



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**EVALUACIÓN, MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE DOS
MÓDULOS DIDÁCTICOS COMPUESTOS POR OCHO MÁQUINAS
ELÉCTRICAS PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LAS HOJAS GUÍAS
DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA EPN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN “INGENIERÍA ELÉCTRICA”**

ANDRÉS RODRIGO LÓPEZ VILLACRÉS

PAUL ISIDRO FIALLOS LÓPEZ

DIRECTOR: ING, HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ, PhD

Quito, junio 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Rodrigo López Villacrés y Paul Isidro Fiallos López, bajo mi supervisión.

PhD. Hugo Arcos Martínez
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Andrés Rodrigo López Villacrés y Paul Isidro Fiallos López, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente

ANDRÉS RODRIGO LÓPEZ VILLACRÉS

PAUL ISIDRO FIALLOS LÓPEZ

DEDICATORIA

A mi padre Rodrigo López, a mi madre Mariana Villacrés, a mis hermanos Sebastián y Melanie, sin ustedes mi vida no tendría sentido.

A Vane, quien es mi amiga, cómplice y confidente de vida, y a Sophie, mi gran amor, que llena de luz mi vida.

A papito Concho y a mama Anita por su amor sincero e incondicional.

Aquellos que ya no están, pero viven en mi memoria, y en mi corazón. En especial a papito Jorge (+) y mamita Rosa (+).

Andrés

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la Virgen de Agua Santa, por brindarme salud, sabiduría, fortaleza y perseverancia durante este camino. Gracias por cuidar de mi familia y permitirme llegar hasta este momento importante.

A mi papá Rodrigo y mi mamá Mariana, por el cariño, consejos, por no dejarme decaer en momentos difíciles, por apoyarme y brindarme su amor incondicional, por forjar un futuro para mí. De corazón, este logro es por y para ustedes, GRACIAS POR TODO.

A mis hermanos, Sebastián y Melanie, por sus consejos, por ser mi ruta de escape durante mi vida universitaria. Gracias por ayudarme a ser mejor persona, les deseo muchos éxitos.

A mi amor Vanessa, por sus palabras de apoyo, por incluirme en sus oraciones cada día y por el amor incondicional. De igual forma, a mi hija Sophie, quien es el motor de nuestras vidas.

A mi familia por permitirme estar a su lado, por compartir momentos buenos y malos.

A los docentes de la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, que formaron parte de mi vida universitaria. Gracias por haber compartido sus conocimientos y experiencias, que ayudaron a formarme como profesional.

A mis amigos politécnicos, quienes han sido parte de esta vida universitaria dentro y fuera de las aulas, con ustedes todo fue más llevadero.

A Damodar, por ayudar a creer en mí, y por ser parte de algo especial. Mi más grande obra es, y siempre será Damodar “Andrés Gómez (+) “.

Un agradecimiento de manera especial al Dr. Hugo Arcos y al Ing. Juan Ramírez, por su experiencia, conocimiento y por su total interés para la culminación de este trabajo.

Andrés

DEDICATORIA

A mis amados padres por todo su apoyo, su amor y por siempre creer en mí.

A mi amada esposa por ser un pilar fundamental en mi vida, por su apoyo y amor.

A mi querido hermano, por su total apoyo y por creer en mí.

A mis queridos suegros por su paciencia y cariño.

A mi amada hija, la niña que ilumina mis días con una sonrisa y la razón de mi existir.

A la memoria de mi querido amigo Erick Chilig (+) que en paz descansa.

Paul

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios y a la vida por mantener a mi familia con vida en estos momentos difíciles.

A mis padres Aurelio y Rocío, gracias por forjarme con mucha paciencia, cariño y amor, nada fue sencillo en este duro camino, pero gracias a su infinito apoyo hoy puedo cumplir este sueño, de hoy en adelante todos mis logros son de ustedes.

A mi esposa Belén, gracias por ser mi confidente, por brindarme tu amor incondicional y tu motivación en todo momento.

A mi hermano Santiago, gracias por ofrecerme tu apoyo y amistad, aunque no siempre te lo diga te quiero mucho y siempre te llevaré en mi corazón.

A mis queridos suegros, Oliverio y Cecilia, gracias por ser como mis segundos padres, desde que llegué a invadir su hogar me brindaron cariño y paciencia.

A mi hija Noelia, gracias por bombear mi corazón día a día con tus ocurrencias y ternuras.

A toda la familia, muchas gracias a todos por creer en mí y apoyarme en todo aspecto.

Al Doctor Hugo Arcos, y al Ing., Juan Ramírez, gracias por brindarnos tiempo con conocimientos y paciencia en el desarrollo de este proyecto.

A todos mis amigos y conocidos que han estado presentes en mi formación profesional en especial a mi grupo los FOSA, gracias por todas las alegrías y tristezas que hemos vivido, son las mismas vivencias las que nos harán crecer como personas.

Paul

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2 ALCANCE	2
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS	4
2.2 MÁQUINA DE INDUCCIÓN	5
2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	7
2.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE	9
2.2.3 POTENCIAS.....	10
2.2.4 MÉTODOS DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD.....	12
2.2.5 MÁQUINA DE INDUCCIÓN COMO GENERADOR	13
2.3 MÁQUINA SINCRÓNICA	14
2.3.1 CONSTRUCCIÓN	15
2.3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE	17
2.4 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA.....	21
2.4.1 CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA	21
2.4.1.1 Máquina de excitación independiente.....	22
2.4.1.2 Máquina de excitación serie	23
2.4.1.3 Máquina de excitación en derivación.....	24
2.4.1.4 Máquina de excitación compound.....	24
2.4.2 CONSTRUCCIÓN	25

2.4.3	EFICIENCIA DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.....	26
2.5	PRUEBAS DE AISLAMIENTO	27
2.5.1	FACTORES QUE AFECTAN LAS LECTURAS	28
2.5.1.1	Influencia de temperatura	29
2.5.1.2	Influencia de la humedad.....	29
2.5.2	MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	30
2.5.2.1	Método de tiempo corto	30
2.5.2.2	Método de tiempo-resistencia.....	31
2.5.2.3	Índice de polarización, IP.....	31
2.5.2.4	Relación de absorción dieléctrica (DAR).....	32
2.5.3	APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE 43-2013.....	32
CAPÍTULO III		33
METODOLOGÍA		33
3.1	INTRODUCCIÓN	33
3.2	MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS	33
3.2.1	DESMONTAJE	33
3.2.2	LIMPIEZA Y BARNIZADO	34
3.2.3	MONTAJE DE LAS MÁQUINAS.....	35
3.3	MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE CONTROL Y PROTECCIÓN	35
3.4	PARÁMETROS ELÉCTRICOS	36
3.4.1	MÁQUINAS SINCRÓNICAS.....	36
3.4.1.1	Prueba de corriente continua.....	37
3.4.1.2	Prueba en circuito abierto	38
3.4.1.3	Prueba de cortocircuito en saturación.....	39
3.4.1.4	Prueba de deslizamiento	39
3.4.1.5	Prueba de cortocircuito trifásico.....	40
3.4.1.6	Prueba de recuperación de voltaje	41
3.4.1.7	Prueba de cortocircuito súbito línea a línea	42
3.4.1.8	Prueba de desconexión de bajo voltaje a un bajo deslizamiento	43
3.4.1.9	Prueba de rechazo de carga.....	44
3.4.2	MÁQUINA DE INDUCCIÓN.....	45
3.4.2.1	Prueba de corriente continua.....	45
3.4.2.2	Prueba sin Carga.....	46
3.4.2.3	Prueba a Rotor Bloqueado	47
3.4.3	MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA	49
3.4.3.1	Prueba de corriente continua.....	49

3.4.3.2	Prueba en circuito abierto.....	50
3.4.3.3	Prueba con carga.....	51
CAPÍTULO IV	52
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	52
4.1	INTRODUCCIÓN.....	52
4.2	MANTENIMIENTO.....	52
4.2.1	MANTENIMIENTO DE LAS MÁQUINAS.....	52
4.2.2	MANTENIMIENTO DE MÓDULOS.....	58
4.3	PRUEBAS DE AISLAMIENTO.....	62
4.4	PARÁMETROS ELÉCTRICOS MÁQUINA SINCRÓNICA.....	65
4.4.1	PRUEBA DE CORRIENTE CONTINUA.....	67
4.4.1.1	Resistencia del devanado de armadura.....	67
4.4.2	PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.....	71
4.4.3	PRUEBA DE CORTO CIRCUITO SOSTENIDO.....	74
4.4.3.1	Reactancia transitoria eje directo, X'_d	78
4.4.4	PRUEBA DE DESLIZAMIENTO.....	80
4.4.4.1	Reactancia transitoria del eje de cuadratura, X_q	83
4.4.5	PRUEBA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO.....	84
4.4.5.1	Reactancia transitoria y subtransitoria eje directo, X'_d y X''_d	90
4.4.5.2	Constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo, t'_d y t''_d	91
4.4.6	PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE VOLTAJE.....	91
4.4.6.1	Constantes de tiempo transitorias y subtransitorias de circuito abierto de eje directo t'_{do} y t''_{do}	95
4.4.7	PRUEBA DE CORTOCIRCUITO BIFÁSICO SÚBITO.....	95
4.4.7.1	Reactancia subtransitoria en el eje de cuadratura, X''_q	100
4.4.8	PRUEBA DE DESCONEXIÓN DE BAJO VOLTAJE.....	102
4.4.8.1	Constante de tiempo subtransitoria de cortocircuito t''_q y subtransitoria de circuito abierto t''_{qo} de eje de cuadratura.....	106
4.4.9	PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA.....	108
4.4.9.1	Constante de inercia, H.....	111
4.4.10	RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS.....	113
4.5	PARÁMETROS ELÉCTRICOS MÁQUINA DE INDUCCIÓN.....	115
4.5.1	PRUEBA DE CORRIENTE CONTINUA.....	115
4.5.1.1	Resistencia del devanado del estator Prueba de corriente continua..	115
4.5.2	PRUEBA SIN CARGA.....	116
4.5.3	PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO.....	117

4.5.3.1	Reactancia de rotor X'_{lr} , reactancia del estator X'_{ls} y resistencia de rotor referida al estator r'_r	118
4.6	PARÁMETROS ELÉCTRICOS MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA ..	122
4.6.1	PRUEBA DE CORRIENTE CONTINUA.....	123
4.6.1.1	RESISTENCIA DE DEVANADOS DE CAMPO, DEVANADO DE ARMADURA Y DE SER EL CASO DEVANADO DE COMPENSACIÓN	123
4.6.2	PRUEBA SIN CARGA	130
4.6.2.1	Curva de magnetización	131
4.6.3	PRUEBA CON CARGA	136
4.6.3.1	Regulación de voltaje.	136
	CAPÍTULO VI.....	139
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
5.1	CONCLUSIONES.....	139
5.2	RECOMENDACIONES	141
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
	ANEXOS	145
ANEXO A.	Resultados obtenidos de las pruebas de aislamiento de las máquinas sincrónicas y máquinas CC	145
ANEXO B.	Hojas guía actualizadas para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.	145

RESUMEN

En este trabajo de titulación se presenta el procedimiento para realizar el mantenimiento y obtención de parámetros de un conjunto de máquinas eléctricas, las mismas que serán evaluadas bajo normas internacionales con el fin de rehabilitarlas y actualizar las hojas guías para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, las máquinas que componen 2 módulos se clasifican en máquinas de inducción, máquinas sincrónicas y máquinas de corriente continua, un total de 8 máquinas eléctricas, que serán usadas para realizar prácticas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional.

En la primera etapa se realiza el diagnóstico de las máquinas eléctricas mediante una evaluación visual, con la finalidad de identificar el estado de las máquinas eléctricas y proceder a realizar el mantenimiento, la limpieza íntegra, revisión de contactos y conexiones, además se realiza pruebas de aislamiento que permiten conocer con precisión el estado de cada una de las máquinas, esta prueba se realizó con el instrumento de medida Megger bajo la norma IEEE Std 43. Una vez realizada esta prueba se procede con el barnizado de cada parte constructiva y para finalizar se procede con el armado de las máquinas.

En la siguiente etapa, una vez terminado el mantenimiento, se procede a probar el funcionamiento de cada una de las máquinas para poder desarrollar las pruebas necesarias y determinar sus parámetros eléctricos. Los parámetros eléctricos siguen normas vigentes como la IEEE Std 115 para máquinas sincrónicas y la norma IEEE Std 112 para máquinas de inducción.

Una vez determinado los parámetros es necesario acoplar las máquinas de acuerdo con disposiciones que permitan realizar nuevas prácticas para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, distintas conexiones motor-generator con el fin de contribuir, en el proceso de aprendizaje a estudiantes y docentes para las distintas materias vinculadas de las facultades de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ingeniería Mecánica y Escuela de Formación de Tecnólogos.

PALABRAS CLAVE: Mantenimiento, rehabilitación, máquina de inducción, máquina sincrónica, máquina de corriente continua, aislamiento, parámetros, máquinas, normas, generador.

ABSTRACT

In this study, the procedure to perform the maintenance and obtain the parameters of a set of electrical machines is presented, which will be evaluated under international standards in order to rehabilitate them and update the guide sheets for the Electrical Machines Laboratory. The machines that make up 2 modules are classified into induction machines, synchronous machines and direct current machines, a total of 8 electric machines, which will be used for practices in the Laboratory of Electrical Machines of Escuela Politécnica Nacional.

In the first stage, the diagnosis of electrical machines is done by means of a visual evaluation in order to identify the state of the electrical machines. Maintenance, complete cleaning, check of contacts and connections are conducted. In addition, insulation tests are performed that allow to know precisely the status of each of the machines using the Megger measuring instrument under the IEEE Std 43 standard. Next, we proceed with the varnishing of each constructive part and finally the machines were assembled.

After the maintenance is finished, the operation of each of the machines is tested in order to execute the necessary tests and determine their electrical parameters. The electrical parameters follow current standards such as IEEE Std 115 for synchronous machines and the IEEE Std 112 standard for induction machines.

Once the parameters have been determined, it is necessary to dock the machines according to provisions that allow to carry out new Electrical Machine Laboratory practices as well as different motor-generator connections in order to contribute to the different subject teachers and students learning process in the faculties of Electrical and Electronic Engineering, Mechanical Engineering and the Technologist Training School.

KEYWORDS: Maintenance, rehabilitation, induction machine, synchronous machine, direct current machine, insulation, parameters, machines, standards, generator.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la Escuela Politécnica Nacional, específicamente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, existen dos módulos compuestos por máquinas de inducción, máquinas sincrónicas y máquinas de corriente continua, los cuales no son utilizados imposibilitando su uso en la realización de prácticas del laboratorio. Cabe mencionar que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas es usado por las facultades de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE), Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM) y la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT).

La rehabilitación de los módulos mencionados tiene como finalidad implementar nuevas prácticas para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas en el contexto de aprovechar de mejor manera el equipamiento existente.

Para poder cumplir el objetivo propuesto es necesario realizar el mantenimiento integral de cada módulo y de cada una de las máquinas que constituyen los módulos, además, para lograr el funcionamiento correcto se procede a determinar los parámetros eléctricos de las máquinas de corriente alterna, comprobándose el adecuado estado mecánico-eléctrico previo a actualizar las hojas guías para prácticas del laboratorio.

Este trabajo de titulación presenta información teórica-práctica de cada uno de los procesos aplicados en la rehabilitación de los módulos de máquinas eléctricas, destacándose los procedimientos encaminados a la verificación del correcto funcionamiento de las diversas partes constructivas de las máquinas, determinación de parámetros eléctricos de las máquinas de corriente alterna, rehabilitación y/o mantenimiento de las máquinas y sus sistemas de control y maniobra.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar la evaluación, mantenimiento y readecuación de 2 módulos de máquinas eléctricas existentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la investigación bibliográfica referente a los distintos grupos de máquinas presentes en los módulos.
- Realizar una evaluación del estado actual de los módulos y sus componentes.
- Ejecutar mantenimiento preventivo de las máquinas eléctricas existentes en los módulos.
- Determinar los parámetros de cada una de las máquinas con base en las normas internacionales aplicables.
- Actualizar las prácticas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas incluyendo prácticas con las máquinas rehabilitadas.

1.2 ALCANCE

- **Primera parte:**

Se realizará el Mantenimiento preventivo de las 8 máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas para lo que se plantea realizar:

Desmontaje de las máquinas: para comenzar es necesario desconectar e identificar el cableado de las borneras de cada máquina, una vez realizado esto se procede a desarmar íntegramente cada una de las máquinas; es importante realizar un etiquetado de cada parte desarmada ya que posteriormente servirá de guía en el armado.

Inspección visual: en esta etapa se revisarán los bobinados, partes móviles y fijas de las máquinas con el objetivo de notar visualmente el deterioro o alguna falla provocada por el paso del tiempo.

Pruebas de aislamiento: esta prueba se realizará con la ayuda de un instrumento de medición llamado MEGGER siguiendo la norma IEEE Std 43 [1], tanto en el rotor como en el estator de cada una de las máquinas; las pruebas se realizarán en los contactos de las bobinas del rotor con respecto al núcleo y al eje.

Limpieza íntegra: se procederá a quitar la pintura de carcasas con herramientas específicas y adecuadas, así mismo mediante un soplete se eliminarán impurezas de todos los bobinados.

Rebarnizado de bobinas: mediante líquidos especiales acorde a guías de empresas especializadas en catálogos de equipos de mantenimiento tanto en motores como en generadores industriales se procederá con el barnizado de manera uniforme y cuidadosa a cada motor en sus partes fijas y móviles, tomando en cuenta tiempos de secado.

Rearmado: se realizará el armado respectivo de cada motor sin aislar pernos o tuercas para no remorder o atascar piezas.

Repintado el chasis: se mezclará elementos líquidos necesarios y se procederá a sopletear para pintar cada motor y dejar reposar un tiempo adecuado para el respectivo secado de la pintura.

- **Segunda parte:**

Una vez que los módulos estén funcionales tanto las máquinas de corriente continua y corriente alterna, se procederá con la determinación de los parámetros eléctricos en especial de las máquinas de corriente alterna como son las de inducción y sincrónicas, todo esto se realizará mediante normas vigentes como la IEEE Std 115 [2], IEEE Std 112 [3].

- **Tercera parte:**

Se procederá con la readecuación de los diferentes grupos de máquinas eléctricas en los módulos, estos módulos serán utilizados en el laboratorio de máquinas, además, en base a esto se actualizarán las prácticas de máquinas eléctricas para el uso tanto de estudiantes como docentes de las distintas carreras de la EPN.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

Una máquina eléctrica básicamente es un convertidor de potencia que funciona transformando energía de campo magnético en energía de campo eléctrico y viceversa, es el resultado de una aplicación inteligente de los principios de electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday.

Las máquinas eléctricas rotativas son convertidores dinámicos de potencia, las máquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica son llamados generadores y las que convierten energía eléctrica en energía mecánica se denominan motores [5].

En la Figura 2.1 se representa el ciclo de transformación de energía en máquinas rotativas.

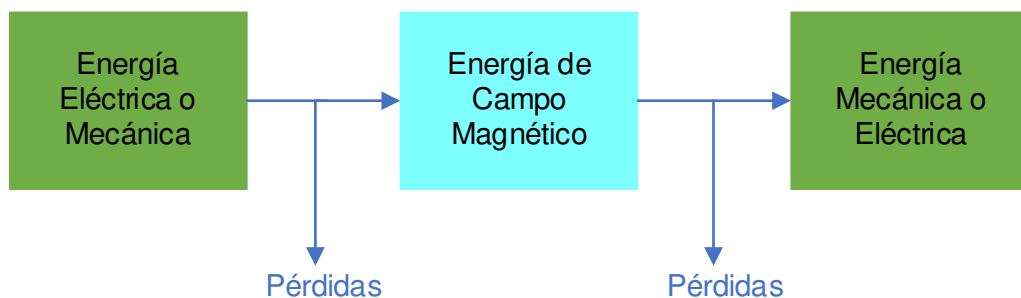


Figura 2.1. Ciclo de conversión de energía.

Cada una de las máquinas cumplen con el principio de reciprocidad electromagnética, es decir, son reversibles y pueden funcionar como generador o motor.

- **Generador**

Es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica, gracias a la interacción de una bobina (rotor) en un campo magnético (estator), obteniendo como resultado una fuerza electromotriz (f.e.m.) o voltaje inducido.

Un generador necesita una fuente de energía mecánica mediante la cual se produce energía eléctrica, cabe mencionar que existen generadores de corriente alterna y corriente continua.

- **Motor**

Este tipo de máquinas aprovechan la energía eléctrica que reciben de una fuente de corriente continua o alterna, la cual es convertida en energía mecánica. Su funcionamiento se basa en la interacción entre los campos magnéticos creados por sus bobinados que dan como resultado una fuerza de torsión que permite girar al rotor.

2.2 MÁQUINA DE INDUCCIÓN

Este tipo de máquinas son las mayormente utilizadas para convertir energía eléctrica en mecánica, su uso es común en la industria debido a su versatilidad, confiabilidad, robustez, y requerimiento para operación limitado exclusivamente a la disponibilidad de una fuente trifásica.

En los módulos del Laboratorio de Máquinas Eléctricas (objeto de la rehabilitación) se cuenta con una máquina de inducción de rotor devanado cuya fotografía se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Máquina de inducción, rotor devanado.

- **Rotor**

El rotor implica dos tipos de circuitos:

- Circuito magnético: constituido por chapas de hierro con aleación de silicio, estas chapas están aisladas entre sí con el objetivo de reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

- Circuito eléctrico: la configuración de este circuito varía según su tipo constructivo que puede ser de jaula de ardilla o rotor devanado.

La jaula de ardilla está estructurada por barras de cobre o aluminio, dependiendo de la potencia de diseño para pequeñas y medianas potencias se construye con aluminio y para potencias más elevadas con cobre [6]. Estas barras están cortocircuitadas mediante anillos que se sitúan a sus extremos, en la Figura 2.3 se observa la disposición de las barras y los anillos de la jaula de ardilla.

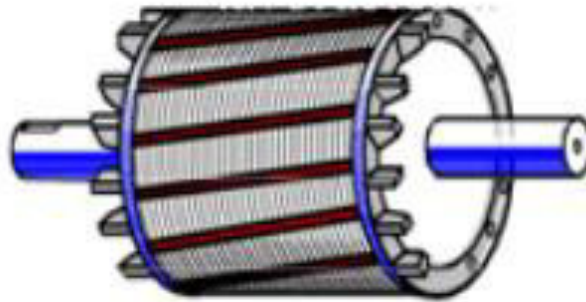


Figura 2.3. Rotor jaula de ardilla [5].

Las máquinas con rotor devanado se caracterizan por incorporar bobinados que están conectados a anillos rozantes ubicados en el eje, estos anillos están en contacto con escobillas que a su vez permiten acceder eléctricamente a los devanados desde el exterior. En la Figura 2.4 se observa el rotor devanado de la máquina mostrada en la Figura 2.2.



Figura 2.4. Rotor devanado de máquina de inducción.

- **Estator**

Conformado por:

- Circuito eléctrico: conforma tres bobinados que pueden ser conectados en Delta o Estrella para formar un bobinado trifásico.
- Circuito magnético: formado por chapas de hierro con aleación de silicio que se encuentran aisladas entre sí y forman un tambor ranurado de forma cilíndrica, las ranuras son usadas para alojar los conductores de los bobinados.

En la Figura 2.5 se puede observar el estator de la máquina de inducción de rotor devanado, que forma parte de los módulos rehabilitados.



Figura 2.5. Estator de máquina de inducción.

2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Esta máquina, cuyos devanados están distribuidos espacialmente con un desfase 120° eléctricos entre sí [6], debe ser alimentada mediante una fuente trifásica, de tal manera que se genere un campo magnético giratorio en el entrehierro de la máquina, este campo inducirá voltajes a un segundo bobinado (inducido) que generalmente se ubica en el rotor.

Al encontrarse en cortocircuito los bobinados del inducido, los voltajes producirán la circulación de corrientes alternas, las corrientes producirán a su vez un nuevo campo magnético en el entrehierro que interactuará con el campo giratorio preexistente.

El rotor no alcanza velocidad de sincronismo y por tanto sus bobinados están permanentemente sometidos a un flujo magnético variable, garantizando la inducción de

fuerza electromotriz (f.e.m.), la circulación de la corriente inducida y la interacción de los campos magnéticos que producen el torque de giro.

El par mecánico de carga intentará frenar el rotor de la máquina, provocando un incremento en el deslizamiento del rotor que se traduce en un aumento de conversión electromecánica de energía con un mayor consumo de potencia eléctrica por parte del motor [6].

En este tipo de máquinas existe un movimiento relativo entre la velocidad sincrónica y la velocidad propia del rotor también conocida como velocidad de deslizamiento, la cual se muestra en la ecuación (2.1) y se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la desarrollada por el rotor.

$$N_d = N_s - N_r \quad (2.1)$$

Donde:

N_d	Velocidad de deslizamiento
N_s	Velocidad propia del rotor
N_r	Velocidad sincrónica

Esta velocidad relativa puede ser representada en términos del desplazamiento cuya definición se muestra en la ecuación (2.2).

El deslizamiento está ligado directamente a la eficiencia del motor, si existe un deslizamiento mayor se ve afecta la eficiencia, debido a que las pérdidas en el cobre se incrementan.

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{N_d}{N_s} \quad (2.2)$$

Donde:

s	Deslizamiento
N_d	Velocidad de desplazamiento
N_s	Velocidad sincrónica
N_r	Velocidad propia del rotor

La velocidad sincrónica se define en función del número de polos de la máquina, según se expresa en la ecuación (2.3).

$$N_s = \frac{(120)(f)}{p} \quad (2.3)$$

Donde:

- N_s Velocidad sincrónica de la máquina (campo magnético) en R.P.M.
- f Frecuencia a la que se encuentra la red o sistema dada en Hz
- p Número de polos de la máquina sincrónica

En Tabla 2.1 se muestra desplazamientos típicos en función del número de polos y para una frecuencia de 60 Hz. Cabe recalcar que si el rotor gira a velocidad sincrónica se obtendrá un desplazamiento, $s = 0$, mientras que si el rotor está en reposo su desplazamiento será, $s = 1$.

Tabla 2.1. Valores típicos de velocidad y desplazamientos según su número de polos.

Numero de polos	N_s (R.P.M.)	N_r (R.P.M.)	s (%)
2	3600	3550	1,38
4	1800	1750	2,7
6	1200	1150	4,16
8	900	850	5,5

2.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

En la Figura 2.6 se presenta el circuito equivalente de una máquina de inducción trifásico en su funcionamiento como motor.

Es necesario que el circuito equivalente de la máquina de inducción sea representado solo por una de sus fases, es decir, se representa con circuito monofásico a base de bobinas y resistencias.

Esta característica se da para simplificar y facilitar los diversos análisis en estado estacionario.

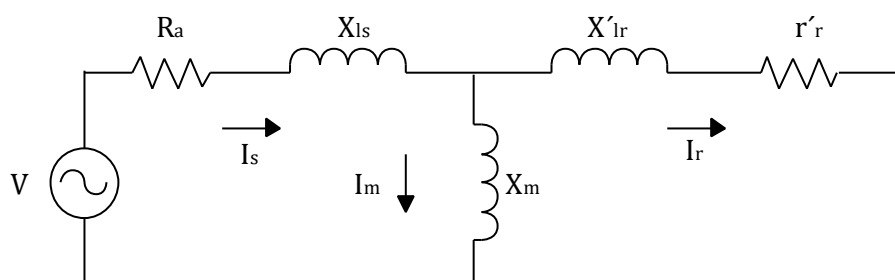


Figura 2.6. Circuito equivalente máquina inducción.

Donde:

R_a	Resistencia del devanado del estator
X_{ls}	Reactancia del estator
X'_{lr}	Reactancia del rotor
X_m	Reactancia de magnetización
r'_r	Resistencia del rotor referida al estator
I_m	Corriente de magnetización
I_s	Corriente del estator
I_r	Corriente del rotor
V	Voltaje aplicado al estator

2.2.3 POTENCIAS

Desde el momento que el motor de inducción es energizado hasta el momento que entrega potencia mecánica en su eje existen pérdidas, estas se registran en el estator, rotor, entrehierro y rodamientos.

La potencia de entrada de un motor de inducción se da en forma de corriente y voltaje trifásico y puede encontrarse mediante la ecuación (2.4).

$$P_{in} = (3)(V_1)(I_1)(\cos \theta) \quad (2.4)$$

Donde:

P_{in}	Potencia de entrada
V_1	Voltaje de entrada
I_1	Corriente de entrada
$\cos \theta$	Factor de potencia

Las pérdidas en el cobre del devanado del estator (P_{scu}) se expresan en la ecuación (2.5).

$$P_{scu} = (3)(R_1)(I_1^2) \quad (2.5)$$

Donde:

P_{scu}	Pérdidas en el cobre del estator
R_1	Resistencia del estator
I_1^2	Corriente de estator

Las pérdidas del núcleo son producidas por histéresis y por corrientes parásitas, con frecuencia se las conoce como pérdidas de vacío o pérdidas rotacionales como se expone en la ecuación (2.6).

$$P_{\text{núcleo}} = (3)(I_c^2)(R_c) \quad (2.6)$$

Donde:

$P_{\text{núcleo}}$	Pérdidas en el núcleo del estator
R_c	Resistencia del estator
I_c^2	Corriente de estator

Las pérdidas en el cobre del rotor se definen en la ecuación (2.7).

$$P_{\text{rcu}} = (3)(I_2^2)(R_2) = (s)(P_{\text{ag}}) \quad (2.7)$$

Donde:

P_{rcu}	Pérdidas en el cobre del rotor
R_2	Resistencia cobre del rotor llevada al estator
I_2	Corriente cobre del rotor llevada al estator
s	Deslizamiento
P_{ag}	Pérdidas en el entrehierro

La potencia que se traslada desde el estator al rotor a través del entrehierro (P_{ag}), queda establecida según se muestra en la ecuación (2.8).

$$P_{\text{ag}} = P_{\text{in}} - P_{\text{scu}} - P_{\text{núcleo}} = \frac{(3)(I_2^2)(R_2)}{s} \quad (2.8)$$

Donde:

P_{ag}	Pérdidas en el entrehierro
P_{scu}	Pérdidas en el cobre del estator
R_2	Resistencia cobre del rotor llevada al estator
I_2	Corriente cobre del rotor llevada al estator
s	Deslizamiento

La potencia electromagnética desarrollada queda definida según se presenta en la ecuación (2.9).

$$P_d = P_{ag} - P_{rcu} = (1 - s)(P_{ag}) \quad (2.9)$$

Donde:

P_d	Potencia electromagnética desarrollada
P_{ag}	Pérdidas en el entrehierro
P_{rcu}	Pérdidas en el cobre del rotor
s	Deslizamiento

El par electromagnético desarrollado por la máquina se obtiene de la ecuación (2.10).

$$T_d = \frac{P_{ag}}{W_s} \quad (2.10)$$

Donde:

T_d	Par electromagnético desarrollado.
W_s	Velocidad sincrónica

2.2.4 MÉTODOS DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD

Las máquinas de inducción se caracterizan porque su velocidad es cercana a la sincrónica; en base en la ecuación (2.11), la cual se obtiene de la sustitución de la ecuación (2.3) en (2.2); siendo importante mencionar que la variación de velocidad en este tipo de máquinas se realiza modificando la frecuencia y número de polos.

$$N_r = (1 - s)N_s = (1 - s) \frac{(120)(f)}{p} \quad (2.11)$$

Donde:

N_s	Velocidad sincrónica de la máquina (campo magnético) en R.P.M.
N_r	Velocidad propia del rotor
p	Número de polos de la máquina sincrónica
s	Deslizamiento
f	Frecuencia a la que se encuentra la red o sistema dada en Hz

En función de la ecuación (2.11) los métodos para la variación de la velocidad son:

- Variación del número de polos: implica modificar el bobinado del estator, en base a esto es posible cambiar el número de polos, esto ocasiona que cambie la relación

entre los polos en el estator y en el rotor; de tal manera que permite la variación de la velocidad.

- Control de resistencia del rotor: se realiza únicamente en motores de rotor devanado, al agregar resistencias externas al rotor se incrementan las pérdidas en el rotor por consiguiente el desplazamiento es modificado afectando directamente al rendimiento.
- Control de frecuencia: requiere la incorporación de variadores electrónicos que permiten proveer un voltaje de alimentación de frecuencia variable.

2.2.5 MÁQUINA DE INDUCCIÓN COMO GENERADOR

Para lograr el funcionamiento de esta máquina como generador, su rotor tiene que girar a una velocidad superior a la sincrónica a través de una máquina motriz, logrando un deslizamiento negativo y cambiando el sentido de rotación del flujo con respecto al rotor.

De esta forma se cambia el sentido de la f.e.m y de la corriente, por lo tanto, el torque desarrollado en la máquina se convierte en frenado con respecto al torque de la máquina motriz, por ende, empieza a operar como generador.

El generador de inducción no es una máquina autoexcitada, por lo tanto, en el momento que una máquina de inducción opera como generador, toma energía reactiva de la red, siendo necesario utilizar un banco de condensadores para inyectar potencia reactiva a la máquina.

El banco de capacitores (ver Figura 2.7) debe suministrar la misma potencia reactiva o un valor mayor a la que normalmente requiere la máquina cuando funciona como motor. El generador está limitado por la corriente nominal de los devanados de la máquina [7].

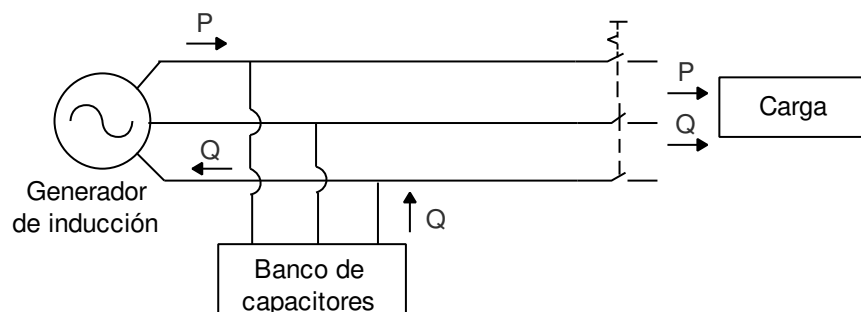


Figura 2.7. Banco de capacitores acoplado a una máquina de inducción.

2.3 MÁQUINA SINCRÓNICA

Se la conoce también como máquina síncrona, este tipo de máquinas se las puede hacer funcionar como generador o motor, siendo mayormente usadas como generadores en centrales eléctricas en todo mundo. En la Figura 2.8 se muestra una máquina síncrona perteneciente al Laboratorio de Máquinas Eléctricas objeto de la rehabilitación.

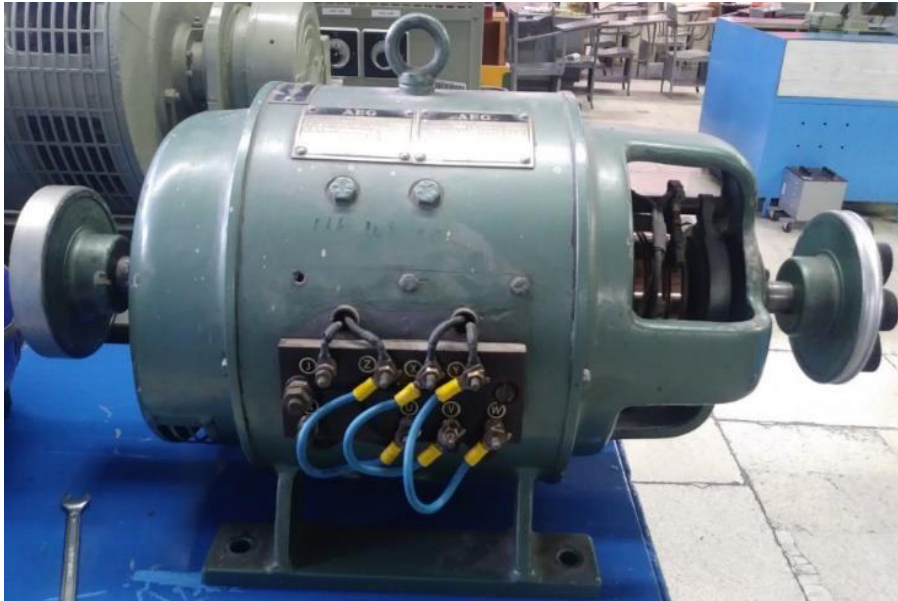


Figura 2.8. Máquina síncrona módulos de laboratorio.

Independientemente de si sea usada como generador o como motor, esta máquina es capaz de consumir o inyectar potencia reactiva, permitiendo su uso en el control del factor de potencia de sistemas eléctricos. En esta máquina tanto el campo magnético rotatorio como el rotor giran a la misma velocidad y en consecuencia la ecuación (2.12) vincula la frecuencia eléctrica con la velocidad de rotación, de lo cual se puede deducir las diferentes velocidades a las que puede operar una máquina síncrona.

$$N_s = \frac{(60)(f)}{P} = \frac{(120)(f)}{p} \quad (2.12)$$

Donde:

- N_s velocidad síncrona de la máquina (campo magnético) en R.P.M.
- f frecuencia a la que se encuentra la red o sistema dada en Hz
- p Número de polos de la máquina síncrona
- P Número de pares de polos que tiene la máquina

De acuerdo al número de polos y a la frecuencia se presenta la velocidad de máquinas sincrónicas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Velocidad de un generador sincrónico (R.P.M.)

N° polos	(R.P.M.) (50Hz)	(R.P.M.) (60Hz)
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

2.3.1 CONSTRUCCIÓN

Como se ve en la Figura 2.9 una máquina sincrónica típica está constituida por el estator también conocido como inducido o armadura, que se alimenta o produce corriente alterna y por el rotor también conocido como inductor que es alimentado por corriente continua desde el exterior a través de anillos deslizantes mediante sus escobillas. El espacio que se encuentra entre estas dos partes se conoce como entrehierro.

El estator está compuesto de un núcleo de material ferromagnético, generalmente de chapas de silicio que están aisladas entre sí, para evitar, pérdidas por corrientes parásitas [8]. además, se alojan 3 bobinas desfasadas 120° en el espacio.

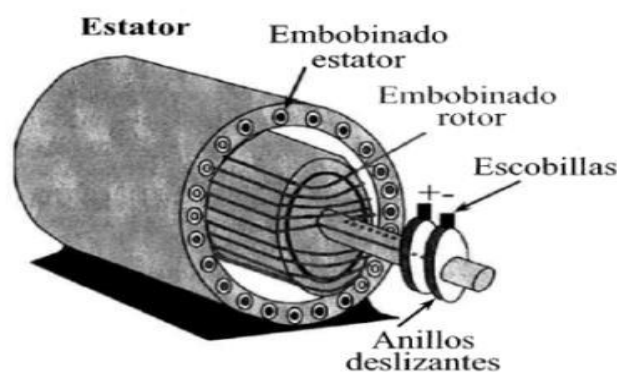


Figura 2.9. Máquina sincrónica (detalle de sus partes) [9].

El rotor está construido con láminas delgadas agrupadas entre sí para reducir pérdidas por corrientes parásitas. Contiene un devanado de corriente continua que impide el

funcionamiento de la máquina a una velocidad distinta a la del sincronismo, el rotor es alimentado desde el exterior mediante escobillas y anillos deslizantes.

Desde el punto de vista constructivo se distinguen dos formas de rotor:

- Polos salientes
- Polos lisos o rotor cilíndrico

En la Figura 2.10 se presenta una máquina de polos salientes, este tipo de máquinas presenta una geometría asimétrica, sus polos se proyectan hacia afuera en donde se establecen sus respectivos devanados de campo, estas máquinas son usadas principalmente para aplicaciones que requieran bajas velocidades.

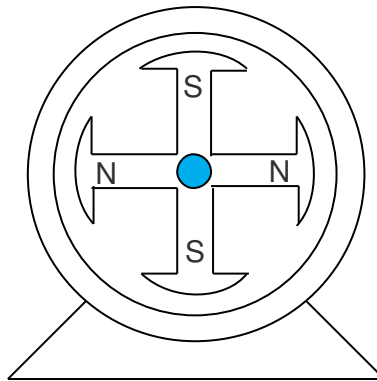


Figura 2.10. Máquina síncrona de polos salientes [10].

En la Figura 2.11 se muestra una máquina de rotor liso, este rotor presenta una geometría simétrica produciendo un flujo magnético uniforme, estas máquinas son usadas en aplicaciones de alta velocidad.

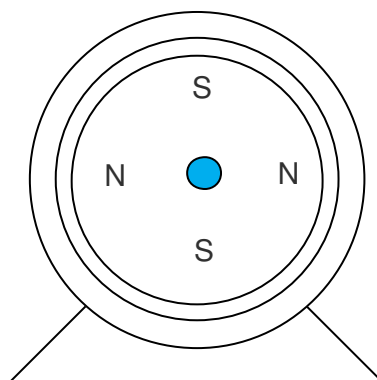


Figura 2.11. Máquina síncrona con rotor cilíndrico [10].

2.3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

En la Figura 2.12 se muestra el circuito equivalente con el cual se analiza una máquina síncrona, incluye tres elementos:

- Resistencia de armadura (R_a), permite determinar las pérdidas en su devanado.
- Reactancia síncrona (X_s), hace relación a la reactancia de dispersión de armadura y a la reactancia de magnetización.
- Fuerza electromotriz inducida (E_{af}).

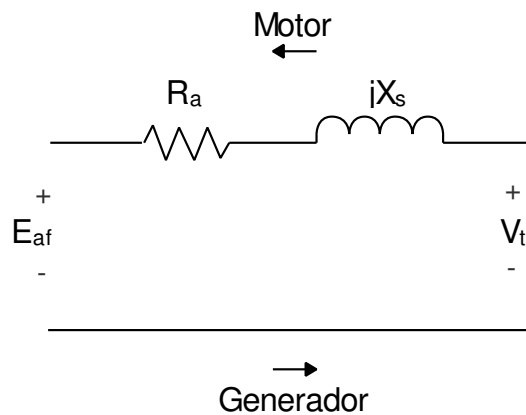


Figura 2.12. Máquina Síncrona de rotor cilíndrico - Circuito Equivalente.

A continuación, se presentan dos ecuaciones que representan al voltaje terminal de la máquina síncrona, para su funcionamiento como motor y generador respectivamente:

$$V_t = E_{af} + I_a (R_a + jX_s) \quad (2.13)$$

$$V_t = E_{af} - I_a (R_a + jX_s) \quad (2.14)$$

Donde:

V_t	Voltaje en terminales
E_{af}	Fuerza electromotriz inducida
I_a	Corriente de armadura
R_a	Resistencia de armadura
X_s	Reactancia síncrona

De la ecuación (2.13) y (2.14) se observa que los valores de voltajes en terminales se diferencian por el sentido de la corriente, si es positivo (+) significa que la máquina síncrona está funcionando como motor en donde la corriente está siendo inyectada hacia la

máquina, si es negativo (-) significa que la máquina síncrona está funcionando como generador en donde la corriente es producida por su armadura.

Para realizar el diagrama fasorial se debe tomar como referencia el voltaje terminal con un ángulo de 0° . En la Figura 2.13, Figura 2.14 y Figura 2.15, se presentan los diagramas para un motor de rotor cilíndrico.

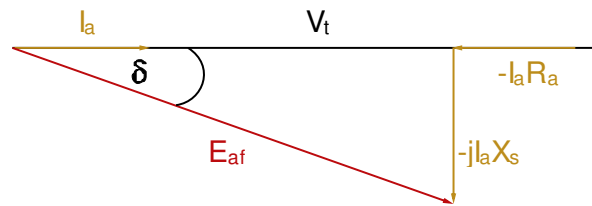


Figura 2.13. Diagrama fasorial con factor de potencia uno [5].

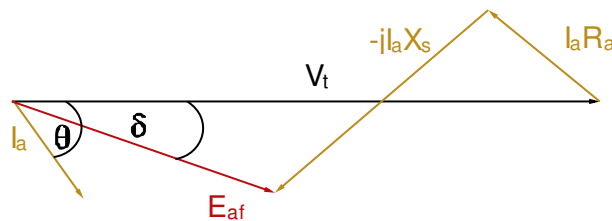


Figura 2.14. Diagrama fasorial con factor de potencia en atraso [5].

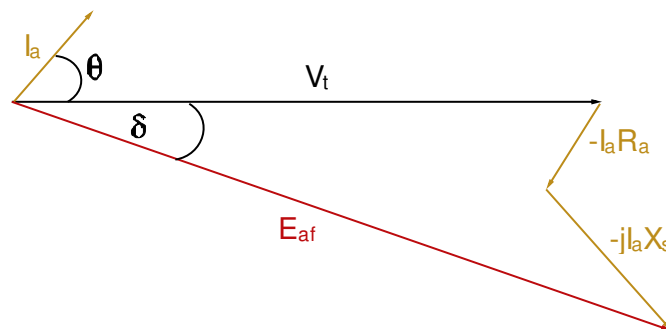


Figura 2.15. Diagrama fasorial con factor de potencia en adelanto [5].

En el caso de una máquina síncrona de polos salientes el circuito equivalente se muestra en la Figura 2.16, se debe considerar que existe un entrehierro más grande en la región ubicada entre los polos que en la región de la parte superior de ellos, debido a esto, las reluctancias difieren en las dos regiones, por lo tanto, la reactancia se divide en reactancia

síncrona de eje directo (X_d) a lo largo del eje polar (eje d) y reactancia síncrona del eje de cuadratura (X_q) a lo largo del eje entre los polos (eje q).

Además, la corriente de armadura se divide hacia sus 2 ejes, siendo la componente directa (I_d) que produce el campo en su eje directo, que se encuentra 90° en atraso con respecto a la fuerza electromotriz inducida (E_{af}), y la componente de cuadratura (I_q) que genera el campo a lo largo del eje q y se encuentra en fase con la fuerza electromotriz E_{af} .

Las ecuaciones (2.15) y (2.16) se aplican para determinar el voltaje en terminales de las máquinas de polos salientes en su funcionamiento como motor y generador.

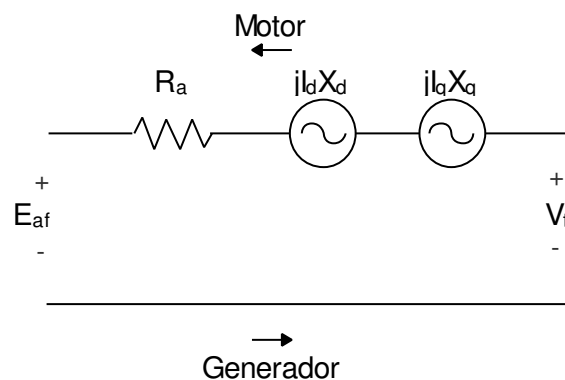


Figura 2.16. Circuito Equivalente máquina síncrona de polos salientes.

$$V_t = E_{af} + I_a R_a + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (2.15)$$

$$V_t = E_{af} - I_a R_a - jI_d X_d - jI_q X_q \quad (2.16)$$

Donde:

V_t	Voltaje en terminales
E_{af}	Fuerza electromotriz inducida
I_a	Corriente de armadura
R_a	Resistencia de armadura
X_d	Reactancia de eje directo
I_d	Corriente de eje directo
X_q	Reactancia de eje de cuadratura
I_q	Corriente de eje de cuadratura

La Figura 2.17, Figura 2.18 y Figura 2.19 presenta los diagramas fasoriales, para estos casos la resistencia de armadura al ser muy pequeña en comparación con la reactancia sincrónica es despreciada.

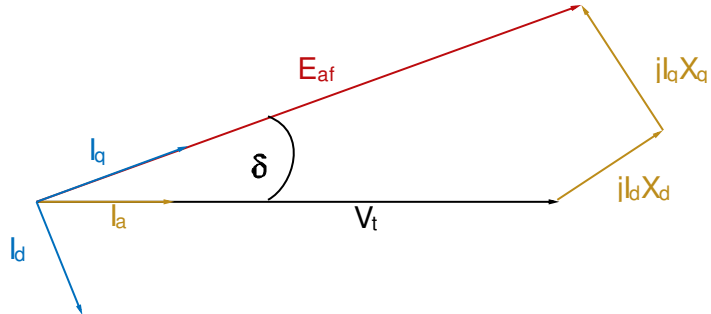


Figura 2.17. Diagrama fasorial generador polos salientes factor de potencia uno [5].

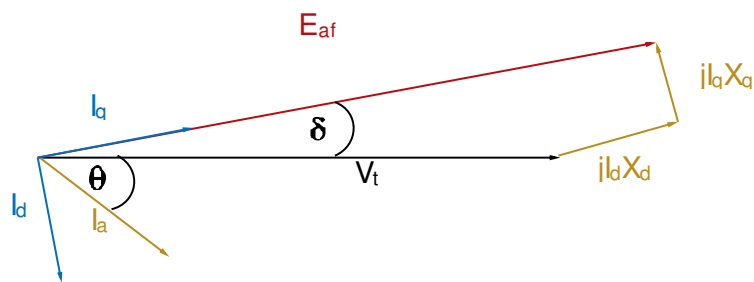


Figura 2.18. Diagrama fasorial generador polos salientes con factor de potencia en atrás [5].

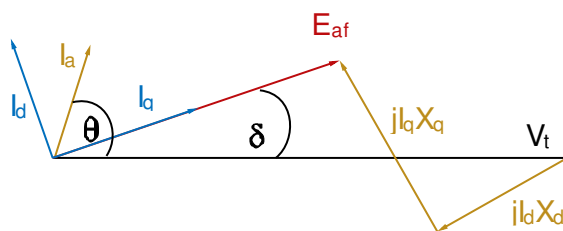


Figura 2.19. Diagrama fasorial generador polos salientes con factor de potencia en adelanto [5].

2.4 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Las máquinas de corriente continua que se muestran en la Figura 2.20, se caracterizan porque pueden generar el campo mediante un electroimán o con un imán permanente, también son conocidas como máquinas devanadas que ayudan a controlar el flujo y la corriente en la bobina.

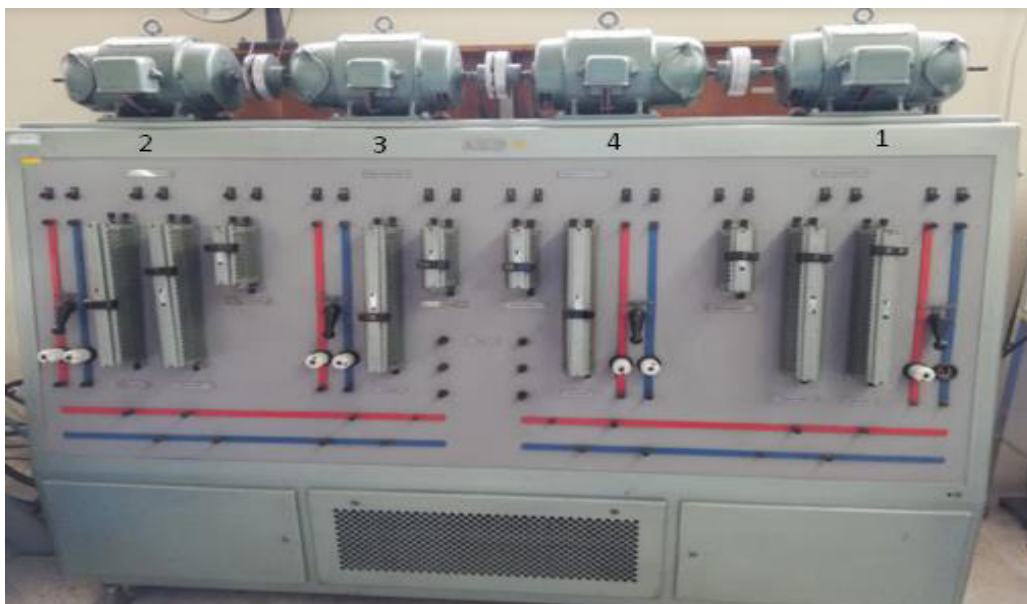


Figura 2.20. Máquinas de Corriente continua.

La máquina de corriente continua se caracteriza por tener un rectificador u ondulator mecánico llamado colector que es un rectificador mecánico [11].

2.4.1 CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

En la Tabla 2.3 se muestra el tipo de conexión de las máquinas de corriente continua según la forma de conexión entre el inductor e inducido .

Tabla 2.3. Características de motores.

Conexión	Velocidad	Par de arranque
Compound	Constante	Alto
Independiente	Constante	Muy elevado
Serie	Variable con la carga	Muy elevado
Derivación	Constante	Bajo

En base a la Tabla 2.4 los terminales de las máquinas de CC se encuentran identificados mediante diferentes estándares, en la Figura 2.21 se presenta 2 máquinas de corriente

continua, de acuerdo con los terminales el Laboratorio de Máquinas Eléctricas cuenta con una de excitación serie y otra de excitación shunt

Tabla 2.4. Normativa de terminales de conexión [12].

Elemento	Terminales de conexión según Norma			
	VDE	ASA	BS	IEC
Armadura	A-B	A1-A2	AA-A	A1-A2
Campo Shunt	C-D	F1-F2	Z-ZZ	E1-E2
Campo serie	E-F	S1-S2	Y-YY	D1-D2
Interpolos	G-H	-	HH-H	B1-B2
Interpolo simétricamente distribuido en el lado A	GA-HA	-	-	1B1-1B2
Interpolo simétricamente distribuido en el lado B	GB-HB	-	-	2B1-2B2
Campo de excitación separada	I-K	F1-F2	X-XX	F1-F2



(a)

(b)

Figura 2.21. Máquinas de corriente continua con distintos terminales (a) y (b).

Según la norma VDE para generadores y motores, la primera letra se refiere a la entrada o polo positivo y la segunda letra es la salida o polo negativo.

2.4.1.1 Máquina de excitación independiente

Este tipo de configuración para motores y generadores se caracteriza por tener una conexión independiente de su bobinado de campo como se muestra en la Figura 2.22. El par de arranque es elevado y su velocidad es constante y fácil de controlar, debido a esto, se considera un motor muy estable.

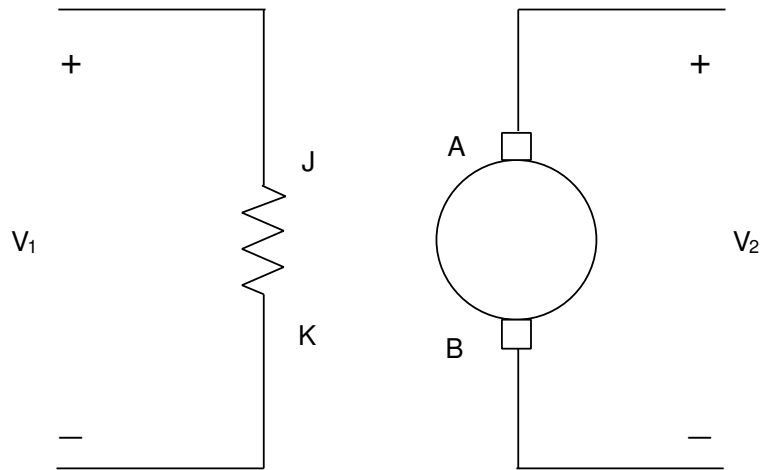


Figura 2.22. Representación motor excitación independiente [13].

2.4.1.2 Máquina de excitación serie

En esta configuración se conectan en serie, el devanado del inducido (rotor) con el devanado de excitación (estator) tal como se muestra en la Figura 2.23 el arrollamiento de la excitación está formado por pocas espiras de grueso calibre que ofrecen una baja resistencia.

La principal característica es que su velocidad varía dependiendo de la carga que esté conectada y que su par de arranque es muy elevado, frente una carga pesada el motor se frena; por el contrario, con una carga ligera se acelera. En el caso de que funcione como motor no puede trabajar en vacío ya que se embala y podría llegar a destruirse.

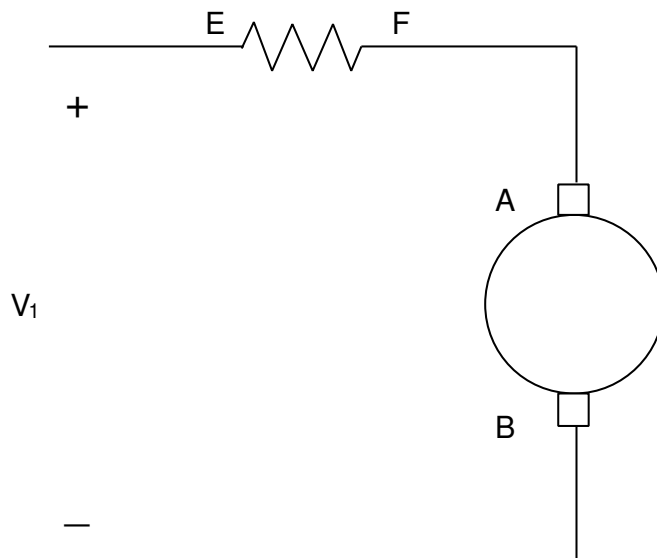


Figura 2.23. Representación de un motor de excitación serie [13].

2.4.1.3 Máquina de excitación en derivación

En la Figura 2.24 el inductor (estator) está conectado en paralelo con el inducido (rotor), una de las características principales de esta configuración es su velocidad que permanece constante y su par de arranque es relativamente bajo, esto permite que la máquina pueda trabajar sin carga o en vacío, a este tipo de motores se los conoce también como motor shunt o paralelo.

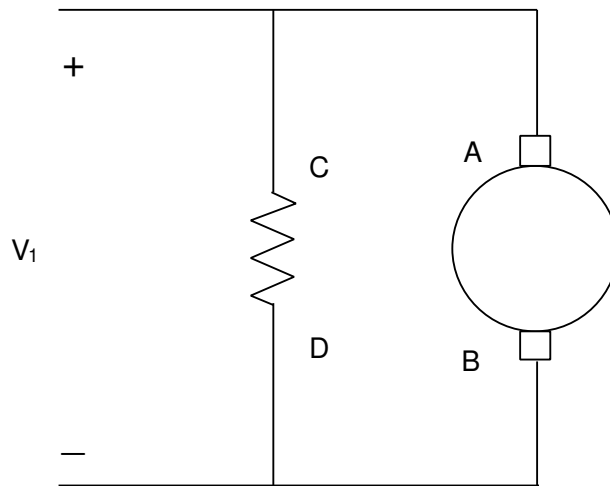


Figura 2.24. Representación de un motor de excitación en derivación [13].

2.4.1.4 Máquina de excitación compound

Es una combinación entre conexión serie y conexión en derivación, se caracteriza por compartir las ventajas de ambos, ya que se obtiene un par de arranque alto y una velocidad constante. En la Figura 2.25 se expresa la forma de conexión.

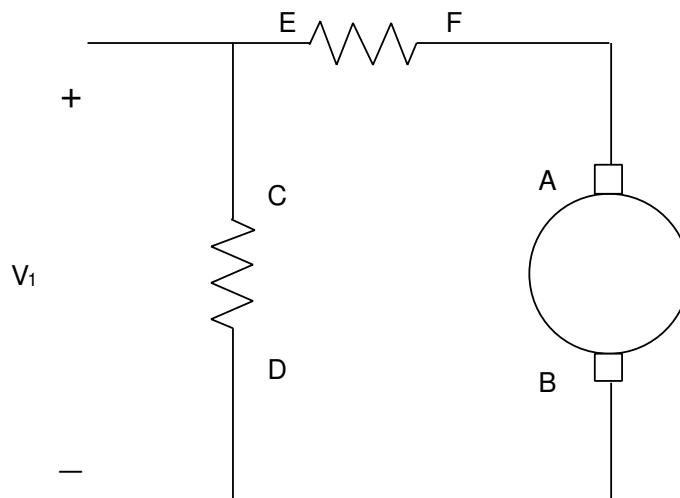


Figura 2.25. Representación de una máquina de excitación compound [13].

2.4.2 CONSTRUCCIÓN

Las máquinas de corriente continua constan de dos devanados que crean campos electromagnéticos cuya interacción genera un torque. Uno de sus bobinados es llamado inductor y está ubicado en el estator (parte fija) y el otro devanado es el inducido ubicado en el rotor (parte giratoria).

- **Bobinado del estator.** Es el devanado que genera el campo magnético de excitación en la máquina, es también conocido como devanado de excitación o inductor.
- **Bobinado del rotor.** En este devanado se inducen las fuerzas electromotrices y por tanto es conocido como devanado inducido.
- **Conmutador.** Estructurado por segmentos o delgas de cobre, desempeña un papel importante, cuando la máquina opera como generador; rectifica el voltaje de CA a CC; y, en operación como motor, el conmutador modifica las conexiones del devanado de armadura de tal forma que los polos magnéticos no se muevan mientras gira el rotor [14].

Las máquinas de corriente continua tienen un par de arranque alto, en comparación con los de corriente alterna, también cabe recalcar que se puede controlar su velocidad con mucha facilidad, por tal razón, son ideales para aplicaciones que requieran un control de velocidad.

Las partes principales de la máquina de corriente continua que se presentan en la Figura 2.26, y sus características constructivas se muestran a continuación:

- **Estator:** lleva el bobinado inductor, la que produce el campo magnético
- **Rotor:** lleva el bobinado inducido, está constituido por chapas magnéticas troqueladas en las que es posible alojar a los bobinados, la laminación es necesaria para evitar las pérdidas por histéresis.
- **Colector:** estructurado por láminas de cobre electrolítico, permite la conexión de los bobinados del inducido con las escobillas.
- **Escobillas:** constituyen el mecanismo de conexión con el inducido de la máquina con el circuito eléctrico que la alberga.



Figura 2.26. Partes de una máquina de corriente continua.

2.4.3 EFICIENCIA DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

La eficiencia para el motor se calcula como se expresa en la ecuación (2.17) y para el generador es posible su cálculo mediante la ecuación (2.18).

$$\% \text{ Eficiencia}_{\text{motor}} = \frac{P_{\text{potencia de entrada eléctrica}} - P_{\text{pérdidas totales del motor}}}{P_{\text{potencia de entrada eléctrica}}} \times 100 \quad (2.17)$$

$$\% \text{ Eficiencia}_{\text{generador}} = \frac{P_{\text{potencia salida eléctrica}}}{P_{\text{potencia salida eléctrica}} + P_{\text{pérdidas totales del motor}}} \times 100 \quad (2.18)$$

Las pérdidas que deben ser tomadas en cuenta para poder realizar el cálculo de la eficiencia son:

- **Pérdidas por efecto Joule en los bobinados de armadura y campo:** En base a la ecuación (2.19) se obtienen las pérdidas en los bobinados de campo y armadura.

$$\text{Pérdidas} = (I^2)(R) \quad (2.19)$$

Donde:

R Resistencia del bobinado de campo, y del bobinado de armadura.

I Corriente de armadura o corriente de campo

- **Pérdidas en las Escobillas:** se calculan mediante el producto de la caída de voltaje que se produce en las escobillas y la corriente circulante, la caída de voltaje depende del material con el que están fabricados, en este caso el material es carbón y grafito por lo cual el valor a considerar es de 1V.
- **Pérdidas Adicionales:** son aquellas que se producen en los cojinetes (fricción) y en aletas de ventilación, estas pérdidas se las puede obtener al hacer que el generador opere con excitación independiente, propulsado por una máquina motriz y generando voltaje nominal.

2.5 PRUEBAS DE AISLAMIENTO

El objetivo principal es conocer y analizar el estado en el que se encuentra un aislante, esto ayuda al funcionamiento correcto y seguro en equipos eléctricos o instalaciones, es importante mencionar que un buen aislamiento se relaciona a la capacidad de limitar la circulación de corriente por secciones donde pueden ocasionar daños tanto a personas como a las instalaciones.

La prueba de aislamiento se realiza aplicando un voltaje ya sea a conductores, mecanismos eléctricos, generadores o motores. En la Figura 2.27 se presenta el circuito equivalente donde el objeto a prueba es representado por una resistencia conectada en paralelo a un capacitor, esto se debe a que el momento que circula una corriente por un elemento no solamente lo hace por su parte resistiva, sino también por la parte capacitiva, obteniendo así el valor de la impedancia.

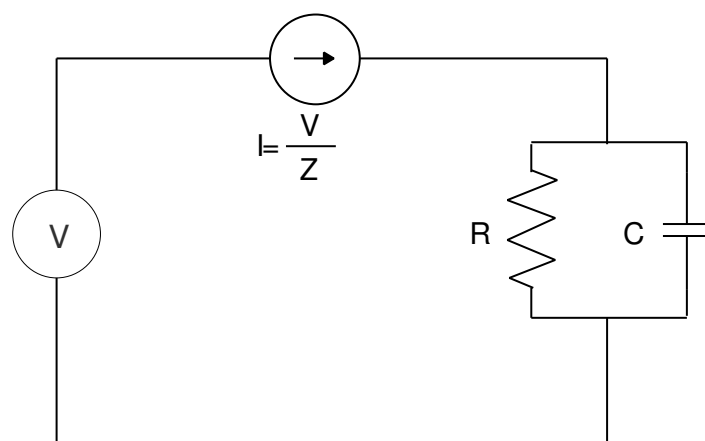


Figura 2.27. Esquema de conexión para prueba de aislamiento.

Para el proceso de medición utilizará el probador de asilamiento MEGGER bajo la norma IEEE 43-2013 [1]. Este instrumento refleja la lectura directa de la resistencia en ohms y megaohms.

2.5.1 FACTORES QUE AFECTAN LAS LECTURAS

Durante la medición de aislamiento existen factores que afectan el resultado final, entre estos se menciona a la temperatura, humedad y el comportamiento de la corriente en función del tiempo, en la en la Figura 2.28 se muestra las componentes de la corriente total.

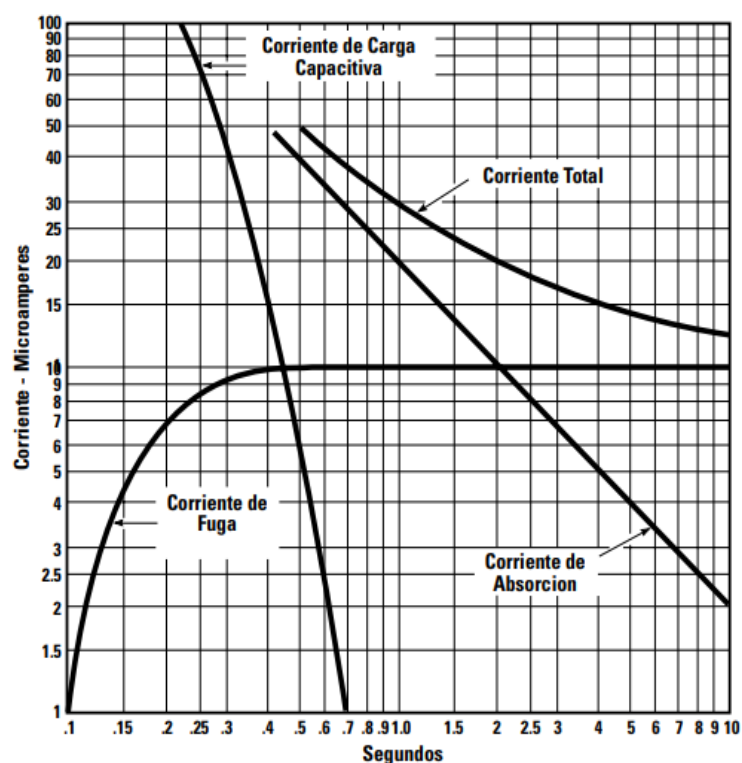


Figura 2.28. Componentes de la corriente durante una prueba de aislamiento [1].

- **Corriente de carga capacitiva.**

Esta corriente es transitoria y depende de la geometría del elemento además que corresponde a la capacidad del aislamiento. En la Figura 2.28 se observa que es elevada en un principio y disminuye exponencialmente a un valor cercano a cero, esto sucede a medida que el elemento a prueba se carga eléctricamente.

- **Corriente de absorción.**

Es la capacidad de aislamiento del material y se genera por la polarización del material dieléctrico. Esta corriente decrece lentamente y requiere más minutos para alcanzar un valor cercano a cero.

- **Corriente de conducción o fuga.**

El tercer componente circula por los exteriores del material de manera superficial, esta corriente es necesaria para determinar el nivel de aislamiento que tiene el material. En la Figura 2.28 se observa que es estable en el tiempo.

- **Corriente total.**

Es la suma de las tres componentes generalmente es medida en megaohms debido a que esta corriente depende del tiempo que se aplica el voltaje

2.5.1.1 Influencia de temperatura

En caso de que existan variaciones de temperatura durante la prueba se obtendrán valores erróneos, sin embargo, es posible corregirlos para acercarlos a condiciones de temperatura de referencia. En la Figura 2.29 se muestra la corrección de resistencia en función de la temperatura acorde a la norma IEEE Std-43.

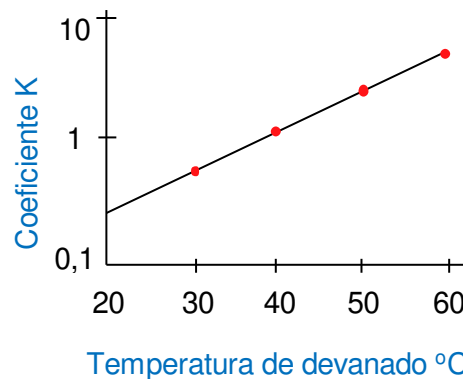


Figura 2.29. Corrección de resistencia en función de la temperatura [15].

Una de las reglas generales con respecto a la resistencia, es que por cada 10°C de incremento de temperatura se divide entre dos la resistencia o por cada 10°C que disminuya la temperatura la resistencia se duplica [15].

2.5.1.2 Influencia de la humedad

Este efecto se produce cuando una máquina se encuentra en ambientes húmedos o calurosos, bajo estas condiciones se forma una película de humedad en la superficie del aislante, afectando a las lecturas de resistencia y en los peores de los casos puede ocasionar daños en el aislante como agujeros y grietas.

Este efecto se presenta en máquinas que han estado fuera de servicio, los valores de aislamiento pueden ser bajos debido a la contaminación por humedad, siendo necesario

secar las máquinas antes de realizar las pruebas de aislamiento, además hay que procurar no tomar medidas si la temperatura es inferior a la del punto de rocío (donde no exista condensación), bajo estas condiciones se obtendrán valores aceptables.

2.5.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN

2.5.2.1 Método de tiempo corto

Este método consiste en aplicar un voltaje durante un lapso de tiempo entre 30 a 60 segundos (es recomendable hacerlo a 60 segundos) en esta prueba se considera que el valor que se obtenga es altamente perturbado por la temperatura y la humedad [16]. En la Figura 2.30 se puede observar una curva típica de esta prueba en un buen aislamiento.

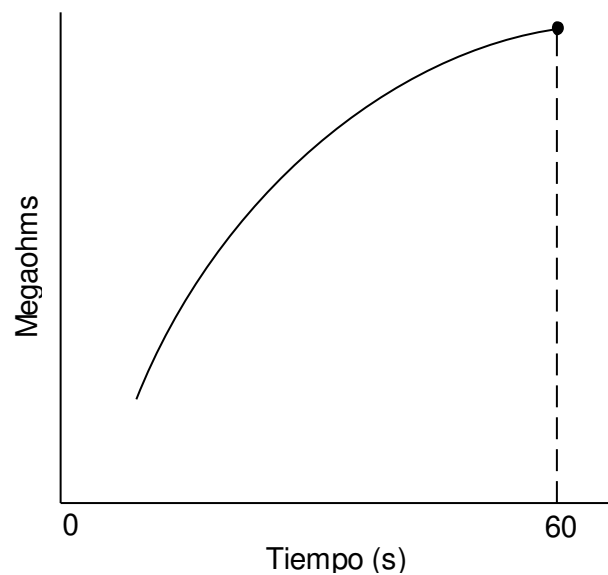


Figura 2.30. Método de tiempo Corto [17].

La resistencia mínima de aislamiento en devanados del estator y rotor se determina en base a las consideraciones de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores mínimos de resistencia de aislamiento [17].

Resistencia de aislamiento mínima (MΩ)	Muestra de prueba
kV + 1	Para la mayoría de los devanados fabricados antes de 1970, todos los devanados de campo
100	Para armaduras de CC y devanados de CA construidos después de 1970 (forma bobinas preformadas)
5	Para la mayoría de las máquinas con bobinas de estator enrolladas al azar y bobinas preformadas con rango inferior 1kV

2.5.2.2 Método de tiempo-resistencia

Este método consiste en tomar valores sucesivos en determinados instantes durante un periodo de tiempo (entre 5 a 10 minutos), el incremento gradual de resistencia indica un buen aislamiento. Este método presenta una ventaja frente a las condiciones ambientales ya que es poco influenciado, gracias a esto los resultados son precisos y no existe la necesidad de corregir datos. En la Figura 2.31 se muestra las curvas típicas de un aislamiento en buen estado vs un aislamiento en mal estado, el aislamiento depende de la corriente de fuga o corriente de conducción:

- En un aislamiento en buen estado el valor es débil y está influenciado con las corrientes de carga capacitiva y corriente de absorción dieléctrica, en este caso la resistencia aumentará.

En un aislamiento incorrecto este valor es constante y sobrepasa las corrientes de carga capacitiva y de absorción dieléctrica, para este caso los valores del aislamiento alcanzan un nivel constante y estable.

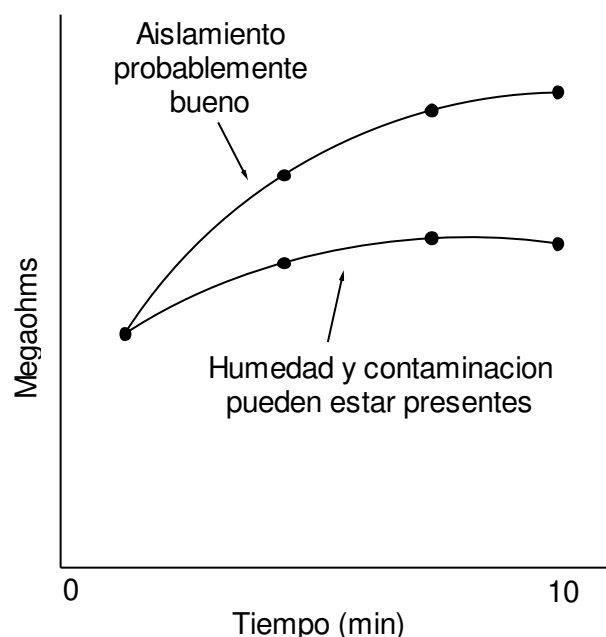


Figura 2.31. Curva típica que muestra el un buen aislamiento vs un mal aislamiento [17].

2.5.2.3 Índice de polarización, IP

Este método recomienda tomar una lectura a 1 min y a los 10 min, este índice es resultado de la relación entre los valores tomados en los dos intervalos de tiempo antes mencionados, en la Tabla 2.6 se observa los valores típicos que detalla el estado de un

aislamiento, un índice mayor a 4 es una señal de un buen aislamiento del elemento a prueba, pero valores por debajo del 2 indica un problema.

Tabla 2.6. Valores para identificar la condición de un aislamiento [17].

Condición	Índice de polarización
Peligroso	$IP < 1$
Dudoso	$1 < IP < 2$
Bueno	$2 < IP < 4$
Excelente	$IP > 4$

2.5.2.4 Relación de absorción dieléctrica (DAR)

Esta relación se obtiene dividiendo los valores de aislamiento a los 60 (s) y a los 30 (s), en la Tabla 2.7 se clasifica el estado del aislamiento según el valor obtenido.

Tabla 2.7. Condición de estado de un aislamiento.

Valor del DAR	Condición de aislamiento
$DAR < 1,25$	Insuficiente
$1,25 < DAR < 1,6$	OK
$DAR > 1,6$	Excelente

2.5.3 APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE 43-2013

La aplicación de la norma tiene como finalidad conocer el estado del aislamiento de máquinas eléctricas y anticipar potenciales fallas provocadas por el deterioro de dicho aislamiento. Las pruebas del nivel de aislamiento se deben ejecutar:

- Como parte de un mantenimiento preventivo.
- Cuando la máquina presente alguna falla que se relacione con el nivel de aislamiento.
- Luego de ser reparada.
- Después de realizar ensayos en la máquina.
- En máquinas que estuvieron detenidas.

Este tipo de pruebas se realiza con la máquina apagada, además, en máquinas que estuvieron detenidas es recomendable mantenerlas a 10°C sobre la temperatura ambiente, esto con la finalidad de evitar que la máquina se humedezca.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se especificarán las técnicas e instrumentos para poder realizar pruebas de aislamiento, mantenimiento preventivo en máquinas de CC y máquinas AC, además de la determinación de parámetros de las máquinas sincrónicas y asincrónicas.

Para el desarrollo del proyecto técnico se recolectó información de normas, publicaciones, libros, páginas de internet y trabajos de titulación para comprender los diferentes procedimientos que se deben o pueden utilizar.

3.2 MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

Las máquinas rotativas son parte fundamental para el sector productivo, de tal manera, el mantenimiento y conservación de las máquinas eléctricas es primordial para evitar alguna falla mecánica o eléctrica. Es importante aclarar que los motores y generadores comparten características constructivas y de funcionamiento, lo que representa una ventaja en cuanto al mantenimiento ya que las reglas para su preservación son aplicables para las dos clases de máquinas.

Gracias a los procesos de mantenimiento se logra alargar la vida útil de las máquinas. Siendo una regla general, controlar y verificar la correcta lubricación de partes móviles, así como su adecuada limpieza para mantener en buen estado una máquina.

La acumulación de polvo es una de las principales causas de daño, ya que actúa como absorbente de aceite, acumulador de humedad e impide el enfriamiento adecuado, por tal razón se debe mantener libre de suciedad a todas las partes que constituyen las máquinas eléctricas.

3.2.1 DESMONTAJE

Para iniciar con el desmontaje de cada una de las máquinas eléctricas ubicadas en los módulos se realiza el siguiente procedimiento:

- Desconectar e identificar el cableado de las borneras de cada máquina eléctrica y del panel móvil.
- Desarmar las máquinas, este procedimiento se debe realizar con precaución; para no estropear las partes constructivas.

- Colocar una señal en cada una de las partes móviles y estáticas, de esta manera se conoce la forma correcta en la que deben ser armadas después de realizar el mantenimiento.
- Realizar la prueba de aislamiento, esta prueba se realiza mediante el equipo Megger que se presenta en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Instrumento de medida para resistencia de aislamiento.

3.2.2 LIMPIEZA Y BARNIZADO

La acumulación de polvo puede obstaculizar la ventilación para el enfriamiento adecuado de las máquinas eléctricas rotativas, por ello una de las reglas más sencillas para mantener un buen estado en cualquier máquina eléctrica es la limpieza.

Para el caso de una máquina CC, es importante realizar el siguiente procedimiento:

- Revisar que el colector se encuentre libre de aceite o suciedad.
- Realizar una inspección del estado de los rodamientos.
- Inspección de las escobillas en las máquinas CC.
- Inspección y limpieza de cada una de las partes móviles.

Para proceder con el barnizado se realiza el siguiente procedimiento:

- Realizar la limpieza de polvo y grasa.
- Aplicar el barniz dieléctrico.
- Aplicar un tiempo de secado.
- Restauración de parte estética de cada una de las máquinas.

3.2.3 MONTAJE DE LAS MÁQUINAS

Uno de los objetivos de este trabajo de titulación es reubicar dos de las ocho máquinas eléctricas, para obtener otro tipo de configuración y lograr obtener nuevas prácticas para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, en este contexto, el procedimiento a seguir para el montaje es el siguiente:

- Disponer de todas las piezas fijas y móviles de cada máquina.
- Colocar el rotor de forma adecuada, evitar producir rayones o golpes en el rotor y en el estator.
- Colocar y ajustar tornillos, se debe realizar el ajuste de los tornillos poco a poco en forma cruzada con el objetivo de ejercer una presión adecuada y sin que exista problemas de ajuste.
- Revisar que el rotor este bien ubicado y que no exista ningún tipo de roce con las partes fijas (estator).
- Comprobar el montaje de las máquinas con una prueba sencilla que consiste en girar manualmente el rotor y si este no presenta fricciones o algún tipo de sonido extraño, quiere decir que el montaje es adecuado.
- Por último, alimentar la máquina respetando sus respectivas conexiones y mantenerla encendida por lo menos 15 minutos. En ese transcurso de tiempo se debe revisar si no se presentan inconvenientes.

3.3 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE CONTROL Y PROTECCIÓN

Se realiza el siguiente procedimiento para lograr el mantenimiento:

- Inspección y mantenimiento de cada uno de los elementos de maniobra.
- Inspección, mantenimiento o reemplazo de equipos de protección.
- Inspección y mantenimiento de reóstatos de cada uno de los grupos de máquinas.
- Desmontaje del esquema didáctico de cada uno de los módulos.
- Restauración estética de los módulos tanto del panel de control como de la parte estructural.

3.4 PARÁMETROS ELÉCTRICOS

3.4.1 MÁQUINAS SINCRÓNICAS

En la Figura 3.2 se muestra el módulo móvil 1 el cual contiene dos máquinas sincrónicas AEG, las que serán sometidas a las siguientes pruebas eléctricas basadas en la norma IEEE Std 115-2009 [2]:

1. Prueba de corriente continua.
2. Prueba de circuito abierto.
3. Pruebas de cortocircuito en saturación.
4. Prueba de deslizamiento.
5. Prueba de cortocircuito trifásico.
6. Prueba de recuperación de voltaje.
7. Prueba de cortocircuito súbito línea a línea.
8. Prueba de desconexión de bajo voltaje a un bajo deslizamiento.
9. Prueba de rechazo de carga.

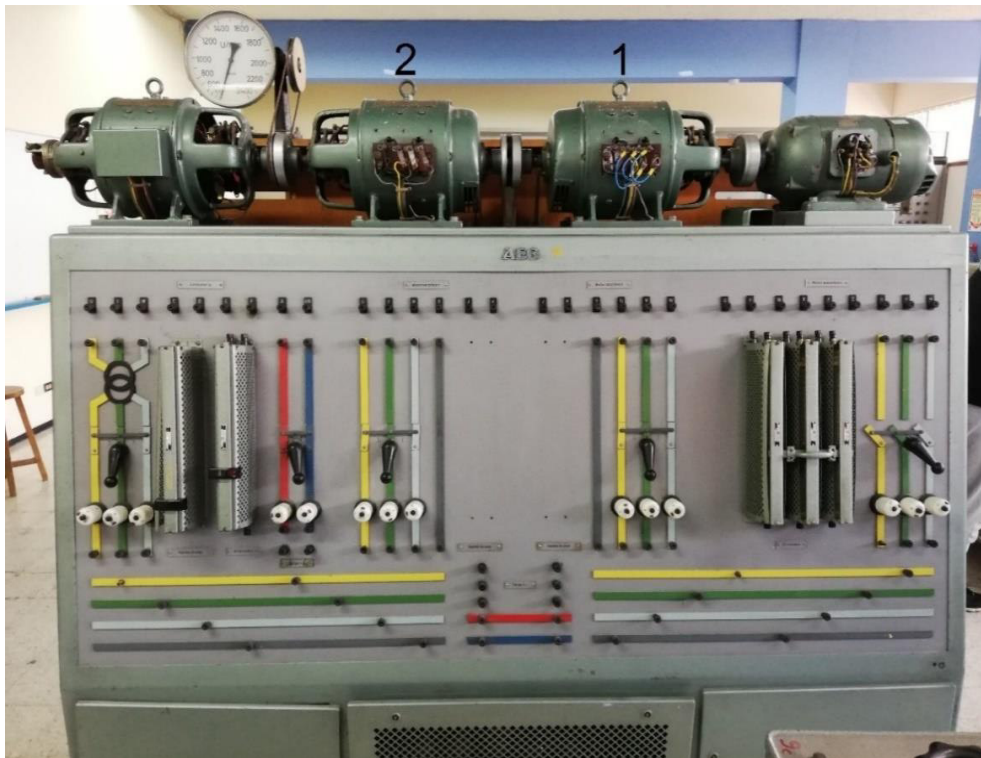


Figura 3.2. Módulo 1 compuesto por dos máquinas sincrónicas.

3.4.1.1 Prueba de corriente continua

Para determinar la resistencia de armadura (R_a) se debe medir voltaje y corriente (método voltímetro-amperímetro) de la siguiente manera:

1. Determinar el tipo de conexión con la finalidad de obtener el valor correcto de la resistencia del devanado de armadura.
2. Alimentar cada devanado con una fuente de voltaje de corriente continua.
3. Variar la fuente en forma ascendente comenzando con un valor de voltaje relativamente bajo.
4. Registrar al menos 10 valores de voltaje y corriente.

Si la conexión de la armadura se encuentra en estrella como se muestra en la Figura 3.3, se debe aplicar la ecuación(3.1).

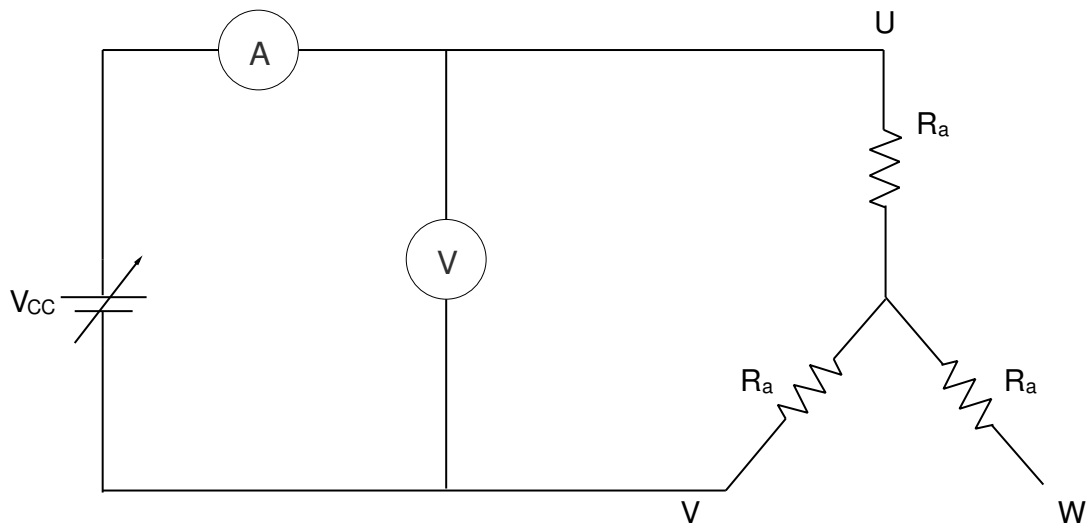


Figura 3.3. Esquema para la toma de valores, conexión estrella [12].

$$R_a = R_a(\text{medida}) \times 0,5 \quad (3.1)$$

Caso contrario su configuración es triángulo correspondiente a la Figura 3.4 y se debe aplicar la ecuación (3.2)

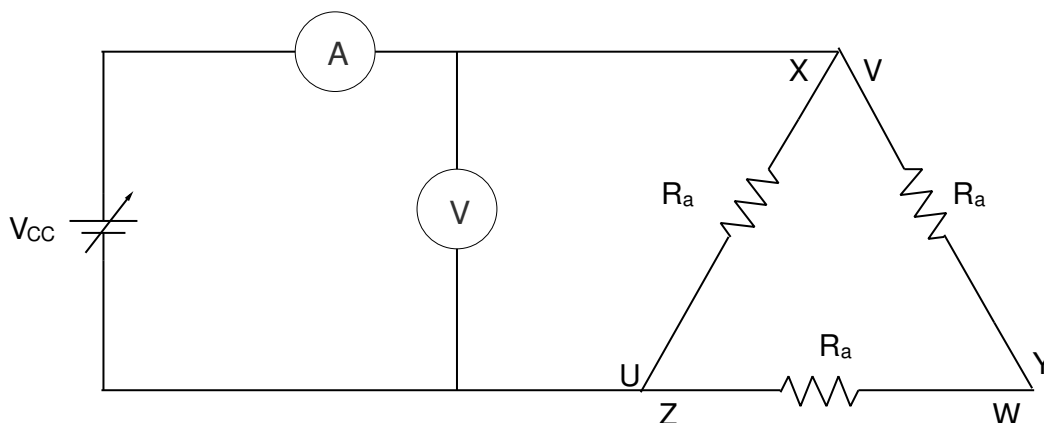


Figura 3.4. Esquema para la toma de valores, conexión triángulo [12].

$$R_a = R_a(\text{medida}) \times 1,5 \quad (3.2)$$

3.4.1.2 Prueba en circuito abierto

La prueba en circuito abierto conjuntamente con la prueba de cortocircuito en saturación se realiza para determinar la reactancia no saturada de eje directo X_d , mediante estas pruebas se demuestra el fenómeno de saturación del material del hierro.

El objetivo de esta prueba es determinar la curva de saturación en circuito abierto, la máquina debe funcionar como generador en vacío para lo cual es necesario impulsarla mediante un motor primario a su velocidad nominal. La norma IEEE Std 115-2009, establece registrar al menos 21 lecturas, siguiendo las directrices expresadas a continuación:

1. Una vez en funcionamiento tomar una lectura sin excitar el generador, de esta manera se conoce el voltaje remanente.
2. Variando el campo de excitación hasta el 60% del voltaje nominal del devanado del estator tomar 6 lecturas incluyendo una lectura a excitación 0.
3. Se deben tomar 10 lecturas entre el 60% y 110% del voltaje nominal con un aumento del 5% entre cada lectura, esto debido a que en este rango se encuentra el codo de saturación y se requiere tener varios puntos para observar a detalle su comportamiento.
4. Para terminar, se realiza la toma de dos valores por encima del 110% lo antes posible hasta que alcance el 130% del voltaje nominal.

Se recomienda tomar lecturas de voltaje entre los terminales de salida de la máquina con el fin de verificar el balance existente entre fases, además se verifica la velocidad del rotor y los valores de corriente de excitación, mediante estos datos se obtiene la curva de saturación.

Es necesario mantener a la máquina operando hasta que se estabilice en cada registro de lectura, con la finalidad de evitar errores provocados por cambios de velocidad.

Es necesario realizar las lecturas en orden ascendente evitando superar cada valor porcentual de voltaje, si se exceden estos valores se produce el efecto de lazo de histéresis, para corregir este error es necesario desenergizar campo y reiniciar la prueba.

La curva de magnetización se obtiene considerando que en el eje de las abscisas se colocarán valores de corrientes de campo y en el eje de las ordenadas los voltajes de armadura.

3.4.1.3 Prueba de cortocircuito en saturación

Esta prueba consiste en aplicar un cortocircuito sostenido trifásico en los terminales del inducido (estator).

En base a la norma IEEE 115-2009, se realiza el siguiente procedimiento:

1. La máquina tiene que funcionar como generador a velocidad nominal, aplicando un cortocircuito controlado en los terminales del estator.
2. La prueba se debe realizar desde el 125% de la corriente nominal de armadura hasta el 25%, de manera decreciente en intervalos de 25%.
3. Tomar las lecturas de voltaje de las tres fases para comprobar el balance.
4. Registrar 5 lecturas de corriente de línea en armadura y corriente de campo.
5. En un principio el circuito de campo debe estar conectado a su valor más bajo, aumentando cuidadosamente hasta que la corriente de armadura alcance el valor máximo permitido.

3.4.1.4 Prueba de deslizamiento

Esta prueba se realiza para encontrar la reactancia no saturada de eje en cuadratura, además previamente se debe conocer el valor de la reactancia sincrónica de eje directo obtenida de las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito en saturación.

Para esta prueba se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Verificar que los terminales del devanado de excitación se encuentren desenergizados.
2. Alimentar el circuito de armadura mediante una fuente trifásica de secuencia positiva a un valor por debajo del codo de la curva de saturación (donde la curva se desvía de la línea de entrehierro).
3. Aplicar deslizamientos de 1%, 2% y 3%, haciendo que el rotor gire a una velocidad diferente (ligeramente menor).
4. Durante la prueba tomar oscilogramas de la corriente de línea en armadura, voltaje de línea en armadura.
5. Registrar el voltaje en el devanado de campo.

Se recomienda que el deslizamiento no sobrepase el 5%, ya que el voltaje inducido en el circuito de campo puede tomar valores altos es necesario controlar que el deslizamiento aplicado sea bajo midiendo la velocidad de la máquina y tratando de que la velocidad permanezca relativamente constante.

3.4.1.5 Prueba de cortocircuito trifásico

Se realiza para determinar los parámetros de reactancias transitoria de eje d (X'_d) y reactancia subtransitoria de eje d (X''_d), además de las constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo t'_d y t''_d por ello es necesario aplicar la prueba de cortocircuito trifásico.

Se analiza el comportamiento de la corriente de línea del devanado de armadura al aplicar un cortocircuito trifásico mediante el siguiente procedimiento:

1. Aplicar un cortocircuito en los terminales del devanado de armadura, considerando que la máquina debe funcionar como generador sin carga y a velocidad sincrónica.
2. Se debe aplicar un cortocircuito en el devanado de armadura a través de un interruptor tripolar de cuchillas.
3. Registrar valores pre- falla de corriente y voltaje de campo antes del cortocircuito.
4. Durante el evento registrar oscilogramas de voltaje y corriente de línea en armadura mediante el osciloscopio.
5. La prueba debe ser realizada lo más rápido posible ya que se debe precautelar la integridad mecánica y eléctrica de la máquina.

6. Graficar los datos obtenidos en escala semilogarítmica se presenta en la Figura 3.5 definidos como curva A, línea B, curva C y línea D según la norma IEEE Std 115, donde la curva B es la corriente total del cortocircuito en p.u sustraída la componente de estado estacionario. La línea C es una extensión de la parte lineal de la curva B hasta el cruce por cero. La curva A nombrada componente subtransitoria se encuentra de la resta de la curva B con la línea C y finalmente la línea D que es una extensión de la parte línea de la curva A componente subtransitoria hasta su cruce por cero.

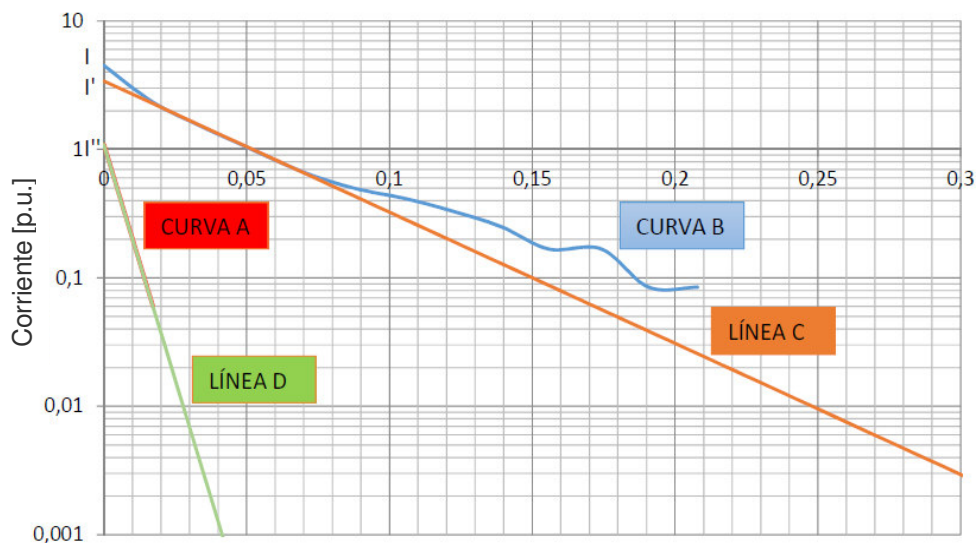


Figura 3.5. Componentes de corriente de un cortocircuito trifásico [8].

3.4.1.6 Prueba de recuperación de voltaje

Esta prueba es necesaria para encontrar las constantes de tiempo transitorio y subtransitoria de circuito abierto de eje directo t'_{do} y t''_{do} , para lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. La máquina debe operar como generador a velocidad sincrónica, se utiliza el mismo circuito que la prueba de cortocircuito trifásico.
2. Alimentar devanado de excitación con un voltaje de por debajo del codo de la curva de saturación en vacío,
3. Conectar un interruptor de cuchillas tripolar en los terminales de bobinado de armadura para realizar el cortocircuito.

4. Registrar oscilogramas de corriente y voltaje de línea previo a la apertura de la falla mediante el interruptor.
5. Graficar los datos en una escala semilogarítmica tal y como se muestra en la Figura 3.6, en donde la curva B se obtiene de la diferencia entre la envolvente de voltaje de recuperación y el voltaje estacionario previo al despeje de la falla, la línea C es la extensión de la porción transitoria de la curva B hasta que cruce por cero, la curva A es el resultado de la resta entre la línea C y la curva B. La línea D es la extensión lineal de la curva A hasta su corte con el eje del tiempo en cero.

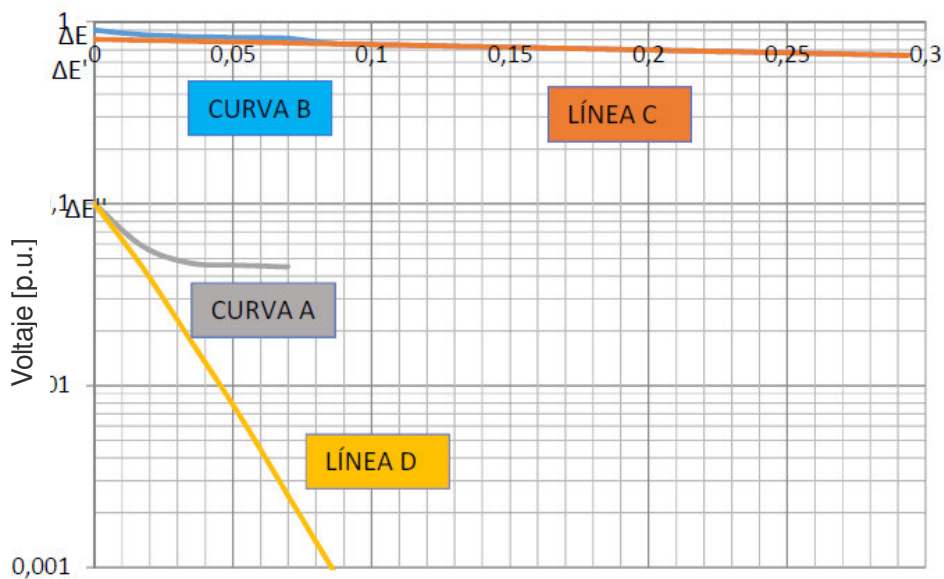


Figura 3.6. Componentes de corriente en condiciones de recuperación de voltaje [8].

3.4.1.7 Prueba de cortocircuito súbito línea a línea

Esta prueba se realiza para encontrar la reactancia subtransitoria de eje de cuadratura X''_q .

Se debe realizar el mismo tipo de conexión que se utilizó para el cortocircuito trifásico a diferencia que se cortocircuitará 2 líneas, de igual manera se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. La máquina debe operar como generador a velocidad sincrónica
2. Se debe aplicar el cortocircuito durante 0,5 (s) para evitar daños en la máquina.
3. Se recomienda tomar valores de pre-falla en bobinado de armadura y de campo.
4. Durante el evento se debe tomar oscilogramas de voltaje y corriente en el devanado de armadura.

5. Graficar los datos obtenidos en escala semilogarítmica se presenta en la Figura 3.7 el procedimiento similar que la Figura 3.5, donde la curva B es la corriente total del cortocircuito en p.u sustraída la componente de estado estacionario. La línea C es una extensión de la parte lineal de la curva B hasta el cruce por cero. La curva A nombrada componente subtransitoria se encuentra de la resta de la curva B con la línea C y finalmente la línea D que es una extensión de la parte línea de la curva A componente subtransitoria hasta su cruce por cero.

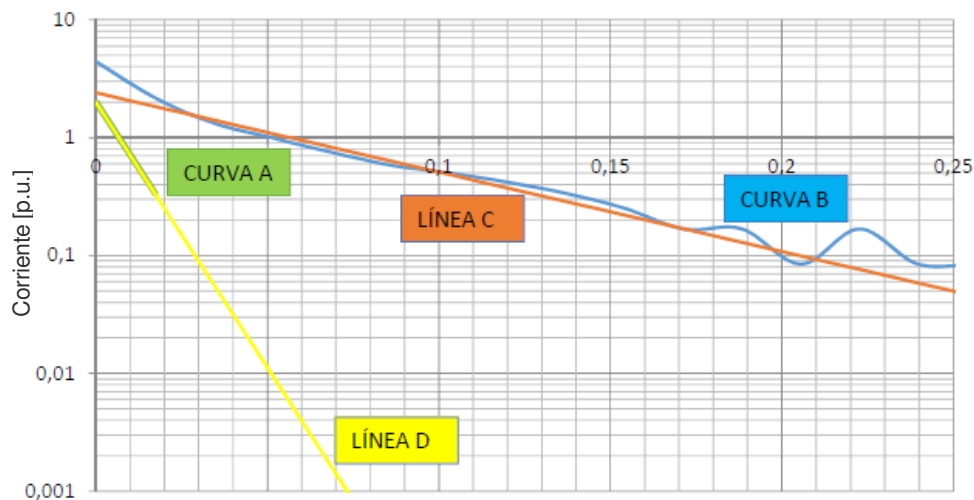


Figura 3.7. Componentes de corriente en condiciones de un cortocircuito bifásico [8].

3.4.1.8 Prueba de desconexión de bajo voltaje a un bajo deslizamiento

Esta prueba se realiza para encontrar la constante de tiempo subtransitoria de cortocircuito (t''_q) y la constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto (t''_{q0}) de eje de cuadratura.

La máquina debe operar como generador a una velocidad por debajo de la velocidad sincrónica, se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Con ayuda de un autotransformador alimentar el devanado de armadura con un voltaje trifásico en el rango del 5% - 10% del voltaje nominal.
2. Establecer un deslizamiento menor al 1%.
3. Realizar la desconexión súbita cuando el rotor este magnetizado por el eje de cuadratura, esta magnetización ocurre cuando el voltaje en campo es mínimo.
4. Registrar oscilogramas de corriente y voltaje de línea en armadura.

5. Finalmente se trasladan los valores de voltaje a una gráfica en escala semilogarítmica, la componente transitoria $V'(0) + V(\infty)$ se determina de la extensión de la porción lineal de la curva del decaimiento del voltaje. Para encontrar la componente subtransitoria $V''(0)$ se debe restar la componente $V'(0)$ del voltaje que decae.

3.4.1.9 Prueba de rechazo de carga

Para determinar la constante de inercia (H) de la máquina se realiza la prueba de rechazo de carga:

1. Generador funcionando mediante una máquina motriz, a velocidad sincrónica y al 100% de su carga nominal.
2. Realizar la desconexión súbita de la carga.
3. Registrar en el momento de la desconexión los valores de potencia en el devanado de armadura.
4. Obtener oscilograma de la frecuencia durante el evento, desde el momento que se encuentra a plena carga hasta después de la desconexión de la carga.

Este efecto se da por el cambio de frecuencia que sufre la máquina el momento de desconectar una carga, hasta el momento que vuelve a sus condiciones normales de operación (ver Figura 3.8).

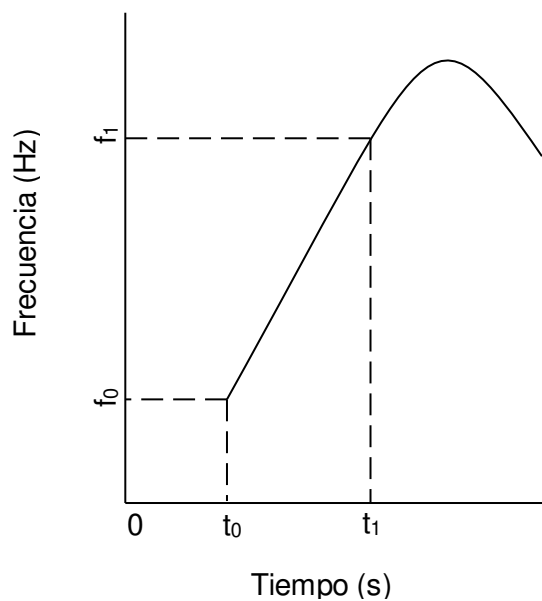


Figura 3.8. Frecuencia de la máquina ante un rechazo de carga.

3.4.2 MÁQUINA DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción mostrada en la Figura 3.9, será sometida a pruebas eléctricas basadas en la norma IEEE Std 112-2004 [3], estas pruebas necesarias para obtener valores de reactancias y resistencias, se detallan a continuación.

1. Prueba de corriente continua.
2. Prueba sin carga.
3. Prueba a rotor bloqueado.

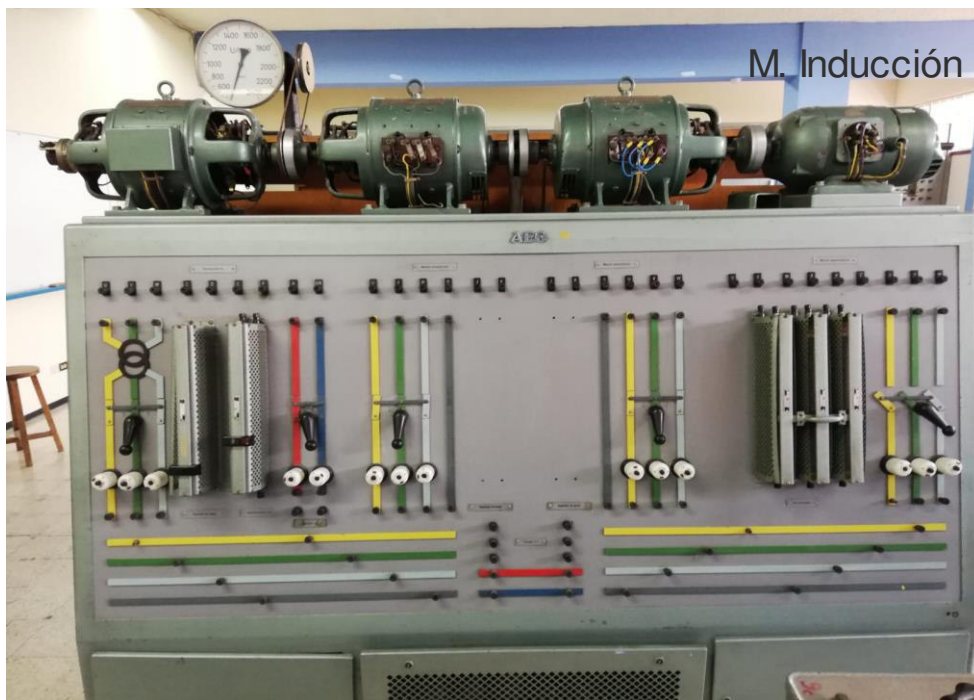


Figura 3.9. Módulo 1 compuesto de una máquina de inducción.

3.4.2.1 Prueba de corriente continua

Para lograr obtener la resistencia de armadura es necesario aplicar la prueba de corriente continua:

1. Conocer previamente el tipo de conexión en el que se encuentra el estator, a partir de esto se encuentra el valor de la resistencia, para una conexión en estrella se aplica la ecuación (3.3), mientras que una conexión en triángulo se debe aplicar la ecuación (3.4).

$$R_a = R_a(\text{medida}) \times 0,5 \quad (3.3)$$

$$R_a = R_a(\text{medida}) \times 1,5 \quad (3.4)$$

2. Se realiza el método de volt-amperímetro como se presenta en la Figura 3.10 para conocer el valor de la resistencia del estator.
3. Alimentar el devanado de armadura con una fuente de voltaje CC e incrementar el valor de voltaje comenzando con un valor de voltaje relativamente bajo.

En la toma de valores de voltaje y corriente, es necesario controlar que la corriente del estator no supere el valor nominal de corriente, se realiza el mismo procedimiento para los tres devanados.

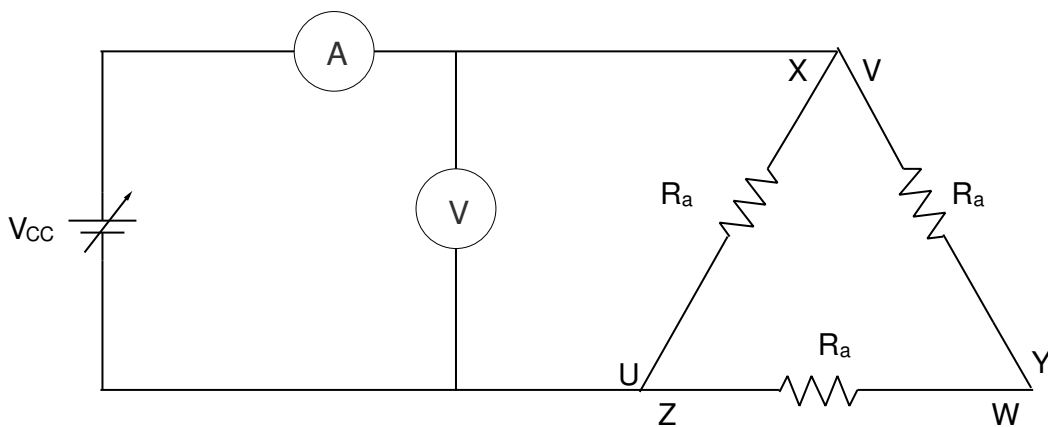


Figura 3.10. Método Volt-Amperímetro (circuito) aplicado en la prueba de resistencia de armadura [12].

Este tipo de máquinas por su estructura poseen aislamiento clase A como se presenta en la Tabla 3.1, por esta razón es necesario realizar una corrección de temperatura a 75°C [9].

Tabla 3.1. Temperatura específica correspondiente al aislamiento [18].

Clase de Aislamiento	Temperatura en °C
A	75
B	95
F	115
H	130

3.4.2.2 Prueba sin Carga

Esta prueba conjuntamente con la prueba de rotor bloqueado se realiza para obtener los valores de reactancia de rotor (X'_{lr}), reactancia del estator (X_{ls}) y resistencia de rotor referida al estator (r'_r).

Se aplica el siguiente procedimiento para la prueba en vacío (sin carga conectada al motor):

1. Alimentar el motor con voltaje y frecuencia nominal.
2. Registrar valores de entrada: voltaje, corriente y frecuencia a la que se realiza la prueba.
3. Se recomienda utilizar un analizador de Red, en la Figura 3.11 se detalla la conexión del analizador.

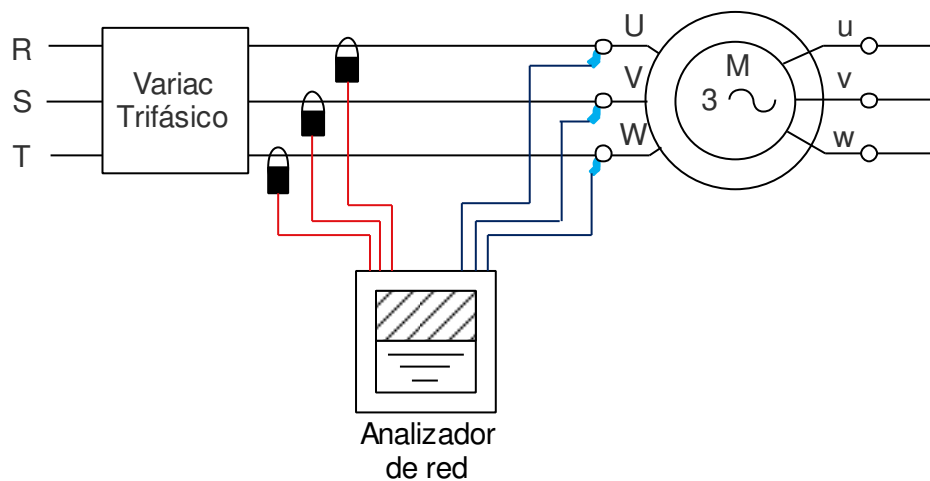


Figura 3.11. Esquema de la prueba sin carga y conexión del analizador de red [19][20].

3.4.2.3 Prueba a Rotor Bloqueado

Esta prueba se aplica para tres frecuencias: frecuencia nominal, frecuencia al 50% de la frecuencia nominal y frecuencia al 25% de la frecuencia nominal, en los tres niveles de frecuencia es necesario alcanzar el valor de la corriente nominal según la norma IEEE Std. 112 [3]. Por limitaciones del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, sólo se realiza la prueba a frecuencia nominal (60 Hz), registrando datos de potencias, voltajes y corrientes.

En la Figura 3.12 se detalla el uso de un autotransformador trifásico necesario para el desarrollo de la prueba mediante el siguiente procedimiento:

1. Con el autotransformador se incrementa poco a poco el voltaje a la salida hasta llegar al valor de la corriente nominal.
2. Cuando se obtenga el valor nominal de la corriente se procede a registrar valores de potencias, voltajes y corrientes.

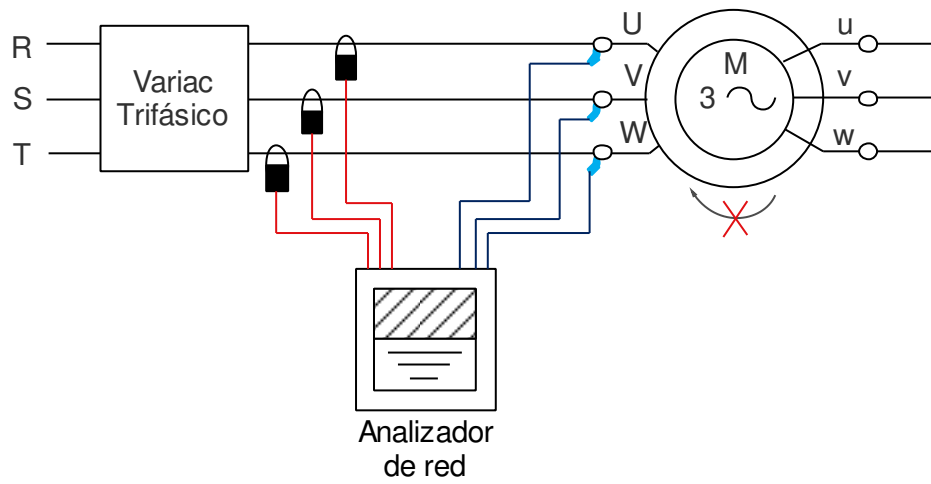


Figura 3.12. Esquema prueba a rotor bloqueado [19].

3.4.3 MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

En base a la norma IEEE Std 113 [4], las pruebas deben ser efectuadas en conexión independiente o shunt, se recomienda verificar la existencia de excitación en campo durante el desarrollo de las pruebas, de no existir campo la velocidad del motor crecería rápidamente y podría llegar a embalsarse [21]. En la Figura 3.13 se muestra el conjunto de máquinas que serán evaluadas.

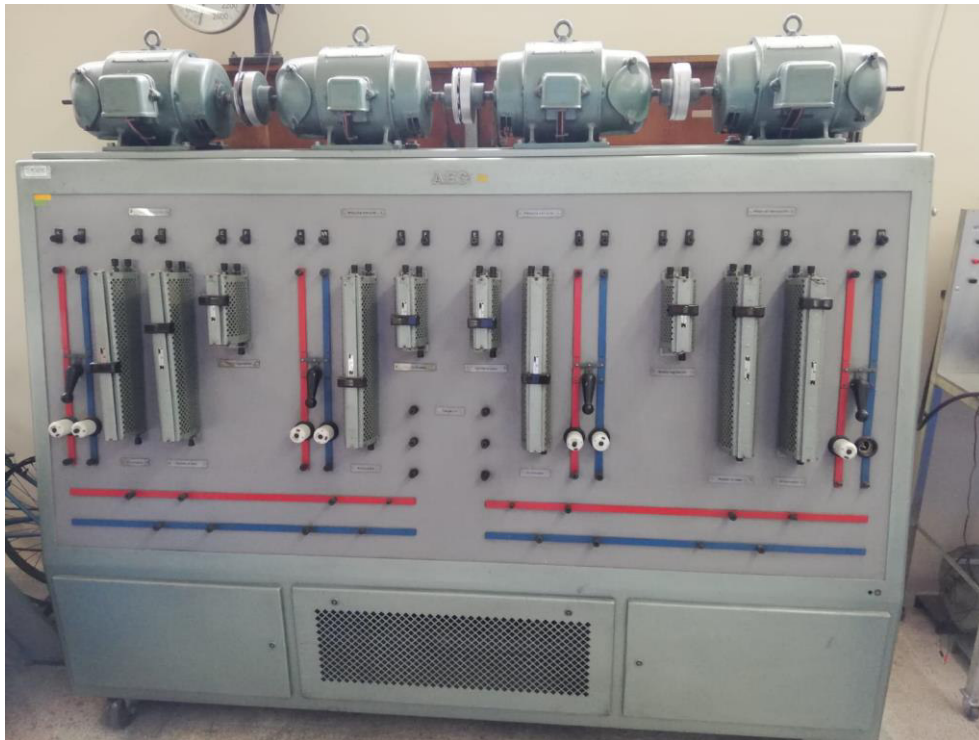


Figura 3.13. Módulo 2 controlar la corriente del estator supervisando que no compuesto por máquinas CC.

3.4.3.1 Prueba de corriente continua

Para la realización de esta prueba es necesario aplicar el siguiente procedimiento:

1. Realizar la identificación de cada uno de los terminales del devanado de campo, devanado de armadura, y de ser el caso también de los devanados de compensación.
2. Alimentar los devanados con una fuente de voltaje de corriente continua, como se presenta en la Figura 3.14.

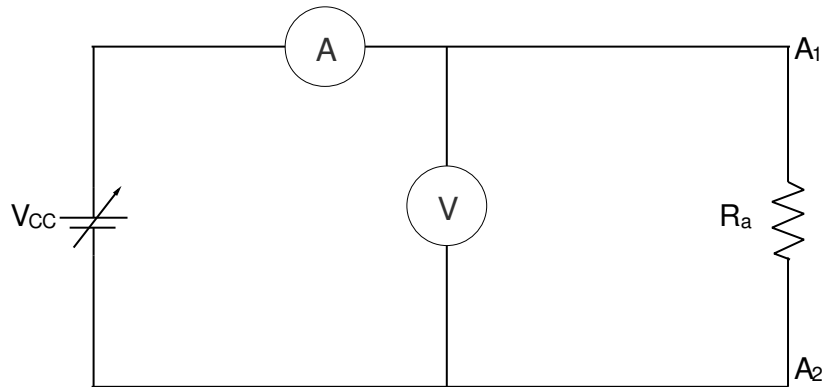


Figura 3.14. Prueba de voltímetro amperímetro para la determinación de resistencias de cada uno de los devanados.

3. Tomar 10 valores de voltaje y corriente, luego determinar los valores de cada una de las resistencias en los devanados.

Es recomendable controlar los valores de corriente para que no superen los valores nominales en los devanados correspondientes a cada máquina.

3.4.3.2 Prueba en circuito abierto

Se realiza esta prueba con el objetivo de conocer las características de los materiales electromagnéticos de las máquinas CC siguiendo los lineamientos presentados a continuación:

1. La máquina de corriente continua debe funcionar como generador a velocidad nominal y constante.
2. Registrar el valor de voltaje remanente el cual se obtiene sin excitar al generador.
3. Alimentar campo con una fuente de alimentación de corriente continua, para conseguir distintos valores de voltaje generado.
4. Durante la prueba tomar valores de voltaje en armadura y corriente de campo.
5. Es necesario llegar al 125% del voltaje nominal sin carga.

Para evitar problemas con el lazo de histéresis es necesario que la corriente de campo no disminuya de su estado inicial, en todo momento la máquina debe girar a velocidad nominal y las medidas deben ser tomadas en forma ascendente.

La curva de magnetización se obtiene trazando en el eje de las abscisas valores de corriente de campo y en el eje de las ordenadas valores de voltaje obtenidos en armadura.

3.4.3.3 Prueba con carga

Los pasos descritos a continuación son necesarios para poder cumplir con el objetivo de la esta prueba:

1. La máquina debe funcionar como generador impulsado por una máquina motriz.
2. Registrar los valores de voltaje generado sin excitación, cuando el campo esté excitado se toma lecturas de corriente en campo.
3. Durante esta prueba se debe registrar valores de voltaje y corriente en armadura en cada uno de los pasos de carga aplicados.

Es recomendable realizar la conexión shunt o independiente como se presenta en la Figura 3.15, siendo necesario verificar que la corriente de campo se encuentre dentro de los valores nominales, se recomienda invertir la polaridad del campo de armadura si el voltaje remanente no se genera.

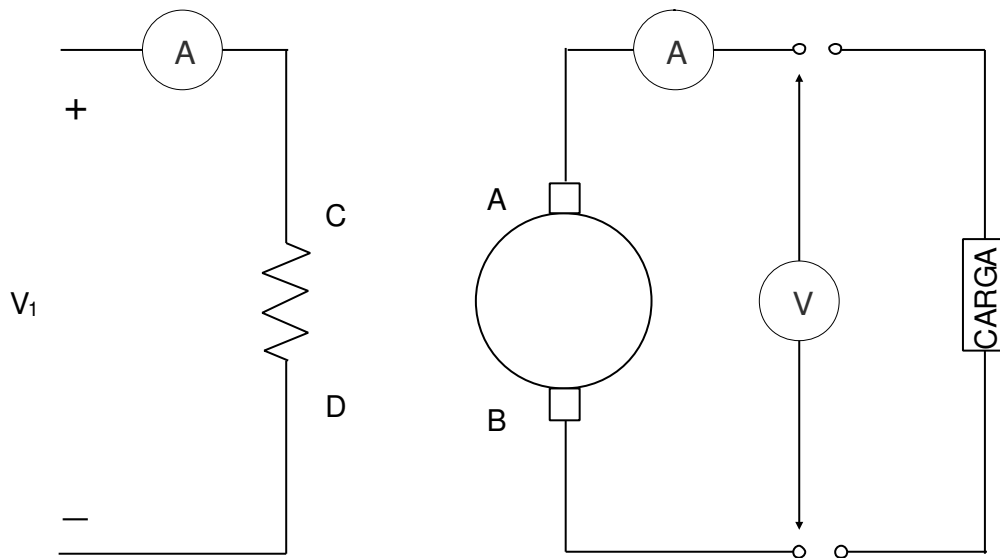


Figura 3.15. Conexión de circuito prueba con carga - máquina CC [21].

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto del mantenimiento preventivo, rehabilitación de los módulos y pruebas eléctricas realizadas en cada una de las máquinas ubicadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

El mantenimiento se realiza principalmente para conocer el estado mecánico y eléctrico de las máquinas con el objetivo de mejorar sus condiciones para el posterior uso en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, ciertos elementos defectuosos y discontinuados son reemplazados, mientras que en elementos que pueden ser reutilizados se realiza un mantenimiento correctivo.

Para las pruebas eléctricas se realiza según normas internacionales, además del uso de información recolectada de artículos científicos y trabajos de titulación.

4.2 MANTENIMIENTO

4.2.1 MANTENIMIENTO DE LAS MÁQUINAS

El desmontaje de las máquinas inicia identificando y desconectando el cableado de las borneras de cada máquina y del panel móvil (ver Figura 4.1 y Figura 4.2).



Figura 4.1. Identificación y etiquetado de cableado en la máquina.

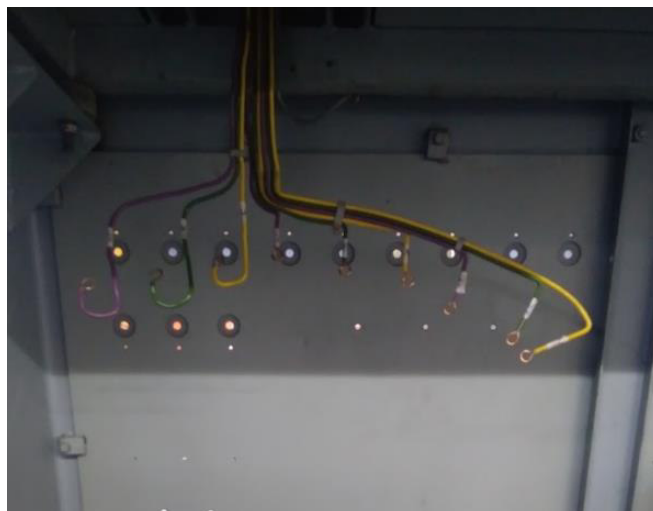


Figura 4.2. Identificación y etiquetado en el panel móvil.

En la Figura 4.3, se muestran las partes constructivas de una de las máquinas sincrónicas. El desmontaje debe ser realizado con precaución, cuidando de no estropear las partes constructivas y cableado en general. Durante este procedimiento la inspección visual se debe realizar a detalle con la finalidad de identificar el deterioro o alguna falla.



Figura 4.3. Desarmado de máquina sincrónica.

El mal estado de rodamientos provoca el mal funcionamiento de una máquina, siendo la principal causa de sobrecalentamiento y presencia sobrecargas. Una alineación inadecuada, mala calidad del lubricante o suciedad ocasionan estos problemas.

La Figura 4.4 muestra el estator de una máquina sincrónicas en el que se evidencia la importancia de la inspección visual, en la imagen se aprecia la acumulación suciedad y polvo que puede producirse en este tipo de maquinaria. Seguidamente se realiza la prueba de aislamiento mediante el equipo Megger, esta prueba facilita la obtención del valor de la rigidez dieléctrica en cada uno de los devanados, en el caso de maquinaria eléctrica es

común observar que la resistencia de aislamiento sea superior a 100 MΩ, siendo un indicativo de un aislamiento apropiado [17].

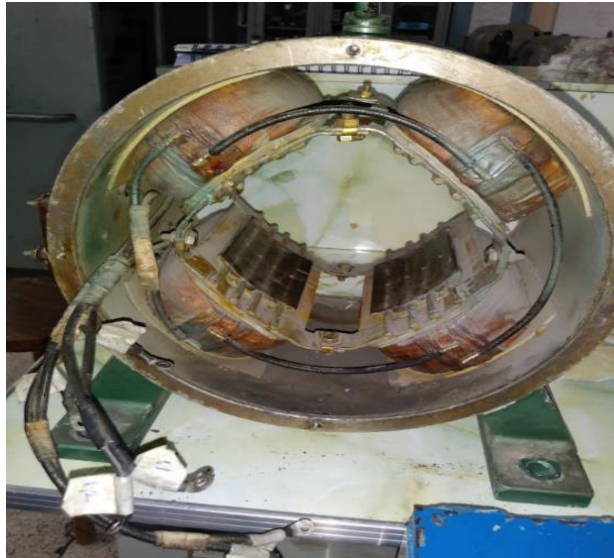


Figura 4.4. Inspección visual, estator máquina síncrona con polvo acumulado.

La temperatura máxima de funcionamiento en rodamientos a condiciones nominales está en el rango de 40 a 50 grados centígrados [16]. En la Figura 4.5 se observa el rotor de máquina síncrona en la que se aprecia la acumulación de suciedad.



Figura 4.5. Inspección visual, rotor máquina síncrona con suciedad acumulada y desgaste de barniz.

En el caso de la máquina CC se debe revisar que el colector se encuentre libre de aceite o suciedad, ya que esto dará origen a la producción de chispas e impedirá conseguir una buena conmutación.

En la Figura 4.6, se aprecia que las escobillas necesitan ser inspeccionadas con frecuencia debido al desgaste por fricción que presentan con el colector.



Figura 4.6. Escobillas de una máquina CC.

La presión que ejercen las escobillas sobre el colector dependerá del uso y condiciones de trabajo que se le dé a la máquina eléctrica, es así que a mayor vibración la presión de las escobillas es más alta. La presión óptima debe causar un mínimo desgaste del colector y de las escobillas, al mismo tiempo este ajuste debe garantizar un buen contacto.

La Figura 4.7 presenta evidencias del deterioro total de la grasa en máquinas eléctricas, por ese motivo la limpieza y el cambio de grasa es uno de los aspectos más importantes para lograr un correcto funcionamiento de este tipo de maquinaria.



Figura 4.7. Tapa de rodamientos con grasa en total deterioro.

Los estatores y rotores de todas las maquinarias deben mantenerse limpios, mediante el uso de un compresor de aire se logra limpiar áreas de difícil acceso de todos los bobinados como se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Limpieza de polvo mediante compresor

Completada la limpieza de cada parte constructiva de las máquinas, se necesita aplicar barniz dieléctrico como se muestra en la Figura 4.9, esto con el objetivo de prolongar su vida útil en base a mejorar el aislamiento de sus partes eléctricas y magnéticas.



Figura 4.9. Barniz dieléctrico y rotor máquina de inducción libre de suciedades.

El barnizado de los bobinados, se realiza utilizando brochas finas, siendo recomendable la aplicación de una capa fina y uniforme de este material (ver Figura 4.10).



Figura 4.10. Barnizado de rotores correspondientes a máquinas de corriente continua.

El proceso de secado es importante ya que si las máquinas presentan humedad se afectará su aislamiento y/o funcionamiento, en la Figura 4.11 se presenta un secado mediante intenso sol por 20 días de 7 a 8 horas diarias.



Figura 4.11. Secado de las máquinas eléctricas.

4.2.2 MANTENIMIENTO DE MÓDULOS

La máquina de inducción que se encuentra montada en el módulo 1 debe ser desmontada para colocarla en el módulo 2 y en su lugar montar una máquina de corriente continua. La Figura 4.12 muestra el desmontaje de las partes constructivas de la máquina de inducción entre ellas están: borneras, cables, elementos de protección y resistencias.



Figura 4.12. Desmontaje máquina de inducción, módulo 1.

Durante el desmontaje de la máquina de inducción se puede notar que los dos módulos presentan elementos de protección discontinuados y con daños mostrados en la Figura 4.13, dichos elementos al no estar actualizados ya no se encuentran en el mercado y por ello es necesario aplicar un cambio por interruptores termomagnéticos mostrados en la Figura 4.14 acorde a los valores nominales de corriente de cada máquina.

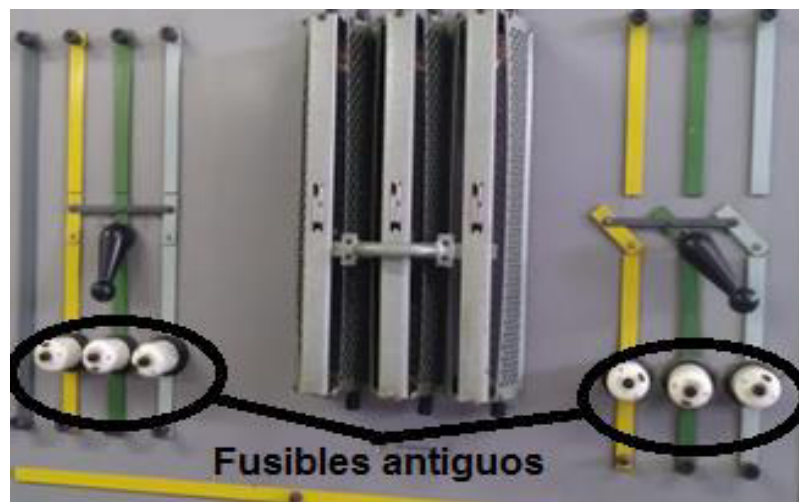


Figura 4.13. Fusibles obsoletos en los módulos móviles.

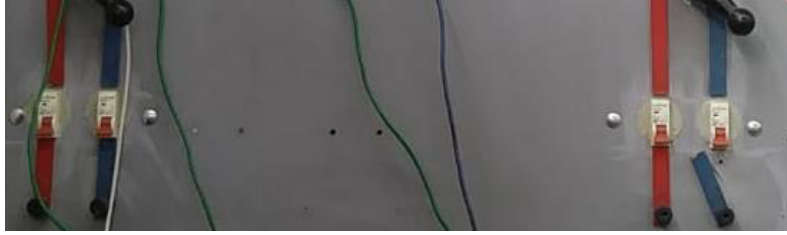


Figura 4.14. Cambio de protecciones en cada uno de los módulos.

En el módulo, además de las protecciones no se encuentran reóstatos para regular el campo de las máquinas sincrónicas (ver Figura 4.15), por ese motivo es necesario añadir nuevos reóstatos como se muestra en la Figura 4.16.

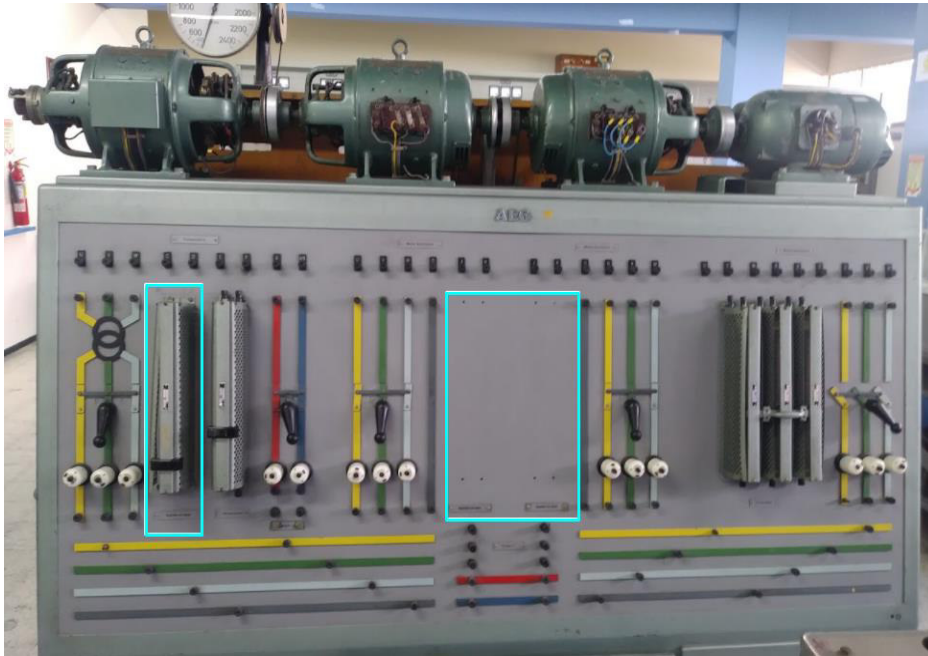


Figura 4.15. Módulos sin reóstatos para máquinas sincrónicas.



Figura 4.16. Cambio de reóstatos en el módulo móvil 1.

Para completar el mantenimiento de cada módulo con las nuevas especificaciones y exigencias de las prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas es necesario revisar y reajustar contactos del cableado del panel de control. En la Figura 4.17 se expone la nueva configuración como resultado final.

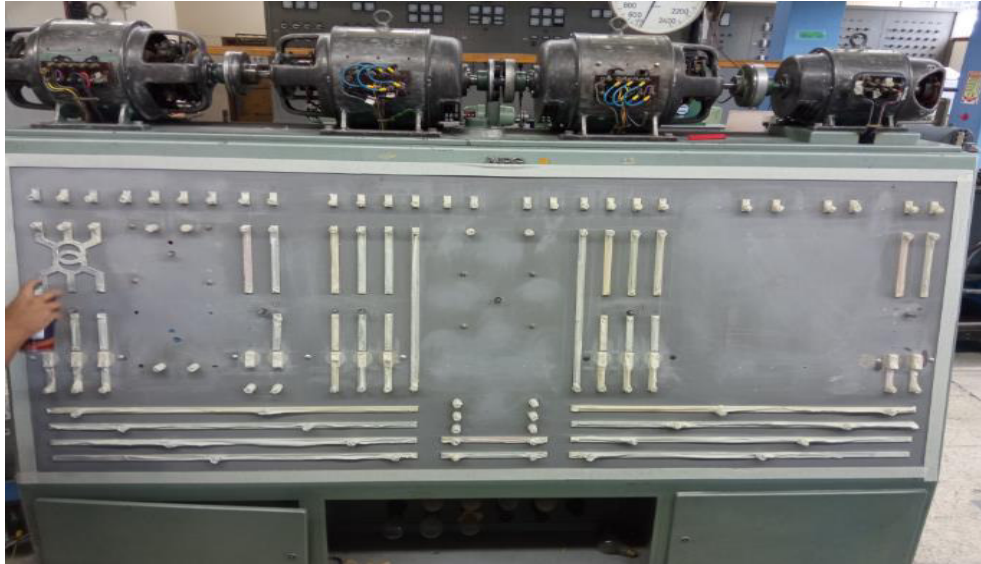


Figura 4.17. Readequación del módulo 1.

Se restaura el panel de control y la parte estructural, este procedimiento se lo realiza para cada uno de los módulos como se muestra en la Figura 4.18, durante el proceso es recomendable cubrir la parte eléctrica y magnética de cada una de las máquinas.



Figura 4.18. Recubrimiento para proceder a pintar los módulos.

Para terminar, se rehabilitan cada uno de los componentes de los módulos, así como el arreglo de cableado y la limpieza de la parte posterior los módulos terminados, la Figura 4.19 corresponde al módulo móvil 1 terminado y La Figura 4.20 corresponde al módulo móvil 2.

La nueva ubicación de las máquinas del módulo 1 con respecto a la distribución de las mismas antes de ser evaluadas y rehabilitadas. En la Figura 4.19 se observa de izquierda a derecha una máquina híbrida, máquina sincrónica 1, máquina síncrona 2, máquina CC de excitación shunt



Figura 4.19. Módulo 1 restaurado con nuevas especificaciones para el laboratorio.

En la Figura 4.19 se observa de izquierda a derecha una máquina CC excitación shunt, máquina CC 1 de excitación serie, máquina CC 2 de excitación serie y una máquina de inducción, que corresponden a la nueva ubicación de las máquinas del módulo 2.



Figura 4.20. Módulo 2 restaurado con nuevas especificaciones para el laboratorio.

4.3 PRUEBAS DE AISLAMIENTO

Para las pruebas de aislamiento se aplica el método de tiempo corto, a temperatura ambiente (20°C). Esta evaluación se determina mediante el instrumento de aislamiento MEGGER. Las pruebas se realizan antes (etapa inicial) y después del mantenimiento en el rotor y estator con respecto a otros devanados y contactos de la máquina, mediante esto se podrá comparar el estado del aislamiento.

La Figura 4.21 presenta un ejemplo del aislamiento mediante el método de tiempo corto presente en la sección 2.5.2.1, los resultados se analizan mediante la relación de absorción dieléctrica (DAR) presente Tabla 4.2.

En base a datos obtenidos en etapa inicial de la prueba de aislamiento entre el núcleo y bobinas de estator de la máquina de inducción como se observa en la Tabla 4.1, la máquina necesita mantenimiento por presentar un bajo nivel de aislamiento en la etapa inicial.

Tabla 4.1. Prueba de aislamiento Estator, máquina de inducción entre Núcleo y bobinas.

Prueba realizada en	Estator		Entre	Núcleo - bobinas				
	Etapa inicial				Después de barnizado			
	Aislamiento (MΩ)		DAR	Voltaje aplicado (V)	Aislamiento (MΩ)		DAR	Voltaje aplicado (V)
	t = 30 (s)	t = 60 (s)			t = 30 (s)	t = 60 (s)		
Bobinado 1	610	821	1,346	1100	590	908	1,539	1099
Bobinado 2	450	565	1,256	1100	395	582	1,473	1099
Bobinado 3	455	571	1,255	1100	465	690	1,484	1100
DAR	1,285				1,499			

Tabla 4.2. Condición de estado de un aislamiento.

Valor del DAR	Condición de aislamiento
DAR < 1,25	Insuficiente
1,25 < DAR < 1,6	OK
DAR > 1,6	Excelente

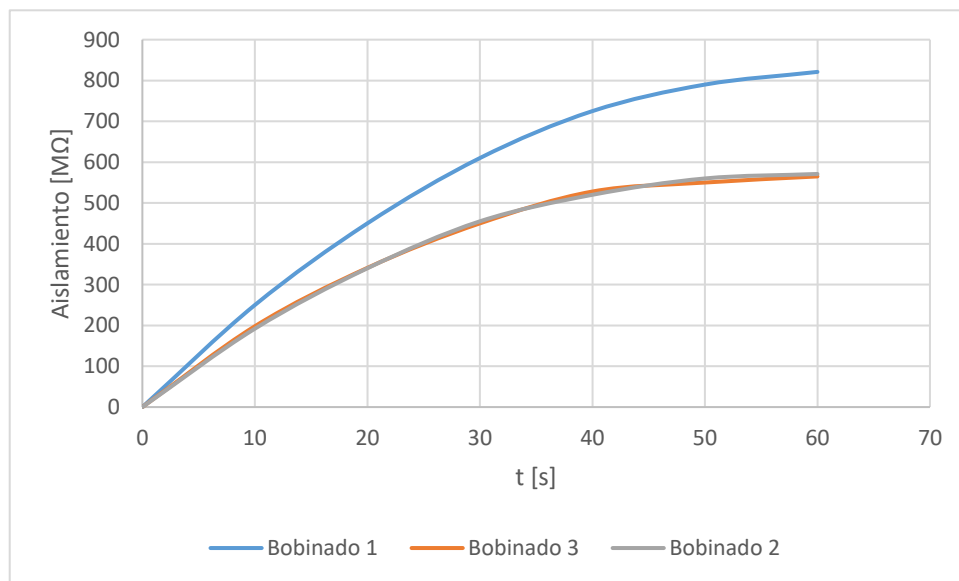


Figura 4.21. Aislamiento estator máquina de inducción – núcleo y bobinas (antes del mantenimiento).

Después del mantenimiento en la máquina de inducción, el nivel de aislamiento mejora aceptablemente como se presenta en la Figura 4.22 y en base a lo expuesto en la sección 2.5.2.1 que presenta una curva típica al aplicar el método de tiempo corto y en base a la relación de absorción dieléctrica que se muestra en la Tabla 4.2 se puede decir que el aislamiento se encuentra en un estado aceptable.

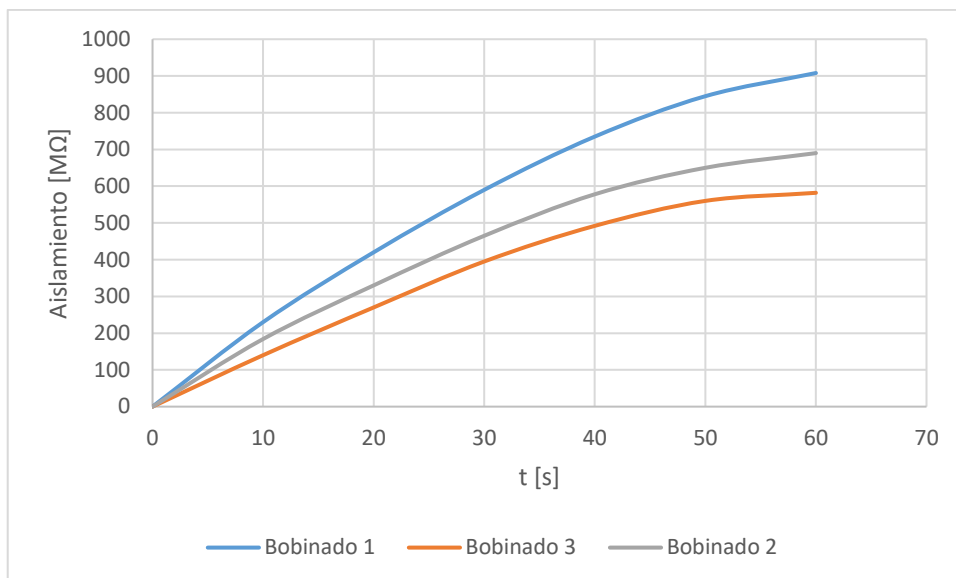
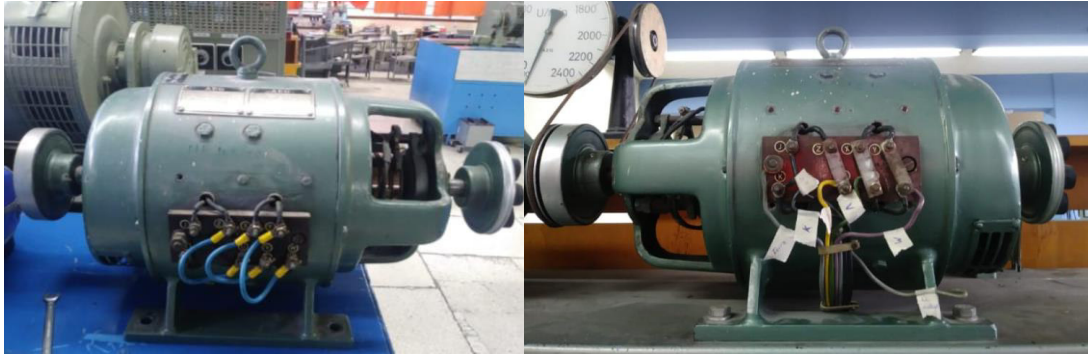


Figura 4.22. Aislamiento estator máquina de inducción – Núcleo y bobinas (después de mantenimiento).

En el ANEXO A se presenta los resultados de las pruebas de aislamiento realizadas a todas las máquinas.

4.4 PARÁMETROS ELÉCTRICOS MÁQUINA SINCRÓNICA

En la Figura 4.23 se presentan las máquinas sincrónicas a ser evaluadas acorde a la norma IEEE Std 115 [2].



a)

b)



c)

Figura 4.23. a) Máquina Sincrónica AEG 1, b) Máquina Sincrónica AEG 2, c) Máquina Sincrónica AEG 3.

En la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se muestran las características de las placas de las máquinas sincrónicas.

Tabla 4.3. Datos de placa de la máquina sincrónica 1.

AEG		AEG	
TYPE DGA	45/4	TYPE DGA	45/4
D-MOT	Nr. 456303	D-GEN	Nr. 456303
Δ/Y 230/400 V	4,45/2,56 A	Δ/Y 230/400 V	3,8/2,17 A
DB 1,5 kW	$\text{Cos}\phi$ 1	DB 1,5 kW	$\text{Cos}\phi$ 0,9
1800 U/min		1800 U/min	60 Hz
Erreg 140 V	0,66 A	Erreg 165V	0,78 A
Isol. -KI E/B	P 00	Isol. -KI E/B	P 00
VDE 530/3,59		VDE 530/3,59	

Tabla 4.4. Datos de placa de la máquina sincrónica 2.

AEG		AEG	
TYPE DGA	45/4	TYPE DGA	45/4
D-MOT	Nr. 456302	D-GEN	Nr. 456302
Δ/Y 230/400 V	4,45/2,56 A	Δ/Y 230/400 V	3,8/2,17 A
DB 1,5 kW	Cos ϕ 1	DB 1,5 kW	Cos ϕ 09
1800 U/min		1800 U/min	60 Hz
Erreg 140 V	0,66 A	Erreg 165V	0,78 A
Isol. -KI E/B	P 00	Isol. -KI E/B	P 00
VDE 530/3,59		VDE 530/3,59	

Inicialmente se determinan los valores bases de las máquinas sincrónicas, para este caso las 2 máquinas tienen las mismas características y se calculan en base a la ecuación (4.1) y (4.2):

$$\text{Potencia } (S_{3\phi}) = 1,5 \text{ [kVA]}$$

$$\text{Voltaje } (V_{L-L}) = 230 \text{ [V]}$$

$$\text{Voltaje } (V_L) = \frac{230}{\sqrt{3}} = 1327,9 \text{ [V]}$$

$$\text{Corriente } (I_{\text{Línea}}) = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{Voltaje}_{L-L}} = \frac{1500 \text{ [VA]}}{\sqrt{3} \times 230 \text{ [V]}} = 3,7653 \text{ [A]} \quad (4.1)$$

$$\text{Impedancia } (Z_{\text{BASE}}) = \frac{(V_{L-L})^2}{S_{3\phi}} = \frac{(230)^2 \text{ [V]}^2}{1500 \text{ [VA]}} = 35,267 \text{ [\Omega]} \quad (4.2)$$

En la Tabla 4.5 se detalla los datos de placa de la máquina híbrida.

Tabla 4.5. Datos de placa de la máquina sincrónica (generador) número 3.

AEG		AEG	
TYPE EU	45	TYPE EU	45
G-MOT	Nr. 456301	D-GEN	Nr. 456301
230 V	10,5 A	150 V	8,4 A
DB 1,8 kW		DB 1,8 kW	Cos ϕ 1
1500 U/min		1800 U/min	60 Hz
Erreg 165V	0,95 A	Erreg 140 V	0,82 A
Isol. -KI E/B	P 00	Isol. -KI E/B	P 00
VDE 530/3,59		VDE 530/3,59	

En el caso de la máquina híbrida, se aplica las ecuaciones (4.3) y (4.4) para obtener los datos bases de corriente e impedancia.

$$\text{Potencia } (S_{3\phi}) = 1,8 \text{ [kVA]}$$

$$\text{Voltaje } (V_{L-L}) = 150 \text{ [V]}$$

$$\text{Voltaje } (V_L) = \frac{150}{\sqrt{3}} = 86,6025 \text{ [V]}$$

$$\text{Corriente } (I_{\text{Línea}}) = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{Voltaje}_{L-L}} = \frac{1800 \text{ [VA]}}{\sqrt{3} \times 150 \text{ [V]}} = 6,9282 \text{ [A]} \quad (4.3)$$

$$\text{Impedancia } (Z_{\text{BASE}}) = \frac{(V_{L-L})^2}{S_{3\phi}} = \frac{(150)^2 \text{ [V]}^2}{1800 \text{ [VA]}} = 12,5 \text{ [\Omega]} \quad (4.4)$$

4.4.1 PRUEBA DE CORRIENTE CONTINUA

4.4.1.1 Resistencia del devanado de armadura

Para encontrar el valor de resistencia de armadura (R_a) es necesario utilizar el método de voltímetro-amperímetro, en la Tabla 4.6, se presentan los valores registrados de la prueba para la máquina sincrónica 1.

Tabla 4.6. Datos obtenidos a temperatura ambiente máquina sincrónica 1.

#datos	Vcc (V)	Icc (A)	Rab (Ω)
1	1	0,45	2,2222
2	1,5	0,65	2,3077
3	2	0,95	2,1053
4	2,5	1,1	2,2727
5	3	1,4	2,1429
6	3,5	1,7	2,0588
7	4	1,9	2,1053
8	4,5	2,2	2,0455
9	5	2,47	2,0243
10	5,5	2,7	2,0370
11	6	2,9	2,0690
12	6,6	3,3	2,0000
Promedio			2,1159

Con el valor de la resistencia promediada a temperatura ambiente ($R_{a1}20^{\circ}\text{C} = 2.1159[\Omega]$) es necesario definir el valor correcto de resistencia por el tipo de conexión y se debe aplicar la ecuación (4.5) debido a que la máquina se encuentra en conexión delta.

$$R_{a1}20^{\circ}\text{C} = R_{a1}20^{\circ}\text{C}(\text{delta}) \times 1,5 = 3,1738247[\Omega] \quad (4.5)$$

Debido a las condiciones ambientales y especificaciones de la norma IEEE Std. 118-1978 [18] se debe realizar la corrección de temperatura como se expresa en la ecuación (4.6). y así se logra obtener el valor de la resistencia en p.u.

$$R_{a1}75^{\circ}\text{C} = R_{a1}20^{\circ}\text{C} \times \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 3,85972[\Omega]$$

$$R_{a1} \text{ p.u} = \frac{R_{a1}}{Z_{\text{BASE}}} = 0,1094428 \text{ p.u.} \quad (4.6)$$

En la Tabla 4.7 se registran los valores de resistencias de la máquina sincrónica 2.

Tabla 4.7. Datos obtenidos a temperatura ambiente máquina sincrónica 2.

#datos	Vcc (V)	Icc (A)	Rab (Ω)
1	0,9	0,5	1,8000
2	1,5	0,75	2,0000
3	2	1	2,0000
4	2,5	1,3	1,9231
5	3	1,55	1,9355
6	3,5	1,8	1,9444
7	4	2,05	1,9512
8	4,5	2,3	1,9565
9	5	2,6	1,9231
10	5,5	2,9	1,8966
11	6	3,15	1,9048
12	6,5	3,4	1,9118
Promedio			1,9289

Con el tipo de conexión que presenta el devanado de la máquina sincrónica 2 y la resistencia de armadura promedio ($R_{a2}20^{\circ}\text{C} = 1,9289[\Omega]$) se aplica la ecuación (4.7).

$$R_{a2}20^{\circ}\text{C} = R_{a2}20^{\circ}\text{C}(\text{delta}) \times 1,5 = 2,8933[\Omega] \quad (4.7)$$

La ecuación (4.8). expone la corrección de temperatura de la ecuación (4.7)

$$R_{a2}75^{\circ}\text{C} = R_{a2}20^{\circ}\text{C} \times \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 3,5186474[\Omega]$$

$$R_{a2} \text{ p.u} = \frac{R_{a2}}{Z_{\text{BASE}}} = 0,0997717 \text{ p.u.} \quad (4.8)$$

En la Figura 4.24 se muestra la ejecución de la prueba voltímetro-amperímetro.



Figura 4.24. Prueba de resistencia armadura de una bobina, máquina sincrónica 1 y 2 respectivamente.

Los distintos valores registrados en el cálculo de la resistencia de armadura a temperatura ambiente de la prueba de voltímetro-amperímetro en la máquina híbrida se exponen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Datos obtenidos a temperatura ambiente máquina híbrida.

#datos	Vcc (V)	Icc (A)	Rab (Ω)
1	0,5	0,2	2,5
2	1	0,5	2,0
3	1,5	0,8	1,88
4	2	1,1	1,81
5	2,5	1,5	1,66
6	3	1,9	1,579
7	3,5	2,3	1,521
8	4	2,8	1,429
9	4,5	3,2	1,41
10	5	3,7	1,351
11	5,5	4,2	1,31
12	6	4,77	1,258
		Promedio	1,64

Con el valor de resistencia de armadura calculada en promedio a temperatura ambiente y con la certeza del tipo de conexión que presenta la máquina híbrida. se aplica la ecuación (4.9).

$$R_{a3} = R_a(\text{medida}) (1,5) = 3,28[\Omega] \quad (4.9)$$

El valor de la resistencia de armadura corregida de 20°C a 75°C, temperatura ambiente y temperatura específica respectivamente, está expresado en p.u. en la ecuación (4.10).

$$R_{a3} 75^\circ\text{C} = R_{a3} 20^\circ\text{C} \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 3,98884[\Omega]$$

$$R_{a3} \text{ p.u} = \frac{R_{a3}}{Z_{\text{BASE}}} = 0,319107 \text{ p.u.} \quad (4.10)$$

En la Figura 4.25 se expone la máquina híbrida en la prueba de voltímetro-amperímetro para determinar la resistencia de armadura.



Figura 4.25. Prueba de resistencia armadura de una bobina, máquina híbrida, generador sincrónico.

4.4.2 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

En la Tabla 4.9. se muestran los datos de voltaje en armadura y corriente de campo, además de la corriente de entrehierro y voltaje de entrehierro, dichos datos se obtienen de la extensión de la parte lineal de la curva de saturación en vacío.

La extensión de la parte lineal se realiza debido a que la curva de saturación no corta en el origen por la presencia de la magnetización remanente, por tal razón se debe extrapolar los datos obtenidos para obtener esta extensión lineal denominada línea de entrehierro, con la cual se obtendrá el valor de corriente de campo correspondiente al voltaje de armadura.

Tabla 4.9. Lecturas para curva de circuito abierto, máquina síncrona 1.

Medición	%Vn	Va1 (V)	Va2 (V)	Va3 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
	0	5,3	5,4	5,5	0	0,0149	5,300
0	10	27,7	27,6	27,6	0,0699	0,0848	30,202
1	20	48	48	47,9	0,125	0,1399	49,833
2	30	69,4	69,4	69,3	0,182	0,1969	70,140
3	40	91,3	91,3	91,2	0,244	0,2589	92,228
4	50	112,9	112,9	112,7	0,302	0,3169	112,891
5	60	134,3	134,2	133,9	0,362	0,3769	134,267
6	65	144,5	144,4	144,1	0,393	0,4079	145,311
7	70	155,4	155,4	155	0,425	0,4399	156,712
8	75	166,3	166,1	165,8	0,459	0,4739	168,825
9	80	176,9	176,9	176,5	0,491	0,5059	180,225
10	85	187,5	187,3	186,9	0,529	0,5439	193,763
11	90	198,2	198,1	197,6	0,564	0,5789	206,232
12	95	209,3	209,1	208,7	0,604	0,6189	220,483
13	100	220,1	219,8	219,5	0,641	0,6559	233,665
14	105	230,7	230,5	239	0,684	0,6989	248,984
15	110	251,9	251,8	251,2	0,78	0,7949	283,185
16	120	262,4	262,6	262,9	0,832	0,8469	301,711
17	130	262,4	262,6	262,9	0,832	0,8469	301,711
18	130	262,4	262,6	262,9	0,832	0,8469	301,711

De la curva de saturación en circuito abierto, presentada en la Figura 4.26, se obtiene la corriente de campo en relación con la línea de entrehierro a voltaje nominal. El valor encontrado es $I_{FG1} = 0,646$ [A], a un voltaje nominal de $V_{n1} = 230$ [V].

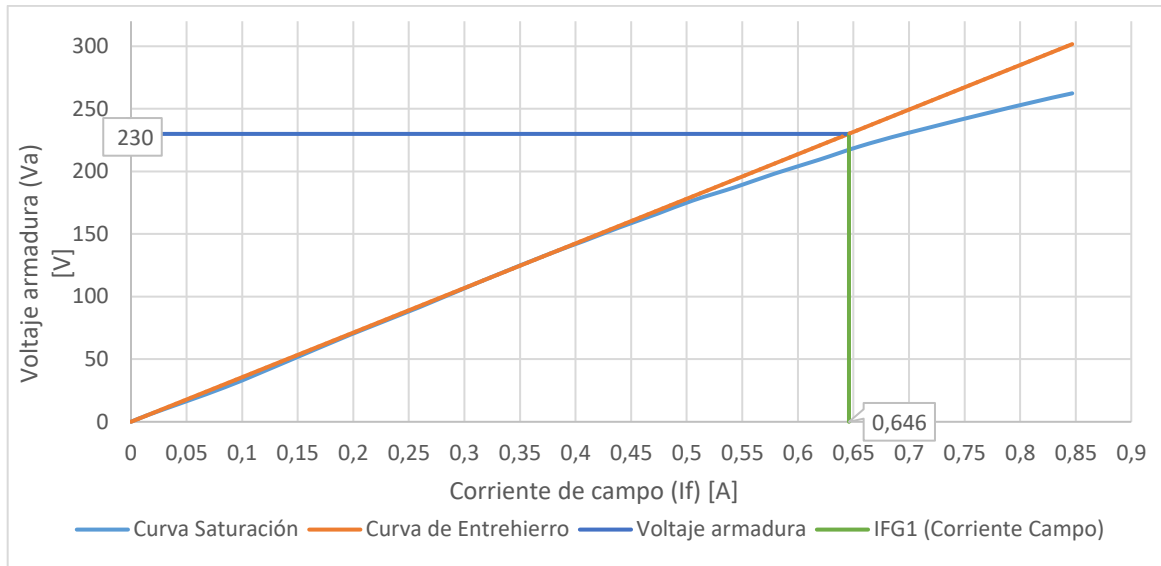


Figura 4.26. Línea Entrehierro vs Curva Saturación (máquina síncrona 1).

La Tabla 4.10 representa datos de prueba de circuito abierto de la máquina síncrona 2.

Tabla 4.10. Lecturas para curva de circuito abierto, máquina síncrona 2.

Medición	%Vn	Va1 (V)	Va2 (V)	Va3 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0	6,3	6,3	6,3	0	0,0182	6,301
1	10	28	28	28	0,071	0,0892	30,842
2	20	48,8	48,9	48,8	0,129	0,1472	50,891
3	30	70,1	70,1	70	0,189	0,2072	71,630
4	40	91,5	91,5	91,4	0,248	0,2662	92,024
5	50	113,1	113,1	113	0,309	0,3272	113,110
6	60	134,2	134,3	134,1	0,368	0,3862	133,503
7	65	145	145	144,9	0,399	0,4172	144,219
8	70	155,2	155,2	155	0,432	0,4502	155,626
9	75	166,3	166,4	166,2	0,464	0,4822	166,687
10	80	177,7	177,7	177,5	0,501	0,5192	179,476
11	85	187,4	187,4	187,3	0,534	0,5522	190,883
12	90	198,2	198,2	198,1	0,572	0,5902	204,018
13	95	209,3	209,4	209,2	0,61	0,6282	217,153
14	100	220	219,9	219,8	0,649	0,6672	230,634
15	105	230,2	230,3	230,1	0,691	0,7092	245,152
16	110	241,3	241,2	240,8	0,737	0,7552	261,052
17	120	250,2	250,4	250,1	0,781	0,7992	276,261
18	130	250,2	250,4	250,1	0,782	0,8002	276,607

La Figura 4.27, muestra el valor de la corriente de campo en relación con la línea de entrehierro ($I_{FG2} = 0,646$ [A]) a voltaje nominal de la prueba de circuito abierto en la máquina síncrona 2.

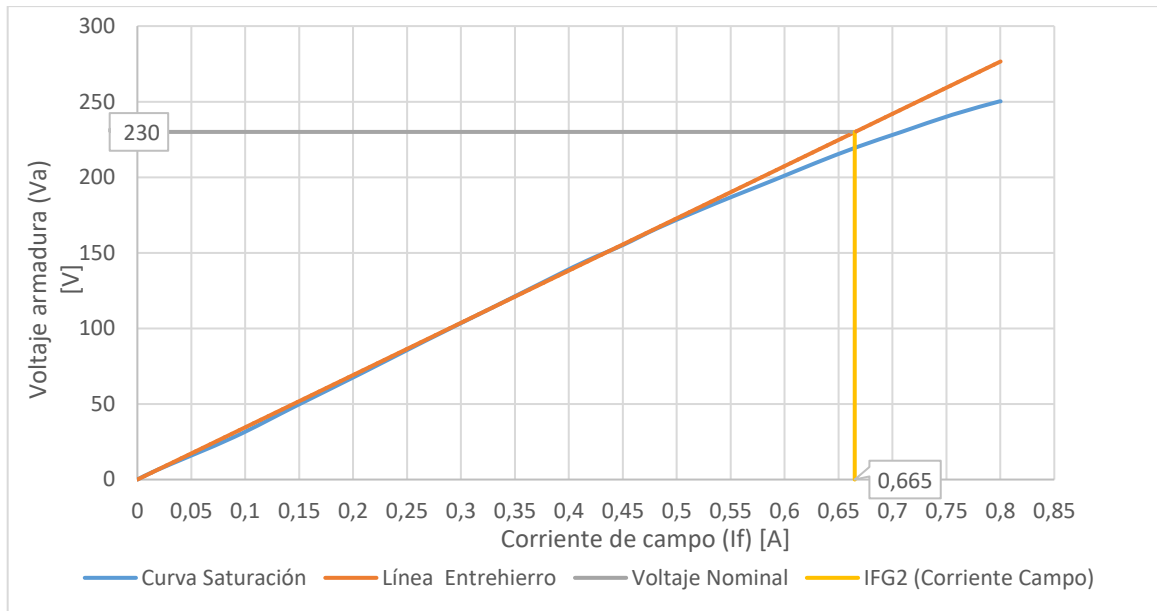


Figura 4.27. Línea Entrehierro vs Curva Saturación (máquina síncrona 2).

La Tabla 4.11 muestra los datos encontrados en la máquina híbrida, mediante la prueba de circuito abierto.

Tabla 4.11. Lecturas para curva de circuito abierto, máquina híbrida.

Medición	%Vn	Va1 (V)	Va2 (V)	Va3 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0	4,3	4,3	4,3	0	0,022	4,302
1	10	17,8	17,8	17,7	0,078	0,100	19,389
2	20	31,2	31,2	31,1	0,146	0,168	32,542
3	30	44,9	44,9	44,7	0,212	0,234	45,308
4	40	58,7	58,7	58,5	0,282	0,304	58,848
5	50	72,1	72	71,8	0,345	0,367	71,034
6	60	85,3	85,4	85,2	0,419	0,441	85,347
7	65	92,5	92,5	92,2	0,457	0,479	92,697
8	70	99,1	99,1	98,7	0,494	0,516	99,854
9	75	106,1	106	105,7	0,538	0,560	108,365
10	80	112,8	112,7	112,4	0,578	0,600	116,101
11	85	119,7	119,6	119,6	0,627	0,649	125,579
12	90	126,2	126,1	125,7	0,672	0,694	134,283
13	95	133,3	133,3	132,9	0,721	0,743	143,761
14	100	140	140	139,5	0,782	0,804	155,560
15	105	146,8	146,8	146,3	0,85	0,872	168,713
16	110	153,5	153,5	152,9	0,926	0,948	183,413

La Figura 4.28 se obtiene el valor de la corriente de campo sobre la línea de entrehierro ($I_{FG3} = 0,775$ [A]) a voltaje nominal de armadura.

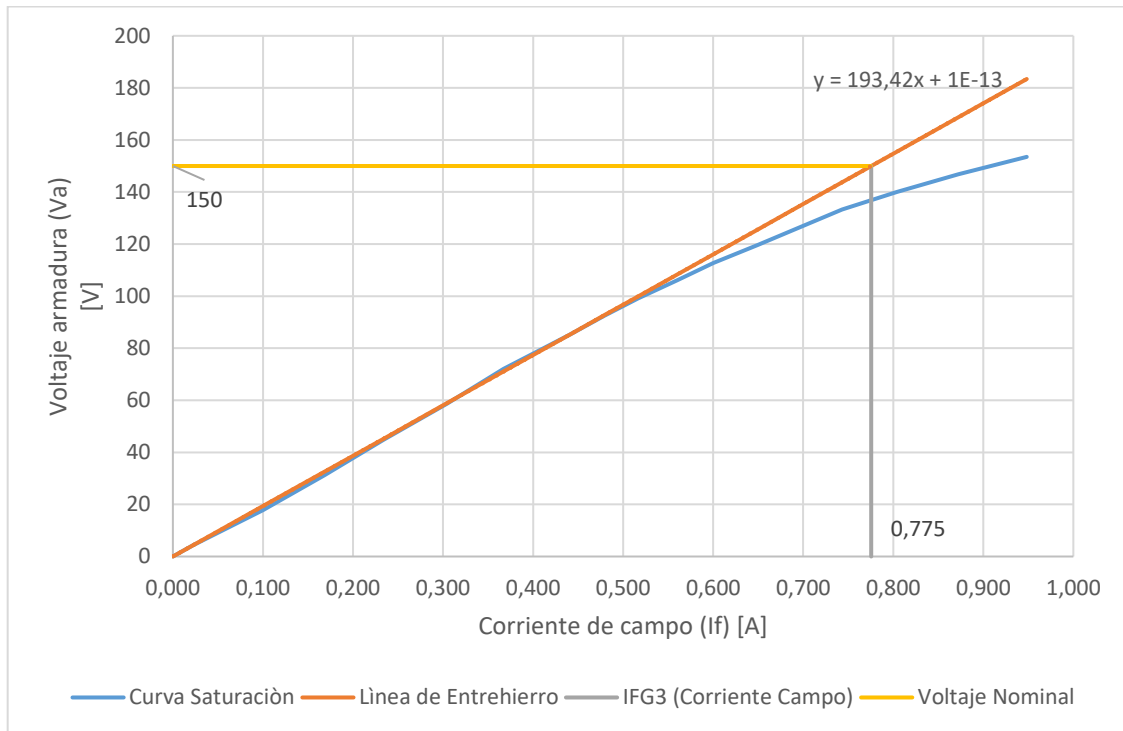


Figura 4.28. Curva máquina híbrida (Línea Entrehierro vs Curva Saturación).

4.4.3 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO SOSTENIDO

La Figura 4.29 muestra las conexiones para el desarrollo de la prueba de cortocircuito en saturación de la máquina síncrona 1.

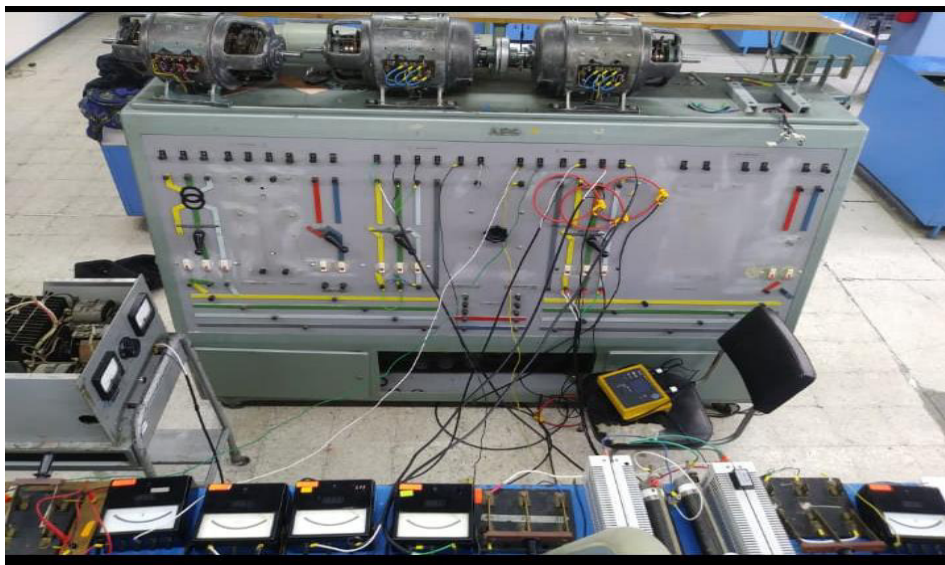


Figura 4.29. Conexión Prueba de saturación en cortocircuito máquina síncrona 1.

En la Figura 4.30 se presenta la conexión de la máquina síncrona 2 durante la prueba.

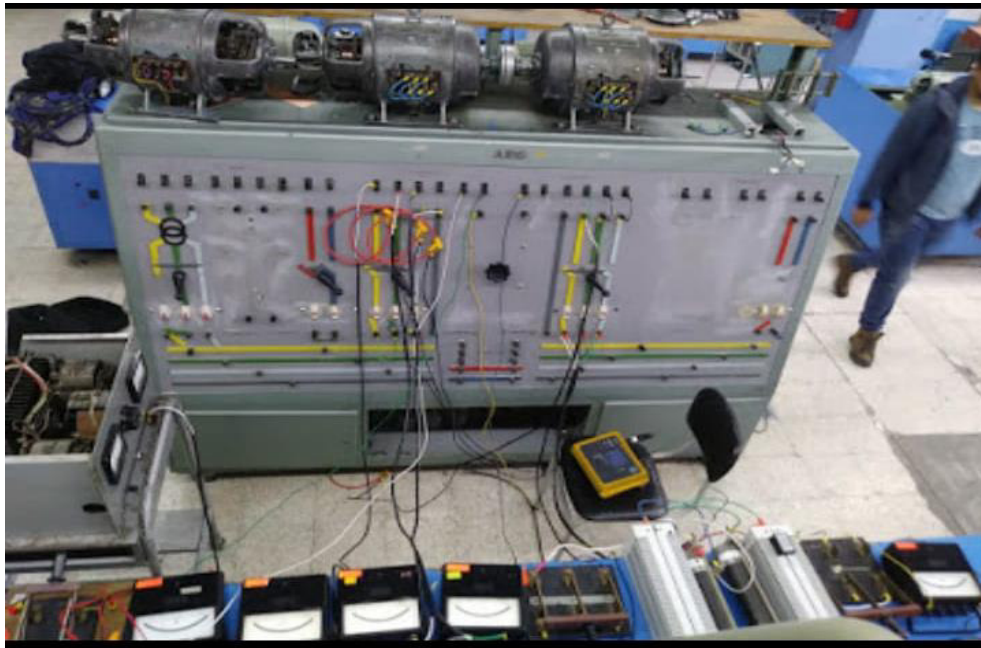


Figura 4.30. Conexión Prueba de saturación en cortocircuito máquina síncrona 2.

La Figura 4.31 se presenta el circuito implementado durante la prueba de cortocircuito en saturación de la máquina híbrida.

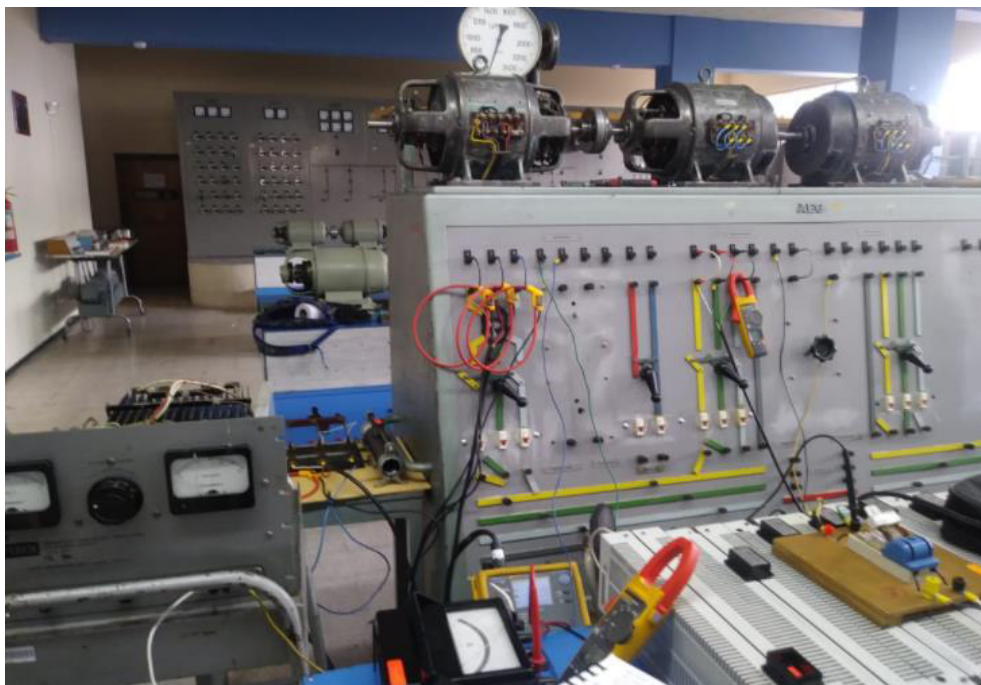


Figura 4.31. Conexión Prueba de saturación en cortocircuito máquina híbrida.

Los resultados de la prueba de la máquina síncrona 1 se representan en la Tabla 4.12, como consideraciones generales, las lecturas deben ser tomadas en orden descendente, para evitar errores de medición provocados con el calentamiento de las máquinas.

Tabla 4.12. Obtención de medidas de cortocircuito, máquina síncrona 1.

% Ia	Referencia (A)	Ia 1 (A)	Ia 2 (A)	Ia 3 (A)	Ia_prom (A)	If (A)	Vf (V)
125%	4,75	4,74	4,78	4,78	4,7666667	0,194	33
100%	3,8	3,79	3,81	3,81	3,8033333	0,155	25,7
75%	2,85	2,84	2,86	2,86	2,8533333	0,109	28,4
50%	1,9	1,9	1,91	1,93	1,9133333	0,068	11,3
25%	0,95	0,95	0,95	0,97	0,9566667	0,028	4

En la Figura 4.32 se observa una tendencia no lineal durante la prueba, esta curva debería ser una línea recta, sin embargo, por errores en instrumentos y el comportamiento propio de la máquina, se debe realizar la corrección utilizando regresión lineal para obtener la corriente de campo correspondiente a la corriente nominal de armadura en la curva de saturación de cortocircuito mediante la ecuación de la recta $y=23,721x + 0,1797$. El valor de corriente de campo a corriente nominal de armadura es $I_{FS11} = 0,153$ [A].

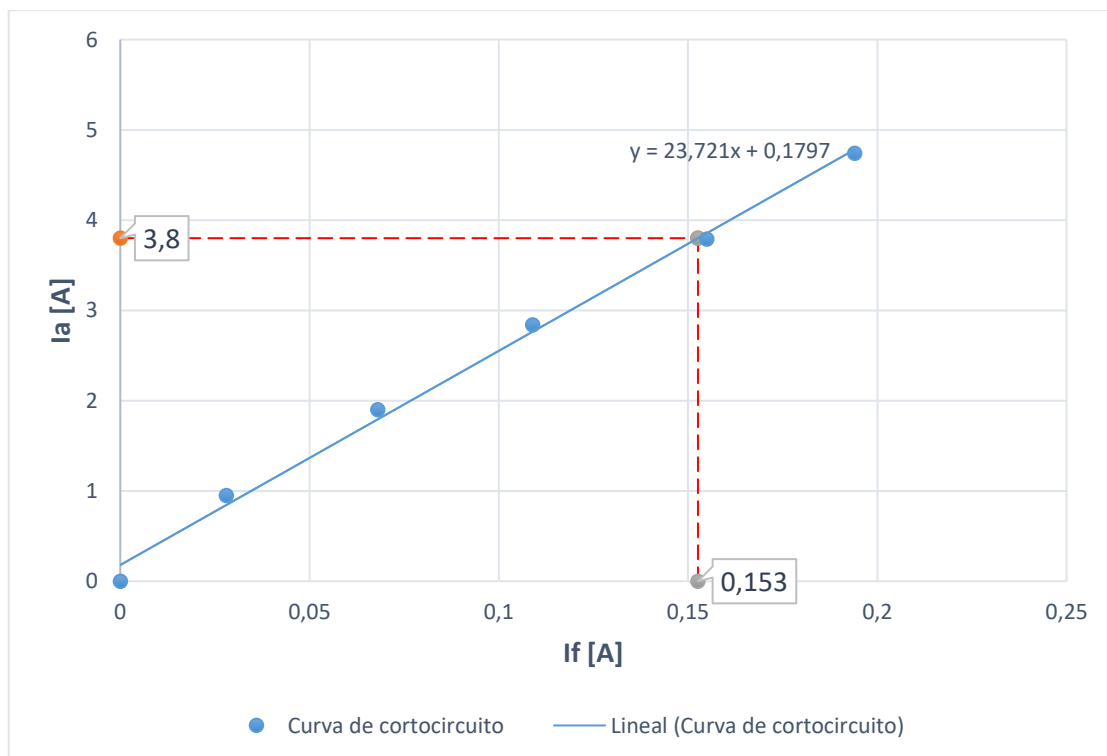


Figura 4.32. Curva Prueba de saturación en cortocircuito máquina síncrona 1.

Para la máquina sincrónica 2 los datos tomados en forma descendente se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Obtención de medidas de cortocircuito, máquina sincrónica 2.

% Ia	Referencia (A)	Ia 1 (A)	Ia 2 (A)	Ia 3 (A)	Ia_prom (A)	If (A)	Vf (V)
125%	4,75	4,75	7,83	4,86	5,8133333	0,194	33,4
100%	3,8	3,8	3,83	3,85	3,8266667	0,155	26,6
75%	2,85	2,85	2,85	2,89	2,8633333	0,109	18,7
50%	1,9	1,9	1,95	1,96	1,9366667	0,068	11,5
25%	0,95	0,95	0,98	0,99	0,9733333	0,028	4,3

En la Figura 4.33, se observa una tendencia no lineal bajo el comportamiento de la máquina en condiciones de cortocircuito, por tal razón se debe realizar la corrección utilizando regresión lineal obteniendo la ecuación de la recta $y=25,041x$. El valor de corriente de campo a corriente nominal de armadura es $I_{FSI2} = 0,152$ [A].

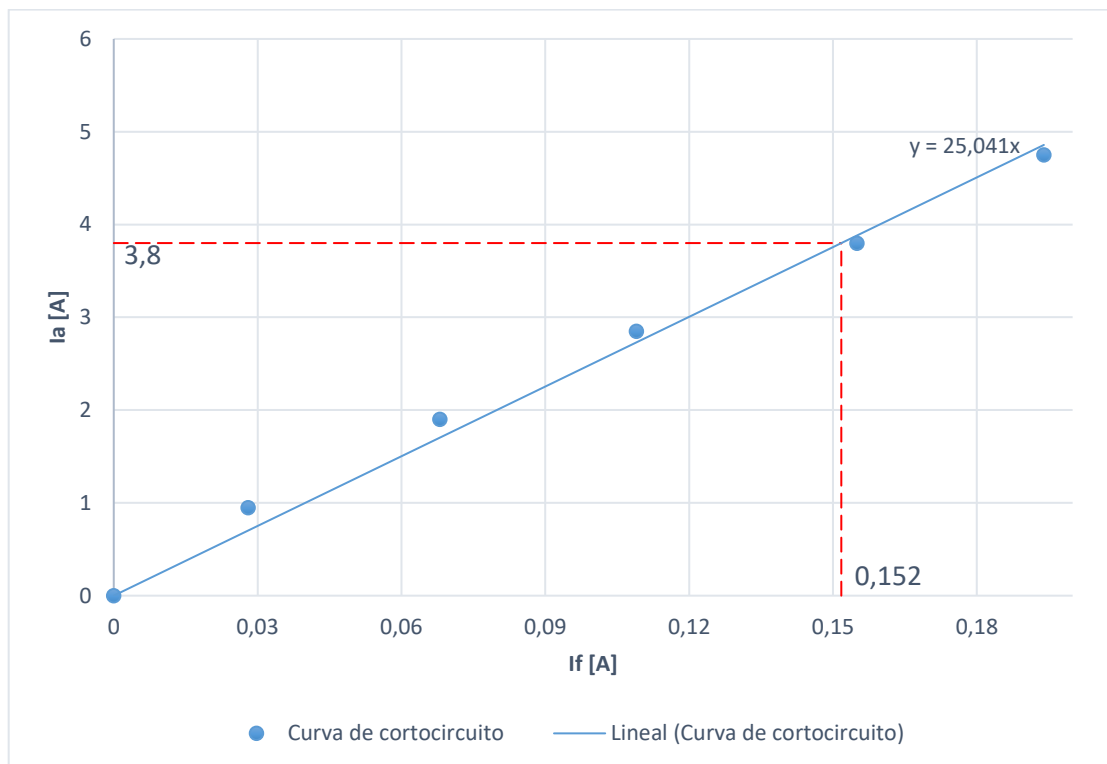


Figura 4.33. Curva Prueba de saturación en cortocircuito máquina sincrónica 2.

En la Tabla 4.14 se exponen los datos de la máquina híbrida de la prueba de cortocircuito en saturación.

Tabla 4.14. Obtención de medidas de cortocircuito, máquina híbrida.

% Ia	Referencia (A)	Ia 1 (A)	Ia 2 (A)	Ia 3 (A)	Ia_prom (A)	If (A)	Vf (V)
125%	10,5	10,47	10,45	10,63	10,516667	0,33	44,5
100%	8,4	8,4	8,35	8,54	8,43	0,26	35,8
75%	6,3	6,34	6,27	6,49	6,3666667	0,198	26,4
50%	4,2	4,22	4,12	4,39	4,24333333	0,12	16,6
25%	2,1	2,1	1,97	2,26	2,11	0,06	8,3

En la Figura 4.34, se observa una tendencia no lineal bajo condiciones de cortocircuito, por tal razón se debe realizar la corrección utilizando regresión lineal obteniendo la ecuación de la recta $y=31,535x + 0,1723$. El valor de corriente de campo correspondiente a un corriente nominal de armadura es $I_{FS3} = 0,261$ [A].

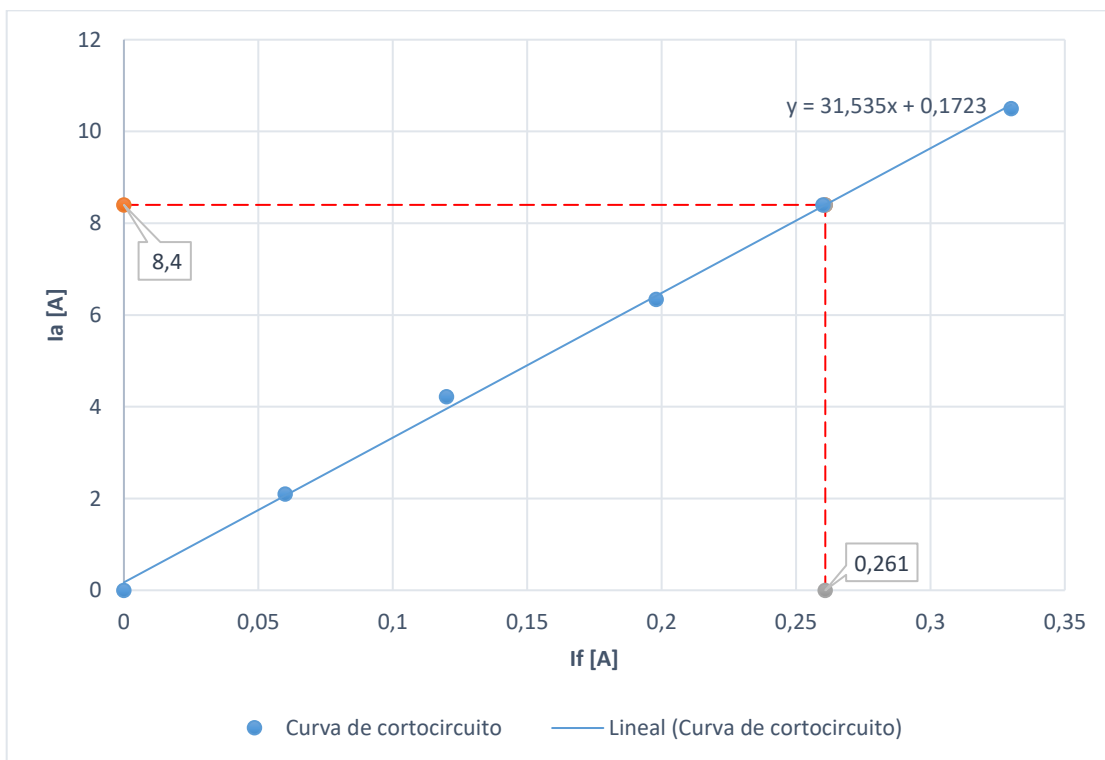


Figura 4.34. Curva Prueba de saturación en cortocircuito máquina híbrida.

4.4.3.1 Reactancia transitoria eje directo, X'_d

En base a la ecuación (4.11) se determina la reactancia sincrónica del eje directo como la relación de la corriente de campo perteneciente a la corriente nominal de armadura en la

curva de saturación de cortocircuito y la corriente de campo correspondiente a la línea de cortocircuito sostenido a una corriente nominal de armadura.

$$X_d = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} \quad (4.11)$$

Donde:

I_{FG}	Corriente calculada en la línea de entrehierro.
I_{FSI}	Corriente de campo de línea de cortocircuito sostenido.
X_d	Reactancia sincrónica de eje directo.

La reactancia sincrónica de eje directo para la máquina sincrónica 1 se calcula en la ecuación (4.12):

$$\begin{aligned} I_{FSI1} &= 0,153 \text{ [A]} \\ I_{FG1} &= 0,646 \text{ [A]} \\ X_{d1} &= \frac{0,153}{0,646} = 0,23684 \text{ p. u.} = 8,3527 \Omega \end{aligned} \quad (4.12)$$

La reactancia sincrónica de eje directo para la máquina sincrónica 2 se calcula en la ecuación (4.13):

$$\begin{aligned} I_{FSI2} &= 0,152 \text{ [A]} \\ I_{FG2} &= 0,665 \text{ [A]} \\ X_{d2} &= \frac{0,152}{0,665} = 0,22857 \text{ p. u.} = 8,061 \Omega \end{aligned} \quad (4.13)$$

La reactancia sincrónica de eje directo para la máquina híbrida se calcula en la ecuación (4.14):

$$\begin{aligned} I_{FSI} &= 0,261 \text{ [A]} \\ I_{FG} &= 0,775 \text{ [A]} \\ X_{d3} &= \frac{0,261}{0,775} = 0,33677 \text{ p. u.} = 28,8287 \Omega \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.4.4 PRUEBA DE DESLIZAMIENTO

Para realizar esta prueba se necesita colocar un interruptor de cuchillas que sea apto para altas corrientes como protección, con la finalidad de proteger los equipos de medición y las máquinas eléctricas. Se conectan los respectivos equipos como se observa en la Figura 4.35. Es muy importante que las máquinas a ser usadas tengan el mismo sentido de giro, además de usar un motor CC como máquina motriz con la finalidad de controlar la velocidad de giro.



Figura 4.35. Esquema de conexión prueba de deslizamiento máquina síncrona 1 y 2.

El oscilograma presente en la Figura 4.36, representa la medición del voltaje línea-línea aplicada aún bajo deslizamiento para la máquina síncrona 1 encontrando un valor máximo de voltaje de 80,598 (V) y un valor mínimo de 77,77 (V).

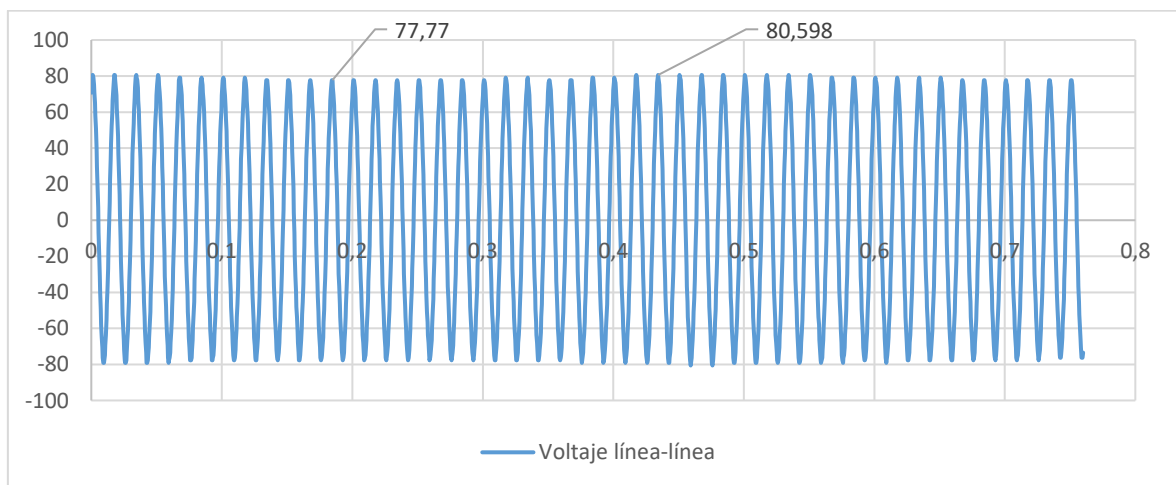


Figura 4.36. Prueba de deslizamiento máquina síncrona 1 voltaje línea- línea.

La Figura 4.37, corresponde al oscilograma de corriente de línea a un bajo deslizamiento de la máquina síncrona 1, para obtener este valor en el oscilograma es necesario el uso de una resistencia acoplada en serie a una fase en armadura, porque el osciloscopio no mide corriente. El valor máximo de corriente es 7,9184 (A) y valor mínimo es 4,242 (A).

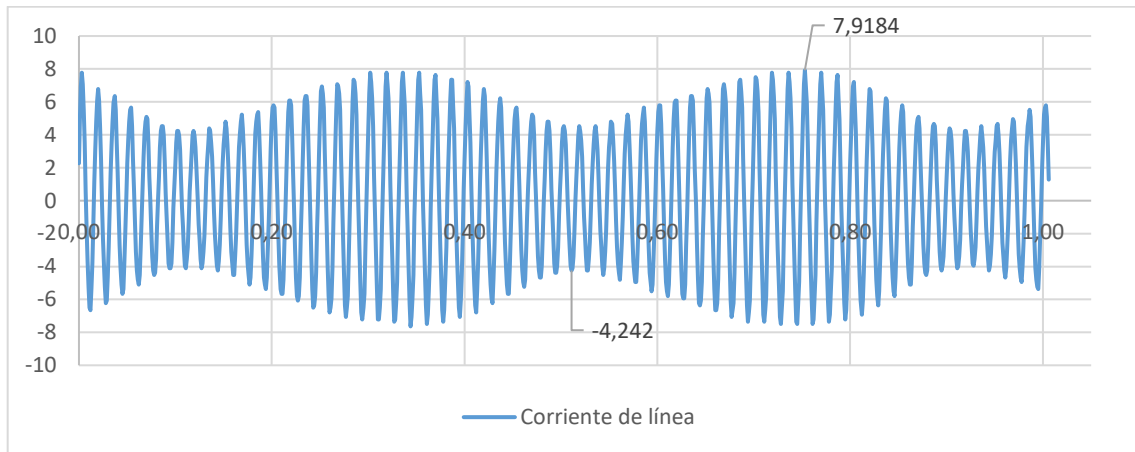


Figura 4.37. Prueba de deslizamiento máquina síncrona 1 corriente de línea.

Las medidas máximas y mínimas de voltaje y corriente respectivamente de la máquina síncrona 1, se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Medidas tomadas de prueba de deslizamiento, máquina síncrona 1.

	E_1 (V)	I_1 (A)
Mín.	77,77	4,242
Máx.	80,594	7,9184

El oscilograma de la Figura 4.38 muestra el voltaje línea-línea de la máquina síncrona 2 en la prueba de deslizamiento, donde se observa el valor máximo y mínimo de voltajes medidos.

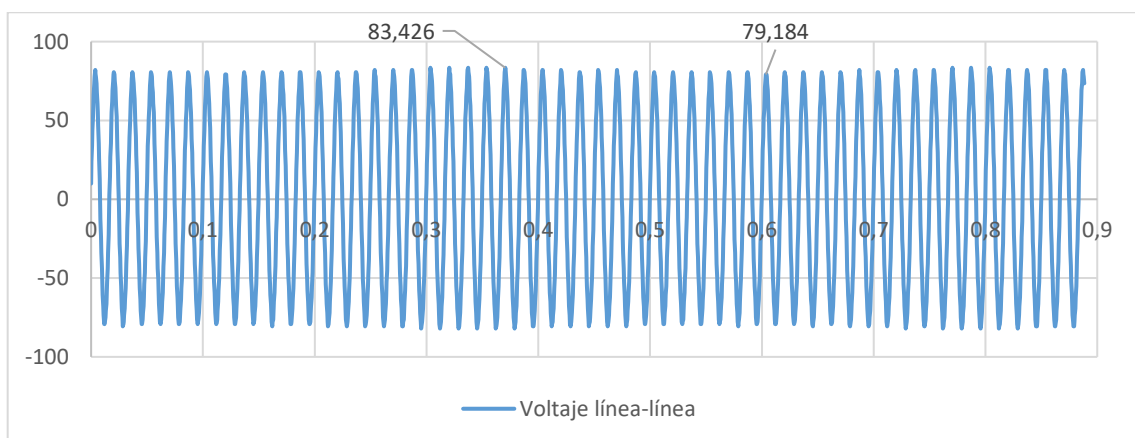


Figura 4.38. Prueba de deslizamiento máquina síncrona 2 voltaje línea- línea.

El oscilograma de corriente de línea de la máquina sincrónica 2 se muestra en la Figura 4.39, donde la corriente máxima medida es 7,9184 (A) y la corriente mínima medida es 3,9592 (A).

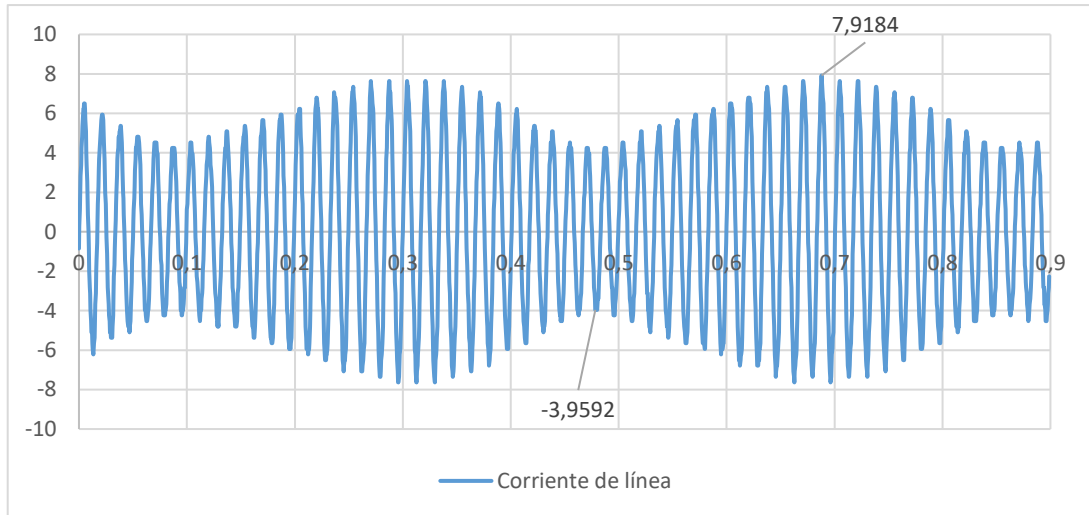


Figura 4.39. Prueba de deslizamiento máquina sincrónica 2 corriente de línea.

Las medidas de la máquina sincrónica 2 en la prueba de deslizamiento se muestran en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Medidas tomadas de prueba de deslizamiento, máquina sincrónica 2.

	E_2 (V)	I_2 (A)
Mín.	79,184	3,9592
Máx.	83,426	7,9184

La Figura 4.40 se muestra el resultado de la prueba en la máquina híbrida, se observa el voltaje máximo y mínimo.

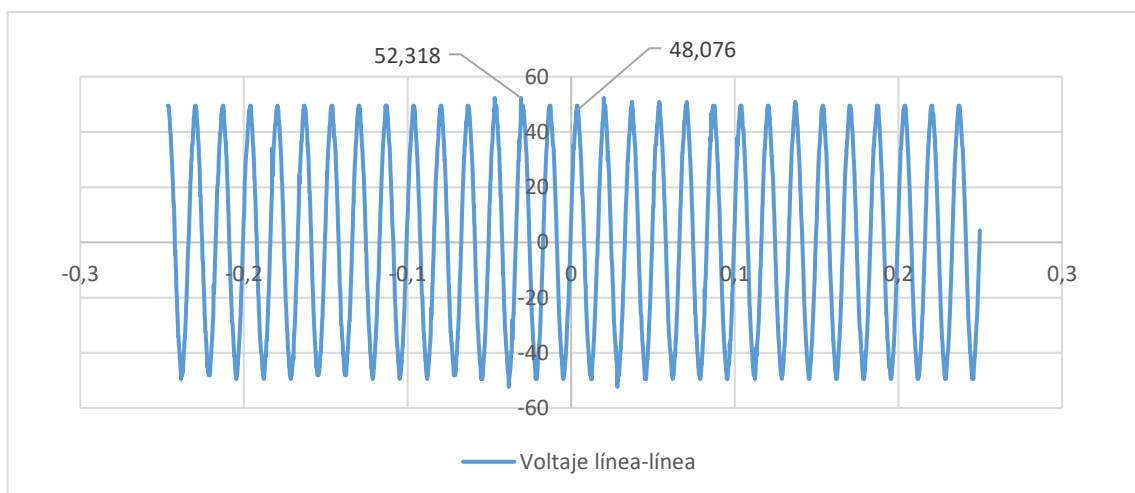


Figura 4.40. Prueba de deslizamiento máquina híbrida voltaje línea- línea.

En la Figura 4.41 se muestran valores obtenidos de la corriente de línea de la máquina híbrida.

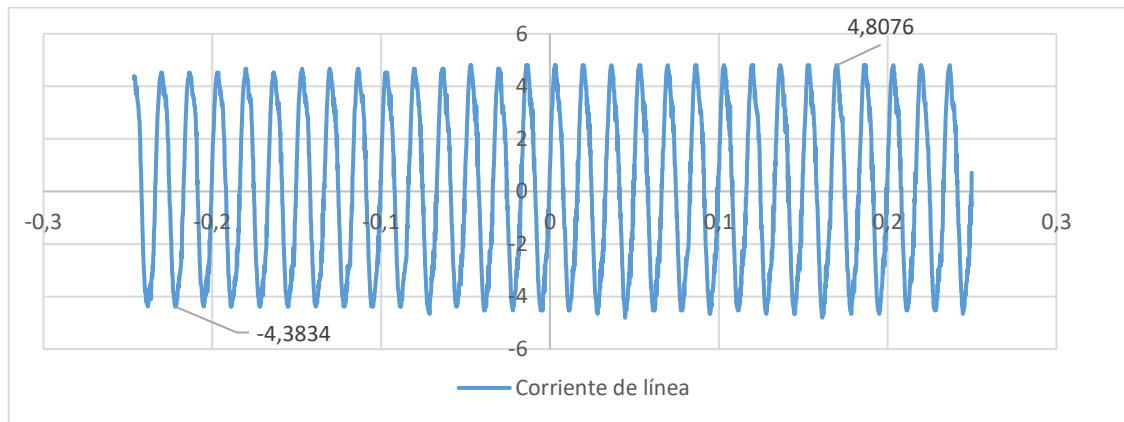


Figura 4.41. Prueba de deslizamiento máquina híbrida corriente de línea.

Los datos que se presentan en la Tabla 4.17 corresponden a los oscilogramas de la prueba de deslizamiento de voltaje y corriente de la máquina híbrida.

Tabla 4.17. Medidas tomadas de prueba de deslizamiento, máquina híbrida

	E_3 (V)	I_3 (V)
Mín.	48,076	4,3834
Máx.	52,318	4,8076

4.4.4.1 Reactancia transitoria del eje de cuadratura, X_q

Para realizar el cálculo se debe tener la relación de los valores máximos y mínimos de voltajes y corrientes, de esta manera se obtienen las reactancias de eje directo (X_{ds}) y cuadratura (X_{qs}), todas expresadas en por unidad (p.u.). (ver ecuación (4.15)).

$$X_{qs} = \frac{E_{mín}}{I_{máx}}; X_{ds} = \frac{E_{máx}}{I_{mín}}; X_q = X_d \frac{X_{qs}}{X_{ds}} \quad (4.15)$$

Donde:

X_{qs}	Reactancia no saturada del eje de cuadratura
X_{ds}	Reactancia no saturada del eje directo
$E_{mín}$	Voltaje mínimo de curva de deslizamiento
$E_{máx}$	Voltaje máximo de curva de deslizamiento
$I_{máx}$	Corriente máxima de prueba de deslizamiento
$I_{mín}$	Corriente mínima de prueba de deslizamiento
X_q	Reactancia de eje de cuadratura

En la (4.16) se realiza el cálculo de la reactancia de eje de cuadratura de máquina sincrónica 1.

$$X_{q1} = 0,23684 \frac{(77,77)(4,242)}{(80,594)(7,9184)} = 0,1224437 \text{ p.u} = 4,318225 [\Omega] \quad (4.16)$$

En base a la ecuación (4.17) se realiza el cálculo de la reactancia de eje de cuadratura de máquina sincrónica 2.

$$X_{q2} = 0,22857 \frac{(79,18)(3,959)}{(83,426)(7,918)} = 0,10847 \text{ p.u} = 3,825548 [\Omega] \quad (4.17)$$

El cálculo de la reactancia de eje de cuadratura de máquina híbrida se obtiene con la ecuación (4.18):

$$X_{q3} = 0,33677 \frac{(48,076)(34,525)}{(52,318)(4,807)} = 0,19077 \text{ p.u} = 6,72816 [\Omega] \quad (4.18)$$

4.4.5 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

El circuito presentado en la Figura 4.42, muestra la conexión para la prueba de cortocircuito trifásico, el objetivo de esta prueba es conseguir el oscilograma del comportamiento de la corriente de línea y que se pueda apreciar la parte subtransitoria, transitoria y estable como se muestra en la Figura 4.43.

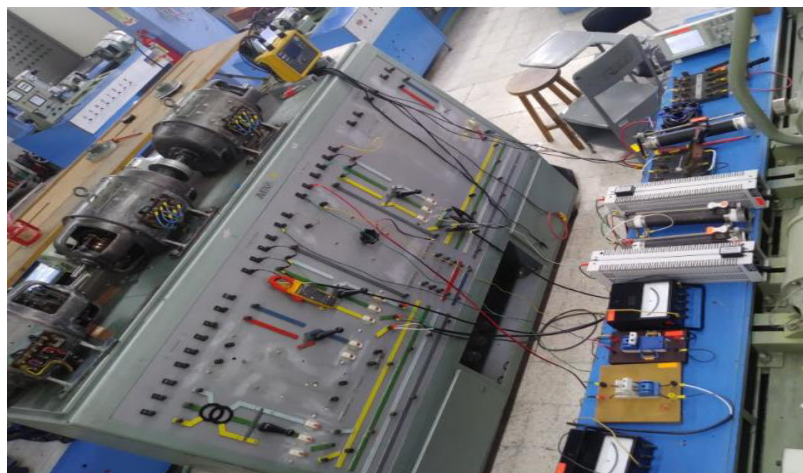


Figura 4.42. Conexión cortocircuito trifásico máquina sincrónica 1.

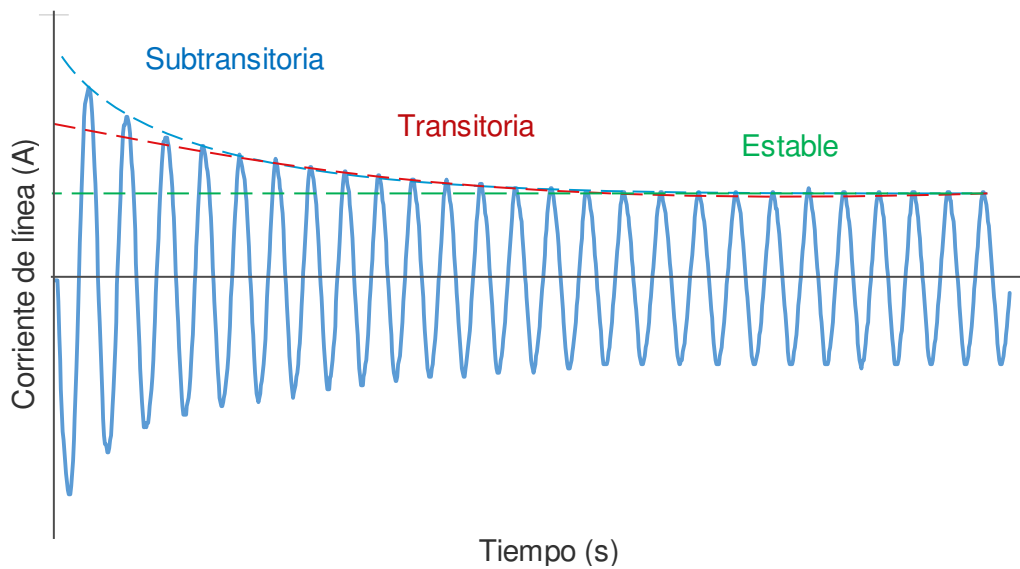


Figura 4.43. Oscilograma prueba cortocircuito trifásico a obtener [8].

La Figura 4.44 corresponde a la prueba de cortocircuito trifásico aplicada en la máquina sincrónica 1.

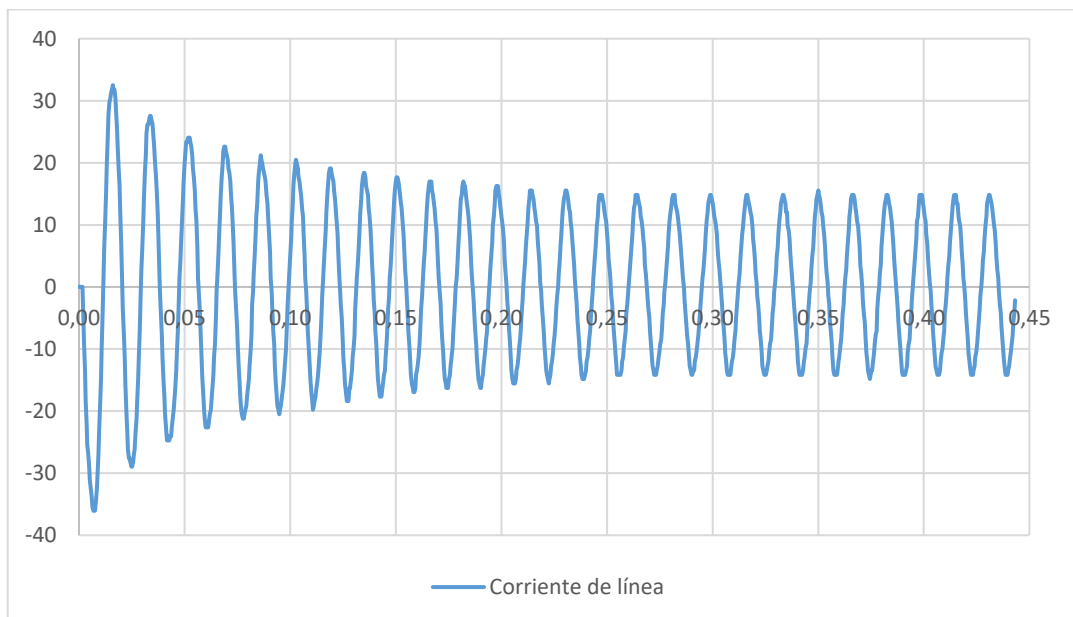


Figura 4.44. Cortocircuito trifásico – oscilación corriente de línea máquina sincrónica 1.

Con los datos obtenidos de la Figura 4.44 se grafican las curvas de componente alterna de corriente de la máquina sincrónica 1 como se muestra en la Figura 4.45.

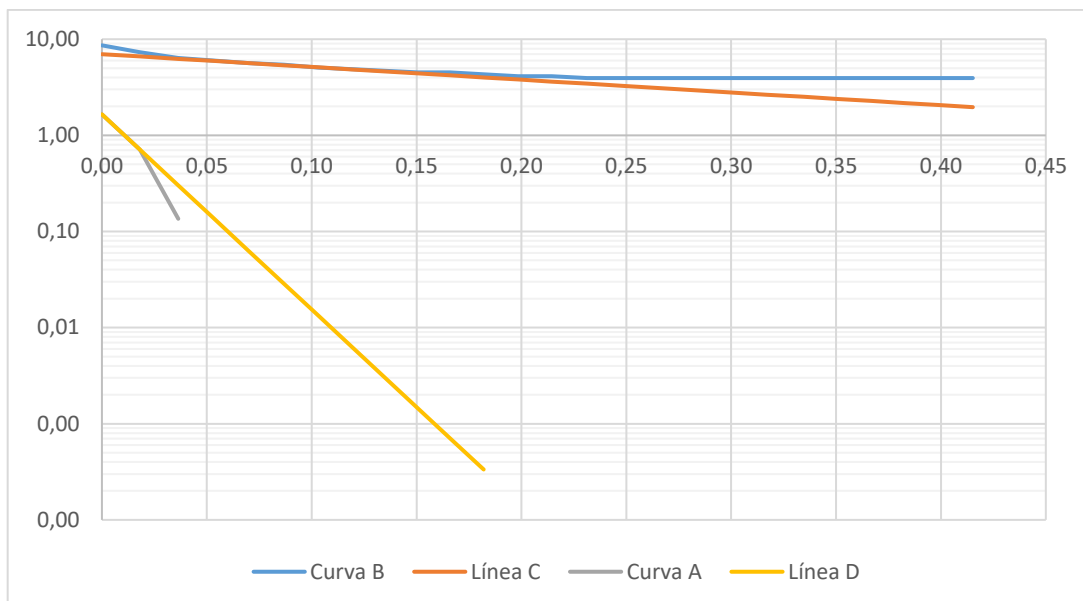


Figura 4.45. Cortocircuito trifásico – Obtención de curvas de componente alterna de corriente en p.u. máquina sincrónica 1.

Los datos obtenidos de la máquina sincrónica 1 en cortocircuito trifásico súbito en las curvas de componente alterna se muestran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Valores de reactancias transitoria y subtransitoria, máquina sincrónica 1 en cortocircuito trifásico súbito.

	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio
1) Voltaje inicial	230,0	229,9	229,2	229,7
2) Voltaje inicial p.u.	1,00	0,99956	0,996521	0,99869
3) Corriente estado estable	14,847	14,924	14,961	14,9106667
4) Corriente en p.u.	3,9431121	3,963562	3,97338857	3,96002089
5) Componente transitoria inicial (curva 3 al tiempo cero) p.u.	6,98362377	6,9935142	7,0137464	6,99696146
6) Corriente transitoria I' (4+5) p.u.	10,9267359	10,9570762	10,987135	10,9569823
7) Componente subtransitoria inicial (curva 4 al tiempo cero) p.u.	1,653669	1,64862	1,66201	1,65476633
8) Corriente subtransitoria I'' (6+7) p.u.	12,5804049	12,6056962	12,649145	12,6117487

El oscilograma de corriente de línea del cortocircuito trifásico aplicado en la máquina sincrónica 2 se presenta en la Figura 4.46.

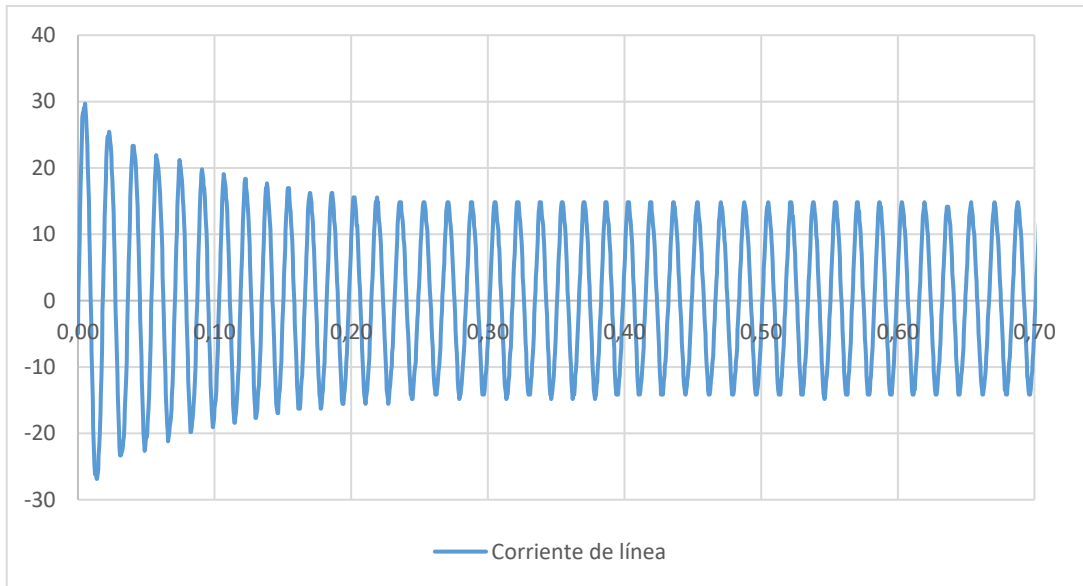


Figura 4.46. Cortocircuito trifásico – oscilación corriente de línea máquina síncronica 2.

Con base en los datos de la Figura 4.46 se grafican las componentes alternas de la curva de corriente en p.u. de la máquina síncronica 2, como se muestra en la Figura 4.47.

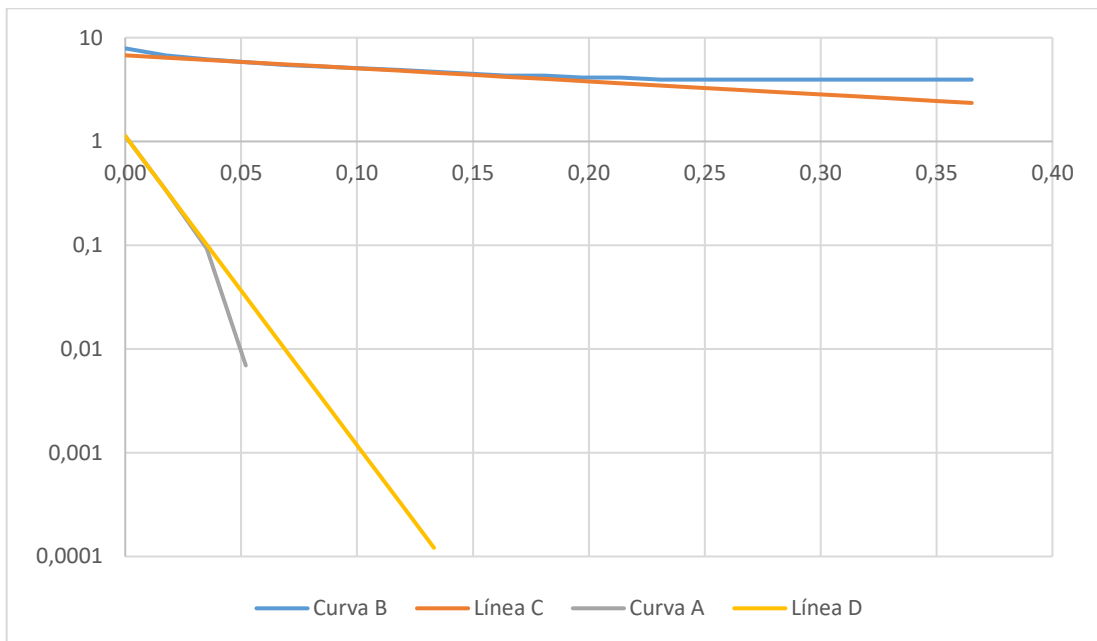


Figura 4.47. Cortocircuito trifásico – Obtención de curvas de componente alterna de corriente en p.u. máquina síncronica 2.

Los datos de la prueba de cortocircuito trifásico de la máquina síncronica 2 de las curvas de componente alterna de corriente en p.u. se muestran en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19. Valores de reactancias transitoria y subtransitoria, máquina síncrona 2 en cortocircuito trifásico súbito.

	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio
1) Voltaje inicial	229,5	230,1	230,2	229,933
2) Voltaje inicial p.u.	0,998	1,000	1,001	1,000
3) Corriente estado estable	14,847	14,872	14,901	14,873
4) Corriente en p.u.	3,943	3,950	3,957	3,950
5) Componente transitoria inicial (curva 3 al tiempo cero) p.u.	9,278	9,331	9,267	9,292
6) Corriente transitoria I' (4+5) p.u.	13,222	13,281	13,225	13,243
7) Componente subtransitoria inicial (curva 4 al tiempo cero) p.u.	0,298	0,292	0,293	0,294
8) Corriente subtransitoria I'' (6+7) p.u.	13,519	13,573	13,518	13,537

La Figura 4.48 y Figura 4.49, corresponden a la prueba de cortocircuito trifásico súbito aplicada a la máquina síncrona 3 y a la componente alterna de corriente en p.u. respectivamente.

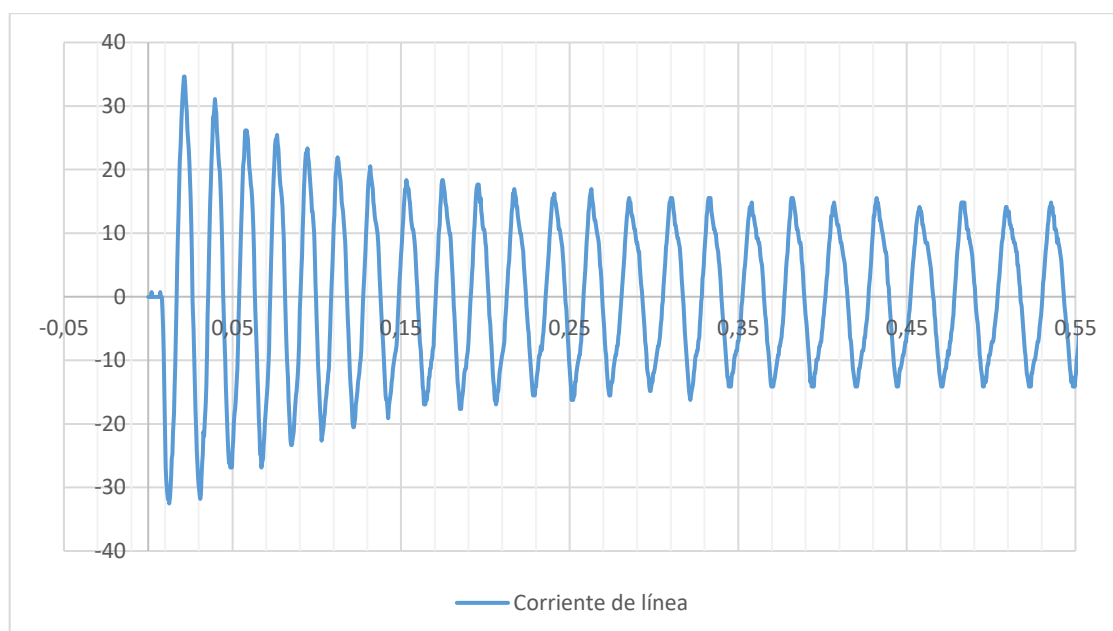


Figura 4.48. Cortocircuito trifásico – oscilación corriente de línea máquina híbrida.

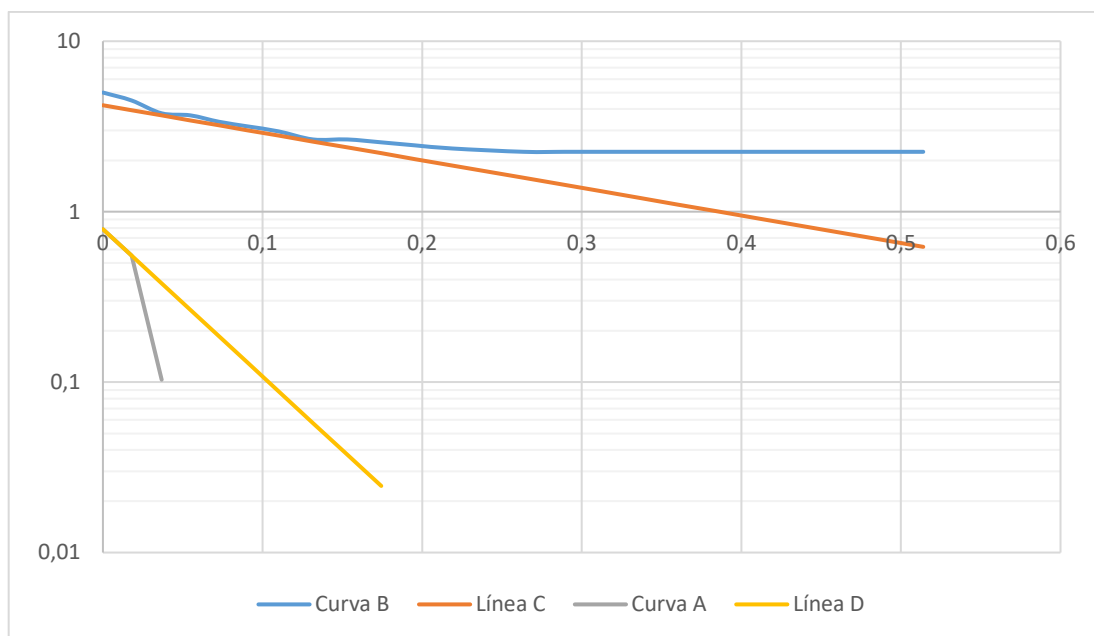


Figura 4.49. Cortocircuito trifásico – Obtención de curvas de componente alterna de corriente en p.u. máquina híbrida.

En la Tabla 4.20 se muestran los valores correspondientes de la gráfica de la componente alterna en p.u. de la prueba de cortocircuito trifásico súbito de la máquina híbrida.

Tabla 4.20. Valores de reactancias transitoria y subtransitoria, máquina híbrida en cortocircuito trifásico súbito.

	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio
1) Voltaje inicial	140,2	140,2	139,5	139,9666
2) Voltaje inicial p.u.	0,93466	0,93466	0,9236	0,93097
3) Corriente estado estable	15,554	15,549	15,559	15,554
4) Corriente en p.u.	4,13087935	4,12955143	4,13220726	4,13087935
5) Componente transitoria inicial (curva 3 al tiempo cero) p.u.	4,211472	4,221535	4,218964	4,21732367
6) Corriente transitoria I' (4+5) p.u.	8,34235135	8,35108643	8,35117126	8,34820301
7) Componente subtransitoria inicial (curva 4 al tiempo cero) p.u.	0,788817	0,784873	0,779844	0,78451133
8) Corriente subtransitoria I'' (6+7) p.u.	9,13116835	9,13595943	9,13101526	9,13271435

4.4.5.1 Reactancia transitoria y subtransitoria eje directo, X'_d y X''_d

La reactancia transitoria se obtiene mediante la relación de voltaje en circuito abierto y la corriente de armadura de la extrapolación de la onda de corriente de armadura de cortocircuito en estado transitorio más la componente de estado estable como se presenta en la ecuación (4.19).

$$X'_d = \frac{E}{I'} \quad (4.19)$$

Donde:

X'_d	Representa la reactancia transitoria en eje directo
E	Voltaje de armadura en circuito abierto
I'	Corriente de armadura de cortocircuito en estado transitorio más la componente de estado estable

La reactancia subtransitoria se determina mediante la relación del voltaje de circuito abierto con la corriente transitoria más la componente subtransitoria inicial como se muestra en la ecuación (4.20).

$$X''_d = \frac{E}{I''} \quad (4.20)$$

Donde:

X''_d	Representa la reactancia subtransitoria en eje directo
E	Voltaje de armadura en circuito abierto
I''	Corriente transitoria más la componente subtransitoria inicial

Para obtener el valor de las reactancias transitoria (X'_d) y subtransitoria (X''_d) en cada máquina sincrónica se aplican las ecuaciones (4.19) y (4.20) respectivamente.

- máquina sincrónica 1

$$X'_{d1} = \frac{E}{I'} = \frac{0,99869}{10,9569823} = 0,09114644 \text{ p. u.} = 3,214462 \text{ } [\Omega]$$

$$X''_{d1} = \frac{E}{I''} = \frac{0,99869}{12,6117487} = 0,07918727 \text{ p. u.} = 2,792697 \text{ } [\Omega]$$

- máquina sincrónica 2

$$X'_{d2} = \frac{E}{I'} = \frac{0,99971014}{13,2425439} = 0,07549230 \text{ p. u.} = 2,662387 \text{ } [\Omega]$$

$$X''_{d2} = \frac{E}{I''} = \frac{0,99971014}{13,5367692} = 0,07385145 \text{ p.u.} = 2,604519 [\Omega]$$

- máquina híbrida

$$X'_{d3} = \frac{E}{I'} = \frac{0,93097}{8,34820301} = 0,11151741 \text{ p.u.} = 1,3939 [\Omega]$$

$$X''_{d3} = \frac{E}{I''} = \frac{0,93097}{9,13271435} = 0,10193793 \text{ p.u.} = 1,274224 [\Omega]$$

4.4.5.2 Constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo, t'_d y t''_d

Al finalizar el análisis de la prueba de cortocircuito se calculan las constantes de tiempo de cortocircuito transitoria (t'_d) y subtransitoria (t''_d) de eje directo, en donde t'_d es el tiempo que se requiere para lograr que el voltaje inicial diferencial aumente 0,36788 veces y está dado en segundos, así como t''_d , que es el tiempo necesario para lograr que reduzca 0,36788 veces la componente subtransitoria inicial de voltaje, su medida también está dada en segundos, dichos valores de tiempo son presentados en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Cálculos de t'_d y t''_d de los generadores sincrónicos en cortocircuito.

Tiempos	Unidad	Fase a	Fase b	Fase c	Promedio
t'_{d1}	s	0,150185	0,149878	0,152235	0,150766
t''_{d1}	s	0,009817	0,014753	0,009121	0,01123033
t'_{d2}	s	0,158594	0,152243	0,167142	0,15932633
t''_{d2}	s	0,06688	0,005278	0,006697	0,026285
t'_{d3}	s	0,123293	0,124487	0,116591	0,121457
t''_{d3}	s	0,023075	0,022985	0,021994	0,02268467

4.4.6 PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE VOLTAJE

El objetivo es analizar el comportamiento del voltaje línea-línea en estado transitorio y en estado subtransitorio cuando se despeja la falla del cortocircuito trifásico sostenido sin carga, para ello se realiza la misma conexión de la prueba de cortocircuito trifásico.

En la Figura 4.50 se muestra el oscilograma de la prueba de recuperación de voltaje aplicado en la máquina sincrónica 1.

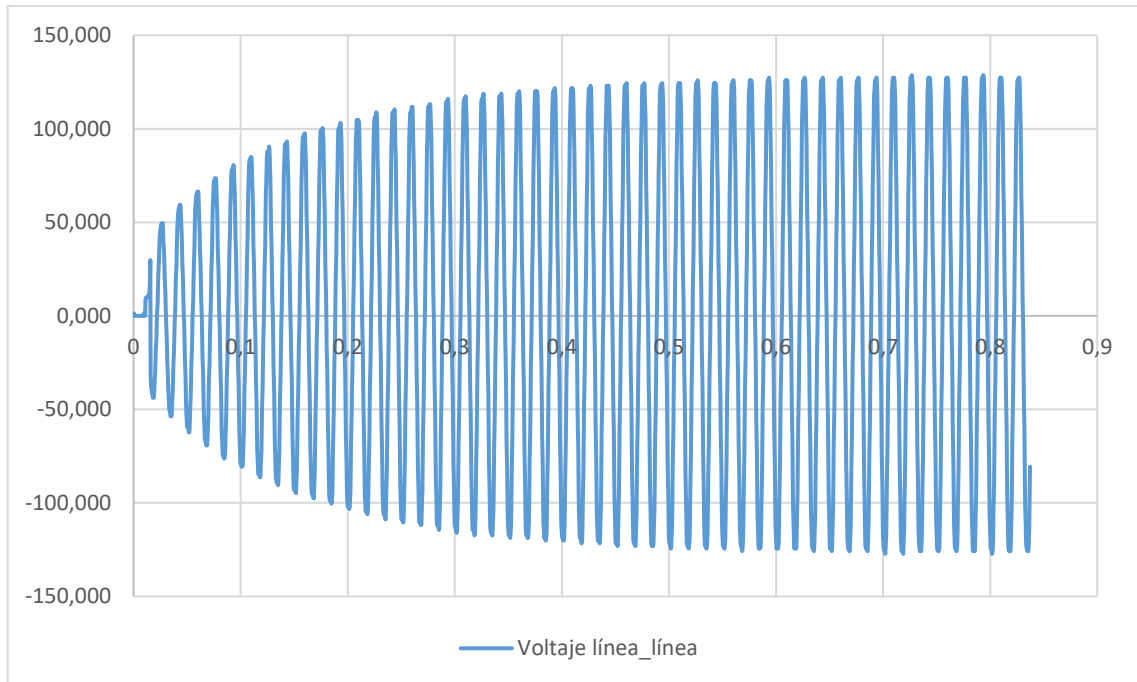


Figura 4.50. Oscilación – Prueba recuperación de voltaje máquina síncronica 1.

Mediante los datos encontrados en la Figura 4.50, se dibujan las curvas mediante prolongaciones y extensiones lineales como muestra la Figura 4.51, y a partir de estas curvas del análisis de recuperación de voltaje de la máquina síncronica 1 se obtienen las constantes de tiempo transitoria (t'_{d01}) y subtransitoria (t''_{d01}).

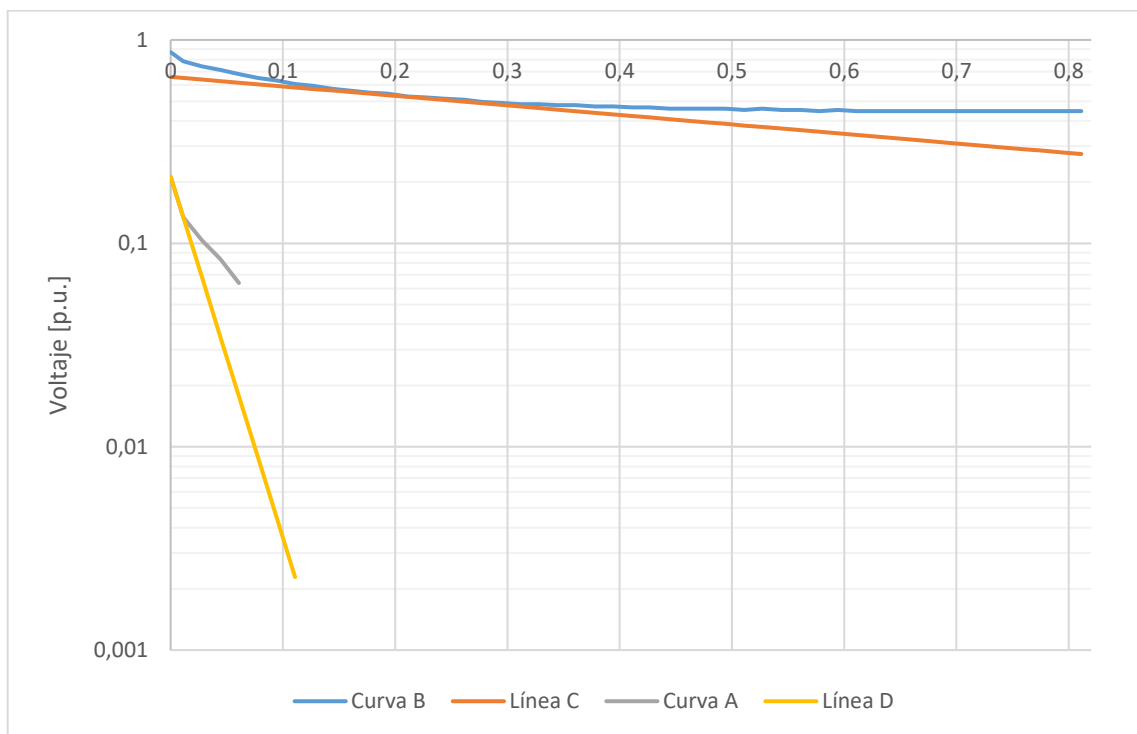


Figura 4.51. Análisis en recuperación de voltaje máquina síncronica 1.

En base a la Figura 4.52 se expone el resultado del oscilograma de la prueba de recuperación de voltaje de la máquina síncrona 2.

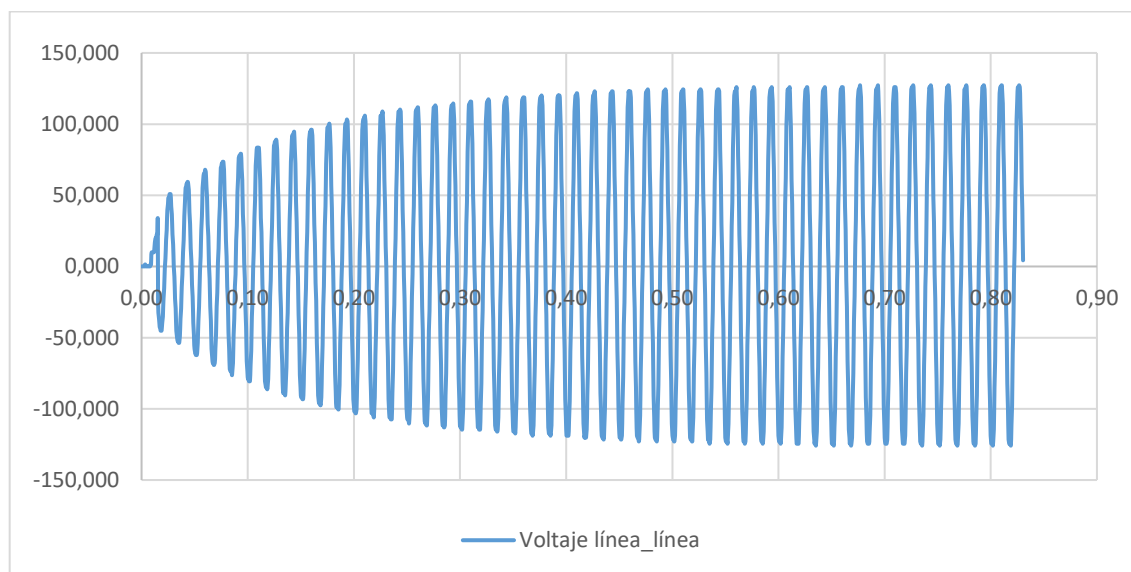


Figura 4.52. Oscilación – Prueba recuperación de voltaje máquina síncrona 2.

Con los datos obtenidos en la prueba de recuperación de voltaje de la máquina síncrona 2, se grafican las curvas que se muestran en la Figura 4.53 que son el resultado de extensiones lineales y prolongaciones, todo esto con la finalidad de obtener las constantes de tiempo transitoria (t'_{d02}) y subtransitoria (t''_{d02}).

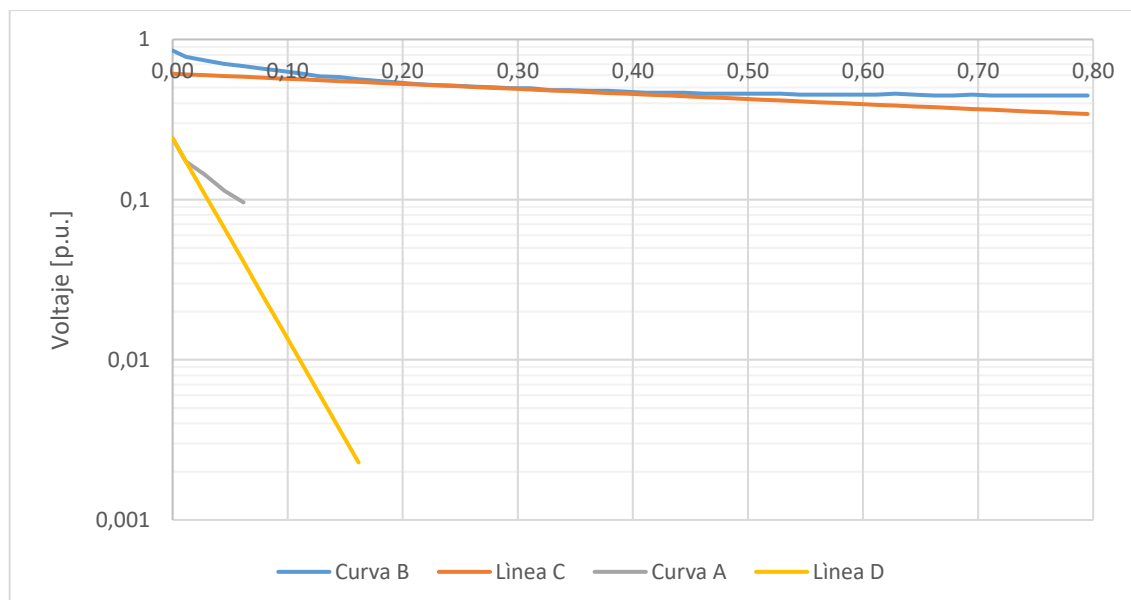


Figura 4.53. Análisis en recuperación de voltaje máquina síncrona 2.

En la Figura 4.54 se muestra el resultado de la oscilación del voltaje de la máquina híbrida, se pueden notar algunos picos que sobresalen y este comportamiento se debe a la interacción entre los campos magnéticos de la máquina de corriente continua.

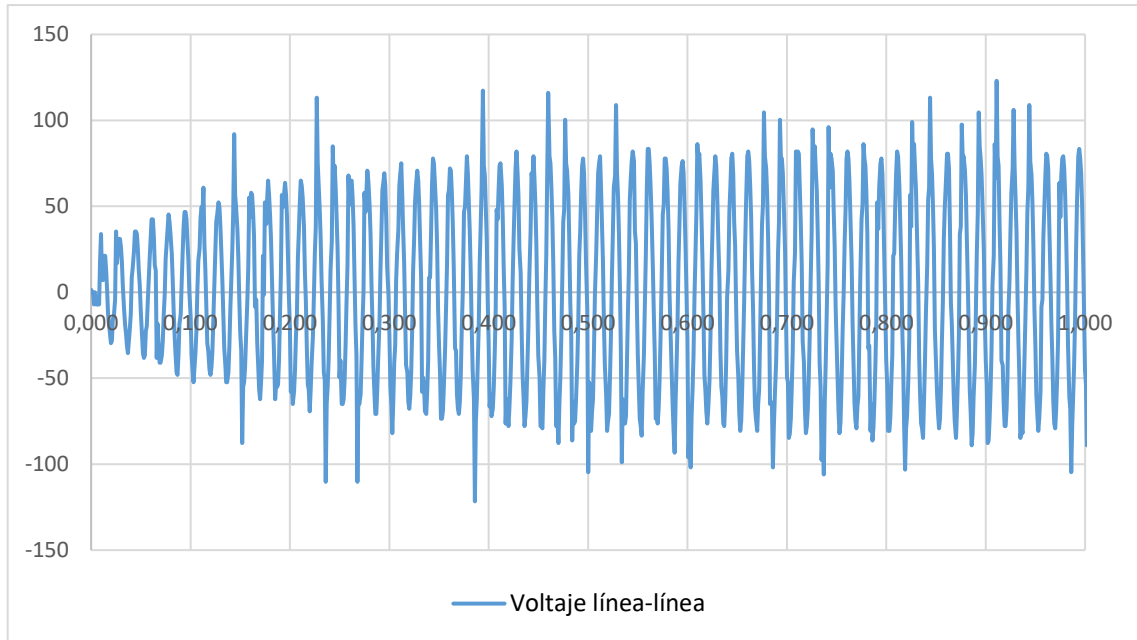


Figura 4.54. Oscilación – Prueba recuperación de voltaje máquina híbrida (3).

En la Figura 4.55 se analiza el comportamiento de la recuperación de voltaje de la máquina híbrida, con la finalidad de obtener las constantes de tiempo transitoria (t'_{d03}) y subtransitoria (t'_{d03}).

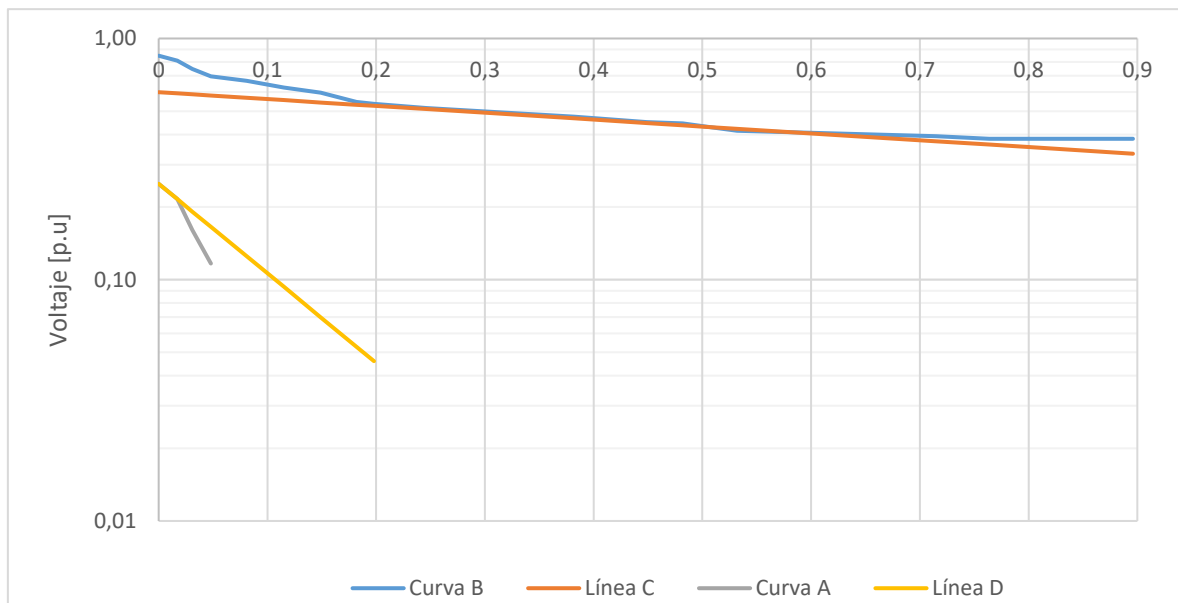


Figura 4.55. Análisis en recuperación de voltaje máquina híbrida (3).

4.4.6.1 Constantes de tiempo transitorias y subtransitorias de circuito abierto de eje directo t'_{d0} y t''_{d0}

En la Tabla 4.22 se muestran los valores de las constantes de tiempo transitorias y subtransitorias calculadas en las 3 máquinas sincrónicas, estos tiempos son requeridos para lograr que el voltaje inicial crezca y la componente subtransitoria inicial de voltaje decrezca 0,36788 veces respectivamente.

Tabla 4.22. Cálculos de t'_{d0} y t''_{d0} de los generadores sincrónicos.

Tiempos	Valor (s)
t'_{d01}	0,426144
t''_{d01}	0,011216
t'_{d02}	0,63019
t''_{d02}	0,01591
t'_{d03}	0,700393
t''_{d03}	0,053694

4.4.7 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO BIFÁSICO SÚBITO

En la Figura 4.56 se muestra el circuito de conexión de la prueba de cortocircuito bifásico (línea-línea), la finalidad es encontrar las reactancias subtransitorias en el eje de cuadratura, para lo cual la máquina debe operar a velocidad nominal y sin carga, previo a la aplicación de cortocircuito se realiza la toma de datos de voltaje pre falla y el valor rms inicial de la corriente de armadura I'' .



Figura 4.56. Conexión cortocircuito bifásico máquina sincrónica 1.

Los oscilogramas de cortocircuito trifásico y bifásico presentan una respuesta de la misma naturaleza, el oscilograma de cortocircuito bifásico de la máquina síncrona 1 se indica en la Figura 4.57.

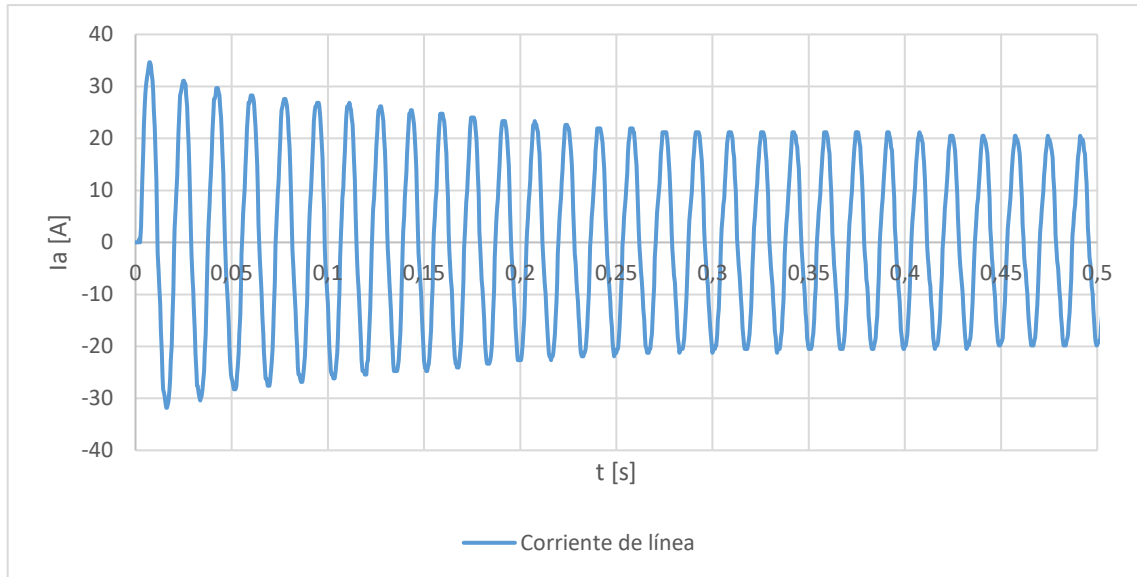


Figura 4.57. Cortocircuito bifásico – oscilación corriente de línea, máquina síncrona 1.

Para determinar el comportamiento transitorio y subtransitorio de la corriente es necesario procesar los resultados de la prueba de cortocircuito bifásico en escala semilogarítmica, en la Figura 4.58 se presentan los resultados para la máquina síncrona 1.

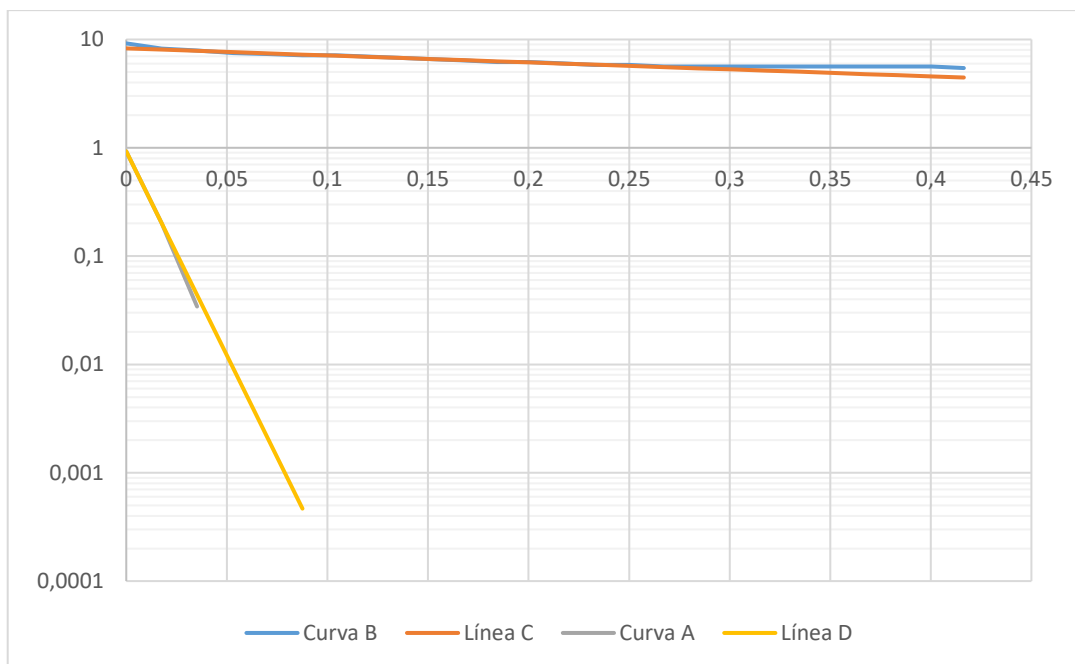


Figura 4.58. Cortocircuito bifásico – Obtención de curvas de componente alterna de corriente en p.u. máquina síncrona 1.

En base a la Figura 4.58, se obtienen los valores de las componentes transitorias y subtransitorias (ver Tabla 4.23), siguiendo el procedimiento similar a la prueba de cortocircuito trifásico.

Tabla 4.23. Valores de reactancias transitoria y subtransitoria, máquina sincrónica 1 en cortocircuito bifásico.

	Fase A-B	Fase B-C	Fase C-A	Promedio
1) Voltaje inicial	229,2	230,4	230,4	230
2) Voltaje inicial p.u.	0,99652174	1,0017391	1,00173913	1
3) Corriente estado estable	21,21	21,12	21,33	21,22
4) Corriente en p.u.	5,63301729	5,6091148	5,66488726	5,63567312
5) Componente transitoria inicial (al tiempo cero) p.u.	8,2741002	8,2954751	8,2817247	8,28376667
6) Corriente transitoria I' (4+5) p.u.	13,9071175	13,904589	13,946612	13,9194398
7) Componente subtransitoria inicial	0,92649471	0,9300145	0,93257416	0,92969447
8) Corriente subtransitoria I'' (6+7) p.u.	14,8336122	14,834604	14,8791861	14,8491343

En la Figura 4.59 se presenta el oscilograma correspondiente al aplicar la prueba cortocircuito bifásico en la máquina sincrónica 2.

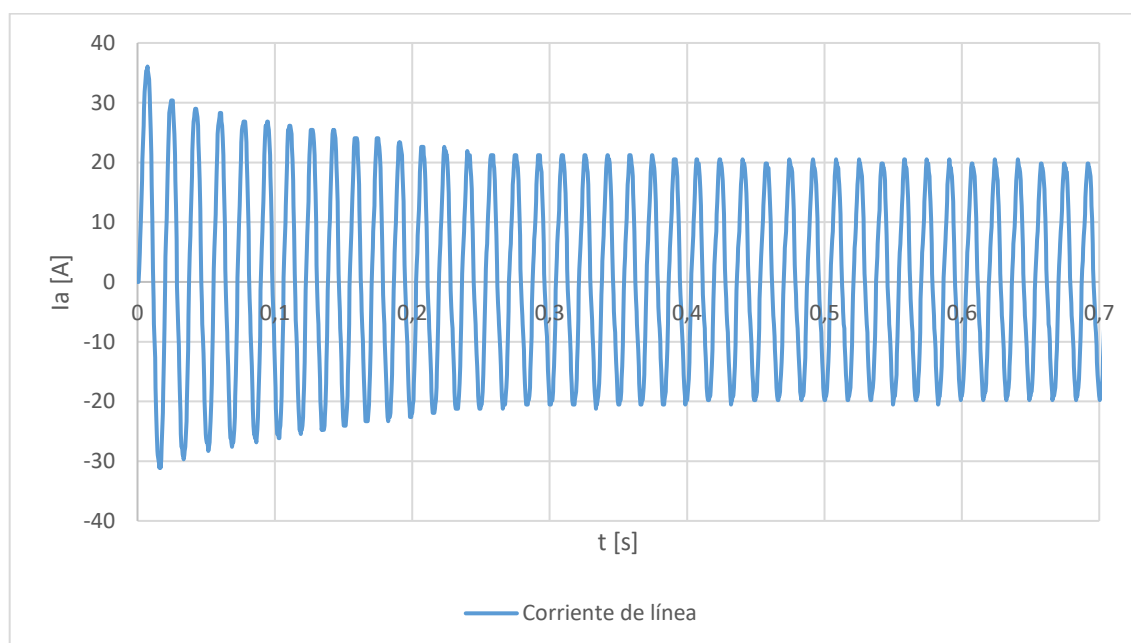


Figura 4.59. Cortocircuito bifásico – oscilación corriente de línea, máquina sincrónica 2.

Para determinar el comportamiento transitorio y subtransitorio de la corriente de la máquina sincrónica 1 es necesario tabular resultados de la prueba de cortocircuito bifásico en escala semilogarítmica como se presenta en la Figura 4.60.

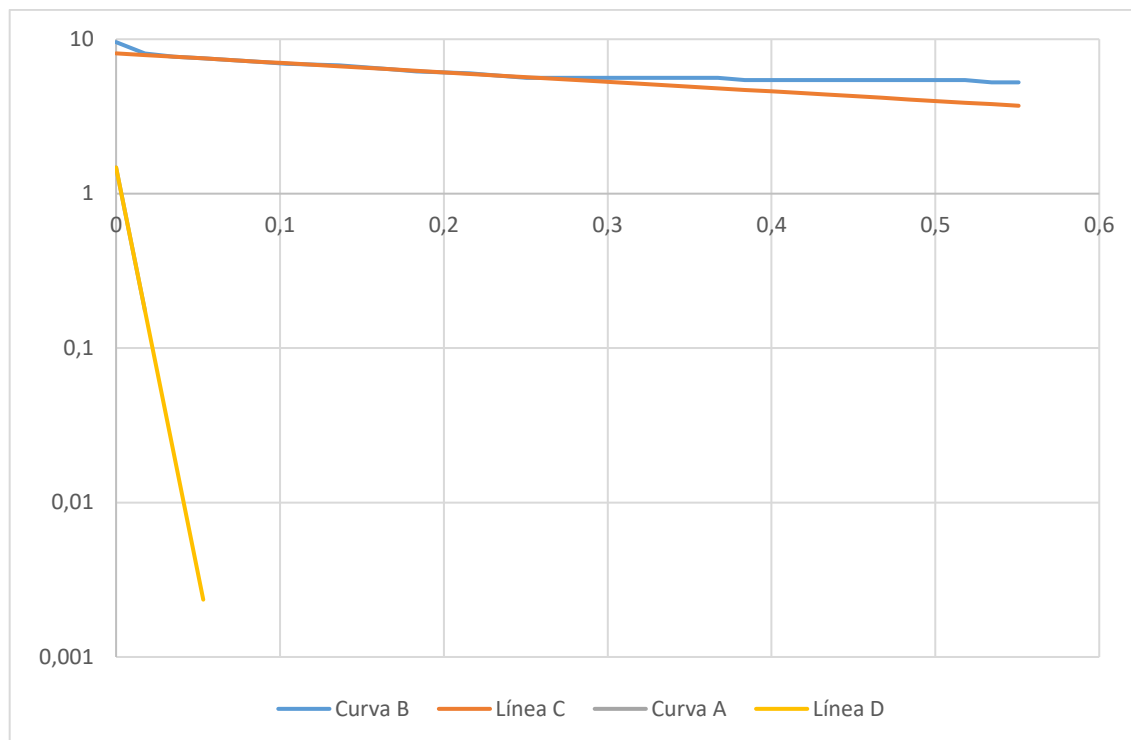


Figura 4.60. Cortocircuito bifásico – Obtención de curvas de componente alterna de corriente en p.u. máquina sincrónica 2.

Las componentes transitoria y subtransitoria de la máquina sincrónica 2 se encuentran de la curva de la componente alterna de corriente en p.u. de la prueba de cortocircuito bifásico en la máquina sincrónica 2, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24. Valores de reactancias transitoria y subtransitoria, máquina sincrónica 2 en cortocircuito bifásico.

	Fase A-B	Fase B-C	Fase C-A	Promedio
1) Voltaje inicial	230,1	229,8	229,7	229,866667
2) Voltaje inicial p.u.	1,00043478	0,9991304	0,99869565	0,99942029
3) Corriente estado estable	19,796	19,774	19,81	19,7933333
4) Corriente en p.u.	5,2574828	5,2516399	5,26120097	5,25677458
5) Componente transitoria inicial (al tiempo cero) p.u.	8,0982907	8,077541	8,087212	8,08768123
6) Corriente transitoria I' (4+5) p.u.	13,3557735	13,329181	13,348413	13,3444558
7) Componente subtransitoria inicial	1,477838	1,465875	1,472354	1,47202233
8) Corriente subtransitoria I'' (6+7) p.u.	14,8336115	14,795056	14,820767	14,8164781

La Figura 4.61 presenta el comportamiento de la corriente de cortocircuito bifásico de la máquina híbrida.

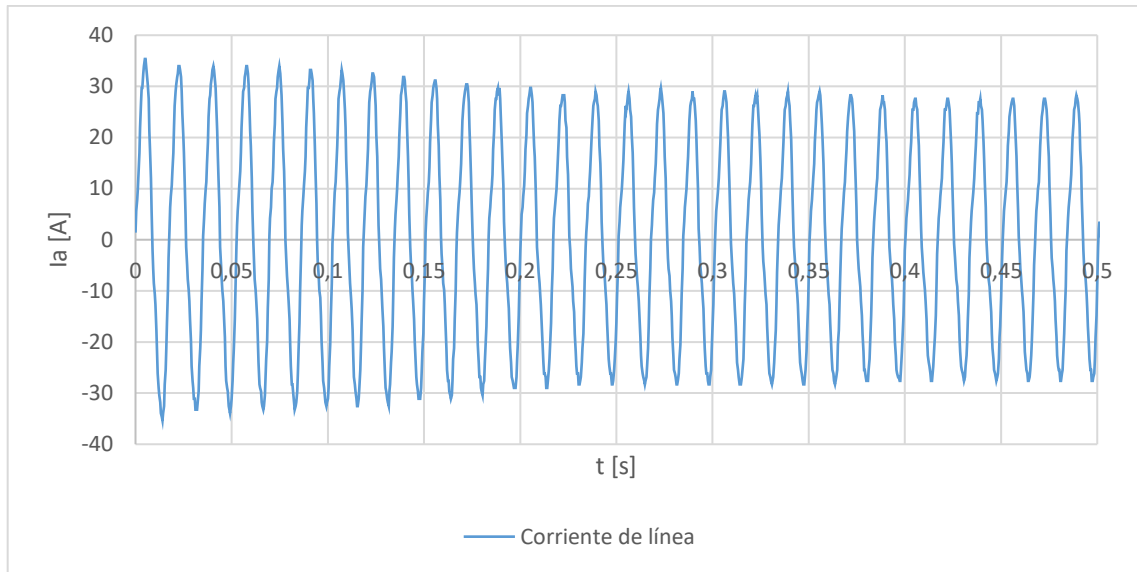


Figura 4.61. Cortocircuito bifásico – oscilación corriente de línea, máquina híbrida.

El comportamiento transitorio y subtransitorio de la prueba de cortocircuito bifásico en la máquina híbrida se determinan a partir de los resultados en escala semilogarítmica que se ubican en las curvas de la Figura 4.62.

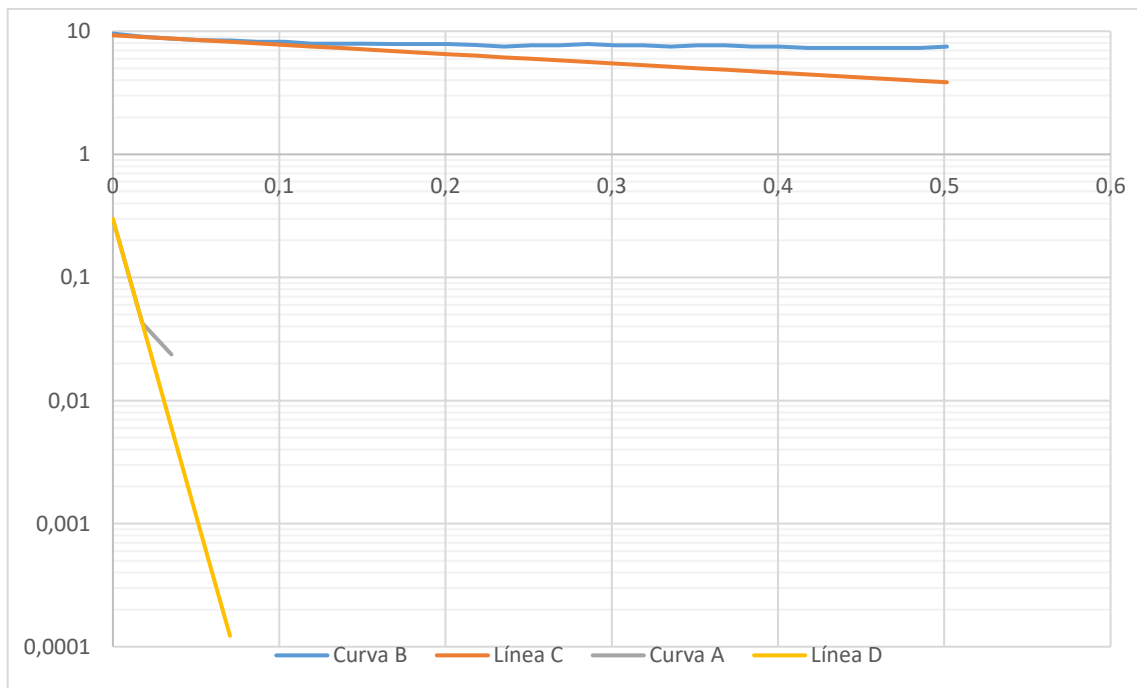


Figura 4.62. Cortocircuito bifásico – Obtención de curvas de componente alterna de corriente en p.u. máquina híbrida.

En la Tabla 4.25 se muestra las componentes transitorias y subtransitorias correspondientes a la máquina híbrida en la prueba de cortocircuito bifásico.

Tabla 4.25. Valores de reactancias transitoria y subtransitoria, máquina híbrida en cortocircuito bifásico.

	Fase A-B	Fase B-C	Fase C-A	Promedio
1) Voltaje inicial	140,2	140,1	139,7	140
2) Voltaje inicial p.u.	0,9346	0,934	0,93133	0,93333
3) Corriente estado estable	14,847	14,872	14,9011	14,8733
4) Corriente en p.u.	2,14298	2,1465	2,15078	2,14678
5) Componente transitoria inicial (al tiempo cero) p.u.	9,27841	9,3314	9,26741	9,2924
6) Corriente transitoria I' (3+5) p.u.	11,42139	11,4780	11,4182	11,4392
7) Componente subtransitoria inicial	0,29771	0,2915	0,2933	0,2942
8) Corriente subtransitoria I'' (6+7) p.u.	11,7191	11,7696	11,7115	11,7334

4.4.7.1 Reactancia subtransitoria en el eje de cuadratura, X''_q

Conjuntamente con la ecuación (4.21) se determina el valor de la reactancia subtransitoria inicial y en la ecuación (4.22) se obtiene la reactancia subtransitoria en el eje de cuadratura.

$$X_{II1} = \frac{\sqrt{3}(E)}{I''} \quad (4.21)$$

Donde:

X_{II1}	Reactancia subtransitoria inicial
E	Voltaje de armadura en circuito abierto
I''	Corriente de estado subtransitorio

$$X''_{q1} = \frac{(X_{II1} - X''_{d1})^2}{X''_{d1}} \quad (4.22)$$

Donde:

X''_{q1}	Reactancia subtransitoria en el eje de cuadratura
X_{II1}	Reactancia subtransitoria inicial
X''_{d1}	Reactancia subtransitoria en eje directo

- Máquina sincrónica 1

En base a la reactancia subtransitoria en eje directo ($X''_{d1} = 0,07918727$ p. u.) ubicada en la sección 4.3.3.1 de la máquina sincrónica 1 juntamente con la ecuación (4.23) se determina el valor de la reactancia subtransitoria inicial:

$$X_{II1} = \frac{\sqrt{3}(E)}{I''} = \frac{\sqrt{3}(1)}{14,8491343} = 0,11683254 \text{ p. u.} \quad (4.23)$$

Después de obtener el valor de la ecuación (4.21), este se reemplaza en la ecuación (4.24) para finalmente obtener la componente subtransitoria en el eje de cuadratura de la máquina sincrónica 1.

$$X''_{q1} = \frac{(X_{II1} - X''_{d1})^2}{X''_{d1}} = \frac{(0,11683254 - 0,07918727)^2}{0,07918727} = 0,01789639 \text{ p. u.} \quad (4.24)$$

- Máquina sincrónica 2

Mediante la reactancia subtransitoria en eje directo ($X''_{d2} = 0,07385145$ p. u.) ubicada en la sección 4.3.3.1 de la máquina sincrónica 2 y aplicando la ecuación (4.25) se obtiene el valor de la reactancia subtransitoria inicial como se presenta a continuación:

$$X_{II} = \frac{\sqrt{3}(E)}{I''} = \frac{\sqrt{3}(0,99942029)}{14,8164781} = 0,03388143 \text{ p. u.} \quad (4.25)$$

Finalmente se obtiene el valor de la reactancia subtransitoria en eje de cuadratura de la máquina 2 en aplicando el resultado de la ecuación (4.25) en la ecuación (4.26).

$$X''_{q2} = \frac{(X_{II2} - X''_{d2})^2}{X''_{d2}} = \frac{(0,03388143 - 0,07385145)^2}{0,07385141} = 0,02163265 \text{ p. u.} \quad (4.26)$$

- Máquina híbrida

En la sección 4.3.3.1. la reactancia subtransitoria en eje directo encontrada para la máquina híbrida es ($X''_{d3} = 0,10193793$ p. u.), seguidamente con la ecuación (4.27) se calcula el valor de la reactancia subtransitoria inicial:

$$X_{II} = \frac{\sqrt{3}(E)}{I''} = \frac{\sqrt{3}(0,93333333)}{11,7334412} = 0,13777550 \text{ p. u.} \quad (4.27)$$

Finalmente, el valor de reactancia subtransitoria de eje en cuadratura de la máquina híbrida se obtiene de la ecuación (4.28).

$$X''_{q3} = \frac{(X_{l13} - X''_{d3})^2}{X''_{d3}} = \frac{(0,13777550 - 0,10193793)^2}{0,10193793} = 0,01259915 \text{ p. u} \quad (4.28)$$

4.4.8 PRUEBA DE DESCONEXIÓN DE BAJO VOLTAJE

Esta prueba se realiza a un bajo deslizamiento mediante una fuente trifásica operando de 5% al 10% del voltaje nominal de armadura.

Se debe considerar que posición del rotor se encuentre alineado con el eje de cuadratura, esto se logra cuando el voltaje medido en campo es mínimo.

El voltaje decae gradualmente hasta un valor menor al 20% del voltaje aplicado, como se observa en la Figura 4.63.

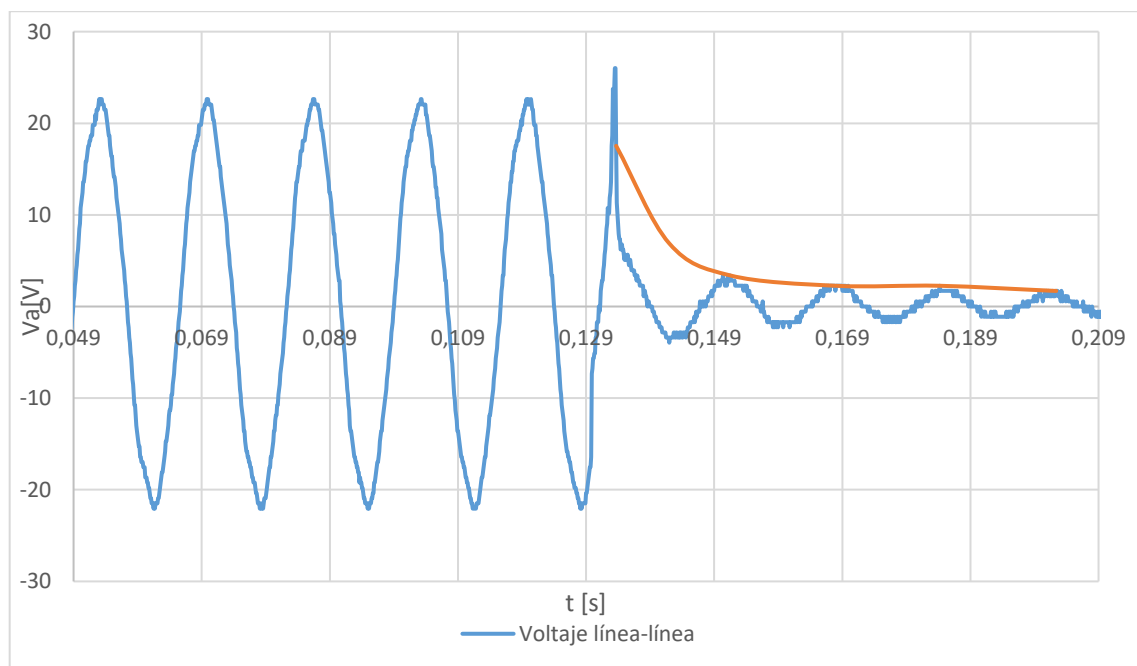


Figura 4.63. Oscilación – Prueba desconexión bajo voltaje máquina sincrónica 1.

En base a la Figura 4.64, la porción lineal de la curva del voltaje de armadura de la máquina sincrónica 1, se extiende hasta el tiempo cero y se procede a determinar la componente transitoria del voltaje inicial $V(i) + V(\text{inf})$, mientras que el voltaje subtransitorio se obtiene de la resta de la componente transitoria $V'(i)$ del voltaje que decae.

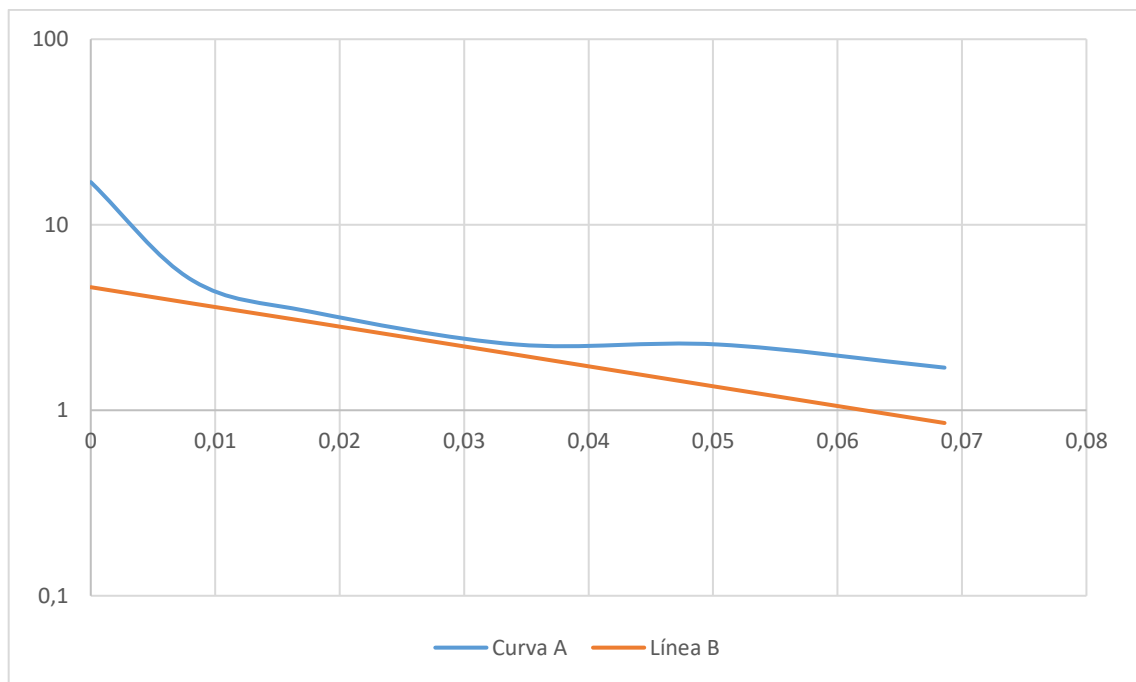


Figura 4.64. Componente semilogarítmica del Voltaje de armadura de la máquina sincrónica 1.

Los resultados del análisis de la componente de voltaje en escala semilogarítmica para la máquina sincrónica 1 (ver Tabla 4.26).

Tabla 4.26. Análisis - Prueba desconexión bajo voltaje máquina sincrónica 1.

Magnitud	Valor	Definición
$V(i)$ [V]	22,624	Voltaje Línea-línea inicial
$V(i)$ p.u.	0,09836522	
$I(i)$ [A]	1,9796	Corriente armadura antes de desconectar
$I(i)$ p.u.	0,52574828	
$V(\text{inf})$ [V]	2,264	Voltaje residual
$V(\text{inf})$ p.u.	0,00984347	
$\Delta V'(i)$ [V]	17,5336	Voltaje inicial transitorio
$\Delta V'(i)$ p.u.	0,07623304	
$\Delta V''(i)$ [V]	3,3936	Voltaje inicial subtransitorio
$\Delta V''(i)$ p.u.	0,01475478	

En la Figura 4.65 se muestra el comportamiento del voltaje de armadura de la máquina sincrónica 2.

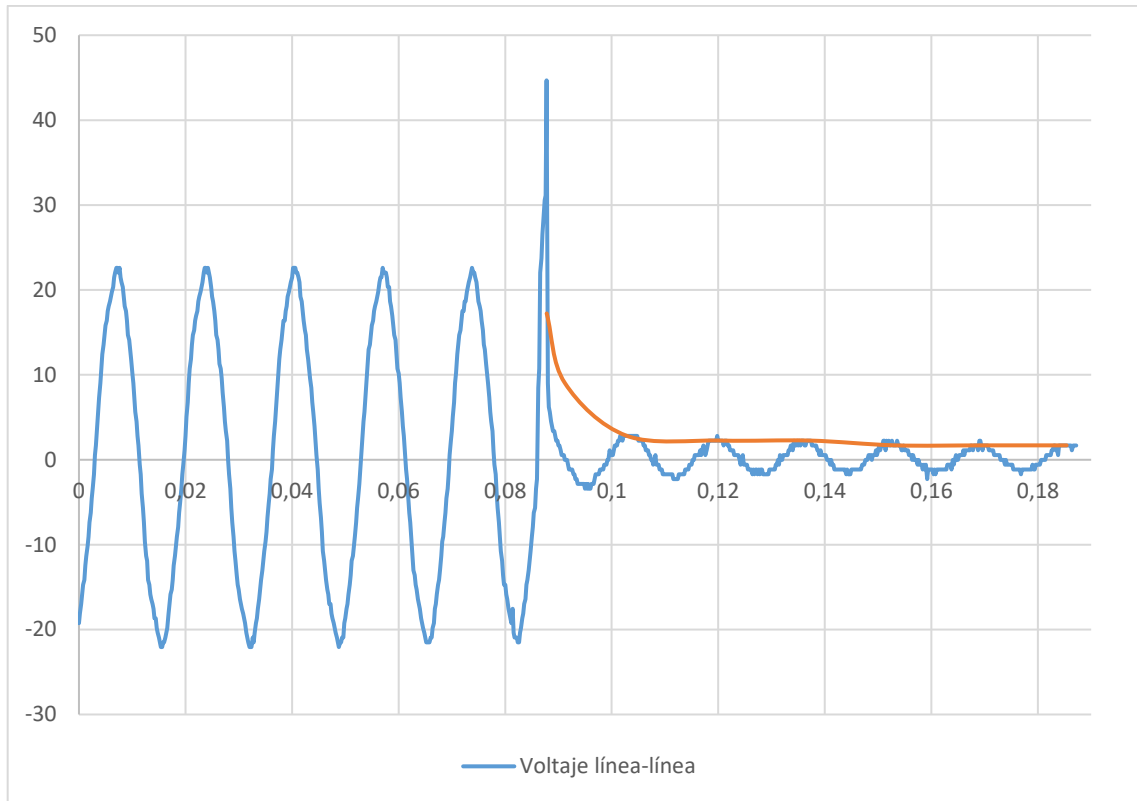


Figura 4.65. Oscilación – Prueba desconexión bajo voltaje máquina síncrona 2.

En base a la Figura 4.66 se muestra el comportamiento transitorio y subtransitorio del voltaje de armadura de la máquina síncrona 2.

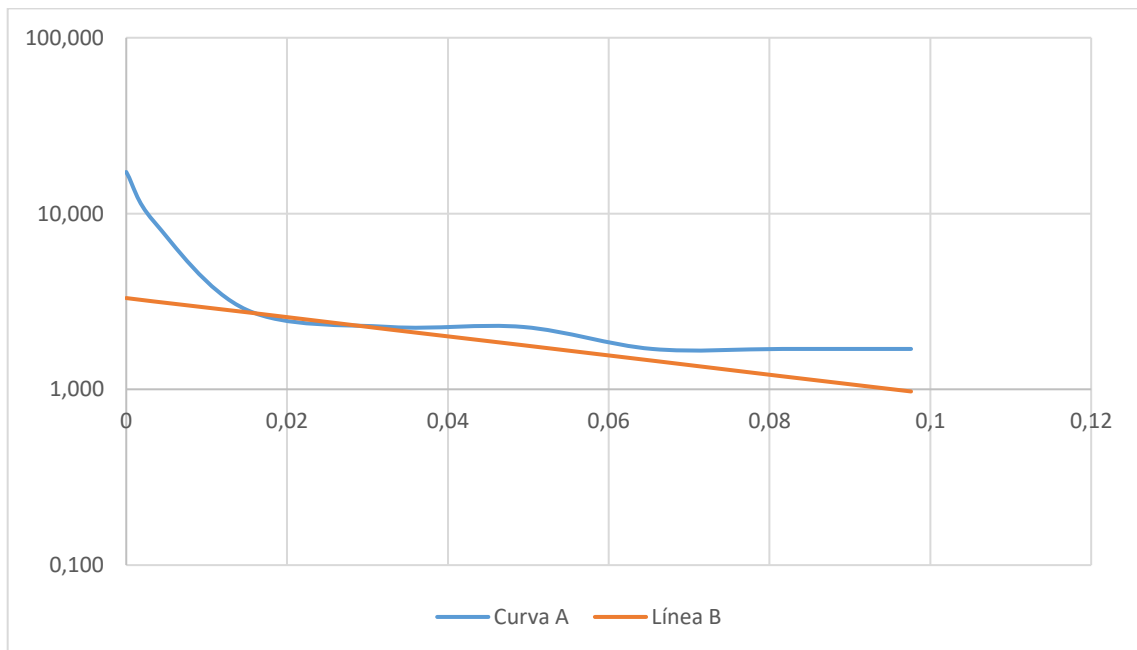


Figura 4.66. Componente semilogarítmica del Voltaje de armadura de la máquina síncrona 2.

En la Tabla 4.27 se muestra los resultados máquina sincrónica 2.

Tabla 4.27. Análisis - Prueba desconexión bajo voltaje máquina sincrónica 2.

Magnitud	Valor	Definición
$V(i)$ [V]	22,058	Voltaje línea-línea inicial
$V(i)$ p.u.	0,0959043478	
$I(i)$ [A]	2,01636	Corriente armadura antes de desconectar
$I(i)$ p.u.	0,53551111	
$V(\text{inf})$ [V]	1,697	Voltaje residual
$V(\text{inf})$ p.u.	0,00737826	
$\Delta V'(i)$ [V]	17,234	Voltaje inicial transitorio
$\Delta V'(i)$ p.u.	0,07493043	
$\Delta V''(i)$ [V]	2,828	Voltaje inicial subtransitorio
$\Delta V''(i)$ p.u.	0,01229565	

En la Figura 4.67 se muestra el comportamiento de la máquina híbrida.

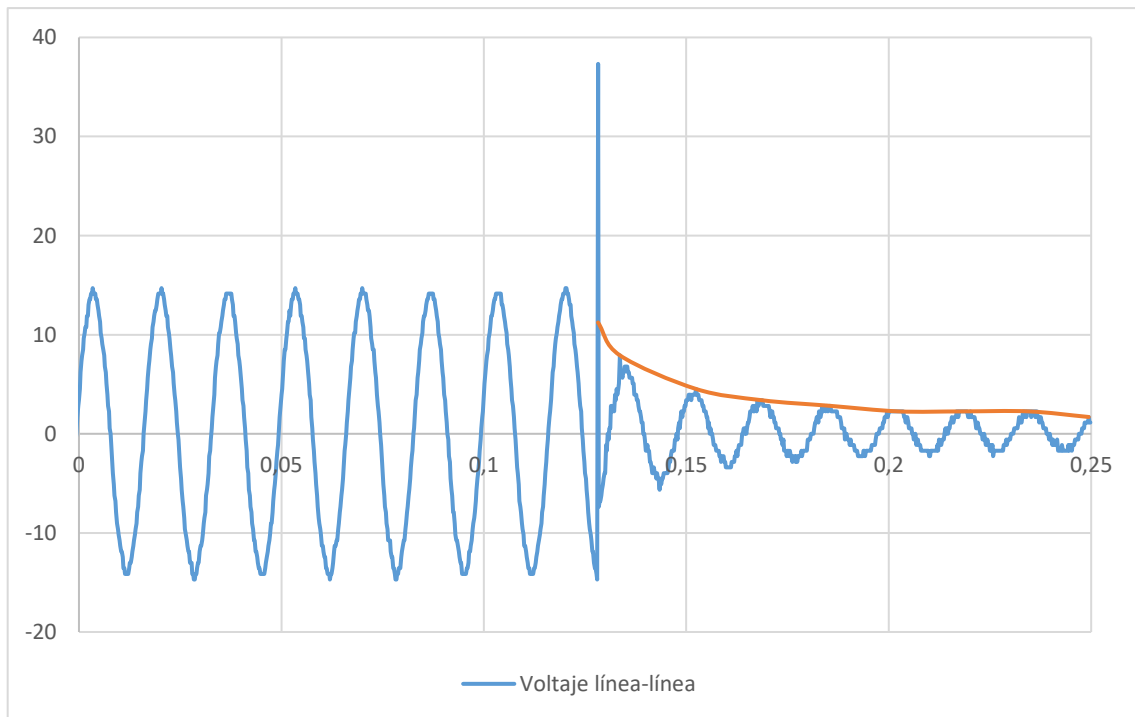


Figura 4.67. Oscilación – Prueba desconexión bajo voltaje máquina híbrida.

En base a la Figura 4.68 se observa el comportamiento de la máquina híbrida en escala semilogarítmica.

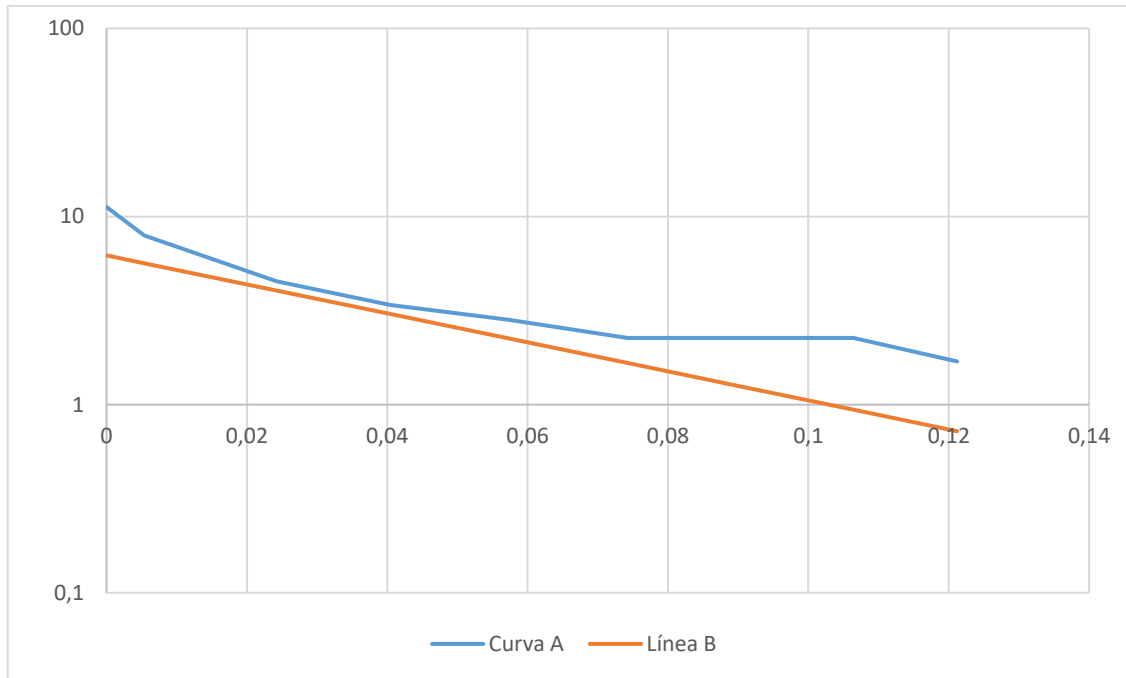


Figura 4.68. Componente semilogarítmica del Voltaje de armadura de la máquina híbrida.

Los resultados del análisis de la máquina híbrida se observan en la Tabla 4.28.

Tabla 4.28. Análisis - Prueba desconexión bajo voltaje máquina híbrida.

Magnitud	Valor	Definición
V(i) [V]	14,7056	Voltaje línea-línea inicial
V(i) p.u.	0,09803733	
I(i) [A]	2,0503	Corriente armadura antes de desconectar
I(i) p.u.	0,29593545	
V(inf) [V]	2,2624	Voltaje residual
V(inf) p.u.	0,01508266	
$\Delta V'(i)$ [V]	7,9184	Voltaje inicial transitorio
$\Delta V'(i)$ p.u.	0,05278933	
$\Delta V''(i)$ [V]	4,5248	Voltaje inicial subtransitorio
$\Delta V''(i)$ p.u.	0,0196730435	

4.4.8.1 Constante de tiempo subtransitoria de cortocircuito t''_q y subtransitoria de circuito abierto t''_{q0} de eje de cuadratura

Mediante la prueba de desconexión de bajo voltaje, se calcula en cuadratura la reactancia transitoria mediante la siguiente ecuación (4.29) para la:

$$X'_{q1} = \frac{(V(i) - \Delta V'(i) - V(\text{inf}))}{\sqrt{3} \times I(i)} \quad (4.29)$$

Donde:

X'_{q1}	Reactancia transitoria
$V(i)$	Voltaje línea-línea inicial
$\Delta V'(i)$	Voltaje inicial transitorio
$V(\text{inf})$	Voltaje residual
$I(i)$	Corriente armadura antes de desconectar

- Máquina sincrónica 1

$$X'_{q1} = \frac{(22,624 - 17,5336 - 3,3936)}{\sqrt{3}(1,9796)} = 0,49487166 \text{ p. u.} \quad (4.30)$$

- Máquina sincrónica 2

$$X'_{q2} = \frac{(22,058 - 17,5336 - 2,828)}{\sqrt{3}(2,01636)} = 0,48573518 \text{ p. u.} \quad (4.31)$$

- Máquina híbrida

$$X'_{q3} = \frac{(14,7056 - 11,234 - 7,9184)}{\sqrt{3}(2,0503)} = 0,63707616 \text{ p. u.} \quad (4.32)$$

Para el cálculo del tiempo en circuito abierto de la constante subtransitoria t''_{q0} , se define como el decrecimiento de 0,368 veces de la componente de voltaje inicial subtransitoria $\Delta V''(i)$. En la Tabla 4.29 se muestran los valores de tiempo para las 3 máquinas sincrónicas.

Tabla 4.29. Cálculos tiempos circuito abierto, desconexión bajo voltaje.

Tiempos (s)	Valor
t''_{q01}	0,01867
t''_{q02}	0,03660
t''_{q03}	0,02583

En base a la ecuación (4.33) se determina la constante de tiempo subtransitoria para la máquina sincrónica 1, 2 y máquina híbrida:

$$t''_q = \frac{(t''_{q0})(x''_q)}{x'_q} \quad (4.33)$$

Donde:

t''_q	Constante de tiempo subtransitoria de cortocircuito
t''_{q0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto
x''_q	Reactancia subtransitoria
x'_q	Reactancia transitoria

$$t''_{q1} = \frac{(0,01867)(0,01789639)}{0,49487166} = 0,675176269 \text{ ms}$$

$$t''_{q2} = \frac{(0,03660)(0,02163265)}{0,48573518} = 1,630013684 \text{ ms}$$

$$t''_{q3} = \frac{(0,02583)(0,01259915)}{0,63707616} = 0,510827535 \text{ ms}$$

4.4.9 PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA

En la Figura 4.69 y Figura 4.70 se presentan los esquemas del circuito implementado en el laboratorio para obtener la variación de frecuencia en función del tiempo durante el rechazo de carga. Para poder realizar esta prueba el generador debe funcionar con el 100% de su capacidad y a velocidad nominal [22].



Figura 4.69. Circuito de rechazo de carga máquinas sincrónicas (generador 1 y 2).



Figura 4.70. Circuito de Rechazo de carga máquina híbrida (generador 3).

En base a programación con elementos electrónicos como: rectificador de media onda, octoacoplador, Arduino-mini, transformador AC de 220V a 6V. El circuito implementado (ver Figura 4.71), funciona mediante la adquisición de datos a través de un transformador de 220V a 6V, esta señal es rectificadada para después pasar por un circuito (octoacoplador) que convierte la señal análoga en digital, su funcionamiento se puede visualizar por 3 leds identificados por inicio, registro de datos y fin del programa.

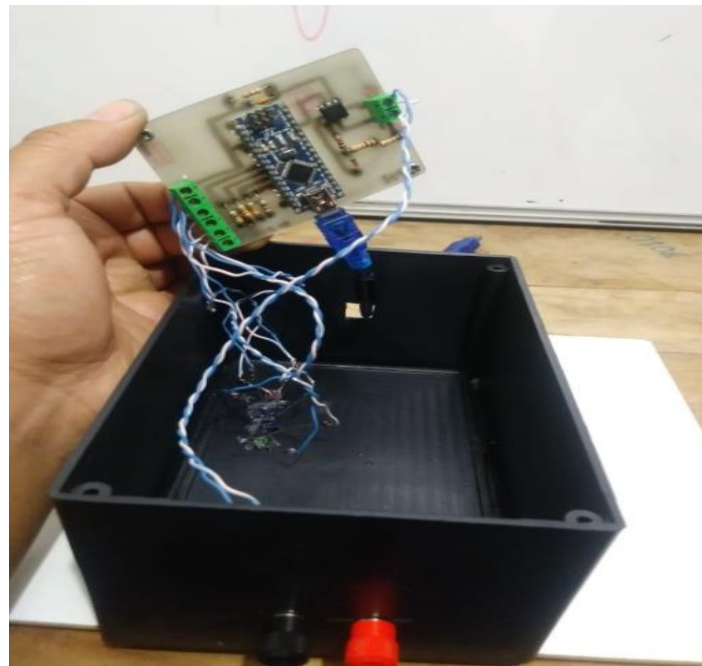


Figura 4.71. Circuito implementado para medir frecuencia vs tiempo del rechazo de carga.

La forma de onda de la frecuencia en función del tiempo causado por el rechazo de carga para la máquina síncrona 1 con 3 pasos de carga de 1,9 A se presenta en la Figura 4.72.

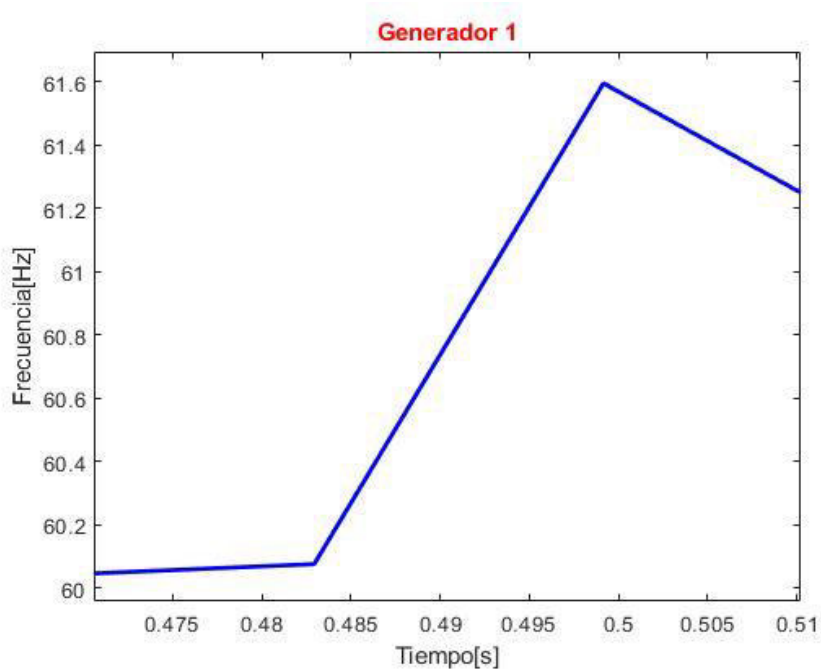


Figura 4.72. Frecuencia al rechazo de carga, máquina síncrona 1.

En base a la Figura 4.73 se expone la onda de la frecuencia en función del tiempo causado por el rechazo de carga, aplicado para tres pasos de carga de 1,9 A en la máquina síncrona 2.

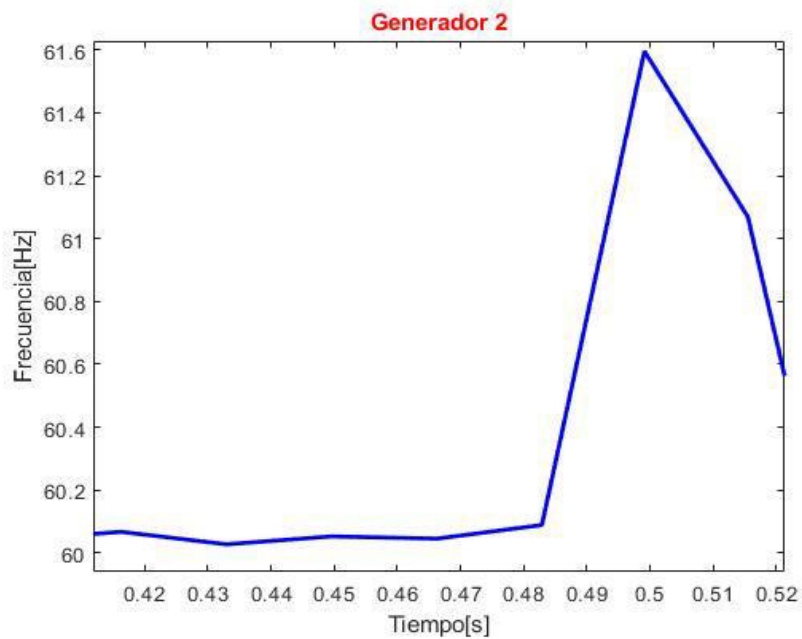


Figura 4.73. Frecuencia al rechazo de carga, máquina síncrona 2.

Se presenta la forma de onda de la frecuencia en función del tiempo causado por el rechazo de carga para 6 pasos de carga de la máquina híbrida en la Figura 4.74.

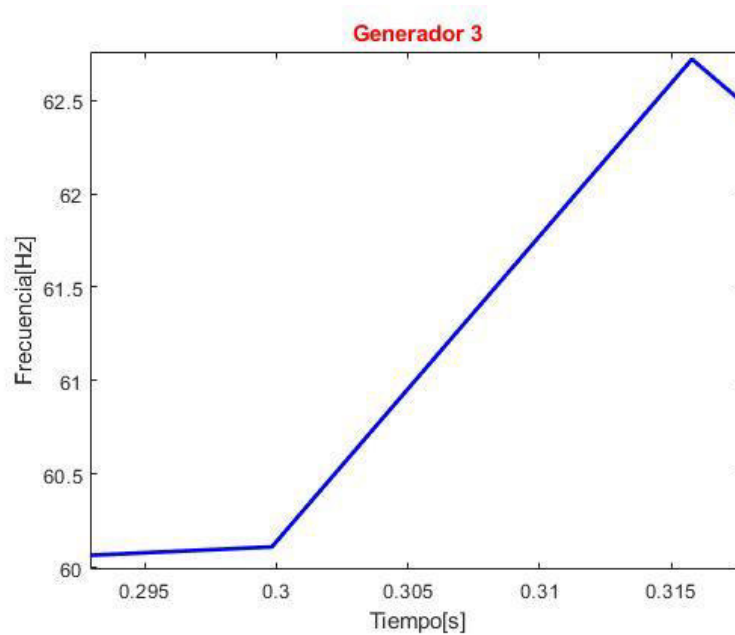


Figura 4.74. Frecuencia al rechazo de carga, máquina híbrida.

En la Tabla 4.30 se presentan los valores obtenidos de la prueba de rechazo de carga.

Tabla 4.30. Datos de rechazo de carga en las máquinas sincrónicas.

Datos	Máquina 1	Máquina 2	Máquina híbrida
S base (kVA)	1,5	1,5	1,8
P (W)	1500	1500	1800
P (p.u.)	1	1	1
F nominal (Hz)	60	60	60
Δt (s)	0,016235	0,016219	0,015944
f1 (Hz)	60,0276	60,0889	60,1106
f2 (Hz)	61,5953	61,6012	62,7195
Δf (Hz)	1,5677	1,5123	2,6089

4.4.9.1 Constante de inercia, H

Esta constante se obtiene de la parte lineal de la curva, es decir se determina a partir de la ecuación de oscilación mostrada en la ecuación(4.34) , sin considerar el amortiguamiento, y de la prueba de rechazo de carga [8].

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H}(P) \quad (4.34)$$

$$H = \frac{f_0}{2 \frac{df}{dt}}(P) \quad (4.35)$$

Aproximando la derivada de la frecuencia a su variación, es decir, donde la respuesta es lineal, y reemplazando la ecuación(4.36) en la ecuación(4.35), para obtener la ecuación (4.37).

$$\frac{df}{dt} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (4.36)$$

$$H = \frac{(f_{nominal})(\Delta t)(P(p. u.))}{2 \Delta f} \quad (4.37)$$

Donde:

H	Constante de inercia
f _{nominal}	Frecuencia nominal
Δt	Variación de tiempo
Δf	Variación de frecuencia
P(p. u.)	Potencia activa de salida en p.u.

En la ecuación (4.38) se calcula la inercia para la máquina síncrona 1.

$$H1 = \frac{(f_{nominal})(\Delta t_1)(P(p. u.))}{2 \Delta f_1} = \frac{(60)(0,016235)(1)}{2(1,5677)} = 0,31068 \text{ s} \quad (4.38)$$

La ecuación (4.39) presenta la inercia calculada para la máquina síncrona 2.

$$H2 = \frac{(f_{nominal})(\Delta t_2)(P(p. u.))}{2 \Delta f_2} = \frac{(60)(0,016219)(1)}{2(1,5123)} = 0,32174 \text{ s} \quad (4.39)$$

La ecuación (4.40) presenta la inercia calculada para la máquina híbrida.

$$H3 = \frac{(f_{nominal})(\Delta t_3)(P(p. u.))}{2 \Delta f_3} = \frac{(60)(0,015944)(1)}{2(2,6089)} = 0,18334 \text{ s} \quad (4.40)$$

4.4.10 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS

En la siguiente sección se muestra los valores obtenidos de las pruebas eléctricas relacionados a las máquinas sincrónicas del módulo 1. En la Tabla 4.31 se presentan detallados los resultados obtenidos de la máquina sincrónica 1

Tabla 4.31. Resultados obtenidos para la máquina sincrónica 1.

Parámetro eléctrico		Valor	Unidad
Ra	Resistencia de armadura	0,1094	p.u.
Xd	Reactancia sincrónica de eje directo	0,2368	p.u.
X'd	Reactancia transitoria de eje directo	0,0911	p.u.
X''d	Reactancia subtransitoria de eje directo	0,0792	p.u.
Xq	Reactancia sincrónica de eje en cuadratura	0,1224	p.u.
X''q	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura	0,0179	p.u.
t'd	Constante de tiempo transitorio de cortocircuito de eje directo	0,1508	s
t''d	Constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito de eje directo	0,0112	s
t'd0	Constante de tiempo transitorio de circuito abierto de eje directo	0,4261	s
t''d0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto de eje directo	0,0112	s
t''q	Constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito de eje en cuadratura	0,6752	s
t''q0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto de eje en cuadratura	0,0187	s
H	Conste de inercia	0,3107	s

En la Tabla 4.32 se muestran los resultados de la máquina sincrónica 2.

Tabla 4.32. Resultados obtenidos para la máquina sincrónica 2.

Parámetro eléctrico		Valor	Unidad
Ra	Resistencia de armadura	0,0998	p.u.
Xd	Reactancia sincrónica de eje directo	0,2286	p.u.
X'd	Reactancia transitoria de eje directo	0,0755	p.u.
X''d	Reactancia subtransitoria de eje directo	0,0739	p.u.
Xq	Reactancia sincrónica de eje en cuadratura	0,1085	p.u.
X''q	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura	0,0216	p.u.
t'd	Constante de tiempo transitorio de cortocircuito de eje directo	0,1593	s
t''d	Constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito de eje directo	0,0263	s
t'd0	Constante de tiempo transitorio de circuito abierto de eje directo	0,6302	s
t''d0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto de eje directo	0,0159	s
t''q	Constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito de eje en cuadratura	1,6300	s
t''q0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto de eje en cuadratura	0,0366	s
H	Conste de inercia	0,3217	s

Finalmente, en la Tabla 4.33 se muestran los resultados de la máquina híbrida obtenidos.

Tabla 4.33. Resultados obtenidos para la máquina sincrónica 3 o máquina híbrida.

Parámetro eléctrico		Valor	Unidad
Ra	Resistencia de armadura	0,3191	p.u.
Xd	Reactancia sincrónica de eje directo	0,3368	p.u.
X'd	Reactancia transitoria de eje directo	0,1115	p.u.
X''d	Reactancia subtransitoria de eje directo	0,1019	p.u.
Xq	Reactancia sincrónica de eje en cuadratura	0,1908	p.u.
X''q	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura	0,0126	p.u.
t'd	Constante de tiempo transitorio de cortocircuito de eje directo	0,1215	s
t''d	Constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito de eje directo	0,0227	s
t'd0	Constante de tiempo transitorio de circuito abierto de eje directo	0,7004	s
t''d0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto de eje directo	0,0537	s
t''q	Constante de tiempo subtransitorio de cortocircuito de eje en cuadratura	0,5108	s
t''q0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto de eje en cuadratura	0,0258	s
H	Conste de inercia	0,1833	s

4.5 PARÁMETROS ELÉCTRICOS MÁQUINA DE INDUCCIÓN

Para obtener los parámetros eléctricos se necesita contar con los datos de placa con el objetivo de calcular los respectivos valores base de la máquina:

$$\text{Voltaje base } (V_{L-L}) = 220 \text{ [V]}$$

$$\text{Corriente base } (I_{\text{línea}}) = 8 \text{ [A]}$$

$$\text{Potencia – base } (S_{3\phi}) = \sqrt{3} \times \text{Voltaje base } (V_{L-L}) \times \text{Corriente base } (I_{\text{línea}}) = 3,048 \text{ [kVA]}$$

$$\text{Impedancia } (Z_{\text{BASE}}) = \frac{(V_L)^2}{S_{3\phi}} = \frac{(220)^2 [\text{V}]^2}{3048 [\text{VA}]} = 15,879 [\Omega]$$

4.5.1 PRUEBA DE CORRIENTE CONTINUA

4.5.1.1 Resistencia del devanado del estator Prueba de corriente continua

Es necesario alimentar los bobinados del estator con un valor bajo de voltaje continuo para obtener el valor de corriente a través de un amperímetro para después obtener el valor de resistencia, en la Figura 4.75 se presenta la implementación del circuito para desarrollar la prueba.



Figura 4.75. Circuito de medición resistencia de armadura máquina inducción.

En la Tabla 4.34 se muestra las lecturas de corriente y voltaje registradas en el laboratorio.

Tabla 4.34. Datos obtenidos con una temperatura de 20°C máquina inducción.

# Datos	Vcc (V)	Icc (A)	Rab (Ω)
1	1	0,6	1,667
2	1,5	0,8	1,875
3	1,8	0,97	1,856
4	2,1	1,15	1,826
5	3,3	1,72	1,919
6	4,6	2,38	1,933
7	5,4	2,85	1,895
8	6,4	3,3	1,939
9	7,7	4,1	1,878
10	8,8	4,62	1,905
11	10	5,28	1,894
12	12	6,22	1,929
R promedio			1,876

Es necesario verificar el tipo de conexión del devanado, en este caso se tiene una conexión en delta, siendo necesario recalcular su valor mediante la ecuación (4.41) para hallar su valor real.

$$R_{a_inducción1} 20^{\circ}\text{C} = R_{a1} 20^{\circ}\text{C}(\text{delta}) (1,5) = 2,814[\Omega] \quad (4.41)$$

Con el valor real de resistencia a temperatura ambiente, se realiza la corrección de temperatura a 75°C como se muestra en la ecuación (4.42).

$$R_{a_inducción} 75^{\circ}\text{C} = R_{a_inducción} 20^{\circ}\text{C} \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 3,4221[\Omega] \quad (4.42)$$

4.5.2 PRUEBA SIN CARGA

Para el desarrollo de esta prueba se debe energizar la máquina de inducción sin carga, con la ayuda de un analizador de red se registra los valores de la velocidad, voltaje, corriente y potencia, en la Figura 4.76 se muestra la implementación para desarrollar la prueba.

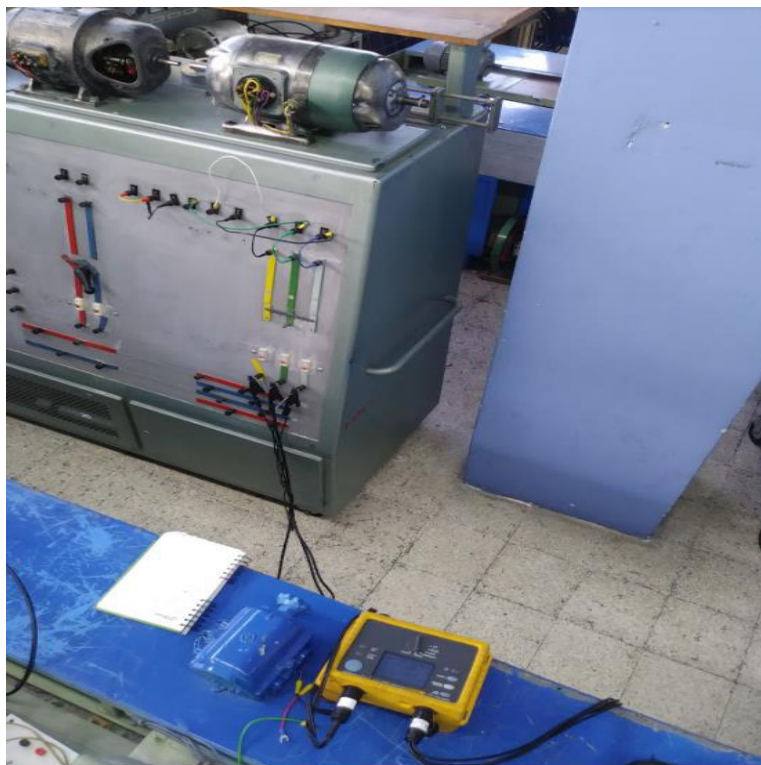


Figura 4.76. Esquema de conexión durante la prueba en circuito abierto en el motor de inducción.

En la Tabla 4.35 se muestra los valores obtenidos en el estator durante la prueba en vacío.

Tabla 4.35. Datos obtenidos durante la prueba en vacío en la máquina inducción.

Prueba en vacío	
V (V)	213
I (A)	3,2
P (kW)	0,14
Frecuencia (Hz)	60
Velocidad (R.P.M.)	1793

4.5.3 PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO

Esta prueba se realiza con ayuda de un autotransformador, se realiza la variación de voltaje de forma ascendente, hasta llegar al valor nominal de corriente en el rotor, en la Tabla 4.36 se muestra los valores obtenidos de esta prueba.

Tabla 4.36. Valores obtenidos de la prueba a rotor bloqueado.

# Datos	V (V)	I (A)	P (W)
1	21,07	2,7	0,5
2	31,1	4,03	0,12
3	60,43	8	0,43

4.5.3.1 Reactancia de rotor X'_{lr} , reactancia del estator X'_{ls} y resistencia de rotor referida al estator r'_r .

Para determinar las reactancias de rotor y estator es necesario conocer la relación entre X'_{lr} y X_{ls} [19], en la Tabla 4.37 se observa el valor según la clase de motor, este caso la máquina de inducción es de tipo A, por este motivo la relación para el cálculo de las reactancias de rotor y estator es de 1 ($X'_{lr} = X_{ls}$).

Tabla 4.37. Relación de reactancias según el tipo de motor [18].

$\frac{X_{ls}}{X'_{lr}}$	Clase de motor
1	A, D y motor de rotor devanado
0,67	B
0,43	C

Con los datos obtenidos de la prueba en vacío, se procede al cálculo de la reactancia sin carga (X_{sc}) indicada en la ecuación (4.43), el cual se obtiene mediante la ecuación (4.44) y (4.45) de donde se conocerá los valores de la resistencia e impedancia sin carga, respectivamente.

$$X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - r_{sc}^2} = X_{ls} + X_m \quad (4.43)$$

Donde:

X_{sc}	Reactancia sin carga
Z_{sc}	Impedancia sin carga
r_{sc}	Resistencia sin carga
X_{ls}	Reactancia de estator
X_m	Reactancia de magnetización

$$r_{sc} = \frac{P_{sc}}{3(I_{sc})^2} \quad (4.44)$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (4.45)$$

El valor de la reactancia sin carga, se obtiene remplazando las ecuaciones (4.44), (4.45) en la ecuación (4.43), para obtener la ecuación (4.46) de esta manera se determina el valor de la reactancia mostrado en la ecuación (4.47).

$$X_{sc} = \sqrt{\left(\frac{V_{sc}}{I_{sc}}\right)^2 - \left(\frac{P_{sc}}{3(I_{sc})^2}\right)^2} \quad (4.46)$$

$$X_{sc} = \sqrt{\left(\frac{213}{\frac{3,2}{\sqrt{3}}}\right)^2 - \left(\frac{140}{3\left(\frac{3,2}{\sqrt{3}}\right)^2}\right)^2}$$

$$X_{sc} = \sqrt{(115,29)^2 - (13,67)^2} = 114,476 \Omega \quad (4.47)$$

El cálculo de la reactancia de rotor bloqueado (X_{rb}) indicada en la ecuación (4.48), para lo cual es necesario obtener los valores de resistencia e impedancia a rotor bloqueado mostrados en las ecuaciones (4.49) y (4.50) respectivamente.

$$X_{rb} = \sqrt{Z_{rb}^2 + r_{rb}^2} = X_{ls} + X'_{lr} \quad (4.48)$$

Donde:

X_{rb}	Reactancia a rotor bloqueado
Z_{rb}	Impedancia a rotor bloqueado
r_{rb}	Resistencia a rotor bloqueado
X_{ls}	Reactancia de estator
X'_{lr}	Reactancia de rotor referida al estator

$$r_{rb} = \frac{P_{rb}}{3(I_{rb})^2} \quad (4.49)$$

$$Z_{rb} = \frac{V_{rb}}{I_{rb}} \quad (4.50)$$

El valor de la reactancia a rotor bloqueado se obtiene reemplazando las ecuaciones (4.49) y (4.50) en la ecuación (4.48), para obtener la (4.51) con el objetivo de calcular el valor de la reactancia mostrado en la ecuación (4.52).

$$X_{rb} = \sqrt{\left(\frac{V_{rb}}{I_{rb}}\right)^2 - \left(\frac{P_{rb}}{3(I_{rb})^2}\right)^2} \quad (4.51)$$

$$X_{rb} = \sqrt{\left(\frac{60,43}{\frac{8}{\sqrt{3}}}\right)^2 - \left(\frac{430}{3\left(\frac{8}{\sqrt{3}}\right)^2}\right)^2}$$

$$X_{rb} = \sqrt{13,08^2 - 6,72^2} = 11,22 \Omega \quad (4.52)$$

En base a la norma NEMA [24] se conoce que la relación de la reactancia de estator y rotor es $\frac{X_{ls}}{X'_{lr}} = 1$, al reemplazar esta relación en la ecuación (4.48) se tiene la ecuación (4.53).

$$X_{ls} = X'_{lr} = 0,5 X_{rb} = 5,61 \Omega \quad (4.53)$$

El valor de la reactancia a rotor bloqueado se obtiene de las reactancias del estator y rotor mostrado en la (4.53) .

De la ecuación (4.43) de prueba en circuito abierto se puede realizar el cálculo para obtener el valor de la reactancia de magnetización la cual se muestra en la ecuación (4.54)

$$X_m = X_{sc} - X_{ls} = 108,86 \Omega \quad (4.54)$$

Para finalizar, se procede con el cálculo de la resistencia del rotor referida al estator mostrada en la ecuación (4.56) y por último se presenta el circuito equivalente a rotor bloqueado de la máquina de inducción en la Figura 4.77.

$$r'_r = \frac{(X'_{lr} + X_m)^2}{X_m^2} (r_{rb} - R_a) \quad (4.55)$$

Donde:

r_{rb} Resistencia a rotor bloqueado

r'_r	Resistencia del rotor referida al estator
X'_{lr}	Reactancia de rotor
R_a	Resistencia a rotor bloqueado
X_m	Reactancia de magnetización

$$r'_r = \frac{(5,61 + 108,86)^2}{108,86^2} (11,22 - 3,42)$$

$$r'_r = 8,625 \Omega \quad (4.56)$$

Tabla 4.38. Datos obtenidos, rotor bloqueado máquina inducción.

Parámetros	Valor 60 Hz
R_a	3,42
r'_r	8,625
$X_{ls} = X'_{lr}$	5,61
X_m	108,86

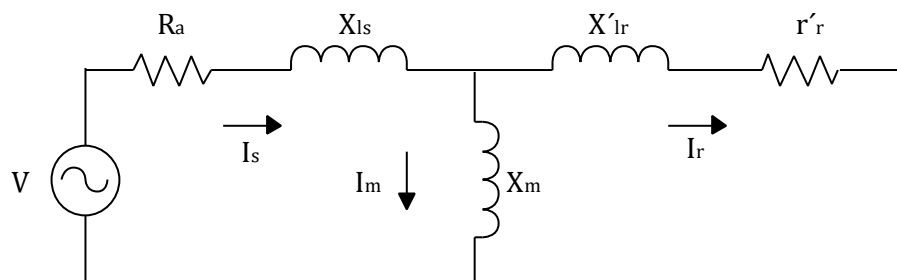


Figura 4.77. Circuito equivalente, rotor bloqueado, máquina de inducción.

4.6 PARÁMETROS ELÉCTRICOS MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Bajo la norma IEEE Std-113 se ejecutan las pruebas eléctricas para las máquinas de corriente continua, en la Figura 4.78 se presentan dos tipos de máquinas que son de excitación shunt o paralelo (máquina 1 - máquina 2) y de excitación serie (máquina 3 – máquina 4).

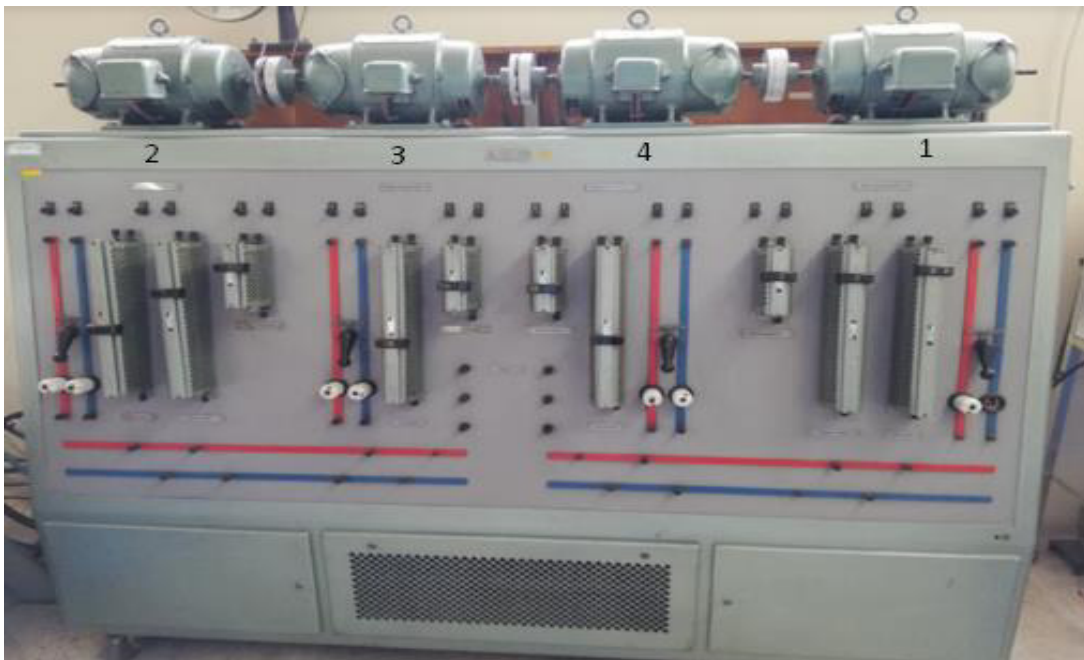


Figura 4.78. Máquinas de Corriente Continua AEG módulo móvil.

En la Tabla 4.39 se presentan los datos de placa corresponden a la máquina híbrida, que se encuentra ubicada en el módulo móvil 1 del Laboratorio de Máquina Eléctricas.

Tabla 4.39. Datos de placa máquina Híbrida.

AEG		AEG	
TYPE EU	45	TYPE EU	45
G-MOT	Nr. 456301	D-GEN	Nr. 456301
230 V	10,5 A	150 V	8,4 A
DB 1,8 kW		DB 1,8 kW	Cosφ 1
1500 U/min		1800 U/min	60 Hz
Erreg 165V	0,95 A	Erreg 140 V	0,82 A
Isol. -KI E/B	P 00	Isol. -KI E/B	P 00
VDE 530/3,59		VDE 530/3,59	

En Tabla 4.40 los datos de placa pertenecen a la máquina de corriente continua 1 y máquina de corriente continua 2, de excitación shunt.

Tabla 4.40. Datos de placa máquina CC 1 y 2.

AEG		AEG	
TYPE EU	27	TYPE G	27
G - MOT	Nr. 667813	EU	Nr. 667813
220V/ 4,1		220V / 4,7 A	
DB 0,9 kW		DB 0,9 kW	
2300 U/min		1340/2300(3800) U/min	
V	A	V	A
Isol. -KI B	P 00	Isol. -KI B	P 00
VDE 530/7,55		VDE 530/7,55	

En la Tabla 4.41 se presentan los datos de placa de la máquina de corriente continua 3 y máquina de corriente continua 4, de excitación serie.

Tabla 4.41. Datos de placa máquina CC 3 y 4.

AEG		AEG	
TYPE G	27	TYPE G	27
G - GEN	Nr. 667805 y Nr. 667792	G - MOT	Nr. 667805 y Nr. 667792
220V / 4,1 A		220 V / 4,83 A	
DB 0,9 kW		DB 0,8 kW	
2300 U/min		1340/2300(3800) U/min	
V	A	V	A
Isol. -KI B	P 00	Isol. -KI B	P 00
VDE 530/7,55		VDE 530/7,55	

4.6.1 PRUEBA DE CORRIENTE CONTINUA

4.6.1.1 RESISTENCIA DE DEVANADOS DE CAMPO, DEVANADO DE ARMADURA Y DE SER EL CASO DEVANADO DE COMPENSACIÓN

En la Tabla 4.42 se muestran los datos de la resistencia del devanado de armadura de la máquina de corriente continua 1 que se encuentra en derivación.

Tabla 4.42. Máquina corriente continua 1 - Resistencia bobina Armadura.

Bobina Armadura A-H			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R _{AH} (Ω)
1	0,6	0,14	4,2857143
2	1	0,2	5
3	1,5	0,32	4,6875
4	1,9	0,385	4,9350649
5	2,5	0,5	5
6	3	0,62	4,8387097
7	3,5	0,721	4,8543689
8	3,9	0,777	5,019305
9	4,5	0,84	5,3571429
Promedio			4,8864229

La resistencia en armadura a temperatura ambiente de la máquina de corriente continua 1 es $R_{AH}20^{\circ}\text{C} = 4,8864229[\Omega]$, esta resistencia necesita ser corregida a 75°C mediante la ecuación (4.57) y de esta manera se obtiene el valor expuesto de la corrección de temperatura en la ecuación(Figura 4.48).

$$R_{AH}75^{\circ}\text{C} = R_{AH}20^{\circ}\text{C} \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} \quad (4.57)$$

Donde:

R_{AH} Resistencia entre terminales A-H

$$R_{AH}75^{\circ}\text{C} = 5,94242784[\Omega] \quad (4.58)$$

La Tabla 4.43 muestra datos de la resistencia del devanado shunt de la máquina de corriente continua 1 en derivación.

Tabla 4.43. Máquina corriente continua 1 - Resistencia bobina Campo.

Bobina Campo C-D			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{CD} (Ω)
1	5	0,0083	602,40964
2	10	0,0168	595,2381
3	15,1	0,0252	599,20635
4	20	0,0338	591,71598
5	24,9	0,042	592,85714
6	29,1	0,049	593,87755
Promedio			595,88413

Con la resistencia de bobina de campo en promedio calculada de la máquina de corriente continua 1 y aplicando corrección de temperatura se obtiene la ecuación (4.59).

$$R_{CD}75^{\circ}\text{C} = 724,660661[\Omega] \quad (4.59)$$

Donde:

R_{CD} Resistencia entre terminales C-D

La Tabla 4.44 corresponde a los datos de la resistencia de compensación de la máquina corriente continua 1.

Tabla 4.44. Máquina corriente continua 1 - Resistencia bobina Compensación.

B. Compensación E-F			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{EF} (Ω)
1	0,2	0,588	0,3401361
2	0,5	1,191	0,4198153
3	0,7	1,545	0,4530744
4	0,9	2,06	0,4368932
5	1,2	2,52	0,4761905
Promedio			0,4252219

La resistencia promedio de la bobina de compensación de la máquina de corriente continua 1 es $R_{EF}20^{\circ}\text{C} = 0,4252219[\Omega]$, el valor corregido a temperatura ambiente se expone en la ecuación (4.60).

$$R_{EF}75^{\circ}\text{C} = 0,5171166[\Omega] \quad (4.60)$$

Donde:

R_{EF} Resistencia entre terminales E-F

Para la máquina de corriente continua 2, se presentan los resultados de la resistencia en armadura de la máquina de corriente continua 2 en la Tabla 4.45.

Tabla 4.45. Máquina corriente continua 2 - Resistencia bobina Armadura.

Bobina Armadura A-H			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{AH} (Ω)
1	0,5	0,12	4,1666667
2	1	0,2	5
3	1,5	0,31	4,8387097
4	2	0,4	5
5	2,5	0,51	4,9019608
6	3	0,61	4,9180328
7	3,5	0,71	4,9295775
8	4	0,76	5,2631579
Promedio			4,8772632

La resistencia de armadura promediada de la máquina de corriente continua 2 es $R_{AH}20^{\circ}\text{C} = 4,8772632[\Omega]$ y el valor corregido a 75°C se presenta en la ecuación (4.61).

$$R_{AH}75^{\circ}\text{C} = 5,9312886[\Omega] \quad (4.61)$$

Los datos del devanado shunt de la máquina corriente continua 2 en derivación, se muestran en la Tabla 4.46.

Tabla 4.46. Máquina corriente continua 2 - Resistencia bobina Campo.

Bobina Campo C-D			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{CD} (Ω)
1	5	0,008	625
2	10,2	0,016	637,5
3	14,9	0,024	620,83333
4	20,2	0,0325	621,53846
5	25	0,041	609,7561
6	29,9	0,048	622,91667
7	34,9	0,0564	618,79433
Promedio			622,33413

La resistencia del devanado shunt de la máquina de corriente continua 2 en promedio es $R_{CD}20^{\circ}\text{C} = 622,33413[\Omega]$ y el valor corregido a 75°C se presenta en la ecuación (4.62).

$$R_{CD}75^{\circ}\text{C} = 756,82677[\Omega] \quad (4.62)$$

Para finalizar con las máquinas en derivación en la Tabla 4.47 se presentan los datos de resistencia del devanado de compensación de la máquina de corriente continua 2.

Tabla 4.47. Máquina corriente continua 2 -Resistencia bobina Compensación.

B. Compensación E-F			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{EF} (Ω)
1	0,2	0,601	0,3327787
2	0,5	1,06	0,4716981
3	0,7	1,627	0,4302397
4	0,9	1,84	0,4891304
5	1,4	2,92	0,4794521
Promedio			0,4406598

La resistencia promedio de la bobina de compensación de la máquina de corriente continua 2 es $R_{EF}20^{\circ}\text{C} = 0,4406598[\Omega]$ y el valor corregido a 75°C se muestra en la ecuación (4.63).

$$R_{EF}75^{\circ}\text{C} = 0,535890798[\Omega] \quad (4.63)$$

Los valores de resistencia de armadura de la máquina de corriente continua 3 en excitación corresponden a los mostrados en la Tabla 4.48.

Tabla 4.48. Máquina corriente continua 3 - Resistencia bobina Armadura.

Bobina Armadura A-H			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{AH} (Ω)
1	0,5	0,09	5,55555556
2	1	0,197	5,07614213
3	1,6	0,3	5,33333333

4	2	0,392	5,10204082
5	2,5	0,484	5,16528926
6	3	0,6	5
7	3,7	0,72	5,13888889
8	4,1	0,82	5
9	4,6	0,872	5,27522936
10	5	0,95	5,26315789
Promedio			5,19096372

La resistencia promedio calculada en la bobina de armadura de la máquina de corriente continua 3 es $R_{AH}20^{\circ}C = 5,19096372[\Omega]$ y el valor corregido de la resistencia calculada a $75^{\circ}C$ se presenta en la ecuación (4.64).

$$R_{AH}75^{\circ}C = 6,31278299[\Omega] \quad (4.64)$$

Los datos que se muestran en la Tabla 4.49 son valores de resistencias calculadas en la bobina de campo de la máquina de corriente continua 3.

Tabla 4.49. Máquina corriente continua 3 - Resistencia bobina Campo.

Bobina Campo E-F			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{EF} (Ω)
1	0,6	0,284	2,11267606
2	1	0,448	2,23214286
3	1,4	0,641	2,18408736
4	1,9	0,868	2,18894009
5	2,3	1,065	2,15962441
6	3	1,42	2,11267606
7	3,4	1,624	2,09359606
8	4,1	1,94	2,11340206
9	5	2,365	2,1141649
10	6,1	2,924	2,08618331
Promedio			2,13974932

La resistencia promedio calculada y corregida a $75^{\circ}C$ de la bobina de campo de la máquina de corriente continua 3 se muestra en la ecuación (4.65).

$$R_{EF}75^{\circ}C = 2,602170588[\Omega] \quad (4.65)$$

Donde:

R_{EF} Resistencia Bobina de campo E-F

Para la máquina de corriente continua 4 se muestran los resultados obtenidos en el bobinado de armadura y en el de excitación serie en la Tabla 4.50.

Tabla 4.50. Máquina corriente continua 4 - Resistencia bobina Armadura.

Bobina Armadura A-H			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{AH} (Ω)
1	0,5	0,06	8,33333333
2	1	0,129	7,75193798
3	1,5	0,191	7,85340314
4	2	0,268	7,46268657
5	2,5	0,331	7,55287009
6	3	0,41	7,31707317
7	3,5	0,482	7,26141079
8	3,9	0,542	7,19557196
9	4,5	0,645	6,97674419
10	5	0,728	6,86813187
Promedio			7,45731631

La resistencia calculada promedio es $R_{AH20^{\circ}C} = 7,45731631[\Omega]$ y el valor corregido a $75^{\circ}C$ se muestra en la ecuación (4.66).

$$R_{AH75^{\circ}C} = 9,068917084[\Omega] \quad (4.66)$$

Los valores obtenidos en la bobina de excitación en serie de la máquina de corriente continua 4 se muestran en la Tabla 4.51.

Tabla 4.51. Máquina corriente continua 4 - Resistencia bobinado en serie.

Bobina Campo E-F			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{EF} (Ω)
1	0,6	0,281	2,13523132
2	1	0,46	2,17391304
3	1,6	0,72	2,22222222
4	1,9	0,882	2,15419501
5	2,5	1,14	2,19298246
6	2,9	1,345	2,15613383
7	3,5	1,58	2,21518987
8	3,8	1,759	2,16031836
9	4,5	2,1	2,14285714
10	5,1	2,38	2,14285714
Promedio			2,16959004

La resistencia calculada promedio en la máquina de corriente continua 4 es $R_{EF20^{\circ}C} = 2,16959004[\Omega]$ y el valor corregido se muestra en la ecuación (4.67).

$$R_{EF75^{\circ}C} = 2,638460186[\Omega] \quad (4.67)$$

En la Tabla 4.52 se muestran datos de las resistencias de armadura calculadas para la máquina de corriente continua 5 (máquina híbrida).

Tabla 4.52. Máquina híbrida - Resistencia bobina Armadura.

Bobina Armadura A-H			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{AH} (Ω)
1	0,27	0,18	1,5
2	0,362	0,34	1,06470588
3	0,5	0,445	1,12359551
4	1	0,7	1,42857143
5	1,5	1,03	1,45631068
6	2,1	1,48	1,41891892
7	2,5	1,78	1,40449438
8	3	2,14	1,40186916
9	3,5	2,48	1,41129032
10	4	2,88	1,38888889
Promedio			1,35986452

La resistencia promedio calculada es $R_{AH}20^{\circ}C = 1,35986452[\Omega]$ y su valor corregido se muestra en la ecuación (4.68).

$$R_{AH}75^{\circ}C = 1,653744868[\Omega] \quad (4.68)$$

En la Tabla 4.53 se muestran los valores obtenidos de la máquina de corriente continua (máquina híbrida) en excitación shunt.

Tabla 4.53. Máquina de corriente continua (híbrida) - Resistencia devanado shunt.

Bobina Campo C-D			
#datos	Vcc (V)	Icc (A)	R_{CD} (Ω)
1	0,57	0,004	142,5
2	1,1	0,0075	146,666667
3	1,5	0,01	150
4	2	0,0142	140,84507
5	2,5	0,0175	142,857143
6	3	0,021	142,857143
7	3,5	0,025	140
8	4	0,028	142,857143
9	4,5	0,0318	141,509434
10	5	0,0352	142,045455
Promedio			143,213805

La resistencia corregida a temperatura específica (mediante la resistencia calculada promedio de la Tabla 4.53 se expone en la ecuación (4.69).

$$R_{CD}75^{\circ}C = 173,903733[\Omega] \quad (4.69)$$

Los datos de la Tabla 4.54 muestran datos de la resistencia de la bobina de compensación y se obtienen mediante la prueba voltímetro-amperímetro aplicada de la máquina híbrida.

Tabla 4.54. Máquina híbrida. - Resistencia bobina de Compensación.

B. Compensación E-F			
#datos	Vcc (V)	Icc(A)	R_{EF} (Ω)
1	0,2	0,8	0,25
2	0,3	1,24	0,24193548
3	0,4	1,65	0,24242424
4	0,5	2,16	0,23148148
5	0,6	2,5	0,24
6	0,7	3	0,23333333
Promedio			0,23986242

El valor de la resistencia de compensación calculada promedio de la máquina de corriente continua híbrida. a 75°C se muestra en la ecuación (4.70).

$$R_{EF75^{\circ}C} = 0,2916990923[\Omega] \quad (4.70)$$

4.6.2 PRUEBA SIN CARGA

El objetivo de la prueba en vacío es obtener la curva de magnetización, para esto se coloca resistencias en serie para regular el voltaje generado, en la Figura 4.79 se muestra la forma de conexión, misma que necesita aplicarse a todos los generadores de corriente continua con sus respectivas precauciones y protecciones, evitando así posibles daños en los aparatos de medición y principalmente al personal que maniobre el circuito.



Figura 4.79. Conexión de generadores CC para obtención de prueba en vacío.

4.6.2.1 Curva de magnetización

El objetivo es poder determinar las diferentes curvas de magnetización con los datos obtenidos de la prueba en vacío de las máquinas de corriente continua.

La Figura 4.80 corresponde a la curva de magnetización de la máquina de corriente continua 1 obtenida mediante los datos presentes en la Tabla 4.55.

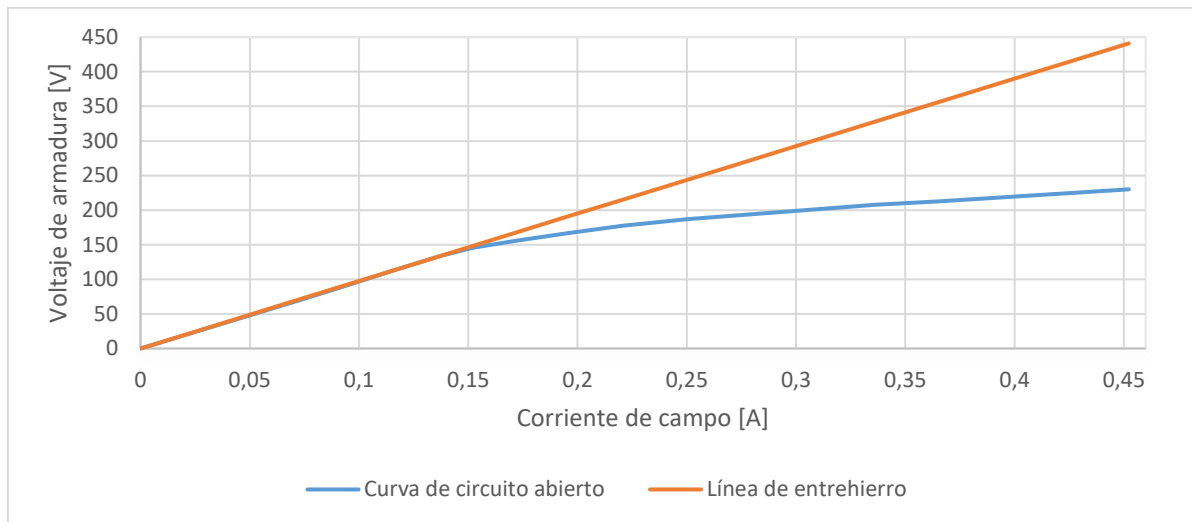


Figura 4.80. Curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 1.

Los datos de la Tabla 4.55 corresponden a la máquina de corriente continua 1.

Tabla 4.55. Datos curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 1.

Medición	Va1 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0		0	0,000
1	7,1	0	0,0073	7,1000
2	72	0,068	0,0753	73,3870
3	92,2	0,088	0,0953	92,8832
4	113,2	0,109	0,1163	113,3542
5	134,8	0,131	0,1383	134,8000
6	145,5	0,145	0,1523	148,4473
7	156,1	0,165	0,1723	167,9435
8	166,6	0,188	0,1953	190,3641
9	177,5	0,214	0,2213	215,7092
10	187,1	0,243	0,2503	243,9786
11	207,5	0,329	0,3363	327,8122
12	212,8	0,359	0,3663	357,0565
13	220	0,396	0,4033	393,1244
14	230	0,445	0,4523	440,8901

La Figura 4.81 corresponde a la curva de magnetización de la máquina 2 de corriente continua obtenida mediante los datos presentes en la Tabla 4.56.

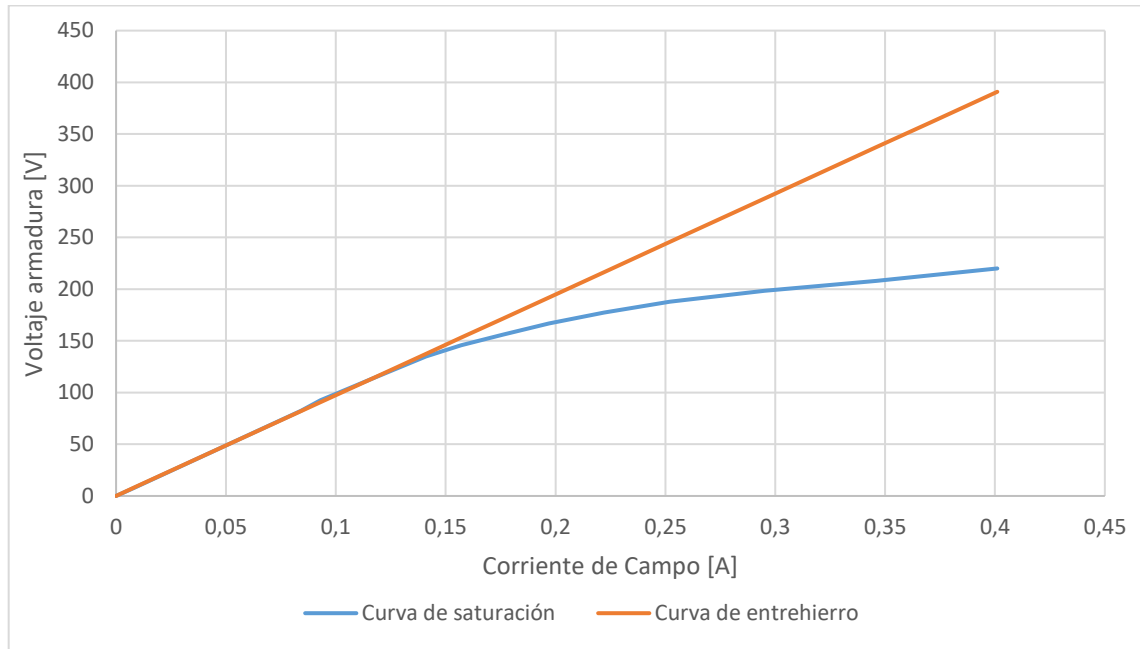


Figura 4.81. Curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 2.

Los datos de la Tabla 4.56 corresponden a la máquina de corriente continua 2.

Tabla 4.56. Datos curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 2.

Medición	Va1 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0,0		0	0
1	7,7	0	0,0081	7,8464
2	82,2	0,076	0,0841	81,9137
3	92,6	0,085	0,0931	90,6849
4	113,1	0,108	0,1161	113,1000
5	134,9	0,133	0,1411	137,4643
6	145,7	0,149	0,1571	153,0574
7	156,1	0,168	0,1761	171,5742
8	166,9	0,189	0,1971	192,0402
9	177,2	0,214	0,2221	216,4045
10	187,8	0,244	0,2521	245,6416
11	198,5	0,287	0,2951	287,5482
12	207,9	0,338	0,3461	337,2513
13	213,2	0,362	0,3701	360,6410
14	220,0	0,393	0,4011	390,8526

La Figura 4.82 corresponde a la curva de magnetización de la máquina 3 de corriente continua obtenida mediante los datos presentes en la Tabla 4.57.

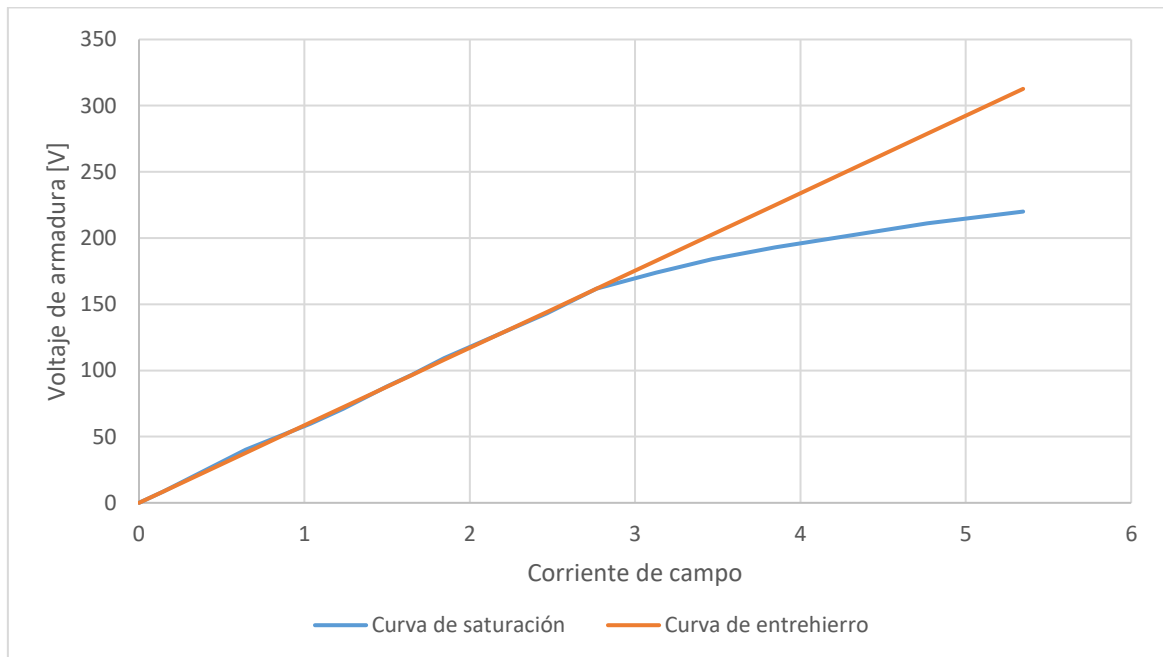


Figura 4.82. Curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 3.

Los datos de la Tabla 4.57 corresponden a la máquina de corriente continua 3.

Tabla 4.57. Datos curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 3.

Medición	Va1 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0		0	0
1	8,5	0	0,1465	8,5686
2	40,2	0,5	0,6465	37,8112
3	59,8	0,89	1,0365	60,6205
4	71,2	1,089	1,2355	72,2590
5	87,7	1,35	1,4965	87,5237
6	96,6	1,5	1,6465	96,2965
7	109,3	1,7	1,8465	107,9935
8	143,1	2,32	2,4665	144,2544
9	161,8	2,62	2,7665	161,8000
10	174	2,98	3,1265	182,8547
11	184	3,32	3,4665	202,7397
12	193	3,7	3,8465	224,9641
13	211	4,62	4,7665	278,7706
14	220	5,2	5,3465	312,6920

La Figura 4.83 corresponde a la curva de magnetización de la máquina 4 de corriente continua obtenida mediante los datos presentes en la Tabla 4.58.

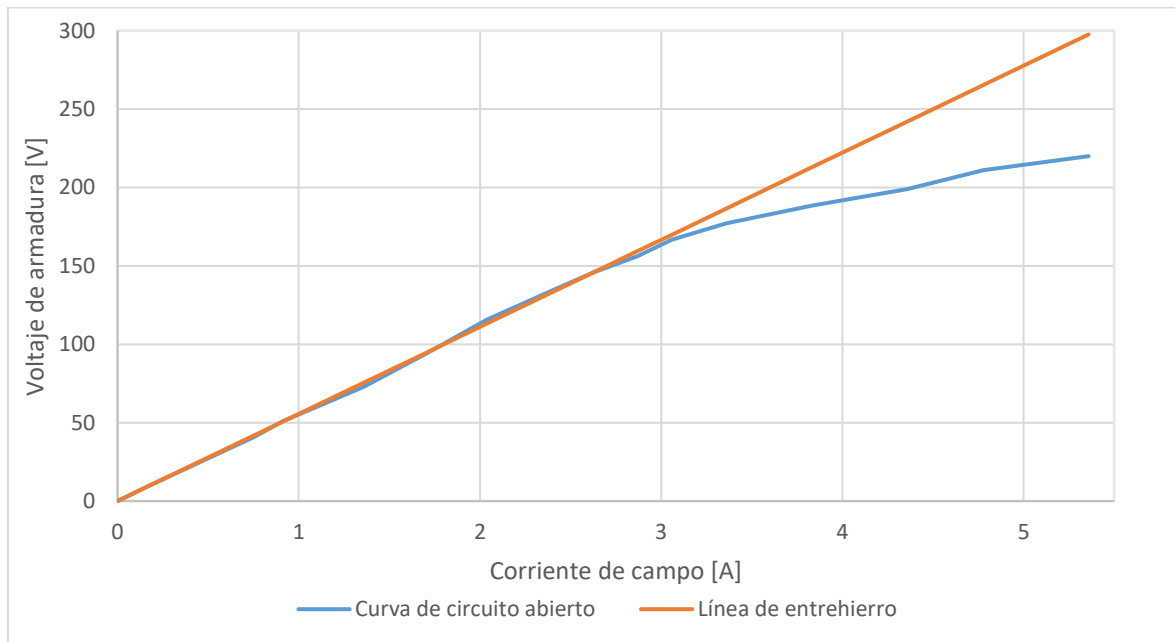


Figura 4.83. Curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 4.

Los datos de la Tabla 4.58 corresponden a la máquina de corriente continua 4.

Tabla 4.58. Datos curva de circuito abierto, máquina de corriente continua 4.

Medición	Va1 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0		0	0
1	8,8	0	0,1584	8,8000
2	41,2	0,6	0,7584	42,1279
3	50,7	0,75	0,9084	50,4599
4	72,9	1,2	1,3584	75,4559
5	94,5	1,55	1,7084	94,8972
6	115,6	1,88	2,0384	113,2275
7	135,3	2,26	2,4184	134,3352
8	146	2,47	2,6284	146,0000
9	156,2	2,71	2,8684	159,3312
10	166,8	2,9	3,0584	169,8850
11	177,2	3,2	3,3584	186,5490
12	188,7	3,68	3,8384	213,2113
13	199	4,2	4,3584	242,0955
14	211	4,62	4,7784	265,4251
15	220	5,2	5,3584	297,6421

La Figura 4.84 corresponde a la curva de magnetización de la máquina híbrida de corriente continua obtenida mediante los datos presentes en la Tabla 4.59.

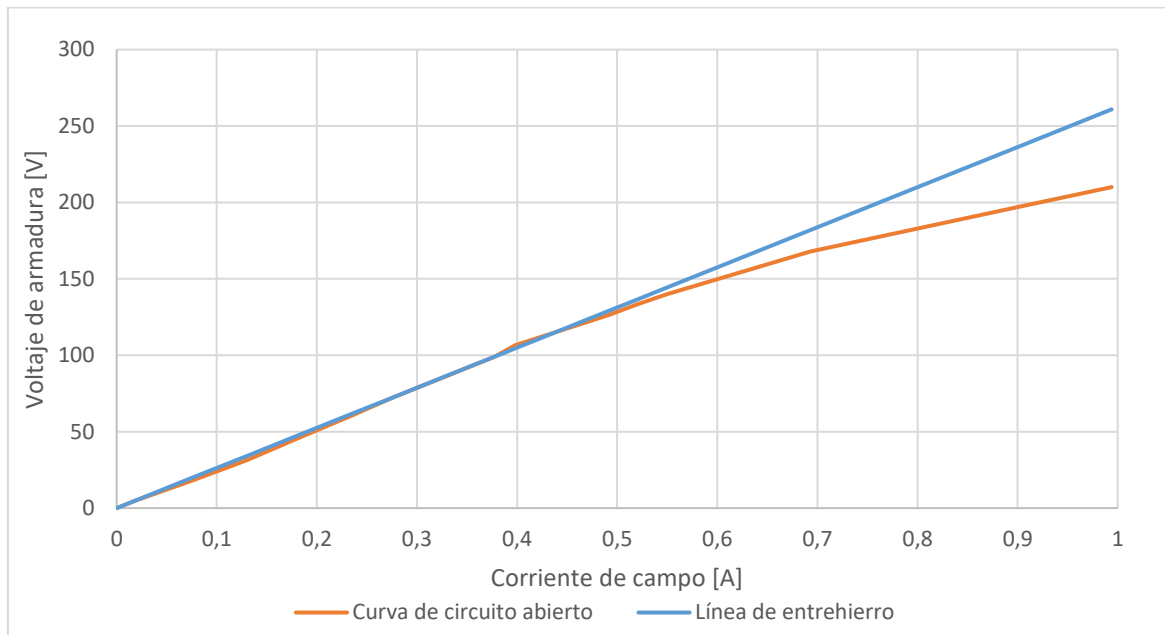


Figura 4.84. Curva de circuito abierto, máquina híbrida.

Los datos de la Tabla 4.59 corresponden a la máquina híbrida.

Tabla 4.59. Datos curva de circuito abierto, máquina híbrida.

Medición	Va1 (V)	If (A)	If Entrehierro (A)	V Entrehierro (V)
0	0		0	0
1	4,7	0	0,0179	4,7070
2	18,23	0,058	0,0759	19,9309
3	31,4	0,112	0,1299	34,1048
4	45,3	0,162	0,1799	47,2289
5	59,1	0,212	0,2299	60,3529
6	72,4	0,258	0,2759	72,4270
7	92,5	0,335	0,3529	92,6380
8	99,2	0,36	0,3779	99,2000
9	106,6	0,38	0,3979	104,4496
10	126,5	0,474	0,4919	129,1228
11	133,3	0,502	0,5199	136,4722
12	140,1	0,532	0,5499	144,3467
13	167,9	0,675	0,6929	181,8814
14	198	0,89	0,9079	238,3147
15	210	0,976	0,9939	260,8880

4.6.3 PRUEBA CON CARGA

Esta prueba se realiza con la finalidad de poder calcular la regulación de voltaje.

4.6.3.1 Regulación de voltaje.

La regulación de voltaje mide la robustez de la máquina en presencia de carga al variar el voltaje, se calcula en porcentaje mediante la ecuación (4.71).

$$\text{Regulación_voltaje} = \frac{V_{\text{sin_carga}} - V_{\text{con_carga}}}{V_{\text{con_carga}}} 100\% \quad (4.71)$$

En base a la prueba con carga se presentan los siguientes datos medidos para las distintas máquinas de corriente continua:

Para la máquina 1 de corriente continua los datos de la prueba con carga se presentan en la Tabla 4.60.

Tabla 4.60. Datos prueba con carga Máquina de corriente continua 1.

Máquina motriz Velocidad= 1800 (R.P.M.)	Máquina 1			
	Corriente de Campo	Voltaje generado	Corriente carga	Corriente Armadura
Pasos de carga	(A) If	(V) Vg	(A) Ic	(A) Ia
0	0,32	205	0	2,3
1	0,32	170,3	1,9	2,6
2	0,32	145,8	3,5	2,9
3	0,32	126,8	4,6	3,1

Para la máquina 2 de corriente continua los datos de la prueba con carga se presentan en la Tabla 4.61.

Tabla 4.61. Datos prueba con carga Máquina de corriente continua 2.

Máquina motriz Velocidad= 1800 (R.P.M.)	Máquina CC 2			
	Corriente de Campo	Voltaje generado	Corriente carga	Corriente Armadura
Pasos de carga	(A) If	(V) Vg	(A) Ic	(A) Ia
0	0,335	208,3	0	2,4
1	0,335	174,2	2	2,6
2	0,335	149,6	3,6	3
3	0,335	130,2	4,8	3,2

Para la máquina 3 de corriente continua los datos de la prueba con carga se presentan en la Tabla 4.62.

Tabla 4.62. Datos prueba con carga Máquina de corriente continua 3.

Máquina motriz Velocidad= 2300 (R.P.M.)	Máquina CC 3		Corriente carga	Corriente Armadura
	Corriente de Campo	Voltaje generado		
Pasos de carga	(A) If	(V) Vg	(A) Ic	(A) Ia
0	4,15	209	0	1,8
1	4,2	152,5	2,2	3,8
2	4,2	118,9	3,3	4,4
3	4,2	99	4	4,2
4	4,2	86,1	4,5	4,8

Para la máquina de corriente continua 4 los datos de la prueba con carga se presentan en la Tabla 4.63.

Tabla 4.63. Datos prueba con carga Máquina de corriente continua 4.

Máquina motriz Velocidad= 2300 (R.P.M.)	Máquina CC 4		Corriente carga	Corriente Armadura
	Corriente de Campo	Voltaje generado		
Pasos de carga	(A) If	(V) Vg	(A) Ic	(A) Ia
0	4	207,4	0	2,4
1	4	150	2,2	3,6
2	4	113,7	3,1	3
3	4	94,9	3,8	3,2
4	4	82,7	4,3	3,4

Para la máquina híbrida de corriente continua los datos de la prueba con carga se presentan en la Tabla 4.64.

Tabla 4.64. Datos prueba con carga Máquina híbrida.

Máquina motriz Velocidad= 1800 (R.P.M.)	Máquina híbrida		Corriente carga	Corriente Armadura
	Corriente de Campo	Voltaje generado		
Pasos de carga	(A) If	(V) Vg	(A) Ic	(A) Ia
0	0,976	210	0	2,4
1	0,976	192	2,4	2,6
2	0,965	178,5	4,4	3
3	0,976	166	6,1	3,2

En base a los datos obtenidos presentados en las tablas anteriores y mediante la aplicación de la ecuación (4.71), se presentan las diferentes regulaciones calculadas en la Tabla 4.65.

Tabla 4.65. Regulación de voltaje de generadores de corriente continua.

Pasos de carga	Regulación Máq. CC 1	Regulación Máq. CC 2	Regulación Máq. CC 3	Regulación Máq. CC 4	Regulación Máq. Híbrida
Regulación paso 1	19,5752009	19,5752009	37,0491803	38,2666667	9,375
Regulación paso 2	39,2379679	39,2379679	75,7779647	82,4098505	17,6470588
Regulación paso 3	59,984639	59,984639	111,111111	118,545838	26,5060241

Para el cálculo de la eficiencia de todos los generadores es necesaria la aplicación de la ecuación (2.18) presente en el capítulo 2.4.3, las pérdidas calculadas por el método de separación de pérdidas corresponden a la Tabla 4.66.

Tabla 4.66. Pérdidas encontradas por el método de separación.

Pérdidas	Máq. CC 1	Máq. CC 2	Máq. CC 3	Máq. CC 4	Máq. CC 5
Armadura (I^2)(R)	64,7431489	64,6217865	68,7781929	98,8064582	195,820491
Bob. Serie (I^2)(R)	5,63402009	5,83856609	28,3508226	28,7462002	34,5401885
Contacto escobillas	2	2	2	2	2
Campo paralelo (I^2)(R)	61,0185349	69,8414477	0	0	0
Pérdidas totales	133,395704	142,3018	99,1290155	129,552658	232,360679

En base a las pérdidas presentes en la Tabla 4.66 se obtiene la eficiencia de las máquinas de corriente continua, mismas que se exponen en la Tabla 4.67.

Tabla 4.67. Eficiencia de las máquinas CC.

Máquina	Eficiencia
CC 1	85,7085582
CC 2	84,89849
CC 3	88,9749954
CC 4	86,0629027
CC 5 (híbrida)	77,4922966

Finalizadas las pruebas en todas las máquinas eléctricas presentes en los módulos móviles, como siguiente paso se crean y se actualizan hojas guías del Laboratorio de Máquinas Eléctricas en las cuales se incluyen las máquinas recuperadas.

Las hojas guías se adjuntarán en el ANEXO B.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El presente trabajo se realiza acorde a las normas internacionales vigentes IEEE Std 112, IEEE Std 113, IEEE Std 115, IEEE Std 43 , para las máquinas situadas en los dos módulos móviles, tanto para máquinas de corriente continua y máquinas de corriente alterna del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, luego de someterlas a su respectivo mantenimiento y obtener los resultados mediante las pruebas realizadas, las máquinas responden de manera aceptable y son aptas para pruebas y estudios.
- La respuesta de las máquinas sincrónicas es rápida debido a su característica de poseer una velocidad constante, por tal razón en la prueba de rechazo de carga y prueba de deslizamiento es imposible detectar un cambio considerable de frecuencia y voltaje, es así, que para la prueba de rechazo de carga se realizó la implementación de un medidor de frecuencia en función del tiempo, con la finalidad de obtener resultados precisos.
- La acumulación de polvo y suciedad son los principales causantes de sobrecalentamiento y mal funcionamiento, ya que, impiden la correcta ventilación de los bobinados en cualquier tipo de máquina, otro factor a considerar es la humedad que afecta el nivel de resistencia del aislamiento, siendo importante realizar un secado correcto, especialmente después de realizar un proceso de barnizado, ya que, la presencia de humedad después de un secado incorrecto ocasiona el fenómeno de condensación afectando directamente el aislamiento respecto a tierra y por ende el mal funcionamiento.
- El arranque de las máquinas sincrónicas se realiza bajo el método directo con by-pass, debido a que con la ayuda de un by-pass se tiene un mayor control y protección de la máquina en funcionamiento, es decir, la máquina arranca con el método directo sin protecciones, para después accionar el by-pass y pasar a funcionar bajo la protección brindada en el panel de control.
- Todas las medidas registradas de las pruebas eléctricas presentan problemas de precisión, estos son causados por el tiempo de uso de los instrumentos de medida

o por el tiempo de vida de las máquinas, razón por la cual se han realizado dos a tres pruebas en cada máquina para asegurar que los resultados no varíen.

- La actualización de hojas guías se enfocan en el uso de la máquina sincrónica, máquina de inducción y máquina CC, para el caso específico de la guía para máquinas sincrónicas, durante la prueba de circuito abierto el generador debe girar a velocidad nominal, esta premisa se logra únicamente acoplado un motor síncrono como máquina motriz, de esta manera se puede realizar la prueba en cualquiera de las dos máquinas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Al momento de registrar datos de resistencia bien sea de armadura, campo o compensación en las máquinas CC, es necesario hacerlo antes que pudiera existir algún cambio significativo en la temperatura de bobinados y provoque el registro de valores alterados.
- Antes de poner en funcionamiento las máquinas, se debe chequear el estado del cableado, comprobar que no exista contactos derivados al chasis, verificar la continuidad en cada bobinado, además durante el arranque se debe utilizar protecciones eléctricas.
- Para registrar los oscilogramas de corriente se recomienda utilizar un reóstato de potencia seteado en un valor mínimo de resistencia (1Ω), de esta manera se procesa los valores de voltaje obtenidos mediante la ley de ohm para determinar los valores de corriente.
- Durante la prueba de recuperación de voltaje, se recomienda seleccionar un valor de voltaje entre el 50% o 60% del voltaje nominal, este valore debe encontrarse en la parte lineal de la curva de saturación (por debajo del codo de la curva de saturación) para que evitar registrar valores erróneos.
- Durante el funcionamiento como motor de las máquinas sincrónicas se recomienda aplicar un voltaje CC por debajo de 140 [V] al devanado de campo, ya que si se alimentamos con un voltaje de 140 [V] o mayor la máquina tiene problemas durante el arranque.
- Se recomienda realizar un monitoreo periódico al nivel de aislamiento de cada una de las máquinas con el objetivo de dar un seguimiento durante su vida útil o para identificar un descenso brusco de su estado, lo cual indicaría fallas o problemas en las máquinas.
- Verificar la presión que ejercen las escobillas sobre su colector, de esto dependerá el correcto funcionamiento y el desgaste de las escobillas, en general para las máquinas CC la presión óptima se ve reflejada cuando existe un mínimo desgaste de las escobillas.
- Para realizar la prueba de circuito abierto se recomienda hacer uso de varios reóstatos conectados en serie al devanado de campo, con el fin de controlar el voltaje generado en armadura, antes de energizar el devanado de campo se debe

verificar la presencia del voltaje producido por la magnetización remanente, esta magnetización se produce por la interacción entre el estator y el movimiento del rotor, el rotor está acoplado a través de una máquina motriz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "Práctica recomendada de IEEE para probar la resistencia de aislamiento de maquinaria eléctrica - Redline", en IEEE Std 43-2013 (Revisión de IEEE Std 43-2000) - Redline , vol., No., Págs. 1-75, 6 de marzo de 2014."
- [2] "DM Saban, DA Gonzalez-Lopez y C. Bailey, 'Más allá de IEEE Std 115 y API 546: Procedimientos de prueba para máquinas síncronas de imán permanente multimegavatios de alta velocidad', en IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 46, no. 5, págs. 1769-1777, septiembre-octubre. 2010, doi: 10.1109 / TIA.2010.2057399."
- [3] "Procedimiento de prueba estándar IEEE para motores y generadores de inducción polifásicos", en IEEE Std 112-2004 (Revisión de IEEE Std 112-1996) , vol., No., Págs. 1-83, 4 de noviembre de 2004, doi: 10.1109 / IEEESTD.2004.95394."
- [4] "Guía IEEE Std 113: Procedimientos de prueba para máquinas de corriente continua."
- [5] "Sincronoscopio virtual para un sistema multimáquina del laboratorio de sistemas eléctricos de potencia Valenzuela Santillán, Alex David - Quito EPN 2013 - Quito : EPN, 2013. - 98 p.: il.; + CD 5255."
- [6] 2008 M. A. Electrotecnia para Ingenieros no especialistas Universidad de Cantabria (España) Rodríguez Pozueta, .
- [7] "Métodos para dimensionar la capacitancia de un generador de inducción auto-excitado, Adams Davis - Pereira 2017."
- [8] "Estimación de parámetros de la máquina sincrónica utilizando Matlab-simulink, Byron Chiguano-QUITO 2018."
- [9] "Pruebas de máquinas rotativas de corriente alterna, Granja Ruales, Iván Andrés - Quito EPN 1995 - Quito : EPN,. + T153.pdf."
- [10] "Instalación de un sistema de protecciones eléctricas de una máquina síncrona de 4900 kVA en ETSII, Esteban Juan-Madrid 2017."
- [11] "Máquinas de corriente continua, Rodríguez Miguel-2017 España."
- [12] "Pernia, M. A. Conceptos Básicos de Máquinas de corriente continua, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Núcleo de Electricidad Unidad Curricular Tecnología Eléctrica, Sep. 2011."
- [13] "Máquinas de corriente continua, Rodríguez Miguel-2017 España."
- [14] "Máquinas de CD y de inducción, López García, Irvin, Canseco García, Hiram, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Dpeartamento de Energía, Área de Ingeniería Energética y Electromagnética."
- [15] "Guía de la medición de aislamiento, Chauvin Arnoux Ibérica S.A. España, 2010 - Ed. 01."
- [16] "Plan de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo de los bancos de prueba (Motor - Generador DC - Motores Monofásicos) del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, Gual Pedrozo, Carlos Enrique, Mora Montiel, Carlos Alberto, Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias 2002."
- [17] "Más Vale Prevenir..."La guía Completa para Pruebas de Aislamiento Eléctrico MEGGER, tercera edición, AVO INTERNATIONAL , 4561 S. WESTMORELAND RD. pag 6, DALLAS, TEXAS USA, 1992."
- [18] "IEEE Std 118-1978 Código de pruebas estándar para medición de resistencia", en IEEE Std 118-1978, vol., No., Págs. 1-35, 8 de Septiembre de 1977."
- [19] "Estimación de parámetros de un motor de inducción a partir de mediciones en el arranque directo de corrientes transitorias del estator utilizando la herramienta de estimación de parámetros de Matlab/simulink, Simba Luna, Katherine Graciela - QUITO EPN 2018 - Quito : EPN - 18 + CD-9326.pdf p. 72 de 148."
- [20] "Medición de parámetros de las máquinas sincrónica de imanes permanentes y de inducción doblemente alimentada del emulador de generación eólica del departamento de energía eléctrica, Motoche Diana-QUITO 2019 - Quito : EPN - 18 + CD 9688.pdf."

- [21] "Pruebas en máquinas de corriente continua, análisis y comparación con diferentes normas, Zeas García, Serafín Euclides, - Quito EPN 2003 - Quito: EPN,. + T2095.pdf."
- [22] "Control de la potencia reactiva de generadores sincrónicos en paralelo, Sánchez Héctor, México, D.F. 2011."
- [23] "Medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico, Villacreses Schubert, Quito: EPN 2012."
- [24] "NEMA MG-1: Motors and Generators," p. 671."

ANEXOS

ANEXO A. Resultados obtenidos de las pruebas de aislamiento de las máquinas sincrónicas y máquinas CC

ANEXO B. Hojas guía actualizadas para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

ANEXO A.

Valores registrados de las pruebas de aislamiento en cada una de las máquinas de los dos paneles.

Tabla A.1. Prueba de aislamiento Rotor máquina sincrónica 1 – eje y anillos rozantes.

Prueba realizada	Rotor		Entre	Eje - Anillos rozantes				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
U	434	544	1,253	1100	427	700	1,639	1099
V	330	422	1,279	1099	327	532	1,627	1100
W	197	249	1,264	1099	207	316	1,527	1100
X	443	550	1,242	1099	421	700	1,663	1100
Y	316	412	1,304	1099	322	530	1,646	1100
Z	194	249	1,284	1099	203	315	1,552	1099
DAR	1,271			1,609				

En la Figura A.1 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.2. de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

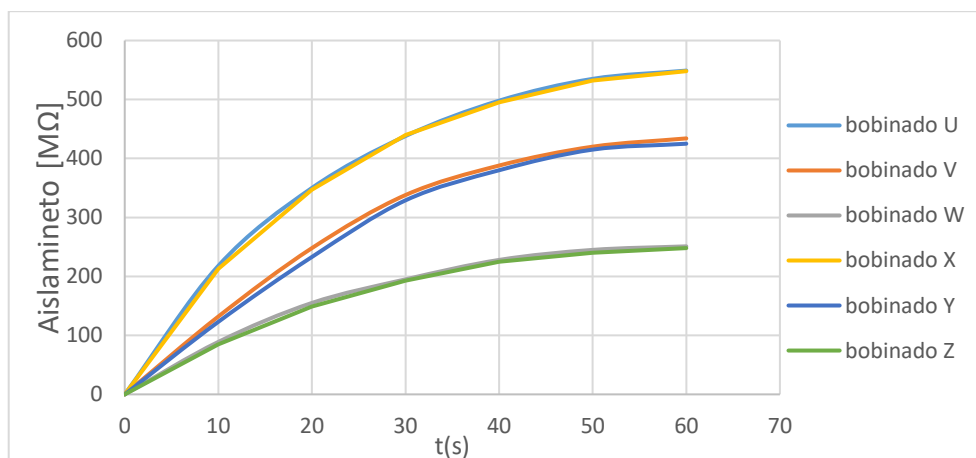


Figura A.1. Aislamiento máquina Sincrónica 1 antes del mantenimiento en rotor.

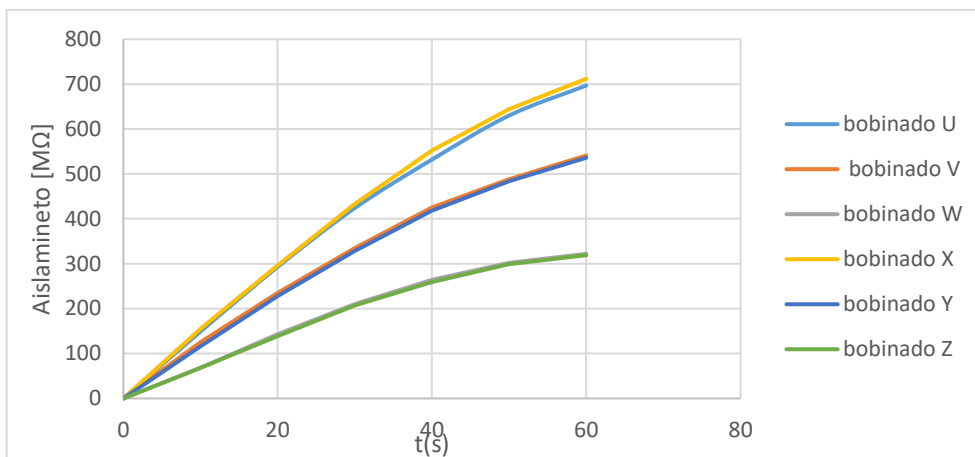


Figura A.2. Aislamiento máquina Sincrónica 1 después del mantenimiento en rotor.

Tabla A.2. Aislamiento Rotor máquina sincrónica 1 – Devanado y Carcasa

Prueba realizada	Estator		Entre	Devanado y carcasa				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)
	t = 30 (s)	t = 60 (s)			t = 30 (s)	t = 60 (s)		
1	168	213	1,268	1100	189	269	1,423	1099
2	166	211	1,271	1100	178	263	1,478	1100
3	158	198	1,253	1100	171	256	1,497	1099
4	155	195	1,258	1099	169	254	1,503	1099
DAR	1,263				1,475			

En la Figura A.3 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.4 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

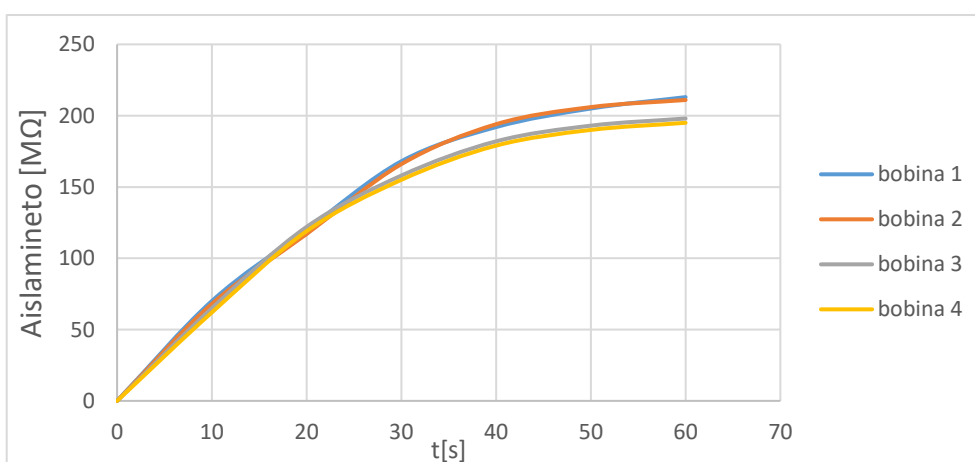


Figura A.3. Aislamiento máquina Sincrónica 1 antes del mantenimiento en estator.

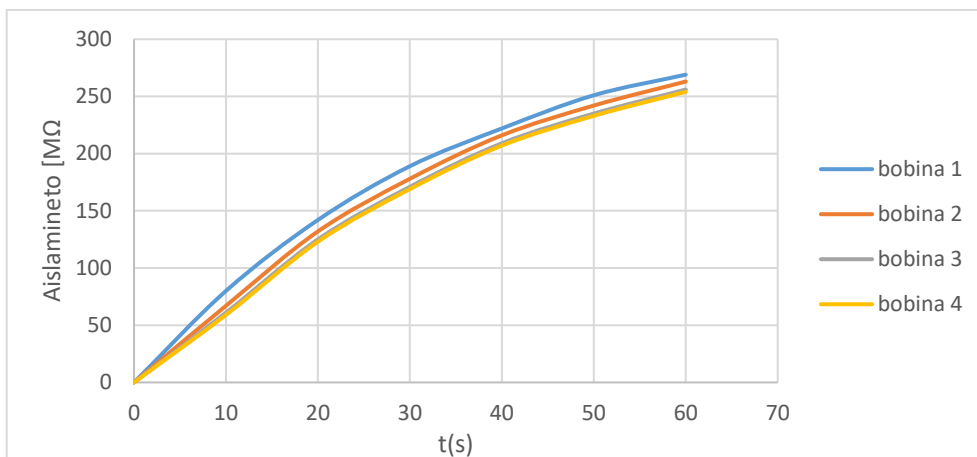


Figura A.4. Aislamiento máquina Sincrónica 1 después del mantenimiento en estator.

Tabla A.3. Prueba de aislamiento Rotor máquina sincrónica 2 – eje y anillos rozantes.

Prueba realizada	Rotor		Entre	Eje - Anillos rozantes				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
1	342	444	1,298	1099	465	748	1,609	1099
2	289	375	1,298	1099	395	640	1,620	1099
3	175	211	1,206	1099	244	346	1,418	1099
4	355	448	1,262	1100	497	765	1,539	1099
5	311	376	1,209	1099	398	644	1,618	1100
6	160	212	1,325	1099	241	346	1,436	1099
DAR	1,266			1,539				

En la Figura A.5 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.6 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

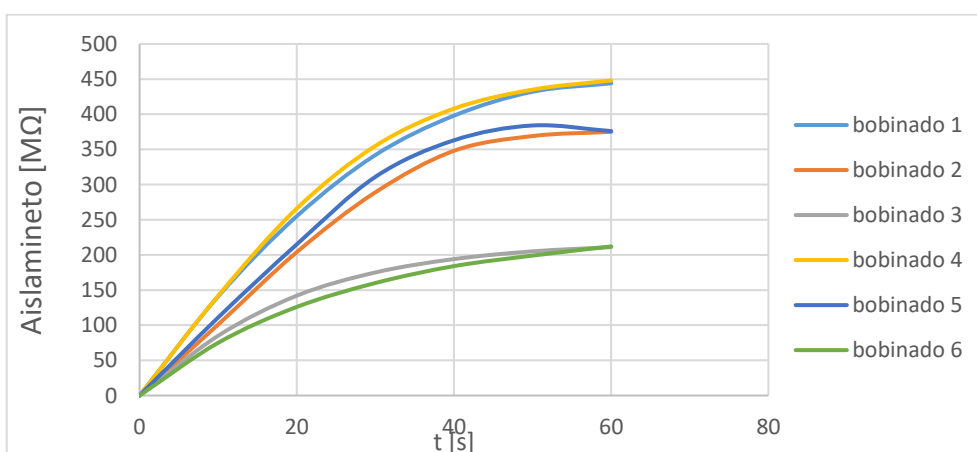


Figura A.5. Aislamiento máquina Sincrónica 2 antes del mantenimiento en rotor.

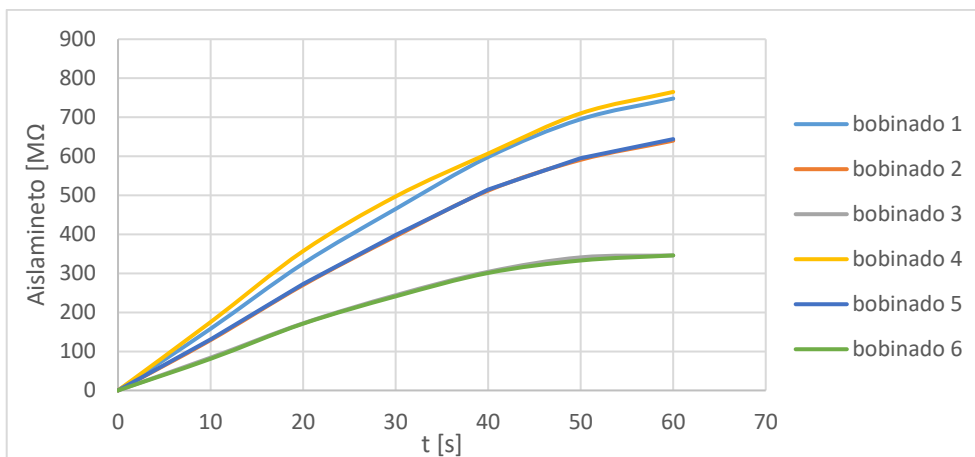


Figura A.6. Aislamiento máquina Sincrónica 2 después del mantenimiento en rotor.

Tabla A.4. Prueba de aislamiento Estator máquina sincrónica 2 – Devanado y anillos.

Prueba realizada	Estator		Entre	Devanado - Anillos rozantes				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
1	220	267	1,214	1100	359	550	1,532	1099
2	216	262	1,213	1100	365	554	1,518	1100
3	223	270	1,211	1100	371	555	1,496	1099
4	221	268	1,213		369	553	1,499	
DAR	1,212507835			1,511110876				

En la Figura A.7 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.8 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

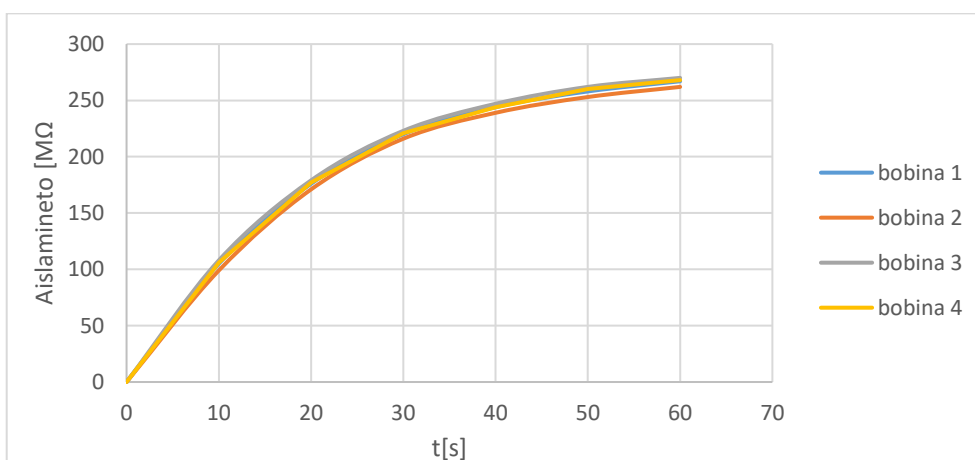


Figura A.7. Aislamiento máquina Sincrónica 2 antes del mantenimiento en estator.

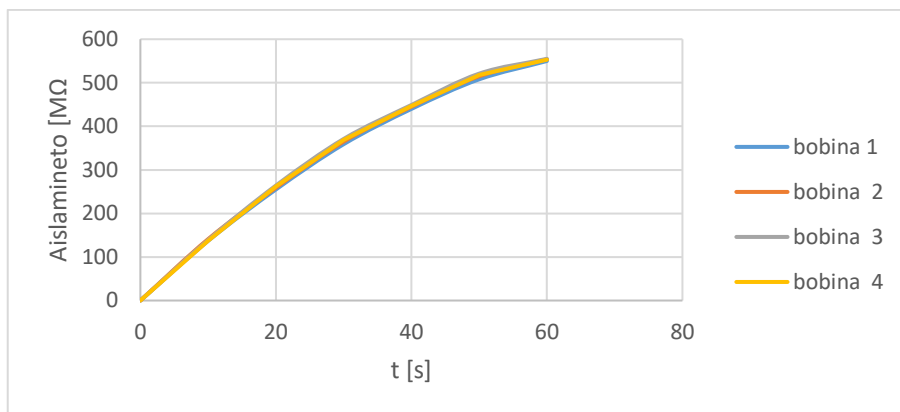


Figura A.8. Aislamiento máquina Sincrónica 2 después del mantenimiento en estator.

Tabla A.5. Aislamiento máquina Sincrónica 2 después del mantenimiento en estator.

Prueba realizada	Rotor		Entre	Eje - Anillos rozantes				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (MΩ)		DAR	V aplicado (V)
	t = 30 (s)	t = 60 (s)			t = 30 (s)	t = 60 (s)		
1	342	417	1,219	1100	522	715	1,369	1099
2	348	423	1,216	1100	515	736	1,429	1100
3	342	437	1,278	1100	529	751	1,419	1099
4	346	441	1,275	1100	534	758	1,419	1099
DAR	1,247			1,409				

En la Figura A.9 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.10 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

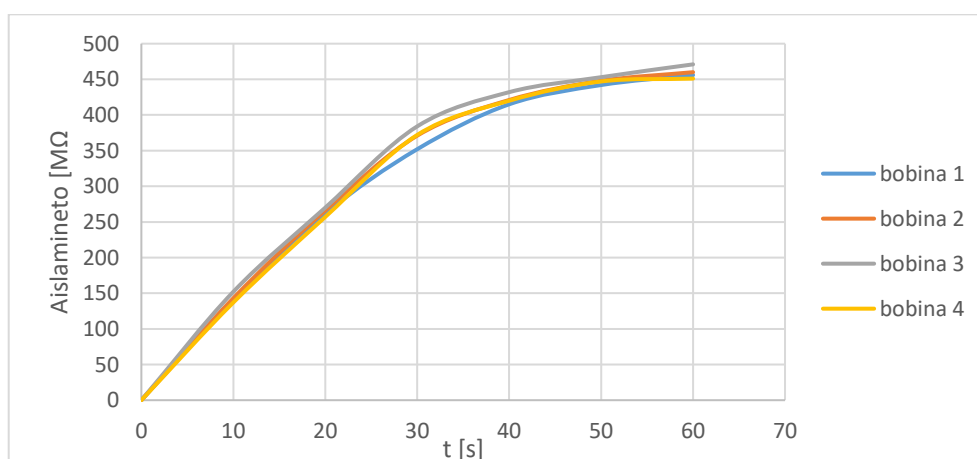


Figura A.9. Aislamiento máquina híbrida antes del mantenimiento en rotor.

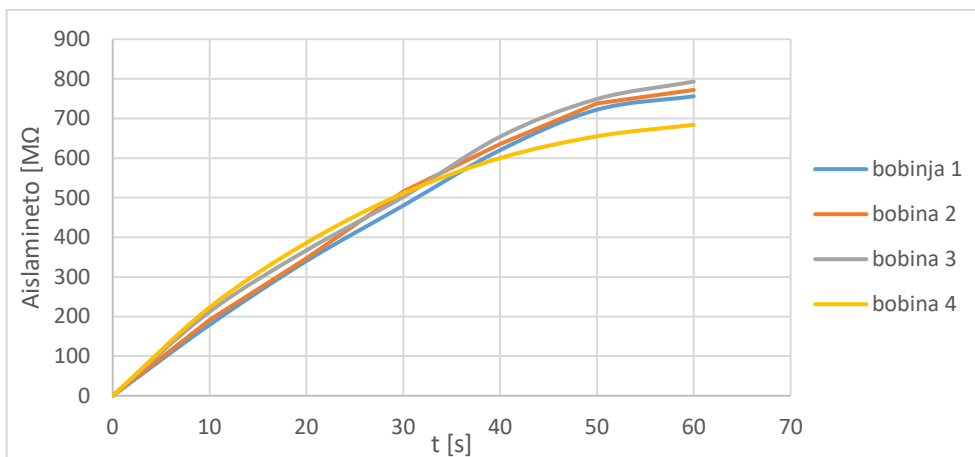


Figura A.10. Aislamiento máquina híbrida después del mantenimiento en rotor.

Tabla A.6. Prueba de aislamiento Rotor máquina CC1 entre colector-eje y núcleo.

Prueba realizada en	Rotor		Entre	Colector-Núcleo-Eje				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
Colector - Núcleo	2,55	3	1,176	1100	2	3,15	1,575	1099
Colector - Eje	2,44	3,58	1,467	1100	2,7	4,08	1,511	1100
DAR	1,322			1,543				

En la Figura A.11 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.12 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

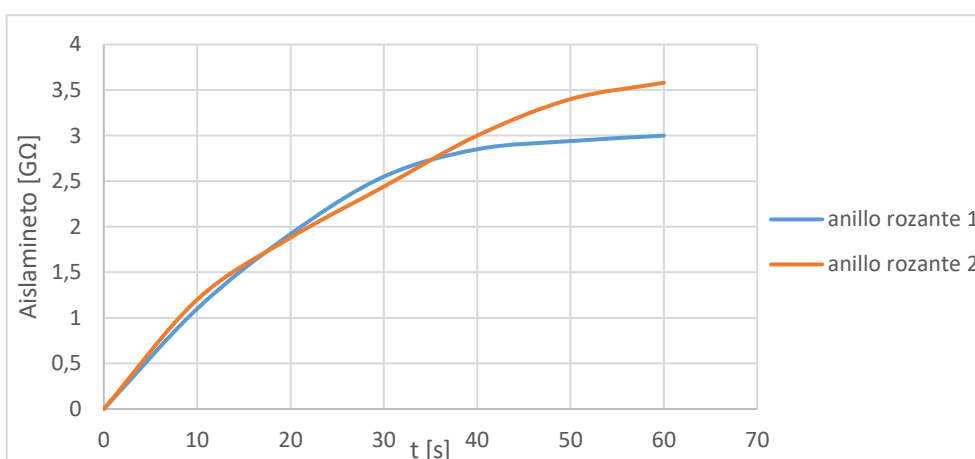


Figura A.11. Aislamiento máquina CC1 antes del mantenimiento en rotor.

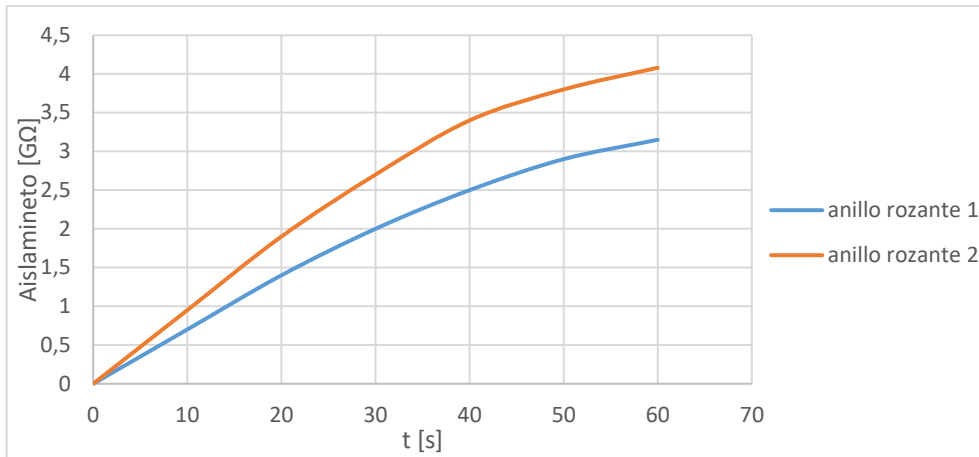


Figura A.12. Aislamiento máquina CC1 después del mantenimiento en rotor.

Tabla A.7. Prueba de aislamiento Rotor máquina CC2 entre colector-eje y núcleo.

Prueba realizada	Rotor		Entre	Colector-Núcleo-Eje				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
Colector - Núcleo	3,48	4,45	1,279	1100	3,09	4,75	1,537	1099
Colector - Eje	2,85	3,41	1,197	1099	2,71	4,14	1,528	1099
DAR	1,238			1,532				

En la Figura A.13 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.14 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

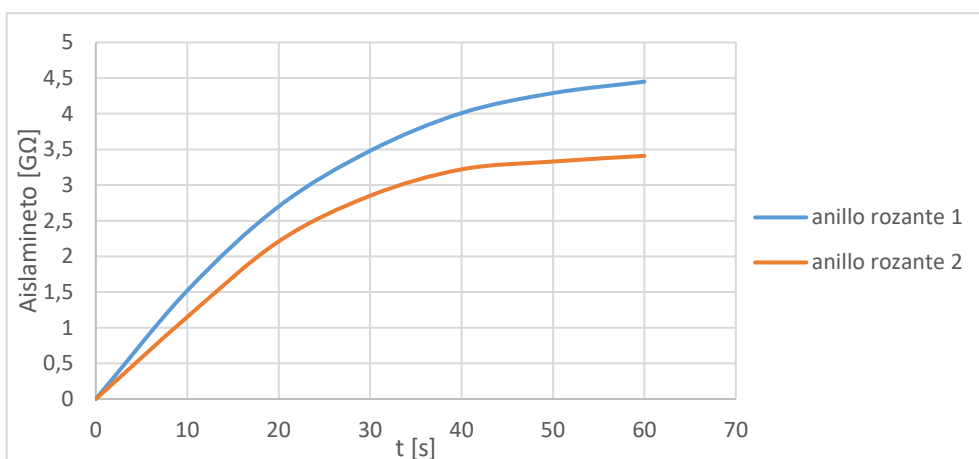


Figura A.13. Aislamiento máquina CC2 antes del mantenimiento en rotor.

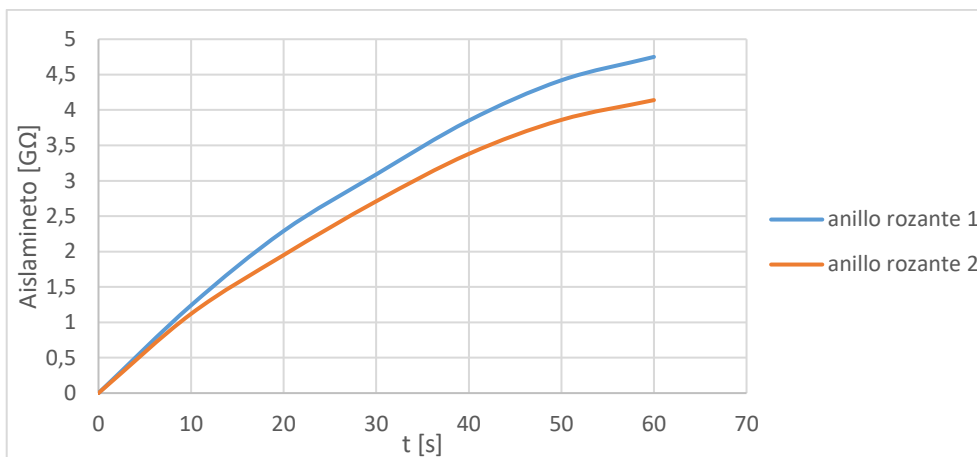


Figura A.14. Aislamiento máquina CC2 después del mantenimiento en rotor.

Tabla A.8. Prueba de aislamiento Rotor máquina CC3 entre colector-eje y núcleo.

Prueba realizada	Rotor		Entre	Colector-Núcleo-Eje				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
Colector - Núcleo	5,88	7,17	1,219	1100	3,01	4,05	1,345	1099
Colector - Eje	2,25	2,71	1,204	1100	2,55	3,15	1,236	1100
DAR	1,212			1,290				

En la Figura A.15 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.16 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

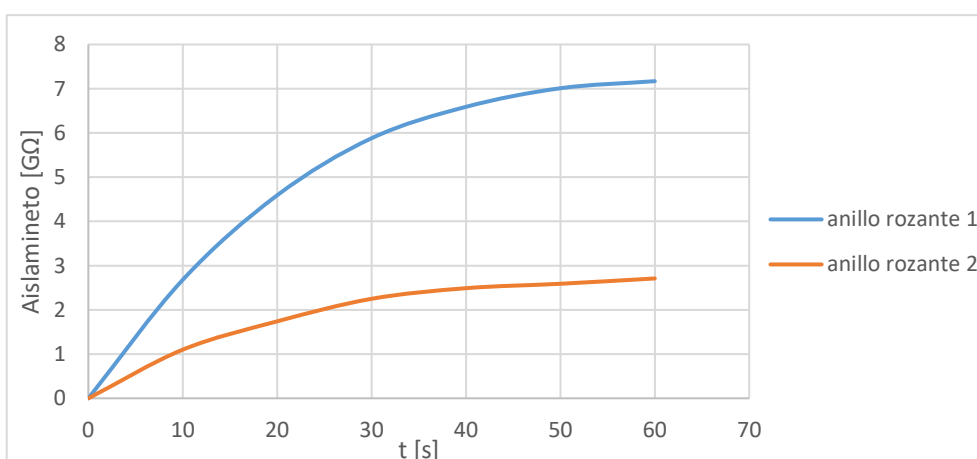


Figura A.15. Aislamiento máquina CC3 antes del mantenimiento en rotor.

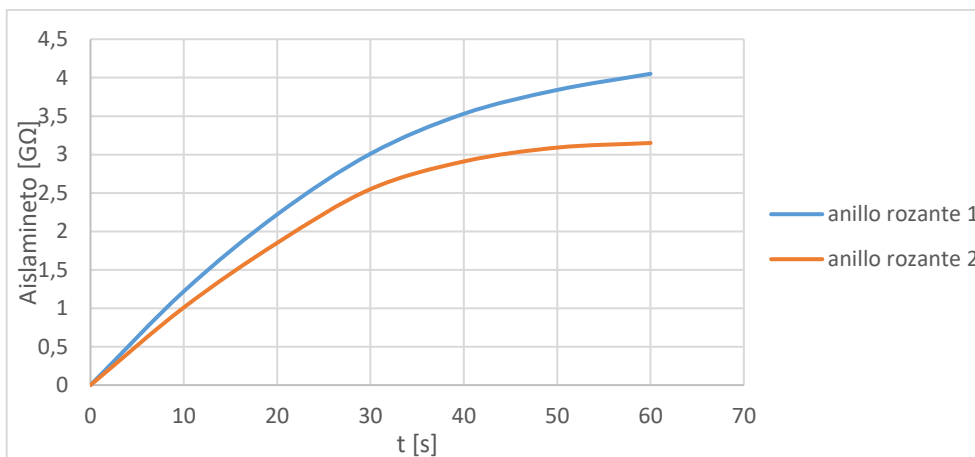


Figura A.16. Aislamiento máquina CC3 después del mantenimiento en rotor.

Tabla A.9. Prueba de aislamiento Rotor máquina CC4 entre colector-eje y núcleo.

Prueba realizada	Rotor		Entre	Colector-Núcleo-Eje				
	Etapa inicial			Después de barnizado				
	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)	Aislamiento (GΩ)		DAR	V aplicado (V)
t = 30 (s)	t = 60 (s)	t = 30 (s)			t = 60 (s)			
Colector - Núcleo	1,78	2,29	1,287	1100	1,84	3	1,630	1099
Colector - Eje	2,2	2,7	1,227	1100	1,83	2,88	1,575	1100
DAR	1,257			1,602				

En la Figura A.17 se presentan los resultados antes de realizar el mantenimiento, los valores obtenidos son de cada uno de los anillos con respecto al núcleo del rotor, en general se obtuvo resultados aceptables mostrados en la Figura A.18 de la relación de absorción dieléctrica y en ciertos casos esta relación es baja por tal razón se recomienda recuperar el nivel de aislamiento.

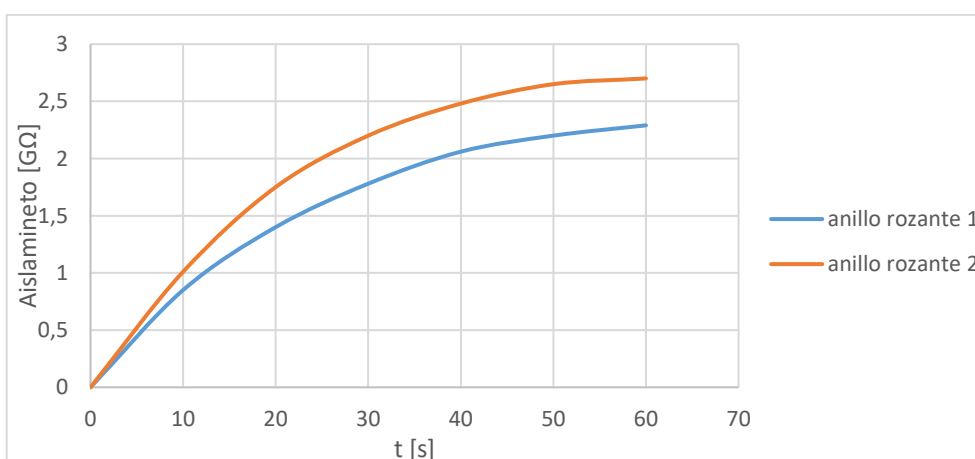


Figura A.17. Aislamiento máquina CC4 antes del mantenimiento en rotor.

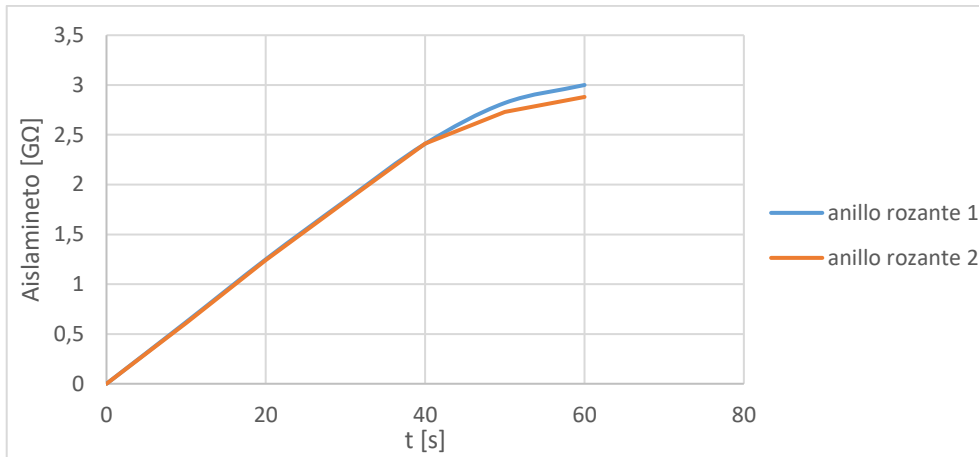


Figura A.18. Aislamiento máquina CC3 después del mantenimiento en rotor.

ANEXO B.

TEMA

GENERADOR CC CON MOTOR DE INDUCCIÓN COMO MÁQUINA MOTRIZ

OBJETIVOS

1. Conocer las partes constitutivas de una máquina CC.
2. Conocer los diferentes métodos para arrancar un motor trifásico de inducción y establecer el método adecuado según el tipo de máquina.
3. Realizar la inversión de giro y frenado de un motor trifásico de inducción.
4. Conocer como generar voltaje CC a partir de Voltaje CA

MARCO TEÓRICO

Los motores de inducción o asíncronos, son los más utilizados debido a su robustez, sencillez constructiva y poco mantenimiento. La utilización de los mismos es apta para aquellos requerimientos donde no se necesite mantener una velocidad constante, porque este tipo de motores disminuye ligeramente su velocidad con el aumento de la carga en su eje.

Arranque

En el período de arranque y aceleración de un motor trifásico de inducción, la intensidad de corriente se encuentra en el orden de 5 a 8 veces del valor nominal. Se han desarrollado varios métodos, entre los que se puede mencionar los siguientes:

Arranque estrella – triángulo.

Arranque con voltaje reducido.

Arranque con resistencia en el circuito del rotor.

Inversión de Giro

El sentido de giro de un motor de inducción, es posible invertirlo mediante el cambio en la secuencia de fases de su voltaje de alimentación.

Frenado

El frenado de una máquina trifásica de inducción, se lo puede realizar mediante dos metodologías: dinámico y por inversión de giro.

TRABAJO PREPARATORIO

1. Consultar el principio de funcionamiento y las partes constitutivas de las máquinas trifásicas de inducción de rotor bobinado y jaula de ardilla.
2. Para cada uno de los métodos de arranque (Estrella – Triángulo, Voltaje Reducido, Resistencias Rotóricas) realice:
 - Explique brevemente en que consiste y detalle sus ventajas y desventajas.
 - Explique el procedimiento completo a seguir para utilizar este método.
 - Dibuje y explique el circuito necesario para realizar este tipo de arranque.
3. Consultar el método de arranque correcto para las diferentes aplicaciones de los motores trifásicos de inducción.
4. Consultar sobre el método para invertir el sentido de giro del motor trifásico de inducción.
5. Consultar sobre los distintos tipos de frenado de los motores trifásicos de inducción, dibuje y explique el circuito necesario. (Frenado por inversión de giro y Frenado dinámico).

EQUIPO Y MATERIALES

- Módulo móvil: Motor/Generador.
- Amperímetros CC analógicos.
- Pinza amperimétrica.
- Fuente de alimentación CA y CC.
- Juego de conductores.

PROCEDIMIENTO

1. Realizar las conexiones necesarias para utilizar la máquina de inducción como motor y realizar un arranque directo. Realice medidas de: corriente de arranque I_{arr} , corriente en estado estable I_{ee} .
2. Armar el circuito para arrancar un motor de inducción trifásico, mediante el método de conexión estrella - triángulo. Realice medidas de: corriente de arranque I_{arr} ,

corriente en estado estable I_{ee} . (Nota: para la conexión Y del estator se utiliza la referencia grounded neutral)

3. Armar el circuito para arrancar el motor por el método de resistencias rotóricas. Arranque el motor para dos valores de resistencias distintas. Realice medidas de: corriente de arranque I_{arr} , corriente en estado estable I_{ee} para cada caso.
4. Armar el circuito para arrancar el motor de inducción por el método de voltaje reducido. Alimente el motor a través de un autotransformador, empezando con un voltaje equivalente al 50 % del valor nominal. Realice medidas de: corriente de arranque I_{arr} , corriente en estado estable I_{ee} .
5. Armar el circuito necesario para frenar al motor mediante el método de inversión de giro. Realice la medida de corriente de frenado I_{fr} .
6. Armar el circuito necesario para frenar al motor mediante el método de freno dinámico. Realice la medida de corriente de frenado I_{fr} .

INFORME

1. Presentar las corrientes de arranque directo y de voltaje reducido del motor. Comentar-
2. Presentar la respuesta de corriente y torque en función del tiempo al momento del arranque para cada uno de los métodos utilizados. (Incluya gráficos explicativos).
3. Consultar las aplicaciones prácticas de los diferentes métodos de arranque.
4. Analizar los efectos que sufre la máquina en el arranque cuando se aplican los diversos métodos. Comparar y comentar sobre la relación de corriente respecto a la nominal para cada método en el momento del arranque.
5. Consultar la variación de las magnitudes eléctrica en estudio cuando los fenómenos de arranque se efectúan con carga y en vacío.
6. Comentar sobre los resultados obtenidos con los métodos de frenado empleado en la práctica. Explique las aplicaciones prácticas.

REFERENCIAS

[1] K. Simba, Estimación de parámetros de un motor trifásico de inducción a partir de mediciones en el arranque directo de corrientes transitorias del estator utilizando la herramienta de estimación de parámetros de Matlab/Simulink, EPN, 2018 [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19907>

TEMA

OPERACIÓN DE MÁQUINAS CC

OBJETIVOS

1. Conocer las partes constitutivas de una máquina de corriente continua.
2. Conocer los diferentes métodos para arrancar una máquina de continua y establecer el método adecuado según el tipo de máquina.
3. Conocer como generar voltaje CC a partir de una máquina motriz CC o a través de una máquina motriz de inducción

MARCO TEÓRICO

Las máquinas de corriente continua funcionan debido a la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando interactúan con los polos de un electroimán de acuerdo con la ley de Lorentz, generalmente el electroimán se denomina rotor, mientras que el imán permanente se sitúa en la carcasa o cuerpo del motor.

La máquina eléctrica de corriente continua tiene una diferencia importante que es su colector, el cual tiene como finalidad restablecer un valor instantáneo fijo de voltaje, en otras palabras, el colector es un rectificador mecánico.

Las máquinas de CC se clasifican en 4 tipos según la forma de conexión de sus bobinas.

- Excitación independiente: en este caso el inductor (estator) y el inducido (rotor) se alimentan de dos fuentes independientes
- Serie: en este caso el inductor e inducido se encuentran conectados en serie
- Derivación o shunt: para este caso sus devanados están conectados en paralelo
- Compound: en estos motores consta de dos devanados inductores, uno de ellos está conectado en serie con el inducido y el otro está conectado en paralelo.

Estas máquinas se caracterizan por el par de arranque y velocidad expuestos en la tabla 1

Tabla 1. Características de motores

Conexión	Velocidad	Par de arranque
Compound	Constante	Alto
Independiente	Constante	Muy elevado
Serie	Variable con la carga	Muy elevado
Derivación	Constante	Bajo

Según la norma VDE para generadores y motores, la primera letra se refiere a la entrada de la intensidad (+) y la segunda letra es por donde sale la intensidad (-), a excepción de la armadura del generador de CC que hace que la corriente fluya o salga a través del terminal A porque se comporta como generador.

Tabla 2. Normativa de terminales de conexión

Elemento	Terminales de conexión según Norma			
	VDE	ASA	BS	IEC
Armadura	A-B	A1-A2	AA-A	A1-A2
Campo Shunt	C-D	F1-F2	Z-ZZ	E1-E2
Campo serie	E-F	S1-S2	Y-YY	D1-D2
Interpolos	G-H	-	HH-H	B1-B2
Interpolo simétricamente distribuido en el lado A	GA-HA	-	-	1B1-1B2
Interpolo simétricamente distribuido en el lado B	GB-HB	-	-	2B1-2B2
Campo de excitación separada	I-K	F1-F2	X-XX	F1-F2

TRABAJO PREPARATORIO

Consultar el principio de funcionamiento como motor, generador y las partes constitutivas de las máquinas de corriente continua.

1. Consultar los distintos tipos de conexión según el tipo de excitación de máquinas de CC, realice lo siguiente.
 - Explique brevemente en que consiste y detalle sus ventajas y desventajas.
 - Explique el procedimiento completo a seguir para utilizar los distintos tipos de motores según la forma de sus bobinas.
 - Dibuje y explique el circuito necesario para conexión y arranque.
2. Consultar sobre el método para lograr el control de velocidad de una máquina de corriente continua.

EQUIPO Y MATERIALES

- Módulo móvil: Motor/Generador
- Fuentes de alimentación CC
- Pinza amperimétrica

- Amperímetros CC analógicos
- Reóstatos variables

PROCEDIMIENTO

Realizar las conexiones necesarias para utilizar la máquina de corriente continua como motor y generador.

Armar el circuito para arrancar un motor de corriente continua como máquina motriz.

El devanado de excitación del generador de cc debe estar energizado.

Comprobar que el devanado de armadura genere voltaje

Conectar en serie varios reóstatos para controlar la velocidad,

Tomar valores de voltaje generado y corriente de campo a distintas velocidades.

INFORME

1. Presentar los datos de placa de la máquina de continua y los datos obtenidos en la práctica.
2. Consultar las aplicaciones prácticas de los diferentes motores de corriente continua según la conexión de sus bobinados.
3. Comparar y comentar sobre la relación de corriente de campo para cada variación de velocidad.
4. Explique las aplicaciones prácticas.
5. Conclusiones y Recomendaciones.

REFERENCIAS

[1] S. Zeas, Pruebas en máquinas de corriente continua, análisis y comparación con diferentes normas, EPN, 2014. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6049>

TEMA

PRUEBA EN VACÍO CON MÁQUINAS SINCRÓNICAS

OBJETIVOS

1. Conocer el procedimiento correspondiente para realizar las pruebas de saturación en circuito abierto de una máquina sincrónica.
2. Determinar la curva de saturación en circuito abierto.
3. Estudiar la forma de conexión y comportamiento de la máquina sincrónica como motor y generador.

MARCO TEÓRICO

Cuando el generador síncrono opera en vacío, se alimenta con corriente continua el devanado de campo, mientras que los devanados de armadura se encuentran en circuito abierto, de esta manera el voltaje inducido en el devanado trifásico se puede medir en sus terminales.

Esta prueba el motor debe funcionar como generador para lo cual es necesario impulsar a la máquina sincrónica mediante un motor primario a su velocidad nominal. Para el funcionamiento de la máquina eléctrica como motor es necesario alimentar el circuito de excitación un voltaje menor a 140V.

TRABAJO PREPARATORIO

1. Investigar sobre la construcción de la máquina sincrónica y el principio de funcionamiento como Motor y Generador, (Incluya Gráficos).
2. Consultar sobre las pruebas eléctricas aplicables en máquinas sincrónicas, además enumere y describa que pruebas se debe realizar para obtener cada parámetro.
3. Consultar sobre las diferentes curvas de saturación en función del material ferromagnético.
4. Consultar el uso de la aplicación de bypass para el arranque de máquinas eléctricas.
5. Determinar el procedimiento para construir la curva de saturación y línea de entrehierro.

EQUIPO Y MATERIALES

- Panel móvil 1.
- Máquinas sincrónicas.
- Fuente trifásica.
- Fuente CC.
- Analizador de red.
- Amperímetro.
- Interruptor de cuchillas.
- Reóstatos

PROCEDIMIENTO

1. Se debe acoplar las máquinas sincrónicas del módulo 1.
2. Armar el siguiente esquema de la Figura 1. para lograr su funcionamiento como motor de la máquina 1, además se debe armar el circuito de la Figura 2. para que la maquina 2 opere como generador.

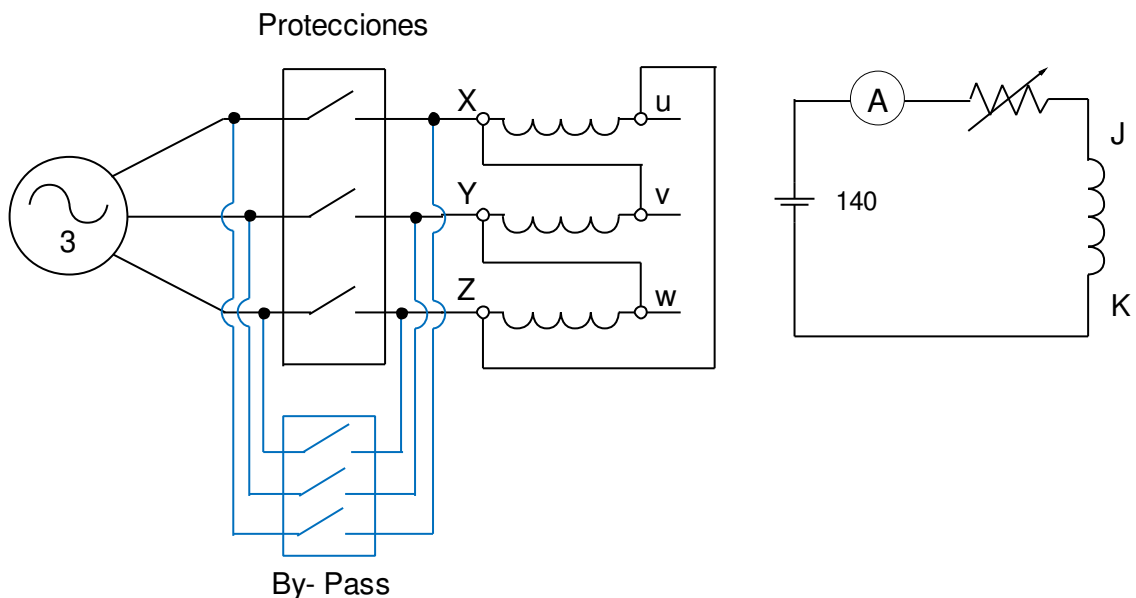


Figura 1. Funcionamiento como motor

3. Realizar la conexión en serie de al menos 6 reóstatos en el devanado de campo, de esta manera se logra variar de manera correcta el voltaje generado.

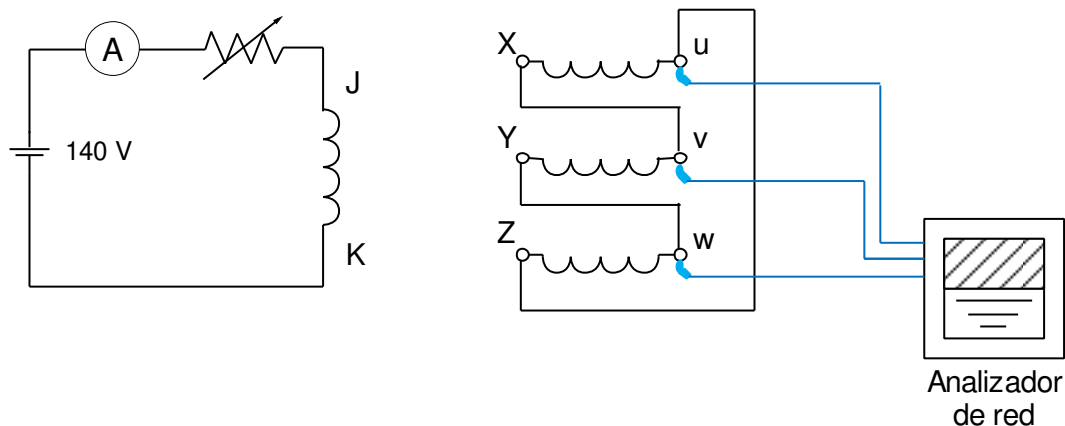


Figura 2. Funcionamiento como generador

4. Una vez en funcionamiento verificar que exista voltaje remanente en el devanado de armadura del generador síncrono.
5. Realizar el registro de valores de voltaje generado y corriente en campo, acorde al procedimiento consultado

Nota: Para el arranque del motor se recomienda el arranque mediante un bypass, ya que las protecciones colocadas no soportan el pico de la corriente de arranque del motor, cuando el motor ya esté en funcionamiento se recomienda transferir la carga a sus protecciones.

INFORME

1. Tabular los datos de placa del motor síncrono utilizado en la práctica, además de los datos obtenidos en las pruebas de vacío.
2. Determinar la curva de magnetización encontrar la corriente de campo correspondiente al voltaje nominal, presentar cálculos detallados junto con las explicaciones correspondientes.
3. Describir las ventajas y desventajas que se presentó durante la ejecución de la prueba.
4. Conclusiones y Recomendaciones

REFERENCIAS

- [1] S. Villacreses, Medición del ángulo de potencia de un generador síncrono, EPN, 2012. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4674>.
- [2] B. Chiguano, Estimación de parámetros eléctricos de la máquina síncrona utilizando MATLAB-Simulink EPN, 2018. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19181>.

TEMA

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO SOSTENIDO

OBJETIVOS

1. Calcular la reactancia no saturada de eje directo.
2. Determinar la curva de saturación en corto circuito.
3. Estudiar la forma de conexión y comportamiento de la máquina sincrónica durante un corto circuito.

MARCO TEÓRICO

La prueba de cortocircuito trifásico se basa en el análisis de las medidas de la corriente de línea en armadura y corriente de campo. Para lograr determinar dichas componentes es necesario operar la máquina a velocidad nominal y sin carga, luego aplicar el cortocircuito trifásico sostenido en los terminales de armadura del generador.

TRABAJO PREPARATORIO

1. Consultar sobre las condiciones que debe cumplir el generador durante la aplicación de un cortocircuito sostenido trifásico.
2. Profundice y analice el procedimiento necesario para desarrollar la práctica.
3. Dibuje los diferentes métodos de arranque de máquinas y como realizar su operación con un By-Pass.
4. Consultar como obtener la reactancia de eje directo en la máquina sincrónica.

EQUIPO Y MATERIALES

- Módulo móvil: Motor/Generador sincrónico.
- Fuentes de alimentación CC.
- Pinza amperimétrica CC.
- Analizador de red.
- Cables.
- Amperímetros.
- Interruptores de cuchillas trifásicos.

PROCEDIMIENTO

1. La máquina tiene que funcionar como generador a velocidad nominal, aplicando un cortocircuito controlado en los terminales del estator como se indica en la figura 1.

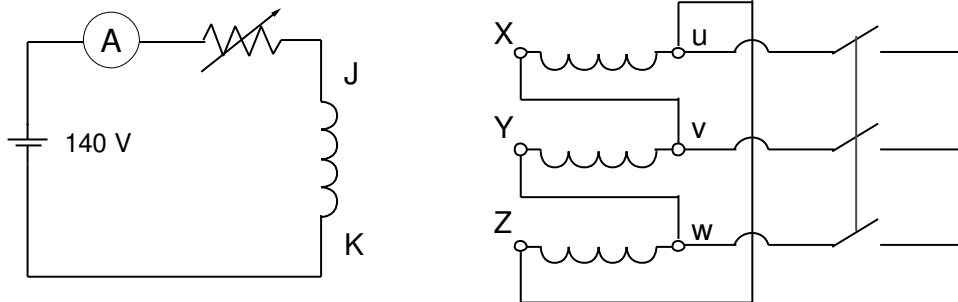


Figura 1. Generador síncrono-esquema de un corto circuito trifásico.

2. La prueba se debe realizar desde el 125% de la corriente nominal de armadura hasta el 25%, de manera decreciente en intervalos de 25%.
3. Registrar datos necesarios para construir la curva de saturación en corto circuito.

Como consideraciones generales, las lecturas deben ser tomadas en orden descendente, para evitar errores de medición provocados con el calentamiento de las máquinas.

INFORME

1. Explicar sobre la curva de saturación en cortocircuito, que se espera obtener.
2. Tabular, explicar y graficar datos obtenidos durante la práctica.
3. Calcular la reactancia síncrona de eje directo, es necesario tener los datos de la práctica de prueba en vacío con máquinas síncronas.
4. Conclusiones y Recomendaciones.

REFERENCIAS

- [1] S. Villacreses, Medición del ángulo de potencia de un generador síncrono, EPN, 2012. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4674>.
- [2] B. Chiguano, Estimación de parámetros eléctricos de la máquina síncrona utilizando MATLAB-Simulink EPN, 2018. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19181>.

TEMA

APLICACIÓN DE UN CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN UNA MÁQUINA SINCRÓNICA

OBJETIVOS

1. Determinar la envolvente de un cortocircuito trifásico y obtener los parámetros eléctricos.
2. Desarrollar la capacidad para realizar el armado del circuito y puesta en marcha de una maquina eléctrica

MARCO TEÓRICO

La corriente que circula es definida por sus impedancias en el momento que existe una falla en la máquina, se realiza la prueba de cortocircuito trifásico para determinar los parámetros de reactancias transitoria de eje d (X'_d) y reactancia subtransitoria de eje d (X''_d), además de las constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo t'_d y t''_d , pues, la corriente que circula en la máquina no es la misma cuando existe la falla, que a la corriente circulante instantes después.

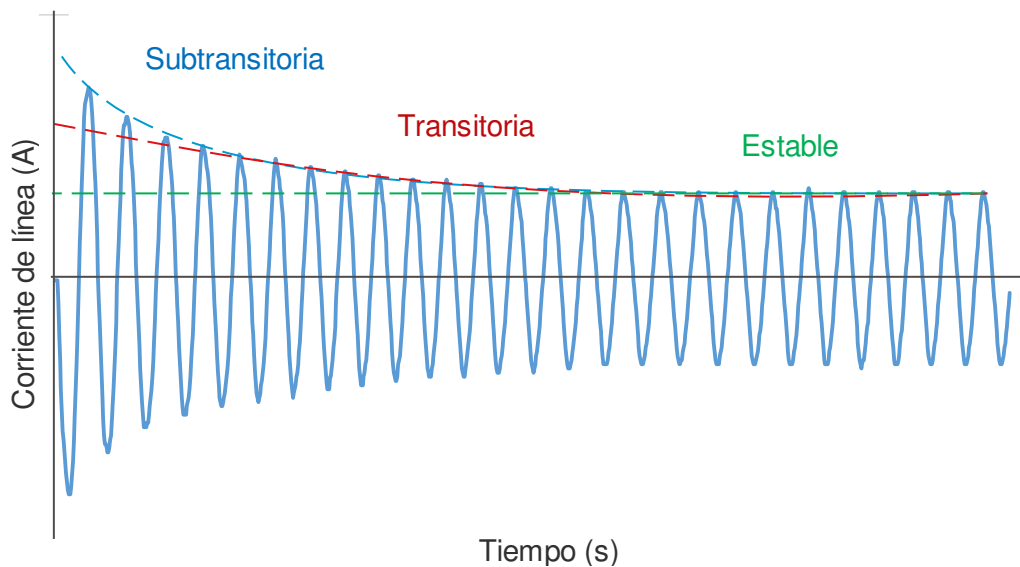


Figura 1. Variación de la corriente en función del tiempo en presencia de una falla.

TRABAJO PREPARATORIO

1. Consulte el procedimiento para realizar un corto circuito trifásico.

2. Explicar sobre las etapas transitoria, subtransitoria y estable del oscilograma en un cortocircuito trifásico.
3. Explique sobre la curva A, curva B, línea C y línea D que expone la norma IEEE Std 115-2009 acorde a la prueba de cortocircuito trifásico.

EQUIPO Y MATERIALES

- Módulo móvil: Motor/Generador sincrónico.
- Fuentes de alimentación CC.
- Pinza amperimétrica.
- Amperímetros CC analógicos.
- Analizador de red.
- Cables.
- Amperímetros.
- Interruptores de cuchillas trifásicos.
- Osciloscopio con entrada USB para guardar datos.

PROCEDIMIENTO

1. Verificar que la máquina funcione como generador y a velocidad sincrónica, alimentar el campo del motor sincrónico con un voltaje menor a 140V.
2. Se debe aplicar un cortocircuito en el devanado de armadura a través de un interruptor tripolar de cuchillas, como se muestra en la Figura 1.

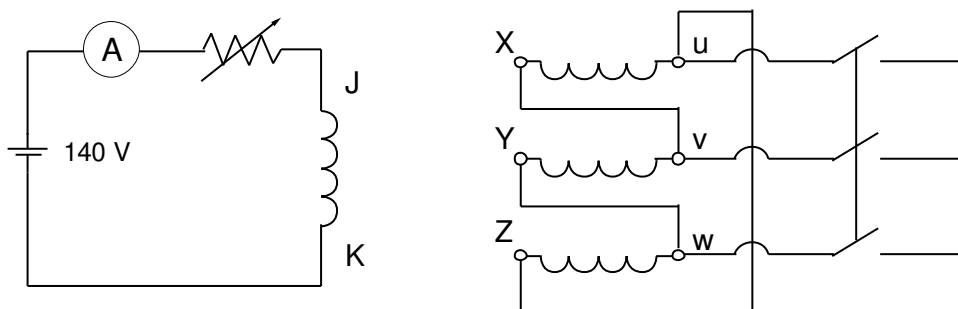


Figura 1. Corto circuito trifásico en un generador sincrónico.

3. Registrar valores pre- falla de corriente y voltaje de campo de la maquina motriz y del generador.
4. Durante el evento registrar oscilogramas de voltaje de línea en armadura mediante el osciloscopio.
5. La prueba debe ser realizada lo más rápido posible ya que se debe precautelar la integridad mecánica y eléctrica de la máquina.

INFORME

1. Procesar los datos para obtener el oscilograma de corriente y explicar sobre el comportamiento del cortocircuito trifásico.
2. Presentar el oscilograma de cortocircuito trifásico aplicado a la máquina sincrónica.
3. Tabular y graficar en escala semilogarítmica la curva A, línea B, Curva C y línea D que expone la norma IEEE Std 115-2009.
4. Presentar datos tabulados de las reactancias transitorias y subtransitorias juntamente con los cálculos de las constantes de tiempo de cortocircuito de eje directo transitorio t'_d y subtransitorio t''_d .
5. Conclusiones y Recomendaciones.

REFERENCIAS

[1] S. Villacreses, Medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico, EPN, 2012. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4674>.

[2] B. Chiguano, Estimación de parámetros eléctricos de la máquina sincrónica utilizando MATLAB-Simulink EPN, 2018. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19181>.

TEMA

PRUEBA DE RECUPERACION DE VOLTAJE

OBJETIVOS

1. Analizar el comportamiento del voltaje línea-línea en estado transitorio y en estado subtransitorio cuando se despeja la falla del cortocircuito trifásico sostenido sin carga.
2. Calcular las constantes de tiempo transitorio y subtransitoria de circuito abierto de eje directo t'_{do} y t''_{do} ,

MARCO TEÓRICO

Esta prueba es necesaria para encontrar las constantes de tiempo transitorio y subtransitoria de circuito abierto de eje directo t'_{do} y t''_{do} ,

TRABAJO PREPARATORIO

1. Consultar la norma IEEE 115-2009, sobre la prueba de recuperación de voltaje en máquinas sincrónicas.
2. Explique sobre la curva A, línea B, Curva C y línea D que expone la norma IEEE Std 115-2009.
3. Explicar la finalidad de obtener las constates de tiempo transitorias y subtransitorias de circuito abierto de eje directo t'_{do} y t''_{do} .

EQUIPO Y MATERIALES

- Módulo móvil: Motor/Generador sincrónico.
- Fuentes de alimentación CC.
- Pinza amperimétrica.
- Amperímetros CC analógicos.
- Analizador de red.
- Cables.
- Amperímetros.
- Interruptores de cuchillas trifásicos.
- Osciloscopio con entrada USB para guardar datos.

PROCEDIMIENTO

1. Alimentar devanado de excitación con un voltaje de por debajo del codo de la curva de saturación en vacío.
2. La máquina debe operar como generador a velocidad sincrónica, se utiliza el mismo circuito que la prueba de cortocircuito trifásico.

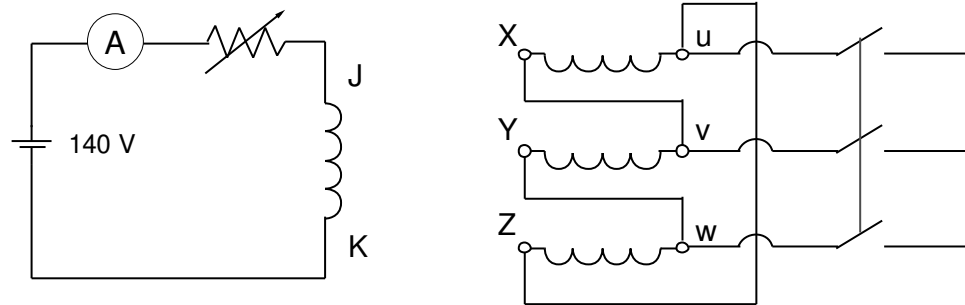


Figura 1. Generador sincrónico-esquema de un corto circuito trifásico.

3. Registrar oscilogramas de voltaje de línea previo a la apertura de la falla mediante el interruptor.

INFORME

1. Grafique el oscilograma de voltaje y encuentre el oscilograma de corriente, explicar sobre el comportamiento en recuperación de voltaje
2. Graficar en escala semilogarítmica la envolvente de corriente en p.u. y encontrar cada una de las curvas necesarias para obtener los parámetros.
3. Analizar, tabular y calcular las constantes de tiempo transitoria t'_{do} y subtransitoria t''_{do}
4. Conclusiones y Recomendaciones.

REFERENCIAS

- [1] S. Villacreses, Medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico, EPN, 2012. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4674>.
- [2] B. Chiguano, Estimación de parámetros eléctricos de la máquina sincrónica utilizando MATLAB-Simulink EPN, 2018. [online] Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19181>.

ORDEN DE EMPASTADO