce ese efecto, entonces al no considerarlo en la ecuación la resistencia encontrada en DC será menor a la resistencia real en AC.

CORRECCION POR EFECTO PELICULAR.

En la práctica es común utilizar un factor entre el (10-20) % del valor de la resistencia calculada.

Considerando un 10%:

$$R_{DC1} = \left(\frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \right) \times 0.1$$

CORRECCION POR TEMPERATURA.

Además de considerar el efecto pelicular, algunas veces se requiere que la resistencia del devanado sea corregida a otro valor de temperatura. Con el valor de la resistencia R_{DC1} encontrada a una temperatura $T_{inicial}$, se puede calcular una resistencia R_{DC2} a cualquier otro valor de temperatura T_{final} usando la siguiente ecuación:

$$R_{DC2} = \frac{R_{DC1}(T_{final} + K_1)}{T_{inicial} + K_1}$$

Donde:

R_{DC1} : es el valor conocido de la resistencia de fase del bobinado del estator en ohmios a la temperatura $T_{inicial}$

T_1 : es la temperatura en °C, del devanado al cual se midió R_{DC1}

T_2 : es la temperatura en $^{\circ}C$, a la que se quiere corregir la resistencia R_{DC1}

R_{DC2} : es la resistencia, del devanado, en ohmios corregida a la temperatura T_{final}

K_1 : es 234,5 para 100% de conductividad del cobre, o 225 para el aluminio basado en una conductividad volumétrica del 62%. Para el caso de otros materiales de bobinado se debe utilizar un valor de K_1 adecuado.

Para los motores trifásicos de inducción los bobinados son de cobre por lo que $K_1 = 234.5$

$$R_{DC2} = \frac{R_{DC1}(T_{final} + 234.5)}{T_{inicial} + 234.5}$$

La norma IEEE Std 112 respalda la ecuación de corrección por temperatura y el factor utilizado para considerar el efecto pelicular.

Con el procedimiento y desarrollo experimental del ensayo más la aplicación de las respectivas correcciones, se puede decir que el valor que se obtendría tiene un alto grado de aceptación.

CONEXIÓN ESTRELLA - ESTRELLA

El motor trifásico de inducción a ensayar es de nueve terminales con el estator conectado en estrella - estrella de bajo voltaje, lo que significa que la bobina estatórica está formada por dos circuitos en estrella con sus fases conectadas en paralelo y con neutros aislados, tal como se muestra en el esquema eléctrico de la figura 4.46

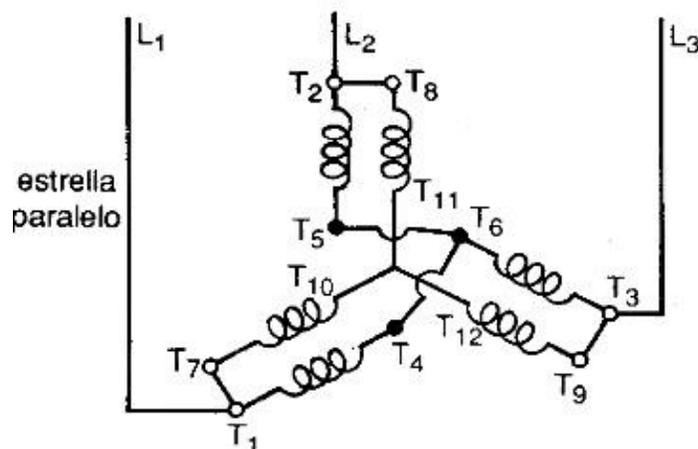


Figura 4.46 Diagrama de conexión estrella-estrella para motor de nueve puntas.

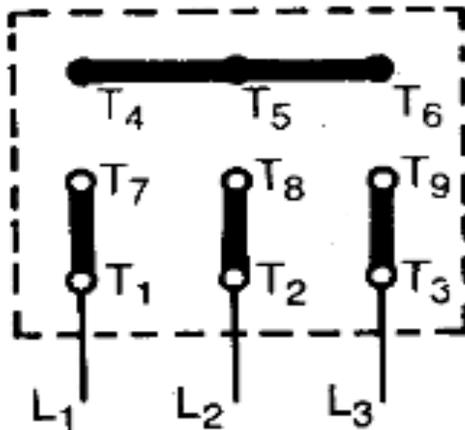


Figura 4.47 Conexión estrella – estrella para motor de nueve puntas visto desde las terminales.

Tabla 4.7 Resumen de conexiones representadas con nomenclatura americana.

CONEXIONES DEL MOTOR								
PUNTAS		LINEA DE ALIMENTACION	PUENTE EXTERNO			PUENTE INTERNO		
T1	T7	L1	T4	T5	T6	T10	T11	T12
T2	T8	L2						
T3	T9	L3						

Como se ha explicado en la descripción general del ensayo, el procedimiento requiere de aplicar una tensión continua a dos de los bobinados, entonces para hacer simple el desarrollo del ensayo y la toma de mediciones se debe separar las dos estrellas de la configuración del motor.

PROCEDIMIENTO PARA SEPARAR LAS DOS CONEXIONES ESTRELLA.

En el diagrama de conexión mostrado en la figura 4.46 se puede observar que para separar los dos circuitos en estrella basta con desconectar la unión que existe entre las terminales: (T_1T_7) , (T_2T_8) , (T_3T_9) , lo que equivale en la práctica a quitar las tres tuercas que unen esos puntos, lo que hace que las terminales de las estrellas queden sueltas, la unión entre terminales está representadas en la figura 4.47 con líneas gruesas de color negro.

PROCEDIMIENTO DE LA PRACTICA.

Teniendo separadas las conexiones en estrella medir la temperatura ambiente en la que se va desarrollar la prueba, también medir la temperatura $T_{INICIAL}$ del bobinado al cual se le quiere determinar la resistencia y no olvidar también que se tiene que medir la temperatura T_{FINAL} del bobinado justo al finalizar el ensayo.

Anotar las mediciones en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Mediciones de la temperatura ambiente y la temperatura del bobinado a tomar durante la prueba DC.

MEDICION DE LA TEMPERATURA		
$T_{AMBIENTE}$ (°C)	$T_{INICIAL}$ del bobinado (°C)	T_{FINAL} del bobinado (°C)

PROCESO DE MANIOBRA.

Para este ensayo se necesita el módulo DL180C DE LORENZO.

1. Antes de realizar cualquier conexión por seguridad verificar que el interruptor principal de encendido del módulo DL180C DE LORENZO se encuentre en la posición de APAGADO.

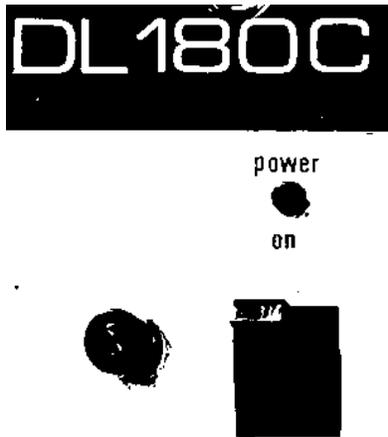


Figura 4.48 Interruptor principal del módulo DL180C DE LORENZO.

2. Verificar que las fuentes de alimentación tengan las perillas de control totalmente girada en el sentido antihorario es decir que tengan la posición inicial de 0 voltios.

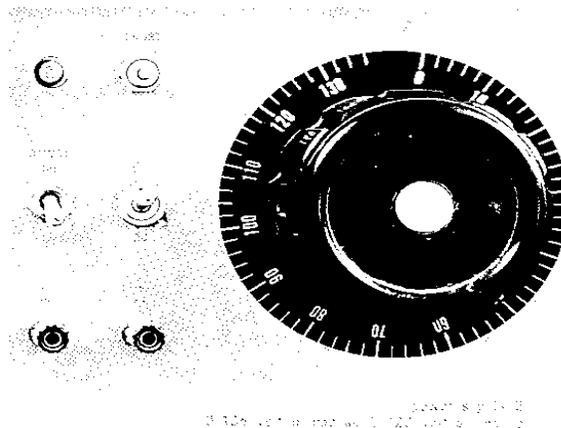


Figura 4.49 Fuente de alimentación 2 del módulo DL180C de LORENZO.

Verificada la ausencia de voltaje en el módulo DL180C desarrollar el siguiente procedimiento:

PROCEDIMIENTO PARA EL CONEXIONADO

Tomar como guía el conexionado practico mostrado en la figura 4.50

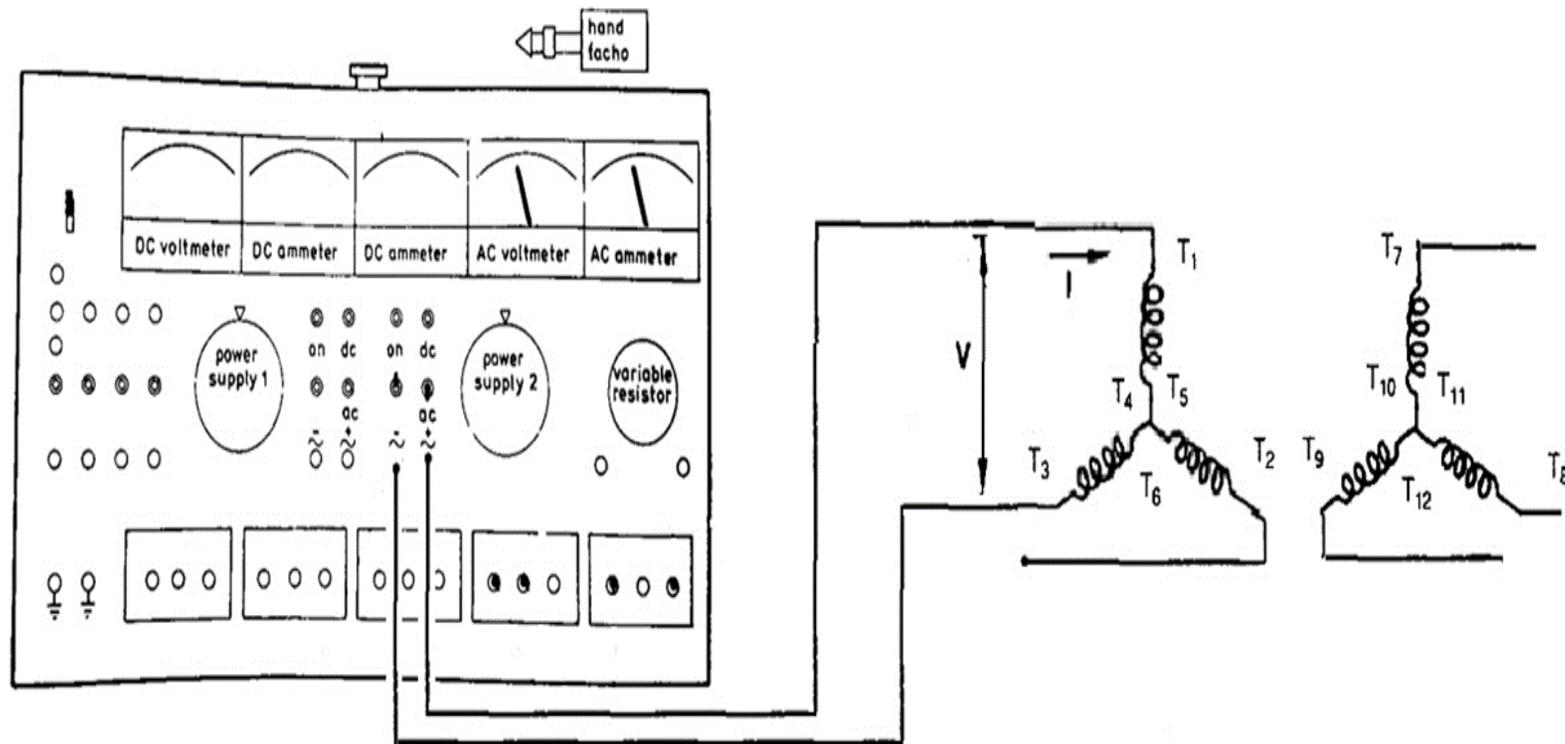


Figura 4.50 Conexión práctico para el ensayo tensión – corriente aplicado entre los terminales (T_1T_3).

3. Conecte el terminal T_1 de la bobina estática del motor a la bornera (+) de la fuente de alimentación 2.
4. Conecte el terminal T_3 de la bobina estática del motor a la bornera (-) de la fuente de alimentación 2.
5. Conecte un voltímetro en paralelo a los bornes (+) (-) de la fuente de alimentación 2 para tomar lecturas del voltaje (V).
6. Conecte un amperímetro en serie entre la terminal T_1 y la terminal (+) de la fuente de alimentación 2 para tomar lecturas de la corriente I .

El módulo DL180C tiene dos fuentes de potencia que están nombradas en la caratula del módulo como FUENTE DE ALIMENTACION 1 Y 2 que pueden entregar voltaje AC/DC, estas fuentes tienen los siguientes parámetros nominales:

- ✓ En la configuración AC ambas fuentes son regulables de 0 - 135V, 5A
- ✓ En la configuración DC ambas fuentes son regulables de 0 - 120V, 5A

Cada una tiene una perilla de regulación de voltaje más dos interruptores, un interruptor de encendido que permite activar la fuente, y el segundo sirve para seleccionar el tipo de voltaje AC o DC.

PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDICIONES.

Ahora para energizar el circuito y tomar mediciones realizar el siguiente procedimiento:

7. Coloque el interruptor principal del módulo DL180C en la posición de ENCENDIDO.
8. Coloque el interruptor de selección de tipo de voltaje en la posición DC
9. Para energizar el circuito llevar el interruptor que activa la fuente de alimentación 2 a la posición de encendido.
10. Varie lentamente la perilla de regulación en el sentido horario hasta leer en el amperímetro una corriente de 0.100A y anotar tanto el valor de corriente como el voltaje alcanzado.
11. Continúe variando la perilla de regulación de voltaje y tomar mediciones cada 0.1A hasta alcanzar la corriente nominal del motor de 0.937A. (tener cuidado de no superar la corriente nominal ya que la bobina podría sufrir daños)

HERRAMIENTAS Y EQUIPO NECESARIOS PARA DESARROLLAR EL PROCESO DE MANIOBRA.

- Motor trifásico de inducción (es recomendable que el motor a ensayar tenga una corriente de placa inferior a los 5A)
- 1 modulo DL180C DE LORENZO
- 2 multímetros FLUKE 115
- 3 cables de conexión banana – banana
- 2 cables de conexión banana – caimán

- Termómetro de mercurio
- Termómetro digital.
- Tenaza
- Cinta aislante

Complete la siguiente tabla de mediciones.

Tabla 4.9 Mediciones a tomar en las terminales (T_1T_3).

T_1T_3				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC1_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC1_{PROMEDIO}$
0.100				
0.200				
0.300				
0.400				
0.500				
0.600				
0.700				
0.800				
0.900				
0.937				

Repita el proceso de maniobra descrito en nueve pasos en los terminales (T_1T_2) (T_2T_3) y llenar las siguientes tablas.

Tabla 4.10 Mediciones a tomar en los terminales (T_1T_2).

T_1T_2				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC2_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC2_{PROMEDIO}$
0.100				
0.200				
0.300				
0.400				
0.500				
0.600				
0.700				
0.800				
0.900				
0.937				

Tabla 4.11 Mediciones a tomar en las terminales (T_2T_3).

T_2T_3				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC3_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC3_{PROMEDIO}$
0.100				
0.200				
0.300				
0.400				
0.500				
0.600				
0.700				
0.800				
0.900				
0.937				

Ahora se puede calcular la Resistencia R_1 del estator del motor con los valores promedios calculados en las tablas anteriores:

$$R_{DC} = \left[\frac{RDC1_{PROMEDIO} + RDC2_{PROMEDIO} + RDC3_{PROMEDIO}}{3} \right]$$

Asumiendo un 10% por el efecto pelicular:

$$R_1 = R_{AC} = R_{DC} \times 0.1$$

Si el procedimiento se realiza con la maquina parada a temperatura ambiente sin haber realizado ninguna prueba antes, y si se ejecuta el procedimiento con rapidez y no se experimentan cambios significativos de temperatura no será necesario aplicar la corrección por temperatura, lo que significa que el resultado de la resistencia R_1 de la bobina obtenida se encuentra a temperatura ambiente.

OBSERVACIONES.

- ❖ Cada una de las fases deben presentar el mismo valor de resistencia, en la práctica es común ver pequeñas variaciones por lo cual se considera la media aritmética para el cálculo de la resistencia del estator.
- ❖ La práctica da información suficiente para realizar la prueba DC a motores en configuración (estrella) o (estrella – estrella) en paralelo, con corriente nominal de placa por debajo de los 5A, recordar que el módulo DL180C está diseñado para

sumir una carga que demande no más de 5A, por arriba de ese valor las protecciones del módulo actuarán, por lo que no se recomienda ensayar motores de corriente nominal arriba de los 5A.

- ❖ Se ha propuesto un procedimiento y una maniobra a ejecutar particularmente para ensayar el motor disponible en el laboratorio marca WEG - W22 modelo TE1BF0X0 Disponible en la escuela de ingeniería eléctrica.
- ❖ Si se quiere ensayar un motor con el bobinado del estator configurado en DELTA se debe plantear otra ecuación para encontrar R_{DC1} obtenida la resistencia se deben considerar las correcciones por temperatura y efecto pelicular.

4.10 Desarrollo de la práctica de laboratorio de la prueba DC.

MOTOR TRIFASICO A ENSAYAR.

MARCA: WEG - W22

MODELO: TE1BF0X0! (Ver sección 4.8 para verificar sus parámetros nominales de placa) este modelo de motor está disponible en la escuela de Ingeniería eléctrica y ha sido una donación por parte de los integrantes del presente trabajo de graduación particularmente para desarrollar la práctica.

INFORMACION IMPORTANTE A CONSIDERAR DE LA PLACA DE DATOS DEL MOTOR PARA DESARROLLAR LA PRACTICA.

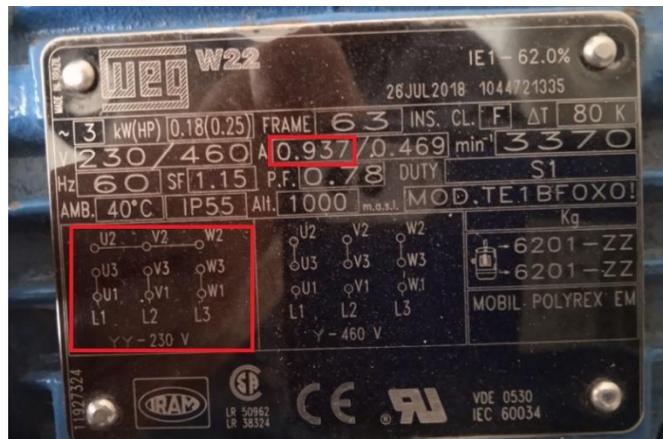
Marca: WEG W22

Modelo: TE1BF0X0!

$I_{nominal} = 0.937A$

Tipo de conexión: Y – Y paralelo

Terminales: Motor de 9 terminales.



MEDICION DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL.

Con el termómetro de mercurio, se procede a tomar lectura de la temperatura ambiente al interior del laboratorio de máquinas eléctricas

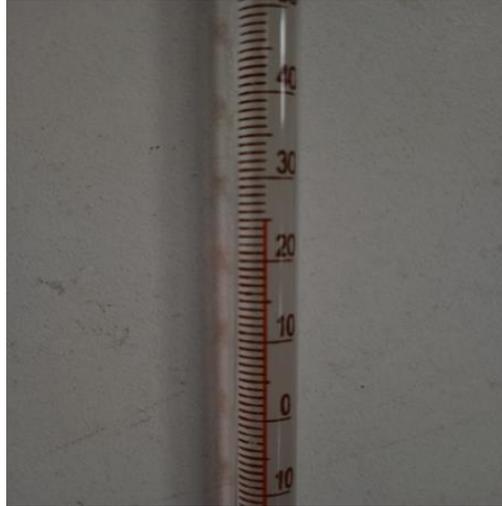


Figura 4.51 Medición de la temperatura ambiente del laboratorio.

El valor de temperatura que registro el termómetro fue:

$$T_{\text{AMBIENTE}} = 25^{\circ}\text{C}$$

MEDICION DE LA TEMPERATURA DEL BOBINADO ANTES DE LA PRUEBA

Con el termómetro infrarrojo FLUKE 65 se midió la temperatura inicial y final de los terminales de la bobina T_1 y T_3 .

Se realizaron tres mediciones de temperatura inicial, se midió directamente en los terminales, más una medición en el neutro los resultados fueron los siguientes:

$$T_{\text{INICIAL EN } T_1} = 25.1^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{INICIAL EN } T_3} = 25.2^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{INICIAL EN EL NEUTRO}} = 25.1^{\circ}\text{C}$$

Promedio:

$$T_{\text{INICIAL del bobinado}} = \frac{25.1 + 25.2 + 25.1}{3}$$

$$T_{\text{INICIAL del bobinado}} = 25.13^{\circ}\text{C}$$

MEDICION DE A TEMPERATURA DEL BOBINADO AL FINALIZAR LA PRUEBA



Figura 4.52 Medición de la temperatura final en el neutro.

$$T_{FINAL EN T1} = 25.9^{\circ}C$$

$$T_{FINAL EN T3} = 25.5^{\circ}C$$

$$T_{FINAL EN EL NEUTRO} = 25.7^{\circ}C$$

$$T_{FINAL del bobinado} = \frac{25.9 + 25.5 + 25.7}{3}$$

$$T_{FINAL del bobinado} = 25.7^{\circ}C$$

El resumen de todas las temperaturas medidas son los mostrados en la tabla 4.12

Tabla 4.12 Resultados de las mediciones de temperatura.

MEDICION DE LA TEMPERATURA		
$T_{AMBIENTE} (^{\circ}C)$	$T_{INICIAL} del bobinado (^{\circ}C)$	$T_{FINAL} del bobinado (^{\circ}C)$
25	25.13	25.7

Ahora se va desarrollar el procedimiento y desarrollo de la maniobra de la prueba DC de la sección 4.9

CONEXIONES PARA EL MONTAJE PRACTICO

Con la ayuda de la tenaza se retiró las tres tuercas que mantienen sujetas las terminales (T_1T_7), (T_2T_8), (T_3T_9) todas estas terminales son extremos de bobina de las dos estrellas que tiene el estor del motor.

Retiradas las tuercas de sujeción quedan separados los circuitos de estrellas que se encontraban en paralelo, es decir la estrella con extremos de bobina T_1, T_2, T_3 y con acceso

neutro (T_4, T_5, T_6) queda separada de la estrella con extremos de bobina T_7, T_8, T_9 y neutro sin acceso (T_{10}, T_{11}, T_{12}).

Ahora se debe cubrir de cinta aislante los terminales de extremo T_7, T_8, T_9 más la terminal de extremo T_2 , lo que se intenta es aislar eléctricamente las terminales que no son utilizadas en el procedimiento, y que no se recomienda dejar sin aislar debido a que puede ocurrir cortocircuitos y provocar errores en la prueba.

Con los pasos anteriores ya se tiene preparado los terminales de bobina T_1 y T_3 que se va ensayar, como se puede observar en la figura 4.46 y 4.47 estas terminales pertenecen a la estrella con acceso al neutro, por lo tanto, el procedimiento y la maniobra descritos en los nueve pasos de la sección 4.9 se va aplicar a la estrella con acceso a neutro.

Ahora se procede a realizar el conexionado practico, se utilizó la fuente de alimentación 1 ya que la 2 presentaba problemas en la perilla de regulación de voltaje lo que da lugar al siguiente montaje.



Figura 4.53 Montaje practico de la prueba DC.

MEDICIONES EN LAS TERMINALES DE LA ESTRELLA CON ACCESO A NEUTRO.

TOMA DE MEDICIONES EN (T_1T_3)

TERMINALES (T_1T_3)				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido} (V)$	$RDC1_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC1_{PROMEDIO} (\Omega)$
0.100	0.108	6.61	30.6018519	31.6222827
0.200	0.206	12.62	30.631068	
0.300	0.298	18.27	30.6543624	
0.400	0.406	25.07	30.8743842	
0.500	0.500	31.16	31.16	
0.600	0.601	37.87	31.5058236	

0.700	0.691	43.99	31.8306802
0.800	0.799	51.79	32.4092616
0.900	0.896	59.11	32.9854911
0.937	0.937	62.91	33.5699039

Tabla 4.13 Resultado de las mediciones realizadas entre (T_1T_3)

RESULTADO DE LA TOMA DE MEDICIONES EN (T_1T_2)

TERMINALES (T_1T_2)				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC2_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC2_{PROMEDIO} (\Omega)$
0.100	0.106	6.464	30.490566	31.6120596
0.200	0.205	12.53	30.5609756	
0.300	0.298	18.31	30.7214765	
0.400	0.410	25.32	30.8780488	
0.500	0.497	30.88	31.0663984	
0.600	0.597	37.52	31.4237856	
0.700	0.699	44.43	31.7811159	
0.800	0.801	51.75	32.3033708	
0.900	0.901	59.34	32.9300777	
0.937	0.937	63.65	33.9647812	

Tabla 4.14 Resultado de las mediciones realizadas entre (T_1T_2)

RESULTADO DE LA TOMA DE MEDICIONES EN (T_2T_3)

TERMINALES (T_2T_3)				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC3_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC3_{PROMEDIO} (\Omega)$
0.100	0.108	6.62	30.6481481	31.6758028
0.200	0.207	12.73	30.7487923	
0.300	0.307	18.98	30.9120521	
0.400	0.400	24.83	31.0375	
0.500	0.500	31.22	31.22	
0.600	0.611	38.49	31.497545	
0.700	0.693	44.07	31.7965368	
0.800	0.805	52.01	32.3043478	
0.900	0.901	59.49	33.0133185	
0.937	0.940	63.13	33.5797872	

Tabla 4.15 Resultado de las mediciones realizadas entre (T_2T_3)

4.11 Práctica de laboratorio para la prueba de vacío.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



TRABAJO DE GRADUACION

“DETERMINACION DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELECTRICOS APLICANDO METODOS INDIRECTO”

DIRECTOR EIE: Ing. Werner David Meléndez Valle

ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACION: Msc. Ing. Luis Roberto Chevez

COORDINADOR DE LABORATORIO: Br. Diego Alberto Escobar Marín

PRACTICA ELABORADA POR:

Br. Edwin José Alemán Cruz

Br. Cristian Daniel Rodríguez Gómez

Br. Yuri Abigail Cruz Moreno

PRACTICA DE LABORATORIO 2: DETERMINACION DE LAS PERDIDAS MECANICAS P_m Y PERDIDAS DEL HIERRO P_{FE} DE UN MOTOR TRIFASICO DE INDUCCION, MEDIANTE EL ENSAYO DE VACIO.

OBJETIVOS:

- ✚ Obtener de manera experimental las pérdidas mecánicas P_m de un motor trifásico de inducción operando en vacío.
- ✚ Con las pérdidas mecánicas P_m obtenidas calcular las pérdidas en el hierro P_m

UTILIDAD DE LA PRACTICA: Cuando al motor trifásico de inducción se hace operar a tensión nominal sin ninguna carga conectada al eje, bajo esta condición de ausencia de

carga no hay potencia útil que el motor pueda entregar (la potencia útil es de cero porque el motor no mueve nada, solo está rotando su propio eje muy cerca de la velocidad nominal) por lo que se dice que la potencia de vacío está asociada únicamente a las pérdidas por fricción en el eje y rozamiento con el aire, es decir a las pérdidas mecánicas P_m , pérdidas del cobre P_{cu0} y pérdidas del hierro P_{Fe} .

$$P_0 = \underbrace{P_{Fe}}_{\text{Depende de la tensión}} + \underbrace{P_m}_{\text{Depende de la velocidad}} + \underbrace{P_{cu0}}_{\text{Depende de la corriente}}$$

Los motores trabajan a tensión, corriente y velocidad nominal por esa razón la suma de pérdidas ($P_{Fe} + P_m$) son constantes, mientras que las pérdidas del cobre P_{cu0} son consideradas variables porque dependen de la corriente, y esta a su vez varía dependiendo la carga que se le conecte al motor.

Ahora bien, conocer estas pérdidas es necesario para poder determinar parte del circuito equivalente, específicamente la rama paralela que está formada por una resistencia de magnetización R_{FE} y una reactancia de magnetización $|X_{eq}|$.

En ese sentido es notoria la relevación que tiene la prueba de vacío ya que es útil para determinar los valores de todas las pérdidas antes mencionadas, que luego son requeridas para calcular la resistencia del hierro R_{FE} y la magnitud total de la reactancia $|X_{eq}|$ y poder definir el circuito paralelo en condiciones de vacío.

DESCRIPCION GENERAL DEL ENSAYO.

Para determinar cada una de las pérdidas en vacío mostradas en la ecuación anterior se debe desarrollar un ensayo de rutina conocido como **PRUEBA DE VACIO** o **PRUEBA A ROTOR LIBRE**. La prueba debe ejecutarse a frecuencia nominal y consiste en aplicar voltaje con una fuente trifásica variable balanceada a los terminales del bobinado del estator, iniciando con la tensión nominal y disminuyendo la tensión de la fuente en espacios que el ensayista estime convenientes hasta alcanzar un mínimo del 30% del voltaje nominal, por cada nivel de tensión que se disminuye se debe tomar medición de la tensión de línea a neutro, corriente de línea, y la potencia trifásica de entrada, es común tomar mediciones de línea a neutro cuando el estator del motor está configurado en estrella, si las mediciones fueran tomadas de línea a línea se deberá calcular el voltaje de línea a neutro dividiendo entre $\sqrt{3}$.

Esquema eléctrico básico.

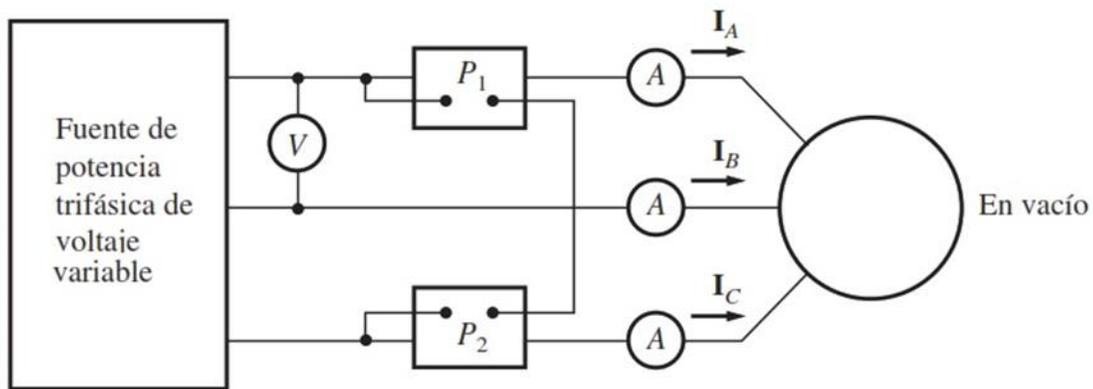


Figura 4.54 Esquema eléctrico para el ensayo de vacío.

PROCEDIMIENTO DE LA PRACTICA.

Como se puede observar en el esquema eléctrico mostrado en la figura 4.54 se necesita de una fuente trifásica variable, entonces para desarrollar este ensayo es requerido el uso de la maquina universal de pruebas Hampden ya que dispone de una fuente trifásica variable con la siguiente capacidad:

Tensión nominal: 208V

Corriente nominal: 13A

Ver sección 1.3 donde se encuentra la descripción detallada de la maquina universal de pruebas Hampden, y la sección 1.4.4 donde se encuentra disponible la información de la fuente trifásica variable.

PROCESO DE MANIOBRA.

1. Antes de realizar el conexionado practico de la figura 4.57, por seguridad verificar que el breaker (protección principal de la MUH) este apagado.



Figura 4.55 Alimentador y protección principal de la maquina universal de pruebas Hampden.

2. Verificar que el main AC de la maquina también se encuentre en la posición de APAGADO.
3. Revisar que el breaker de la fuente este en la posición de apagado, con el dial de la perilla de regulación en la posición de CERO.

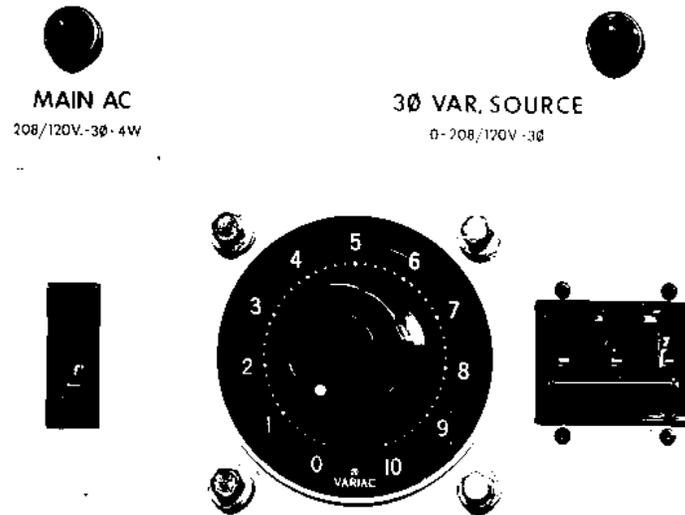


Figura 4.56 Main principal de la MUH, breaker de activación de la fuente 3 ϕ y su perilla de control.

Verificada la ausencia de voltaje en la maquina universal de pruebas Hampden desarrollar el siguiente procedimiento de conexión.

PROCEDIMIENTO PARA EL CONEXIONADO.

Tome como guía el conexionado practico mostrado en la figura 4.57

1. Conecte los terminales de salida $R S T$ de la fuente trifásica variable de la MUH, a los terminales 1L1, 3L2, 5L3 de la protección del motor siemens 3VU1300-0MK00
2. Conecte las tres líneas de la estrella del secundario del trasformador trifásico a las terminales 2T1, 4T2, 6T3 de la protección del motor siemens 3VU1300-0MK00 (nótese que el trasformador se va utilizar como elevador de voltaje)
3. Conecte las tres líneas de la delta del primario del trasformador trifásico a UN LADO EXTREMO del automático de protección.

DEL OTRO EXTREMO DEL AUTOMATO:

4. Conecte la línea de suministro R del primario del trasformador, a los terminales del motor donde se unen las terminales ($T_2 T_8$)
5. Conecte la línea de suministro S del primario del trasformador, a los terminales del motor donde se unen las terminales ($T_1 T_7$)

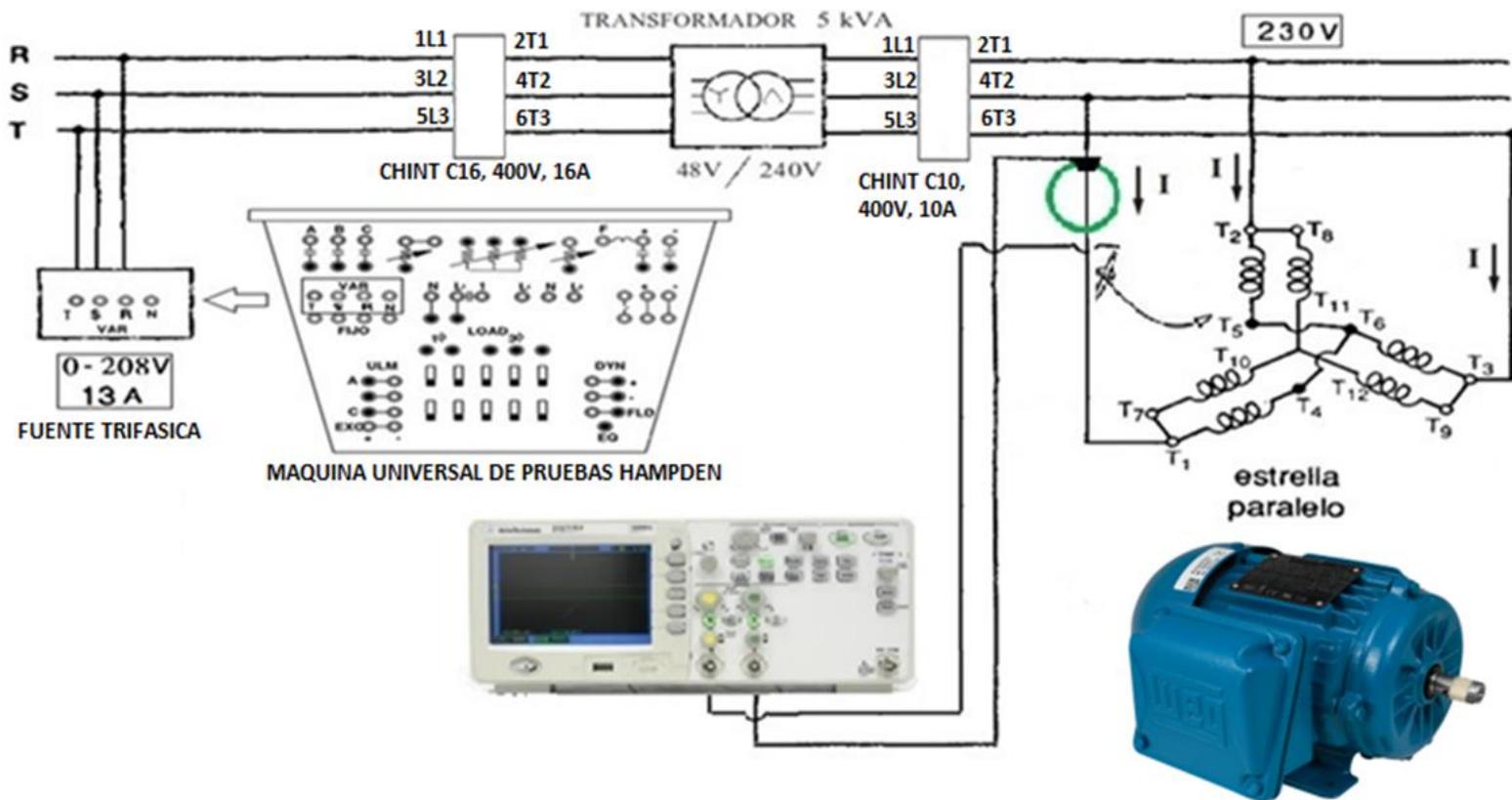


Figura 4.57 Conexión práctico para el ensayo de vacío.

6. Conecte la línea de suministro T al borne del motor donde se unen las terminales (T_3T_9)

Conexión de la sonda de voltaje.



Figura 4.58 sonda de voltaje para osciloscopio.

7. Conecte la sonda de voltaje mostrada en la figura 4.58 en el canal 1 del osciloscopio, luego **conecte la punta de gancho en la línea de suministro S , y la pinza de caimán en el neutro de la estrella** tal como se muestra en el conexionado de la figura 4.56. (Nótese que el neutro está formado por las terminales $(T_4T_5T_6)$ por lo que puede ubicar la pinza de caimán en cualquiera de esas terminales), **con esto ya podrá registrar el voltaje línea a neutro V_{SN}**

“Configure la sonda de voltaje en el canal 1 del osciloscopio para mediciones de voltaje AC con una atenuación de x1

Conexión de la sonda de corriente



Figura 4.59 sonda de corriente FR100RA para osciloscopio.

8. Conecte la sonda de corriente mostrada en la figura 4.59 en el canal 2 del osciloscopio, y **luego conéctela en la línea de suministro S para registrar la corriente I_S**

“Configure la sonda en la escala AC: 3V/100A”

9. Conecte tres voltímetros para medir los voltajes de línea a línea:

Conecte el primer voltímetro en paralelo a las líneas de suministro R y S para registrar V_{RS}

Conecte el segundo voltímetro en paralelo a las líneas de suministro S y T para registrar V_{ST}

Conecte el tercer voltímetro en paralelo a las líneas de suministro T y R para registrar V_{TR}

Considere lo siguiente:

Los osciloscopios internamente vienen diseñados con unión entre el neutro de los canales de medición y la tierra físico del toma de alimentación, cuando se van a efectuar mediciones de voltaje en sistemas trifásicos en delta donde no se tiene acceso a neutro para evitar daños a las sondas de medición y el instrumento por referencias erróneas se debe aislar la tierra física del neutro de los canales de medición con un adaptador antes de conectarlo al tomacorriente.

En sistemas en estrella con acceso a neutro como el motor mostrado en el conexionado practico de la figura 4.57, no es necesario aislar el terminal de tierra del toma de alimentación del osciloscopio, ya que en sistemas balanceados no hay corriente por el neutro además de tener un nivel de referencia de 0 voltios.

PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDICIONES.

10. Encender el breaker de protección principal que energiza el alimentador de la MUH.
11. Coloque el breaker (main AC) en la posición de encendido (Observara que la luz piloto se activa a color rojo, indicando que la MUH esta encendida y lista para operar)
12. Ahora proceda a encender la fuente trifásica variable, para esto coloque el breaker de la fuente en posición de encendido (automáticamente podrá observar que la luz piloto se activa a color rojo, indicando que la fuente esta encendida y lista para suplir voltaje).
13. Gire lentamente la perilla de regulación de la fuente trifásica, hasta que los tres voltímetros registren 230V nominales (el esquema de conexión de la figura 4.57

el motor mostrado es el mismo que se ensayó en la PRUEBA DC motor 9 terminales configurado en estrella paralelo a 230V marca: WEG - W22, modelo: TE1BF0X0! Que está disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas de la escuela de ingeniería eléctrica UES).

14. Alcanzado el voltaje nominal de 230V, anote las tres mediciones de los voltímetros y luego conecte un pendrive USB 2.0 en el puerto USB del osciloscopio, y vaya al modo adquisición de datos, guarde una imagen en formato PNG de la señal de voltaje y corriente que se muestra en la pantalla del osciloscopio, guarde con el nombre de *FASE SN – 230V* también guarde un archivo de datos CSV con el mismo nombre de la imagen.

Si se ha seguido el procedimiento correctamente, ya tendrá guardado en el pendrive un archivo con formato CSV que contiene 602 muestras de voltaje de la línea S respecto al neutro (V_{SN}) y 602 muestras de corriente de línea (I_S) en el tiempo, para el nivel de tensión ajustado a 230V.

15. Importante NO regresar la perilla a la posición de cero voltios, ya que faltan dos mediciones para el nivel de tensión ajustado de 230V, por lo que déjela regulada a 230V y apague la MUH por completo.
16. Ahora traslade la sonda de voltaje del osciloscopio para que mida el voltaje entre la línea de suministro R y el neutro de la estrella del motor, traslade también la sonda de corriente a la línea de suministro R
17. Encienda nuevamente la MUH, y encienda la fuente, observara que el motor trabajara a 230V, nuevamente guarde en el pendrive el archivo de imagen PNG y el archivo de datos CSV, con esto tendrá (V_{RN}) y (I_R)
18. Repita el paso 13 (apague por completo la maquina). Ahora traslade la sonda de voltaje del osciloscopio para que mida el voltaje entre la línea de suministro T y el neutro de la estrella del motor, traslade también la sonda de corriente a la línea de suministro T. Encienda nuevamente la MUH, nuevamente guarde en el pendrive el archivo de imagen PNG y el archivo de datos CSV, con esto tendrá (V_{TN}) y (I_T)
19. Apague totalmente la maquina y su protección principal y regrese la perilla a la posición de 0 voltios.

Para 230V se tendría guardado en el pendrive los siguientes archivos:

FASE S:

602 muestras de V_{SN} y I_S en un archivo CSV llamado FASE SN – 230V

FASE R:

602 muestras de V_{RN} y I_R en un archivo CSV llamado FASE RN – 230V

FASE T:

602 muestras de V_{TN} y I_T en un archivo CSV llamado FASE TN – 230V

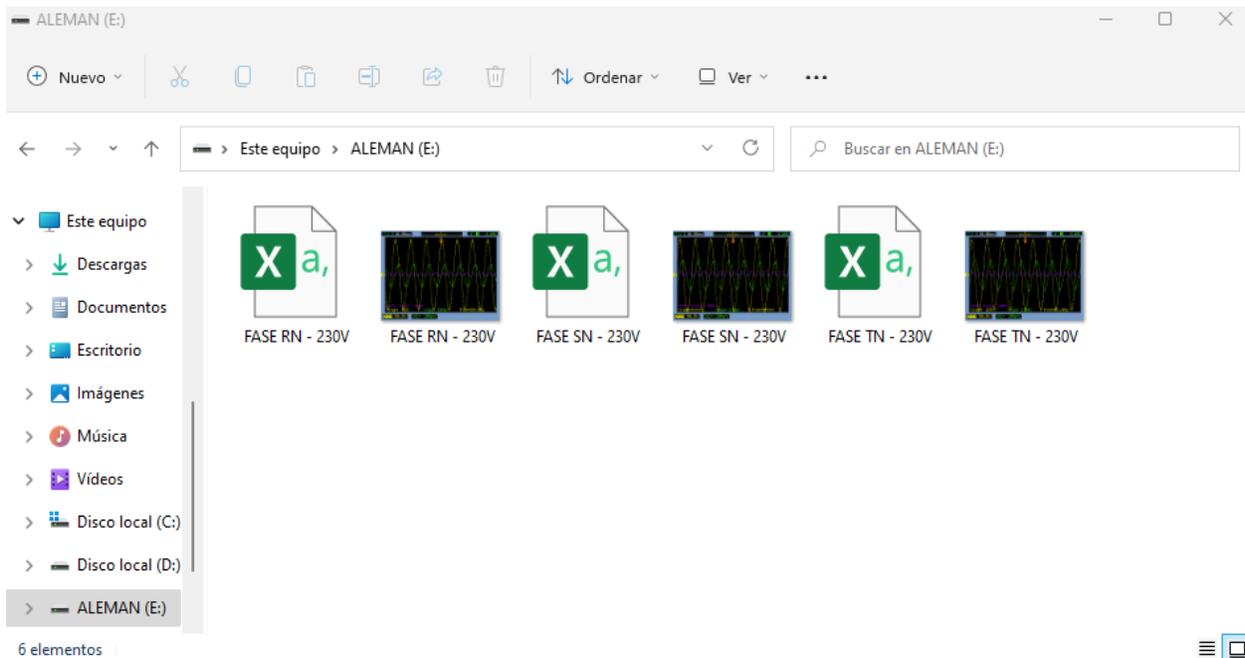


Figura 4.60 archivos que debe obtener para el primer nivel de voltaje de vacío ensayado de 230V.

20. Repita el procedimiento de toma de mediciones desde el paso 8 al 19 para los siguientes voltajes: 210, 190V, 170V, 150, 130V, 110V, 90V, 70V, 50V, 30V, 20V. Guarde en el pendrive los 6 archivos por cada nivel de tensión ensayado, lo que obtendrá es una lista con 36 archivos CSV y 36 archivos de imagen PNG como se muestra en la lista de la figura 4.61

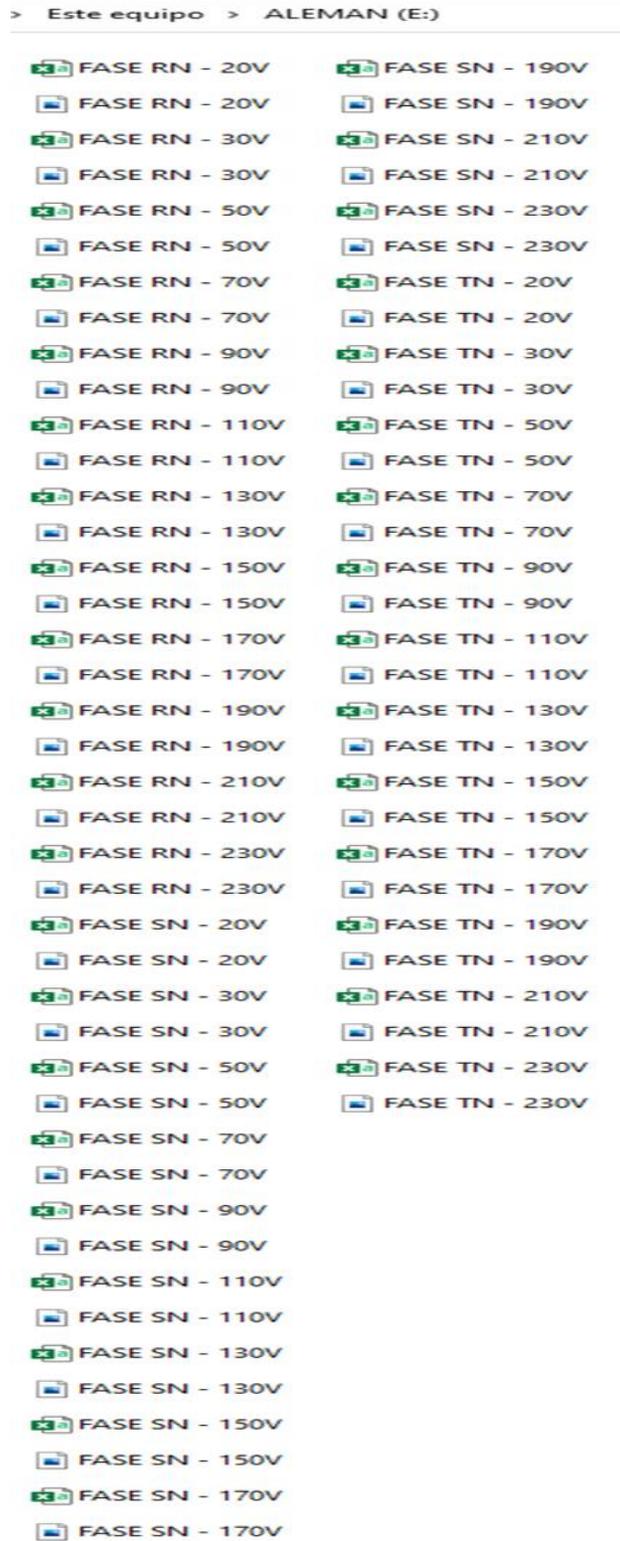


Figura 4.61 Cantidad de archivos a obtener en el ensayo de vacío.

PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS DE LOS ARCHIVOS CSV.

Este análisis es útil para determinar los valores rms del voltaje fase a neutro, corriente de línea, y potencia trifásica para cada nivel de tensión ensayado.

A continuación, se va explicar el procedimiento a seguir para determinar **los voltajes RMS de fase a neutro** (V_{SN}, V_{RN}, V_{TN}) **corrientes de fase** (I_S, I_R, I_T) **y potencia trifásica total** $P_{3\phi}$ **solamente para 230V** (voltaje nominal del motor a ensayar) observe que mediante el procedimiento de toma de mediciones lo que se obtiene son MUESTRAS DE DATOS, habrá que hacer un análisis a las muestras, para determinar las magnitudes eléctricas mencionadas en valores RMS, que son necesarias para iniciar el análisis de la prueba de vacío.

PARA 230V:

✓ De los 36 archivos CSV que se capturaron los que corresponden a 230V son:

FASE S:

Nombre de archivo: FASE SN – 230V

FASE R:

Nombre de archivo: FASE RN – 230V

FASE T:

Nombre de archivo: FASE TN – 230V

Se va determina (V_{SN}, V_{RN}, V_{TN}), (I_S, I_R, I_T) y $P_{3\phi}$ para **un periodo completo** (T) de las muestras:

➤ Cálculo del periodo T :

La frecuencia f de la prueba de vacío es:

$$f = 60\text{Hz}$$

El periodo entonces es:

$$T = \frac{1}{60\text{HZ}} = 0.0166 \text{ segundos}$$

El rango de valores a tomar de las muestras seria:

Desde un $t = 0$ hasta un $t = 0.0166 \text{ s}$

ANALISIS PARA FASE S:

1. Abra el archivo CSV con nombre **FASE SN – 230V** y de las 602 muestras de V_{SN} y I_S , seleccione solo los valores para el rango de tiempo calculado y descarte el resto de datos.

2. Con la depuración de datos, lo que se tiene es la información de LAS PRIMERAS TRES COLUMNAS (tiempo - canal 1 – canal 2) como se muestra en la tabla 4.16
3. Complete la tabla 4.16, la columna 4,5,6 se calcula directamente 7,8,9 requieren de ecuaciones básicas.

Columna 4:

Para obtener los valores de esta columna es muy simple, multiplique por 3 cada uno de los datos en el tiempo de $I_s(t)$ (se multiplica por 3 para reescalar la muestra de corriente a su valor real, 3 es el factor de la sonda de corriente *FR100RA*).

Columna 5:

Eleve al cuadrado cada uno de los datos en el tiempo de $V_{SN}(t)$

Columna 6:

Eleve al cuadrado cada uno de los datos en el tiempo de $(I_s(t) \times 3)$

Columnas 7:

$$P_s(t) = V_{SN}(t) \times (I_s(t) \times 3)$$

Columna 8:

$$V_{SN} RMS = \sqrt{(V_{SN}(t))^2}$$

Columna 9:

$$I_s RMS = \sqrt{(I_s(t) \times 3)^2}$$

FASE S								
TIEMPO	CANAL 1	CANAL 2						
$t(s)$	$V_{SN}(t)$	$I_s(t)$	$I_s(t) \times 3$	$(V_{SN}(t))^2$	$(I_s(t) \times 3)^2$	$P_s(t)$	$V_{SN} RMS$	$I_s RMS$
0						P_{s1}		
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
0.016								

Tabla 4.16 Parámetros a calcular para obtener los valores RMS de V_{SN} y I_s para la FASE S a 230V

Con esto ya se tiene $V_{SN\ RMS}$ y $I_S\ RMS$ correspondientes a la fase S, PERO RECUERDE que faltan las otras dos fases R y T.

EL PROCEDIMIENTO ES IGUAL Y REPETITIVO PARA LAS OTRAS DOS FASES, solo tenga cuidado de escoger el archivo CSV correcto (es decir que pertenezca al nivel de voltaje ensayado), luego repita el procedimiento que se usó en el análisis de la fase S en el resto de las fases y llene la siguiente tabla que corresponde al análisis en la fase R Y T

ANALISIS PARA FASE R:

FASE R								
TIEMPO	CANAL 1	CANAL 2						
t(s)	$V_{RN}(t)$	$I_R(t)$	$I_R(t) \times 3$	$(V_{RN}(t))^2$	$(I_R(t) \times 3)^2$	$P_R(t)$	$V_{RN\ RMS}$	$I_R\ RMS$
0						P_{R1}		
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
0.016								

Tabla 4.17 Parámetros a calcular para obtener los valores RMS de V_{RN} y I_R para la FASE R a 230V

Con esto ya se tiene $V_{RN\ RMS}$ y $I_R\ RMS$.

ANALISIS PARA FASE T:

FASE T								
TIEMPO	CANAL 1	CANAL 2						
t(s)	$V_{TN}(t)$	$I_T(t)$	$I_T(t) \times 3$	$(V_{TN}(t))^2$	$(I_T(t) \times 3)^2$	$P_T(t)$	$V_{TN\ RMS}$	$I_T\ RMS$
0						P_{T1}		
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
0.016								

Tabla 4.18 Parámetros a calcular para obtener los valores RMS de V_{TN} y I_T para la FASE T a 230V

Con esto ya se tiene $V_{TN\ RMS}$ y $I_T\ RMS$.

Solo queda por determinar la potencia trifásica $P_{3\phi}$ para el nivel de 230V:

POTENCIA TRIFASICA PARA 230V:

- Para determinar la potencia para el nivel de tensión 230V construya una columna con la SUMA DE LAS POTENCIAS POR FASE.

Para cada uno de los tiempos calcule la suma de la potencia monofásica con la siguiente ecuación:

$$SUMA P_{1\phi} = P_S(t) + P_R(t) + P_T(t)$$

COLUMNA SUMA P1φ:

Determine estos valores, así como el ejemplo que se muestra a continuación

Para $t = 0$

$$P_{1\phi}(t = 0) = P_{S1} + P_{R1} + P_{T1}$$

COLUMNA SUMA P3φ:

Para calcular la $P_{3\phi}$ haga el promedio de todos los valores de la columna $P_{1\phi}$ con la siguiente ecuación:

La potencia trifásica total para el nivel de tensión en análisis (230V) es un valor constante en el tiempo.

$$P_{3\phi} = \overline{(SUMA P_{1\phi})}$$

TIEMPO $t(s)$	SUMA P1φ	P3φ
0	$P_{1\phi}(t = 0)$	
.	.	
.	.	
.	.	
.	.	
.	.	
.	.	
.	.	
.	.	
0.016	$P_{1\phi}(t = 0.016)$	

Tabla 4.19 Potencia monofásica y trifásica para el nivel de voltaje 230V

Ahora traslade a la tabla final 4.20 todos los valores de voltajes, corrientes y potencia trifásica en rms encontradas, como se observa el procedimiento para análisis de archivos

CSV enumerado en 4 pasos, solo permite obtener todos los valores para un nivel de voltaje en específico.

5. Repita el procedimiento para el análisis de archivos CSV hasta llenar por completo la tabla 4.20

<i>VLL TEORICO</i>	<i>VLL TEORICO</i>	<i>VOLTAJE DE VACIO LINEA A NEUTRO</i>			<i>CORRIENTE DE VACIO DE LINEA</i>			<i>POTENCIA</i>
		<i>V_{SN} (V)</i>	<i>V_{RN} (V)</i>	<i>V_{TN} (V)</i>	<i>I_S (A)</i>	<i>I_R (A)</i>	<i>I_T (A)</i>	<i>P3φ</i>
230.00	132.790562	<i>V_{SN} RMS</i>	<i>V_{RN} RMS</i>	<i>V_{TN} RMS</i>	<i>I_S RMS</i>	<i>I_R RMS</i>	<i>I_T RMS</i>	Obtenido de tabla 4.18
210.00	121.243557							
190.00	109.696551							
170.00	98.149546							
150.00	86.602540							
130.00	75.055535							
110.00	63.508530							
90.00	51.961524							
70.00	40.414519							
50.00	28.867513							
30.00	17.320508							
20.00	11.547005							

Tabla 4.20 Voltajes, corrientes, y potencias trifásicas a obtener, para todos los niveles de tensión escogidos para el ensayo de vacío.

HERRAMIENTAS Y EQUIPO NECESARIOS PARA DESARROLLAR EL PROCESO DE MANIOBRA.

- Motor trifásico de inducción (marca: WEG - W22, modelo: TE1BF0X0!)
- Transformador Trifásico de 5KVA, delta/estrella, 240/48V
- Fuente trifásica variable de la maquina universal de pruebas Hampden (variable desde 0 – 208V, 13A)
- 3 multímetros FLUKE 115
- 1 pinza amperimétrica Klein tolos CL312
- 1 osciloscopio Agilent Technologies DS01012A
- 1 sonda de corriente FR100RA para osciloscopio
- 3 cables de conexión banana – Cable desnudo
- 3 cables de conexión terminal de argolla – cable desnudo
- Autómato CHINT C16, 400V, 16A (para proteger la fuente trifásica de la MUH)
- Autómato CHINT C10, 400V, 10A (para proteger el primario del transformador trifásico)
- Cinta aislante
- Tenaza

- Destornillador plano

OBSERVACIONES.

- ❖ La fuente trifásica de la maquina universal de pruebas, solo puede entregar una corriente máxima de 13A y tensión máxima de 208V (misma tensión de la red eléctrica en la EIE), el motor a ensayar marca: WEG - W22, modelo: TE1BF0X0! en la configuración estrella paralelo requiere una alimentación de 230V nominales, entonces para alcanzar esa tensión el único recurso disponible que se encuentra en el laboratorio es el transformador trifásico 240/48V que debe ser usado como transformador elevador de voltaje. Se recomienda alimentar al transformador trifásico con la fuente de la MUH solo con 44V ya que son suficientes para alcanzar los 230V nominales que requiere el motor.
- ❖ Cuando utilice el transformador como elevador no exceda los 48V del secundario (voltaje de placa del transformador trifásico), esto por seguridad para evitar daños, debido a que el transformador ha sido diseñado y construido de forma artesanal bajo las condiciones nominales de voltaje de operación 240/48V, exceder el voltaje dañaría los bobinados del TF, y si está conectado el motor TE1BF0X0! Al sistema de potencia se quemaría por sobrecorriente.
- ❖ Si se desea realizar la prueba de vacío a cualquier otro motor en particular o a una variedad de motores, tomar en consideración que desarrollar esta prueba en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE - UES tomando como guía la práctica de laboratorio de la sección 4.10 y con la MUH como plataforma de pruebas, la limitante esta impuesta por el sistema de potencia es decir la FUENTE TRIFASICA DE LA MUH más TRANSFORMADOR TRIFASICO con las protecciones definidas el sistema permite ensayar únicamente motores donde la tensión nominal de placa sea un máximo de 240V y que la demanda de corriente sea máximo 9A.

RECOMENDACIÓN.

- ❖ Se recomienda trabajar todos los archivos CSV en mismo archivo de EXCEL y separar en distintas hojas de trabajo los análisis de cada nivel de tensión ensayado, para mantener un orden conciso en los análisis y evitar confusiones por último se debe presentar en una hoja el resultado obtenido, como se muestra en la figura 4.62



Figura 4.62 Hoja de cálculo en Excel, las nuevas hojas creadas están nombradas con el valor de los niveles de voltajes escogidos para la prueba.

4.12 Desarrollo de la práctica de laboratorio de la prueba de vacío.

MOTOR TRIFASICO A ENSAYAR:

MARCA: WEG - W22

MODELO: TE1BF0X0! (Ver sección 4.8 para verificar sus parámetros nominales de placa)

INFORMACION IMPORTANTE A CONSIDERAR DE LA PLACA DE DATOS DEL MOTOR PARA DESARROLLAR EL ENSAYO DE VACIO.

Marca: WEG W22

Modelo: TE1BF0X0!

Tipo de conexión: Y – Y paralelo

$I_{nominal}$ = 0.937 A

Terminales: Motor de 9 terminales



La máquina universal de pruebas esta especificada por el fabricante para sea alimentada en una red eléctrica que suministre voltaje trifásico a 208V, no solamente para que la fuente trifásica variable que se va utilizar en el ensayo de vacío funcione de forma adecuada, sino también para las demás funciones de la máquina para que estas puedan trabajar con normalidad.

El alimentador de la MUH está conectado a su protección principal y luego directamente conectado al subtablero que está ubicado en el edificio de potencia, la subestación que alimenta al tablero principal y los subtableros de la EIE-UES tiene una configuración delta – estrella poniendo a disposición niveles de voltaje 120V/208V lo que evidencia que efectivamente la MUH esta alimentada a un nivel adecuado de voltaje y se encuentra lista para utilizarse como plataforma de

pruebas, y para el caso particular de este trabajo de graduación esta lista para ejecutar el ensayo de vacío.

FUENTE TRIFÁSICA VARIABLE.

La máquina universal de pruebas tiene una fuente trifásica que proviene de la derivación a la salida de un autotransformador trifásico que se encuentra instalado al interior de la MUH, la fuente tiene una capacidad de regulación de 0V a 120V, y de 0 a 208V, puede suministrar una corriente máxima de 13A, la regulación se hace por medio de una perilla que está instalada en el panel frontal de la máquina, el control de encendido y la perilla de regulación de la fuente es el mostrado en la figura 4.63a, la salida de la fuente se encuentra en el panel lateral sus terminales de salida son las mostradas en la figura 4.63b.

La fuente trifásica de la maquina universal de pruebas Hampden es el único recurso que actualmente se tiene disponible en el laboratorio, es el único VARIAC que puede servir como fuente de suministro de potencia para desarrollar el ensayo de vacío, por lo que se hizo una valoración basada en su capacidad nominal y de su fácil utilización, de esta manera es como se tomó la decisión de incorporar la fuente al ensayo.



a)



b)

Figura 4.63 a) Control de encendido y de regulación de la fuente trifásica variable b) Terminales de salida de la fuente.

TRASFORMADOR TRIFASICO ELEVADOR DE VOLTAJE.

La primera dificultad surgió cuando se verificó las tensiones nominales de la placa características del motor a ensayar, en la configuración estrella – paralelo de bajo voltaje, el voltaje y la corriente nominal son de 230V, 0.937A, mientras que en la configuración de una sola estrella de alto voltaje, el voltaje y la corriente nominal son de 460V, 0.469A, los voltajes de ambas configuración superan a los 208V que es la tensión máxima que la fuente trifásica puede suministrar, misma tensión de la red eléctrica de la EIE-UES, en ese sentido la configuración de alto voltaje 460V quedo totalmente descartada para ensayar en el laboratorio, debido a que no se dispone de ninguna fuente de potencia que pueda ofrecer una regulación de 0 a 460V, por lo que se optó por trabajar con la configuración de bajo voltaje de 230V, 0.937A pero incluso en esta configuración se tuvo dificultades, porque tampoco es posible realizar el ensayo de vacío, ya que como se ha explicado la fuente trifásica suministra 208V máximos, hacen faltan 22V para alcanzar la tensión completa (230V) que exige la configuración del motor, y el ensayo de vacío estrictamente necesita la información de la corriente y la potencia consumida por el motor a voltaje nominal, debido a que es necesario para el análisis de la prueba en la determinación de las pérdidas mecánicas.

Entonces para superar esta dificultad se consideró la posibilidad de conectar un transformado de potencia a la salida de la fuente trifásica de la MUH para elevar el nivel de voltaje de 208V a 230V, por lo que se investigó los recursos con los que cuenta el laboratorio de máquinas eléctricas, y se encontró disponible un trabajo de graduación en el que se fabricó un transformador trifásico de 5KVA, 240V/48V, delta – estrella, el TF se encontró en buenas condiciones y ha estado conectado con el primario (delta) a la red de 208V de la EIE, se hizo una medición del voltaje en el secundario (estrella) y se obtuvo 43V de línea a línea, lo que evidencia su buena operatividad, el transformador trifásico es el mostrado en la figura 4.64



Figura 4.64 Transformador trifásico a utilizar en la prueba de vacío.

El diseño y construcción le pertenecen a los ahora Ingenieros: Fernando A, Barahona Y Ricardo E. Prieto, fue construido de forma artesanal, la información de la placa característica del transformador trifásico es la mostrada en la figura 4.65



Figura 4.65 Placa característica del transformador trifásico 5KVA.

Como se ha explicado, el uso del transformador es de gran utilidad para mejorar la fuente trifásica de la MUH, y poder desarrollar el ensayo de vacío al motor de inducción, al conectar el transformador como elevador de voltaje a los terminales de salida de la fuente de la MUH, se logra alcanzar una mayor regulación de voltaje ($0V \sim 240V$), con el TF se ha solventado la dificultad que tiene la fuente de la MUH de no alcanzar el voltaje nominal en la configuración más baja del motor.

Habrá que establecer la corriente que puede manejar el transformador trifásico, como se va usar como elevador de voltaje, el bobinado que se va alimentar con la fuente de la maquina universal es el del secundario del TF, en general es el secundario de los transformadores los que soporta una

mayor demanda de corriente, ya que es lado de baja al que se conectan todas las cargas, pero para el caso particular que se va usar como elevador de voltaje, es importante conocer cuál es la corriente máxima tanto del lado secundario del TF (donde estará el suministro de la fuente de la MUH) como la del primario (donde se conectara el motor) para poder definir protecciones para el sistema.

Por lo que antes conectar el TF a la fuente de la MUH habrá que calcular la corriente que soportan los bobinados con los valores nominales de placa:

$$S = 5KVA$$

$$V_P = 240V$$

$$V_S = 48V$$

- **Cálculo de la corriente del secundario del transformador.**

$$I_{SECUNDARIO} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_S} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 48} = 60A$$

- **Cálculo de la corriente del primario del transformador.**

$$I_{PRIMARIO} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_P} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 240} = 12A$$

PROTECCION DEL LADO SECUNDARIO.

- **Cálculo de la protección del secundario.**

Las protecciones por criterio se dimensionan al 125% de la corriente nominal.

$$I_{secundario} = 60 \times 125\% = 75A$$

Habrà que escoger una protección menor, puede escogerse una protección para 74A o 72A

La protección que se encontró en el laboratorio **SIEMENS 3VU1300-0MK00 de 400V, 72A.**



Figura 4.66 protección SIEMENS 3VU1300-0MK00 de 400V, 72A.

Cabe aclarar que cuando se encontró el transformador en el laboratorio de máquinas eléctricas, este ya incorporaba la protección SIEMENS 3VU1300-0MK00 de 400V, 72A que está dimensionada para proteger al secundario del TF cuando funciona como reductor de voltaje (de alta a baja), pero en el sentido inverso es decir como elevador de voltaje (de baja a alta) que es como se va utilizar en el ensayo, la protección estaría mal dimensionada ya que si la fuente entrega máximo 13A nominales de ninguna manera se alcanzaría la corriente nominal de 60A del secundario del TF o corrientes excesivas que llegarían a dañar al bobinado, por lo que la protección a colocar en el secundario del transformador va enfocada a proteger la fuente de la MUH y no al bobinado en caso de que falle la protección principal de la fuente del tipo termomagnético.

Lo recomendable es dimensionar la protección utilizando la corriente máxima de la fuente de la MUH.

$$I_{\text{nominal de la fuente MUH}} = 13A$$

$$I = 13 * 125\% = 16.25A$$



Figura 4.67 Autómato CHINT C16 de 400V, 16A.

La protección más adecuada es un **autómato de 16A, 400V**. como el que se muestra en la figura 4.67. Se puede dejar el secundario sin protección, porque la fuente trifásica incorpora un breaker magnético de tres polos que se dispara automáticamente a la posición de apagado si la carga demanda mayor corriente que la nominal de 13A. sin embargo no se valoró la posibilidad dejar al sistema sin protección, porque sería de fiarse de la protección de la fuente, razones para no confiar en esa protección hay muchas, entre ellas la antigüedad de la máquina, también ha estado guardada por muchos años sin ningún uso, el ultimo mantenimiento de la maquina fue en el año 2003, por lo que usar una protección a la salida de la fuente genero mayor confianza para realizar la prueba.

PROTECCION DEL LADO PRIMARIO DEL TF.

El primario del transformador es el que va manejar la carga y de acuerdo al cálculo podrán circular 12A.

➤ Cálculo de la protección del secundario.

$$I_{proteccion} = 12 * 125\% = 15 A$$

Las capacidades de los breaker marcan CHINT de 3 polos comerciales son: 10A, 16A, 20A, 32A etc.

La protección más adecuada para el primario es un **autómato de 400V, 10A** como el mostrado en la figura 4.68.



Figura 4.68 Autómato CHINT C10 de 400V, 10A.

PROTECCION PARA EL MOTOR A ENSAYAR.

El motor que se va ensayar en el sistema es de pequeña capacidad tiene una potencia de ¼ de HP que en la configuración más baja de voltaje 230V demanda una corriente nominal de 0.937A como se puede observar es bien pequeña, y en condición de vacío será todavía menor.

➤ Cálculo de la protección del motor.

$$I = 0.937 * 125\% = 2.35A$$

Como la corriente que resulta es pequeña no hay un automático de la marca CHINT para ese nivel de tensión, pero se puede utilizar un guardamotor ajustable en el rango de (1.6 – 2.5) A.

Esta protección se instalaría si se le conecta carga al motor ya que solo así circularía la corriente nominal por el estator, pero en el ensayo de vacío que se va desarrollar se simula lo contrario sin carga en el eje (rotor libre) en esta condición la corriente de vacío es inferior a la nominal de placa, por lo que no es necesario proteger el motor por lo antes mencionado.

CORRIENTE CONSUMIDA EN VACIO.

Generalmente la información de las corrientes más importantes son la corriente de arranque, y la corriente a plena carga (corriente de placa), sin embargo, a nivel de laboratorio y en este caso que se va desarrollar el ensayo de vacío es importante la información de la corriente de vacío, que como ya se dijo es menor que la corriente de la placa característica.

¿Cómo calcular la corriente de vacío?

Hay una regla general que se puede utilizar.

Para diseño de motores estándar CLASE B, se establece la corriente de vacío como porcentaje de la corriente nominal de acuerdo al número de polos de la máquina, pero cabe aclarar que, para cada diseño, modelo, fabricante, cambia por lo que no se puede generalizar y utilizar con otras clases de motor. La tabla 4.21 es producto de múltiples ensayos experimentales realizados a motores trifásicos asíncronos pero pertenecientes a la clase B.

CANTIDAD DE POLOS	CORRIENTE DE VACIO COMO % DE LA CORRIENTE NOMINAL PARA MOTORES CLASE B
2	25 - 33%
4	33 - 40%

6	50 - 60%
8	70 - 80%
10	80 - 100%
12 o mas	100 - 110%

Tabla 4.21 Corriente de vacío como porcentaje de la corriente nominal para motores clase B.

Ejemplo de cómo usar la información de la tabla 4.21:

Se tiene un motor trifásico estándar clase B con los siguientes datos de placa: 20HP, 60A, 230V, 2900 RPM, 2 polos

El motor es de dos polos, según la tabla la corriente de vacío esta entre (25-33) % de la corriente nominal:

$$I_0 = [25\%I_{nominal}, 33\%I_{nominal}]$$

$$I_0 = [(0.25 \times 60), (0.33 \times 60)]$$

$$I_0 = [15A , 19.8A]$$

El motor que se va ensayar de la marca WEG W22, modelo *TE1BFOXO!* es CLASE F, por el tipo de clase no es aplicable el análisis anterior, y no se tiene información como la presentada en la tabla 4.18 por lo que no fue posible calcular la corriente de vacío antes de la prueba, sin embargo, cuando se desarrolló la prueba en el laboratorio se inició con el voltaje nominal de placa 230V, la corriente que se midió fue de 0.61A entonces se puede establecer el porcentaje que representa esa corriente medida de la corriente nominal de placa, y se puede generar una tabla 4.22 basado en la experimentación y la toma de mediciones que se hizo en el laboratorio.

El motor a ensayar tiene las siguientes características: 1/4HP, 0.937A, 230V, 3370 RPM, 2 polos

La corriente de vacío medida de 0.61A y representa el 65% $I_{nominal}$

CANTIDAD DE POLOS	CORRIENTE DE VACIO COMO % DE LA CORRIENTE NOMINAL PARA MOTORES CLASE F
2	65%

Tabla 4.22 Corriente de vacío como porcentaje de la corriente nominal para el motor ensayado.

La prueba de vacío exige alcanzar la tensión nominal, se pudo observar que con el sistema de potencia formada por las dos máquinas (fuente trifásica de la MUH y el transformador elevador) está limitado a ensayar motores comerciales de bajo voltaje, los niveles que se pueden ensayar con

el sistema de potencia son 120/240V, 208/120V y en base a las protecciones que se instalaron, el sistema queda definido para suministrar voltaje variable de 0V - 240V, con capacidad de suministrar una corriente máxima de 9A.

CONEXIONES PARA EL MONTAJE PRACTICO.

Hasta aquí, se ha presentado la información necesaria, que permitió familiarizarse con la fuente trifásica, y con el transformador, aun mas importante resulta el haber definido la capacidad nominal de la fuente en base a protecciones para volver seguro el sistema de potencia, la fuente ahora está formada por la combinación de dos máquinas, VARIAC interno a la MUH y un transformador trifásico elevador de voltaje, Adicional ya se presentó la información de la placa característica tanto del motor a ensayar como del transformador, Ahora se está listo para desarrollar procedimiento de la práctica de laboratorio y a ejecutar la maniobra del ensayo de vacío de la sección 4.11

El conexionado del transformador se realizó tomando como guía el esquema eléctrico mostrado en la figura 4.57.

CONEXIONES DE LA FUENTE TRIFASICA AL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR.

No se recomienda conectar la fuente trifásica de la MUH con el transformador trifásico directamente (aun sabiendo que la fuente tiene su protección termomagnética) esto por seguridad de la maquina universal, para evitar daños por cortocircuito en el caso que el termomagnético se haya deteriorado, como se ha explicado anteriormente la maquina es antigua). Entonces para conectar el TF a la fuente primero debe pasar el suministro eléctrico de la fuente por la protección **CHINT C16** para lo cual se siguió el procedimiento descrito a continuación:

Primero se conectó tres cables tipo **banana – cable desnudo** en la siguiente disposición, los extremos con terminal banana se conectaron a las borneras de salida *R S T* de la fuente trifásica de la MUH, y los extremos de **cable desnudo** a las terminales *1L1, 3L2, 5L3* del automático CHINT C16 400V, 16A.

El orden de la conexión fue: (FASE S con terminal 3L2), (FASE R con terminal 1L1), (FASE T con terminal 5L3)

Las terminales de cable desnudo del secundario del TF se conectaron a los terminales $2T1$, $4T2$, $6T3$.

CONEXION DEL MOTOR WEG W22, MODELO *TE1BFOXO*! AL PRIMARIO DEL TRASFOMADOR.

Se conecto las terminales desnudas del primario del trasformador a las terminales $1L1$, $3L2$, $5L3$ de la protección CHINT C10, 400V, 10A. Luego se conectó el otro extremo de la protección con terminales $2T1$, $4T2$, $6T3$ a las terminales T del estator del motor en el siguiente orden:

Se unió el terminal $4T2$ con los terminales de motor T_1T_7

Se unió el terminal $2T1$ con los terminales de motor T_2T_8

Se unió el terminal $6T3$ con los terminales de motor T_3T_9

Para estas conexiones se utilizó tres cables de tipo **argolla – cable desnudo** y fue necesario el uso de una tenaza para retirar las tuercas de sujeción y poder instalar los cables de terminal argolla a los bornes del bobinado estatórico del motor.

Realizadas todas las conexiones, ya se tiene preparado el montaje practico, y a su vez el ambiente más adecuado y seguro en el laboratorio para dar inicio con el ensayo y tomar mediciones.

MONTAJE PARCIAL.

El montaje práctico del ensayo de vacío es el mostrado en la figura 4.69



Figura 4.69 Montaje parcial para el ensayo de vacío, utilizando el analizador de redes eléctricas aemc instrument modelo 8336 como el único instrumento de medición.

En la figura 4.68 se muestra el primer montaje (montaje parcial) que se realizó para el ensayo de vacío, como se puede apreciar el instrumento que se utilizó para tomar mediciones fue el **analizador de redes eléctricas AEMC INSTRUMENT MODELO 8336**.

TOMA DE MEDICIONES.

El primer voltaje a ensayar en la prueba corresponde al voltaje nominal del motor 230V a frecuencia industrial 60Hz.

Mediciones obtenidas con el analizador de redes eléctricas para 230V:

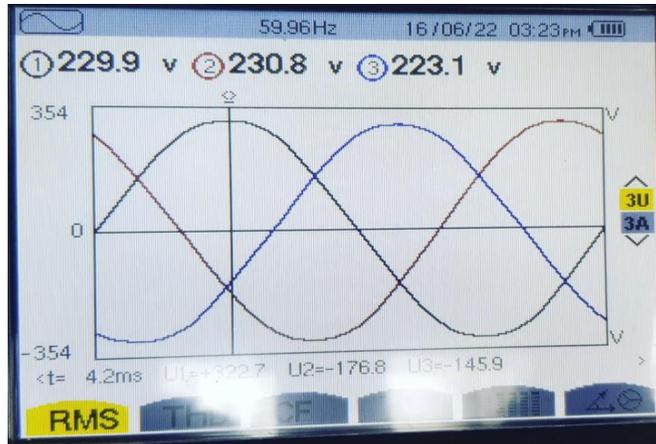


Figura 4.70 Voltaje línea a línea a la entrada del motor.

$$f = 59.96\text{Hz}$$

$$V_{AB} = 229.9\text{V}; I_A = 0.60\text{A}$$

$$V_{BC} = 230.8\text{V}; I_B = 0.58\text{A}$$

$$V_{CA} = 223.1\text{V}; I_C = 0.62\text{A}$$

➤ **Cálculo del voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3} = \frac{229.9 + 230.8 + 223.1}{3}$$

$$V_{LL} = 227.93\text{V}$$

➤ **Cálculo del voltaje línea a neutro:**

$$V_{LN} = \frac{V_{LINEA-LINEA}}{\sqrt{3}} = \frac{227.93}{\sqrt{3}}$$

$$V_{LN} = 131.59\text{V}$$

Las figuras 4.70 muestra la forma de onda de voltaje, se puede apreciar que las tres señales de voltaje a la entrada del motor son perfectamente sinusoidales, además de un ligero desbalance de la FASE C de aproximadamente 7V respecto a la FASE A Y B, esto se debe a la misma construcción artesanal de transformador trifásico, es probable que no tengan exactamente el mismo número de espiras en el bobinado de la FASE C, se hizo una comprobación desconectando el TF y haciendo una medición directa en la salida de la fuente y efectivamente los voltajes de línea a

línea resultaron de 208V diferencias de menos de 1.5V lo que muestra que la salida de la fuente si esta balanceada.

La señal de la corriente de fase es la mostrada en la figura 4.71 idealmente deberían de ser ondas sinusoidales, pero como se puede observar las ondas que resultaron en la medición tienen distorsión y no son puramente sinusoidales.



Figura 4.71 Corriente de fase del motor.

➤ **Cálculo de la corriente de fase:**

$$I_L = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{0.60 + 0.58 + 0.62}{3}$$

$$I_L = 0.60A$$

En general es bien común encontrar en las señales de los sistemas eléctricos una cierta distorsión, a veces se debe a fenómenos transitorios generados por el arranque de motores, conmutación de capacitores, algunas veces a efectos de tormentas eléctricas o fallas por cortocircuitos en la red eléctrica, pero para el caso de las señales distorsionadas obtenidas no se deben a ninguna causa de las antes mencionadas, si no se debe a condiciones permanentes que están relacionadas con armónicos de estado estable, que cuando es baja no produce problemas en la operación de equipos, cabe mencionar que existen normas que ya establecen los límites permitidos de distorsión armónica dependiendo del voltaje de operación.

Luego de extraer las magnitudes eléctricas de V_{LL} , V_{LN} , I_L para el voltaje nominal 230V, se continuó desarrollando con normalidad el procedimiento de la prueba para extraer las magnitudes eléctricas para los demás niveles de voltaje.

V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	V_{LL}	I_A	I_B	I_C	I_L
229.90	230.80	223.1	227.93	0.60	0.58	0.62	0.60
222.00	221.60	214.70	219.43	0.62	0.53	0.69	0.61
211.40	212.30	203.90	209.20	0.68	0.56	0.61	0.62
203.20	200.90	194.00	199.36	0.75	0.46	0.77	0.66
184.10	184.00	178.00	182.03	0.66	0.46	0.80	0.64
170.60	168.10	165.10	167.93	0.63	0.44	0.60	0.56
160.60	157.10	153.60	157.10	0.71	0.34	1.25	0.77
149.70	148.00	143.30	146.66	0.59	0.34	0.36	0.43
140.20	140.10	134.70	138.33	0.55	0.36	1.53	0.81
131.00	128.50	123.90	127.80	0.39	0.33	0.70	0.47
121.70	120.40	119.90	120.66	0.44	0.30	1.22	0.65
114.60	110.80	107.20	110.86	0.47	0.27	0.30	0.35
105.30	100.10	98.80	101.40	0.64	0.26	0.75	0.55
94.80	90.00	87.60	90.80	0.33	0.23	0.88	0.48
79.70	75.40	74.20	76.43	0.50	0.21	9.39	3.36
71.20	67.10	64.60	67.63	0.89	0.25	0.82	0.65
64.90	60.60	61.10	62.20	0.50	0.18	0.59	0.42
53.10	50.50	46.50	50.03	0.42	0.28	1.22	0.64
40.60	36.60	33.50	36.90	0.60	0.36	1.21	0.72
33.80	30.40	26.10	30.10	0.99	0.44	1.06	0.83
23.20	20.00	15.00	19.40	0.57	0.47	0.49	0.51

Tabla 4.23 Voltaje de línea – línea, corriente de fase obtenidos con el analizador de redes eléctricas Aemc Instrument Modelo 8336 para el ensayo de vacío.

Las primeras tres columnas de izquierda a derecha de la tabla 4.23 muestran todos los valores de los voltajes línea a línea, la cuarta columna corresponde al voltaje línea a línea promedio, las últimas cuatro columnas corresponden a la corriente de fase, y corriente promedio, se registraron 16 mediciones incorrectas, de acuerdo a la tabla 4.22 las mediciones superan el $65\%V_{nominal}$ es decir 16 mediciones superan 0.61A además de no presentar una tendencia decreciente en la corriente a medida se ve disminuida la alimentación del motor.

El analizador lee muy bien todos los valores de voltaje ensayados, pero a medida el voltaje de alimentación disminuye, la corriente debe disminuir también por debajo de 0.60A, pero las corrientes al ser demasiado pequeñas el instrumento está arrojando errores de medición, es probable que las sondas de corriente del analizador no estén especificadas para tomar lecturas inferiores a 0.5A de corriente, por esa razón se descartó el uso del analizador de redes para toma de mediciones en la prueba de vacío.

Ahora bien, con el analizador de redes eléctricas descartado como instrumento principal de medición, y con la señal de la corriente con distorsión producto de armónicos de estado estable, es como se presentó la segunda dificultad en cómo poder medir voltaje, corrientes bajas y la potencia 3ϕ para cada nivel de tensión ensayado.

Para solucionar el problema se tomó en cuenta las recomendaciones del asesor, el cual fue incorporar como instrumento de medición el osciloscopio Agilent Technologies modelo DS01012A, luego mediante la sonda de corriente FR100RA y la sonda de voltaje registrar todas las corrientes de fase y voltajes de línea a neutro del ensayo, y es entonces donde el uso del osciloscopio se volvió relevante en la toma de mediciones para el ensayo de vacío, como todas las corrientes de fase son inferiores a 0.61A, al ser un instrumento que los fabricantes construyan orientado más a la medición en circuitos electrónicos de baja potencia, hace que el instrumento tenga un alto grado de precisión, y genera mayor confianza para mediciones de corrientes y voltaje a escalas pequeñas, para el caso particular del motor ensayado en condiciones de vacío las corrientes están en el orden miliamperios.

Básicamente se busca utilizar el osciloscopio como sustitución del analizador de redes eléctricas para medir los voltajes de línea a neutro V_{SN} , V_{RN} , V_{TN} , corrientes de fase I_S , I_R , I_T y la potencia trifásica $P_{3\phi}$, en valores RMS y es donde surge una tercera dificultad el osciloscopio no puede medir potencia directamente.

Entonces otra recomendación por parte del asesor es utilizar el modo adquisición de datos del osciloscopio, para guardar en un archivo CSV las muestras de voltaje y corriente en el tiempo para cada fase, y luego realizar un análisis a los datos obtenidos en el archivo CSV con el objetivo de determinar la potencia aplicando el siguiente concepto ***En un sistema trifásico la potencia promedio total consumida es el promedio de la suma de potencias instantáneas monofásicas en un periodo completo***”

Esto da lugar al montaje final, utilizando como instrumento de medición el osciloscopio Agilent Technologies modelo DS01012A el montaje es el mostrado en la figura 4.72.

Montaje definitivo



Figura 4.72 Montaje definitivo para el ensayo de vacío, utilizando el osciloscopio Agilent Technologies modelo DS01012A como el único instrumento de medición.

Con el montaje completo se inició la prueba nuevamente, el voltaje nominal del motor es de 230V por lo que se escogieron 12 niveles diferentes de voltaje para ensayar durante la prueba, y son mostrados en la tabla 4.24

Niveles de voltajes escogidos para el ensayo de vacío (V)
230
210
190
170
150
130
110
90
70

50
30
20

Tabla 4.24 Listado de los niveles de voltaje escogidos para ensayar el motor en vacío.

Establecidos los niveles de voltaje para el ensayo, se inició nuevamente con la toma de mediciones, pero esta vez usando el osciloscopio y tomando como guía el procedimiento planteado en la práctica de laboratorio de la sección 4.11.

Recordar que en la práctica de laboratorio se explicó únicamente para el nivel de voltaje nominal de 230V, y en esta sección de desarrollo experimental de igual forma se va desarrollar solo para 230V, esto debido a que la explicación del procedimiento solo para un nivel de voltaje es demasiado extensa, y exactamente igual y repetitivo para los otros 11 niveles restantes de voltaje a ensayar de la tabla 4.24, si el lector está interesado en los demás niveles de voltajes del ensayo, remítase al archivo de nombre **Prueba de vacío.xlsx** que se encuentra disponible de forma digital en el **DISCO** de este trabajo de graduación.

A continuación, se va describir como extraer las muestras de corriente, voltaje y de cómo usar el osciloscopio para guardar en un pendrive todas las muestras en un archivo de formato CSV, además se va explicar cómo calcular a partir de las muestras obtenidas los voltajes de vacío de línea a neutro ($V_{SN} RMS, V_{RN} RMS, V_{TR} RMS$), corrientes de vacío de cada fase ($I_S RMS, I_R RMS, I_T RMS$) y el análisis que se utilizó para calcular la potencia media trifásica $P_{3\phi}$.

ANALISIS PARA LA FASE S A 230V

Teniendo el montaje completo se procedió a conectar los instrumentos de medición primero se conectó la sonda de voltaje en el canal 1 del osciloscopio, y luego la sonda de corriente en el canal 2, la conexión de las sondas en el circuito es la siguiente:

Conexión de la sonda de voltaje.

Como el motor está conectado en estrella paralelo se tiene acceso al neutro, por lo que las mediciones serán hechas respecto del neutro, entonces la sonda de corriente se conectó con el terminal tipo gancho a la fase S de la alimentación del motor, y el terminal masa o común al neutro, luego se configuro en las opciones de canal 1 del osciloscopio para que la sonda tenga una

atenuación X10 y para que pueda medir voltajes AC, con esto ya se puede registrar voltaje de vacío línea a neutro V_{SN} .

Conexión de la sonda de corriente.

La sonda de corriente FR100RA está formada por una bobina diferencial rogowski y un integrador electrónico de señales, la forma correcta de conectar la sonda de corriente al circuito es, que primero se tiene que diferenciar la dirección positiva del flujo de corriente, la bobina tiene un seguro de abierto/cerrado y al contorno del seguro se ubica una flecha indicando la posición correcta de como la bobina debe abrazar la fase que se quiere medir, en este caso se va medir la corriente de vacío en la fase S de alimentación del motor, entonces se debe girar el seguro para abrir la bobina y colocarla abrazando el cable de la fase S en el sentido horario, ahora para que el integrador de señal funcione correctamente se debe alimentar de forma externa por medio de un cargador de 9V (No se recomienda utilizar baterías ya que el ensayo es largo, y la carga se agota rápido lo que produciría errores en las mediciones) solo quedaría configurar el integrador de señales en la escala AC: 3V/100A con esta conexión ya se puede registrar la corriente de vacío I_S (si no se respeta la orientación del flujo y la sonda no se encuentra en la orientación correcta lo que se va obtener en el osciloscopio será una señal de corriente invertida), por ultimo configure en las opciones del canal 2 para que la sonda tenga atenuación x10 y pueda medir corrientes AC.

Configuración del osciloscopio.

Se configuro en la opción MEASURES para que el canal 1 pueda registrar el voltaje rms y la frecuencia. Luego se configuro siempre en la opción MEASURES para que el canal 2 registre el voltaje rms, con esto ya se podrá visualizar en la pantalla del osciloscopio la señal de $V_{SN}(t)$ y $I_S(t)$, ahora para visualizar la potencia instantánea $P_S(t)$ se configuro en la opción MATH la multiplicación del canal 1 y el canal 2.

AJUSTE DE LA PRIMERA TENSION A ENSAYAR DE 230V

Para energizar el sistema de potencia y ajustar el primer nivel de tensión, primero se llevó a la posición de encendido el breaker de 3 polos que energiza el alimentador de la maquina universal de pruebas, luego se activó el MAIN principal y automáticamente se enciende la luz piloto indicando que la alimentación es correcta a 208V,3 ϕ . Ahora se procede a encender la fuente trifásica variable, llevando a la posición de encendido su breaker y automáticamente se enciende

el segundo piloto indicando que la fuente esta lista para operar, para ajustar el voltaje se varió en el sentido horario lentamente la perilla de regulación de la fuente hasta leer en los tres multímetros FLUKE 115 una lectura de 230V, así como se muestra en la figura 4.73

Como se puede observar en el montaje definitivo de la figura 4.72, además de utilizar el osciloscopio se utilizaron tres multímetros FLUKE 115 y una pinza amperimétrica Klein Tools CL312 para medir los voltajes de línea a línea, y corriente de fase respectivamente, las mediciones con el voltímetro sirvieron solo de referencia visual que se alcanzaba efectivamente el voltaje ensayado de 230V, mientras que la medición con la pinza amperimétrica sirvió para hacer una comparación de la corriente medida por el instrumento y la calculada por medio de las muestras obtenidas del osciloscopio, tanto la medida como la calculada deben de resultar aproximadamente iguales.

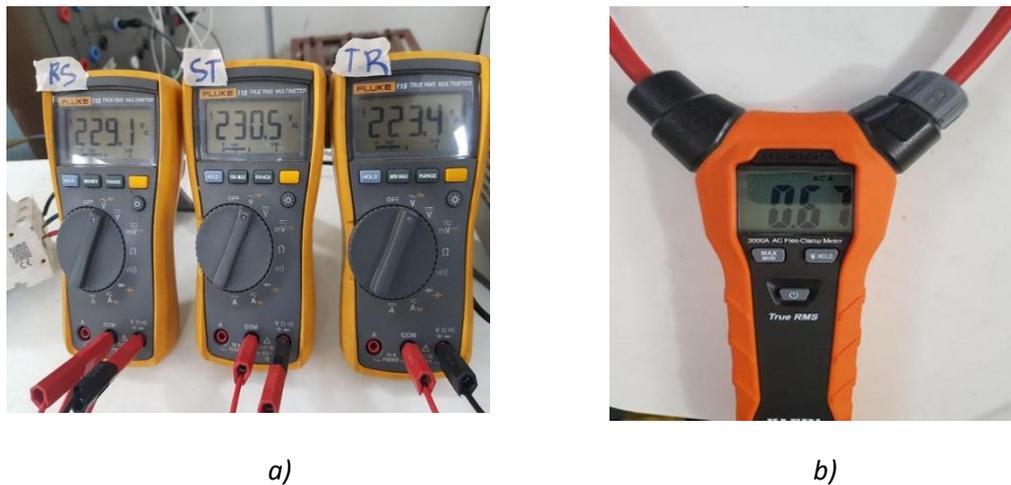


Figura 4.73 a) Voltaje de línea a línea, b) Corriente de fase, para la FASE S a 230V.

$$V_{RS} = 229.1V$$

$$V_{ST} = 230.5V$$

$$V_{TR} = 223.4V$$

$$I_S = 0.67A$$

➤ **Voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{229.1 + 230.5 + 223.4}{3} = 227.7V$$

➤ **Voltaje línea a neutro:**

$$V_{SN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{227.7}{\sqrt{3}}$$

$$V_{SN} = 131.1V$$

La figura 4.74 muestra las señales obtenidas con el osciloscopio, la señal en color amarillo corresponde al voltaje línea a neutro $V_{SN}(t)$, la señal en color verde a la corriente de fase $I_s(t)$ y la señal en color morado a la potencia instantánea $P_s(t)$, la señal de voltaje siempre va tener una mayor amplitud que la señal de corriente, debido a que el voltaje de alimentación serán siempre voltios y la corriente apenas se encuentra el orden de los miliamperios, es importante mencionar que la sonda mide la corriente real en amperios, pero como el integrador está configurado en la escala (AC:3V/100A) la corriente $I_s(t)$ de color verde mostrada en la pantalla del osciloscopio, es el valor de la corriente real medida en amperios dividido entre 3, es decir la señal de corriente que se visualizada no corresponde a la corriente real, si no a una señal de corriente disminuida.

Para el caso de la señal de potencia instantánea, lo que se ha hecho es una multiplicación de canales como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_s(t) = \text{CANAL } 1 \times \text{CANAL } 2 = V_{SN}(t) \times I_s(t)$$

El osciloscopio no puede medir la potencia promedio directamente, y al usar la multiplicación de canales lo único que se ha conseguido es la visualización de la señal de color morado, como la corriente se ha dicho que no es la real ya que ha sido dividida entre 3, lo que significa que tampoco la señal de potencia instantánea es la correcta porque esta proviene de la multiplicación ($V_{SN}(t) \times I_s(t)$), de las tres señales que el osciloscopio muestra en la figura 4.74 la única señal que es real es la de voltaje $V_{SN}(t)$.

Cómo se puede observar en el gráfico de la figura 4.73 por alguna razón el osciloscopio no capturo el valor de voltaje rms, ni la frecuencia como se puede ver aparece $V_{rms}=*****$, $Freq=*****$, esto solo ocurrió en la FASE S pero para las FASES R Y T si se pudo leer la medición. Esto no representa ningún problema, porque la frecuencia para el ensayo de vacío no es variable al contrario es fija y de 60Hz, y el voltaje se puede calcular a través de un muestreo.

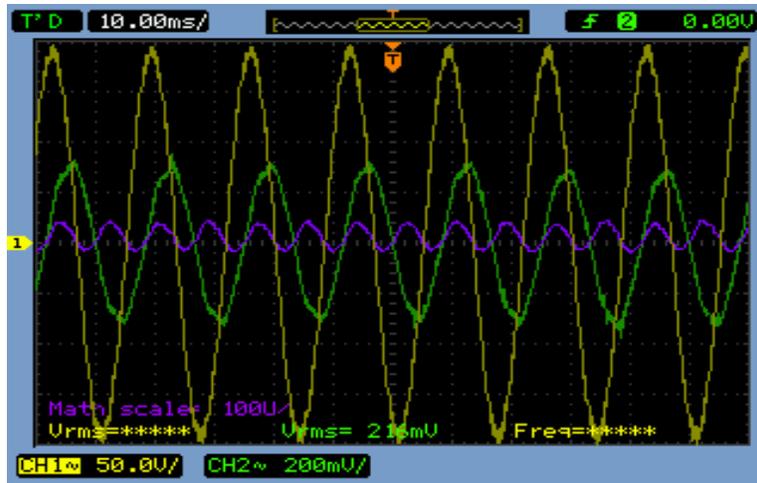


Figura 4.74 Señal de voltaje, señal de corriente, y señal de la potencia instantánea en la FASE S para 230V.

EXTRACCION DE MUESTRAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE.

En la opción adquisición de datos del osciloscopio, tiene la función de poder guardar imágenes (captura de las señales mostradas en la pantalla del osciloscopio) en formato PNG en un dispositivo de almacenamiento externo, y tiene además la función de poder guardar un total de 602 muestras que corresponden a aproximadamente 7 periodos de las señales de voltaje y corriente.

Para guardar en un archivo CSV la información visualizada en la figura 4.75 es muy sencillo, se coloca un pendrive en el puerto USB ubicado al frente del osciloscopio, luego en la opción ADQUISICION DE DATOS se debe seleccionar guardar en un archivo CSV, luego pedirá asignar un nombre en este caso se usó de nombre FASE SN – 230V, luego se procedió a guardar la captura de pantalla, en la misma opción de adquisición de datos se seleccionó guardar imagen PNG, y se nombró de igual forma FASE SN – 230, con esto ya se tiene guardados dentro del pendrive los dos archivos, así como se muestra en la figura 4.75

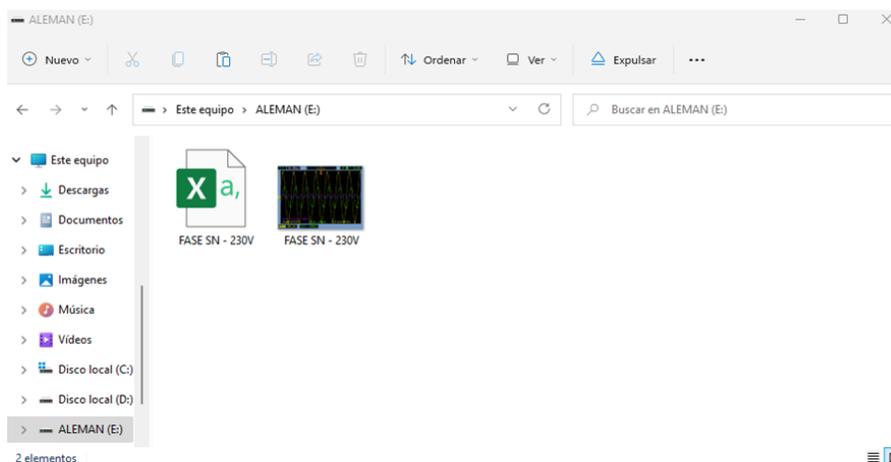


Figura 4.75 Archivo CSV, y captura de pantalla para la FASE S al nivel de tensión nominal 230V guardadas en el pendrive.

ANALISIS DEL ARCHIVO CSV.

Al abrir el archivo **FASE SN – 230V.scv** lo que contiene son las muestras y están ordenadas en columnas, son las primeras tres columnas de la izquierda de la tabla 4.25 que corresponden al tiempo $t(s)$, al voltaje $V_{SN}(t)$, y a la corriente $I_S(t)$, las muestras aportan información suficiente para hacer un análisis y poder calcular las demás columnas de la tabla, lo que se persigue es calcular los valores promedio, valores rms de V_{SN} , I_S , es decir valores que ya no dependen del tiempo.

Siempre que se menciona un numero de columna el orden esta siempre es de izquierda a derecha.

➤ **COLUMNA 4: “ $I_S(t) \times 3$ ”**

Para calcular los valores de esta columna es simple, solo basta con multiplicar por 3 todos los valores registrados por el canal 2 es decir multiplicar por 3 todos los valores de la corriente $I_S(t)$, recordar que se ha dicho que la sonda de corriente mide la corriente real, pero como se está usando una escala AC:3V/100A el osciloscopio la registra dividida entre 3, por lo que nuevamente hay que reescalarla para encontrar los verdaderos valores $I_S(t)$

➤ **COLUMNA 5: “ $(V_{SN}(t))^2$ ”**

Los valores de esta columna se calculan directamente, simplemente elevando al cuadrado todos los valores registrados por el canal 1, es decir elevando al cuadrado el voltaje $V_{SN}(t)$

➤ **COLUMNA 6: “ $(I_S(t) \times 3)^2$ ”**

Los valores de esta columna se obtienen elevando al cuadrado los valores obtenidos en la COLUMNA 4

➤ **COLUMNA 7: “ $P_S(t)$ ”**

Los valores de esta columna se obtienen también de forma directa, multiplique los valores del canal 1 por los valores de la COLUMNA 4

$$P_S(t) = V_{SN}(t) \times [I_S(t) \times 3]$$

Esta columna representa la potencia instantánea y será de mucha utilidad para calcular la potencia promedio.

➤ **COLUMNA 8: “ $V_{SN} RMS$ ”**

Para calcular V_{SN} pero en valor eficaz o RMS lo que se aplico fue la definición, el valor eficaz es al valor cuadrático medio de la magnitud eléctrica. Todos los instrumentos de medición lo que realmente miden él es valor eficaz.

La ecuación para calcular el $V_{SN} RMS$ es la siguiente:

$$V_{SN} RMS = \sqrt{(V_{SN}(t))^2}$$

➤ **COLUMNA 9: “ $I_S RMS$ ”**

$$I_S RMS = \sqrt{(I_S(t) \times 3)^2}$$

No es necesario trabajar con las 602 muestras de corriente y voltaje que aproximadamente equivalen 7 periodos de las señales, se puede trabajar y aplicar las definiciones del valor promedio o eficaz únicamente para un periodo T completo de las señales.

➤ **Cálculo del periodo T :**

La frecuencia f de la prueba de vacío es:

$$f = 60Hz$$

El periodo entonces es:

$$T = \frac{1}{60HZ} = 0.0166 \text{ segundos}$$

El rango de valores de tiempo a tomar de las muestras seria:

$$\text{Desde un } t = 0 \text{ hasta un } t = 0.0166 \text{ s}$$

Al trabajar con el primer periodo T positivo de la señal desde un $t = 0$ hasta un $t = 0.0166 \text{ s}$ las muestras se han reducido de 602 a 81 muestras.

Tabla 4.25 Análisis de muestras para la FASE S al nivel de voltaje nominal 230V.

FASE S								
TIEMPO	CANAL 1	CANAL 2						
t(s)	$V_{SN}(t)$	$I_S(t)$	$I_S(t) \times 3$	$(V_{SN}(t))^2$	$(I_S(t) \times 3)^2$	$P_S(t)$	$V_{SN} RMS$	$I_S RMS$
0	164	-0.04	-0.12	26896	0.0144	-19.68	134.574042	0.68599708
0.0002	178	0	0	31684	0	0		
0.0004	184	0.008	0.024	33856	0.000576	4.416		
0.0006	174	0.056	0.168	30276	0.028224	29.232		
0.0008	178	0.056	0.168	31684	0.028224	29.904		
0.001	194	0.112	0.336	37636	0.112896	65.184		
0.0012	180	0.112	0.336	32400	0.112896	60.48		
0.0014	196	0.16	0.48	38416	0.2304	94.08		
0.0016	196	0.16	0.48	38416	0.2304	94.08		
0.0018	178	0.208	0.624	31684	0.389376	111.072		
0.002	190	0.272	0.816	36100	0.665856	155.04		
0.0022	172	0.2	0.6	29584	0.36	103.2		
0.0024	166	0.232	0.696	27556	0.484416	115.536		
0.0026	172	0.272	0.816	29584	0.665856	140.352		
0.0028	166	0.256	0.768	27556	0.589824	127.488		
0.003	146	0.28	0.84	21316	0.7056	122.64		
0.0032	150	0.28	0.84	22500	0.7056	126		
0.0034	124	0.256	0.768	15376	0.589824	95.232		
0.0036	124	0.28	0.84	15376	0.7056	104.16		
0.0038	108	0.296	0.888	11664	0.788544	95.904		
0.004	104	0.28	0.84	10816	0.7056	87.36		
0.0042	92	0.312	0.936	8464	0.876096	86.112		
0.0044	88	0.304	0.912	7744	0.831744	80.256		
0.0046	56	0.32	0.96	3136	0.9216	53.76		
0.0048	56	0.288	0.864	3136	0.746496	48.384		
0.005	24	0.32	0.96	576	0.9216	23.04		
0.0052	20	0.312	0.936	400	0.876096	18.72		
0.0054	4	0.28	0.84	16	0.7056	3.36		
0.0056	-2	0.288	0.864	4	0.746496	-1.728		
0.0058	-30	0.264	0.792	900	0.627264	-23.76		
0.006	-30	0.264	0.792	900	0.627264	-23.76		
0.0062	-66	0.232	0.696	4356	0.484416	-45.936		
0.0064	-66	0.224	0.672	4356	0.451584	-44.352		
0.0066	-88	0.192	0.576	7744	0.331776	-50.688		
0.0068	-94	0.192	0.576	8836	0.331776	-54.144		
0.007	-108	0.136	0.408	11664	0.166464	-44.064		
0.0072	-108	0.168	0.504	11664	0.254016	-54.432		

0.0074	-138	0.12	0.36	19044	0.1296	-49.68
0.0076	-136	0.112	0.336	18496	0.112896	-45.696
0.0078	-158	0.072	0.216	24964	0.046656	-34.128
0.008	-164	0.08	0.24	26896	0.0576	-39.36
0.0082	-158	0.024	0.072	24964	0.005184	-11.376
0.0084	-166	0.024	0.072	27556	0.005184	-11.952
0.0086	-180	-0.032	-0.096	32400	0.009216	17.28
0.0088	-174	-0.032	-0.096	30276	0.009216	16.704
0.009	-192	-0.064	-0.192	36864	0.036864	36.864
0.0092	-194	-0.064	-0.192	37636	0.036864	37.248
0.0094	-184	-0.12	-0.36	33856	0.1296	66.24
0.0096	-198	-0.12	-0.36	39204	0.1296	71.28
0.0098	-184	-0.176	-0.528	33856	0.278784	97.152
0.01	-186	-0.176	-0.528	34596	0.278784	98.208
0.0102	-194	-0.224	-0.672	37636	0.451584	130.368
0.0104	-184	-0.216	-0.648	33856	0.419904	119.232
0.0106	-174	-0.256	-0.768	30276	0.589824	133.632
0.0108	-180	-0.264	-0.792	32400	0.627264	142.56
0.011	-158	-0.24	-0.72	24964	0.5184	113.76
0.0112	-160	-0.264	-0.792	25600	0.627264	126.72
0.0114	-140	-0.28	-0.84	19600	0.7056	117.6
0.0116	-136	-0.288	-0.864	18496	0.746496	117.504
0.0118	-132	-0.28	-0.84	17424	0.7056	110.88
0.012	-128	-0.28	-0.84	16384	0.7056	107.52
0.0122	-102	-0.304	-0.912	10404	0.831744	93.024
0.0124	-106	-0.288	-0.864	11236	0.746496	91.584
0.0126	-72	-0.32	-0.96	5184	0.9216	69.12
0.0128	-70	-0.32	-0.96	4900	0.9216	67.2
0.013	-54	-0.336	-1.008	2916	1.016064	54.432
0.0132	-50	-0.312	-0.936	2500	0.876096	46.8
0.0134	-30	-0.336	-1.008	900	1.016064	30.24
0.0136	-26	-0.32	-0.96	676	0.9216	24.96
0.0138	12	-0.296	-0.888	144	0.788544	-10.656
0.014	12	-0.304	-0.912	144	0.831744	-10.944
0.0142	40	-0.264	-0.792	1600	0.627264	-31.68
0.0144	46	-0.272	-0.816	2116	0.665856	-37.536
0.0146	60	-0.232	-0.696	3600	0.484416	-41.76
0.0148	64	-0.232	-0.696	4096	0.484416	-44.544
0.015	90	-0.208	-0.624	8100	0.389376	-56.16
0.0152	92	-0.208	-0.624	8464	0.389376	-57.408
0.0154	122	-0.176	-0.528	14884	0.278784	-64.416

0.0156	122	-0.168	-0.504	14884	0.254016	-61.488
0.0158	136	-0.128	-0.384	18496	0.147456	-52.224
0.016	142	-0.128	-0.384	20164	0.147456	-54.528

$$V_{SN} RMS = 134.574042 V$$

$$I_S RMS = 0.68599708 A$$

Los resultados obtenidos con el análisis de las muestras son confiables, y para comprobar que efectivamente el análisis por muestras es certero, se estableció comparaciones entre las mediciones que arrojaron los multímetros fluke 115 y la pinza amperimétrica Klein Tools CL312 con los valores obtenidas producto del análisis de las muestras.

En ese sentido, La corriente que se obtuvo con la pinza amperimétrica resulto 0.67A, mientras que la corriente que se calculó por medio del análisis de las muestras resulto de 0.68A, por lo que se puede decir que el método de muestreo tiene muy buena precisión.

El voltaje línea a neutro que se calculó con las mediciones de voltaje línea a línea con los multímetros FLUKE 115 resulto de 131.1V, y mediante el análisis de muestreo resulto de 134.5V lo que da una diferencia de 3.4V, estos no resultaron precisamente iguales como la corriente, hay un mayor grado de error cometido, pero es completamente normal ya que cada instrumento de medición tiene su grado de error asociado, que incluso es proporcionado en las hojas técnicas del instrumento, por lo que no se tomó en cuenta las mediciones de los multímetros FLUKE 115, si no que se optó por tomar únicamente los resultados del muestro, esto para utilizar únicamente el osciloscopio como instrumento de medición.

Ahora se procedió a graficar los datos de la columna 2, columna 4, columna 7, de la tabla 4.25 que corresponden a $V_{SN}(t)$, $(I_S(t) \times 3)$, $P_S(t)$ respectivamente, para un periodo completo, las gráficas son las mostradas en la figura 4.76, estas señales si representan el comportamiento eléctrico real que experimenta la FASE S.

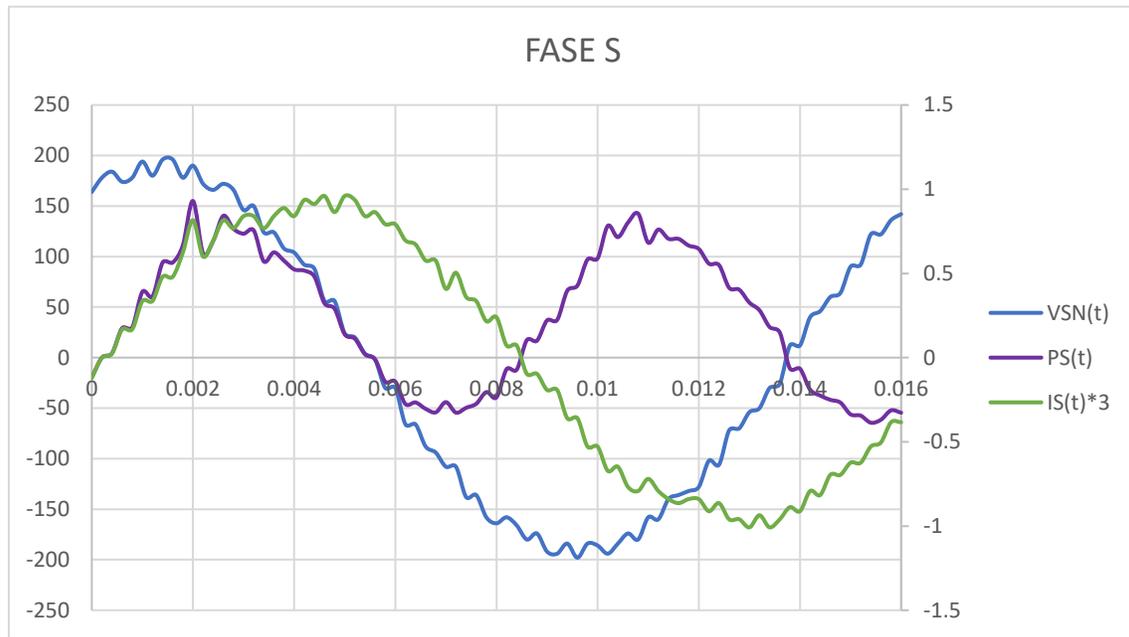


Figura 4.76 Señal real de voltaje $V_{SN}(t)$, señal real de corriente $I_S(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_S(t)$ para la FASE S al nivel de voltaje 230V.

Hasta aquí a finalizado el **ANÁLISIS PARA LA FASE S A 230V**, pero para terminar con el nivel de voltaje de 230V **FALTA ANALISAR LA FASE R Y T**, y con todas las fases analizadas ya se puede calcular la potencia promedio trifásica consumida en vacío, pero como se ha explicado el análisis es extenso y repetitivo, por lo que para las otras dos fases ya no se va explicar, sino que simplemente se van colocar las tablas completa del análisis de las muestras, gráficos, capturas del osciloscopio, y fotografías de las medición con los instrumentos.

MEDIONES EN LA FASE R A 230V

Medición de voltaje línea a línea, con los multímetros FLUKE 115, y medición de la corriente de fase con la pinza amperimétrica Klein Tools CL312:



Figura 4.77 Voltaje de línea a línea, corriente de fase, para la FASE R a 230V.

$$V_{RS} = 229.4V$$

$$V_{ST} = 228.9V$$

$$V_{TR} = 222.5V$$

$$I_R = 0.49A$$

➤ **Voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{229.4 + 228.9 + 222.5}{3} = 226.93V$$

➤ **Voltaje línea a neutro:**

$$V_{RN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{226.93}{\sqrt{3}}$$

$$V_{RN} = 131V$$

Señales obtenidas con el osciloscopio:

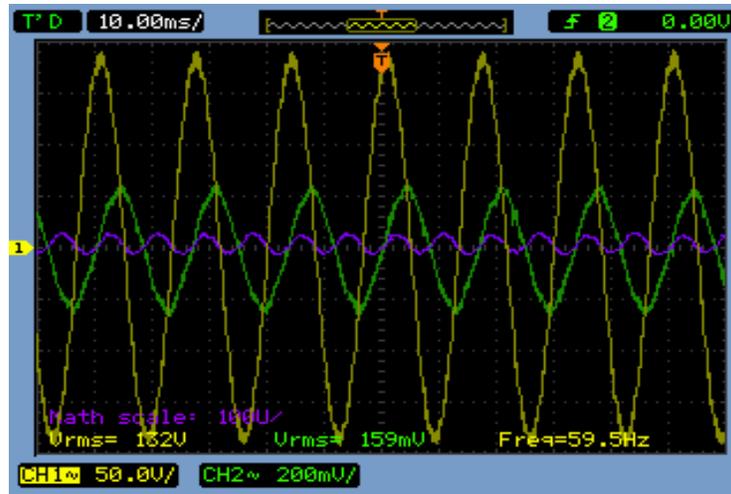


Figura 4.78 Señal de voltaje, señal de corriente, y señal de la potencia instantánea en la FASE R para 230V.

ANÁLISIS DEL ARCHIVO CSV.

Tabla 4.26 Análisis de muestras para la FASE R al nivel de voltaje nominal 230V.

FASE R								
TIEMPO	CANAL 1	CANAL 2						
$t(s)$	$V_{RN}(t)$	$I_R(t)$	$I_R(t) \times 3$	$(V_{RN}(t))^2$	$(I_R(t) \times 3)^2$	$P_R(t)$	$V_{RN} RMS$	$I_R RMS$
0	190	0.032	0.096	36100	0.009216	18.24	129.491122	0.48294651
0.0002	178	0.064	0.192	31684	0.036864	34.176		
0.0004	178	0.072	0.216	31684	0.046656	38.448		
0.0006	190	0.112	0.336	36100	0.112896	63.84		
0.0008	184	0.088	0.264	33856	0.069696	48.576		
0.001	170	0.152	0.456	28900	0.207936	77.52		
0.0012	178	0.136	0.408	31684	0.166464	72.624		
0.0014	156	0.168	0.504	24336	0.254016	78.624		
0.0016	160	0.16	0.48	25600	0.2304	76.8		
0.0018	146	0.184	0.552	21316	0.304704	80.592		
0.002	142	0.168	0.504	20164	0.254016	71.568		
0.0022	134	0.192	0.576	17956	0.331776	77.184		
0.0024	132	0.184	0.552	17424	0.304704	72.864		
0.0026	106	0.208	0.624	11236	0.389376	66.144		
0.0028	108	0.2	0.6	11664	0.36	64.8		
0.003	82	0.224	0.672	6724	0.451584	55.104		
0.0032	80	0.208	0.624	6400	0.389376	49.92		
0.0034	64	0.24	0.72	4096	0.5184	46.08		
0.0036	60	0.224	0.672	3600	0.451584	40.32		

0.0038	38	0.24	0.72	1444	0.5184	27.36
0.004	34	0.216	0.648	1156	0.419904	22.032
0.0042	-2	0.232	0.696	4	0.484416	-1.392
0.0044	-2	0.224	0.672	4	0.451584	-1.344
0.0046	-28	0.192	0.576	784	0.331776	-16.128
0.0048	-34	0.216	0.648	1156	0.419904	-22.032
0.005	-46	0.168	0.504	2116	0.254016	-23.184
0.0052	-50	0.168	0.504	2500	0.254016	-25.2
0.0054	-80	0.144	0.432	6400	0.186624	-34.56
0.0056	-80	0.152	0.456	6400	0.207936	-36.48
0.0058	-112	0.128	0.384	12544	0.147456	-43.008
0.006	-112	0.128	0.384	12544	0.147456	-43.008
0.0062	-122	0.088	0.264	14884	0.069696	-32.208
0.0064	-128	0.104	0.312	16384	0.097344	-39.936
0.0066	-144	0.072	0.216	20736	0.046656	-31.104
0.0068	-140	0.064	0.192	19600	0.036864	-26.88
0.007	-168	0.048	0.144	28224	0.020736	-24.192
0.0072	-158	0.048	0.144	24964	0.020736	-22.752
0.0074	-172	0	0	29584	0	0
0.0076	-182	0.008	0.024	33124	0.000576	-4.368
0.0078	-172	-0.016	-0.048	29584	0.002304	8.256
0.008	-174	-0.008	-0.024	30276	0.000576	4.176
0.0082	-190	-0.056	-0.168	36100	0.028224	31.92
0.0084	-180	-0.056	-0.168	32400	0.028224	30.24
0.0086	-190	-0.088	-0.264	36100	0.069696	50.16
0.0088	-192	-0.088	-0.264	36864	0.069696	50.688
0.009	-178	-0.128	-0.384	31684	0.147456	68.352
0.0092	-184	-0.128	-0.384	33856	0.147456	70.656
0.0094	-168	-0.152	-0.456	28224	0.207936	76.608
0.0096	-168	-0.144	-0.432	28224	0.186624	72.576
0.0098	-164	-0.184	-0.552	26896	0.304704	90.528
0.01	-160	-0.176	-0.528	25600	0.278784	84.48
0.0102	-144	-0.192	-0.576	20736	0.331776	82.944
0.0104	-144	-0.2	-0.6	20736	0.36	86.4
0.0106	-120	-0.16	-0.48	14400	0.2304	57.6
0.0108	-122	-0.176	-0.528	14884	0.278784	64.416
0.011	-102	-0.208	-0.624	10404	0.389376	63.648
0.0112	-100	-0.208	-0.624	10000	0.389376	62.4
0.0114	-88	-0.232	-0.696	7744	0.484416	61.248
0.0116	-86	-0.216	-0.648	7396	0.419904	55.728
0.0118	-52	-0.248	-0.744	2704	0.553536	38.688

0.012	-52	-0.232	-0.696	2704	0.484416	36.192
0.0122	-22	-0.248	-0.744	484	0.553536	16.368
0.0124	-18	-0.24	-0.72	324	0.5184	12.96
0.0126	-2	-0.216	-0.648	4	0.419904	1.296
0.0128	4	-0.232	-0.696	16	0.484416	-2.784
0.013	30	-0.2	-0.6	900	0.36	-18
0.0132	30	-0.208	-0.624	900	0.389376	-18.72
0.0134	64	-0.176	-0.528	4096	0.278784	-33.792
0.0136	66	-0.176	-0.528	4356	0.278784	-34.848
0.0138	84	-0.16	-0.48	7056	0.2304	-40.32
0.014	90	-0.168	-0.504	8100	0.254016	-45.36
0.0142	102	-0.128	-0.384	10404	0.147456	-39.168
0.0144	106	-0.136	-0.408	11236	0.166464	-43.248
0.0146	132	-0.096	-0.288	17424	0.082944	-38.016
0.0148	128	-0.112	-0.336	16384	0.112896	-43.008
0.015	152	-0.088	-0.264	23104	0.069696	-40.128
0.0152	156	-0.088	-0.264	24336	0.069696	-41.184
0.0154	152	-0.048	-0.144	23104	0.020736	-21.888
0.0156	162	-0.064	-0.192	26244	0.036864	-31.104
0.0158	172	-0.032	-0.096	29584	0.009216	-16.512
0.016	166	-0.032	-0.096	27556	0.009216	-15.936

$$V_{RN} \text{ RMS} = 129.491122 \text{ V}$$

$$I_R \text{ RMS} = 0.48294651 \text{ A}$$

Grafica de los datos de la columna 2, columna 4, columna 7, de la tabla 4.26 que corresponden a $V_{RN}(t)$, $(I_R(t) \times 3)$, $P_R(t)$ respectivamente, para un periodo completo, las gráficas son las mostradas en la figura 4.79, estas señales si representan el comportamiento eléctrico real que experimenta la FASE R.

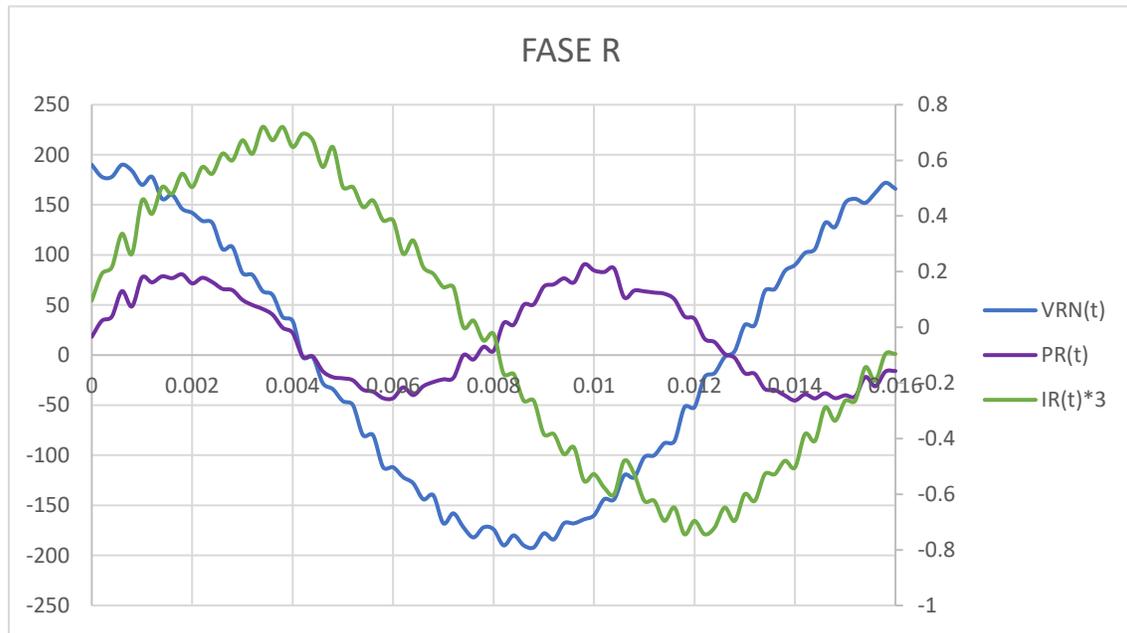


Figura 4.79 Señal real de voltaje $V_{RN}(t)$, señal real de corriente $I_R(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_R(t)$ para la FASE R al nivel de voltaje 230V.

MEDIONES EN LA FASE T A 230V

Medición de voltaje línea a línea, con los multímetros FLUKE 115, y medición de la corriente de fase con la pinza amperimétrica Klein Tools CL312:



Figura 4.80 Voltaje de línea a línea, corriente de fase, para la FASE T a 230V.

$$V_{RS} = 229.1V$$

$$V_{ST} = 230.9V$$

$$V_{TR} = 223.3V$$

$$I_T = 0.67A$$

➤ **Voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{229.1 + 230.9 + 223.3}{3} = 227.76V$$

➤ **Voltaje línea a neutro:**

$$V_{TN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{227.76}{\sqrt{3}}$$

$$V_{TN} = 131.50V$$

Señales obtenidas con el osciloscopio:

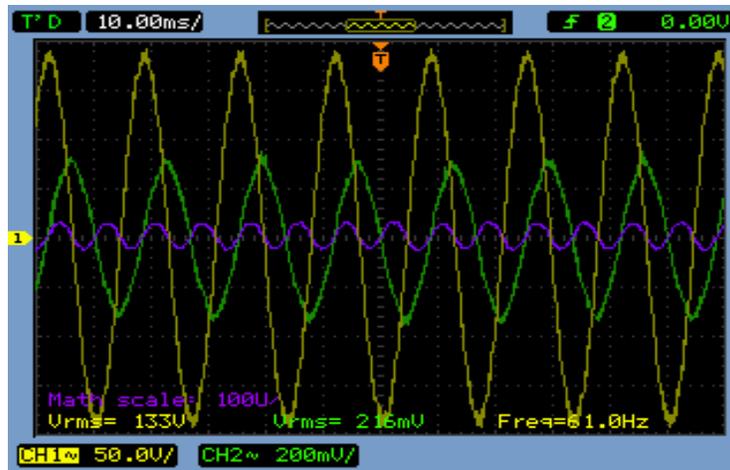


Figura 4.81 Señal de voltaje, señal de corriente, y señal de la potencia instantánea en la FASE T para 230V.

ANÁLISIS DEL ARCHIVO CSV.

Tabla 4.27 Análisis de muestras para la FASE T al nivel de voltaje nominal 230V.

FASE T								
TIEMPO	CANAL 1	CANAL 2						
$t(s)$	$V_{TN}(t)$	$I_T(t)$	$I_T(t) \times 3$	$(V_{TN}(t))^2$	$(I_T(t) \times 3)^2$	$P_T(t)$	$V_{TN\ RMS}$	$I_T\ RMS$
0	184	-0.032	-0.096	33856	0.009216	-17.664	130.478701	0.6644764
0.0002	178	0.008	0.024	31684	0.000576	4.272		
0.0004	190	0	0	36100	0	0		
0.0006	180	0.064	0.192	32400	0.036864	34.56		
0.0008	180	0.064	0.192	32400	0.036864	34.56		

0.001	188	0.112	0.336	35344	0.112896	63.168
0.0012	178	0.12	0.36	31684	0.1296	64.08
0.0014	170	0.168	0.504	28900	0.254016	85.68
0.0016	174	0.152	0.456	30276	0.207936	79.344
0.0018	152	0.192	0.576	23104	0.331776	87.552
0.002	156	0.184	0.552	24336	0.304704	86.112
0.0022	138	0.216	0.648	19044	0.419904	89.424
0.0024	136	0.216	0.648	18496	0.419904	88.128
0.0026	130	0.24	0.72	16900	0.5184	93.6
0.0028	126	0.232	0.696	15876	0.484416	87.696
0.003	102	0.256	0.768	10404	0.589824	78.336
0.0032	106	0.256	0.768	11236	0.589824	81.408
0.0034	74	0.296	0.888	5476	0.788544	65.712
0.0036	74	0.28	0.84	5476	0.7056	62.16
0.0038	56	0.312	0.936	3136	0.876096	52.416
0.004	50	0.312	0.936	2500	0.876096	46.8
0.0042	30	0.296	0.888	900	0.788544	26.64
0.0044	28	0.312	0.936	784	0.876096	26.208
0.0046	-10	0.288	0.864	100	0.746496	-8.64
0.0048	-10	0.296	0.888	100	0.788544	-8.88
0.005	-38	0.272	0.816	1444	0.665856	-31.008
0.0052	-44	0.28	0.84	1936	0.7056	-36.96
0.0054	-58	0.256	0.768	3364	0.589824	-44.544
0.0056	-60	0.256	0.768	3600	0.589824	-46.08
0.0058	-88	0.224	0.672	7744	0.451584	-59.136
0.006	-88	0.224	0.672	7744	0.451584	-59.136
0.0062	-120	0.2	0.6	14400	0.36	-72
0.0064	-122	0.192	0.576	14884	0.331776	-70.272
0.0066	-136	0.16	0.48	18496	0.2304	-65.28
0.0068	-138	0.168	0.504	19044	0.254016	-69.552
0.007	-148	0.128	0.384	21904	0.147456	-56.832
0.0072	-148	0.136	0.408	21904	0.166464	-60.384
0.0074	-170	0.104	0.312	28900	0.097344	-53.04
0.0076	-164	0.088	0.264	26896	0.069696	-43.296
0.0078	-180	0.016	0.048	32400	0.002304	-8.64
0.008	-182	0.056	0.168	33124	0.028224	-30.576
0.0082	-174	0	0	30276	0	0
0.0084	-182	0.016	0.048	33124	0.002304	-8.736
0.0086	-192	-0.04	-0.12	36864	0.0144	23.04
0.0088	-180	-0.048	-0.144	32400	0.020736	25.92
0.009	-192	-0.096	-0.288	36864	0.082944	55.296

0.0092	-190	-0.088	-0.264	36100	0.069696	50.16
0.0094	-176	-0.144	-0.432	30976	0.186624	76.032
0.0096	-182	-0.096	-0.288	33124	0.082944	52.416
0.0098	-162	-0.184	-0.552	26244	0.304704	89.424
0.01	-166	-0.184	-0.552	27556	0.304704	91.632
0.0102	-156	-0.224	-0.672	24336	0.451584	104.832
0.0104	-152	-0.208	-0.624	23104	0.389376	94.848
0.0106	-138	-0.248	-0.744	19044	0.553536	102.672
0.0108	-142	-0.224	-0.672	20164	0.451584	95.424
0.011	-116	-0.264	-0.792	13456	0.627264	91.872
0.0112	-116	-0.256	-0.768	13456	0.589824	89.088
0.0114	-96	-0.288	-0.864	9216	0.746496	82.944
0.0116	-92	-0.288	-0.864	8464	0.746496	79.488
0.0118	-80	-0.32	-0.96	6400	0.9216	76.8
0.012	-78	-0.32	-0.96	6084	0.9216	74.88
0.0122	-46	-0.336	-1.008	2116	1.016064	46.368
0.0124	-48	-0.328	-0.984	2304	0.968256	47.232
0.0126	-12	-0.344	-1.032	144	1.065024	12.384
0.0128	-10	-0.336	-1.008	100	1.016064	10.08
0.013	8	-0.32	-0.96	64	0.9216	-7.68
0.0132	14	-0.32	-0.96	196	0.9216	-13.44
0.0134	36	-0.304	-0.912	1296	0.831744	-32.832
0.0136	36	-0.296	-0.888	1296	0.788544	-31.968
0.0138	70	-0.272	-0.816	4900	0.665856	-57.12
0.014	70	-0.28	-0.84	4900	0.7056	-58.8
0.0142	96	-0.248	-0.744	9216	0.553536	-71.424
0.0144	102	-0.256	-0.768	10404	0.589824	-78.336
0.0146	110	-0.216	-0.648	12100	0.419904	-71.28
0.0148	114	-0.224	-0.672	12996	0.451584	-76.608
0.015	138	-0.192	-0.576	19044	0.331776	-79.488
0.0152	134	-0.2	-0.6	17956	0.36	-80.4
0.0154	158	-0.144	-0.432	24964	0.186624	-68.256
0.0156	156	-0.152	-0.456	24336	0.207936	-71.136
0.0158	164	-0.12	-0.36	26896	0.1296	-59.04
0.016	168	-0.12	-0.36	28224	0.1296	-60.48

$$V_{TN} \text{ RMS} = 130.478701 \text{ V}$$

$$I_T \text{ RMS} = 0.6644764 \text{ A}$$

Grafica de los datos de la columna 2, columna 4, columna 7, de la tabla 4.27 que corresponden a $V_{TN}(t)$, $(I_T(t) \times 3)$, $P_T(t)$ respectivamente, para un periodo completo, las gráficas son las mostradas en la figura 4.82, estas señales si representan el comportamiento eléctrico real que experimenta la FASE T.

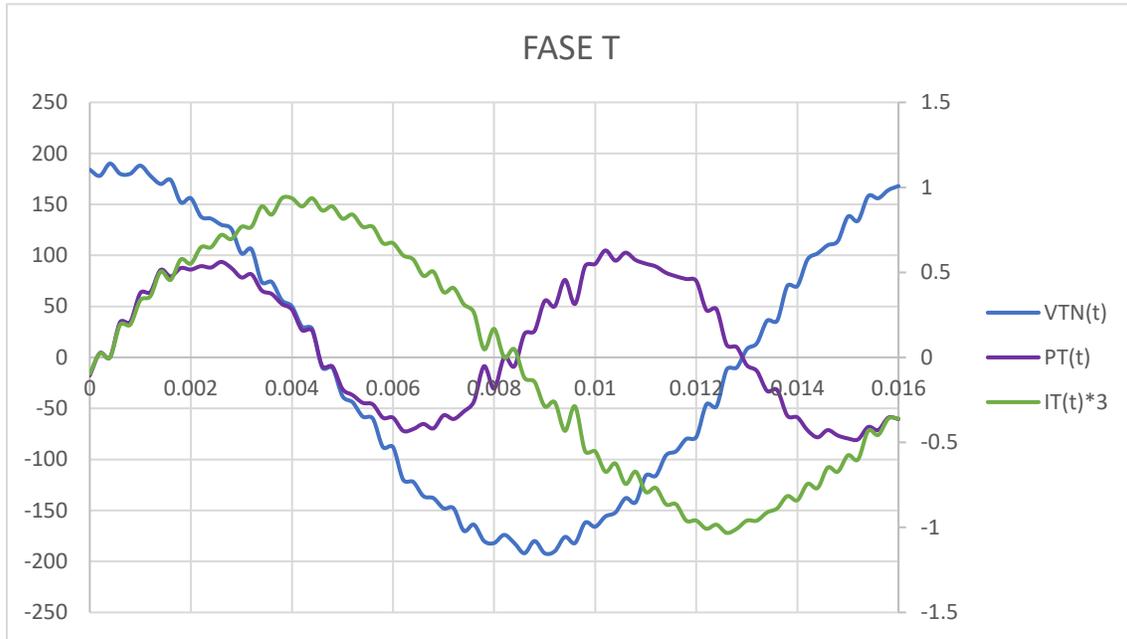


Figura 4.82 Señal real de voltaje $V_{TN}(t)$, señal real de corriente $I_T(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_T(t)$ para la FASE T al nivel de voltaje 230V.

CALCULO DE LA POTENCIA DE VACIO PROMEDIO $P_{3\phi}$ PARA 230V.

Una vez analizado todas las muestras de los archivos CSV para el nivel de 230V, ya se tiene completas las tablas 4.25, 4.26, 4.27, que corresponde a un análisis hecho por cada fase, y ya se tiene la información suficiente para calcular la potencia promedio consumida en vacío para ese nivel de voltaje, que es en este caso el voltaje nominal del motor 230V.

POTENCIA INSTANTANEA $P(t)$.

La potencia instantánea se denomina como el producto del voltaje instantáneo y la corriente instantánea:

$$P(t) = V(t) \times I(t)$$

La potencia instantánea para elementos puramente resistivos, tiene un solo signo y es que siempre resulta positiva debido a que la corriente y voltaje están en fase, como se puede observar en el gráfico de la figura 4.83.

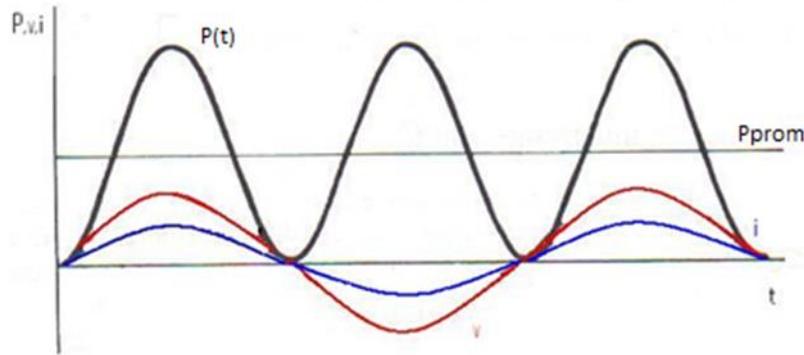


Figura 4.83 Señal de la potencia instantánea para elementos resistivos.

Para el caso particular del ensayo del motor se tiene un comportamiento resistivo e inductivo, la corriente y el voltaje ya no están en fase, lo que resulta en que la potencia instantánea tenga valores positivos y negativos.

Entonces si nos remitimos a las tablas 4.25, 4.26, 4.27 ya se tiene las columnas donde efectuó ese cálculo $P_S(t)$, $P_R(t)$, $P_T(t)$ respectivamente, es decir ya se conoce todos los valores de la potencia instantánea por fase para un periodo completo, y como se ha dicho en esas columnas se observa valores de la potencia instantánea que resultaron positivos y negativos, pero es completamente normal.

POTENCIA TRIFASICA PROMEDIO $P_{3\phi}$.

Para calcular la potencia trifásica se aplicó la siguiente definición:

“La potencia promedio trifásica es el promedio de la suma de las potencias instantáneas monofásicas en un periodo completo, es un valor constante e invariante en el tiempo”

Entonces, para aplicar el criterio primero se debe calcular los valores de la columna *SUMA P1φ*

Ejemplo para calcular el primer valor de la columna suma:

$$t = 0$$

$$\begin{aligned}
 P_{1\phi}(t = 0) &= P_{S1(t=0)} + P_{R1(t=0)} + P_{T1(t=0)} \\
 &= -19.68 + 18.24 + -17.664 \\
 P_{1\phi}(t = 0) &= -19.104
 \end{aligned}$$

Al calcular la suma de las contribuciones de las potencias instantáneas monofásicas, así como se realizó en ejemplo para t=0 es como se completa la columna *SUMA P1φ*, calculando para los demás tiempos hasta completar la tabla 4.28.

Luego ya se puede aplicar completamente la definición para calcular la potencia promedio.

$$P_{3\phi} = \overline{(SUMA P1\phi)}$$

La cual resultado de:

$$P_{3\phi} = 70.2014815 W$$

<i>t(s)</i>	<i>SUMA P1φ</i>	<i>P3φ</i>
0	-19.104	70.2014815
0.0002	38.448	
0.0004	42.864	
0.0006	127.632	
0.0008	113.04	
0.001	205.872	
0.0012	197.184	
0.0014	258.384	
0.0016	250.224	
0.0018	279.216	
0.002	312.72	
0.0022	269.808	
0.0024	276.528	
0.0026	300.096	
0.0028	279.984	
0.003	256.08	
0.0032	257.328	
0.0034	207.024	
0.0036	206.64	
0.0038	175.68	

0.004	156.192
0.0042	111.36
0.0044	105.12
0.0046	28.992
0.0048	17.472
0.005	-31.152
0.0052	-43.44
0.0054	-75.744
0.0056	-84.288
0.0058	-125.904
0.006	-125.904
0.0062	-150.144
0.0064	-154.56
0.0066	-147.072
0.0068	-150.576
0.007	-125.088
0.0072	-137.568
0.0074	-102.72
0.0076	-93.36
0.0078	-34.512
0.008	-65.76
0.0082	20.544
0.0084	9.552
0.0086	90.48
0.0088	93.312
0.009	160.512
0.0092	158.064
0.0094	218.88
0.0096	196.272
0.0098	277.104
0.01	274.32
0.0102	318.144
0.0104	300.48
0.0106	293.904
0.0108	302.4
0.011	269.28
0.0112	278.208
0.0114	261.792
0.0116	252.72
0.0118	226.368
0.012	218.592

0.0122	155.76
0.0124	151.776
0.0126	82.8
0.0128	74.496
0.013	28.752
0.0132	14.64
0.0134	-36.384
0.0136	-41.856
0.0138	-108.096
0.014	-115.104
0.0142	-142.272
0.0144	-159.12
0.0146	-151.056
0.0148	-164.16
0.015	-175.776
0.0152	-178.992
0.0154	-154.56
0.0156	-163.728
0.0158	-127.776
0.016	-130.944

Tabla 4.28 Potencia promedio trifásica para el nivel de voltaje nominal 230V.

Para tener una visualización de las señales de todas las potencias para el nivel de 230V se procedió a graficar las potencias monofásicas instantáneas, la gráfica de la suma y la potencia promedio trifásica para un periodo completo, el grafico es el mostrado en la figura 4.84

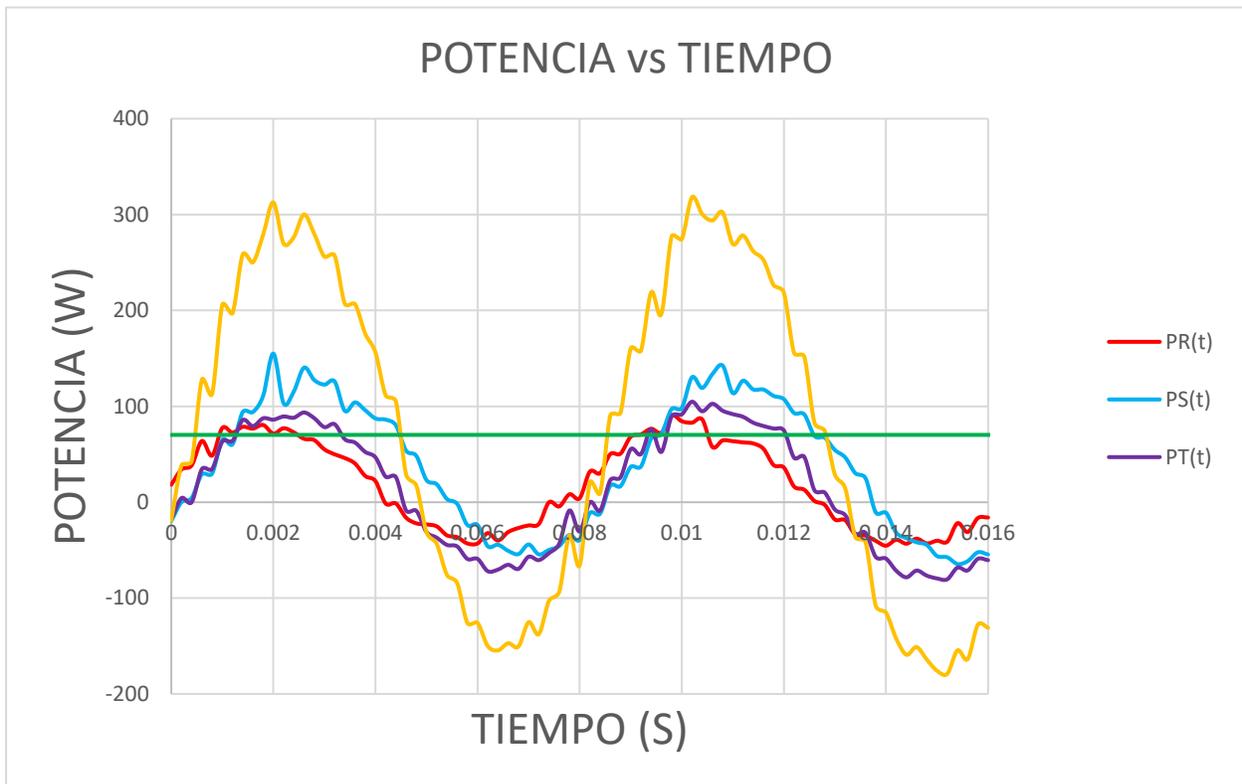


Figura 4.84 Señales de todas las potencias asociadas al nivel de voltaje nominal 230V.

Hasta aquí se ha terminado el análisis para el primer nivel de voltaje de 230V, falta analizar los otros 11 niveles de voltaje, como se podrá observar es bastante extenso, pero a su vez repetitivo, con la ayuda de una hoja de cálculo resulto sencillo de analizar.

En resumen, para el nivel de 230V se tiene:

$$V_{SN} \text{ RMS} = 134.574042 \text{ V}$$

$$I_S \text{ RMS} = 0.68599708 \text{ A}$$

$$V_{RN} \text{ RMS} = 129.491122 \text{ V}$$

$$I_R \text{ RMS} = 0.48294651 \text{ A}$$

$$V_{TN} \text{ RMS} = 130.478701 \text{ V}$$

$$I_T \text{ RMS} = 0.6644764 \text{ A}$$

Ahora solo quedaría ubicarlas en la primera fila de la tabla 4.29 de resultados finales del ensayo de vacío.

Para completar toda la tabla 4.29, realice el ensayo para los 11 niveles restantes de voltaje.

**TABLA RESULTANTE PRODUCTO DE ENSAYAR TODOS LOS NIVELES DE
VOLTAJES ELEGIDOS PARA EL ENSAYO DE VACIO.**

		<i>VOLTAJE DE VACIO</i>			<i>CORRIENTE DE VACIO DE LINEA</i>			<i>POTENCIA</i>
		<i>LINEA A NEUTRO</i>						
<i>VLL</i>	<i>VLL</i>	$V_{SN} (V)$	$V_{RN} (V)$	$V_{TN} (V)$	$I_S (A)$	$I_R (A)$	$I_T (A)$	$P_{3\phi}$
<i>TEORICO</i>	<i>TEORICO</i>							
230.00	132.790562	134.574042	129.491122	130.478701	0.685997	0.482947	0.664476	70.201481
210.00	121.243557	123.642655	119.724787	118.975254	0.618655	0.393981	0.588397	53.298370
190.00	109.696551	110.900244	108.458105	105.903287	0.557659	0.371405	0.477497	48.442074
170.00	98.149546	102.971889	96.513032	98.699944	0.489833	0.301982	0.501837	43.745778
150.00	86.602540	89.467009	85.709530	85.652470	0.440452	0.252236	0.421190	37.018667
130.00	75.055535	78.297943	74.472631	73.289886	0.393358	0.222503	0.348406	31.170370
110.00	63.508530	67.413227	62.106241	63.587016	0.358862	0.178527	0.308228	26.668444
90.00	51.961524	56.035703	51.372760	54.339127	0.286577	0.155492	0.271843	22.570667
70.00	40.414519	44.593638	39.238429	42.031147	0.301746	0.109982	0.262053	20.070519
50.00	28.867513	31.807290	27.258253	29.978593	0.298595	0.157311	0.239793	17.703111
30.00	17.320508	21.523458	16.232873	18.316828	0.496272	0.247857	0.381771	20.148741
20.00	11.547005	14.794060	9.102977	10.958958	0.502785	0.300187	0.365645	12.610963

Tabla 4.29 Resultados finales de todas las mediciones obtenidas del ensayo de vacío.

4.13 Práctica de laboratorio para la prueba a rotor bloqueado modelo a baja frecuencia.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



TRABAJO DE GRADUACION

“DETERMINACION DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELECTRICOS APLICANDO METODOS INDIRECTO”

DIRECTOR EIE: Ing. Werner David Meléndez Valle

ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACION: Msc. Ing. Luis Roberto Chevez

COORDINADOR DE LABORATORIO: Br. Diego Alberto Escobar Marín

PRACTICA ELABORADA POR:

Br. Edwin José Alemán Cruz

Br. Cristian Daniel Rodríguez Gómez

Br. Yuri Abigail Cruz Moreno

PRACTICA DE LABORATORIO 3: PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO A 21.8 Hz MODELO A BAJA FRECUENCIA PARA MOTOR 3 ϕ DE INDUCCION.

OBJETIVOS:

- ✚ Obtener a través de la prueba experimental la resistencia rotorica R_2 .
 - ✚ Obtener a través de la prueba experimental la reactancia del estator X_1 y la reactancia del rotor X_2 .
-

UTILIDAD DE LA PRACTICA: Esta ensayo es de rutina y es considerada una prueba destructiva, es complementaria a la prueba DC, y VACIO, ya que sin ella no sería posible definir por completo el circuito equivalente del motor de inducción, la prueba de rotor bloqueado es útil para determinar los valores de las reactancias del estator X_1 y roto X_2 , también es útil para calcular el valor de la resistencia rotorica R_2 , esta prueba se realiza para dos modelos diferentes, y dependiendo el modelo va a requerir desarrollar el ensayo a diferente frecuencia de prueba.

MODELO A PLENA FRECUENCIA.

Este modelo es **útil cuando se quiere estudiar la corriente de arranque de la máquina**, para esto se debe plantear y su vez dar solución al circuito equivalente, pero con las reactancias X_1 , X_2 y la resistencia R_2 encontradas a partir de una prueba a rotor bloqueado a plena frecuencia (60Hz), es decir encontradas al valor de la frecuencia nominal de la placa característica del motor.

Cuando los valores de las reactancias X_1 , X_2 y la resistencia R_2 son obtenidos a frecuencia nominal 60Hz, estos valores son válidos únicamente para el arranque, en general cuando los motores experimentan el arranque sucede que la frecuencia del rotor es igual a la del estator, en ese sentido si son iguales coincide con la frecuencia de la prueba, generalmente 60Hz:

En el arranque:

$$f_{estator} = f_{rotor} = f_{prueba}$$

$$f_{prueba} = 60Hz:$$

$$f_{estator} = f_{rotor} = 60Hz$$

Entonces de una prueba a rotor bloqueado a frecuencia nominal las reactancias resultan menores a los valores cuando el motor opera en el rango de operación normal, estos efectos son debidos a la alta frecuencia de la corriente que circula por el rotor.

MODELO A BAJA FRECUENCIA.

Este modelo es **útil cuando se quiere estudiar la eficiencia de la máquina**, para estudiar el desempeño del motor de inducción queda totalmente descartado analizar el modelo de plena frecuencia, debido a la corriente de alta frecuencia que experimenta el rotor.

Después del arranque los motores alcanzan el rango de normal de operación, entonces en esa condición el deslizamiento de la mayoría de motores es tan solo del 2 a 4% y la frecuencia de la corriente circulante del rotor está en el rango de 1 a 3Hz, en resumen, la frecuencia del estator es diferente a la del rotor, es decir la del estator coincide con la red eléctrica de alimentación 60Hz, y la del rotor es pequeña en el rango de (1-3) Hz.

En operación normal:

$$f_{estator} \neq f_{rotor}$$

$$f_{estator} = 60\text{Hz:}$$

$$f_{rotor} = (1 - 3)\text{Hz:}$$

$$60\text{Hz} \neq (1 - 3)\text{Hz}$$

Entonces para estudiar la eficiencia solo puede hacerse bajo esas condiciones, NO EN EL ARRANQUE ya que se dicho que en el arranque las frecuencias son iguales, y coinciden con la frecuencia de la red eléctrica y esta no reúne las condiciones ni simula la operación normal del motor.

La solución ha sido propuesta en la norma **IEEE Std 112 - 1996 titulada "Procedimiento de prueba estándar para motores y generadores de inducción polifásicos"** la cual recomienda que la prueba a rotor bloqueado se realice a una corriente trifásica nominal, y a una frecuencia que se encuentre al 25% de la frecuencia nominal de la placa características, es decir a 15 Hz para obtener los valores correctos de la resistencia del rotor R_2 y las reactancias X_1 , X_2 en condiciones de operación normal, luego se podrá plantear y dar solución al circuito equivalente.

Es importante diferenciar los modelos, y la utilidad que cada uno de ellos tiene, porque tienen enfoques distintos, y cada uno está orientado a un interés de estudio particular que se tenga, la frecuencia errónea del rotor solo va provocar que la prueba produzca resultados errados.

DESCRIPCION GENERAL DEL ENSAYO.

El ensayo consiste en alimentar al estator del motor de inducción por medio de una fuente trifásica de voltaje y frecuencia variable, la cual se debe variar hasta que por el bobinado del estator fluya la corriente nominal del motor, pero hay garantizar las siguientes condiciones:

La velocidad tiene que ser cero durante toda la ejecución de la prueba, lo que implica que el deslizamiento de la máquina sea unitario:

$$n = 0, S = 1$$

En resumen, se va energizar el motor, pero no se le va dejar girar al eje, entonces para evitar el giro habrá que bloquearlo por algún mecanismo, hay diferentes maneras de bloquear el eje del motor, existen una variedad de tipos de frenos para solventar este requerimiento de la prueba:

- ✓ Frenos magnéticos.
- ✓ Frenos mecánicos hidráulicos.
- ✓ Electrofrenos
- ✓ Frenos metalúrgicos.

Todos son útiles, pero la elección de este dependerá del torque mecánico, capacidad del motor, y del coste económico, por ejemplo, los frenos metalúrgicos generalmente son piezas simples fabricadas a base de elementos metálicos son económicos comparados con los magnéticos e hidráulicos, entonces una vez escogido el freno más adecuado, La prueba inicia con cero voltios de alimentación luego se incrementa lentamente de tal manera de que por el estator circule la corriente nominal, alcanzada la corriente nominal se debe tomar las mediciones de voltaje línea a neutro, corriente de línea, potencia trifásica.

Esquema eléctrico básico

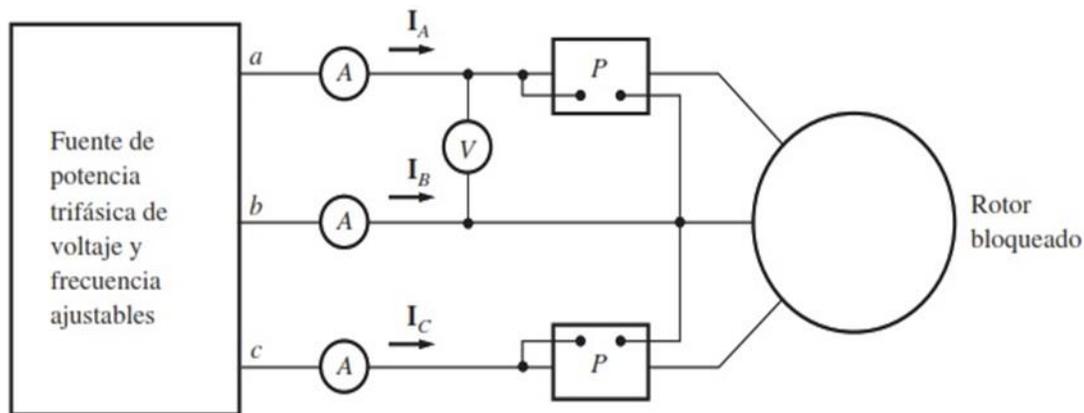


Figura 4.85 Esquema eléctrico para el ensayo a rotor bloqueado.

PROCEDIMIENTO DE LA PRACTICA.

Como se puede observar en el esquema eléctrico mostrado en la figura 4.85 para desarrollar la prueba se necesita de una fuente trifásica de voltaje y frecuencia variable, entonces para desarrollar este ensayo es requerido el uso de la maquina universal de pruebas Hampden, configurada como fuente de generación aislada de voltaje a baja frecuencia utilizando la unidad moto-generadora.

La máquina universal consta de un generador de corriente continua (Dinamo) acoplado mecánicamente a un motor universal.

Parámetros nominales régimen de motor universal.

- ✓ Voltaje nominal: 208/120V
- ✓ Corriente nominal: 8A
- ✓ Potencia nominal 1.5KVA
- ✓ # de polos: 2
- ✓ Rango de velocidad para los modos DC: (1800 – 2400) RPM
- ✓ Rango de velocidades para los modos AC: (2400 – 3600) RPM

Parámetros nominales régimen de máquina de corriente continua.

- ✓ Voltaje nominal: 120V
- ✓ Corriente nominal: 27A
- ✓ Potencia nominal: 3KW
- ✓ # de polos: 4
- ✓ Rango de velocidad: (2400 – 3600) RPM

Remítase a la sección 4.4 donde va encontrar la descripción de la maquina universal de pruebas Hampden con mayores detalles.

PROCESO DE MANIOBRA.

1. Antes de realizar el conexionado practico de la figura 4.86 por seguridad verificar que el breaker (protección principal de la MUH) este apagado.



Figura 4.86 Protección principal de la maquina universal de pruebas Hampden.

2. Verificar que el main AC de la maquina también se encuentre en la posición de APAGADO.

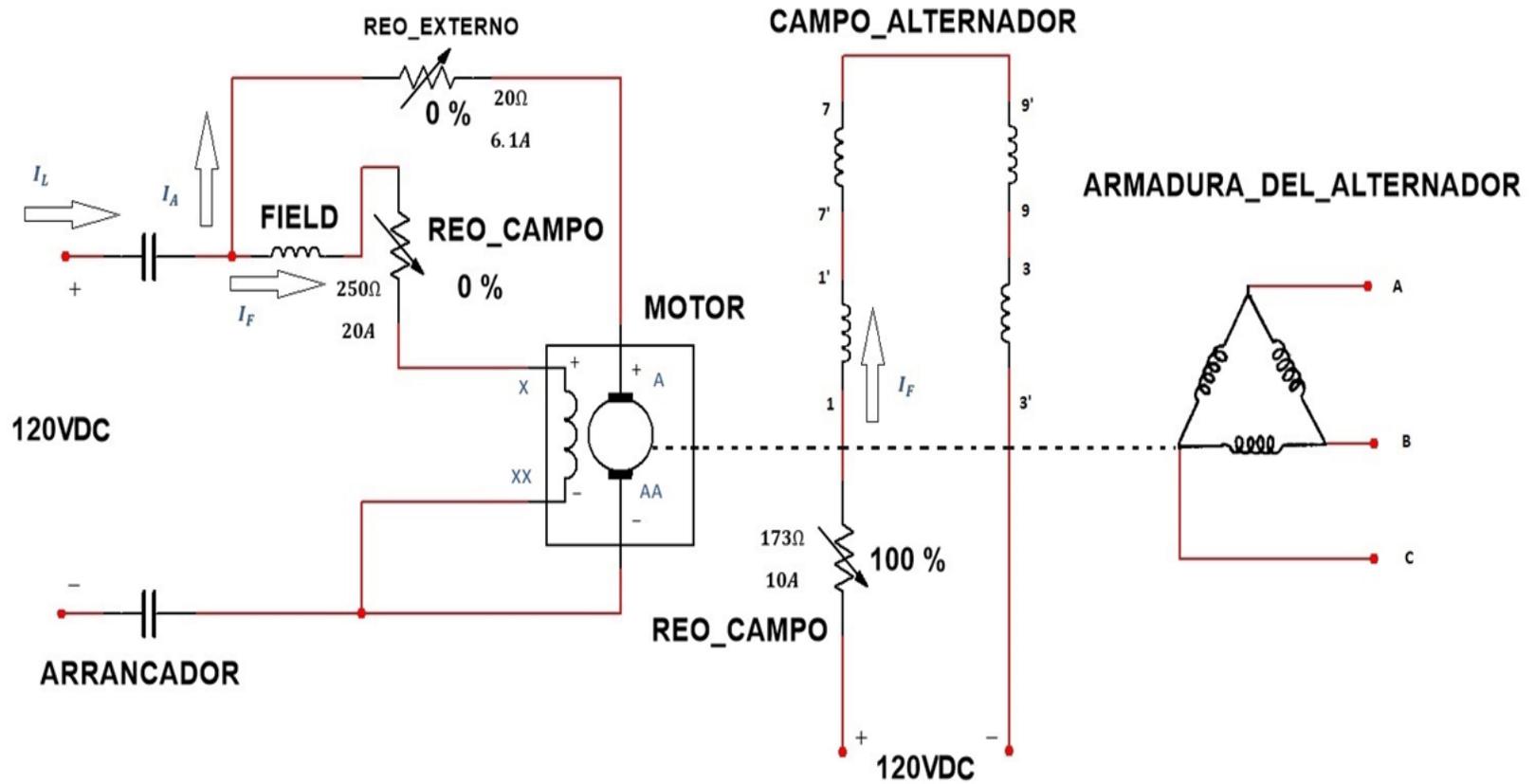
Verificada la ausencia de voltaje en la maquina universal de pruebas Hampden desarrollar el siguiente procedimiento de conexión.

PROCEDIMIENTO PARA EL CONEXIONADO.

Tome como guía el conexionado eléctrico mostrado en la figura 4.87

1. Conecte los terminales + y – de la fuente de 120VDC a los terminales LINEA de los contactores del ARRANCADOR DC.
2. Unir el terminal XX de la bobina de campo del motor DC al terminal AA de la bobina de armadura del motor DC.
3. Conectar el terminal – del contactor a la unión de las terminales XX y AA que se hizo en el paso anterior, se formara un nodo.
4. Conectar el terminal + del contactor a un extremo del reóstato externo de 20Ω , 6.1A, luego conecte el otro extremo del reóstato a la terminal A de la bobina de armadura del motor DC.
5. Conectar el terminal FIELD de la bobina de embalamiento a uno de los terminales del reóstato de campo de la dinamo de 250Ω , 20A, el otro terminal del reóstato conéctelo al terminal X de la bobina de campo del motor DC.

Figura 4.87 Diagrama eléctrico de la fuente de generación de voltaje utilizando la MUH



PROCEDIMIENTO PARA LA CONEXIÓN DEL MOTOR DC SHUNT POR CONTROL DE ARMADURA

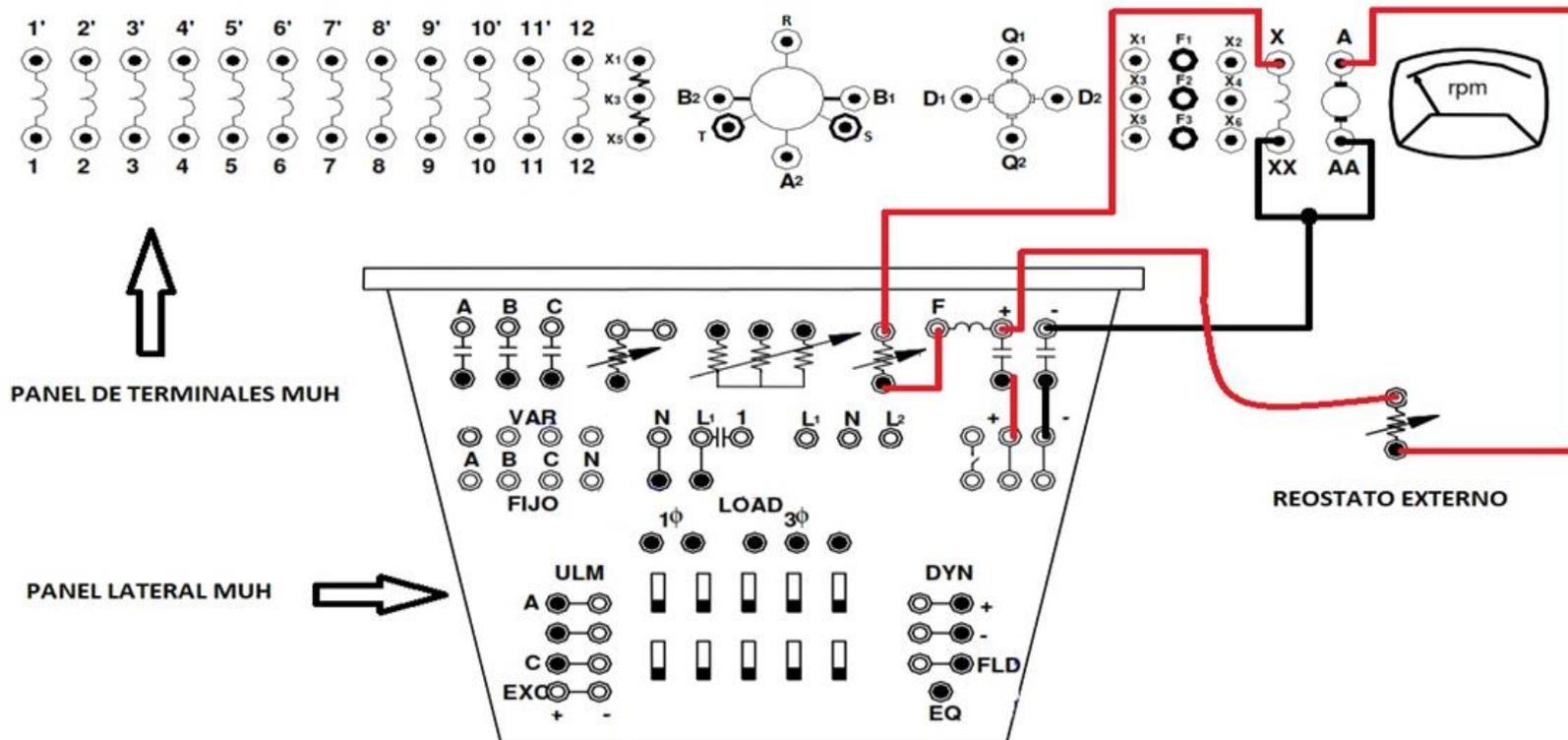


Figura 4.88 Esquema practico de las conexiones del motor DC shunt o paralelo utilizando la MUH.

1. Conecte el terminal + de la fuente 120VDC a uno de los extremos del reóstato de la maquina universal de 173Ω , 10A, el otro extremo del reóstato conéctelo en el terminal 1 de la bobina del estator del alternador.
2. Una las terminales de bobina del estator del alternador 1' con 7'
3. Una las terminales de bobina del estator del alternador 7 con 9'
4. Una las terminales de bobina del estator del alternador 9 con 3

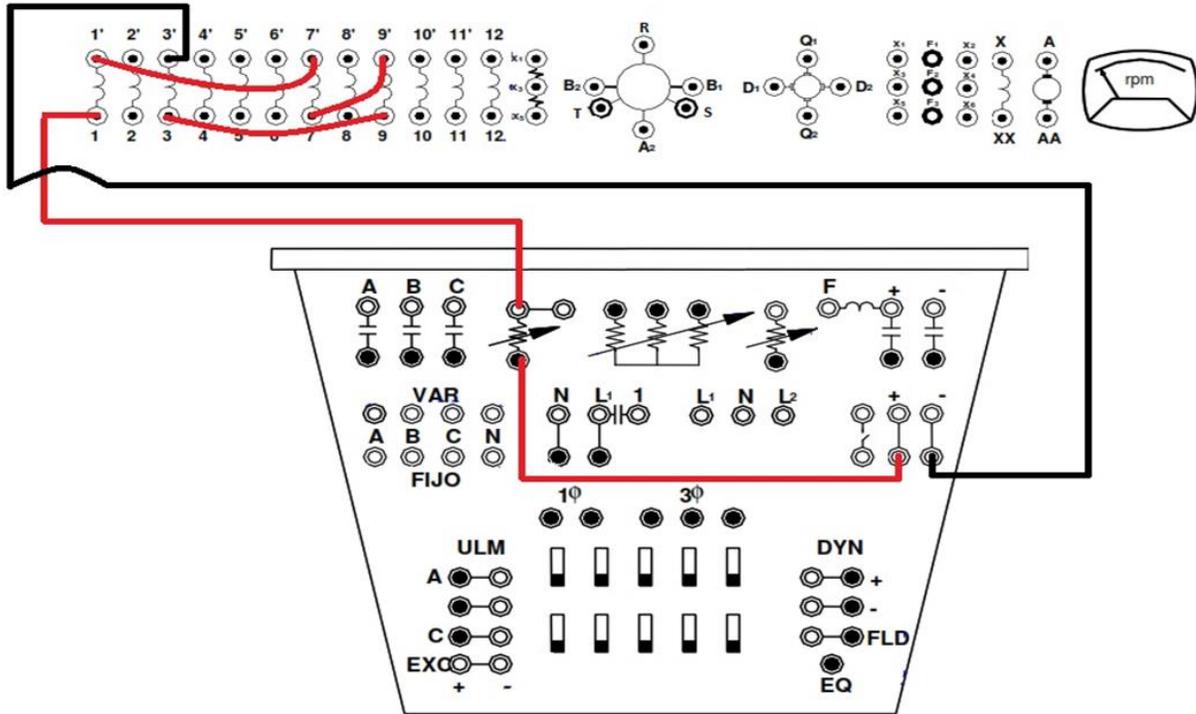


Figura 4.89 Esquema practico de las conexiones del alternador utilizando la MUH.

PROCEDIMIENTO PARA LA CONEXIÓN DE LA ARMADURA DEL ALTERNADOR HACIA EL MOTOR WEG W22 MODELO TE1BFOXO!

1. Conecte la línea de alimentación *R* al terminal *1L1* de la protección CNINT C10.
2. Conecte la línea de alimentación *S* al terminal *3L2* de la protección CNINT C10.
3. Conecte la línea de alimentación *T* al terminal *5L3* de la protección CNINT C10.
4. Conectar el terminal *2T1* de la protección CHINT C10 a las terminales *T₂T₈* del motor.
5. Conectar el terminal *4T2* de la protección CHINT C10 a las terminales *T₁T₇* del motor.
6. Conectar el terminal *6T3* de la protección CHINT C10 a las terminales *T₃T₉* del motor.

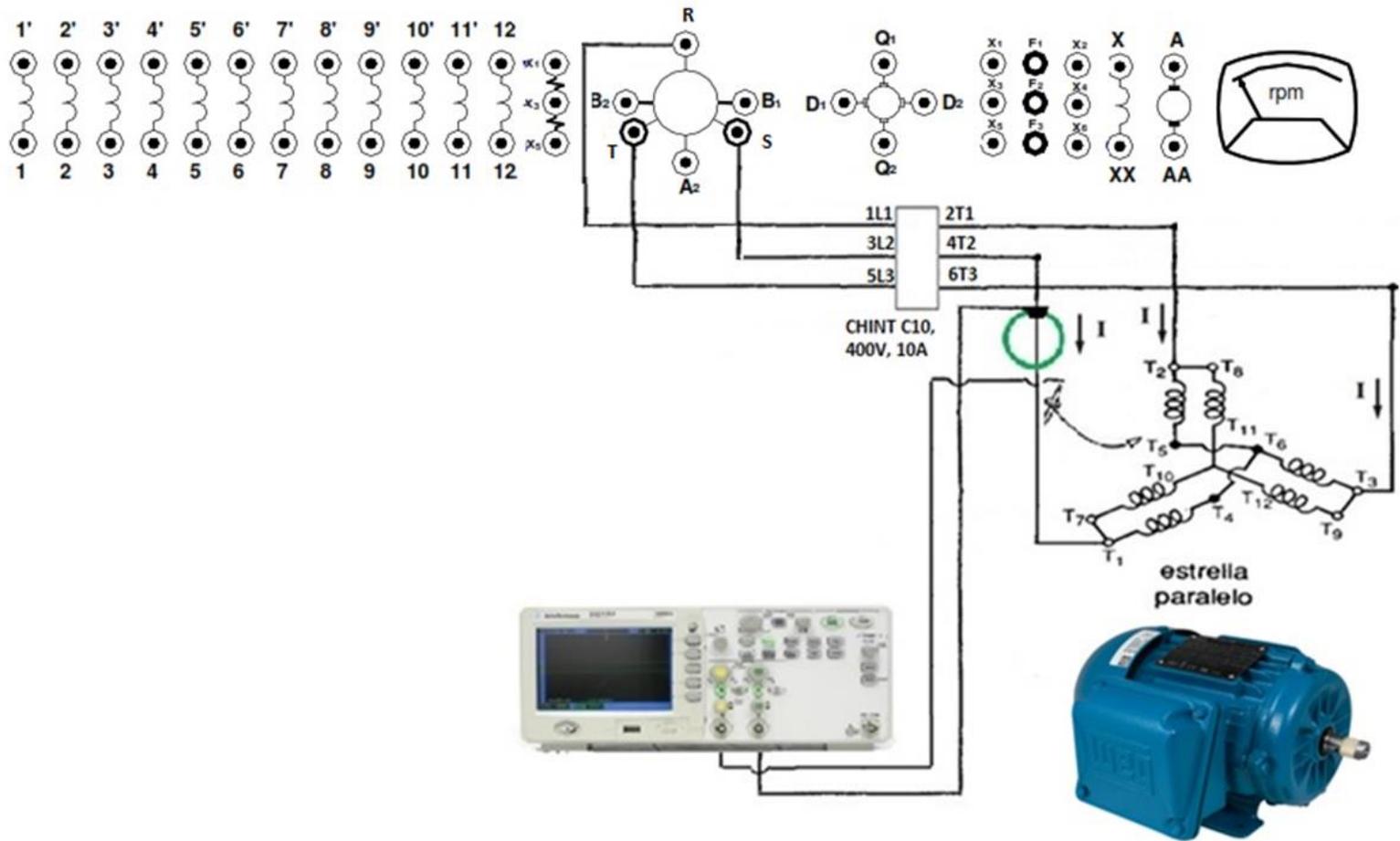


Figura 4.90 Esquema practico de las conexiones del motor hacia el alternador.

PROCEDIMIENTO PARA BLOQUEAR EL EJE DEL MOTOR.

1. Coloque primero el cuñero en la ranura que se ubica en el eje del motor.
2. Coloque el soporte de cuñero en el eje.
3. Con la ayuda de una llave #10 enrosque dos pernos para sujetar el soporte del cuñero a la base del motor.
4. Con la ayuda de una llave Allen coloque dos prisioneros (con esto ya se garantiza que el motor no va girar)

PROCESO DE MANIOBRA PARA AJUSTAR LA FRECUENCIA A 21.8 HZ

1. Colocar la protección CHINT C10 en la posición apagado.
2. Colocar el reóstato del dinamómetro en la posición de mínima resistencia.
3. Colocar el reóstato de la maquina universal en la posición de máxima resistencia (173Ω).
4. Colocar el reóstato externo ubicado en la armadura del motor en la posición de máxima resistencia (20Ω).
5. Colocar las escobillas en posición 4 UP.
6. Encender el breaker de protección principal que energiza el alimentador de la MUH.
7. Coloque el breaker (main AC) en la posición de encendido (Observara que la luz piloto se activa a color rojo, indicando que la MUH esta encendida y lista para operar)
8. Ahora proceda a colocar el breaker de la fuente 120VDC a la posición de encendido, (automáticamente podrá observar que la luz piloto se activa a color rojo, indicando que la fuente esta encendida y lista para suplir voltaje).
9. Junto a la fuente se encuentra el arrancador DC, coloque el breaker en la posición de encendió y presione el botón START (escuchara que los contactores hacen el enclavamiento).
10. Disminuya lentamente la perilla de regulación del reóstato externo recordar que estaba ubicada en máxima resistencia (20Ω) disminuya hasta que la caratula marque 7.7Ω (observara que a medida disminuye la resistencia el motor DC comenzara a moverse espere unos segundos mientras el sistema se estabiliza y estará listo para empezar con la toma de mediciones).

PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDICIONES EN LA FASE S.

EJECUTAR ESTA PROCESO LO MAS RAPIDO POSIBLE YA QUE SE CALINETAN LOS BOBINADOS.

1. Colocar la sonda de voltaje del osciloscopio para registrar el voltaje V_{SN} como se muestra en la figura 4.90
2. Colocar la sonda de corriente del osciloscopio para registrar la corriente de cortocircuito I_S como se muestra en la figura 4.90
3. Colocar 3 amperímetros FLUKE 115 para registrar los voltajes línea a línea V_{RS}, V_{ST}, V_{TR}
4. Colocar una pinza amperimétrica Klein Tools CL312 en la línea de alimentación S.
5. Colocar la protección CHINT C10 en la posición de encendido.
6. Gire la perilla del reóstato de la maquina universal, hasta leer en la pinza amperimétrica Klein Tools CL312 la corriente nominal del motor de 0.937A
7. Alcanzado la corriente nominal de 0.937A, anote las tres mediciones de los voltímetros y luego conecte un pendrive USB 2.0 en el puerto USB del osciloscopio, y vaya al modo adquisición de datos, guarde una imagen en formato PNG de la señal de voltaje y corriente que se muestra en la pantalla del osciloscopio, guarde con el nombre de **FASE S** también guarde un archivo de datos CSV con el mismo nombre de la imagen.
8. Capturados los archivos, rápidamente pulse el botón STOP del arrancador DC (el motor se apagará), apague el main principal de la MUH y regrese la perilla del reóstato de la maquina universal nuevamente su posición de máxima resistencia. (no toque el reóstato externo, ya que finalizada la primera medición se calentará, tampoco lo regrese a su posición inicial)
9. Apague la fuente 120VDC y regrese a la posición de apagado la protección del arrancador DC.
10. Apague el breaker del alimentador de la MUH.
11. Ponga la protección CHINT C10 en la posición de apagado.
12. Tome un lapso de tiempo de 20 minutos mientras el reóstato se enfría.

Solo faltaría extraer la información de las otras dos fases, por lo que repita el procedimiento de la toma de mediciones y aplíquelo a la FASE R y T, importante siempre dejar un lapso de 20 minutos por análisis de fase ya que el reóstato externo que controla la corriente de armadura del motor DC tiende a calentarse mucho.

Analizadas las 3 fases obtendrá en el pendrive 6 archivo CSV:

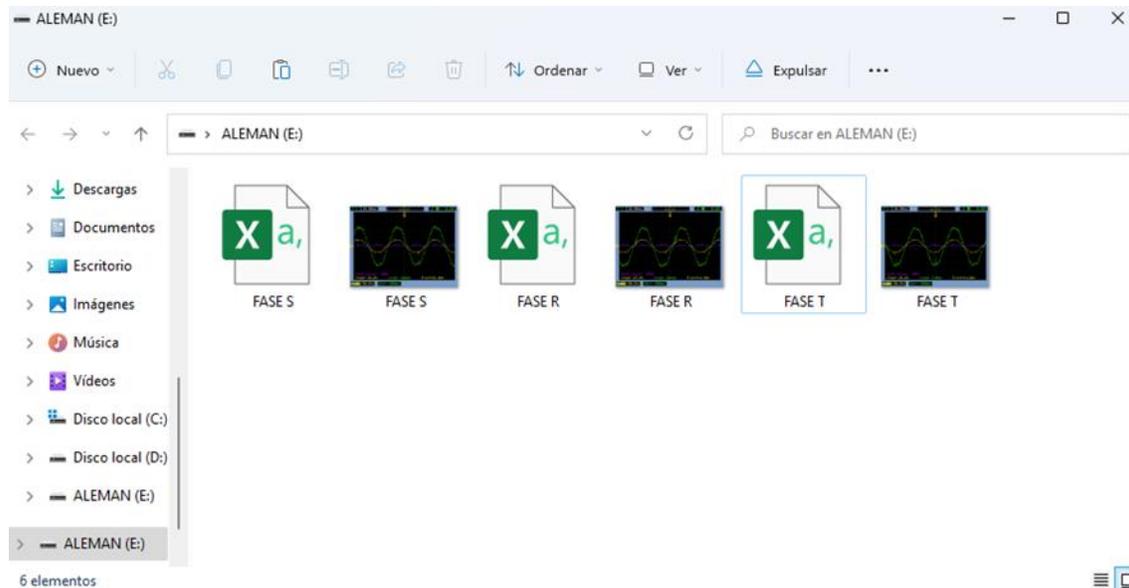


Figura 4.91 Archivos que debe obtener para el ensayo a rotor bloqueado.

A los 3 archivos CSV obtenidos de la prueba de rotor bloqueado a 21.8 Hz, habrá que analizarlos de forma similar a como se hizo con los archivos CSV obtenidos en el ensayo de vacío, remítase a la sección 4.11 y 4.12 para visualizar el procedimiento paso a paso que debe seguir para analizar las muestras.

Para analizar los archivos CSV, siempre se realizará para el tiempo de un periodo completo de la señal, pero para el caso la prueba de rotor bloqueado se desarrolló a 21.8Hz, por lo que el tiempo de duración de un periodo completo es totalmente diferente; al tiempo de duración de un periodo completo de la prueba de vacío, debido a que el ensayo de vacío se desarrolla a 60Hz.

Otra diferencia es que en vacío se analiza para diferentes niveles de voltajes de ensayo, en rotor bloqueado el análisis es únicamente para un solo valor de voltaje y es al que corresponde cuando la corriente nominal circula por el bobinado del estator.

➤ **Cálculo para el periodo T :**

La frecuencia f de la prueba a rotor bloqueado es:

$$f = 21.8 \text{ Hz}$$

El periodo entonces es:

$$T = \frac{1}{21.8 \text{ Hz}} = 0.046 \text{ segundos}$$

Por lo que el rango de valores a tomar de las muestras sería:

Desde un $t = 0$ hasta un $t = 0.046 s$

Finalizado el análisis de los archivos CSV, traslade los resultados a la siguiente tabla:

$V_{RN} (V)$	$V_{SN} (V)$	$V_{TN} (V)$	$I_R (A)$	$I_S (A)$	$I_T (A)$	$P_{3\phi} (W)$	$f (Hz)$

Tabla 4.30 Resultados de los análisis CSV.

HERRAMIENTAS Y EQUIPO NECESARIOS PARA DESARROLLAR EL PROCESO DE MANIOBRA.

- Motor trifásico de inducción (marca: WEG - W22, modelo: TE1BF0X0!)
- Maquina universal de pruebas Hampden (sistema motor-generator)
- Fuente 120VDC de la maquina universal de pruebas Hampden (variable desde 0 – 120VDC, 30A)
- Freno metalúrgico para bloquear el eje del motor.
- 1 reóstato externo 20Ω , 6.1A
- 3 multímetros FLUKE 115
- 1 pinza amperimétrica Klein tolos CL312
- 1 osciloscopio Agilent Technologies DS01012A
- 1 sonda de corriente FR100RA para osciloscopio
- 4 cables de conexión banana – hembra
- 5 cables de conexión banana – gancho
- 1 cable de conexión hembra – gancho
- 4 cables de conexión gancho - gancho
- 3 cables de conexión terminal de argolla – cable desnudo
- Autómato CHINT C10, 400V, 10A (para proteger el bobinado de armadura del alternador)
- Cinta aislante
- Tenaza
- Destornillador plano

OBSERVACIONES.

Si se desea realizar la prueba de rotor bloqueado a motores de mayor capacidad, tomar en consideración que la MUH, que la prueba demanda corriente plena, por lo que el sistema tiene las siguientes limitantes:

- ❖ La fuente DC es capaz de entregar una corriente máxima de 30A.
- ❖ Como el método de control de velocidad del motor DC, es por reóstato externo en armadura, la limitante viene impuesta por el reóstato externo, el que está disponible para la práctica tiene una capacidad de 6.1A, para ensayar el motor de 1/4 HP fue suficiente ya que la corriente que se midió en la armadura fue 6.5A, apenas 0.4A superior a la que el reóstato soporta, como los reóstato son dispositivos de control de potencia pueden soportarlo, pero para el caso de ensayar un motor de mayor capacidad provocara que por la armadura del motor circulo una corriente mayor a la que soporta el reóstato, por lo que tendría que sustituirlo por uno de mayor capacidad de corriente.
- ❖ La otra limitante es que el alternador puede entregar 8A nominales por fase en el bobinado de armadura.

RECOMENDACIONES.

- ❖ Se recomienda trabajar todos los archivos CSV en mismo archivo de EXCEL y separar en distintas hojas de trabajo los análisis de cada nivel de tensión ensayado, para mantener un orden conciso en los análisis y evitar confusiones.
- ❖ Manipule el reóstato externo con cuidado, considere que experimenta altas temperaturas durante la prueba, recomendado utilizar guantes de protección para evitar quemaduras.

4.14 Desarrollo de la práctica de laboratorio de la prueba a rotor bloqueado a 21.8Hz.

MOTOR TRIFASICO A ENSAYAR:

MARCA: WEG - W22

MODELO: TE1BF0X0! (Ver sección XXX para verificar sus parámetros nominales de placa)

INFORMACION IMPORTANTE A CONSIDERAR DE LA PLACA DE DATOS DEL MOTOR PARA DESARROLLAR LA PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO.

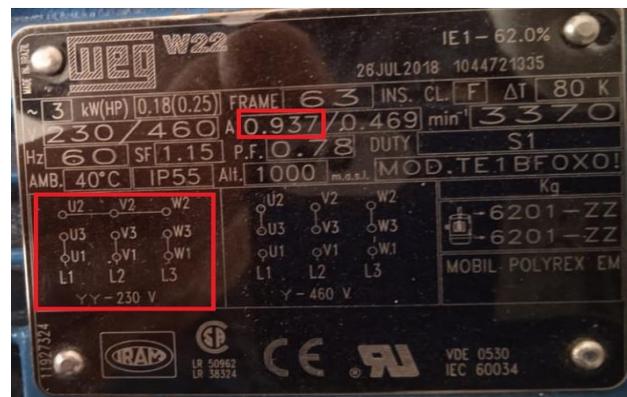
Marca: WEG W22

Modelo: TE1BF0X0!

Tipo de conexión: Y – Y paralelo

$I_{nominal} = 0.937 \text{ A}$

Terminales: Motor de 9 terminales.



SISTEMA MOTOR-GENERADOR DE LA MAQUINA UNIVERSAL DE PRUEBAS HAMPDEN.

La máquina universal de pruebas (MUH) está formada por dos máquinas eléctricas rotativas, un generador de corriente continua acoplado mecánicamente a un motor universal ver figura 4.92, estas máquinas eléctricas obedecen al principio de reciprocidad, y es por esto que pueden trabajar tanto en el régimen de motor como de generador.



Figura 4.92 motor universal (figura de la izquierda), muñón de acoplamiento y conexiones eléctricas (figura al medio), Generador de corriente continua (figura de la derecha).

El motor universal puede funcionar:

- ✓ Motor trifásico, bifásico, monofásico asíncrono, motor DC.
- ✓ Generador de corriente alterna (alternador).

El generador de corriente continua (Dinamo) puede funcionar:

- ✓ Generador de excitación independiente.
- ✓ Motor DC shunt con control de velocidad por corriente de campo.

Para seleccionar el modo de funcionamiento, la máquina trae una palanca con un mecanismo de elevación a 3 posiciones de las escobillas:



Figura 4.93 Control para seleccionar el modo de funcionamiento.

4UP:

Todas las escobillas levantadas, para cuando la MUH funciona como máquina de inducción o síncrona.

2 DOWN:

Se utilizan las escobillas Q1 y Q2 para el funcionamiento de máquinas de corriente continua.

4 DOWN:

Todas las escobillas abajo, para el funcionamiento de máquinas de campo cruzado.

Los parámetros nominales de cada una de las maquinas del sistema son los siguientes:

Parámetros nominales del motor universal:

- ✓ Voltaje nominal: 208/120V
- ✓ Corriente nominal: 8A
- ✓ Potencia nominal 1.5KVA
- ✓ # de polos: 2
- ✓ Rango de velocidad para los modos DC: (1800 – 2400) RPM
- ✓ Rango de velocidades para los modos AC: (2400 – 3600) RPM

Parámetros nominales del generador de corriente continua:

- ✓ Voltaje nominal: 120V
- ✓ Corriente nominal: 27A
- ✓ Potencia nominal: 3KW
- ✓ # de polos: 4
- ✓ Rango de velocidad: (2400 – 3600) RPM

Lo que se busca es la posibilidad de usar el sistema moto-generador de la MUH para hacer con esta una fuente de generación propia, y exclusiva para desarrollar la prueba de rotor bloqueado a motores trifásicos, y a su vez aplicar la recomendación de la norma IEEE112, El cual sugiere que la prueba de rotor bloqueado se realice a una corriente trifásica nominal, y a una frecuencia que se encuentre al 25% de la frecuencia nominal de la placa características, es decir a **15 Hz** para obtener los valores correctos de la resistencia del rotor R_2 y las reactancias X_1 , X_2 en condiciones de operación normal.

Se necesita de una fuente trifásica de voltaje y frecuencia variable, entonces el enfoque que lleva el desarrollo de esta sección es a utilizar un motor y que este accione mecánicamente el eje de un generador y de esta manera poder generar la energía necesaria para poder desarrollar la prueba.

Para generar voltaje de baja frecuencia a 15Hz, como el alternador de la MUH es de 2 polos se puede calcular la velocidad.

➤ **Cálculo de la velocidad.**

$$n = \frac{120f}{\# \text{ polos}} = \frac{120 \times 15}{2} = 900 \text{ RPM}$$

La interpretación es que el primotor debe entregarle al eje del alternador 900 RPM.

En ese sentido, conocidos los parámetros nominales de las maquinas, las diferentes funciones de cada una de ellas, además de cómo seleccionar la función por medio de las escobillas, finalmente se escogió como **primotor la dinamo en el régimen de motor DC en la configuración shunt.**

La dificultad a este punto es como controlar el motor DC para poder establecer la velocidad apropiada para la generación, el motor de corriente continua se consideró como la mejor opción ya que es una maquina versátil por su fácil control del par y velocidad, tiene una variedad de formas para poder controlar, pero las formas de control se interpretan mejor con la ecuación que relaciona la velocidad con el par:

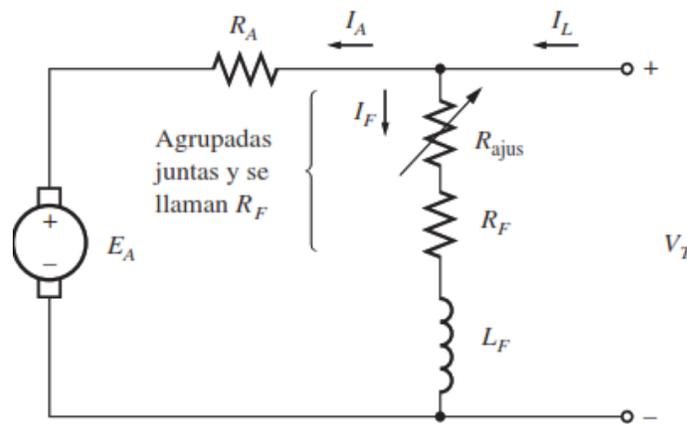


Figura 4.94 Circuito equivalente del motor DC paralelo.

ECUACIONES:

$$E_A = K\phi\omega \quad (4.1)$$

$$\tau_{ind} = k\phi I_A \quad (4.2)$$

Despejando I_A de ecuación 4.2:

$$I_A = \frac{\tau_{ind}}{k\phi} \quad (4.3)$$

Por ley de voltaje de Kirchhoff:

$$V_T = E_A + R_A I_A \quad (4.4)$$

La bobina en DC se comporta como cortocircuito, no se toma en consideración.

Corriente de campo:

$$I_f = \frac{V_T}{R_f} \quad (4.5)$$

Corriente de línea:

$$I_L = I_f + I_A \quad (4.6)$$

Sustituyendo ecuaciones 4.1 y 4.3 en ecuación 4.4:

$$V_T = k\phi\omega + R_A \left(\frac{\tau_{ind}}{k\phi} \right)$$

Dividiendo entre $k\phi$:

$$\frac{V_T}{K\phi} = \frac{k\phi\omega}{k\phi} = \frac{R_A \left(\frac{\tau_{ind}}{k\phi} \right)}{K\phi}$$

$$\frac{V_T}{K\phi} = \omega + \frac{R_A(\tau_{ind})}{K\phi^2}$$

Ecuación resultante que relaciona la velocidad y el par:

$$\omega = \frac{V_T}{k\phi} - \frac{R_A}{K\phi^2} \times \tau_{ind} \quad (4.7)$$

Con la ecuación 4.7 obtenida se puede observar lo sencillo que es el control de velocidad de la máquina, la alimentación V_T es fija, la resistencia de armadura R_A también es fija, k es una constante, por lo que si se varía el flujo magnético también variaría la velocidad ω de la máquina ya que son inversamente proporcionales.

Para variar el flujo magnético basta con controlar la corriente I_f que circula por la bobina de campo del motor, para lograrlo regularmente se conectan resistores variables de potencia (reóstatos) en serie con el resistor R_f para cambiar la resistencia y así tener control sobre la corriente de excitación.

MEDICIONES DE LAS BOBINAS DEL MOTOR, Y REOSTATO UTILIZANDO EL RCL METER MODELO PM6303:



Figura 4.95 Medición de la inductancia del bobinado de campo del motor DC con el RCL meter.

$$L_f = 3H$$

$$R_f = 133.2\Omega$$

$$R_A = 4\Omega$$

Resistencia minima del reostato del motor: $REO_CAMPO = 11.4\Omega$

Resistencia maxima del reostato del motor: $REO_CAMPO = 252.7\Omega$

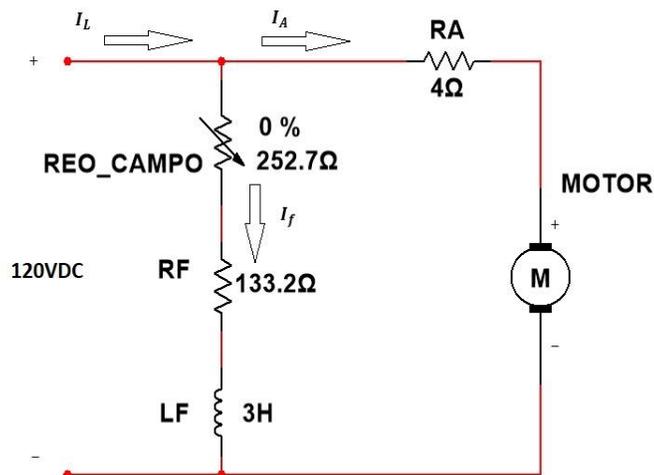


Figura 4.96 Circuito equivalente del motor DC paralelo con todos los parámetros medidos.

MOTOR SHUNT CON CONTROL DE VELOCIDAD POR CORRIENTE CAMPO.

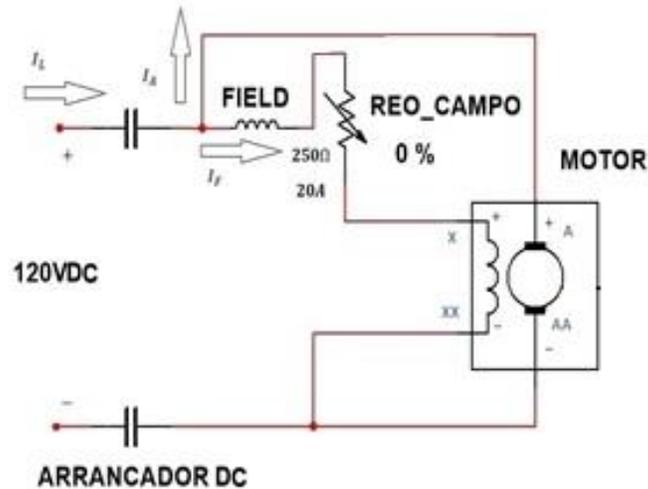


Figura 4.97 Diagrama de conexiones eléctricas para configurar el motor DC shunt de control de velocidad por corriente de campo en la MUH.

Vale la pena recalcar que la bobina que aparece en el diagrama de la figura 4.97 nombrada FIELD es parte del arrancador automático DC y siempre se debe de conectar en serie con el reóstato de campo ya que funciona como protección, se encarga de desactivar la maquina MUH de forma automática en el caso de que el circuito de campo habrá de forma accidental, es decir la maquina interpreta el desbocamiento, la MUH tiene una red de diodos y resistencias que energizan un relé que permanece activo, cuando detecta que la corriente de campo está en los rangos seguros, como el arrancador DC se puede usar tanto con la dinamo o motor el relé responde a los siguientes rangos definidos:

- Los rangos seguros de corrientes de campo I_f para la dinamo van de 0.2A a 1A.
- El otro rango corresponde cuando la maquina universal funciona como motor DC comprendidos desde los 2.6A A 10A.

Si se activa el arrancador con el reóstato de campo del motor en la mínima resistencia producirá que la resistencia en derivación limite la corriente al valor máximo seguro de 0.9A esto ara funcionar al dinamómetro aproximadamente a 2300RPM.

MONTAJE DEL MOTOR SHUNT CON CONTROL DE VELOCIDAD POR CORRIENTE DE CAMPO.

Se desarrollaron todas las conexiones de la figura 4.97 en la maquina universal de pruebas Hampden luego se puso en marcha al motor DC con el reóstato de campo (REO_CAMPO) en la resistencia mínima (11.4Ω), en este caso el motor servirá como primotor de accionamiento mecánico del alternador. El montaje es el mostrado en la figura 4.98



Figura 4.98 Montaje práctico del motor DC shunt con control de velocidad por corriente de campo.

Con el motor en marcha y en vacío (sin carga en el alternador) se comenzó a variar lentamente la perilla del reóstato hasta alcanzar su máxima resistencia (252.7Ω), se hicieron las siguientes mediciones:

I_L (A)	I_A (A)	I_F (A)	V_A (V)	V_C (V)	VELOCIDAD (RPM)
6.8	6.5	0.856	125.4	122.2	2150
6.8	6	0.708	125.1	102.3	2298
6.7	6.1	0.603	124.8	87.4	2413
6.9	6.1	0.505	124.6	73.3	2551
7.3	6.5	0.407	124.4	59.2	2786
7.4	6.7	0.33	125.3	49.96	3033

Tabla 4.31 Mediciones realizadas al motor DC shunt.

A medida se aumenta la resistencia del reóstato disminuye la corriente de campo I_f , lo que provoca una disminución del flujo magnético ϕ hacia la armadura, al haber una disminución en el flujo

aumenta la velocidad de la maquina esto es porque el flujo magnético es inversamente proporcional a la velocidad, ya que se observó que la maquina fue adquiriendo velocidad poco a poco desde los 2150 RPM hasta los 3033 RPM esto se aprecia mejor en la tabla 4.31.

Además se puede observar que no se alcanzó la velocidad nominal 3600 RPM, para alcanzarla se tiene que activar el interruptor del reóstato auxiliar de 100Ω que se encuentra ubicado arriba de la perilla de control del reóstato de campo de la dinamo, esto ara que el reóstato alcance una resistencia total de 307.2Ω , provocara que cuando se varie su resistencia la corriente de campo alcance su nivel mínimo de $0.25A$ de tal manera que el motor funcionara a 3600 RPM, esto no se hizo en la práctica por la antigüedad de la máquina, falta de uso, y de mantenimientos se consideró no llevar la maquina a su velocidad nominal.

Esta configuración no resultó útil debido a que el control solo permite variar la velocidad por arriba de la velocidad base, es decir al arrancar el motor con reóstato de campo al mínimo y a los segundos de haberse estabilizado queda operando a una velocidad 2150 RPM de acuerdo a las mediciones de la tabla 4.28.

La frecuencia seria:

$$f = \frac{n \times \# \text{ polos}}{120} = \frac{2150 \times 2}{120} = 35.8 \text{ Hz}$$

Todavía está muy por arriba de los 15Hz que recomienda la norma IEEE112 para desarrollar la prueba de rotor bloqueado, por esta razón queda descartado el método por control de corriente de campo.

MOTOR SHUNT CON CONTROL DE VELOCIDAD POR RESISTENCIA EN SERIE CON LA ARMADURA.

De acuerdo a la ecuación 4.10 otra manera de controlar la velocidad del motor es mantener el flujo magnético constante, y controlar la maquina por medio de insertar un reóstato externo en serie a la resistencia de armadura R_A de 4Ω .

De acuerdo a la ecuación 4.10 otra manera de controlar la velocidad del motor es mantener el flujo magnético constante, y controlar la maquina por medio de insertar un reóstato externo en serie a la resistencia de armadura R_A de 4Ω .

$$I_A = \frac{V_T}{R_A + R_1 + R_2 \dots \dots \dots} \quad (4.11)$$

En este tipo de control de velocidad, el arranque de la maquina tiene que ser con el reóstato en resistencia máxima para limitar la corriente de armadura I_A .

El esquema eléctrico para las conexiones en la maquina universal de pruebas es el mostrado en la figura 4.99.

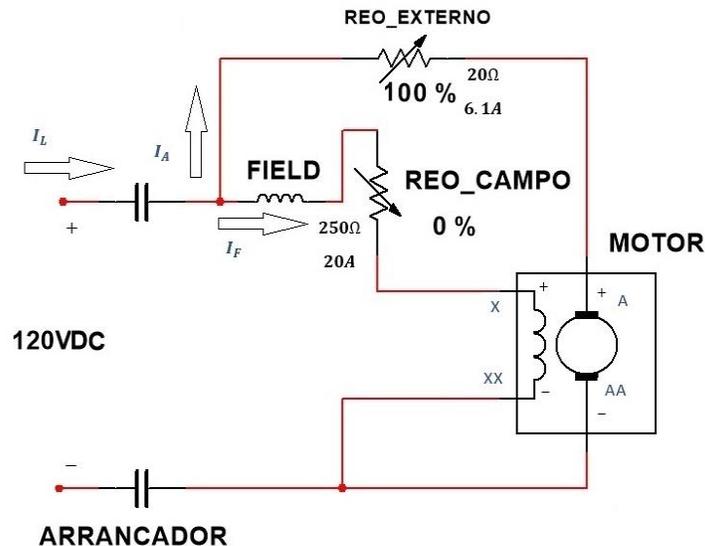


Figura 4.99 Diagrama de conexiones eléctricas para configurar el motor DC shunt de control de velocidad por reóstato de armadura en la MUH.

La máquina universal de pruebas tiene solo dos reóstatos, uno regula la corriente de campo del motor, el otro regula la corriente de excitación del alternador, pero para emplear el control de velocidad por armadura se necesita el uso de un tercer reóstato y este será externo a la MUH, por lo que nuevamente se investigó los recursos disponibles en el laboratorio, y se encontró un reóstato de la marca OHMITE con especificaciones nominales de 20Ω, 6.1A el cual es mostrado en la figura 4.100, El reóstato esta funcional y en perfectas condiciones pero se encontró sin su perilla de porcelana, ni base de apoyo, tampoco se encontraron sus pernos, por lo que se fijó a un trozo de madera para apoyarlo y mantenerlo fijo durante la manipulación, para su regulación por seguridad se utilizó guantes de protección.



Figura 4.100 Reóstato marca OHMITE de 20Ω disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE-UES.

Se procedió a realizar las conexiones del diagrama de 4.99, manteniendo siempre el reóstato de campo al mínimo para mantener el flujo constante, pero con el reóstato externo en la máxima resistencia $20\ \Omega$, y al presionar el START del arrancador DC el motor no giro, debido a que la corriente de armadura ha sido limitada, a medida se fue disminuyendo la resistencia del reóstato, el motor comenzó a tomar velocidad partiendo del reposo hasta alcanzar las 2150 RPM (velocidad base) por lo que se ha conseguido experimentar el comportamiento normal de la maquina cuando el control se ubica en la armadura.

Este método tiene algunas ventajas, desventajas y es importante tomarlas en cuenta.

- ✓ Los reóstatos son de pocos ohmios y de alta potencia, por uso genera un gran calentamiento por lo que deben estar muy ventilados.
- ✓ Al colocar un resistor en serie se pierde potencia en el eje de la máquina.
- ✓ La velocidad del motor puede ser bastante influenciada por la corriente que demande la carga.
- ✓ Si se utilizan resistores de potencia la conmutación puede hacerse por medio de tiempo o por medio de sensores.
- ✓ El arranque por medio de tiempo puede ser impreciso y depende de la carga conectada al eje del motor en el momento del arranque.

Este método de control de velocidad si resulta útil, ya que se está interesado en una velocidad de 900 RPM, con este último método de control si es posible establecer velocidades bajas para el motor, se pueden configurar cualquier velocidad por debajo de la velocidad base 2150 RPM.

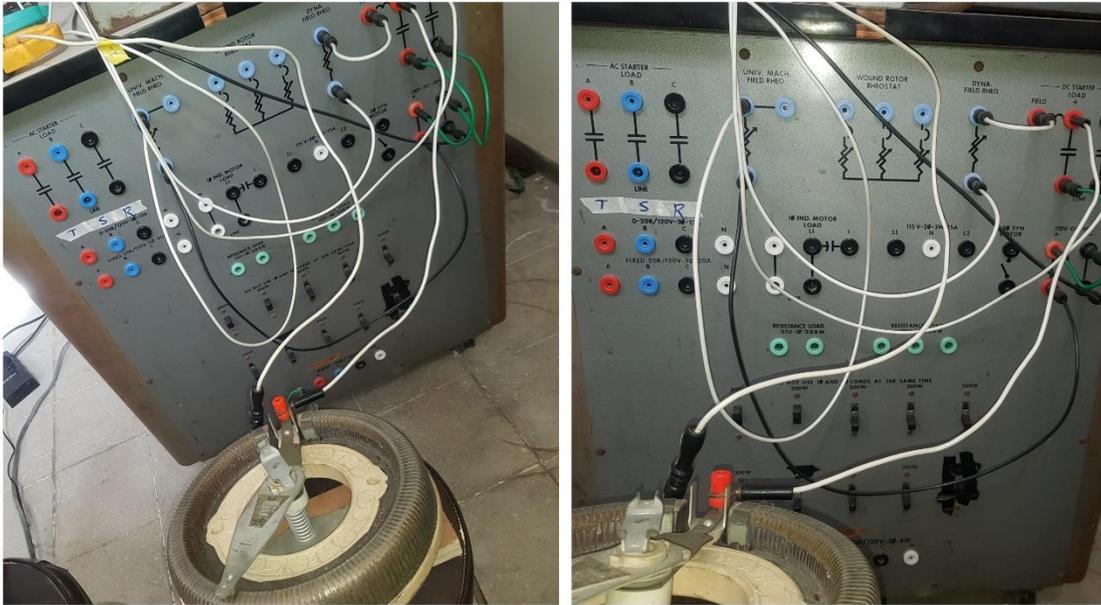


Figura 4.101 Montaje práctico del motor DC shunt de control de velocidad por réostato de armadura.

MOTOR UNIVERSAL COMO ALTERNADOR.

El estator del motor universal este compuesto por 12 bobinas que llegan directamente al panel de terminales, cada bobina tiene un par de conectores, lo que da un total de 24 conectores, permitiendo la interconexión entre bobinas.

Es importante diferenciar que cuando el motor universal funciona en los modos de corriente alterna, se puede conectar una variedad de configuraciones de devanados de tensión y de fase en el estator:

- ✓ Bobinado trifásico con 120° de dispersión conectado en estrella.
- ✓ Bobinado trifásico con 60° de dispersión conectado en estrella.
- ✓ Bobinado trifásico con 60° de dispersión, con dos ramales paralelos por fase, en estrella.
- ✓ Bobinado trifásico con 120° de dispersión conectado en delta.
- ✓ Bobinado trifásico 60° de dispersión conectado en delta.
- ✓ Bobinado trifásico con 60° de dispersión, con dos ramales paralelos por fase, conectado en delta.

- ✓ Bobinado monofásico con 180° de dispersión.
- ✓ Bobinado monofásico con 180° de dispersión, con dos ramales paralelos.
- ✓ Bobinados para conexión bifásica con 90° de dispersión.
- ✓ Bobinados para conexión bifásica con 90° de dispersión, con dos ramales por fase.

Mientras que en los modos de corriente continua se puede configurar:

- ✓ Bobinados en serie
- ✓ Bobinados en paralelo.
- ✓ Bobinados de compensación.

MEDICIONES DE LAS BOBINAS Y EN EL REOSTATO.

$$R_{bobina} = 0.5\Omega$$

$$V_T = 120VDC$$

$$R_{limitadora} = 10.8 \Omega$$

$$\text{Resistencia minima del reostato del motor universal: } REO_{CAMPO} = 12.6 \Omega$$

$$\text{Resistencia maxima del reostato del motor universal: } REO_{CAMPO} = 173 \Omega$$

Se tiene una limitante y es que el reóstato que sirve para controlar la corriente de campo del alternador, viene especificado a 173Ω soporta 1A en la configuración de resistencia máxima, y en la mínima 10A, la corriente de excitación para el alternador debe iniciar de 0A esto para que la maquina no inicia excitada y generando voltaje a la salida, entonces se debe limitar la corriente para esto debe ubicarse el reóstato a la máxima resistencia.

- **Cálculo de la corriente I_f con el reóstato en máxima resistencia, y utilizando 4 bobinas en serie:**

$$I_f = \frac{V_T}{R_{reostato} + R_{limitadora} + (4 \times R_{bobina})}$$

$$I_f = \frac{120V}{173 + 10.8 + (4 \times 0.5)}$$

$$I_f = 0.64 A$$

- **Cálculo de la corriente I_f con el reóstato en mínima resistencia, y utilizando 4 bobinas en serie:**

$$I_f = \frac{V_T}{0 + R_{limitadora} + (4 \times R_{bobina})}$$

$$I_f = \frac{120V}{10.8 + (4 \times 0.5)}$$

$$I_f = 9.4 A$$

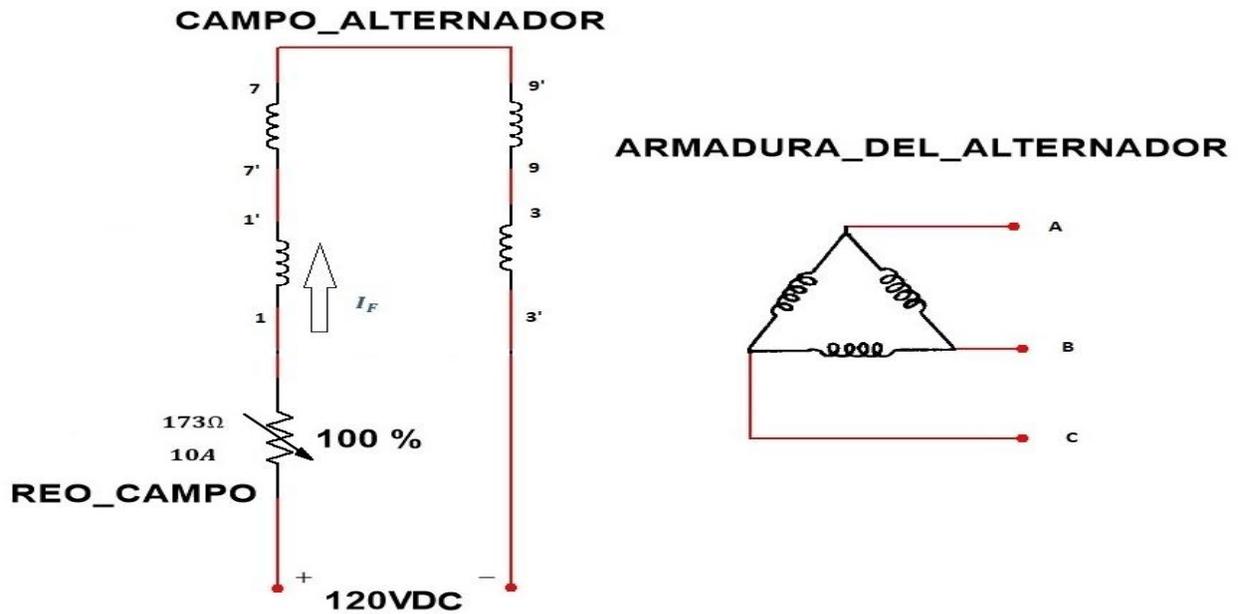


Figura 4.102 Diagrama de conexiones eléctricas para excitar el campo del alternador.

Con las corrientes calculadas se garantiza que el reóstato no se dañe, se procedió hacer todas las conexiones de la figura 4.102 en el estator del motor universal.

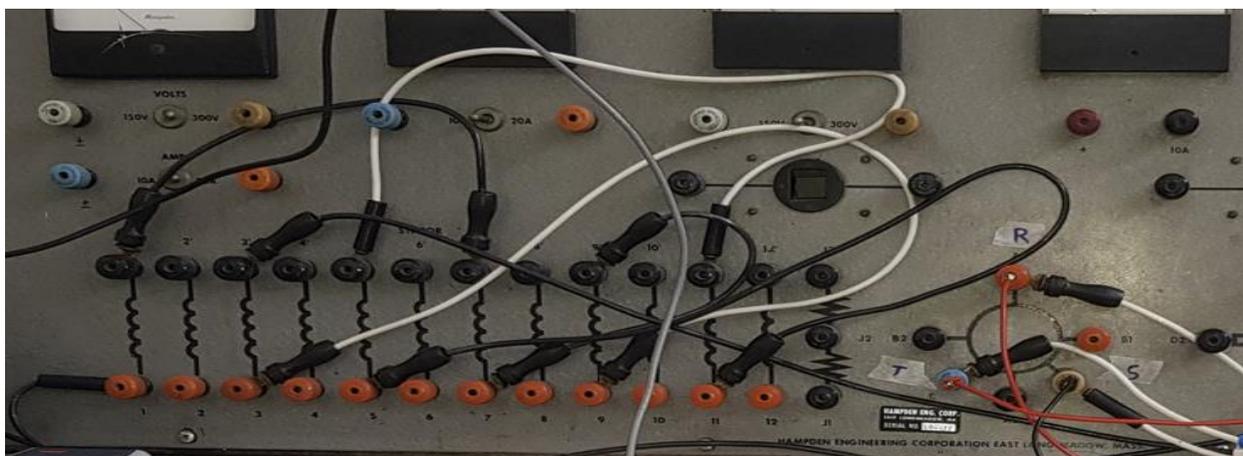


Figura 4.103 Montaje práctico de todas las conexiones hechas en el estator del motor universal.

PROTECCION A LA SALIDA DEL ALTERNADOR.

El bobinado de armadura puede entregar 8 amperios nominales por línea a una carga trifásica, para evitar daños al bobinado por sobrecorriente se le coloco una protección a la salida.

- **Cálculo de la protección para el bobinado de armadura del alternador.**

$$I_{proteccion} = 8 * 125\% = 10 A$$



Figura 4.104 Protección CHINT C10 400V, 10A para proteger la armadura del alternador.

FRENO PARA BLOQUEAR EL EJE DEL MOTOR.

Durante la prueba de rotor bloqueado es necesario mantener el eje fijo, por lo que se requiere de un mecanismo de frenado, hay diferentes tipos de frenos:

- ✓ Frenos magnéticos.
- ✓ Frenos mecánicos hidráulicos.
- ✓ Frenos mecánicos metalúrgicos.

Tanto los frenos magnéticos como los hidráulicos son de un alto costo económico, los frenos metalúrgicos son los más económicos, como el motor a ensayar es de pequeña capacidad se pensó en el diseño simple de una estructura metálica (o una pieza) que sujete el eje que pero que cumpla la función de mantener el eje fijo y que soporte el par del motor.

Diseño:

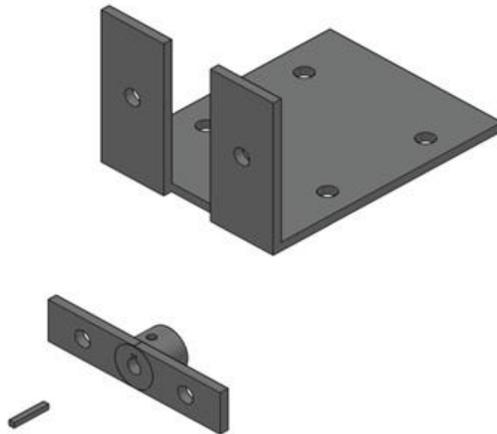


Figura 4.105 Dibujo 3D del freno mecánico metalúrgico.

Luego del diseño del freno, se tuvo dificultades para elaborar físicamente las piezas, por el desconocimiento de como manipular máquinas como el torno, taladro industrial, soldadura eléctrica. La elaboración de la pieza estuvo a cargo del Lic. Julio quintanilla feje del taller de la escuela de ingeniería mecánica.

Freno:



Figura 4.106 Acabado final del freno mecánico metalúrgico.

Configurada todas las conexiones tanto del motor como el alternador y con el freno ya instalado en el motor a ensayar, ya se tiene el ambiente más adecuado para ejecutar la prueba a rotor bloqueado en el laboratorio, lo que dio lugar al montaje final es el mostrado en la figura 4.107

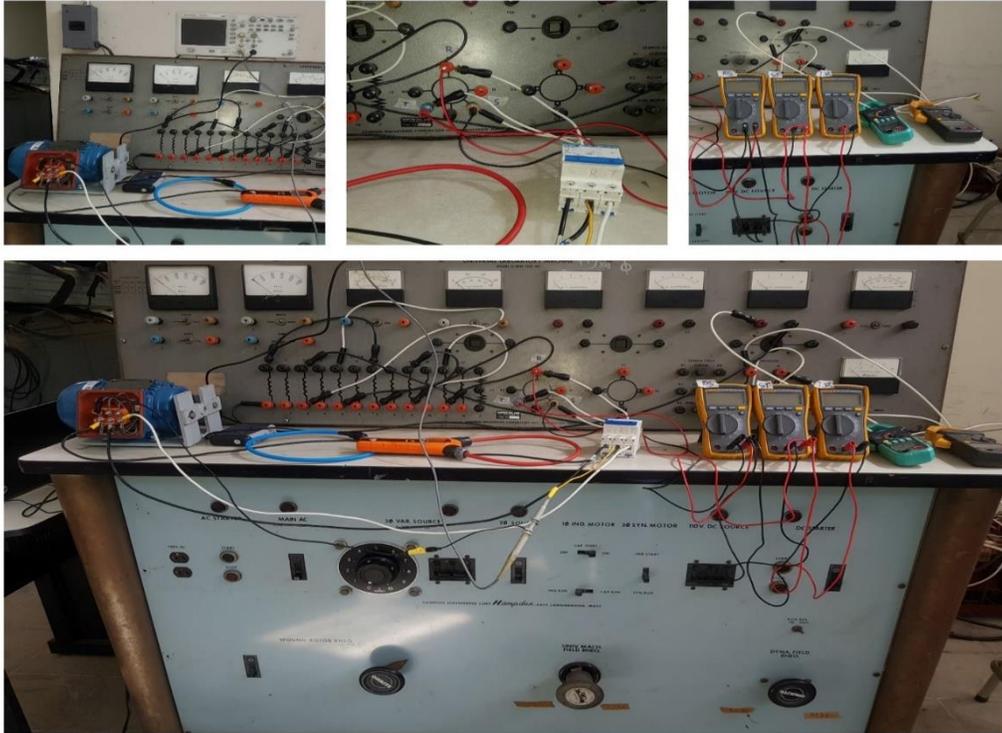


Figura 4.107 Montaje completo de la fuente de generación para la prueba de rotor bloqueado.

EQUIPO DE MEDICION.

Como se puede ver en el montaje practico se utilizó un osciloscopio **Agilent Technologies DS01012A** ya que es un equipo confiable ante mediciones en baja frecuencia, generalmente para medir el voltaje de cortocircuito, corriente de cortocircuito, y potencia trifásica en la prueba de rotor bloqueado lo que se utiliza es un analizador de redes, pero como se va utilizar una generación de voltaje a baja frecuencia (15Hz) se descartó el uso de este, porque son equipos de medición orientados a efectuar mediciones en redes eléctricas de 50Hz o 60Hz.

Por lo que se siguió manteniendo el osciloscopio, como instrumento de medición principal para efectuar mediciones durante el ensayo y extraer muestras de voltaje línea a neutro y corriente de línea que luego fueron guardados en un archivo CSV, de igual forma como se trabajó en la obtención y análisis de los archivos CSV en la prueba de VACIO, el osciloscopio además sirvió como referencia para saber que si se alcanza la frecuencia de prueba.

Otro equipo de medición que se utilizo fue la **pinza amperimétrica Klein tolos CL312** con ella se hizo la medición de la corriente de cortocircuito de línea, esa medida de corriente que se obtuvo

luego sirvió para hacer una comparación con la corriente obtenida por medio del análisis de archivos CSC, además el uso de la pinza amperimétrica sirvió como referencia que se alcanzaba la corriente nominal del motor de 0.937A

También se utilizaron 3 multímetros **FLUKE 115** para registrar el voltaje línea a línea en la entrada del motor a ensayar.

Se utilizo una **pinza amperimétrica TES 3082** para medir la corriente de armadura del motor DC.

Se utilizo una **pinza amperimétrica NEK SF2108A** para medir la corriente de campo del alternador.

PROCEDIMIENTO DE MANIOBRA PARA AJUSTAR LA FRECUENCIA DE TRABAJO.

Con el motor conectado a la armadura del alternador y con la protección CHINT C10 en posición APAGADO, se procede a ajustar la frecuencia de trabajo 15 Hz, es importante mantener la protección apagada mientras se ajusta la frecuencia de trabajo, ya que si la protección esta encendida al motor le llegara el voltaje remanente del alternador.

Para ajustar el sistema de generación a 15Hz, primero se debe poner en marcha el motor DC, para esto primero se debe colocar el breaker del alimentador de la MUH en la posición de encendido, luego se debe activar el MAIN principal también a la posición de encendido, automáticamente se activa la luz piloto de color rojo indicando que la alimentación de la maquina es correcta 208V, 3 ϕ .

Para arrancar el motor, coloque el breaker de la fuente de 120VDC a la posición de encendido también se activará la luz piloto a color rojo indicando que está listo el suministro, ahora coloque en la posición de encendido el breaker de protección del arrancador DC, y presione el botón de START (inmediatamente de haber presionado el START se puede escuchar como los contactores hacen el enclavamiento). Ahora se fue disminuyendo lentamente la resistencia del reóstato de armadura del motor DC, esto provoca que la corriente de armadura vaya incrementándose paulatinamente, y a su vez el motor comenzó a moverse y fue aumentando su velocidad a medida se fue disminuyendo cada vez más la resistencia del reóstato de la armadura, al retirar por completo la resistencia el motor alcanzo la velocidad base 2150 RPM.

Así como se describió anteriormente es como se controló la velocidad del motor DC para ajustar las 900 RPM requeridas por el ensayo.

Ajustada las 900 RPM, se encendió la protección CHINT C10 y luego se empezó a disminuir lentamente la resistencia del reóstato del motor universal, la disminución causa que la corriente de excitación del campo del alternador se incremente paulatinamente, a medida se fue excitando el campo la generación de voltaje trifásico a la salida del alternador fue mejorando.

Aquí surgió un problema durante la prueba de rotor bloqueado con el ajuste a 900 RPM, 15Hz, aunque se éxito el campo del alternador con la corriente máxima de 10A, la maquina no fue capaz de entregar al motor la corriente nominal apenas y alcanzo 0.6A y tenía que alcanzarse 0.937A, también que la corriente que circulo por la armadura del motor DC fue de 7.5A, y el reóstato que se usó solo soporta 6.1A aunque la prueba se ejecute rápido, esa corriente pone en riesgo que el reóstato se dañe, en este caso no se alcanza la corriente necesaria ya que el alternador es de pequeña capacidad (1.5KVA) además de que generar voltaje a 900 RPM, 15Hz como lo sugiera la norma IEEE112 de acuerdo a las experiencias de laboratorio resulto ser bien impráctico.

Una recomendación de nuestro asesor fue desarrollar la prueba de rotor bloqueado a 1200 RPM, 20Hz, pero experimentalmente tampoco fue posible alcanzar la corriente nominal del motor, esto llevo a tener que repetir numerosas veces el ensayo de rotor bloqueado hasta alcanzar la corriente nominal del motor de 0.937.

Se logro alcanzar la corriente nominal del motor a una frecuencia 21.8Hz aproximadamente a una velocidad de 1300 RPM para ajustar esa velocidad se hizo lo siguiente.

Se ubicó la resistencia del reóstato de armadura del motor DC a 7.7Ω , y antes de arrancar el motor e iniciar con el ensayo, se midió la temperatura inicial del reóstato resulto de fue de 25.5°C



Figura 4.108 Medición de la resistencia y la temperatura inicial del réostato de armadura del motor DC.

Luego se procedió a energizar el sistema de generación, para esto se enciende el breaker del alimentar de la MUH, se enciende el MAIN principal, se enciende la fuente de 120VDC, se enciende la protección del arrancador y por último se presiona el botón START de la botonera del arrancador.

Con esos ajustes arrancó el motor DC y alcanzo la velocidad requerida, luego se habilito la protección CHINT C10 y se dio inicio al ensayo de rotor bloqueado, se comenzó a disminuir la resistencia del motor universal, hasta alcanzar la corriente nominal de 0.937A. A continuación, se muestran todas las mediciones que se tomaron por cada fase

TOMA DE MEDICIONES.

MEDICIONES EN LA FASE S

Medición del voltaje línea a línea a la salida del alternador, y medición de la corriente de línea I_s



Figura 4.109 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase S.

$$V_{RS} = 47.24 \text{ V}$$

$$V_{ST} = 46.96 \text{ V}$$

$$V_{TR} = 47.27 \text{ V}$$

$$I_S = 0.94 \text{ A}$$

➤ **Voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{47.24 + 46.96 + 47.27}{3} = 47.16 \text{ V}$$

➤ **Voltaje línea a neutro:**

$$V_{SN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{47.16}{\sqrt{3}}$$

$$V_{SN} = 27.22 \text{ V}$$

Mediciones obtenidas con el osciloscopio:

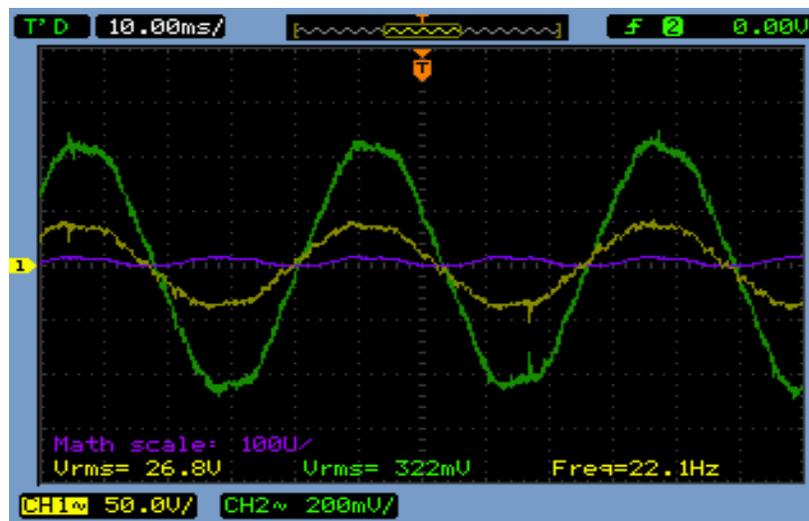


Figura 4.110 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase S.

$$V_{SN} = 26.8 \text{ V}$$

$I_s = 322mA \times 3 = 0.97 A$; 3 es el factor de escalamiento sonda de corriente

$f_s = 22.1 Hz$

ANALISIS DEL ARCHIVO CSV.

➤ **Cálculo para el periodo T:**

La frecuencia f de la prueba a rotor bloqueado es:

$$f = 21.8 Hz$$

El periodo entonces es:

$$T = \frac{1}{21.8 Hz} = 0.046 \text{ segundos}$$

Por lo que el rango de valores a tomar de las muestras seria:

Desde un $t = 0$ hasta un $t = 0.046 s$

Teniendo el tiempo de duración del periodo ya se pueden escoger las muestras para hacer el análisis en los archivos CSV en busca de la potencia trifásica promedio, lo que da lugar a una selección de 230 muestras, por la cantidad de muestras el análisis del archivo CSV es muy laborioso, en ese sentido si se tiene interés en verificar el análisis completo de las muestras de la FASE S remítase al archivo **Prueba a rotor bloqueado 21.8Hz.xlsx** que está contenido en el disco de este trabajo de graduación.

Analizado el archivo se procedió a graficar las magnitudes eléctricas instantáneas y son las mostradas en la figura 4.111 estas señales representan el comportamiento eléctrico real que experimenta la FASE S.

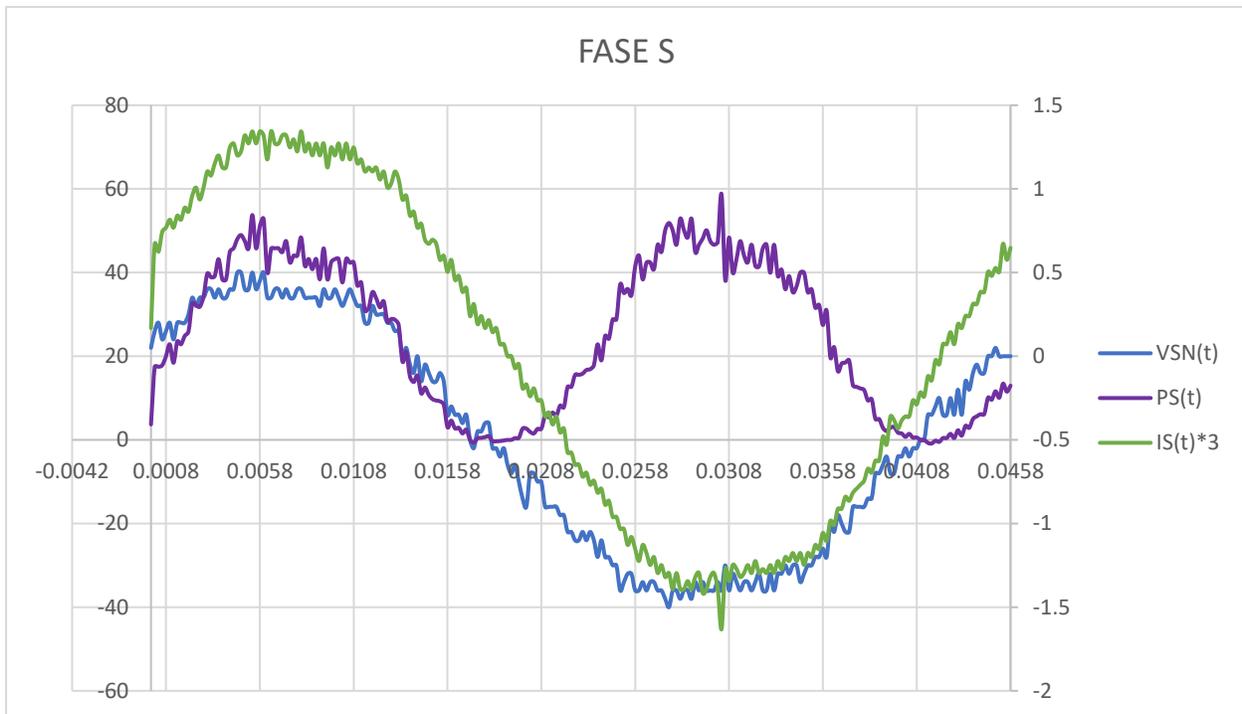


Figura 4.111 Señal real de voltaje $V_{SN}(t)$, señal real de corriente $I_s(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_S(t)$ para la FASE S de la prueba de rotor bloqueado.

La medición de la corriente de campo I_f del alternador fue de 8.3A, mientras que la corriente de armadura I_A del motor DC fue de 6.5A, la temperatura final del reóstato fue de 72.2°C como se muestra en la figura 4.112



Figura 4.112 Medición de la corriente de excitación del campo del alternado durante la prueba, y medición de la temperatura del reóstato al final de la prueba.

Finalizada las mediciones en la FASE S se procedió a apagar todo el sistema de generación y se dio un tiempo de 25 minutos para que el reóstato de armadura del motor se enfriara, ya que la resistencia varia con los cambios de temperatura.

MEDICIONES EN LA FASE R

Medición del voltaje línea a línea en la salida del alternador, y medición de la corriente de línea I_R



Figura 4.113 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase R.

$$V_{RS} = 48.06 \text{ V}$$

$$V_{ST} = 47.90 \text{ V}$$

$$V_{TR} = 48.17 \text{ V}$$

$$I_R = 0.94 \text{ A}$$

- **Voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{48.06 + 47.90 + 48.17}{3} = 48.04 \text{ V}$$

- **Voltaje línea a neutro:**

$$V_{RN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{48.04}{\sqrt{3}}$$

$$V_{RN} = 27.73 V$$

Mediciones obtenidas con el osciloscopio:

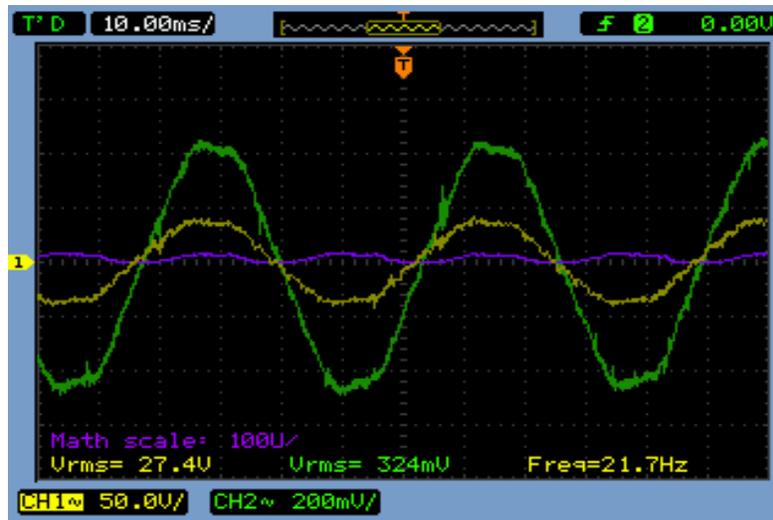


Figura 4.114 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase R.

$$V_{RN} = 27.4 V$$

$$I_R = 324mA \times 3 = 0.97 A ; 3 \text{ es el factor de escalamiento sonda de corriente}$$

$$f_R = 21.7 Hz$$

ANALISIS DEL ARCHIVO CSV.

Para determinar la potencia trifásica remítase al análisis completo del archivo CSV para la FASE R que se encuentra en el archivo **Prueba a rotor bloqueado 21.8Hz.xlsx** que está contenido en el disco de este trabajo de graduación.

Analizado el archivo se procedió a graficar las magnitudes eléctricas instantáneas y son las mostradas en la figura 4.115 estas señales representan el comportamiento eléctrico real que experimenta la FASE R.

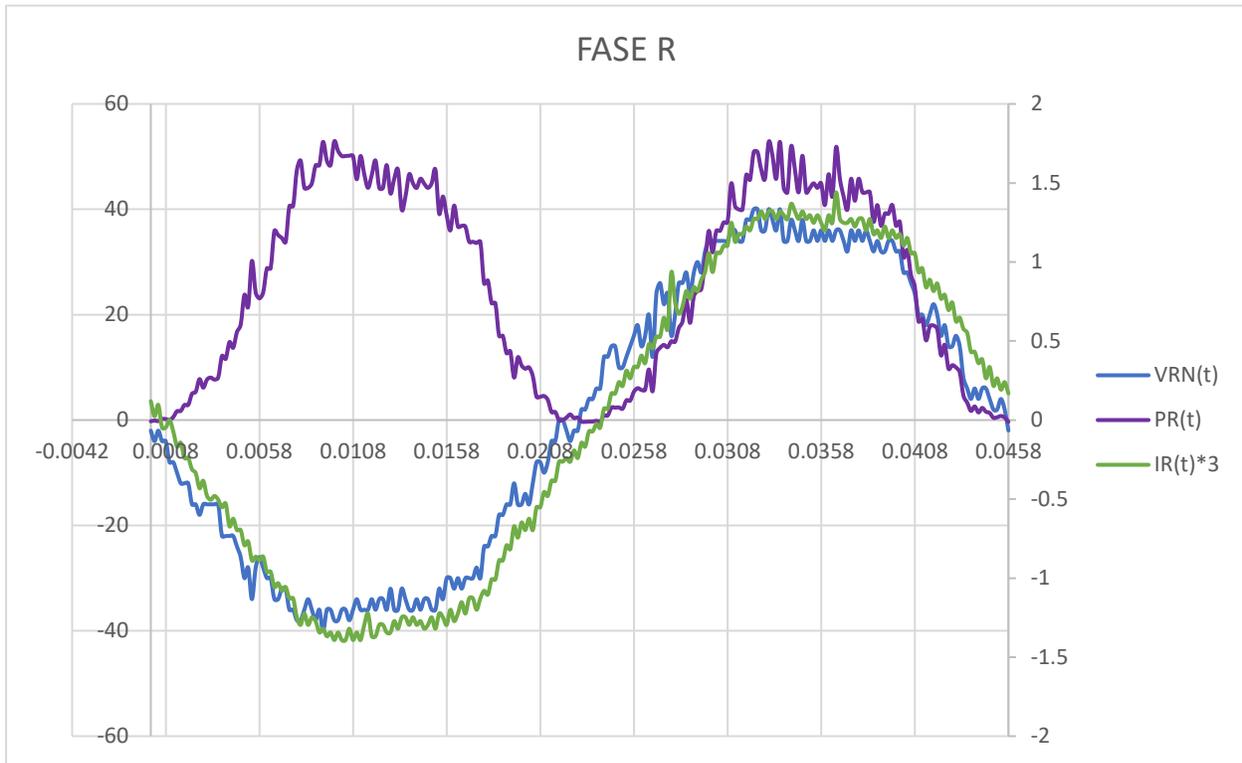


Figura 4.115 Señal real de voltaje $V_{RN}(t)$, señal real de corriente $I_R(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_R(t)$ para la FASE R de la prueba de rotor bloqueado.

La medición de la corriente de campo I_f del alternador fue de 8.9A, mientras que la corriente de armadura I_A del motor DC fue de 6.6A, la temperatura final del reóstato fue de 65.9°C como se muestra en la figura 4.116



Figura 4.116 Medición de la corriente de excitación del campo del alternador durante la prueba, y medición de la temperatura del reóstato al final de la prueba.

Finalizada las mediciones en la FASE R se procedió a apagar todo el sistema de generación y se dio un tiempo de 25 minutos para que el reóstato de armadura del motor se enfriara, ya que la resistencia varía con los cambios de temperatura.

MEDICIONES EN LA FASE T

Medición del voltaje línea a línea en la salida del alternador, y medición de la corriente de línea I_T



Figura 4.117 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase T.

$$V_{RS} = 47.12 \text{ V}$$

$$V_{ST} = 46.89 \text{ V}$$

$$V_{TR} = 47.28 \text{ V}$$

$$I_T = 0.94 \text{ A}$$

➤ **Voltaje línea a línea:**

$$V_{LL} = \frac{47.12 + 46.89 + 47.28}{3} = 47.09 \text{ V}$$

➤ **Voltaje línea a neutro:**

$$V_{RN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{47.09}{\sqrt{3}}$$

$$V_{TN} = 27.19 \text{ V}$$

Mediciones obtenidas con el osciloscopio:

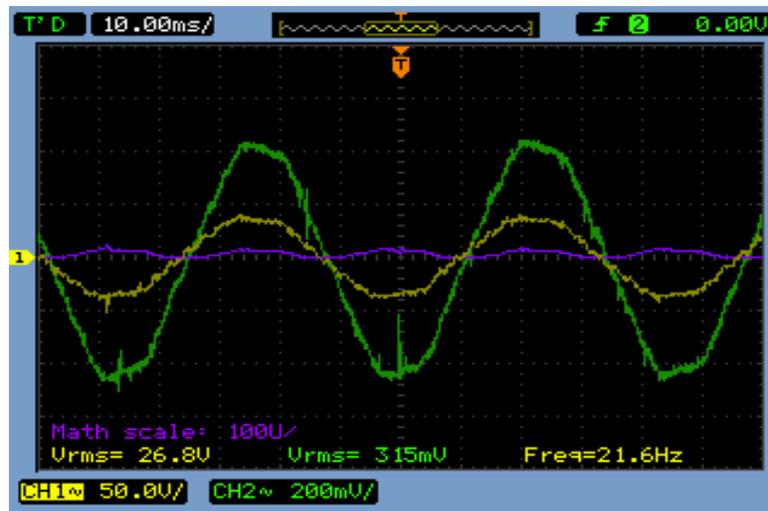


Figura 4.118 Medición de voltajes de línea a línea y corriente de línea a la entrada del motor para la fase T.

$$V_{RN} = 26.8 \text{ V}$$

$$I_R = 315 \text{ mA} \times 3 = 0.94 \text{ A} ; 3 \text{ es el factor de escalamiento sonda de corriente}$$

$$f_R = 21.6 \text{ Hz}$$

ANALISIS DEL ARCHIVO CSV.

Para determinar la potencia trifásica remítase al análisis completo del archivo CSV para la FASE T que se encuentra en el archivo **Prueba a rotor bloqueado 21.8Hz.xlsx** que está contenido en el disco de este trabajo de graduación.

Analizado el archivo se procedió a graficar las magnitudes eléctricas instantáneas y son las mostradas en la figura 4.119 estas señales representan el comportamiento eléctrico real que experimenta la FASE T.

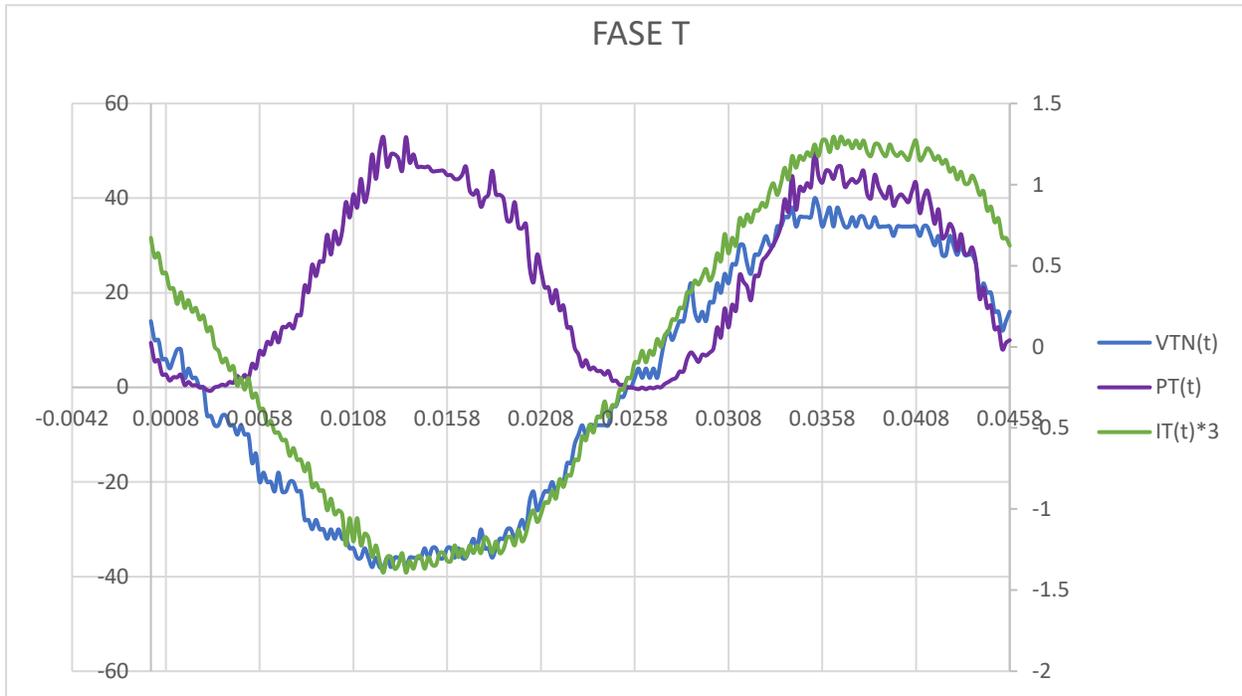


Figura 4.119 Señal real de voltaje $V_{TN}(t)$, señal real de corriente $I_T(t)$, Señal de la potencia instantánea real $P_T(t)$ para la FASE R de la prueba de rotor bloqueado.

La medición de la corriente de campo I_f del alternador fue de 8.6A, mientras que la corriente de armadura I_A del motor DC fue de 6.5A, la temperatura final del reóstato fue de 80.8°C como se muestra en la figura 4.120



Figura 4.120 Medición de la corriente de excitación del campo del alternador durante la prueba, y medición de la temperatura del reóstato al final de la prueba.

CORRIENTE TOTAL DEMANDADA POR LA FUENTE.

Para ejecutar la prueba de rotor bloqueado a 21.8 Hz al motor WEG W22 modelo TE1BF0X0! se necesita de cierta corriente consumida por el sistema, el sistema moto generador consume 3 corrientes:

- ✓ La corriente I_A en la armadura del motor DC.
- ✓ La corriente I_f en el campo del motor DC.
- ✓ La corriente I_f de excitación del alternador.

La fuente de corriente continua puede suplir 30A nominal, por lo que se tiene que tomar en cuenta que, al momento de la prueba de motores, el sistema no vaya demandar más de la corriente nominal de la fuente.

Las mediciones que se obtuvieron fueron las siguientes:

La corriente de excitación del alternador fue:

$$I_f = 7.2 A$$



Figura 4.121 Medición de la corriente total consumida por el alternador.

La corriente en total consumida por el motor DC.

$$I_A = 7.4 A$$



Figura 4.122 Medición de la corriente total consumida por el motor DC.

La corriente total consumida fue:

$$I_T = 14.6 \text{ A}$$

Los resultados finales de las mediciones son los mostrados en la tabla 4.32

$V_{RN} (V)$	$V_{SN} (V)$	$V_{TN} (V)$	$I_R (A)$	$I_S (A)$	$I_T (A)$	$P_{3\phi} (W)$	$f (Hz)$
27.042961	26.559204	26.453898	0.965732	0.949148	0.928710	74.7122087	21.80

Tabla 4.32 Resultados finales de las mediciones del ensayo de rotor bloqueado.

CAPITULO V: Análisis de resultados.

5.1 Análisis de resultados.

5.2 Prueba de DC

Con el desarrollo de la práctica se obtuvieron los siguiente de datos de resistencias.

- *La mediciones en $T_1 - T_3$ arrojo una resistencia por fase de:*

$$RDC1_{PROMEDIO} = 31.6222827 \Omega$$

- *La mediciones en $T_1 - T_2$ arrojo una resistencia por fase de:*

$$RDC2_{PROMEDIO} = 31.6120596 \Omega$$

- *La mediciones en $T_2 - T_3$ arrojo una resistencia por fase de:*

$$RDC3_{PROMEDIO} = 31.6758028 \Omega$$

➤ **Cálculo de la resistencia en corriente directa:**

$$R_{DC} = \left[\frac{RDC1_{PROMEDIO} + RDC2_{PROMEDIO} + RDC3_{PROMEDIO}}{3} \right]$$

$$R_{DC} = \left[\frac{31.6222827 + 31.6120596 + 31.6758028}{3} \right]$$

$$R_{DC} = 31.63671504 \Omega$$

➤ **Cálculo de la resistencia en corriente alterna:**

Asumiendo un 10% por el efecto pelicular:

$$R_1 = R_{AC} = R_{DC} \times 0.1$$

$$R_1 = R_{AC} = 31.63671504 \times 0.1$$

$$R_1 = R_{AC} = 3.163671504 \Omega$$

Este resultado se ha obtenido de analizar parejas de bobinas de la estrella con acceso a neutro, pero cabe aclarar que es indiferente analizar cualquiera de las estrellas, ya que por aspectos constructivos de la maquina el fabricante se encarga de construir bobinados eléctricamente igual, lo que quiere decir que tanto la inductancia como la resistencia de todos los bobinados por fase son iguales.

Mediciones en las terminales de la estrella sin acceso a neutro.

TOMA DE MEDICIONES EN (T₇T₉)

TERMINALES (T₇T₉)				
<i>I</i> TEORICA	<i>IDC</i> medida (A)	<i>VDC</i> medido (V)	<i>RDC4</i> CALCULADA (Ω)	<i>RDC4</i> PROMEDIO (Ω)
0.100	0.110	6.73	30.5909091	31.6847218
0.200	0.206	12.65	30.7038835	
0.300	0.307	18.96	30.8794788	
0.400	0.403	25.03	31.0545906	
0.500	0.507	31.69	31.2524655	
0.600	0.605	38.34	31.6859504	
0.700	0.700	44.76	31.9714286	
0.800	0.796	51.59	32.4057789	
0.900	0.896	59.03	32.9408482	
0.937	0.934	62.32	33.3618844	

Tabla 5.1 Resultado de las mediciones realizadas entre T₇T₉

TOMA DE MEDICIONES EN (T₇T₈)

TERMINALES (T_7T_8)				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC5_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC5_{PROMEDIO} (\Omega)$
0.100	0.103	6.38	30.9708738	31.8173066
0.200	0.205	12.67	30.902439	
0.300	0.301	18.65	30.9800664	
0.400	0.404	25.04	30.990099	
0.500	0.502	31.41	31.2848606	
0.600	0.600	37.95	31.625	
0.700	0.707	45.42	32.1216407	
0.800	0.805	52.43	32.5652174	
0.900	0.897	59.35	33.0824972	
0.937	0.941	63.33	33.6503719	

Tabla 5.2 Resultado de las mediciones realizadas entre (T_7T_8)

TOMA DE MEDICIONES EN (T_8T_9)

TERMINALES (T_8T_9)				
$I_{TEORICA}$	$IDC_{medida} (A)$	$VDC_{medido}(V)$	$RDC6_{CALCULADA} (\Omega)$	$RDC6_{PROMEDIO} (\Omega)$
0.100	0.101	6.268	31.029703	31.8323426
0.200	0.203	12.59	31.0098522	
0.300	0.300	18.65	31.0833333	
0.400	0.405	25.25	31.1728395	
0.500	0.504	31.64	31.3888889	
0.600	0.597	37.49	31.39866	
0.700	0.694	44.35	31.9524496	
0.800	0.797	51.68	32.4215809	
0.900	0.896	59.02	32.9352679	
0.937	0.940	63.79	33.9308511	

Tabla 5.3 Resultado de las mediciones realizadas entre (T_8T_9)

- La mediciones en $T_7 - T_9$ arrojo una resistencia por fase de:

$$RDC4_{PROMEDIO} = 31.6847218 \Omega$$

- La mediciones en $T_7 - T_8$ arrojo una resistencia por fase de:

$$RDC5_{PROMEDIO} = 31.8173066 \Omega$$

- La mediciones en $T_8 - T_9$ arrojo una resistencia por fase de:

$$RDC6_{PROMEDIO} = 31.8323426 \Omega$$

- **Cálculo de la resistencia en corriente directa:**

$$R_{DC} = \left[\frac{RDC4_{PROMEDIO} + RDC5_{PROMEDIO} + RDC6_{PROMEDIO}}{3} \right]$$

$$R_{DC} = \left[\frac{31.6847218 + 31.8173066 + 31.8323426}{3} \right]$$

$$R_{DC} = 31.77812368 \Omega$$

- **Cálculo de la resistencia en corriente alterna:**

Asumiendo un 10% por el efecto pelicular:

$$R_1 = R_{AC} = R_{DC} \times 0.1$$

$$R_1 = R_{AC} = 31.77812368 \times 0.1$$

$$R_1 = R_{AC} = 34.95594 \Omega$$

5.3 Prueba de vacío.

Los datos mostrados en la tabla 5.4 son el resultado del análisis de datos hechos en la sección 4.12, todos los datos provienen de la toma de mediciones realizadas al motor que fue ensayado en laboratorio bajo la condición de vacío mientras este funcionaba a frecuencia nominal, la prueba de vacío fue desarrollada en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE – UES, la información obtenida es necesaria para iniciar el cálculo de las pérdidas en vacío, y posteriormente calcular los parámetros de la rama de vacío del circuito equivalente.

N ^o de medición	V _{LN} TEÓRICO	V _{RN} (V)	V _{SN} (V)	V _{TN} (V)	I _R (A)	I _S (A)	I _T (A)	P3Φ (W)
1	132.7905619	129.4911218	134.574042	130.4787008	0.482946512	0.685997085	0.664476402	70.20148148
2	121.2435565	119.7247873	123.642655	118.9752542	0.393981387	0.618655172	0.588397447	53.29837037
3	109.6965511	108.4581048	110.900244	105.9032869	0.371404541	0.557658597	0.477497179	48.44207407
4	98.14954576	96.51303245	102.971889	98.69994434	0.301981604	0.489832624	0.501836627	43.74577778
5	86.60254038	85.70952956	89.4670089	85.65247036	0.252236221	0.440452293	0.421189849	37.01866667
6	75.05553499	74.47263148	78.2979431	73.28988612	0.222502934	0.393358191	0.348405894	31.17037037
7	63.50852961	62.10624111	67.4132273	63.5870163	0.178527309	0.3588624	0.30822791	26.66844444
8	51.96152423	51.37276023	56.0357029	54.33912716	0.155492051	0.28657673	0.271843092	22.57066667
9	40.41451884	39.23842914	44.5936385	42.03114659	0.109981817	0.30174603	0.26205343	20.07051852
10	28.86751346	27.2582528	31.8072901	29.97859319	0.157310733	0.29859523	0.239792503	17.70311111
11	17.32050808	16.23287322	21.5234583	18.31682759	0.247856589	0.496272327	0.38177131	20.14874074
12	11.54700538	9.102977399	14.7940595	10.95895823	0.300186609	0.502785132	0.365644636	12.61096296

Tabla 5.4 Resultados de la prueba de vacío, representados con valores de tensión de línea - neutro para cada fase, y para cada corriente de fase.

Representación de la tensión y corriente a valores promedios.

El motor está conectado en estrella – estrella alimentada a 230V de línea - línea, de acuerdo a esta configuración se efectuaron mediciones de tensión en cada fase respecto al neutro, obteniéndose tres valores de tensión (V_{RN} , V_{SN} , V_{TN}) y tres valores de corriente de fase (I_R , I_S , I_T) por cada nivel de tensión ensayado. La $P3\Phi$ es la potencia trifásica de vacío, y cabe aclarar que cada uno de los valores de la columna representan el valor promedio de la sumatoria de potencias monofásicas para cada nivel de tensión ensayado en la prueba de vacío, que también fue determinada en el análisis de datos en la sección anterior.

Con las expresiones mostradas a continuación:

$$V_0 = \frac{V_{RN} + V_{SN} + V_{TN}}{3} \quad I_0 = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Calcular la tensión promedio de vacío V_0 y corriente promedio de vacío I_0 . Para el caso de la potencia trifásica como se mencionó ya son valores promedio por lo que solo se van a trasladar los valores de la columna de la tabla 5.4 a la tabla 5.5 pero estará con nombre y subíndice P_0 .

Con esto la tabla de datos se ve reducida únicamente a valores promedio, y son mostrados en la tabla 5.5.

NºMedición	V_{LN}TEÓRICO	$V_o(V)$	$I_o(A)$	$P_o(W)$
1	132.790562	131.514622	0.611140	70.201481
2	121.243557	120.780899	0.533678	53.298370
3	109.696551	108.420545	0.468853	48.442074
4	98.1495458	99.394955	0.431217	43.745778
5	86.6025404	86.943003	0.371293	37.018667
6	75.055535	75.353487	0.321422	31.170370
7	63.5085296	64.368828	0.281873	26.668444
8	51.9615242	53.915863	0.237971	22.570667
9	40.4145188	41.954405	0.224594	20.070519
10	28.8675135	29.681379	0.231899	17.703111
11	17.3205081	18.6910531	0.37530008	20.1487407
12	11.5470054	11.6186651	0.38953879	12.610963

Tabla 5.5 Resultados de la prueba de vacío, con valores de tensión de vacío, corriente de vacío y potencia de vacío representados en valores promedio.

Cuando el motor opera en condición de vacío no tiene conectado ninguna carga al eje, por lo que la potencia útil es de cero, por esta razón la potencia eléctrica corresponde únicamente a las potencias de pérdidas, es decir corresponden a las pérdidas en el hierro, perdidas mecánicas, y perdidas en el cobre del estator, lo mencionado se resume mejor en las siguientes ecuaciones:

➤ *Balace de potencias para la condicion de vacio:*

$$P_E = P_P + P_U ; \text{ pero en vacio: } P_U = 0$$

$$P_E = P_P$$

Entonces:

$$P_0 = P_P = P_{Fe} + P_m + P_{cu0} \quad (5.1)$$

Donde:

P_0 : Potencia eléctrica en vacío.

P_{Fe} : Potencia de pérdidas en el hierro.

P_m : Potencia de pérdidas mecánicas.

P_{cu0} : Potencia de pérdidas en el cobre del estator.

➤ Despejando ($P_{Fe} + P_m$) de la ecuación (5.1) tenemos:

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{cu0} \quad (5.2)$$

➤ Las Pérdidas del cobre en el estator se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$P_{cu0} = 3I_0^2 R_{AC} \quad (5.3)$$

Donde:

R_{AC} : Es la resistencia del estator.

I_0 : Corriente medida en vacío.

➤ De la prueba DC se obtuvo una resistencia por fase de:

$$R_1 = R_{AC} = 34.80039 \, \Omega$$

Cálculo de las pérdidas del cobre del estator P_{cu0} y la sumatoria de pérdidas del hierro y mecánicas ($P_{Fe} + P_m$).

Corriente, tensión y potencia son valores conocidos que fueron obtenidos del ensayo de vacío ver tabla 5.5, la resistencia por fase del bobinado del estator también es un valor conocido y fue obtenido de la prueba DC, por lo que el cálculo de la potencia de pérdidas del cobre del estator P_{cu0} es de forma directa aplicando la ecuación 5.3. El cálculo de P_{cu0} se debe realizar para cada nivel de tensión ensayado, esto permite generar una nueva columna de valores.

Ahora, ya se puede aplicar la ecuación 5.2, hacer la resta de la potencia de vacío P_0 y la potencia de pérdidas del cobre del estator P_{cu0} previamente calculadas para cada nivel de tensión ensayado,

esto permite generar otra columna de valores que corresponde a la suma de las pérdidas del hierro y las perdidas mecánicas ($P_{Fe} + P_m$). Las dos nuevas columnas son mostradas en la tabla 5.6

N° Medición	V_{LN} TEÓRICO	$V_o(V)$	$I_o(A)$	$P_o(W)$	$P_{Cu0}(W)$	$P_{Fe} + P_m(W)$
1	132.790562	131.514622	0.611140	70.201481	38.9925751	31.208906
2	121.243557	120.780899	0.533678	53.298370	29.7343947	23.563976
3	109.696551	108.420545	0.468853	48.442074	22.9495783	25.492496
4	98.149546	99.394955	0.431217	43.745778	19.4129774	24.332800
5	86.602540	86.943003	0.371293	37.018667	14.3924101	22.626257
6	75.055535	75.353487	0.321422	31.170370	10.7858062	20.384564
7	63.508530	64.368828	0.281873	26.668444	8.2948022	18.373642
8	51.961524	53.915863	0.237971	22.570667	5.9121739	16.658493
9	40.414519	41.954405	0.224594	20.070519	5.2661820	14.804337
10	28.867513	29.681379	0.231899	17.703111	5.6143577	12.088753
11	17.320508	18.691053	0.37530008	20.1487407	14.7047553	5.443985
12	11.547005	11.618665	0.38953879	12.610963	15.8417051	-3.230742

Tabla 5.6 Cálculo de las Perdidas del cobre del estator P_{Cu0} y cálculo de la sumatoria de pérdidas del hierro y mecánicas $P_{Fe} + P_m$, para doce mediciones de tensión ensayadas.

Representación de la suma de perdidas ($P_{Fe} + P_m$) en función de la tensión de vacío V_0 .

Para determinar las perdidas mecánicas P_m primero se debe representar todos los valores de la suma de perdidas ($P_{Fe} + P_m$) en función de la tensión V_0 el resultado es una curva con tendencia exponencial decreciente.

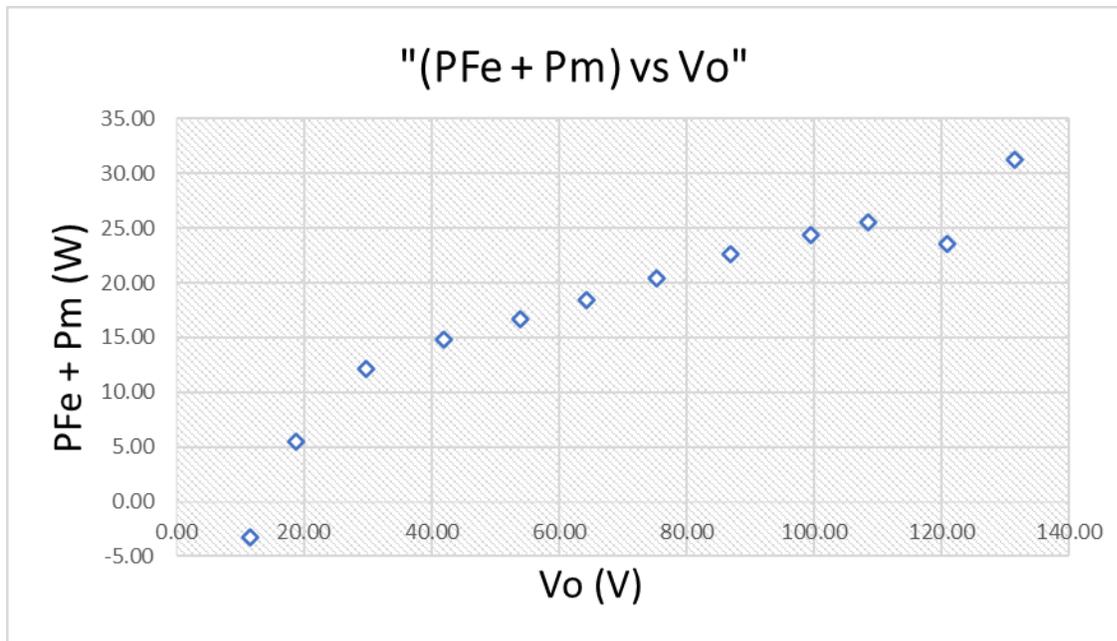


Figura 5.1 Gráfico de pérdidas vs tensión para doce mediciones.

En el gráfico de dispersión de la figura 5.1 están representados todas las mediciones (12 mediciones) se observa que no tiene tendencia exponencial, esta se ha visto afectada por las últimas tres mediciones, cerca de finalizar el ensayo se observó que estas tuvieron un incremento de las corrientes monofásicas que incluso superaban a las corrientes de las mediciones anteriores, esto se aprecia mejor en la tabla 5.4.

El procedimiento del ensayo de vacío se desarrolló partiendo desde la tensión nominal de 230V, se fue disminuyendo y por cada 20V se tomó mediciones hasta ensayar un mínimo de 5% de la tensión nominal aproximadamente 11.62V de alimentación del motor, cabe mencionar que a este nivel de tensión el eje aún permanecía en movimiento, pero de forma muy lenta.

Ahora bien, en el procedimiento descrito del ensayo de vacío en el libro de Máquinas Eléctricas de Jesús Fraile Mora capítulo 4 “máquinas asíncronas” subtema 4.5.1 “Ensayo de vacío o rotor libre” página 309 menciona lo siguiente: “Para determinar P_{Fe} y P_m es preciso alimentar el motor por una tensión variable, comenzando con el valor de la tensión nominal o una tensión algo superior y reduciendo hasta un valor que pueda tomarse entre el (30-50) % del valor de tensión nominal”.

De acuerdo a la explicación del libro la última medición a la cual debe finalizar el ensayo es como mínimo a un 30% de la tensión nominal, y aplicándolo de forma particular para el motor ensayado la prueba debió finalizar a los 69V, aunque en la práctica no es estricto que tenga que finalizar precisamente a ese porcentaje de la tensión nominal, debido a que el motor todavía permanecía en movimiento y fue posible tomar cinco mediciones más, pero con el desarrollo del ensayo la repetición del mismo y los resultados obtenidos se puede concluir que tomar mediciones por debajo de los 69V hasta finalizar a una tensión aproximada de 11.62V justo antes de que el eje del motor se detenga por completo arroja algunas mediciones erróneas para el análisis de vacío, porque cuando el motor opero con tensiones por debajo de los 30V se observó que por fase tubo incremento de corriente.

Razón por la cual se van excluir las últimas tres mediciones que corresponden a las mediciones 10,11,12 por no aportar información importante para el análisis de vacío y que considerarlos como se ha visto en el grafico 5.1 afecta de forma negativa a la tendencia exponencial decreciente que debe presentar el motor trifásico de inducción operando sin carga.

Ahora quedaría eliminar de la tabla 5.4 y del gráfico de la figura 5.1 las mediciones que no pertenecen a la tendencia, y nuevamente hacer la representación gráfica de las perdidas contra la tensión, también se va definir cuál será el valor de la última tensión medida y que se va considerar como valida a la que finaliza el ensayó de vacío, además del valor en porcentaje que esta última medida representa del valor de la tensión nominal.

Nº Medicion	V_{LN} TEORICO	V₀(V)	I₀(A)	P₀(W)	P_{Cu0}(W)	P_{Fe} + P_m(W)
1	132.790562	131.514622	0.611140	70.201481	38.9925751	31.208906
2	121.243557	120.780899	0.533678	53.298370	29.7343947	23.563976
3	109.696551	108.420545	0.468853	48.442074	22.9495783	25.492496
4	98.149546	99.394955	0.431217	43.745778	19.4129774	24.332800
5	86.602540	86.943003	0.371293	37.018667	14.3924101	22.626257
6	75.055535	75.353487	0.321422	31.170370	10.7858062	20.384564
7	63.508530	64.368828	0.281873	26.668444	8.29480223	18.373642
8	51.961524	53.915863	0.237971	22.570667	5.91217388	16.658493
9	40.414519	41.954405	0.224594	20.070519	5.26618202	14.804337

Tabla 5.7 Cálculo de las Perdidas del cobre del estator P_{Cu0} y cálculo de la sumatoria de pérdidas del hierro y mecánicas $P_{Fe} + P_m$, para nueve mediciones de tensión ensayadas.

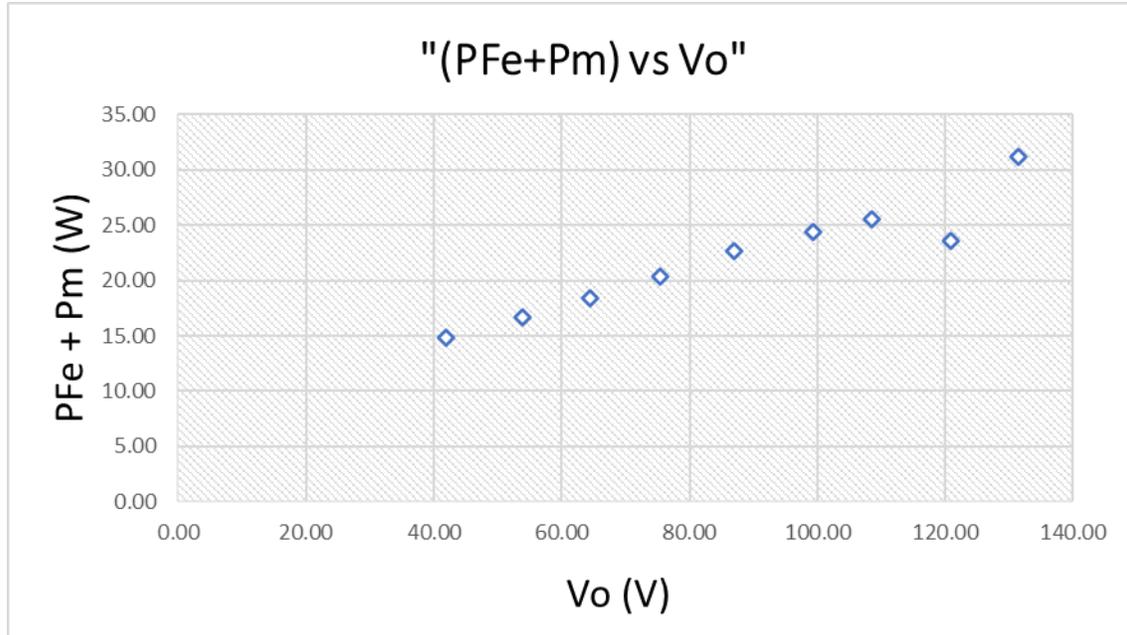


Figura 5.2 Gráfico de pérdidas vs tensión para nueve mediciones.

Entonces al eliminar las mediciones 10,11,12 la tabla se ve reducida solamente a nueve mediciones validas, considerando 41.95V como la tensión final del ensayo y a su vez se da por finalizada la prueba a ese valor. En la tabla 5.10 están representadas todas las mediciones que se tomaron del ensayo de vacío partiendo desde la tensión nominal 230V hasta finalizar con un aproximado del 18% de la tensión nominal ($\approx 41.4V$) y en el gráfico de la figura 5.2 se puede observar que efectivamente se ha conseguido el comportamiento correcto, ya que los puntos graficados presentan una tendencia exponencial decreciente.

Métodos para determinar las pérdidas mecánicas P_m .

Una vez representada la suma de pérdidas ($P_{Fe} + P_m$) en función de la tensión V_0 , para determinar las pérdidas mecánicas P_m se debe aplicar el siguiente artificio:

“En el instante que la tensión de vacío tenga el valor de cero ($V_0 = 0$) las pérdidas en el hierro son nulas ($P_{Fe} = 0$), la razón es porque las pérdidas del hierro dependen de la tensión”

Esto quiere decir que las pérdidas mecánicas se encuentran justo en el punto cuando la curva con tendencia exponencial decreciente corta el eje de ordenadas tal como se muestra en el gráfico de la figura 5.3.

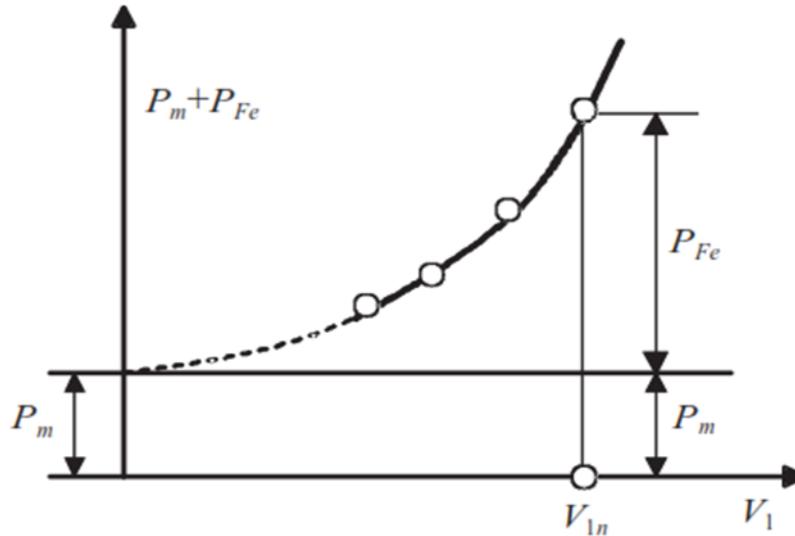


Figura 5.3 Repartición de las pérdidas en el ensayo de vacío.

Ahora bien, con el desarrollo experimental del ensayo se observa que queda definido siempre en un rango finito de valores de tensiones de prueba escogidos por el ensayista, es decir un rango establecido entre la tensión nominal y una tensión pequeña pero diferente de cero considerada como el ultimo valor a ensayar (tensión de parada).

La tensión de parada escogida para el ensayo de vacío entonces debe de cumplir las siguientes condiciones:

- La tensión debe ser diferente de cero ($V_0 \neq 0$).
- No se debe escoger una tensión a la cual el motor se haya detenido.
- No puede escogerse una tensión donde se observen incrementos de corrientes que superen a las mediciones tomadas previamente.

Si la tensión escogida cumple las condiciones se debe de dar por finalizado el ensayo. No se recomienda continuar con la toma de mediciones por debajo de la tensión de parada escogida, ya que cuando el motor opera con tensiones demasiado reducidas incluso si el motor sigue en

movimiento ya no se toman mediciones validas, como tampoco se toman con el eje del motor detenido ya que no tendría sentido para la prueba.

Particularmente para el motor ensayado en el laboratorio el rango establecido para la prueba se definió en:

$$[V_{\text{nominal}}, 18\%V_{\text{nominal}}] = [230V, 41.4V]; \text{ tomando mediciones cada } 20V$$

Y el ultimo valor de parada escogido fue de 41.4V cumpliendo las condiciones mencionadas, y no se tiene información alguna por debajo de ese valor ya que el ensayo lo excluye.

En resumen: Para determinar las perdidas mecánicas P_m el artificio va forzar a que las pérdidas del hierro sean cero ($P_{Fe} = 0$), esto ocurre solo si el flujo magnético circulante se ha visto anulado, y como las pérdidas del hierro depende de la tensión solo existe un instante donde lo anterior se cumple, y es cuando la tensión vale cero ($V_0 = 0$) a nivel de ensayo es imposible incluso si se quisiera tomar un valor muy cercano a cero ya se argumentó que el ensayo excluye todos los valores por debajo del valor de la tensión de parada.

Razón por la cual para determinar P_m se utilizan los siguientes métodos:

1. Método gráfico.

En la práctica el método es efectivo. utilizado cuando se necesita la información de las perdidas mecánicas P_m con rapidez, el método consiste en construir el gráfico de la suma de perdidas ($P_{Fe} + P_m$) contra la tensión V_0 esto genera una curva con tendencia exponencial decreciente que inicia en la tensión nominal V_{1n} y finaliza en algún punto donde la tensión es $V_0 \neq 0$, Luego se deberá hacer una prolongación de la curva hasta que esta corte el eje donde están representadas la suma de perdidas ($P_{Fe} + P_m$), entonces desde punto de origen hasta el punto de corte estarían definidas las perdidas mecánicas P_m esto se aprecia mejor en el gráfico de la figura 5.3, el método se puede aplicar en una hoja papel milimetrado y hacer la prolongación a mano, luego definir cuál es el valor de las P_m , para minimizar errores generalmente se plotea el grafico y se prolonga la curva en software computacional. Como se ha explicado el método es muy bueno, pero carece de precisión y el mismo procedimiento hace que el resultado de P_m presente bastante error.

2. Método numérico de regresión exponencial.

La aplicación de un método numérico de regresión exponencial en la determinación de las pérdidas mecánicas P_m permite obtener resultados más confiable que el uso de métodos gráficos, además que el análisis deja una justificación matemática de los resultados, En general el uso de métodos numéricos de regresión permiten obtener resultados aproximados del comportamiento real de los fenómenos, para el caso particular de los datos obtenidos en el ensayo de vacío donde la tendencia encontrada en los datos fue exponencial decreciente, al aplicar un análisis de regresión a los datos se tendrá la ventaja de poder determinar una ecuación con la que se puede generar una tabla de datos que luego al graficarlos se obtendría una curva aproximada que representa a los datos y en efecto al comportamiento de forma aproximado del motor trifásico de inducción funcionando en vacío. Ahora bien, para determinar las P_m entonces se deberá aplicar un análisis de regresión a todos los datos de la columna V_0 y $(P_{Fe} + P_m)$ hasta encontrar una ecuación en la cual directamente se evalúan las condiciones de: $V_0 = 0$; $P_{Fe} = 0$ el valor que resulte de la evaluación serían las pérdidas mecánicas P_m .

Determinación de las pérdidas mecánicas mecánicas P_m a través de un análisis de regresión exponencial modelo $y = a_1 e^{b_1 x}$.

A continuación, se va aplicar a los datos de las columnas V_0 y $(P_{Fe} + P_m)$ de la tabla 5.5 un análisis de regresión exponencial en busca de una ecuación y un ajuste de curva aproximado para el comportamiento en vacío del motor.

Nº Medicion	V ₀	P _{Fe} + P _m	V ₀ ²	V ₀ × ln (P _{Fe} + P _m)	ln (P _{Fe} + P _m)	(ln (P _{Fe} + P _m)) ²	Prom (ln (P _{Fe} + P _m))	Prom (V ₀)
1	131.514622	31.2089063	17296.0957	452.502821	3.44070351	11.8384407	3.06480871	86.9607341
2	120.780899	23.5639757	14588.0255	381.633712	3.15971909	9.98382473		
3	108.420545	25.4924957	11755.0147	351.107373	3.23838412	10.4871317		
4	99.3949552	24.3328004	9879.35712	317.251328	3.19182525	10.1877484		
5	86.9430029	22.6262566	7559.08576	271.184879	3.11911103	9.7288536		
6	75.3534869	20.3845641	5678.14799	227.174031	3.01477795	9.08888611		
7	64.3688282	18.3736422	4143.34605	187.372326	2.91091715	8.47343865		
8	53.9158634	16.6584928	2906.92033	151.661019	2.81292016	7.91251985		
9	41.9544047	14.8043365	1760.17208	113.06377	2.69492014	7.26259459		
Sumatoria	782.646607		75566.1652	2452.95126	27.5832784	84.9634384		

Tabla 5.8 Tabla de datos para el análisis de la regresión exponencial.

➤ **Cálculo de b₁:**

$$b_1 = \frac{n \times (\sum_{i=1}^n V_0 \times \ln (P_{Fe} + P_m)) - \sum_{i=1}^n V_0 \times \sum_{i=1}^n \ln(P_{Fe} + P_m)}{n \sum_{i=1}^n V_0^2 - [\sum_{i=1}^n V_0]^2}$$

$$b_1 = \frac{(9 \times 2452.95126) - (782.646607 \times 27.5832784)}{(9 \times 75566.1651975225) - (782.646607)^2}$$

$$b_1 = 0.00723214$$

➤ **Cálculo de a₁:**

$$a_1 = e^{\overline{\ln (P_{Fe} + P_m)} - b_1 \times \overline{V_0}}$$

$$a_1 = e^{3.064808713 - 0.00723214 \times 86.960734}$$

$$a_1 = 11.42605311$$

➤ **Cálculo del coeficiente de correlación:**

$$r = \frac{n \times (\sum_{i=1}^n V_0 \times \ln(P_{Fe} + P_m)) - \sum_{i=1}^n V_0 \times \sum_{i=1}^n \ln(P_{Fe} + P_m)}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n V_0^2 - [\sum_{i=1}^n V_0]^2} \times \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n \ln(P_{Fe} + P_m)^2}}$$

$$= \frac{(9 \times 2452.95126) - (782.646607 \times 27.5832784)}{\sqrt{9 \times 75566.1651975225 - (782.646607)^2} \times \sqrt{9 \times 84.9634383634847 - (27.5832784)^2}}$$

$$r = 0.96006869$$

➤ **Ecuación Resultante:**

$$(P_{Fe} + P_m) = a_1 e^{b_1 \times V_0}$$

$$(P_{Fe} + P_m) = 11.42605311 e^{0.00723214 \times V_0}$$

Con la ecuación obtenida, ahora se van a evaluar en la ecuación de regresión todos los valores de V_0 de tal manera de generar una columna de valores aproximados de la suma de $(P_{Fe} + P_m)$

En la tabla 5.9 y en el gráfico de la figura 5.4 se muestran tanto los valores de $(P_{Fe} + P_m)$ aproximados encontrados con la ecuación, como también los valores reales obtenidos por medio de mediciones.

	Valor calculado	Valor calculado con la ecuación de regresión	Error verdadero
V_0	REAL $(P_{Fe} + P_m)$	APROXIMADO $(P_{Fe} + P_m)$	$e = \text{Valor real} - \text{Aproximación}$
131.514622	31.208906	29.577942	1.630964659384450
120.780899	23.563976	27.368728	-3.804752007615160
108.420545	25.492496	25.028350	0.464146014543417
99.394955	24.332800	23.446818	0.885982259382796
86.943003	22.626257	21.427614	1.198642278699540
75.353487	20.384564	19.704823	0.679741231666306
64.368828	18.373642	18.199985	0.173656990823829
53.915863	16.658493	16.874835	-0.216341713101983
41.954405	14.804337	15.476402	-0.672065780351449

Tabla 5.9 Valores de la suma de ($P_{Fe} + P_m$) reales y valores calculados con la ecuación de regresión.

Al graficar los datos se tiene la siguiente curva ajustada:

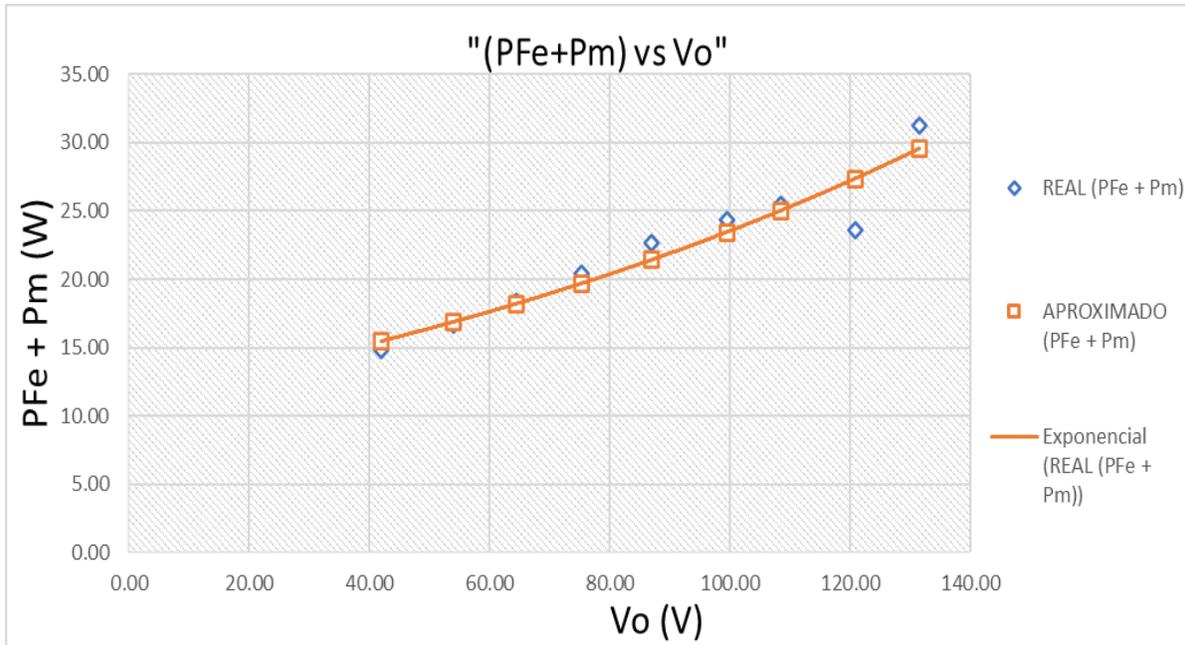


Figura 5.4 Curva de ajuste de los datos en vacío.

➤ **Calculo de las perdidas mecánicas P_m :**

- Condiciones a evaluar en la ecuación de regresión: $V_0 = 0$; $P_{Fe} = 0$

$$(P_{Fe} + P_m) = 11.42605311e^{0.00723214 \times V_0}$$

$$(0 + P_m) = 11.42605311e^{0.00723214 \times 0}$$

$$P_m = 11.42605311 \text{ W}$$

Con el análisis de regresión aplicado se ha podido calcular el valor de las perdidas mecánicas, resultaron de 11.4260531 W y con respecto al coeficiente de correlación que resulto de 0.96 es muy cercano a la unidad, se puede decir que el análisis realizado a los datos es exitoso, con el cálculo del error verdadero se puede establecer un error máximo del 3.8%, como se observa hay un error implícito por medición pero este es pequeño y se puede apreciar mejor en la tabla 5.9 al hacer una comparación entre el valor del dato aproximado respecto al valor real.

Para cometer el menor error posible y definir de mejor manera las pérdidas mecánicas P_m se debe considerar la recomendación que hace el libro de máquinas eléctricas de Jesús Fraile Mora el cual cita lo siguiente: “Se deben representar las pérdidas ($P_{Fe} + P_m$) en función del cuadrado de la tensión V_0^2 ” sucede que al hacer grande los valores de tensión en el eje se obliga a la tendencia exponencial decreciente a comportarse de forma lineal, luego se podrá determinar las pérdidas mecánicas P_m ya sea con el método gráfico o a treves de una ecuación que produce un análisis de regresión lineal

A continuación, se va aplicar a los datos de las columnas V_0 y $(P_{Fe} + P_m)$ de la tabla 5.5 un análisis de regresión lineal en busca de una ecuación y poder determinar las pérdidas mecánicas P_m de forma directa, en este caso primero se debe construir una tabla con los valores de la tensión elevados al cuadrado, para el caso de los valores de la suma de pérdidas ($P_{Fe} + P_m$) estos simplemente se trasladan de la tabla 5.5 a la tabla 5.10 por recomendación de la bibliografía de Jesús Fraile Mora.

V_0^2	$(P_{Fe} + P_m)$
17296.095692	31.208906
14588.025534	23.563976
11755.014652	25.492496
9879.357116	24.332800
7559.085759	22.626257
5678.147990	20.384564
4143.346047	18.373642
2906.920330	16.658493
1760.172077	14.804337

Tabla 5.10 Representación de todos los valores de la tensión V_0 al cuadrado.

Determinación de las pérdidas mecánicas P_m método gráfico.

El primer paso consiste en plotear todos los puntos de la tabla 5.13 para esto se utilizó el programa GeoGebra Clásico.

Procedimiento:

1. Abrir GeoGebra Clásico y en la opción vistas habilitar los siguientes modos:

- ❖ Vista Algebraica.
- ❖ Vista Grafica.
- ❖ Hoja de cálculo.

2. En la hoja de cálculo que se desplegó colocar todas las dos columnas de datos de la tabla 5.10

{1,2}

3. Para plotear el grafico seleccionar los datos de la tabla 5.13 y luego en el icono seleccionar la opción lista de puntos, esto desplegara una lista a la cual se han asignado nueve letras A-I y de forma automática se plotearán los puntos como se muestra en el gráfico de la figura 5.6

<input type="radio"/>	Vo^2	⋮
<input type="radio"/>	$(PFe+Pm)$	⋮
<input type="radio"/>	A = (A2, B2) → (17296.1, 31.21)	⋮
<input type="radio"/>	B = (A3, B3) → (14588.03, 23.56)	⋮
<input type="radio"/>	C = (A4, B4) → (11755.01, 25.49)	⋮
<input type="radio"/>	D = (A5, B5) → (9879.36, 24.33)	⋮
<input type="radio"/>	E = (A6, B6) → (7559.09, 22.63)	⋮
<input type="radio"/>	F = (A7, B7) → (5678.15, 20.38)	⋮
<input type="radio"/>	G = (A8, B8) → (4143.35, 18.37)	⋮
<input type="radio"/>	H = (A9, B9) → (2906.92, 16.66)	⋮
<input type="radio"/>	I = (A10, B10) → (1760.17, 14.8)	⋮
<input checked="" type="radio"/>	I1 = {A, B, C, D, E, F, G, H, I} → {(17296.1, 31.21), (14588.03, 23.56), (11755.01, 25.49), (9879.36, 24.33), (7559.09, 22.63), (5678.15, 20.38), (4143.35, 18.37), (2906.92, 16.66), (1760.17, 14.8)}	⋮
<input type="radio"/>	Entrada...	

Figura 5.5 Listado de los nueve puntos a plotear en el entorno gráfico de GeoGebra.

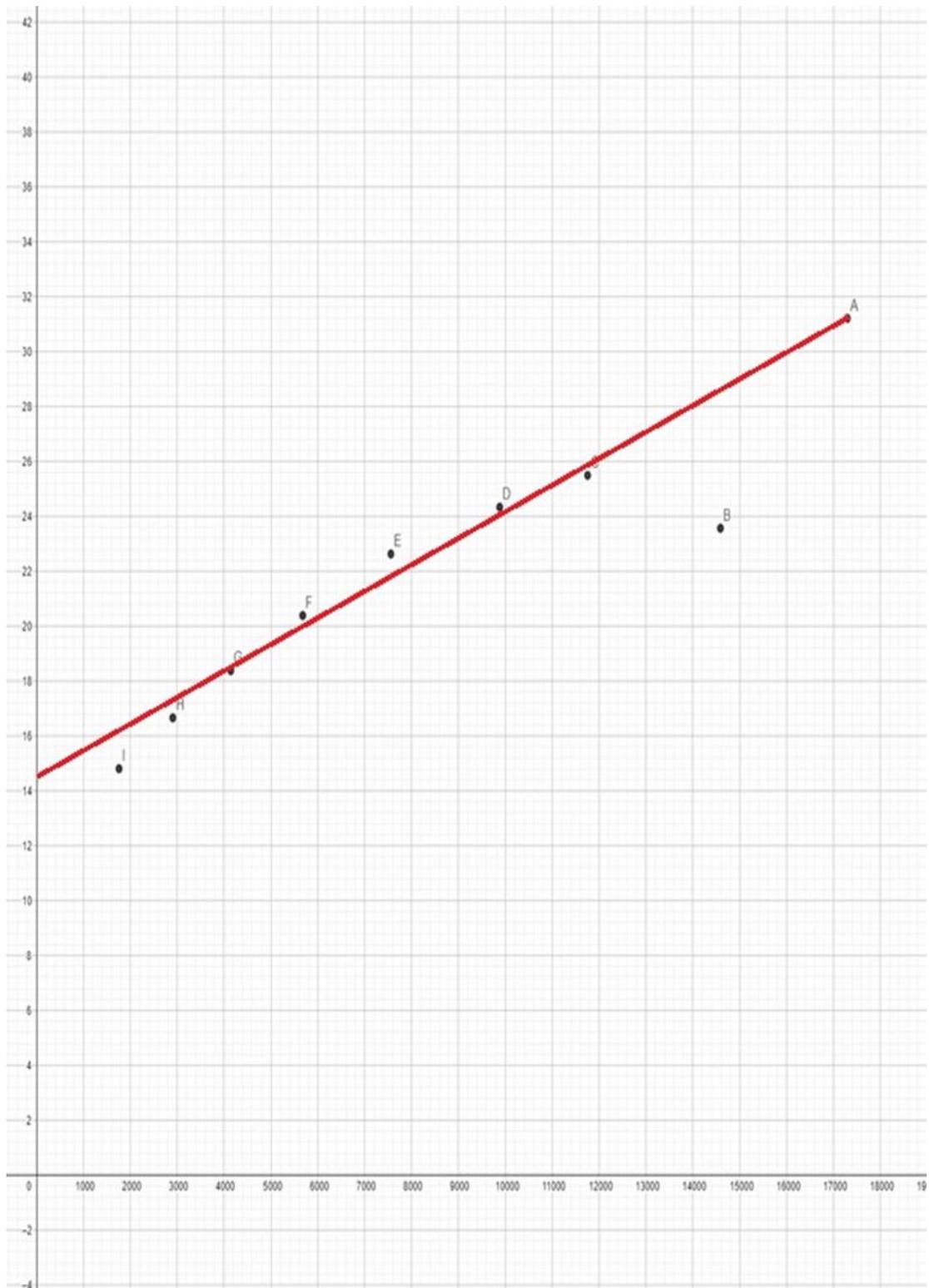


Figura 5.6 Gráfico de $(P_{Fe} + P_m)$ vs V_0^2 plotado en GeoGebra.

Del gráfico se puede observar que cada división en el eje de las pérdidas equivale a 0.4 WAl y trazar la curva de color rojo a mano y prolongarla hasta que toque el eje $(P_{Fe} + P_m)$ se puede estimar que las pérdidas mecánicas gráficamente son de:

$$P_m = 14.4 W$$

Determinación de las pérdidas mecánicas P_m a través de la regresión lineal modelo $y = a_1x + a_0$.

A continuación, se va aplicar a los datos de las columnas V_0^2 y $(P_{Fe} + P_m)$ de la tabla 5.10 un análisis de regresión lineal en busca de una ecuación para evaluar directamente las condiciones $V_0 = 0$; $P_{Fe} = 0$ y así determinar las pérdidas mecánicas P_m .

Nº Medicion	V_0^2	$(P_{Fe} + P_m)$	$V_0^2 \times (P_{Fe} + P_m)$	$(V_0^2)^2$	$(P_{Fe} + P_m)^2$	Prom (V_0^2)	Prom ($P_{Fe} + P_m$)
1	17296.0957	31.2089063482	539792.2306	299154926	973.99583544828	8396.240578	21.9383855932
2	14588.0255	23.56397565	343751.8785	212810489	555.26094866848		
3	11755.0147	25.49249573	299664.6609	138180369	649.86733871174		
4	9879.35712	24.33280038	240392.4246	97601697	592.08517437241		
5	7559.08576	22.62625659	171033.814	57139777.5	511.94748721166		
6	5678.14799	20.38456412	115746.5718	32241364.6	415.53045452498		
7	4143.34605	18.37364222	76128.35786	17167316.5	337.59072840597		
8	2906.92033	16.65849279	48424.91135	8450185.8	277.50538200969		
9	1760.17208	14.8043365	26058.17972	3098205.74	219.16837921784		
Sumatoria	75566.1652	197.4454703389	1860993.029	865844332	4532.95172857106		

Tabla 5.11 Tabla de datos para el análisis de la regresión lineal.

Como se muestra en el gráfico de la figura 5.7 se puede observar que el cuadrado de la tensión de vacío V_0^2 ha provocado que la tendencia exponencial que presentan comportamiento en vacío del motor se comporte como una línea recta.

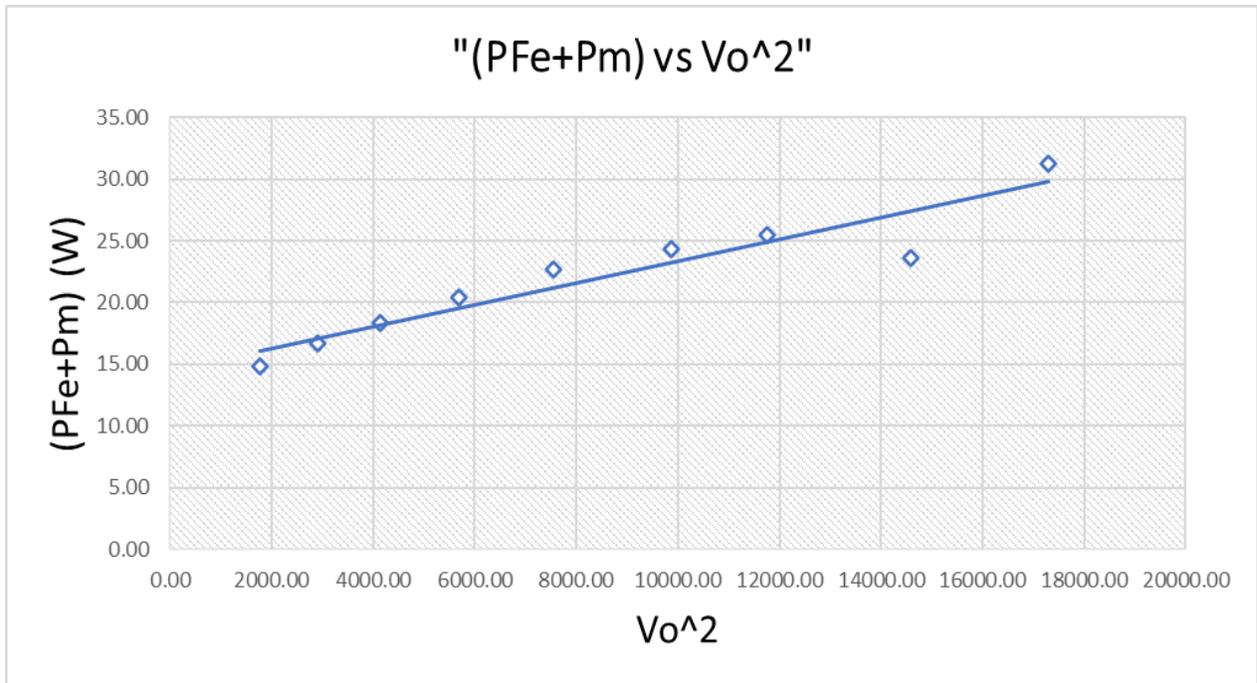


Figura 5.7 Representación gráfica de la suma de pérdidas ($P_{Fe} + P_m$) vs V_0^2 .

➤ **Cálculo de a_1 :**

$$a_1 = \frac{n(\sum_{i=1}^n V_0^2 \times (P_{Fe} + P_m)) - \sum_{i=1}^n V_0^2 \times \sum_{i=1}^n (P_{Fe} + P_m)}{n \sum_{i=1}^n V_0^2 - [\sum_{i=1}^n V_0^2]^2}$$

$$a_1 = \frac{9 \times 1860993.029 - 75566.1652 \times 197.4454703389)}{9 \times 865844332 - (75566.1652)^2}$$

$$a_1 = 0.000878208$$

➤ **Cálculo de a_0 :**

$$a_0 = \overline{(P_{Fe} + P_m)} - a_1 \overline{V_0}$$

$$a_0 = 21.9383855932 - 0.000878208 \times 8396.24058$$

$$a_0 = 14.56473757$$

➤ **Cálculo del coeficiente de correlación:**

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n (V_0^2 \times (P_{Fe} + P_m)) - \sum_{i=1}^n V_0^2 \times \sum_{i=1}^n (P_{Fe} + P_m)}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n (V_0^2)^2 - [\sum_{i=1}^n V_0^2]^2} \times \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n (P_{Fe} + P_m)^2 - [\sum_{i=1}^n (P_{Fe} + P_m)]^2}}$$

$$= \frac{9 \times 1860993.029 - 75566.1652 \times 197.4454703389}{\sqrt{9 \times 865844332 - (75566.1652)^2} \times \sqrt{9 \times 4532.95172857106 - (197.4454703389)^2}}$$

$$r = 0.94148507$$

➤ **Ecuación resultante:**

$$(P_{Fe} + P_m) = a_1 V_0^2 + a_0$$

$$(P_{Fe} + P_m) = 0.000878208 V_0^2 + 14.56473757$$

- Evaluando las condiciones $V_0^2 = 0$ y $P_{Fe} = 0$ en la ecuación del análisis de regresión lineal se tiene:

$$(0 + P_m) = 0.000878208(0) + 14.56473757$$

$$P_m = 14.56473757 \text{ W}$$

- Ahora ya se pueden calcular las pérdidas del hierro P_{Fe} :

A tension nominal 230V se calculo:

$$(P_{Fe} + P_m) = 31.2089063 \text{ W}$$

Sustituyendo las P_m encontradas:

$$P_{Fe} = 31.2089063 \text{ W} - 14.56473757 \text{ W}$$

$$P_{Fe} = 16.64416873 \text{ W}$$

Cálculo de los parámetros de la rama paralelo en vacío del circuito equivalente.

➤ **Calculo del factor de potencia en vacío:**

$$\cos \varphi_m = \text{FP} = \frac{P_{\text{Fe}}}{3 \times V_{1n} \times I_0}$$

$$= \frac{16.64416873}{3 \times 131.51462159114 \times 0.611139999491251}$$

$$\cos \varphi_m = \text{FP} = 0.069022812961$$

$$\varphi_m = \cos^{-1}(0.069022812961) = 86.04183188^\circ \text{ (atraso)}$$

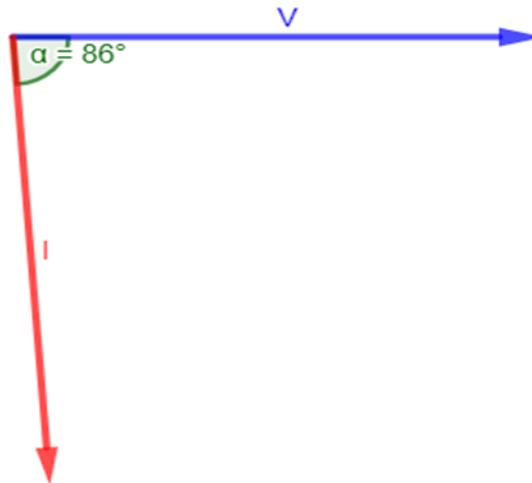


Figura 5.8 Diagrama fasorial de la tensión y la corriente en vacío.

➤ **Calculo de las componentes de la corrientes:**

$$I_{\text{FE}} = I_0 \cos \varphi_m = 0.611139999491251 \times \cos(-86.04183188^\circ)$$

$$I_{\text{FE}} = 0.04218260188 \text{ A}$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_m = 0.611139999491251 \times \sin(-86.04183188^\circ)$$

$$I_{\mu} = 0.6096822557 \text{ A}$$

➤ **Calculo de la resistencia de magnetizacion:**

$$R_{\text{FE}} = \frac{V_{1n}}{I_{\text{FE}}} = \frac{131.51462159114}{0.04218260188}$$

$$R_{FE} = 3.12 \text{ K}\Omega$$

➤ **Calculo de la impedancia de entrada en vacio:**

$$|X_{eq}| = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}} = \frac{131.51462159114}{0.6096822557}$$

$$|X_{eq}| = 215.71 \Omega = X_1 + X_M$$

El circuito de la rama paralelo es:

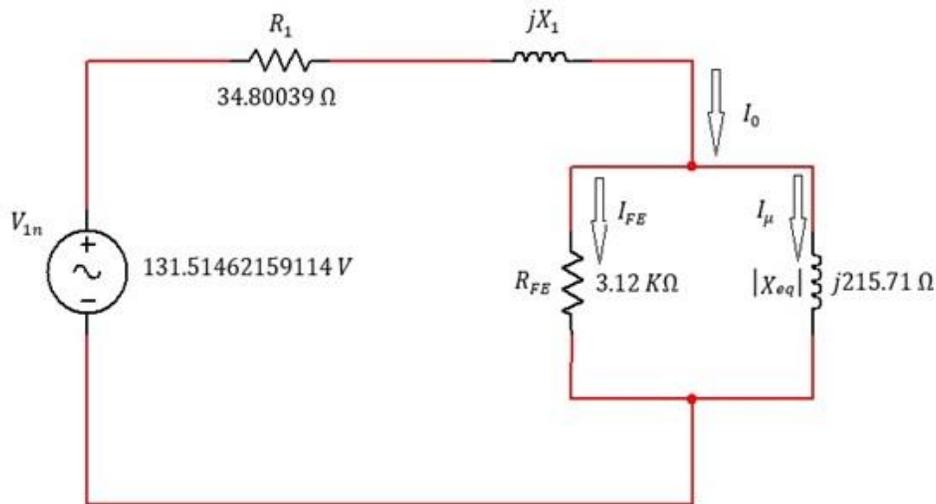


Figura 5.9 Circuito de la rama paralela de vacío.

Las pérdidas del hierro P_{Fe} que resultaron de 16.64416873 W están siendo disipadas en la resistencia de magnetización de 3.12KΩ, las perdidas mecánicas P_m fueron de 14.56473757 W.

5.4 Prueba de rotor bloqueado modelo a baja frecuencia.

En la tabla 5.12 están representados todos los datos que fueron obtenidos del análisis de la sección 4.14 los datos pertenecen a la prueba de rotor bloqueado que fue realizada al motor trifásico ensayado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE-UES.

Durante la prueba se le impidió al motor que desarrolle su torque por medio del freno mecánico que se diseñó en la sección 4.7 y que se le instalo al eje del motor previo al ensayo, de esta manera se consiguió que el deslizamiento sea unitario ($S = 1$) cumpliendo así la primera condición de la prueba, la segunda condición la impone la tensión y la frecuencia como se va estudiar el parámetro eficiencia fue necesario disminuir la frecuencia, con ciertas limitaciones se pudo disminuir la frecuencia hasta un valor aproximado del 36% de la frecuencia nominal del motor es decir unos

21.8 Hz, esto fue posible mediante el uso del sistema moto-generador de la maquina universal de pruebas Hampden.

El análisis de la prueba de rotor bloqueado va proveer información sobre el factor de potencia, ángulo de la impedancia, la resistencia del rotor, reactancias, y un análisis a baja frecuencia produce un cálculo más exacto de la resistencia del rotor y las reactancias ya que ambas dependen de las frecuencias bajas.

V_{RN} (V)	V_{SN} (V)	V_{TN} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	$P_{3\phi}$ (W)	f (Hz)
27.042961	26.559204	26.453898	0.965732	0.949148	0.928710	74.7122087	21.80

Tabla 5.12 Mediciones de tensión, corriente y potencia del ensayo de rotor bloqueado.

Representación de la tensión y corriente a valores promedio

El motor tiene una configuración estrella – estrella, por lo que las mediciones fueron tomadas de forma similar al ensayo de vacío, tres mediciones de tensión de fase a neutro y tres mediciones de corriente de fase, pero para dar inicio con el análisis se debe expresar la tensión y corriente de la tabla 5.12 en valores promedio con las expresiones siguientes:

$$V_{RB} = \frac{V_{RN} + V_{SN} + V_{TN}}{3} \quad I_{RB} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

V_{RB} (V)	I_{RB} (A)	$P_{3\phi}$ (W)	f (Hz)
26.685354	0.947863	74.7122087	21.80

Tabla 5.13 Representación de las mediciones de corriente y tensión en valores promedio.

5.1.1.1 Cálculo de los parámetros de la rama serie del circuito equivalente

➤ Cálculo del factor de potencia y el ángulo de la impedancia a rotor bloqueado:

$$\begin{aligned} \cos \varphi = FP &= \frac{P_{ent}}{3 \times V_T \times I_L} \\ &= \frac{74.7122086956522}{3 \times 26.68535410 \times 0.94786344} \\ \cos \varphi = FP &= 0.9845812894 \\ \varphi &= \cos^{-1}(0.9845812894) = 10.07444813^\circ \text{ (atraso)} \end{aligned}$$

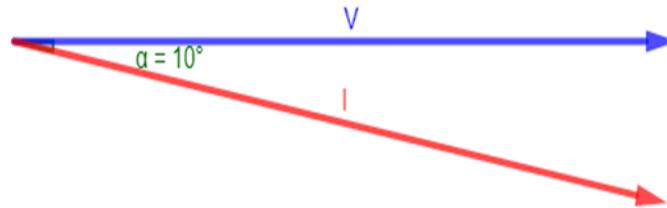


Figura 5.10 Diagrama fasorial de la tensión y corriente de la prueba de rotor bloqueado.

➤ **Calculo de la magnitud de la impedancia de rotor bloqueado:**

$$|Z_{RB}| = \frac{V_T}{I_L} = \frac{26.68535410}{0.94786344}$$

$$|Z_{RB}| = 28.15316318 \Omega$$

➤ **La impedancia total es:**

$$Z_{RB} = R_{RB} + jX'_{RB} = |Z_{RB}| \cos \varphi + j|Z_{RB}| \sin \varphi$$

➤ **Calculo de la resistencia del rotor bloqueado:**

$$R_{RB} = |Z_{RB}| \cos \varphi = R_1 + R_2$$

$$R_{RB} = 28.15316318 \times \cos(10.07444813^\circ)$$

$$R_{RB} = 27.7190777 \Omega$$

Ahora ya se puede determinar el valor de R_2 :

$$R_{RB} = R_1 + R_2$$

R_1 es el valor de la resistencia del estator que fue determinado en la prueba DC.

$$R_2 = R_{RB} - R_1$$

$$R_2 = 27.7190777 - 34.80039$$

$$R_2 = 7.0813123 \Omega$$

➤ **Calculo de la reactancia a frecuencia de prueba 21.8Hz:**

$$X'_{RB} = |Z_{RB}| \sin \varphi$$

$$X'_{RB} = 28.15316318 \times \sin(10.07444813^\circ)$$

$$X'_{RB} = 4.924766827 \Omega$$

Encontrada la reactancia del rotor a la frecuencia de prueba, ahora se puede calcular la reactancia total equivalente a frecuencia industrial de operación.

➤ **Calculo de la reactancia total equivalente a 60Hz:**

$$X_{RB} = \frac{f_{nom}}{f_{prueba}} \times X'_{RB} = X_1 + X_2$$

$$\left(\frac{60\text{Hz}}{21.8\text{Hz}}\right) \times 4.924766827 = X_1 + X_2$$

$$13.55440411 \Omega = X_1 + X_2$$

➤ **Calculo de la reactancia del rotor:**

$$X_2 = X_{RB} \sin \varphi$$

$$X_2 = 13.55440411 \times \sin(10.07444813^\circ)$$

$$X_2 = 2.371040131 \Omega$$

➤ **Calculo de la reactancia del estator:**

$$X_1 = X_{RB} - X_2$$

$$X_1 = 13.55440411 - 2.371040131$$

$$X_1 = 11.18336398 \Omega$$

➤ **Calculo de la reactancia de magnetizacion:**

$$|X_{eq}| = X_1 + X_M$$

$$X_M = |X_{eq}| - X_1$$

$$X_M = 215.71 - 11.18336398$$

$$X_m = 204.526636 \Omega$$

Circuito equivalente:

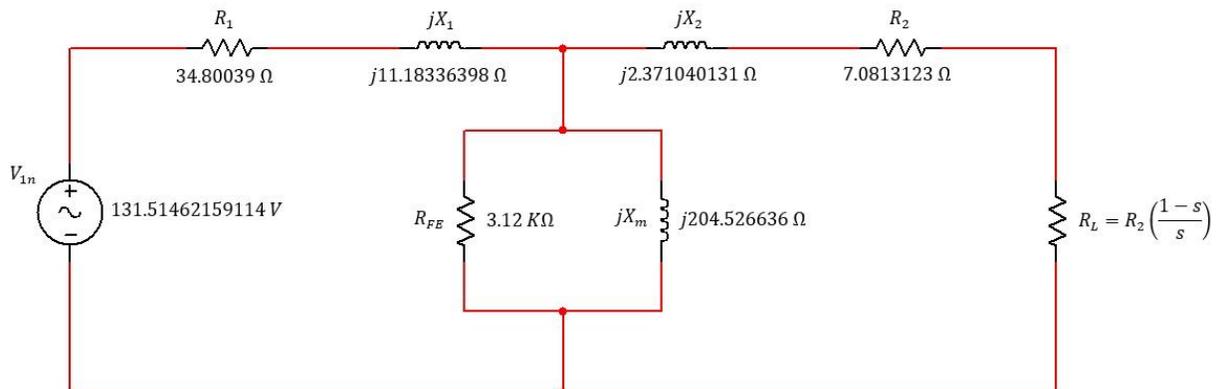


Figura 5.11 Circuito equivalente del motor trifásico de inducción.

5.5 Solución del circuito equivalente.

Con el desarrollo de los ensayos de laboratorio y sus análisis hechos en las secciones anteriores se ha logrado encontrar el circuito equivalente del motor el cual es mostrado en la figura 5.12, como se puede observar el único parámetro desconocido del circuito es la resistencia de carga R_L que a su vez tiene dependencia del deslizamiento que pueda experimentar la máquina.

Como el deslizamiento (S) varia con la carga que se le conecta al motor, entonces para definir completamente el circuito equivalente y proceder a la solución, primero se necesita conocer el deslizamiento (S) cuando la maquina opera en condiciones nominales, este se puede calcular utilizando la velocidad sincrónica N_s , y la velocidad rotorica N_r , esta última medida a plena carga.

La velocidad síncrona N_s es fija ya que depende del número de polos y la frecuencia, es decir depende de los aspectos constructivos del motor, mientras que la velocidad rotorica N_r generalmente es un dato conocido que se encuentra en la placa característica que proporciona el fabricante.

Con el deslizamiento obtenido se procede a definir una resistencia de carga R_L que simula las condiciones de operación a plena carga del motor lo que define por completo el circuito equivalente, luego se procede a dar solución mediante teoría y análisis de circuitos eléctricos.

Datos de placa del motor necesarios para el cálculo del deslizamiento S :

polos = 2

Frecuencia = 60Hz

Velocidad nominal del rotor a plena carga $N_r = 3370$ RPM

Velocidad síncrona:

$$N_s = \frac{120 \times f}{\# \text{ polos}}$$

$$= \frac{120 \times 60}{2}$$

$$N_s = 3600 \text{ RPM}$$

➤ **Calculo del deslizamiento S:**

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{3600\text{RPM} - 3370\text{RPM}}{3600\text{RPM}}$$

$$S = 0.06389$$

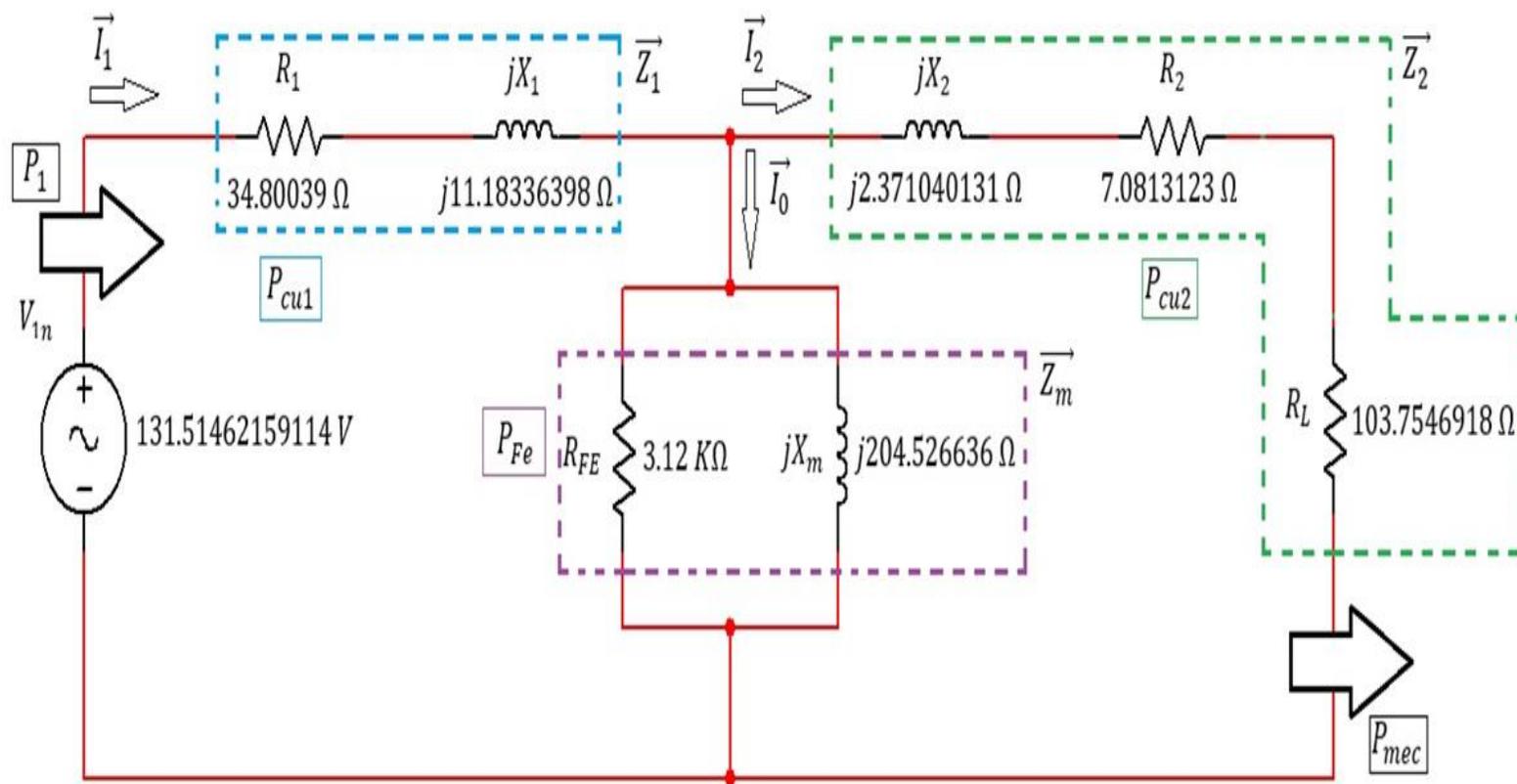
$$S = 6.39\%$$

➤ **La resistencia de carga seria:**

$$R_L = R_2 \times \left(\frac{1-s}{s} \right)$$

$$R_L = 7.0813123 \times \left(\frac{1 - 0.06389}{0.06389} \right) = 103.7546918 \Omega$$

Figura 5.12 Circuito equivalente para un deslizamiento del 6.39%



- **Calculo de las impedancia \vec{Z}_1 :**

$$\vec{Z}_1 = (R_1 + jX_1)$$

$$\vec{Z}_1 = 34.80039 + j11.18336398$$

$$\vec{Z}_1 = 36.55317735 \angle 17.81519456^\circ \Omega$$

- **Calculo de las impedancia \vec{Z}_2 :**

$$\vec{Z}_2 = (R_2 + R_L) + jX_2$$

$$\vec{Z}_2 = (7.0813123 + 103.7546918) + j2.371040131$$

$$\vec{Z}_2 = 110.8360041 + j2.371040131$$

$$\vec{Z}_2 = 110.8613622 \angle 1.225503176^\circ \Omega$$

- **Calculo de las impedancia \vec{Z}_m :**

$$\vec{Z}_m = R_{FE} \parallel jX_m = \frac{R_{FE} \times jX_m}{R_{FE} + jX_m}$$

$$= \frac{(3.12 \times 10^3) \times (j204.526636)}{(3.12 \times 10^3) + (j204.526636)}$$

$$\vec{Z}_m = 13.35004972 + j203.6514947$$

$$\vec{Z}_m = 204.0885963 \angle 86.24943257^\circ \Omega$$

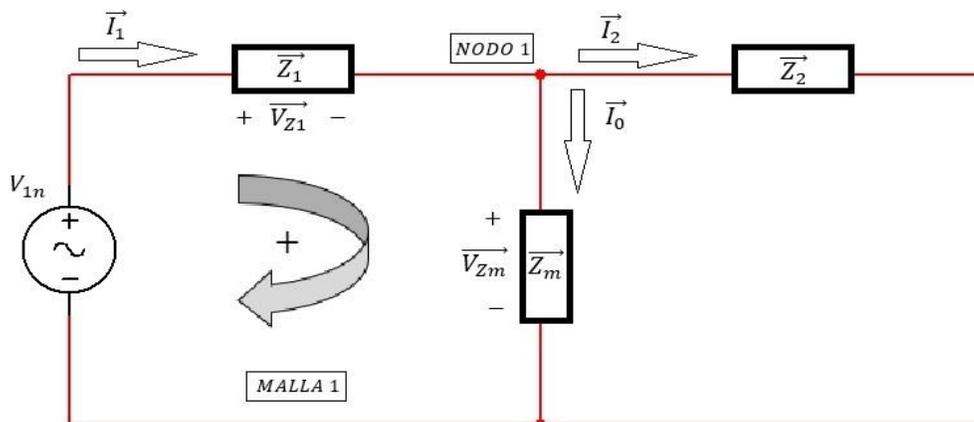


Figura 5.13 Impedancias de cada rama del circuito equivalente.

➤ **Calculo de la impedancia total:**

$$\vec{Z}_T = (\vec{Z}_2 \parallel \vec{Z}_m) + \vec{Z}_1 = \frac{(\vec{Z}_2 \times \vec{Z}_m)}{(\vec{Z}_2 + \vec{Z}_m)} + \vec{Z}_1$$

$$= \frac{(110.8613622 \angle 1.225503176^\circ) \times (204.0885963 \angle 86.24943257^\circ)}{(110.8613622 \angle 1.225503176^\circ) + (204.0885963 \angle 86.24943257^\circ)} + (36.55317735 \angle 17.81519456^\circ)$$

$$\vec{Z}_T = 117.4138952 + j56.14274137 \Omega$$

$$\vec{Z}_T = 130.14618777 \angle 25.55530643^\circ \Omega$$

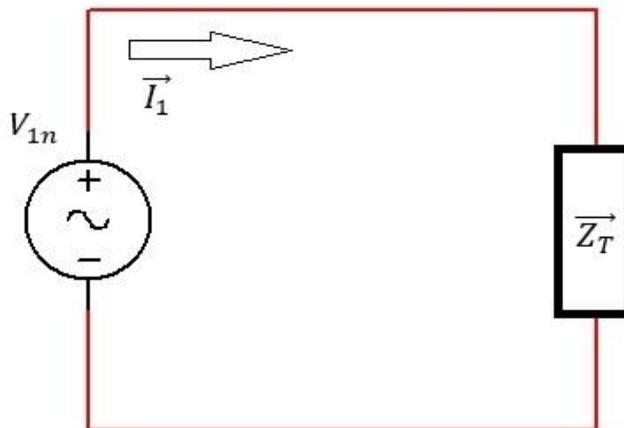


Figura 5.14 Circuito equivalente del motor trifásico representado en una sola impedancia total.

➤ **Calculo de la corriente \vec{I}_1 :**

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_{1n}}{\vec{Z}_T}$$

$$\vec{I}_1 = \frac{131.51462159114 \angle 0}{130.14618777 \angle 25.55530643^\circ}$$

$$\vec{I}_1 = 0.9116552409 - j0.4359179494 \text{ A}$$

$$\vec{I}_1 = 1.01051459 \angle -25.55530643^\circ \text{ A}$$

Aplicando LK en la malla 1 del circuito de la figura 5.12:

$$\overrightarrow{V_{Z1}} + \overrightarrow{V_{Zm}} - \overrightarrow{V_{1n}} = 0$$

$$\overrightarrow{V_{Zm}} = \overrightarrow{V_{1n}} - \overrightarrow{V_{Z1}}$$

$$\overrightarrow{V_{Zm}} = \overrightarrow{V_{1n}} - \overrightarrow{I_1} \times \overrightarrow{Z_1}$$

$$\overrightarrow{V_{Zm}} = (131.51462159114 \angle 0) - (1.01051459 \angle -25.55530643^\circ) \times (36.55317735 \angle 17.81519456^\circ)$$

$$\overrightarrow{V_{Zm}} = 94.91363457 + j4.974742262 \text{ V}$$

$$\overrightarrow{V_{Zm}} = 95.04391663 \angle 3.000318734 \text{ V}$$

➤ **Calculo de la corriente I_0 :**

$$\overrightarrow{I_0} = \frac{\overrightarrow{V_{Zm}}}{Z_m}$$

$$\overrightarrow{I_0} = \frac{95.04391663 \angle 3.000318734}{204.0885963 \angle 86.24943257^\circ}$$

$$\overrightarrow{I_0} = 0.05474423663 - j0.4624704396$$

$$\overrightarrow{I_0} = 0.465699301 \angle -83.24911384^\circ \text{ A}$$

Aplicando LCK en el nodo 1 del circuito de la figura 4.42:

$$\overrightarrow{I_1} = \overrightarrow{I_0} + \overrightarrow{I_2}$$

$$\overrightarrow{I_2} = \overrightarrow{I_1} - \overrightarrow{I_0}$$

$$= (1.01051459 \angle -25.55530643^\circ) - (0.465699301 \angle -83.24911384^\circ)$$

$$\overrightarrow{I_2} = 0.8569110042 + j0.02655249024$$

$$\overrightarrow{I_2} = 0.857322287 \angle 1.774815579^\circ \text{ A}$$

- **Calculo de la potencia de entrada P_1 :**

$$S_1 = \overline{V}_{1n} \times \overline{I}_1 = P + jQ$$

$$= (131.51462159114 \angle 0) \times (1.01051459 \angle 25.55530643^\circ)$$

$$S_1 = 132.8974439 \angle 25.55530643$$

$$S_1 = \underbrace{119.895994}_{P(W)} + \underbrace{j57.32958416}_{Q(VAR)}$$

$$P(W) \qquad Q(VAR)$$

$$Q_1 = 3 \times 57.32958416 = 171.9887525 \text{ VAR}$$

$$P_1 = 3 \times 119.895994 = 359.687982 \text{ W}$$

- **Calculo de las perdidas del cobre P_{cu1} :**

$$P_{cu1} = 3 \times I_1^2 \times R_1$$

$$P_{cu1} = 3 \times (1.01051459)^2 \times 34.80039$$

$$P_{cu1} = 106.6081832 \text{ W}$$

- **Calculo de las perdidas del cobre P_{cu2} :**

$$P_{cu2} = 3 \times I_2^2 \times R_2$$

$$P_{cu2} = 3 \times (0.857322287)^2 \times 7.0813123$$

$$P_{cu2} = 15.61432557 \text{ W}$$

- **Calculo de la potencia mecánica de salida P_{mec} :**

$$P_{mec} = 3 \times I_2^2 \times R_L$$

$$P_{mec} = 3 \times (0.857322287)^2 \times 103.7546918$$

$$P_{mec} = 228.7795635 \text{ W}$$

- **Calculo del par de salida T :**

$$T = \frac{3 \times 60 \times I_2^2 \times R_2}{2\pi \times N_s \times S}$$

$$T = \frac{3 \times 60 \times (0.857322287)^2 \times 7.0813123}{2\pi \times 3600 \times 0.06389}$$

$$T = 0.64827492 \text{ N} \cdot \text{m}$$

➤ **Calculo de la eficiencia η :**

$$\eta = \frac{P_{\text{mec}}}{P_1}$$

$$\eta = \frac{228.7795635}{359.687982}$$

$$\eta = 0.6360500627$$

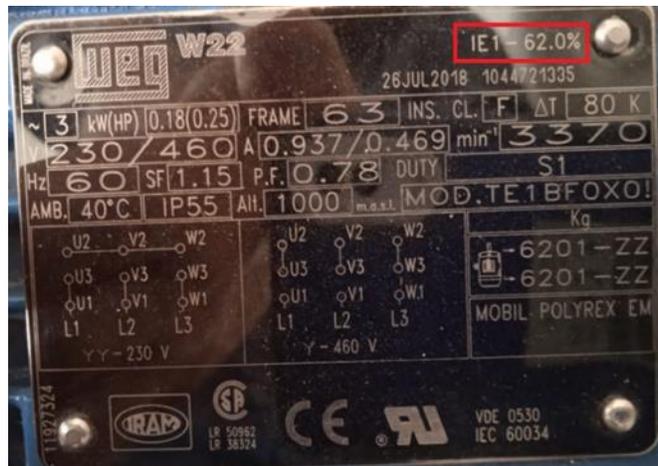
$$\eta = 63.6\%$$

➤ **Calculo del error:**

$$\eta_{\text{error}} = \frac{\eta_{\text{calculada}} - \eta_{\text{placa}}}{\eta_{\text{placa}}} \times 100$$

$$\eta_{\text{error}} = \frac{63.6\% - 62\%}{62\%} \times 100$$

$$\eta_{\text{error}} = 2.58\%$$



El siguiente script realizado en octave, grafica la eficiencia y par en función del deslizamiento, el código resuelve múltiples soluciones del circuito equivalente de la figura 5.15 para la eficiencia y par en un rango de deslizamientos de 0 a 1, el programa se llama **calc_motores.m** y se encuentra en el disco del trabajo de graduación.

```

1  ##FUNCION QUE GRAFICA LA EFICIENCIA Y PAR EN FUNCION DEL DESLIZAMIENTO##
2  function calc_motores(Nr=3370, f=60, polos=2, steps=1000)
3  ###PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE
4  V1N=131.51462159114;
5  R1=34.80039;
6  R2=7.0813123;
7  X1=11.18336398i;
8  X2=2.371040131i;
9  RFE=3.12E3;
10 XM=204.526636i;
11 ##CALCULO DE LA IMPEDANCIA Z1
12   Z1=R1+X1;
13 ##CALCULO DE LA IMPEDANCIA ZM
14   ZM=(RFE*XM)/(RFE+XM);
15 #####
16   s = 0:1/steps:1;
17   for i = 0: length(s)-1;
18   ##CALCULO DE LA VELOCIDAD SINCRONA
19     Ns=120*f/polos;
20   ##CALCULO DE LA RESISTENCIA DE CARGA
21     RL(i+1)=(R2*(1-s(i+1)))/s(i+1);
22   ##CALCULO DE LA IMPEDANCIA Z2
23     Z2(i+1)=(R2+RL(i+1))+X2;
24   ##CALCULO DE LA IMPEDANCIA TOTAL
25     ZT(i+1)=((Z2(i+1)*ZM)/(Z2(i+1)+ZM))+Z1;
26   ##CALCULO DE LA CORRIENTE I1
27     I1(i+1)=V1N/ZT(i+1);
28   ##CALCULO DE VZM
29     VZM(i+1)=V1N-I1(i+1)*Z1;
30   ##CALCULO DE IO
31     IO(i+1)=VZM(i+1)/ZM;
32   ##CALCULO DE I2
33     I2(i+1)=I1(i+1)-IO(i+1);
34   ##CALCULO DE LA POTENCIA DE ENTRADA P1
35     S1(i+1)=V1N*I1(i+1);
36     P1(i+1)=real(S1(i+1))*3;
37   ##CALCULO DE LA POTENCIA MECANICA DE SALIDA PMEC
38     PMEC(i+1)=3*(real(I2(i+1))*real(I2(i+1)))*(RL(i+1));
39   ##CALCULO DEL PAR DE SALIDA:
40     T(i+1)=(3*60*(real(I2(i+1))^2)*R2)./(2*pi*Ns*s(i+1));
41   ##CALCULO DE LA EFICIENCIA
42     N(i+1)=(PMEC(i+1)/P1(i+1))*100;
43     i = i+1;
44   endfor
45   figure(1);
46   plot(s,N,"g-");
47   grid on;
48   xlabel('DESLIZAMIENTO');
49   ylabel('% EFICIENCIA');
50   title("DESLIZAMIENTO VS. EFICIENCIA");
51   figure(2);
52   plot(s,T,"r-");
53   grid on;
54   xlabel('DESLIZAMIENTO');
55   ylabel('PAR [N.M]');
56   title("DESLIZAMIENTO VS. PAR");
57   endfunction

```

Figura 5.15 Solución del circuito equivalente mediante Octave.

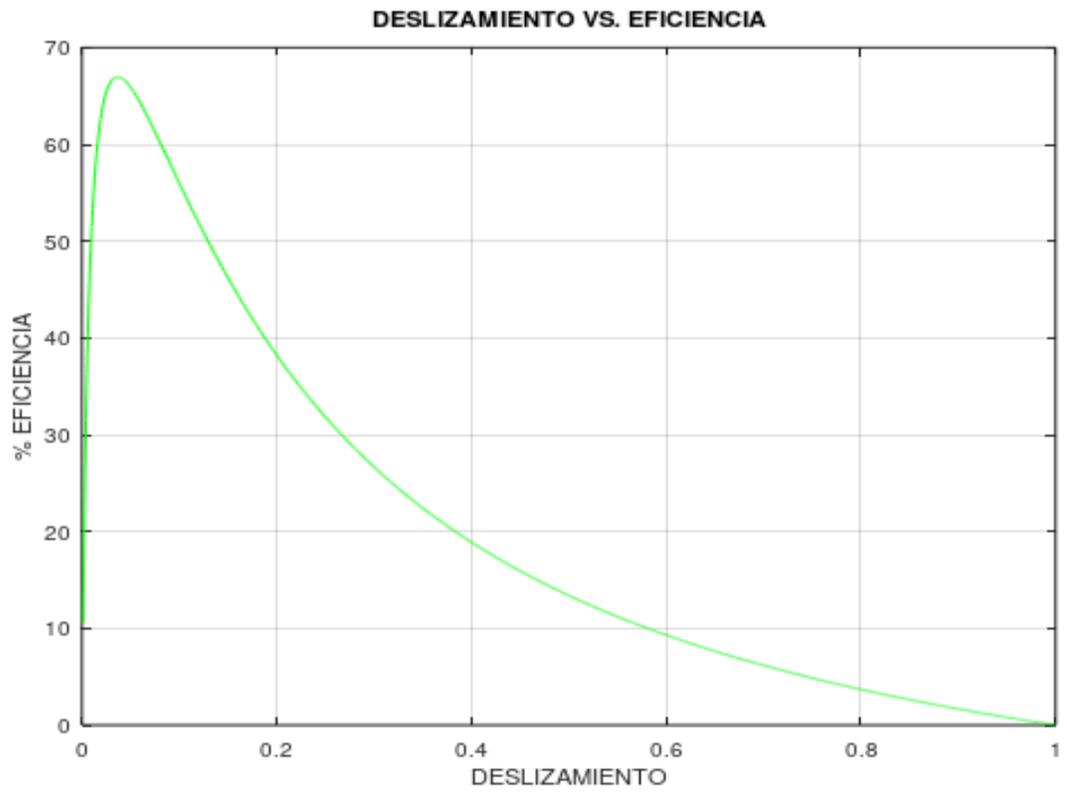


Figura 5.16 Eficiencia vrs. Deslizamiento.

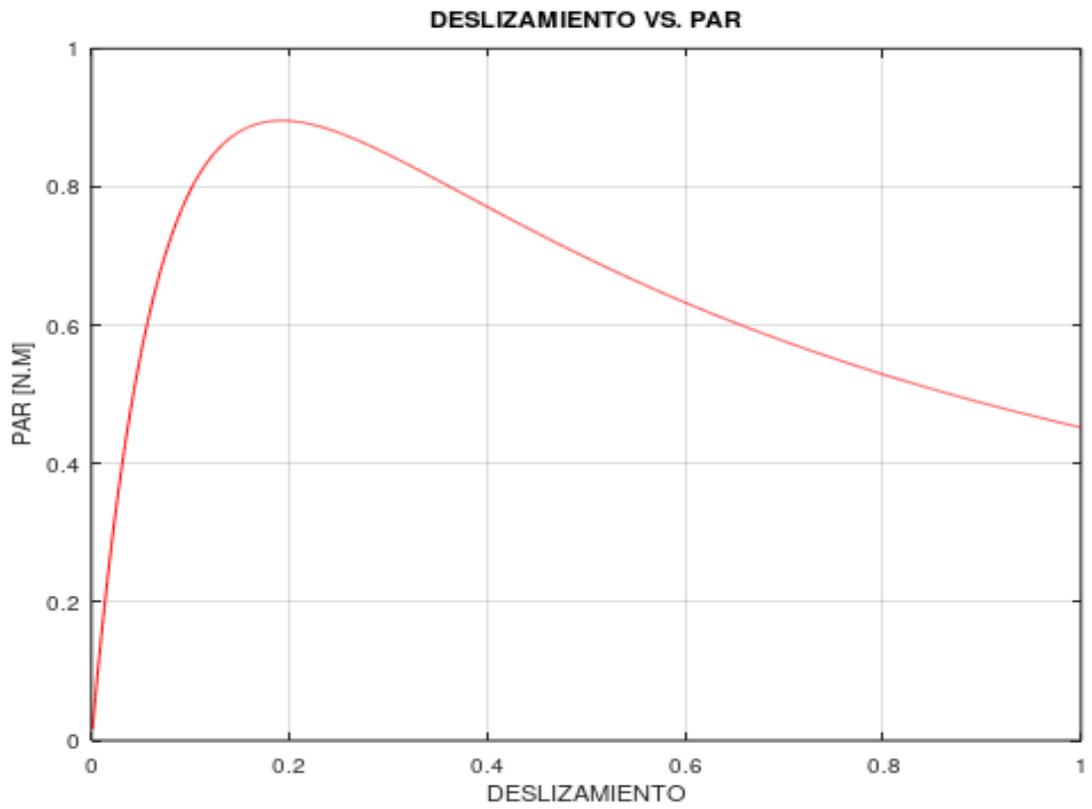


Figura 5.17 Par de salida vs. Deslizamiento.

LIMITACIONES.

❖ Prueba DC:

El módulo DL180C de Lorenzo (maquinas italianas), está diseñado para suplir una carga máxima de 5A, por arriba de ese valor las protecciones del módulo actuaran, por lo que la limitante está en la fuente DC del por lo que no se recomienda ensayar motores de corriente nominal arriba de los 5A.

❖ Prueba de VACIO:

Si se desea realizar la prueba de vacío a cualquier otro motor en particular, o a una variedad de motores, tomar en consideración que la limitante esta impuesta por el sistema de potencia es decir la FUENTE TRIFASICA DE LA MUH más TRASFORMADOR TRIFASICO, de acuerdo a las protecciones establecidas en el sistema, se pueden ensayar motores donde la tensión nominal de placa sea máxima 240V y que la demanda de corriente del motor sea máxima 9A.

❖ Prueba de rotor bloqueado:

Si se desea realizar la prueba de rotor bloqueado a motores de mayor capacidad, tomar en consideración que la prueba demanda corriente plena, por lo que el sistema tiene las siguientes limitantes:

1. Para ensayar cualquier otro motor, se tiene que tomar en cuenta que la prueba exige bloquear el eje, por lo que se debe considerar el freno más adecuado.
2. Como el método de control de velocidad del motor DC, es por reóstato externo conectado en serie con el resistor de armadura, la limitante viene impuesta por el reóstato externo, el reóstato que está disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE-UES tiene una capacidad de 20Ω , 6.1A, para ensayar el motor WEG - W22, modelo: TE1BF0X0! de $\frac{1}{4}$ HP, 0.937A, fue suficiente ya que la corriente que se midió en la armadura fue 6.5A, apenas 0.4A superior a la que el reóstato soporta, pero para el caso de ensayar un motor de mayor capacidad provocara que por la armadura del motor circulo una corriente un mayor a la que soporta el reóstato externo, por lo que para ensayar otro motor de mayor capacidad, tendrá que ser sustituido por uno que soporte una mayor corriente.

3. La otra limitante es que el alternador puede entregar 8A por línea, en el bobinado de armadura.
4. La fuente DC es capaz de entregar una corriente máxima de 30A.

CONCLUSIONES.

- ❖ Con la investigación desarrollada a la clasificación y los métodos propuestos por la norma IEEE Std 112 para determinar la eficiencia del motor de inducción, y de acuerdo a la verificación de todos los recursos disponibles con los que cuenta el laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE-UES, es como se llegó a valorar y a seleccionar como método más adecuado para desarrollar en el laboratorio; el método de rotor bloqueado modelo a baja frecuencia, que de acuerdo a la norma está clasificado dentro de los métodos a resolver por el circuito equivalente.
- ❖ Para determinar la eficiencia por el método de rotor bloqueado a baja frecuencia se necesitó de dos pruebas complementarias, la prueba óhmica y a rotor libre, esto para poder definir completamente el circuito equivalente del motor de inducción, también fue posible solventar el desarrollo de las pruebas complementarias en el laboratorio solo con el recurso disponible de laboratorio.
- ❖ Con el sistema moto-generator no fue posible desarrollar la prueba de rotor bloqueado a una frecuencia de prueba de 15Hz como lo establece estrictamente la norma IEEE Std 112, debido a que el alternador es de pequeña capacidad, sin embargo, se logró desarrollar a 21.8Hz, con esta frecuencia de prueba se determinó la eficiencia del motor WEG W22 modelo TE1BF0X0! Que tiene una eficiencia de placa de 62%, mediante el método se logró determinar una eficiencia aproximada de 63.6% obteniéndose un error del 2.58%, los resultados obtenidos son satisfactorio.
- ❖ El uso del sistema motor-generator de la maquina universal de pruebas Hampden fue indispensable para solventar el requerimiento de la baja frecuencia, la MUH resulto ser una

maquina versátil y debido a las maquinas rotativas que la conforman y al principio de reciprocidad de las mismas, permiten una variedad de configuraciones en AC y DC, y particularmente para el proyecto fue útil la configuración como fuente de generación aislada.

- ❖ La máquina universal de pruebas Hampden puede utilizarse como plataforma de pruebas a motores, y es un recurso que está en el laboratorio, pero que no se está aprovechando actualmente, es una alternativa a adquirir un banco profesional de pruebas que tiene un alto costo económico
- ❖ El diseño del freno mecánico metalúrgico resulto ser una buena opción para bloquear el eje del motor durante la prueba de rotor bloqueado a baja frecuencia, es de bajo costo económico y cumplió muy bien la función de soportar el par mecánico del motor ensayado, los frenos metalúrgicos es una buena alternativa comparada con el alto costo de un freno magnético o hidráulico.
- ❖ Todas las pruebas tienen limitaciones, y fueron establecidas en base a las capacidades nominales de las maquinas.

RECOMENDACIONES.

- ❖ Mejorar la capacidad del reóstato de control por armadura del motor DC para poder ensayar motores de mayor capacidad.
- ❖ Arreglar el cableado interno de la máquina universal de pruebas Hampden, por la antigüedad de la maquina el forro del cableado se ha cristalizado, no es seguro llevar la maquinas a toda su capacidad nominal.

- ❖ Mantenimientos con mayor regularidad.
- ❖ Diseñar una fuente DC de mayor capacidad.

BIBLIOGRAFÍA.

- Anonimo. (2021). *Electrical Deck*. Obtenido de Electrical Deck: <https://www.electricaldeck.com>
- Chapman, S. J. (Quinta edicion). *Maquinas Electricas*. Mc Graw Hill.
- Chiarena, M. A. (Sf). *Unidad 3: Motores Electricos* . 399- Taller de Electricidad.
- De Almeida, A. T. (Sf). *Normas de Motores Electricos*. Coimbra.
- De la torre, F. (Sf). *Instituto Politécnico Superior (UNR)*. Obtenido de <https://unr.edu.ar/instituto-politecnico-superior/>
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. J., & Umans, S. D. (Sexta edicion). *Maquinas Electricas*. Mc Graw Hill.
- Fraile Mora, J. (Sexta edicion). *Maquinas Electricas*.
- IEEE STD112, N. (2004). Estandar IEEE STD 112.
- IEEE, E. (s.f.). Estandar IEEE 739-1995 (Revision de IEEE Std 739-1984). *IEEE*.
- Kundur, P. (Sf). *Estabilidad y control de sistemas de energia* .
- Normas ISO, 9. (Sf). Normas ISO 9001.
- Rodriguez Pozueta, M. A. (Sf). *Maquinas Electricas I - G862*. Departamento de Ingenieria Electrica y Energetica.
- System Hampden, E. R. (Sf). *H-REM-120-CM-MP*.
- Vargas, F., & Machuca, S. (Sf). *Maquinas Electricas Rotativas*.
- Villajulca, J. C. (2012). *Frenado por Contracorriente y por Inyeccion de Corriente Continua*.
- Viloria, J. R. (Novena edicion). *Motores Electricos Automatismos de Control* .

ANEXOS.

Método de la Lissajous para determinar el desfase de ondas senoidales utilizando el osciloscopio.

Historia.

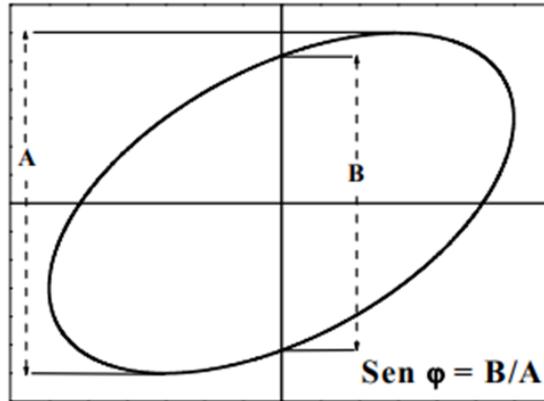
Las curvas de Lissajous fueron descubiertas por el físico francés Julio Antoine Lissajous (1822 a 1880). Lissajous estaba interesado en poder visualizar las vibraciones. Estudió las vibraciones transversales de las láminas elásticas y la composición de varios movimientos vibratorios por un procedimiento óptico. Sus experimentos más famosos implicaron diapasones y espejos. Por ejemplo, uniendo un espejo a un diapasón y enfocando una luz sobre él, Lissajous podía observar, ayudado por otro par de espejos, la luz reflejada que se torcía y daba vuelta en los espejos, al tiempo de las vibraciones del diapasón. Cuando él instaló dos diapasones perpendicularmente, con uno vibrando al doble de la frecuencia del otro, Lissajous encontró que las líneas curvadas en la pantalla se combinaban para dar lugar a una de estas curvas que hoy llevan su nombre.

Las curvas de Lissajous fueron utilizadas para determinar las frecuencias de sonidos o de señales de radio. Estas curvas permiten el estudio de los movimientos vibratorios y, particularmente, la comparación de los sonidos dados por dos instrumentos.

Medición del ángulo de fase aplicando el método de las Figuras de Lissajous

Las figuras de Lissajous pueden observarse en la pantalla del osciloscopio Agilent Technologies modelo DS01012A, con el modo x-y (pulsando la tecla 5), uno de los requisitos para que los resultados sean correctos es que la curva de Lissajous debe estar centrada en los ejes X e Y del osciloscopio. Para ello, se conectarán los dos canales a masa (GND) y se eliminará la base de tiempos, de esta forma la señal del canal I se representa en el eje vertical y la del canal II en el eje horizontal.

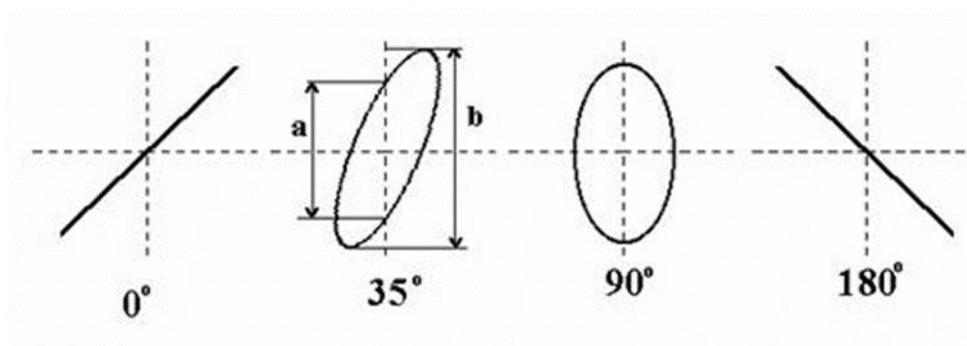
Para medir diferencia de fases es el Método de Lissajous. Se realizan las mismas operaciones que para medir frecuencia utilizando las figuras de lissajous, conectando los voltajes de igual frecuencia y amplitud, pero en otros ángulos aparecerá una elipse que por su forma se puede determinar el ángulo de desfasaje.



Este método determinará la diferencia de fase si se cumplen las siguientes condiciones:

- La frecuencia de las dos señales debe ser la misma
- La amplitud de las dos señales debe ser la misma. Si no son de la misma amplitud, los controles de ganancia vertical y horizontal del osciloscopio se deben ajustar para obtener las mismas desviaciones vertical y horizontal.
- La forma de onda debe estar perfectamente centrada.

Los diagramas siguientes son los resultados de dos señales de la misma frecuencia con ángulos de desfase de 0° , 35° , 90° y 180° .



Para hallar el ángulo de desfase entre las dos señales se mide las distancias a y b , se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{sen } \varphi = a/b \quad \varphi = \arcsen a/b$$

ya que si se tiene en el eje horizontal una señal: $x = X \cos \omega t$ y otra en el eje vertical $y = Y \cos (\omega t + \varphi)$, aparece en la pantalla una figura similar a las mostradas en la figura anterior.

Considerando el instante $\omega t = -90$ se tiene que:

$$x = 0$$

$$y = Y \text{ sen } \varphi, \quad y = a/2, \quad Y = b/2,$$

$$\text{entonces: } \text{sen } \varphi = (y/Y) = (a/b)$$

$$\text{y por tanto, } \varphi = \text{arcsen } (a/b)$$

Acoplamiento de la entrada.

Se trata de un conmutador de tres posiciones que conecta eléctricamente a la entrada del osciloscopio la señal exterior, el acoplamiento DC deja pasar la señal tal como viene del circuito exterior (es la señal real) y el acoplamiento AC bloquea mediante un condensador la componente continua que posea la señal exterior. El acoplamiento GND desconecta la señal de entrada del sistema vertical y lo conecta a masa, permitiéndonos situar el punto de referencia en cualquier parte de la pantalla (generalmente el centro de la pantalla cuando se trabaja con una sola señal).

Las Figuras de Lissajous constituyen otro medio muy conveniente para la comparación entre frecuencias que se encuentran en relaciones de valores comprendidos entre 0.1 y 10. Sin embargo, debe restringirse su aplicación a frecuencias cuya relación sea el cociente entre números enteros comprendidos entre dichos límites, a fin de evitar dificultades visuales en la observación (figuras móviles o difíciles de identificar). De esta manera, su aplicación principal, en lugar de ser la medición directa de cualquier frecuencia, es más bien la determinación de la coincidencia entre frecuencias conocidas y frecuencias que se desea medir.

Método ARÓN para determinar la potencia trifásica.

El método de los dos vatímetros (conocido como Método ARÓN) se utiliza para medir la potencia activa consumida por una carga equilibrada o desequilibrada sin hilo neutro. Las conexiones de los dos vatímetros a la red están representadas en la figura ##. Las bobinas amperimétricas se introducen en dos fases cualesquiera de la red, y las bobinas voltimétricas se conexionan entre la fase que tiene la bobina amperimétrica correspondiente y la fase restante.

Permite el empleo de un solo aparato de medida, con dos sistemas de medida y cuya escala indica directamente la potencia a medir. En el sistema Aron las tensiones aplicadas a las bobinas

voltimétricas son las tensiones de línea, el principio de la bobina voltimétrica debe estar conectado a la misma fase en la cual esta intercalada la bobina amperimétrica, y al final de la bobina Voltimétrica, debe conectarse a la fase que no tiene ninguna bobina amperimétrica intercalada (esto quiere decir a la fase libre). Entonces la potencia total trifásica será igual a la suma de los dos vatímetros.

$$P_T = P_1 + P_2$$

Nota: Al inicio se comenzó a trabajar con el analizador de redes eléctricas, pero luego fue descartado como instrumento principal de medición, debido a que la señal de la corriente presentaba distorsión producto de armónicos de estado estable, es como se tomó la decisión de descartar, pero aun necesitábamos poder medir voltaje, corrientes bajas y la potencia 3ϕ para cada nivel de tensión ensayado, en la prueba de vacío.

Para solucionar el problema incorporamos como instrumento de medición el osciloscopio Agilent Technologies modelo DS01012A, luego mediante la sonda de corriente FR100RA y la sonda de voltaje registrar todas las corrientes de fase y voltajes de línea a neutro del ensayo, y es entonces donde el uso del osciloscopio se volvió relevante en la toma de mediciones para el ensayo de vacío, como todas las corrientes de fase son inferiores a 0.61A, al ser un instrumento que los fabricantes construyan orientado más a la medición en circuitos electrónicos de baja potencia, hace que el instrumento tenga un alto grado de precisión para mediciones de corrientes y voltaje a escalas pequeñas, para el caso particular del motor ensayado en condiciones de vacío las corrientes están en el orden de miliamperios.

Es de esta forma que llegamos al punto de tomar en cuenta la aplicación del método de la Lissajous o método de Aron, a continuación, se muestran los resultados obtenidos por dicho método:

Resolución: Al analizar los valores obtenidos aplicando el método de la Lissajous o método de Aron, no fueron los datos que esperábamos, esto sucedió debido a que una de las características del método es que la elipse debe quedar estática e inmóvil y la nuestra no lo hacía, aparte contenía una alta distorsión, es por ello que se descartó el uso del método.

Si algún grupo más adelante deseara retomar el método en cuenta, deberá resolver el problema con la distorsión aplicando un TC de control y mejoramiento a la señal de la sonda de corriente, sin usar la sonda de corriente FR100RA.

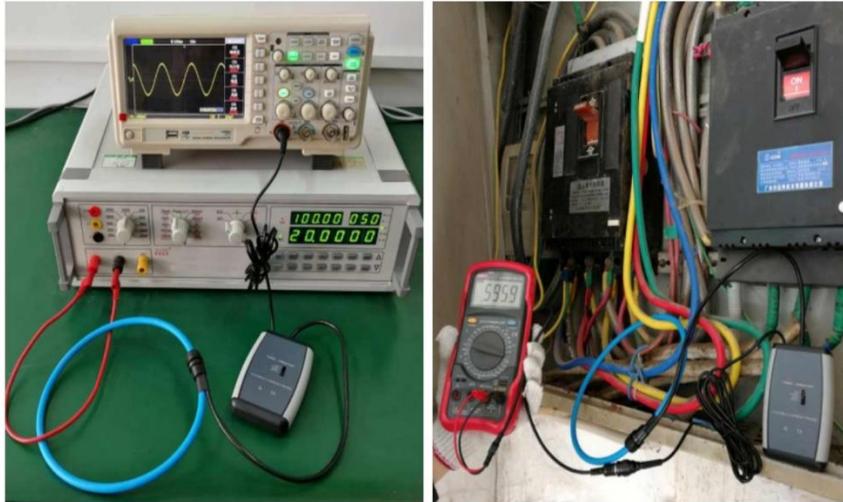
EQUIPOS Y ESPECIFICACIONES.

1) SONDA DE CORRIENTE FR100RA.

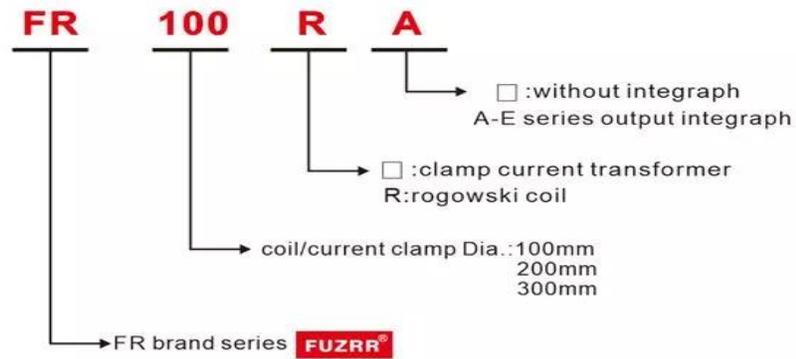


INTRODUCCIÓN DEL PRODUCTO.

El sensor de bobina rogowski de la serie FR también se incluye como sensor de corriente flexible. Es una bobina toroidal que se enrolla uniformemente sobre material no ferromagnético. No tiene efecto de histéresis, el error de fase casi nulo, sin saturación magnética y buena linealidad. La señal de salida es el diferencial de corriente frente al tiempo. Al integrar la señal de voltaje de salida, la corriente de entrada se puede restaurar verdaderamente y su rango de corriente de medición puede variar de miliamperios a millones de amperios. Se utiliza principalmente para corriente de fuga de CA, corriente alta, corriente armónica alta, corriente de forma de onda compleja, corriente de irrupción transitoria, fase, energía eléctrica, potencia, factor de potencia y otras detecciones. Con integrador, fácil de integrar a otros equipos, tales como: calibrador de campo de medidor de energía eléctrica, medidor de energía multifunción, osciloscopio, multímetro digital, instrumento de identificación de cables, detector de fallas de cables, probador de resistencia de puesta a tierra de doble pinza, voltímetros de fase de doble pinza, registradores de corriente digitales, etc., pueden medir y comparar una variedad de parámetros eléctricos en un estado ininterrumpido. El sensor de bobina rogowski de la serie FR no tiene ningún conductor de metal expuesto, las mediciones son sin contacto, seguro y confiable.



* NAMING RULES



Coil Parameters Table

Model Number	FR100R	FR200R	FR300R
Coil Length	315mm	630mm	950mm
Coil Inside Dia.	Φ 100mm	Φ 200mm	Φ 300mm
Weight	80g	100g	120g

2) Klein Tools CL150 Pinza amperimétrica, comprobador eléctrico de CA con pinza flexible de 18 pulgadas, lecturas RMS verdaderas, rango automático.



❖ Detalles de equipo: Pinza amperimétrica para medir corriente alterna

Pinza flexible de 18 pulgadas en el medidor que permite realizar mediciones en áreas de difícil acceso.

Medidor de verdadero valor eficaz CAT IV 600 V, CAT III 1000 V.

Pantalla LCD retroiluminada para lecturas claras con 3000 cuentas.

Duradero, con protección contra caídas de hasta 6,6 pies (2 m).

El apagado automático después de 15 minutos sin uso conserva la vida útil de la batería.

Indicador de batería baja y compartimento de batería de fácil acceso.

3) Fluke - 115 true rms digital multimeter



❖ Detalles de equipo:

Multímetro digital de propósito general para pruebas eléctricas y electrónicas.

Ideal para verificaciones rápidas y servicio de campo.

Presenta una gran retroiluminación LED blanca para trabajar en áreas poco iluminadas.

Mide voltaje AC y DC a 600V.

Mide corriente CA y CC hasta 10 A (sobrecarga de 20 A durante 30 segundos como máximo).

4) Osciloscopio Agilent Technologies DS01012A.



❖ Los osciloscopios de la serie 1000 de Keysight Technologies, Inc. ofrecen el rendimiento y las características que espera en un osciloscopio grande y la portabilidad y el bajo precio que necesita en uno pequeño. Hemos redefinido el alcance de la economía al brindarle captura y visualización de señales potentes, capacidades de medición avanzadas y productividad acelerada. Ya sea que su trabajo sea diseñar productos en I+D, enseñar a la próxima generación en educación o realizar pruebas en la fabricación o el servicio, los nuevos osciloscopios de la serie 1000 pueden ayudarlo a hacerlo con confianza.

❖ Características:

Ancho de banda: 100MHz.

Canales: 2.

Profundidad máxima de memoria: 20 kpts.

Tasa de muestreo máxima: 2 GSa/s.

Pantalla: 5,7 pulgadas.

Pantalla: LCD de 5,7 pulgadas.

Ancho de banda: 100 MHz.

Muestreo: 2 GSa/s.

ADC: 8 bits.

5) 3082 TES_PINZA AMPERIMÉTRICA DIGITAL.



Especificación	Descripción
Descripción	Pinza amperimétrica TRMS CA/CC
Gama DCA/ACA	CC400A/AC600A
Rango DCV/ACV	CC/CA600V
Peso	0,64 kg