

LABORATORIO VIRTUAL DE LAS PRÁCTICAS CORRESPONDIENTES A LA
MÁQUINA SINCRONA EN LA ASIGNATURA MÁQUINAS ELÉCTRICAS 2

LUIS EDUARDO BALAGUERA ARDILA
JAIME JOSÉ PICO ANAYA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2019

LABORATORIO VIRTUAL DE LAS PRÁCTICAS CORRESPONDIENTES A LA
MÁQUINA SINCRONA EN LA ASIGNATURA MÁQUINAS ELÉCTRICAS 2

LUIS EDUARDO BALAGUERA ARDILA
JAIME JOSÉ PICO ANAYA

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Electricistas.

Director

JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ

Ingeniero Electricista, PhD.

Codirector

DIEGO ALFONSO JIMÉNEZ ALVERNIA

Ingeniero Electricista.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico primero que todo a Dios por darme esa sabiduría, paciencia y fortaleza en cada momento para culminar. A mis padres José Luis y Dora Luz por ser el motor principal para realizar esta carrera, por tanto esfuerzo, por siempre confiar en mí y apoyarme en todo momento. Seguido de mis hermanos que admiro mucho y ser un ejemplo a seguir Rubiela, Edwin, jhoan y José Luis, por toda esa colaboración y darme la motivación de poder seguir y finalizar esta meta. A Karol por siempre creer en mí, estar ahí en esos momentos de apoyo incondicional que me hicieron seguir luchando. A toda mi familia, Mis tíos, tías, primos, primas y sobrinos por creer en mí y estar ahí siempre apoyándome.

Agradecerle a Jean Paul por toda esa colaboración, ese ayuda, por esos consejos y estar ahí siempre cuando lo necesite.

A mí amigo Jhon Rodríguez por esos consejos de seguir en pie y no decaer.

A mis amigos de la universidad industrial de Santander, con quiénes supimos superar los obstáculos y aportaron ese granito de arena para cumplir está meta Juan Pablo, Jaime pico, Yilmar Pedrozo, Ludwing Gómez, Jean Paul, Arlongth León, Carlos Rocha, Jean Luque, Jorge Santiago, Miguel Ardila, Sergio Angulo, Cristian Riveros, Jhonny Robles, Edward Guti, Jhoany Torrez, Fredy.

A todas esas personas que hicieron parte de esta trayectoria muchas gracias y mil bendiciones.

Luis Eduardo Balaguera Ardila

DEDICATORIA

Primero que todo a Dios, por permitirme vivir todas y cada una de las cosas hasta el momento, ya que está presente en todo momento. A mi familia, que está compuesto por 6 grandes pilares que son: mi padre Jaime Pico M., quien es y siempre será mi mayor admiración, mi madre Vilma Anaya A., que es lo más sagrado para mí, mi hermana Jeritza Pico Anaya, a quien admiro profundamente y me ayuda a crecer como persona, mi hermana Vanessa Pico Anaya, quien siempre he admirado por su coraje, mi hermano Brayan Pico Anaya, quien siempre está para ayudarme incondicionalmente, y mi sobrina Guadalupe Cabezas Pico, quien me ayuda a motivarme cada día más. A mi tía Martha Anaya, quien me enseñó a perseverar siempre, a mi tío Alberto Anaya, quien me enseñó a ver desde otra perspectiva las cosas. A mis demás familiares, primos, primas, tíos, tías, abuelo y abuela. A quienes ya no están entre nosotros, mi tía Mery Anaya, mi abuelo Jaime Pico, que en su momento ayudaron en mi educación y crecimiento como persona. A compañeros de la universidad que el día de hoy puedo considerar mis amigos, Ludwing Gómez, Juan Sandoval, Yilmar Pedrozo, Luis Balaguera, Leonardo Marín, Johan Serrano, quienes fueron indispensables durante el proceso de formación como persona íntegra. A mis nuevas amistades como Jonny Robles, Cristian Ángulo, Juan Nuñez, Carlos Rueda, Cristian Riveros, Edward Gutiérrez, Sergio Ángulo, Miguel Ardila, Jorge Santiago, Carlos Rocha, Arlongth León, y demás amistades que me faltan por mencionar, quienes gracias a esta experiencia universitaria logré conocerlos y aportaron en mí de una manera u otra manera valores durante mi formación.

Jaime José Pico Anaya

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director el doctor Javier Enrique Solano por su tiempo y dedicación que durante el todo el proceso de nuestro trabajo de grado.

A nuestro codirector Diego Jiménez Alvernia por su tiempo y dedicación durante el todo el proceso de nuestro trabajo de grado.

Al auxiliar de laboratorio Guillermo Galindez por el acompañamiento y colaboración en la realización de cada una de las prácticas en el laboratorio.

Al profesor Juan Manuel Murcia por el acompañamiento y colaboración en la realización de cada una de las prácticas en el laboratorio.

Al profesor Jairo Gómez por ayudarnos a despejar dudas con respecto a los conceptos de nuestro trabajo de grado.

A la secretaria Ingrid García por su colaboración en los trámites durante el proceso.

A todos los profesores que durante la carrera lograron transmitirnos sus conocimientos y experiencias durante la formación como profesionales íntegros.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA	20
1.1 TIPOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.....	22
1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR SÍNCRONO	23
1.3 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR SÍNCRONO.....	24
1.4 FLUJO DE POTENCIA EN EL GENERADOR SÍNCRONO.....	26
2. PRUEBAS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	28
2.1 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO.....	28
2.2 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO	29
2.3 PRUEBA CURVA EXTERNA.....	31
2.4 PRUEBA CURVA RELACIÓN DE REGULACIÓN.....	32
2.5 PRUEBA CONEXIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS	34
2.6 PRUEBA CONEXIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO A UNA RED	37
2.7 PRUEBA CURVA EN V	38
3. METODOLOGIA APLICADA	40
3.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS PRUEBAS	41
3.1.1 Prueba de cortocircuito en el laboratorio UIS	41
3.1.2 Prueba de circuito abierto en el laboratorio UIS	42
3.1.3 Prueba curva externa.....	43
3.1.4 Prueba curva relación de regulación.	44
3.1.5 Prueba conexión en paralelo de generadores síncronos.....	44
3.1.6 Prueba conexión generador síncrono a la red.....	46
3.1.7 Prueba curva en V.	47
3.2 SIMULACIÓN DE LAS PRUEBAS EN MATLAB/SIMULINK.....	48
3.2.1 Construcción prueba cortocircuito..	50
3.2.2 Construcción prueba circuito abierto..	52
3.2.3 Construcción prueba curva externa..	55

3.2.4	Construcción prueba curva relación de regulación..	57
3.2.5	Construcción prueba conexión en paralelo de generados síncronos.	59
3.2.6	Construcción prueba conexión del generador síncrono a la red.....	63
3.2.7	Construcción prueba curva en V.....	66
4.	RESULTADOS	68
4.1	COMPARACIÓN PRUEBA CORTOCIRCUITO	69
4.2	COMPARACIÓN PRUEBA CIRCUITO ABIERTO	70
4.3	COMPARACIÓN CURVA EXTERNA	72
4.3.1	Resultados prueba curva externa con el modelo ajustado.	73
4.4	COMPARACIÓN CURVA RELACIÓN REGULACION	74
4.4.1	Resultados prueba curva relación de regulación con el modelo ajustado.	75
4.5	COMPARACIÓN CONEXIÓN GENERADORES EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS	77
4.6	COMPARACIÓN GENERADOR SÍNCRONO A LA RED	77
4.7	COMPARACIÓN CURVA EN V.....	77
4.8	COMPARACIÓN GENERAL.....	78
5.	CONCLUSIONES	80
6.	RECOMENDACIONES.....	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	82
	ANEXOS.....	83

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Máquina Síncrona.	20
Fig. 2 Tipos de Rotor de la Máquina Síncrona.	21
Fig. 3 Funcionamiento como Generador de la Máquina Síncrona.....	22
Fig. 4 Funcionamiento como Motor de la Máquina Síncrona.	23
Fig. 5 Circuito Equivalente Generador del Síncrono.....	23
Fig. 6 Diagrama Fasorial del Generador Síncrono con Factor de Potencia Unitario.	25
Fig. 7 Diagrama Fasorial del Generador Síncrono con Factor de Potencia en Atraso.	25
Fig. 8 Diagrama Fasorial del Generador Síncrono con Factor de Potencia en Adelanto.....	26
Fig. 9 Flujo de Potencia Generador Síncrono	27
Fig. 10 Esquema de Conexión para la Prueba de Cortocircuito.....	29
Fig. 11 Curva de Cortocircuito.....	29
Fig. 12 Esquema de Conexión para la Prueba de Circuito Abierto.....	30
Fig. 13 Curva de Circuito Abierto.....	31
Fig. 14 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva Externa	31
Fig. 15 Curva Externa para los Distintos Tipos de Cargas	32
Fig. 16 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva Relación de Regulación	33
Fig. 17 Curva Relación de Regulación para los Distintos Tipos de Cargas.....	34
Fig. 18 Esquema de Conexión para la Prueba de Generadores en Paralelo.	35
Fig. 19 Diagrama de Secuencia de Fases.....	36
Fig. 20 Esquema de Conexión para el Método de las Tres Lámparas.	36
Fig. 21 Esquema de Conexión para la Prueba del Generador Síncrono a la Red.	38
Fig. 22 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva en V.	39
Fig. 23 Curva en V de la Máquina Síncrona.....	39
Fig. 24 Esquema de Conexión para la Prueba de Cortocircuito en el Laboratorio.	41

Fig. 25 Esquema de Conexión para la Prueba Circuito Abierto en el Laboratorio.	42
Fig. 26 Esquema de Conexión para la Prueba Curva Externa en el Laboratorio ..	43
Fig. 27 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva Relación de Regulación en el Laboratorio	44
Fig. 28 Esquema de Conexión para la Prueba de Generadores en Paralelo en el Laboratorio.....	45
Fig. 29 Esquema de Conexión para la Prueba del Generador Síncrono a la Red en el Laboratorio.	46
Fig. 30 Esquema de Conexión de la Prueba de Curva en V en el Laboratorio.	47
Fig. 31 Bloque Máquina Síncrona en pu de Simulink	49
Fig. 32 Subsistema F.e.m en Simulink.....	49
Fig. 33 Bloques para la Prueba de Cortocircuito en Simulink.....	50
Fig. 34 Bloque Corriente de Excitación para la Prueba de Cortocircuito en Simulink	51
Fig. 35 Configuración del Bloque Scope en Simulink	52
Fig. 36 Bloques para la Prueba de Circuito Abierto en Simulink	53
Fig. 37 Bloque Corriente de Excitación en la Prueba de Circuito Abierto en Simulink	53
Fig. 38 Configuración Bloque Scope en la Prueba de Circuito Abiero en Simulink	54
Fig. 39 Bloques para la Prueba de Curva Externa en Simulink.....	55
Fig. 40 Bloque Corriente de Excitación para la Prueba Curva Externa en Simulink	55
Fig. 41 Configuración Bloque Scope para la Prueba Curva Externa en Simulink..	56
Fig. 42 Bloques para la Prueba Curva Relación de Regulación en Simulink	57
Fig. 43 Bloque Corriente de Excitación para la Prueba Curva Relación de Regulación en Simulink	57
Fig. 44 Configuración Bloque Scope para la Prueba Curva Relación de Regulación en Simulink	59

Fig. 45 Bloques para la Prueba Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink	60
Fig. 46 Subsistema Sincronismo en Paralelo para la Prueba de Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink.	61
Fig. 47 Estado de la Magnitud para el Sincronismo en la Prueba de Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink	62
Fig. 48 Subsistemas de Medidas de Potencias para la Prueba de Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink	62
Fig. 49 Bloques para la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink	63
Fig. 50 Subsistema de Sincronismo con la Red para la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink	64
Fig. 51 Estado de la Magnitud para el Sincronismo en la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink	65
Fig. 52 Medidas de Potencia del Generador para la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink	65
Fig. 53 Bloques para la Prueba Curva en V en Simulink.....	66
Fig. 54 Bloque de Corriente de Excitación para la Prueba de Curva en V	66
Fig. 55 Configuración del Bloque Scope para la Prueba de Curva en V	67
Fig. 56 Parámetros Bloque Máquina Síncrona en Simulink	69
Fig. 57 Comparación Prueba Curva Cortocircuito	70
Fig. 58 Comparación Prueba Curva Circuito Abierto.....	71
Fig. 59 Curva de Magnetización	72
Fig. 60 Comparación Curva Externa	73
Fig. 61 Resultados del Modelo Ajustado en la Prueba Curva Externa	73
Fig. 62 Comparación Prueba Curva Relación de Regulación Carga Tipo Inductiva	74
Fig. 63 Comparación Prueba Curva Relación de Regulación Carga Tipo Resistiva	75

Fig. 64 Resultado del modelo Ajustado Prueba Curva Relación de Regulación Carga Inductiva	76
Fig. 65 Resultado del modelo Ajustado Prueba Curva Relación de Regulación Carga Resistiva	76
Fig. 66 Comparación Prueba Curva en V	78
Fig. 67 Visualización del ANEXO A.....	83
Fig. 68 Visualización del ANEXO C.....	84
Fig. 69 Visualización del ANEXO E.....	85
Fig. 70 Visualización del ANEXO G.....	87
Fig. 71 Visualización del ANEXO I.	88
Fig. 72 Visualización del ANEXO K.....	90
Fig. 73 Visualización del ANEXO M.	91
Fig. 74 Curva de Cortocircuito en el Laboratorio UIS	95
Fig. 75 Curva de Circuito Abierto en el Laboratorio UIS.....	95
Fig. 76 Curva Característica Externa en el Laboratorio UIS.....	97
Fig. 77 Curva Característica de Regulación para Carga Resistiva en el Laboratorio UIS.....	97
Fig. 78 Curva Característica de Regulación para Carga Inductiva en el Laboratorio UIS.....	98
Fig. 79 Montaje en Paralelo de los dos Generadores alimentando una Carga en el Laboratorio UIS.....	100
Fig. 80 Curva en V en el Laboratorio UIS.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros del Generador Síncrono del Laboratorio UIS.	68
Tabla 2 Comparación General.....	78
Tabla 3 Comparación Laboratorio del Campus y Laboratorio Virtual.	79
Tabla 4 Valores de Carga Resistiva en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.....	93
Tabla 5 Valores de Carga Capacitiva en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. .	93
Tabla 6 Valores de Carga Inductiva en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.....	94
Tabla 7 Incertidumbre de los Equipos de Medida en el Laboratorio.....	94
Tabla 8 Regulación de Tensión en el Laboratorio UIS	98
Tabla 9 Repartición de Potencia para Carga Resistiva en el Laboratorio	99
Tabla 10 Repartición de Potencia Activa y Reactiva para Carga RL en el Laboratorio	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO P: Protocolo del Laboratorio Virtual.....	83
ANEXO Q: Información de Cargas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.....	93
ANEXO R Informe de Resultados del Laboratorio de la UIS.....	95

(Ver anexos adjuntos en CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

ANEXO A: Prueba_Cortocircuito.slx	
ANEXO B: Script_Cortocircuito.m	
ANEXO C: Prueba_Circuito_Abierto.slx	
ANEXO D: Script_Circuito_Abierto.m	
ANEXO E: Prueba_Curva_Externa.slx	
ANEXO F: Script_Curva_Externa.m	
ANEXO G: Prueba_Relacion_Regulacion.slx	
ANEXO H: Script_Relacion_Regulacion.m	
ANEXO I: Prueba_Generadores_Paralelo.slx	
ANEXO J: Script_Generadores_Paralelo.m	
ANEXO K: Prueba_Red_Infinita.slx	
ANEXO L: Script_Red_Infinita.m	
ANEXO M: Prueba_Curva_V.slx	
ANEXO N: Script_Curva_V.m	
ANEXO O: Resultados_Lab_UIS.m	

RESUMEN

TÍTULO: LABORATORIO VIRTUAL DE LAS PRACTICAS CORRESPONDIENTES A LA MÁQUINA SINCRONA EN LA ASIGNATURA MÁQUINAS ELÉCTRICAS 2.*

AUTORES: LUIS EDUARDO BALAGUERA ARDILA, JAIME JOSÉ PICO ANAYA.**

PALABRAS CLAVE: Laboratorio virtual, máquina síncrona, manual de laboratorio de máquinas eléctricas, generador síncrono, curvas características, Matlab-simulink.

DESCRIPCION:

En el presente documento se presenta la realización de un laboratorio virtual con el software Matlab-simulink, los montajes planteados en la parte práctica de la asignatura de máquinas eléctricas 2 correspondientes a la máquina síncrona, siendo este el objetivo general del trabajo de grado. En la primera etapa de este trabajo, se realiza una recopilación de la información y fundamentación teórica de la maquina síncrona necesaria para llevar a cabo los montajes de cada una de las pruebas en Matlab-simulink. En la segunda etapa, se realizan las pruebas en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus universitario, todo esto con el fin de comparar los resultados con los archivos de simulación, teniendo en cuenta las tendencias y comportamientos de estos según la teoría de la máquina síncrona. En la tercera etapa, se ajustan los archivos de simulación buscando reducir el error de las comparaciones. Finalmente, se crea un protocolo que permita la correcta utilización de los archivos que conforman el laboratorio virtual. Se espera lograr un buen impacto a la comunidad universitaria e incentivarlos a la creación de más laboratorios virtuales, pero dejando claro que son alternativas de estudio, y no reemplazar u omitir la experiencia que ofrecen los laboratorios presenciales del campus universitario.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD, Javier Enrique Solano Martínez. Co-director: Ing, Diego Alfonso Jiménez Alvernia.

ABSTRACT

TITLE: VIRTUAL LABORATORY OF THE PRACTICES CORRESPONDING TO THE SYNCHRONOUS MACHINE IN THE SUBJECT ELECTRIC MACHINES 2.*

AUTHORS: LUIS EDUARDO BALAGUERA ARDILA, JAIME JOSÉ PICO ANAYA.**

KEY WORDS: Virtual laboratory, synchronous machine, laboratory manual of electric machines, synchronous generator, characteristic curves, Matlab-simulink.

DESCRIPTION:

This project degree document develops the realization of a virtual laboratory with the software Matlab-simulink, the assemblies raised in the practical part of the subject of electrical machines 2 corresponding to the synchronous machine, this being the general objective of the project degree. In The first stage of this work, a compilation of the information and theoretical foundation of the synchronous machine is made necessary to carry out the assemblies of each one of the tests in Matlab-Simulink. In the second stage, the tests are carried out in the laboratory of electrical machines of the university campus, all this in order to compare the results with the simulation files, taking into account the tendencies and behaviors of these according to the theory of the synchronous machine. In The third stage, the simulation files are adjusted looking to reduce the error of the matches. Finally, a protocol is created that allows the correct use of the files that make up the virtual laboratory. It Is hoped to make a good impact to the university community and encourage them to create more virtual laboratory, but making it clear that they are study alternatives, and not to replace or omit the experience offered by the campus's presence laboratory's University.

* Bachelor Degree Project.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD, Javier Enrique Solano Martínez. Co-director: Ing, Diego Alfonso Jiménez Alvernia.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander cuenta con unas instalaciones donde se lleva a cabo la parte práctica de la asignatura máquinas eléctricas 2. Pese a que se ha venido presentando dificultades y limitaciones técnicas, tales como la escasez de los equipos, el exceso de estudiantes por banco de trabajo y la necesidad de contar con un auxiliar al momento de usar el laboratorio; que obstaculizan complementar de manera adecuada el componente teórico e incluso esto ha representado un riesgo para la integridad de los estudiantes, debido a la falta de actualización y mantenimiento de los equipos de laboratorio. Este trabajo de grado busca la implementación de un laboratorio virtual como alternativa, para suplir estas necesidades y reforzar los conceptos que se buscan en la realización de las prácticas por medio de software de simulación como Matlab/Simulink.

Para el cumplimiento de los objetivos se presenta un marco teórico de la máquina síncrona, su funcionamiento y su modelo. Luego, se abarca las diferentes pruebas que se le realizan a la máquina y su respectivo procedimiento llevado a cabo en el laboratorio del campus universitario. Posteriormente, se explica la implementación de los bloques en Simulink necesarios para la construcción de las prácticas virtuales, se ha creado un protocolo para la manipulación correcta de estos archivos. Por último, para comprobar su buen funcionamiento, se exponen las comparaciones de los datos tomados en el laboratorio del campus y el laboratorio de modalidad virtual, donde se hace énfasis en los comportamientos de las curvas y sus tendencias de error.

1. GENERALIDADES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

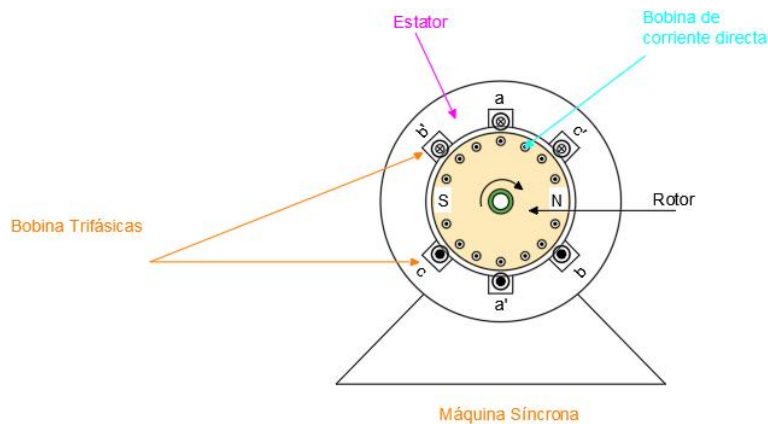
La máquina síncrona es una máquina eléctrica que se utiliza para transformar energía eléctrica en mecánica y viceversa, Gurú¹. La principal característica de esta máquina es que la velocidad del rotor es la misma que la de los campos magnéticos en el rotor y que depende de la frecuencia eléctrica y de los polos de la máquina como se muestra en la siguiente ecuación:

$$n_m = n_s = \frac{120 f_e}{P}$$

Donde:

- f_e , es la frecuencia eléctrica.
- n_s , es la velocidad síncrona en rpm.
- n_m , es la velocidad mecánica del campo magnético en rpm.
- P , numero de polos.

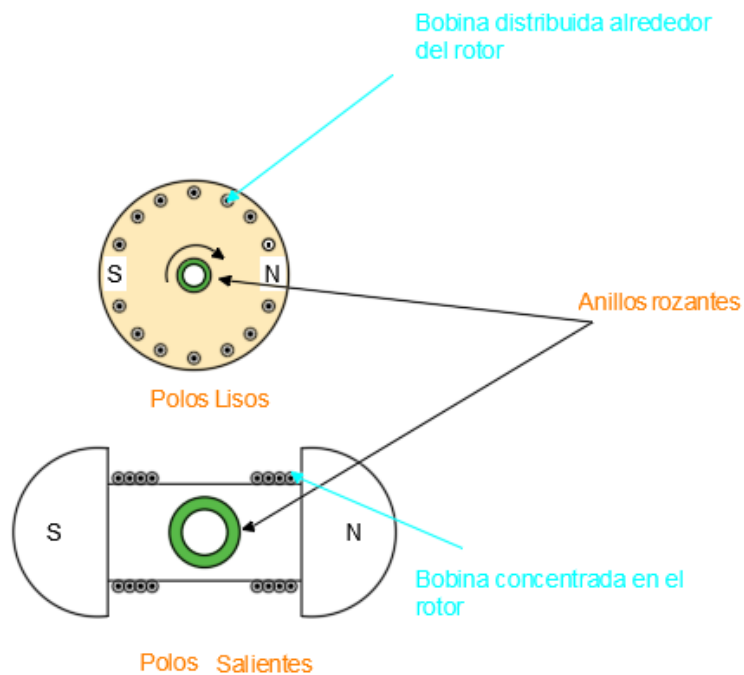
Fig. 1 Máquina Síncrona.



¹ GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Hüseyin R. Máquinas eléctricas y transformadores, 3ed. Alfaomega, 2003 Cap 7.

En la Fig. 1, se muestra el estator de la máquina síncrona es muy similar al de la máquina de inducción, posee un devanado trifásico pero su principal diferencia constructiva es el rotor, en donde se aloja una bobina a la cual se le inyecta corriente directa para crear un campo magnético constante. El rotor es construido de dos tipos, polos lisos y polos salientes.

Fig. 2 Tipos de Rotor de la Máquina Síncrona.



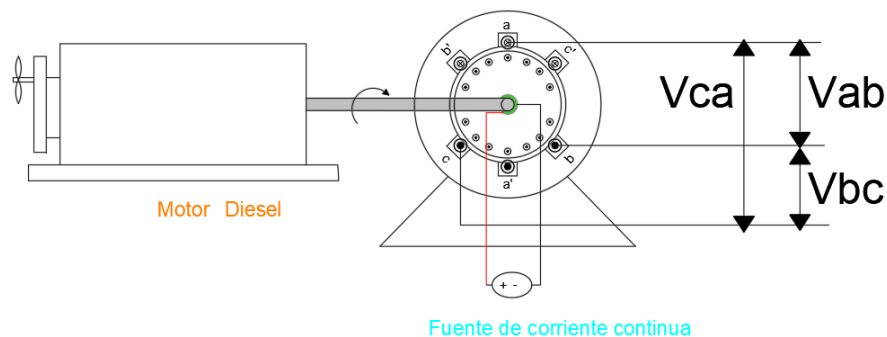
En ambos casos de la Fig.2, se utiliza un juego de anillos rozantes en el eje en donde se conecta a los terminales de la bobina y mediante escobillas poder alimentarlo con corriente directa mientras éste gira.

1.1 TIPOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

Las máquinas síncronas pueden funcionar de dos formas, como generador o como motor, Aller.²

- Funcionamiento como generador, Fig.3. Habitualmente denominado generador síncrono, para su funcionamiento se acopla en su eje un sistema mecánico que proporciona el par mecánico, por ejemplo, puede ser un motor diésel; luego, se inyecta corriente continua a la bobina del rotor a través de los anillos rozantes para crear el campo magnético inductor, finalmente el motor gira a cierta velocidad produciendo un campo magnético que induce tensión a las bobinas del estator cuya frecuencia depende de la velocidad del rotor.

Fig. 3 Funcionamiento como Generador de la Máquina Síncrona.

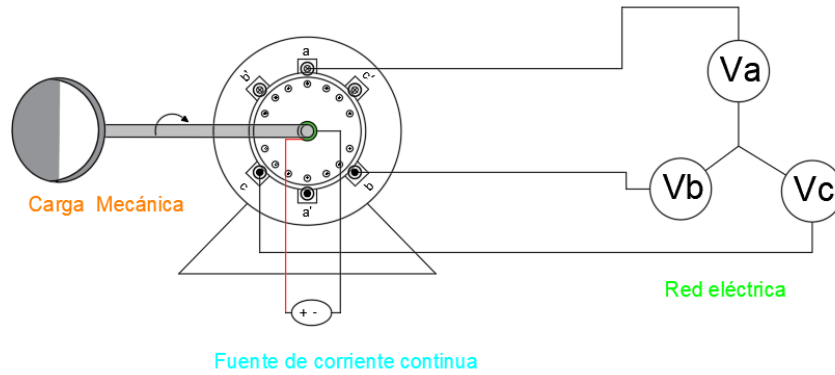


- Funcionamiento como motor, Fig. 4. Generalmente denominado motor síncrono, para su funcionamiento se conectan sus terminales del estator a una red eléctrica trifásica de la cual absorbe energía para luego transformarla y entregarla a una carga mecánica acoplada al eje de la máquina. Para este régimen, también, es necesario alimentar la bobina del rotor para crear el

² ALLER CASTRO, José Manuel. Introducción a la teoría general de las máquinas eléctricas rotativas. España, Universidad Simón Bolívar, 2000, Cap 8.

campo magnético constante y hacer que el rotor gire a la velocidad de sincronismo.

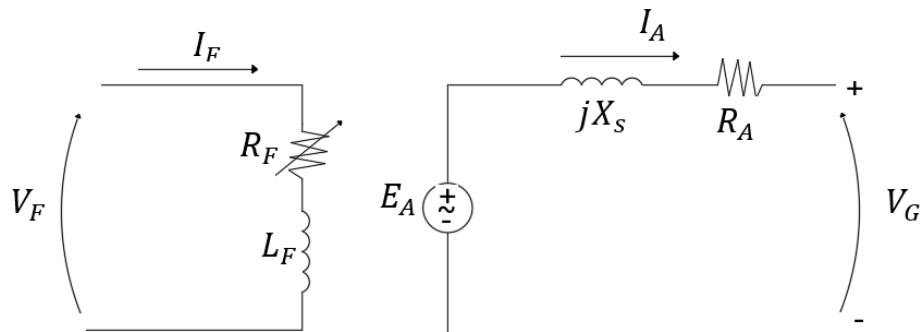
Fig. 4 Funcionamiento como Motor de la Máquina Síncrona.



1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR SÍNCRONO

El circuito equivalente del generador sincrónico se plantea en la Fig.5, Chapman³.

Fig. 5 Circuito Equivalente Generador del Síncrono.



Donde:

- V_F , Tensión del circuito de campo

³ CHAPMAN, Stephen J. Máquinas eléctricas, 3 ed. McGraw-Hill, 2000, Cap 5.

- I_F , Corriente del circuito de campo
- R_F , Resistencia del circuito de campo
- L_F , Inductancia del circuito de campo
- E_A , Tensión inducida
- jX_S , Reactancia de sincronismo.
- R_A , Resistencia de armadura o estator.
- I_A , Corriente de armadura o estator.
- V_G , Tensión en los terminales del generador.

La magnitud de la tensión de inducido en un estator dado como:

$$E_A = \sqrt{2} \pi N_C \varphi f$$

La tensión depende del flujo φ en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina.

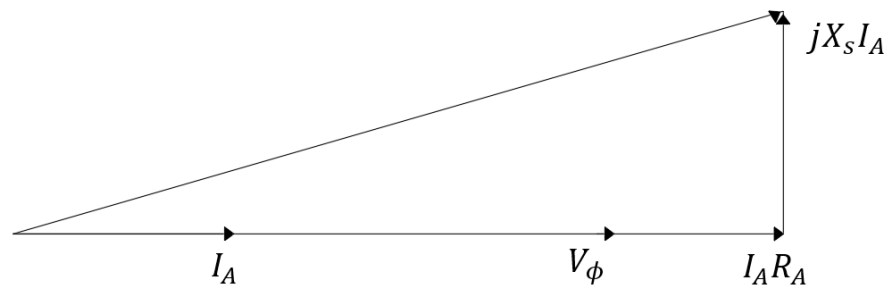
La tensión interna generado E_A es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en si depende de la corriente que fluye en el circuito de campo del rotor. La corriente del circuito de campo I_F está relacionada con el flujo φ .

1.3 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR SÍNCRONO

Debido a que las tensiones de un generador síncrono son alternos, usualmente se expresan como fasores. Puesto que los fasores tienen magnitud y ángulo, la relación entre ellos debe ser expresada por un dibujo bidimensional. Cuando las tensiones y las corrientes de una fase se grafican de tal forma que muestren relaciones entre ellos, el dibujo resultante se llama diagrama fasorial.

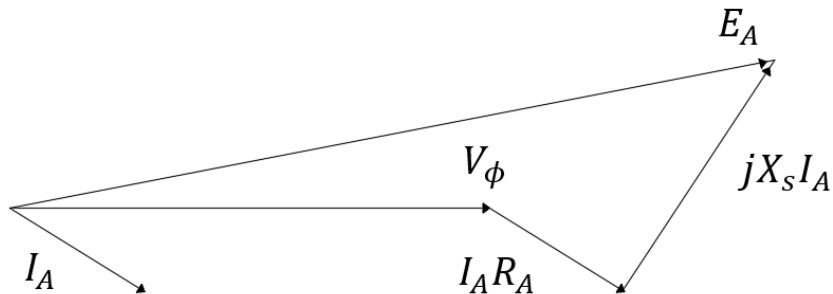
Por ejemplo, la Fig. 6 muestra estas relaciones cuando el generador está alimentando una carga cuyo factor de potencia es igual a la unidad (carga puramente resistiva), Fitzgerald⁴.

Fig. 6 Diagrama Fasorial del Generador Síncrono con Factor de Potencia Unitario.



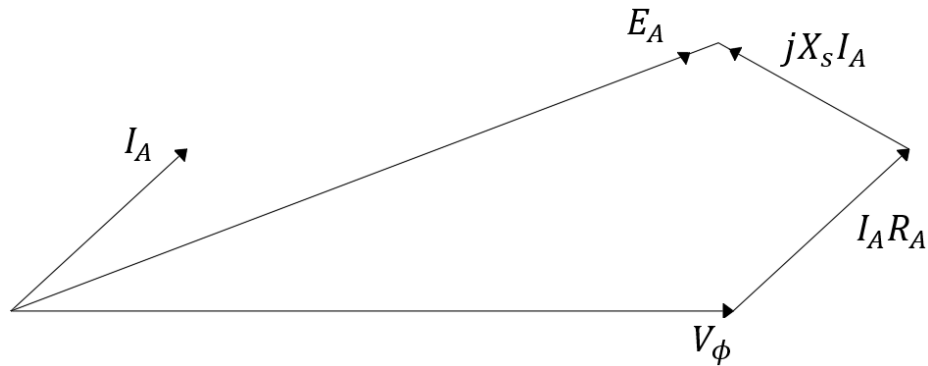
Este diagrama fasorial puede compararse con los diagramas fasoriales de generadores que operan con factores de potencia en atraso y en adelanto. La Fig. 7 y Fig. 8, muestran estos diagramas fasoriales.

Fig. 7 Diagrama Fasorial del Generador Síncrono con Factor de Potencia en Atraso.



⁴ FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, Charles, UMANS, Stephen. Máquinas Eléctricas, 6 ed. McGraw-Hill, 2005, Cap 5.

Fig. 8 Diagrama Fasorial del Generador Síncrono con Factor de Potencia en Adelanto.



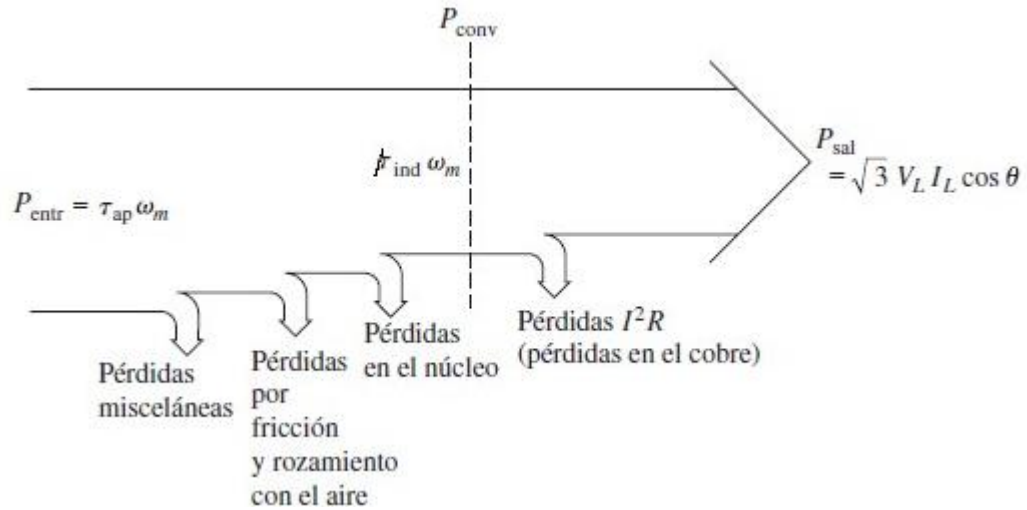
1.4 FLUJO DE POTENCIA EN EL GENERADOR SÍNCRONO

La conversión de la energía eléctrica depende de una fuente mecánica, que podría ser un motor Diesel, una turbina a vapor, una turbina hidráulica o sistemas similares. Cualquiera que sea la fuente, debe cumplir la propiedad básica de que su velocidad sea constante, independientemente de la demanda de potencia. Si esto no se cumple, la frecuencia resultante podría presentar fallas, Fraile⁵.

No toda esa potencia mecánica que entra al generador sincrónico se convierte en potencia eléctrica a la salida de la máquina. La diferencia entre la potencia de salida y de entrada representa las pérdidas de potencia en la máquina. La Fig. 9 muestra un diagrama de flujo de potencia para un generador sincrónico.

⁵ FRAILE MORA, Jesús. Maquinas eléctricas, 5ed. McGraw-Hill, 2003, Cap 5.

Fig. 9 Flujo de Potencia Generador Síncrono



La potencia mecánica es la potencia en el eje generador $P_{in} = \tau \omega$, mientras que la potencia mecánica convertida internamente en eléctrica está dada por $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3 E_A I_A \cos \gamma$, donde γ es el ángulo entre E_A e I_A . La diferencia entre la potencia de entrada al generador y la potencia convertida en el generador representa las pérdidas mecánicas, en el núcleo, y las pérdidas misceláneas de la máquina.

La potencia eléctrica real a la salida del generador síncrono se puede expresar en cantidades de línea como $P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta$ y en cantidades de fase como $P_{out} = 3 V_\phi I_A \cos \theta$. La potencia reactiva de salida puede ser expresada en cantidades de línea a línea como $Q_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta$ o en cantidades de fase como $Q_{out} = 3 V_\phi I_A \sin \theta$.

2. PRUEBAS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

Las pruebas en la máquina síncrona que se realizarán son las siguientes:

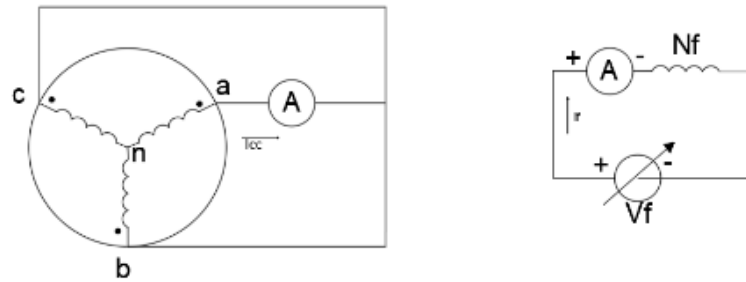
- Prueba de cortocircuito.
- Prueba de circuito vacío.
- Prueba de curva externa.
- Prueba de curva relación de regulación.
- Prueba de conexión en paralelo de generadores síncronos.
- Prueba de conexión generador síncrono a una red.
- Prueba de curvas en V.

2.1 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

La prueba en cortocircuito brinda información acerca de las potencialidades de corriente de un generador síncrono, Gurú⁶. Se lleva a cabo impulsando el generador a su velocidad nominal, con las terminales del devanado de la armadura en cortocircuito, como se aprecia en la Fig. 10 para un generador conectado en Y.

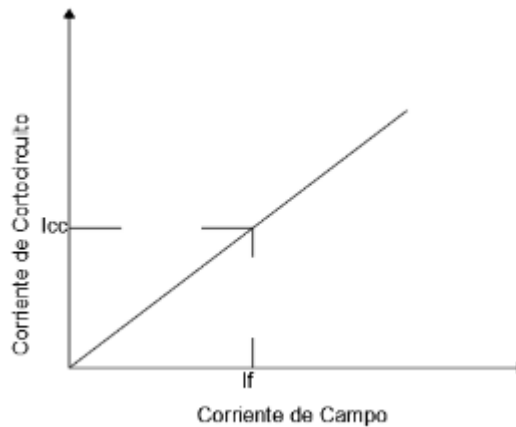
⁶ GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Hüseyin R. Máquinas eléctricas y transformadores, 3ed. Alfaomega, 2003, Cap 7.

Fig. 10 Esquema de Conexión para la Prueba de Cortocircuito.



Se coloca un amperímetro en serie con una de las tres líneas en cortocircuito. Se incrementa gradualmente la corriente del campo y se registra el valor correspondiente de la corriente. La corriente máxima de la armadura debe estar en un intervalo de 1 a 1.5 la corriente nominal del generador, para evitar deteriorar el aislamiento del generador. Con base en los datos se calcula la corriente por fase en cortocircuito. Cuando esta última se grafica como función de la corriente del campo, obteniendo la curva de cortocircuito, como se aprecia en la Fig. 11.

Fig. 11 Curva de Cortocircuito.

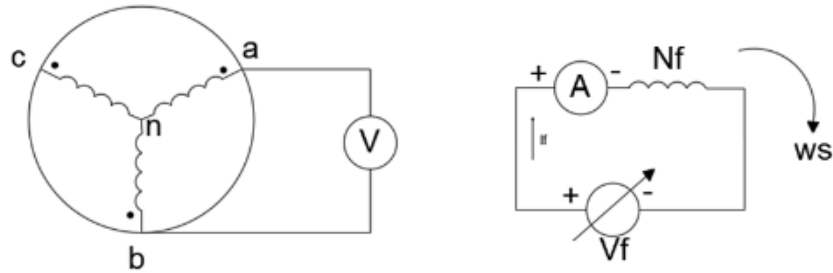


2.2 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

La prueba de circuito abierto se efectúa impulsando el generador a su velocidad nominal al tiempo que se deja abierto el devanado de la armadura. La corriente del

campo se varía en pasos apropiados y se registran los valores correspondientes de la tensión a circuito abierto entre dos pares cualesquiera de terminales de los devanados de armadura como se describe en la Fig. 12 para un generador conectado en Y, Gurú⁷ .

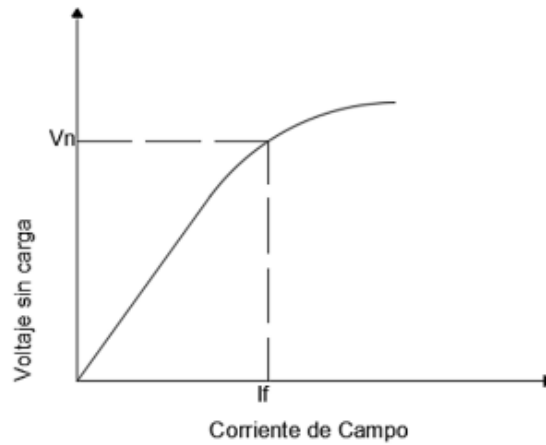
Fig. 12 Esquema de Conexión para la Prueba de Circuito Abierto.



La corriente del campo puede aumentarse hasta que la tensión de circuito abierto esté en un intervalo de 1.1 a 1.5 de la tensión nominal del generador. De los datos registrados para la tensión a circuito abierto es posible calcular la tensión por fase. Cuando se grafica la tensión por fase como función de la corriente de campo, se obtiene una gráfica llamada curva de circuito abierto tal como se muestra en la Fig. 13.vol

⁷ GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Hüseyin R. Máquinas eléctricas y transformadores, 3ed. Alfaomega, 2003, Cap7

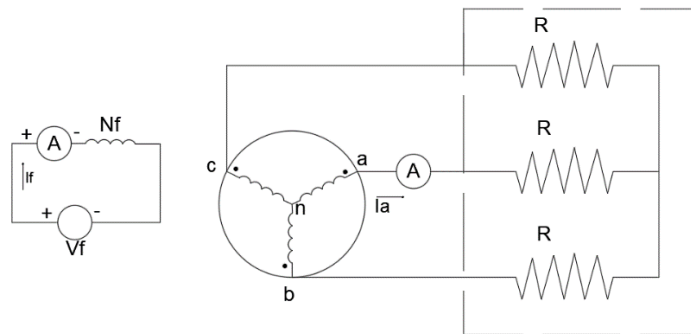
Fig. 13 Curva de Circuito Abierto.



2.3 PRUEBA CURVA EXTERNA

La prueba de curva externa se realiza llevando el generador a velocidad nominal al tiempo que la carga conectada en los bornes esté en la posición 0, como se muestra en la Fig. 14.

Fig. 14 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva Externa

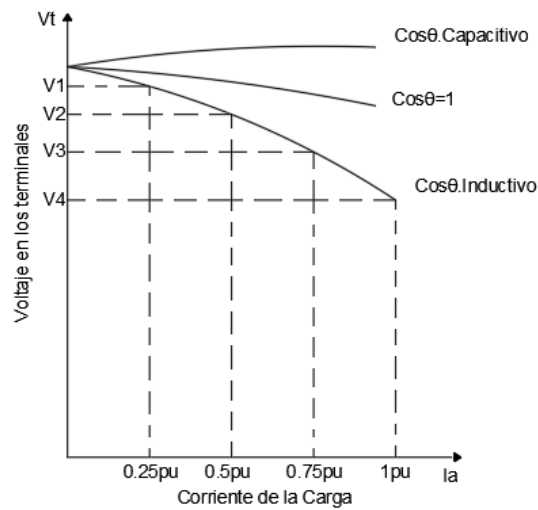


A continuación, variando la corriente de campo se busca el valor para el cual la tensión en bornes es la nominal y dicho valor de corriente será constante para la prueba, Chapman⁸. Posteriormente, variando la carga a posición 1 se toman las

⁸ CHAPMAN, Stephen J. Máquinas eléctricas, 3 ed. McGraw-Hill, 2000, Cap 5.

lecturas de corriente de armadura y tensión en bornes y se va armando la curva externa similar a la Fig. 15, confirmando la velocidad y corriente de campo constantes.

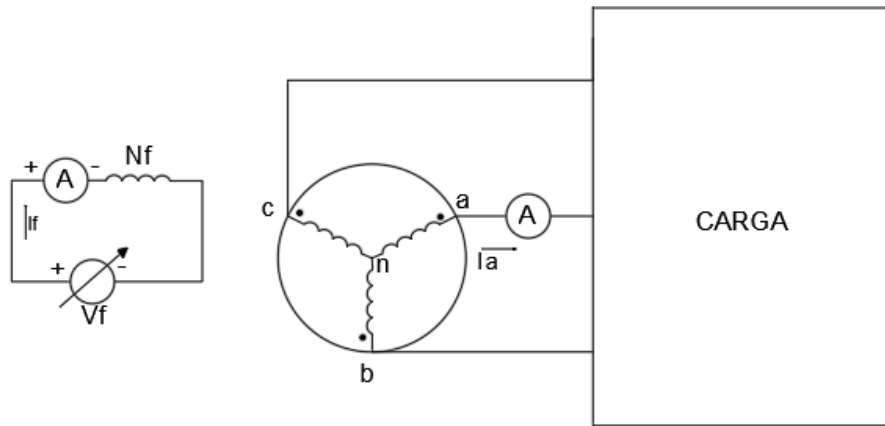
Fig. 15 Curva Externa para los Distintos Tipos de Cargas



2.4 PRUEBA CURVA RELACIÓN DE REGULACIÓN

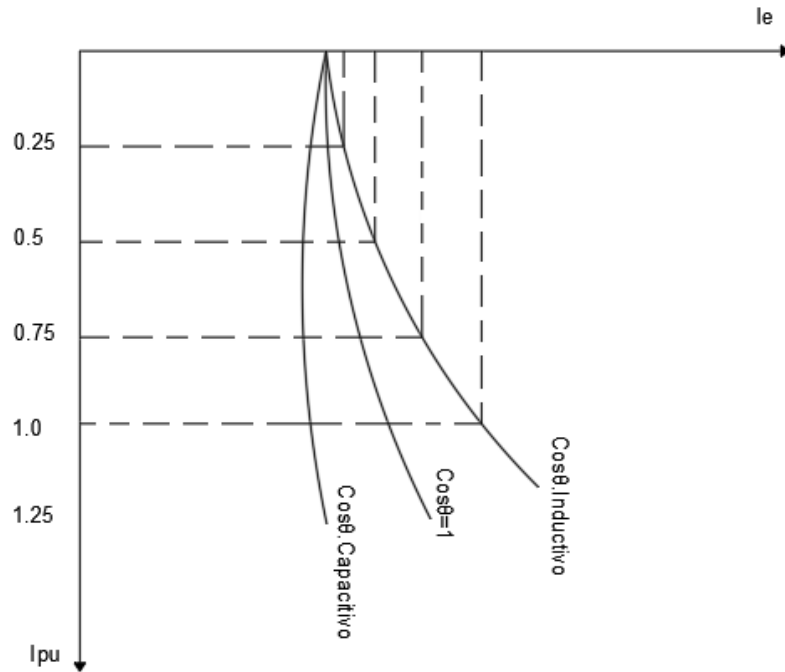
La prueba de curva relación de regulación, permite conocer la forma en que se ha de variar la corriente de excitación del campo, a medida que varía la carga para mantener la tensión en bornes constante, con el montaje planteado en la Fig. 16.

Fig. 16 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva Relación de Regulación



Se realiza ubicando la carga en la posición 0, se modifica la corriente de excitación para conseguir la tensión nominal en bornes, luego se varía la carga, esto va a producir un cambio en la tensión en bornes y se modifica la corriente de excitación para corregirla, tomar las lecturas de corriente de armadura y corriente de excitación para cada posición, realizar esto para tipo de carga resistiva y tipo de carga inductiva, se espera obtener curvas vistas en la Fig. 17.

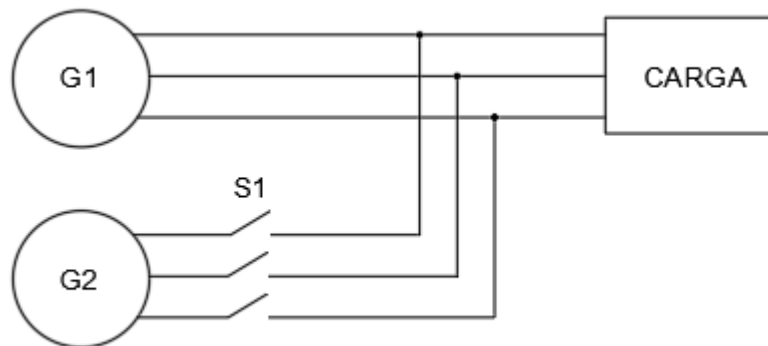
Fig. 17 Curva Relación de Regulación para los Distintos Tipos de Cargas



2.5 PRUEBA CONEXIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS

La Fig. 18 muestra un generador síncrono G_1 que suministra potencia a una carga, otro generador G_2 que se puede colocar en paralelo con G_1 cerrando el interruptor S_1 .

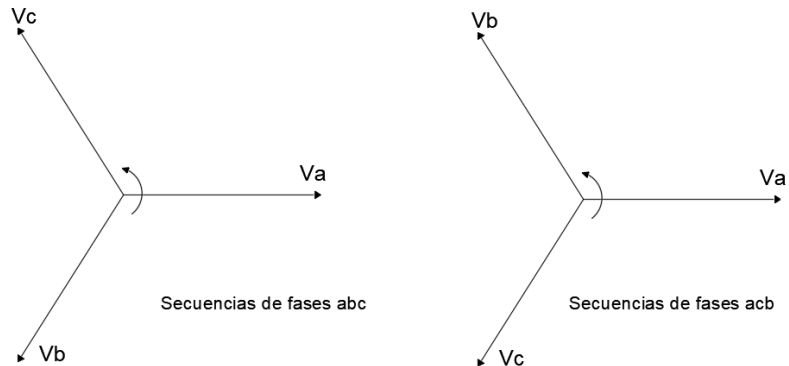
Fig. 18 Esquema de Conexión para la Prueba de Generadores en Paralelo.



Si el interruptor se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente y que la carga pierda potencia. Si las tensiones no son exactamente iguales en cada uno de los generadores que se conectan, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor. Para evitar este problema, las tres fases deben tener exactamente la misma magnitud de tensión y ángulo de fase que el conductor. En otras palabras, la tensión de la fase a debe ser exactamente igual a la tensión en la fase a' , y así en forma sucesiva para las fases $b-b'$ y $c-c'$. Para lograr esto se deben cumplir las siguientes condiciones de sincronismo:

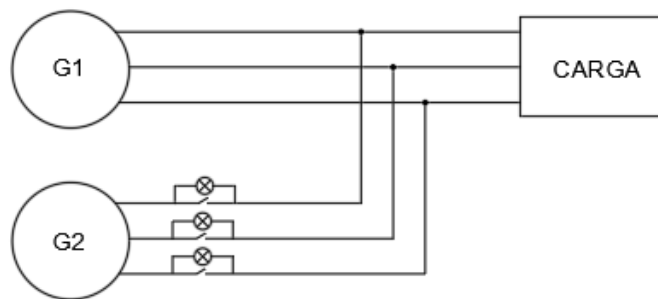
- Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fases (Fig. 19).
- La tensión de los dos generadores deben tener un valor eficaz igual y sus fases deben coincidir.
- La frecuencia de los dos generadores, deben ser igual.

Fig. 19 Diagrama de Secuencia de Fases.



Para verificar estas condiciones, se emplea el método de las tres lámparas que se muestra en la Fig. 20, según Chapman⁹. Para esta comprobación, se arranca la máquina por medio del motor teniendo en cuenta que se deben prender y apagar al mismo tiempo las tres lámparas, esto indica que existe la misma secuencia de fase, si se prenden y apagan muy rápido es que las frecuencias son diferentes, lo cual se soluciona subiendo la velocidad del motor primario aumentando el flujo con el reóstato de campo. Si prenden y apagan en desorden es indicador que no tienen la misma frecuencia de fases.

Fig. 20 Esquema de Conexión para el Método de las Tres Lámparas.



⁹ CHAPMAN, Stephen J. Máquinas eléctricas, 3 ed. McGraw-Hill, 2000, Cap 5.

2.6 PRUEBA CONEXIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO A UNA RED

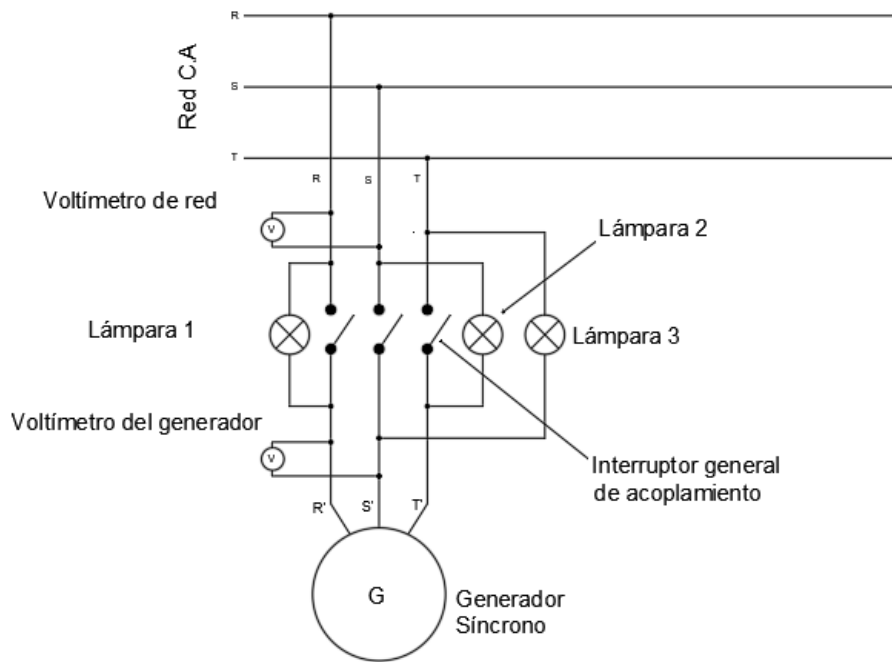
La conexión en paralelo de un alternador a la red implica una serie de operaciones complejas que constituyen la llamada sincronización de la máquina. Es evidente que tal conexión se realice sin ninguna perturbación, se hace necesario que el valor instantáneo de la tensión del generador tenga igual magnitud y fase que el valor instantáneo de la tensión de la red. Teniendo en cuenta esta exigencia se deduce las siguientes condiciones necesarias para poder acoplar en paralelo un alternador a la red.

- Las secuencias de fases del alternador y la red deben ser idénticas.
- La tensión del generador debe tener un valor eficaz igual a la tensión de la red y sus fases deben coincidir.
- Las frecuencias de ambas tensiones deben ser iguales

Para verificar estas condiciones se emplean en la práctica unos aparatos denominados sincronoscopios, que en el caso más simple están formados por tres lámparas incandescentes, indicado por Fraile¹⁰. En la Fig. 21, se muestra un circuito de este tipo. La operación comienza arrancando la máquina por medio del motor primario hasta una velocidad cercana a la de sincronismo. Se introduce entonces la excitación en el inductor del alternador y se va elevando ésta gradualmente hasta que la tensión en bornes del generador coincide con la tensión de la red. En estas condiciones, si la secuencia de las fases del generador y la red son idénticas y las tres lámparas del sincronoscopio se colocan formando los vértices de un triángulo equilátero con las condiciones indicadas en la Fig. 21, aparecerá una rotación en la iluminación de las lámparas cuyo brillo cambiará con el tiempo.

¹⁰ FRAILE MORA, Jesús. Maquinas eléctricas, 5ed. McGraw-Hill, 2003, Cap 5.

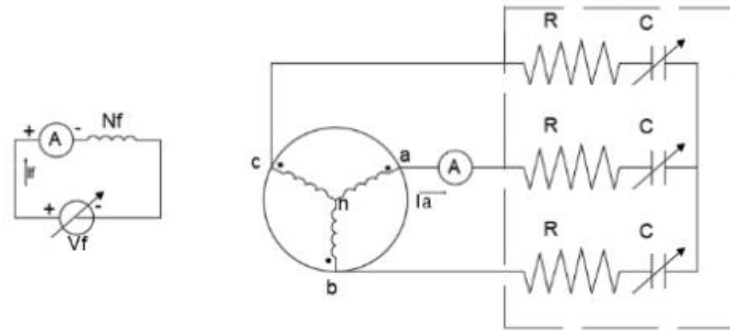
Fig. 21 Esquema de Conexión para la Prueba del Generador Síncrono a la Red.



2.7 PRUEBA CURVA EN V

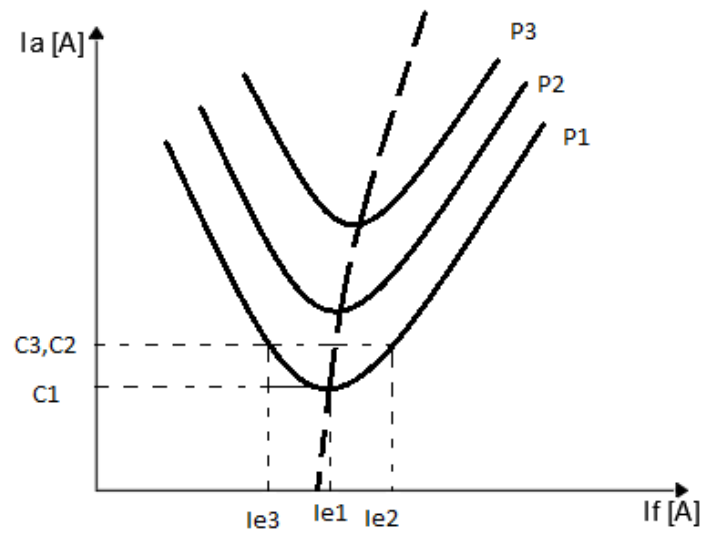
La curva en V de la máquina síncrona permite ver el comportamiento de la corriente de armadura que se tiene al variar la corriente de excitación. Para dicha prueba se arranca la máquina a velocidad nominal, y se conecta una carga RC de potencia activa constante, como se muestra en la Fig. 22, se mantiene la tensión en bornes constante y variando la carga capacitiva.

Fig. 22 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva en V.



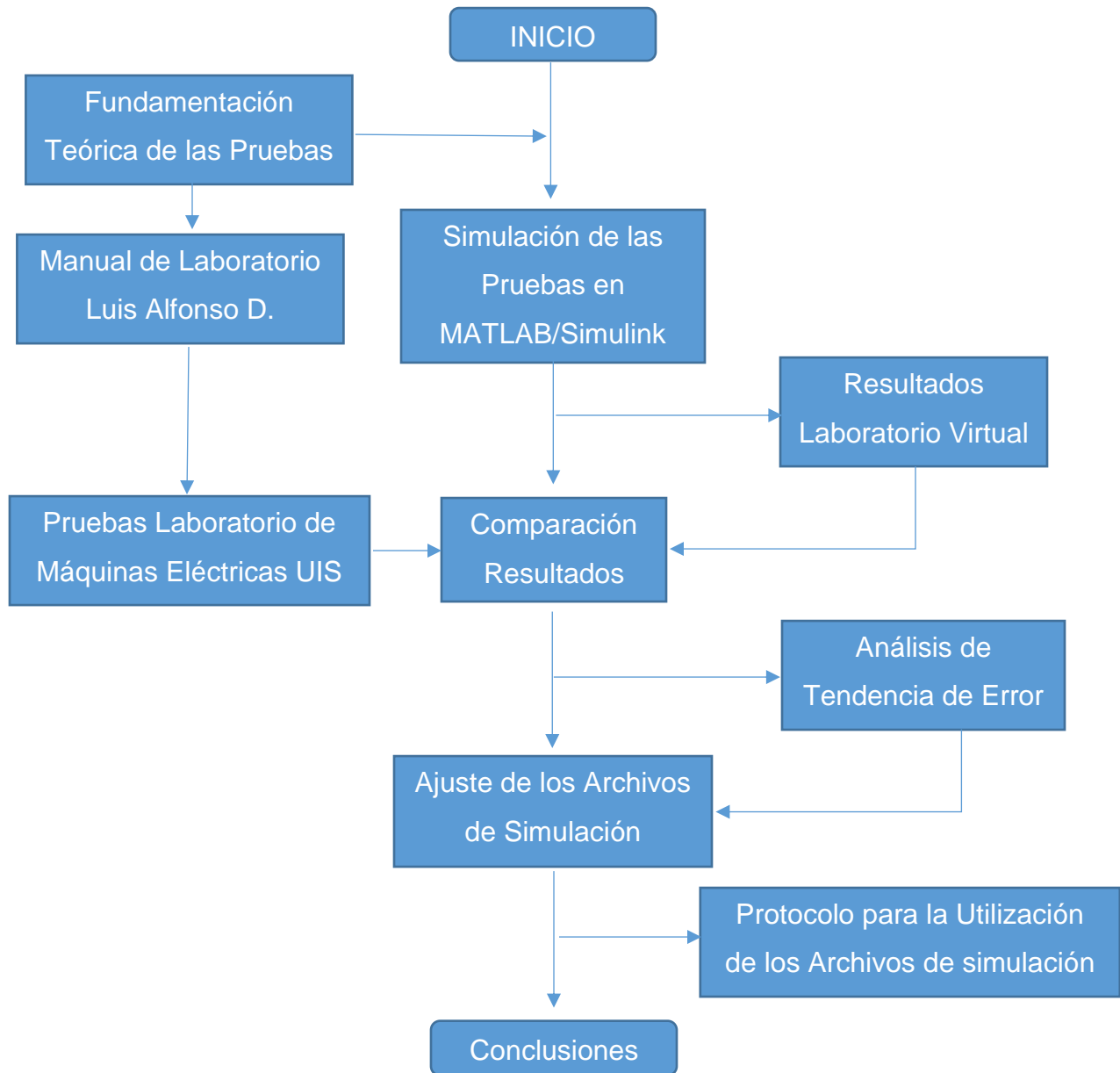
Se toma los datos de corriente de excitación y corriente de armadura, se repite este proceso para los diferentes valores de la parte capacitiva de la carga, y se realiza la gráfica de la cual se obtendrá una curva similar a la Fig. 23.

Fig. 23 Curva en V de la Máquina Síncrona.



3. METODOLOGIA APLICADA

Para la realización del proyecto se plantea lo siguiente:



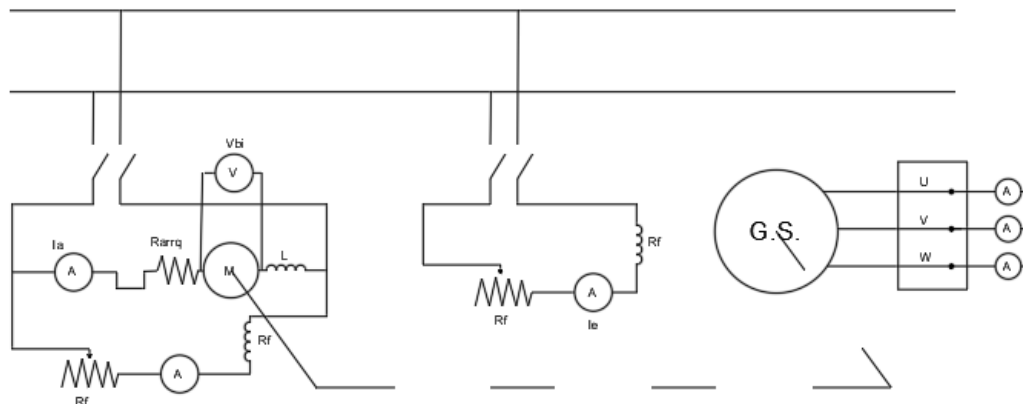
3.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS PRUEBAS

Basándose en la Guía de Laboratorio de Máquinas Eléctricas, de Luis Alfonso D., se realizaron las pruebas en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus universitario, siguiendo el siguiente procedimiento para cada práctica.

3.1.1 **Prueba de cortocircuito en el laboratorio UIS.** La realización de la prueba de corto circuito en el laboratorio de la UIS comprende el siguiente paso a paso:

1. Realizar el circuito presentado en la siguiente Fig. 24:

Fig. 24 Esquema de Conexión para la Prueba de Cortocircuito en el Laboratorio.



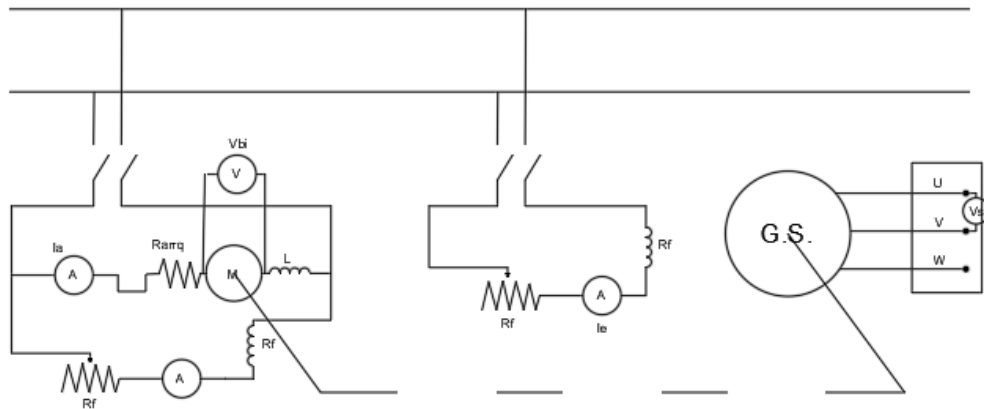
2. Luego se arranca el motor DC y se regula su velocidad hasta la nominal del generador, igual a 1800 rpm.
3. Se lleva el reóstato de excitación a su máximo valor y energizar el circuito de excitación.
4. Manteniendo la velocidad constante en 1800 rpm, medir I_F e I_A en el generador, repetir para otros valores de I_F tomados en forma ascendente hasta que $I_A = 1,15 I_N$, es decir, hasta que la corriente de

armadura sea un 15% más grande que la corriente nominal de la máquina.

3.1.2 **Prueba de circuito abierto en el laboratorio UIS.** La realización de la prueba de circuito abierto en el laboratorio de la UIS comprende el siguiente paso a paso:

1. Realizar el circuito presentado en la siguiente Fig. 25:

Fig. 25 Esquema de Conexión para la Prueba Circuito Abierto en el Laboratorio.

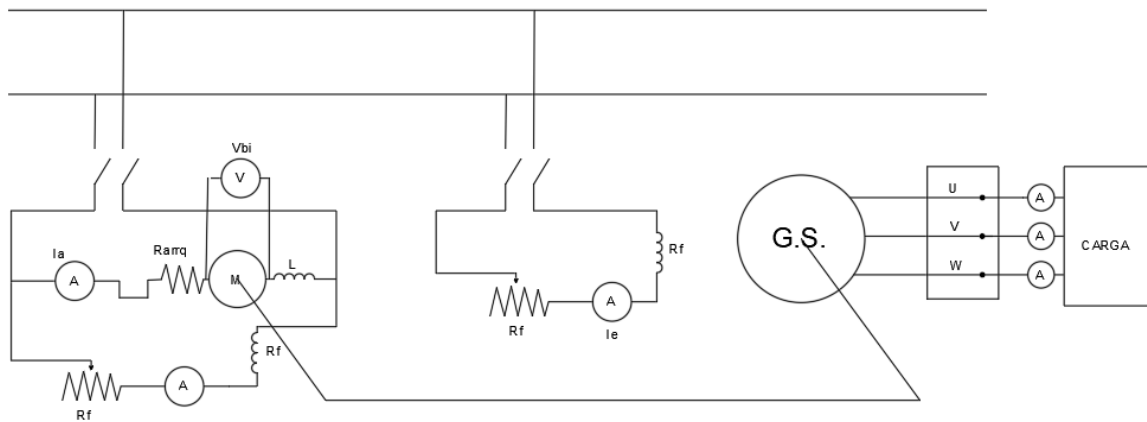


2. Luego se arranca el motor DC y se regula su velocidad hasta la nominal del generador, igual a 1800 rpm.
3. Sin conectar la excitación del generador medir V_L , tensión en bornes del inducido, correspondiente a la tensión remanente.
4. Se lleva el reóstato de excitación a su máximo valor y energizar el circuito de excitación.
5. Manteniendo la velocidad constante en 1800 rpm, medir V_L e I_F en el generador, repetir para otros valores de I_F , tomados en forma ascendente, hasta que el $V_L = 1,2 V_N$, es decir, hasta que la tensión medida en bornes del estator esté un 20% por encima de la tensión nominal de la máquina.

3.1.3 **Prueba curva externa.** La realización de la prueba de curva externa en el laboratorio de la UIS comprende el siguiente paso a paso:

1. Realizar el circuito presentado en la siguiente Fig. 26:

Fig. 26 Esquema de Conexión para la Prueba Curva Externa en el Laboratorio

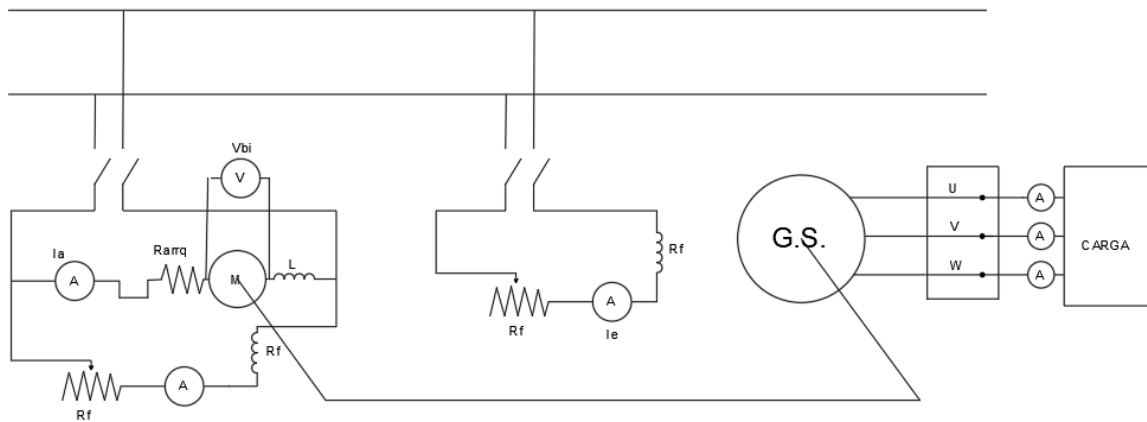


2. Luego se arranca el motor DC y se regula su velocidad hasta la nominal del generador, igual a 1800rpm.
3. Se lleva el reóstato de excitación a su máximo valor y energizar el circuito de excitación.
4. Manteniendo la velocidad constante en 1800 rpm y la corriente de excitación constante.
5. Medir V_T e I_A en el generador variando los valores en la carga.

3.1.4 **Prueba curva relación de regulación.** La realización de la prueba de curva externa en el laboratorio de la UIS comprende el siguiente paso a paso:

1. Realizar el circuito presentado en la siguiente Fig. 27:

Fig. 27 Esquema de Conexión para la Prueba de Curva Relación de Regulación en el Laboratorio

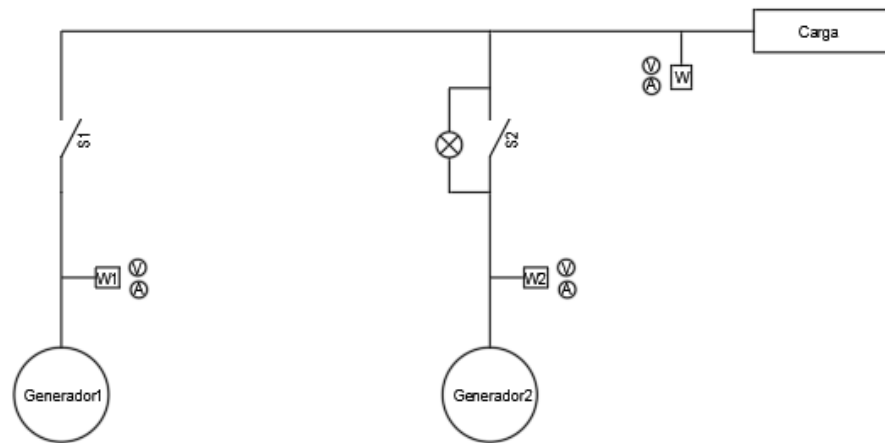


2. Luego se arranca el motor DC y se regula su velocidad hasta la nominal del generador, igual a 1800rpm.
3. Se lleva el reóstato de excitación a su máximo valor y energizar el circuito de excitación.
4. Manteniendo la velocidad constante en 1800 rpm y variar la corriente de excitación para mantener la tensión de bornes constante.
5. Medir I_F e I_A en el generador para cualquier carga.

3.1.5 **Prueba conexión en paralelo de generadores síncronos.** La realización de la prueba de conexión en paralelo de dos generadores síncronos comprende el siguiente paso a paso en el laboratorio de la UIS:

1. Realizar la conexión que se muestra en el diagrama unifilar de la siguiente Fig. 28.

Fig. 28 Esquema de Conexión para la Prueba de Generadores en Paralelo en el Laboratorio.

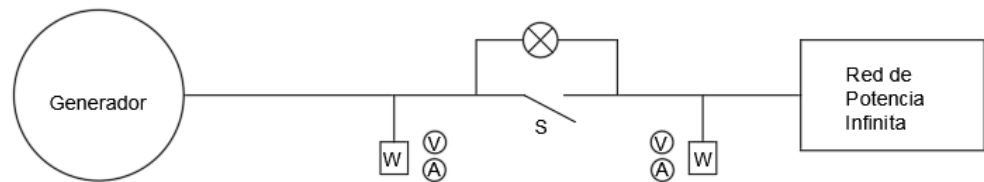


2. Arrancar el generador1 y conectar carga inductiva. Medir potencia activa, tensión y corriente.
3. Arrancar el generador2, medir tensión en bornes y frecuencia en ambos generadores, regular estos parámetros hasta que sean iguales.
4. Una vez cumplida el anterior paso, realizar el instante de sincronismo con ayuda del método de las lámparas apagadas; efectuándose en el instante en que los fasores o las ondas de tensión de todas las fases coincidan totalmente, esto ocurrirá cuando las lámparas se apaguen.
5. Cerrar el interruptor manualmente, cuando las lámparas estén apagadas, quedando así conectado el generador1 en paralelo con el generador2.
6. Una vez conectado los dos generadores, repartir por igual potencia activa entre los dos generadores, manteniendo la frecuencia y la tensión constantes. Medir la potencia y corriente de cada generador y de la carga, antes de alcanzar la repartición por igual de la carga.

3.1.6 **Prueba conexión generador síncrono a la red.** La realización de la prueba de conexión del generador síncrono a la red en el laboratorio de la UIS comprende el siguiente paso a paso:

1. Realizar la conexión que se muestra en el diagrama unifilar de la siguiente Fig. 29.

Fig. 29 Esquema de Conexión para la Prueba del Generador Síncrono a la Red en el Laboratorio.

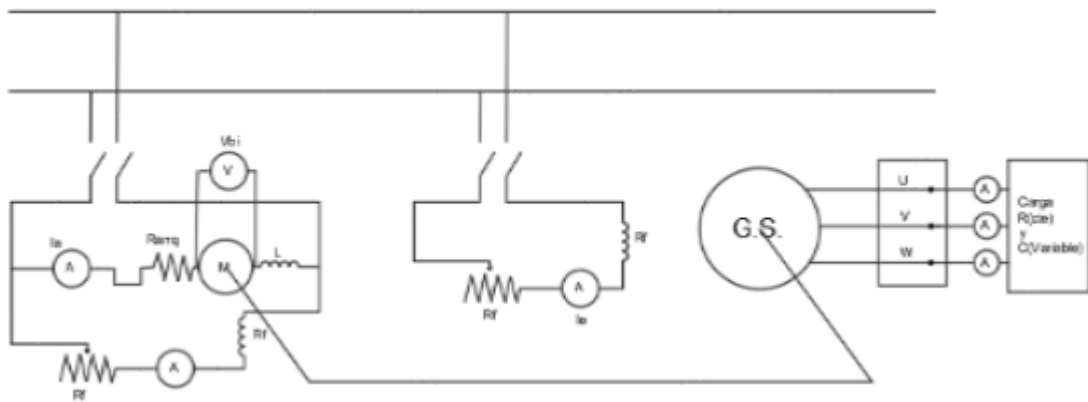


2. Arrancar el generador y llevar a velocidad nominal.
3. Medir tensión en bornes y frecuencia. Regular estos parámetros hasta que sean iguales con los de la red de potencia infinita.
4. Una vez cumplida las anteriores condiciones, realizar el instante de sincronismo con ayuda del método de las lámparas apagadas; efectuándose en el instante en que los fasores o las ondas de tensión de todas las fases coincidan totalmente, esto ocurrirá cuando las lámparas se apaguen.
5. Cerrar el interruptor manualmente, cuando las lámparas estén apagadas, quedando así conectado el generador con la red de potencia infinita.
6. Medir potencia activa, corriente y tensión.

3.1.7 **Prueba curva en V.** La realización de la prueba para la obtención de las curvas en V del generador síncrono en el laboratorio de la UIS comprende el siguiente paso a paso:

1. Realizar el circuito presentado en la siguiente Fig. 30:

Fig. 30 Esquema de Conexión de la Prueba de Curva en V en el Laboratorio.



2. Luego se arranca el motor DC y se regula su velocidad hasta la nominal del generador, igual a 1800rpm.
3. Se lleva el reóstato de excitación a su máximo valor y energizar el circuito de excitación.
4. Manteniendo la velocidad constante en 1800 rpm, la potencia activa constante y la tensión en bornes constante.
5. Medir I_F e I_A en el generador variando los valores de capacitancia en la carga.

Los resultados de las practicas realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus universitario, se pueden consultar en el **ANEXO O**.

3.2 SIMULACIÓN DE LAS PRUEBAS EN MATLAB/SIMULINK

El bloque seleccionado para representar la máquina síncrona en cada una de las pruebas es el bloque *Simplified Synchronous Machine pu Units*, de la siguiente manera.

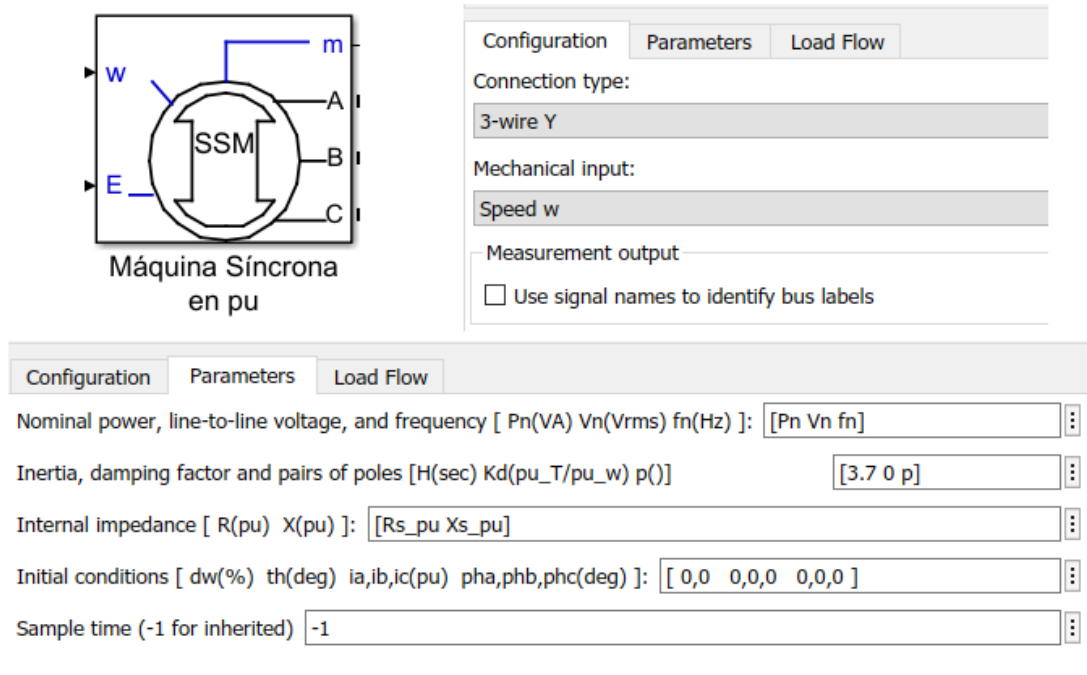
Para lograr los montajes y el correcto uso de la herramienta de simulación, fueron necesarios materiales guías de simulink¹¹.

En la Fig. 31, se describe el bloque que estudia el estado estable de la máquina síncrona como se considera en la asignatura Máquinas Eléctrica 2; debido a esto no se consideran los otros bloques de máquina síncrona ya que hacen énfasis en el estado dinámico de la máquina, modelo usado por Kundur¹².

¹¹ Mathworks Inc. Using Simulink. E.E.U.U. The MathWorks, 2002

¹² KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994, Cap 6.

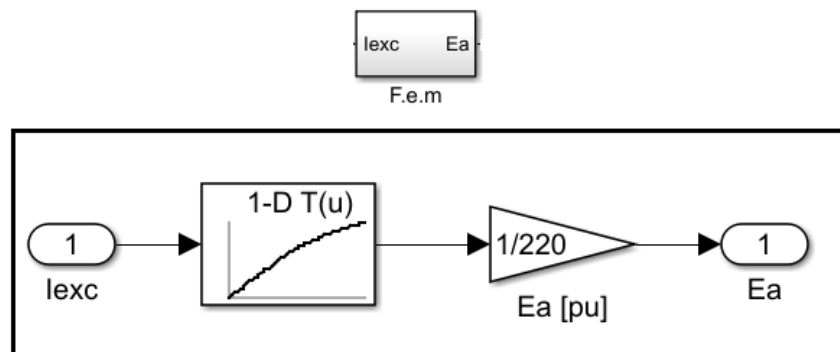
Fig. 31 Bloque Máquina Síncrona en pu de Simulink



Debido a que el modelo no contempla el circuito de campo, se opta por crear un subsistema que cumpla el comportamiento de la corriente de excitación del laboratorio del campus universitario, llamado F.e.m.

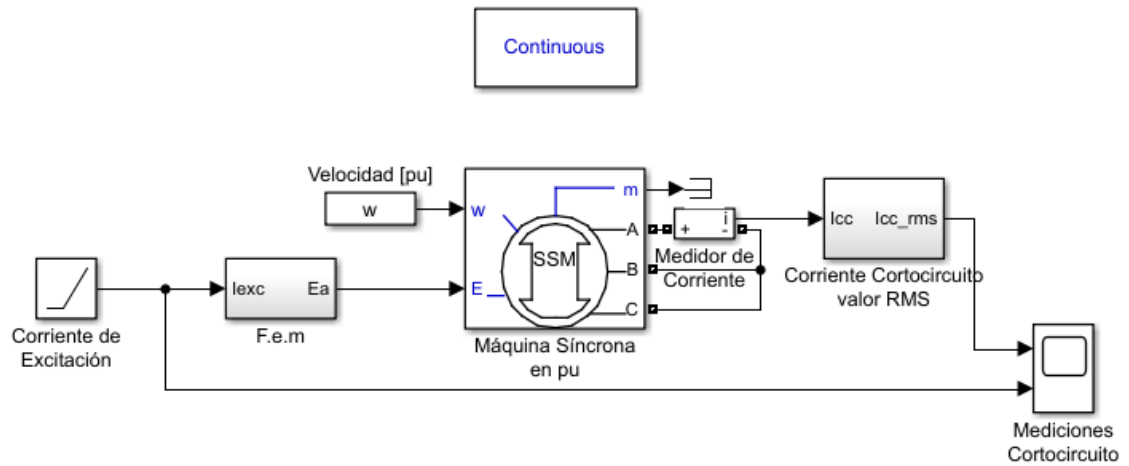
En la Fig. 32, se describe el subsistema F.e.m. donde se utilizó *1-D Lookup Table* en cascada con el bloque *Gain*.

Fig. 32 Subsistema F.e.m en Simulink



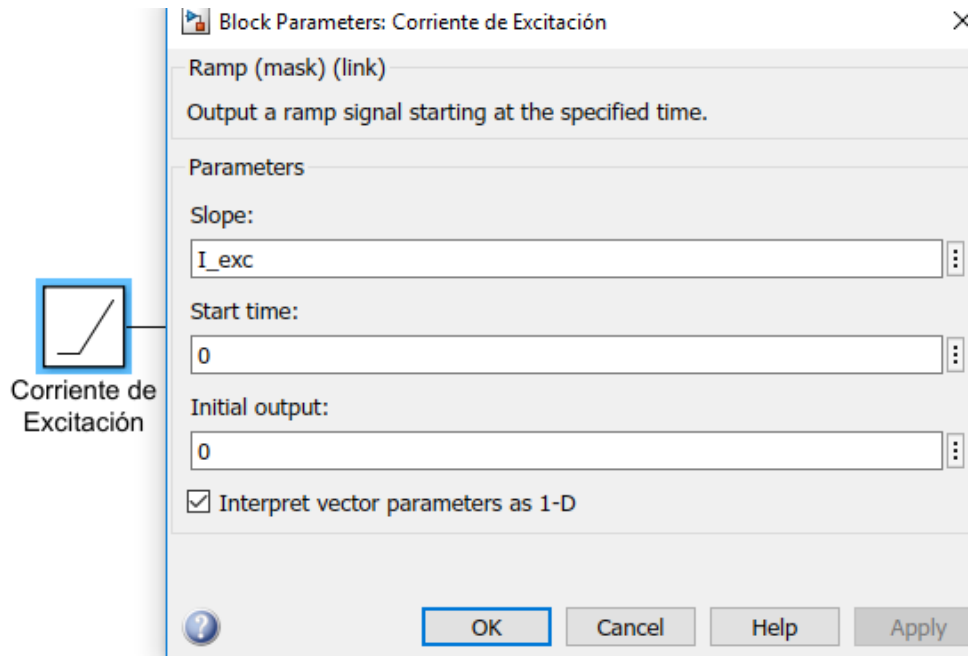
3.2.1 **Construcción prueba cortocircuito.** La Fig. 33, muestra los bloques utilizados en la simulación de la prueba de cortocircuito.

Fig. 33 Bloques para la Prueba de Cortocircuito en Simulink



Corriente de excitación: para representar la corriente de excitación se utilizó el bloque *Ramp*, como se muestra en la Fig. 34.

Fig. 34 Bloque Corriente de Excitación para la Prueba de Cortocircuito en Simulink



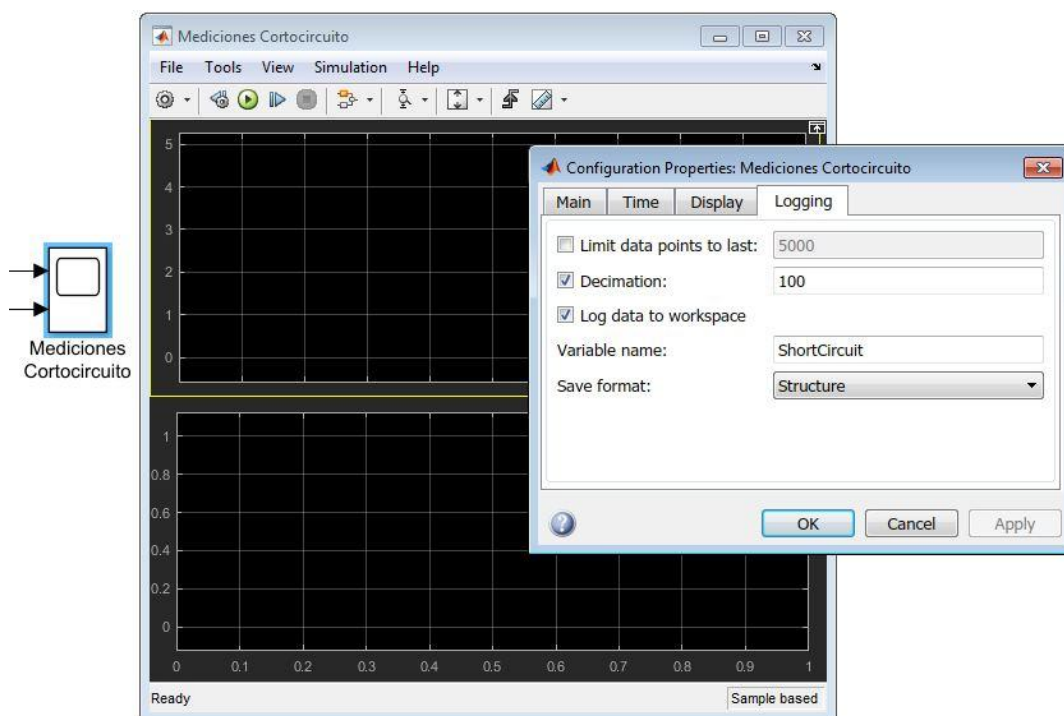
Velocidad [pu]: para representar la velocidad en por unidad se utilizó el bloque *Constant*.

Medidor de corriente: para medir la corriente de armadura se utilizó el bloque *Current Measurement*.

Corriente de cortocircuito valor RMS: para obtener el valor rms de la corriente se utilizó un subsistema el cual contiene un bloque de *Fourier* en cascada con el bloque *Gain*.

Mediciones cortocircuito: se utilizó el bloque *Scope* configurándolo con dos entradas, y activando el registro de datos al espacio de trabajo de Matlab de la siguiente manera. Como se muestra en la Fig.35.

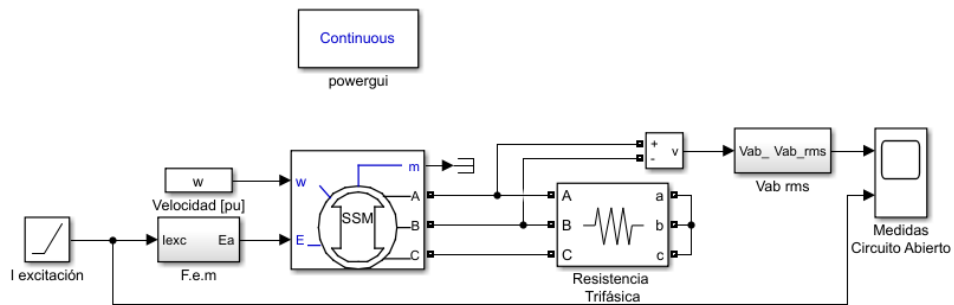
Fig. 35 Configuración del Bloque Scope en Simulink



Los datos de las Fig. 33, Fig. 34 y Fig. 35 se presentarán con más detalle en los **ANEXO A** y **ANEXO B**.

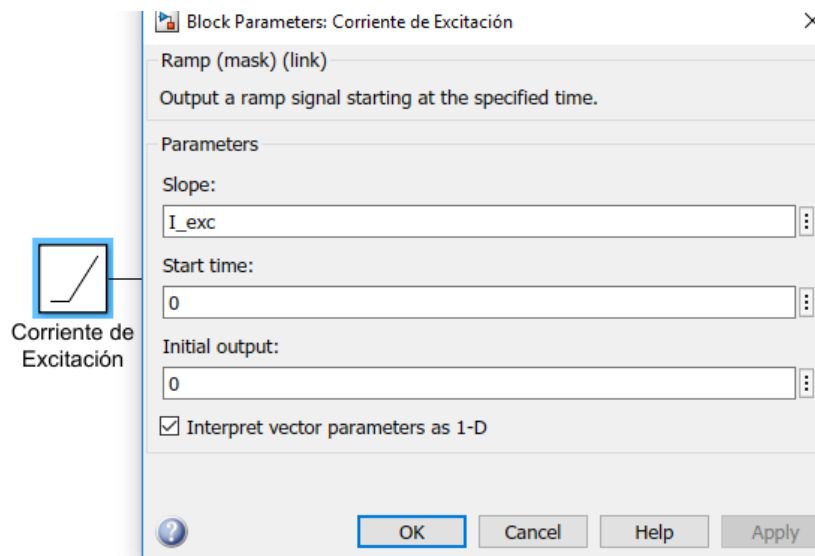
3.2.2 Construcción prueba circuito abierto. La Fig. 36 muestra los bloques utilizados en simulink para la prueba.

Fig. 36 Bloques para la Prueba de Circuito Abierto en Simulink



Corriente de excitación: Se utilizó el bloque *Ramp*, para representar la corriente de excitación. Como se muestra en la Fig. 37.

Fig. 37 Bloque Corriente de Excitación en la Prueba de Circuito Abierto en Simulink



Velocidad [pu]: Se utilizó el bloque *Constant*, para representar la velocidad en por unidad.

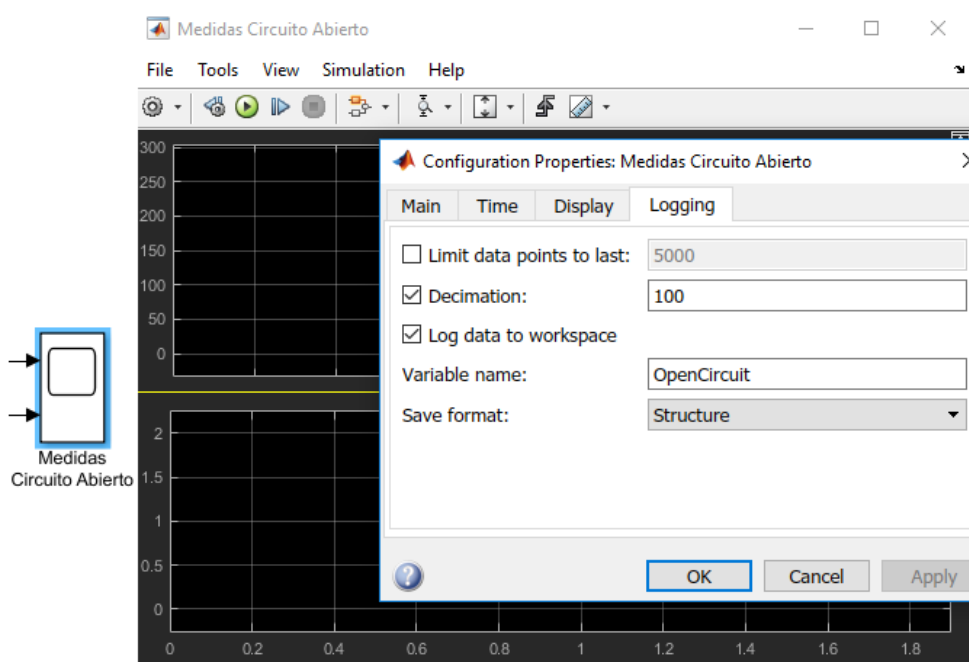
Resistencia trifásica: Resistencia alta que no permite el paso de corriente.

Medidor de tensión: Medir la tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement*.

Tensión en terminales valor RMS: Se utilizó un subsistema el cual contiene un bloque de *Fourier* en cascada con el bloque *Gain*, para obtener el valor rms de la tensión.

Mediciones circuito abierto: Se utilizó el bloque *Scope* configurándolo con dos entradas, y activando el registro de datos al espacio de trabajo de Matlab de la siguiente manera. Como se muestra en la Fig. 38.

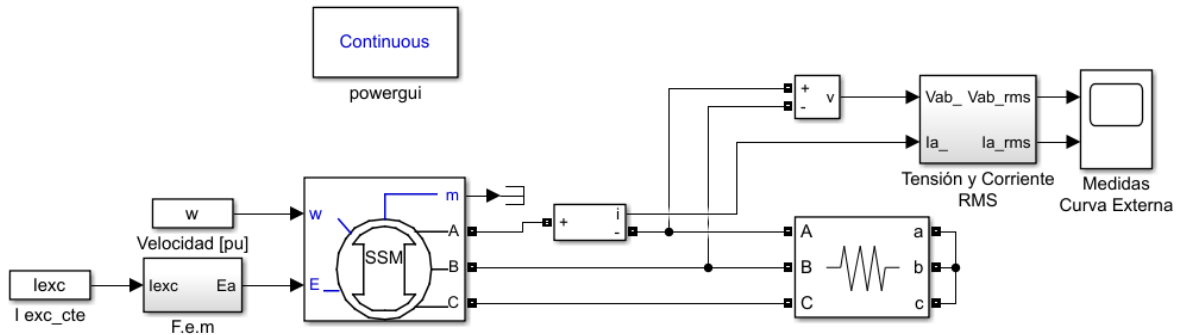
Fig. 38 Configuración Bloque Scope en la Prueba de Circuito Abierto en Simulink



Los datos de las Fig. 36, Fig. 37 y Fig. 38 se presentarán con más detalle en los **ANEXO C** y **ANEXO D**.

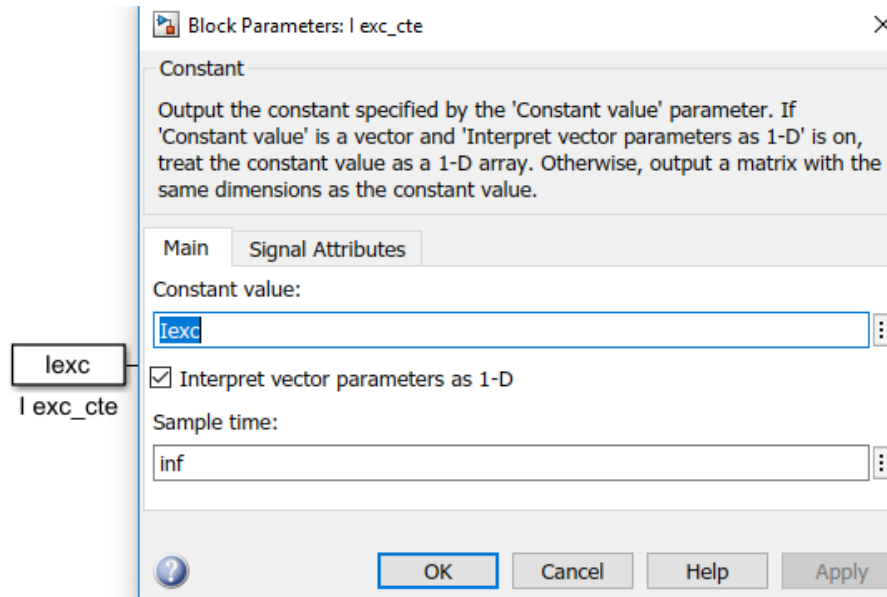
3.2.3 **Construcción prueba curva externa.** La Fig. 39 muestra los bloques utilizados en simulink para la prueba.

Fig. 39 Bloques para la Prueba de Curva Externa en Simulink



Corriente de excitación: Se utilizó el bloque Constant, para representar la corriente de excitación constante. Como se muestra en la Fig. 40.

Fig. 40 Bloque Corriente de Excitación para la Prueba Curva Externa en Simulink



Velocidad [pu]: Se utilizó el bloque *Constant*, para representar la velocidad en por unidad.

Medidor de corriente: Se utilizó el bloque *Current Measurement*, para medir la corriente de armadura.

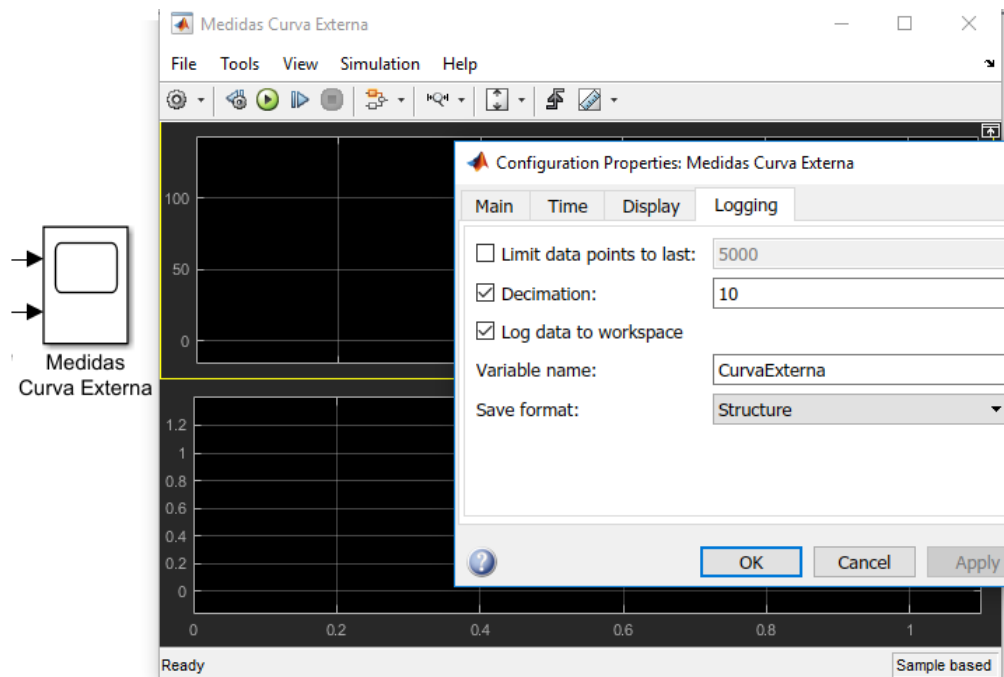
Medidor de tensión: Medir la tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement*.

Tensión en terminales y corriente armadura en valor RMS: Se utilizó un subsistema el cual contiene un bloque de *Fourier* en cascada con el bloque *Gain*, para obtener el valor rms de la tensión y la corriente.

Resistencia trifásica variable: se utilizó el bloque *Three-Phase Series RLC Branch*, que representa una carga resistiva variable.

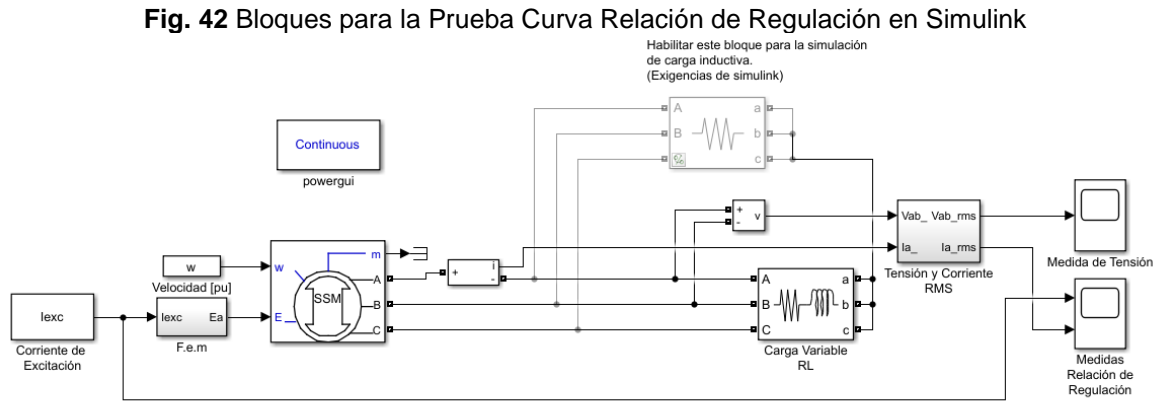
Medidas curva externa: Se utilizó el bloque *Scope* configurándolo con dos entradas, y activando el registro de datos al espacio de trabajo de Matlab de la siguiente manera. Como se muestra en la Fig. 41.

Fig. 41 Configuración Bloque Scope para la Prueba Curva Externa en Simulink



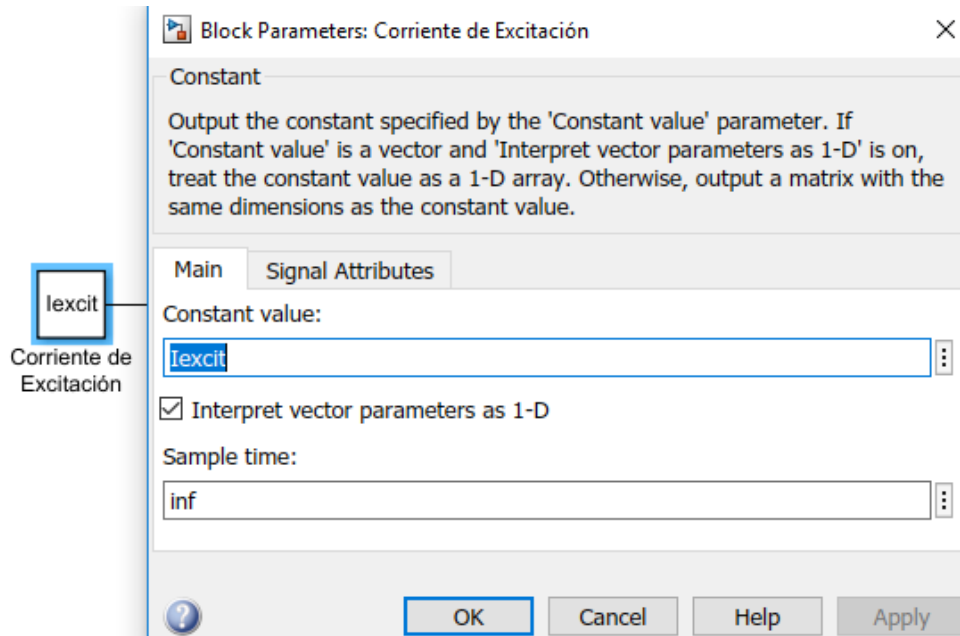
Los datos de las Fig. 39, Fig. 40 y Fig. 41 se presentarán con más detalle en los **ANEXO E** y **ANEXO F**.

3.2.4 **Construcción prueba curva relación de regulación.** La Fig. 42 muestra los bloques utilizados en simulink para la prueba.



Corriente de excitación: Se utilizó el bloque Constant, para representar la corriente de excitación constante. Como se muestra en la Fig. 43.

Fig. 43 Bloque Corriente de Excitación para la Prueba Curva Relación de Regulación en Simulink



Velocidad [pu]: Se utilizó el bloque *Constant*, para representar la velocidad en por unidad.

Medidor de corriente: Se utilizó el bloque *Current Measurement*, para medir la corriente de armadura.

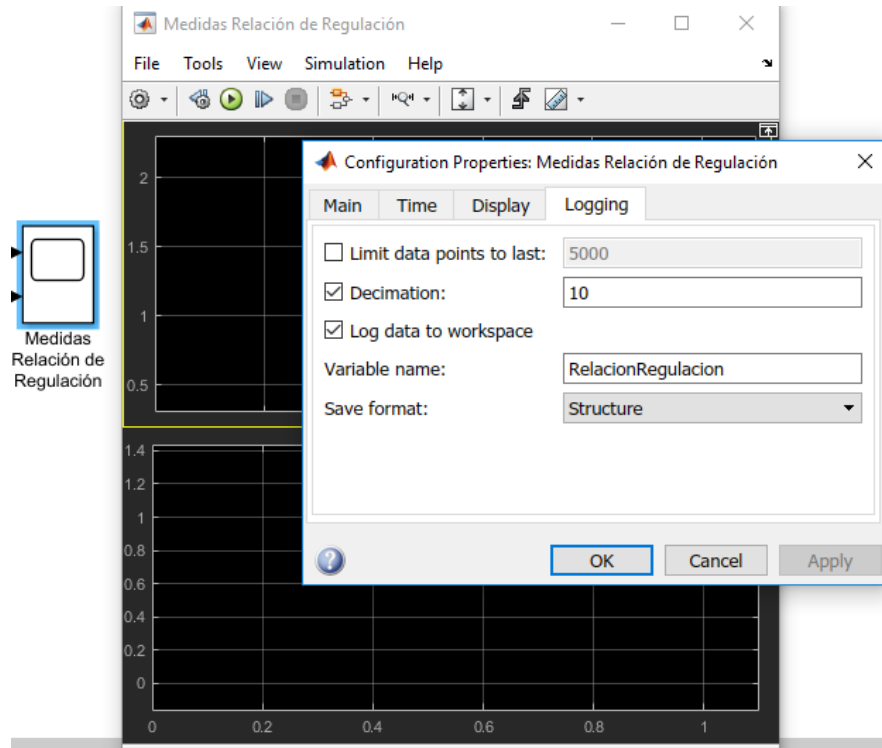
Medidor de tensión: Medir la tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement*.

Tensión en terminales y corriente armadura en valor RMS: Se utilizó un subsistema el cual contiene un bloque de *Fourier* en cascada con el bloque *Gain*, para obtener el valor rms de la tensión y la corriente.

Carga variable RL: Se utilizó el bloque *Three-Phase Series RLC Branch*, que representa una carga RL variable.

Mediciones relación de regulación: Se utilizó el bloque *Scope* configurándolo con dos entradas, y activando el registro de datos al espacio de trabajo de Matlab de la siguiente manera. Como se muestra en la Fig. 44.

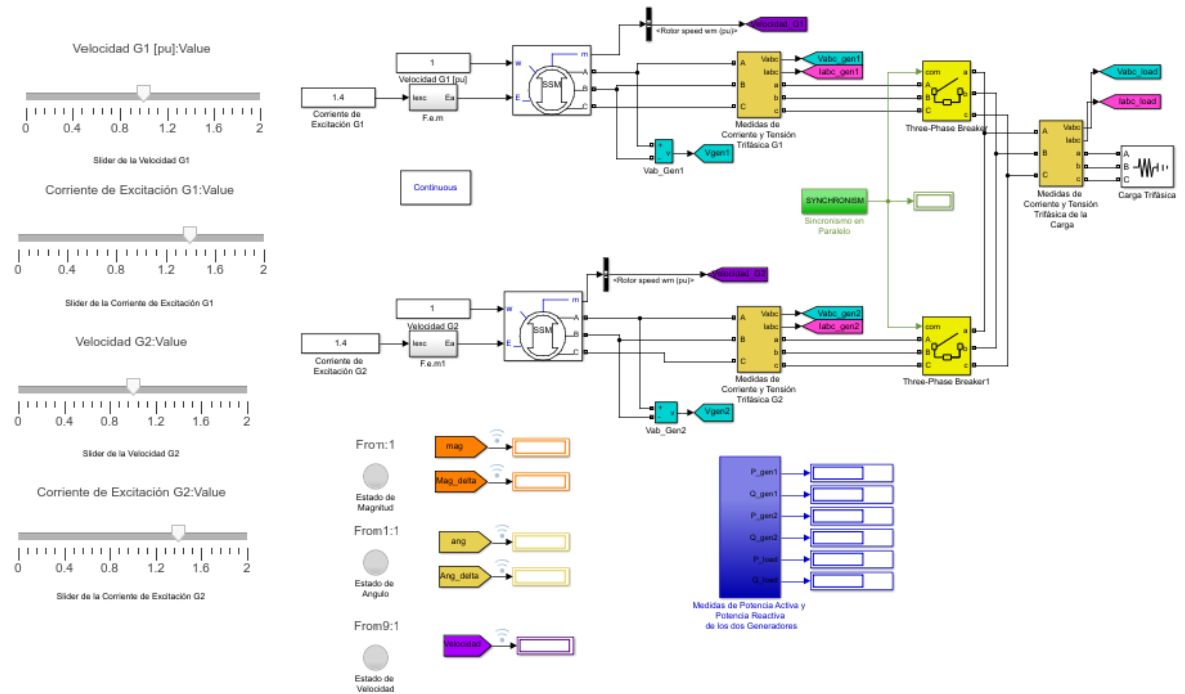
Fig. 44 Configuración Bloque Scope para la Prueba Curva Relación de Regulación en Simulink



Los datos de las Fig. 42, Fig. 43 y Fig. 44 se presentarán con más detalle en los **ANEXO G** y **ANEXO H**.

3.2.5 Construcción prueba conexión en paralelo de generados síncronos. La Fig. 45 muestra los bloques utilizados en simulink para la prueba.

Fig. 45 Bloques para la Prueba Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink



Corriente de excitación G1: Se utilizó el bloque *Constant* enlazado con un *Slider*, para permitir variar manualmente la corriente de excitación.

Velocidad G1 [pu]: Se utilizó el bloque *Constant*, para representar la velocidad en por unidad.

Medidor de tensión G1: Se utilizó un medidor de tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement* conectado con un bloque *Goto* para obtener las medidas.

Medida de velocidad G1: Se utilizó un bloque *Bus Selector* a la salida del puerto *m*, de la maquina síncrona conectado con un bloque *Goto*, para obtener la medida.

Medidas de corriente y tensión trifásicas G1: Se utilizó un bloque *Three-Phase V-I Measurement1*, en terminales (A, B, C) de la máquina síncrona, conectado con los bloques *Goto*, para obtener las medidas respectivas.

Interruptor trifásico G1: Se utilizó un bloque *Three-Phase-Braker*, en los terminales (a, b, c) del medidor de corriente y tensión trifásico.

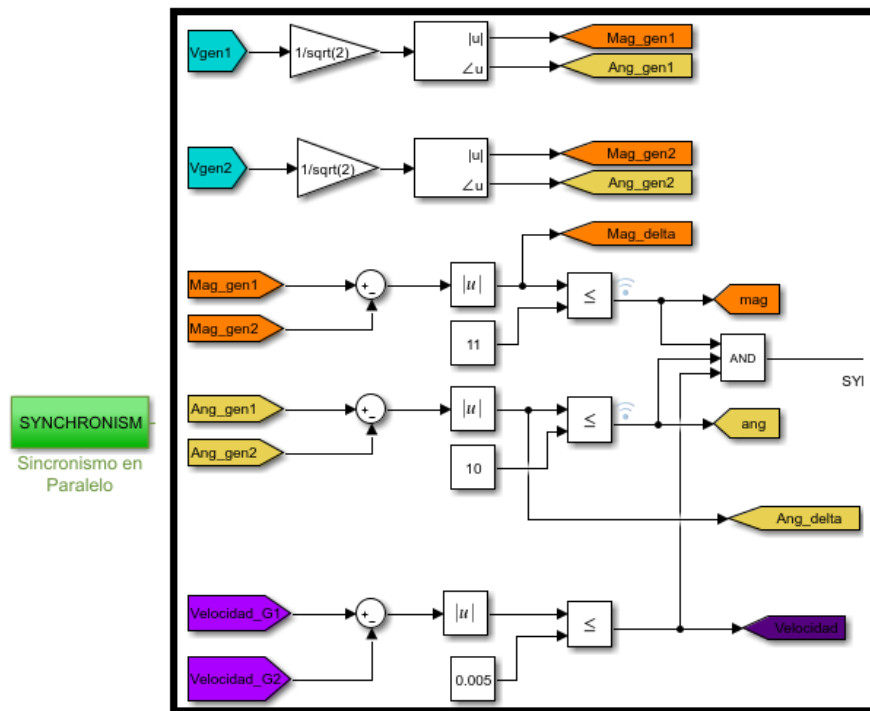
Para el **Generador2** se hizo el mismo procedimiento mencionado anteriormente.

Medidas de corriente y tensión trifásicas de la carga: Se utilizó un bloque *Three-Phase V-I Measurement1*, en terminales (a, b, c) del bloque *interruptor trifásico*, conectado con los bloques *Goto*, para obtener las medidas respectivas.

Carga trifásica: se utilizó un bloque *Three-Phase Series RLC Load*.

Sincronismo: Se creó un subsistema *sincronismo en paralelo*. Ver Fig. 46.

Fig. 46 Subsistema Sincronismo en Paralelo para la Prueba de Conexión en en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink.



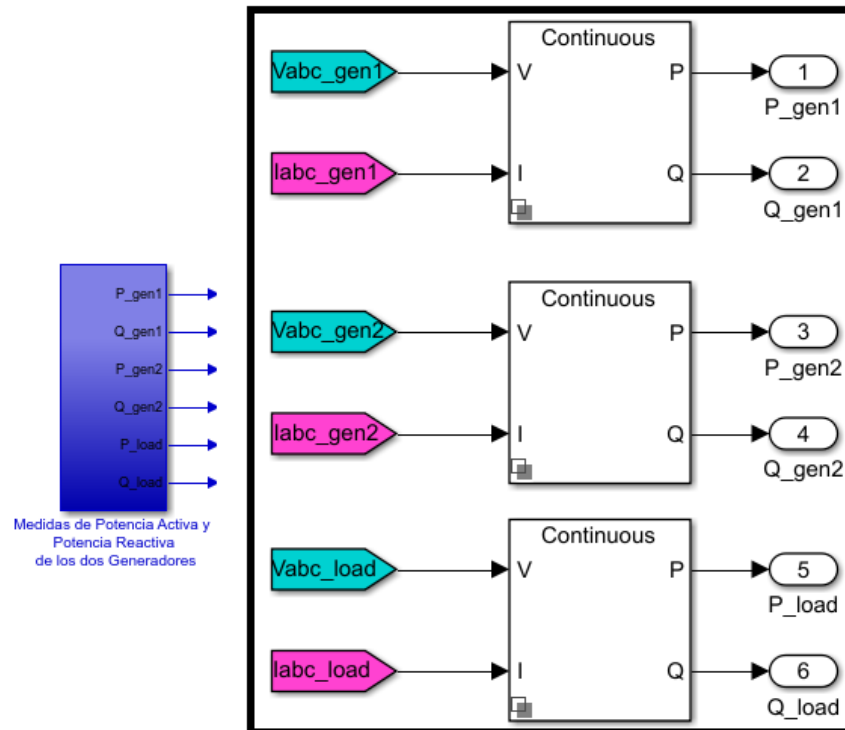
Para visualizar si los dos generadores en paralelo están en sincronismo se utilizó el bloque *Lamp*, vinculado con un bloque *From*, para cada uno de los valores de los parámetros que se deben tener en cuenta para el sincronismo (Tensión, Velocidad, Fase). Ver Fig. 47.

Fig. 47 Estado de la Magnitud para el Sincronismo en la Prueba de Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink



Medidas de potencia activa y potencia reactiva de los dos generadores: Se creo un subsistema, que internamente contiene los *From*, de tensión y corriente trifásica de cada generador y la carga, conectado con el bloque *Three-Phase Power Measurement*, como se muestra en la Fig. 48.

Fig. 48 Subsistemas de Medidas de Potencias para la Prueba de Conexión en Paralelo de Generadores Síncronos en Simulink

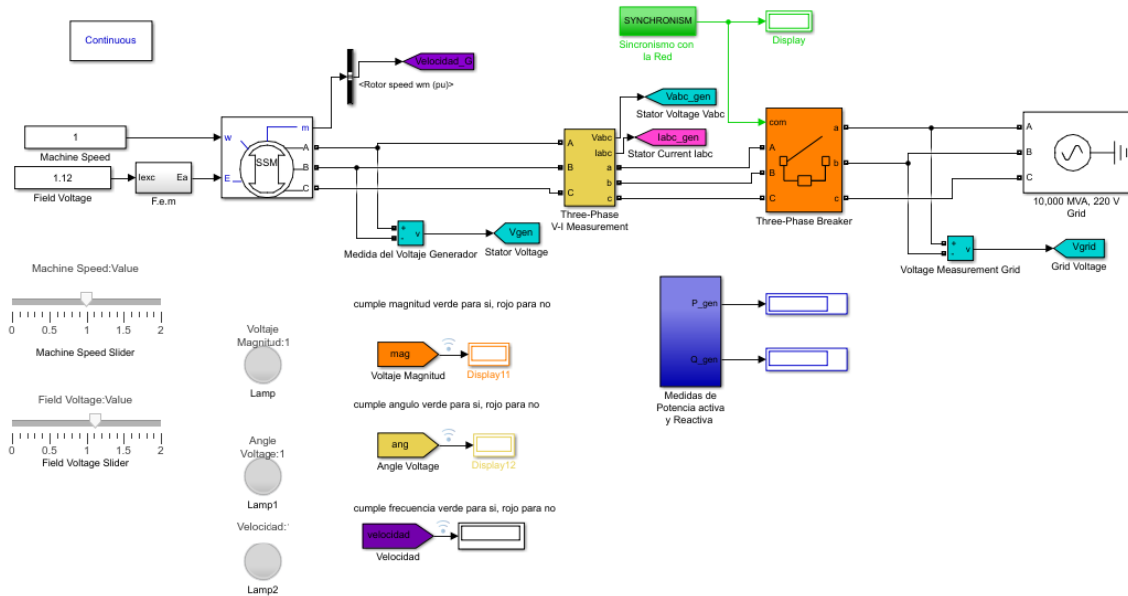


Los datos de las Fig. 45, Fig. 46, Fig. 47 y Fig. 48 se presentarán con más detalle en los **ANEXO I** y **ANEXO J**.

3.2.6 Construcción prueba conexión del generador síncrono a la red.

La Fig. 49 muestra los bloques utilizados en simulink para la prueba.

Fig. 49 Bloques para la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink



Corriente de excitación G: Se utilizó el bloque *Constant* enlazado con un *Slider*, para permitir variar manualmente la corriente de excitación.

Velocidad G [pu]: Se utilizó el bloque *Constant*, para representar la velocidad en por unidad.

Medidor de tensión G: Se utilizó un medidor de tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement* conectado con un bloque *Goto* para obtener las medidas.

Medida de velocidad G: Se utilizó un bloque *Bus Selector* a la salida del puerto *m*, de la máquina síncrona conectado con un bloque *Goto*, para obtener la medida.

Medidas de corriente y tensión trifásicas G: Se utilizó un bloque *Three-Phase V-I Measurement1*, en terminales (*A*, *B*, *C*) de la máquina síncrona, conectado con los bloques *Goto*, para obtener las medidas respectivas.

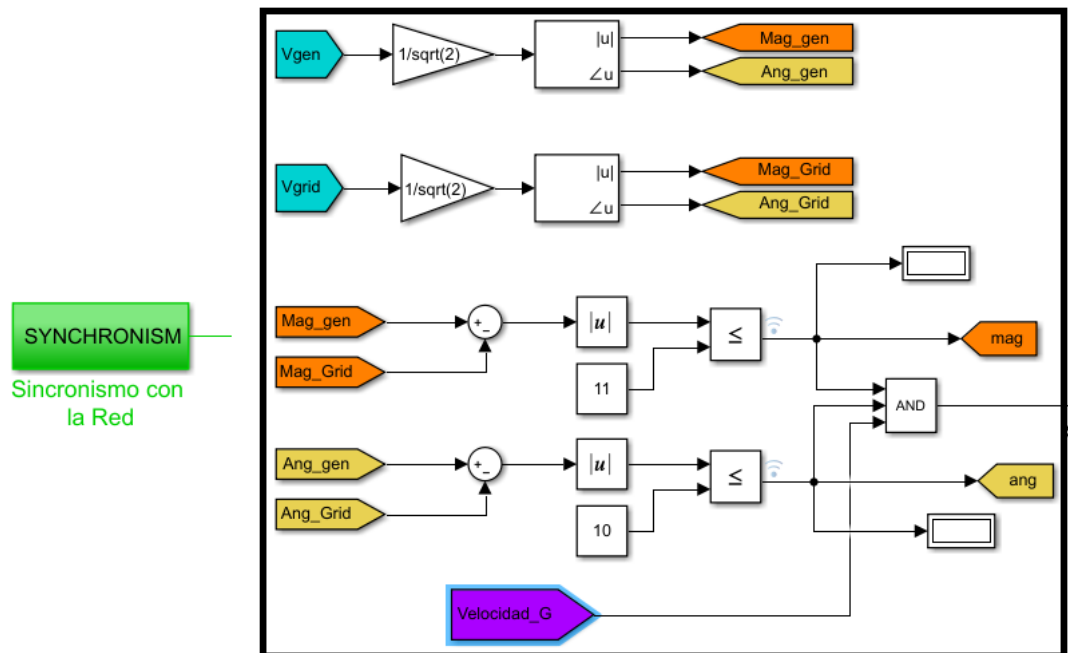
Interruptor trifásico: Se utilizó un bloque *Three-Phase-Braker*, en los terminales (a, b, c) del medidor de corriente y tensión trifásico.

Red de potencia infinita: Se utilizó un bloque *Three-Phase Source*, conectado en los terminales (a, b, c) del *Three-Phase-Braker*, para representar la red de potencia infinita.

Medidor de tensión en la carga: Se utilizó un medidor de tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement* conectado con un bloque *Goto* para obtener las medidas.

Sincronismo: Se creó un subsistema *sincronismo en paralelo*, Ver Fig. 50.

Fig. 50 Subsistema de Sincronismo con la Red para la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink



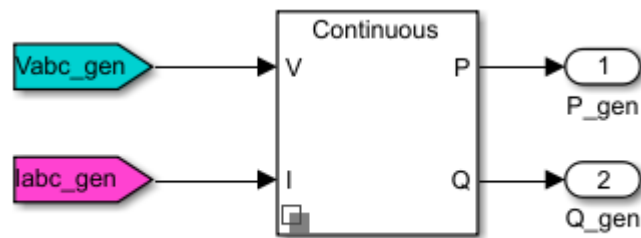
Para visualizar el sincronismo del generador con la red, se utilizó el bloque *Lamp*, vinculado con un bloque *From*, para cada uno de los valores de los parámetros que se deben tener en cuenta para el sincronismo (Tensión, Velocidad, Fase). Ver Fig. 51.

Fig. 51 Estado de la Magnitud para el Sincronismo en la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink



Medidas de potencia activa y potencia reactiva del generador: Se creó un subsistema, que internamente contiene los *From*, de tensión y corriente trifásica de del generador, conectado con el bloque *Three-Phase Power Measurement*, como se muestra en la Fig. 52.

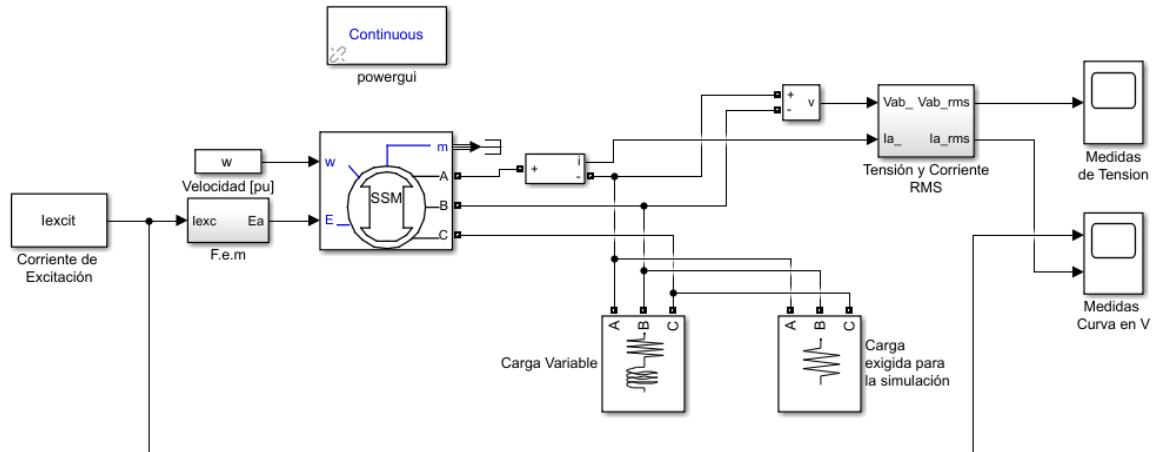
Fig. 52 Medidas de Potencia del Generador para la Prueba de Conexión Generador Sicono a la Red en Simulink



Los datos de las Fig. 49, Fig. 50, Fig. 51 y Fig. 52 se presentarán con más detalle en los **ANEXO K** y **ANEXO L**.

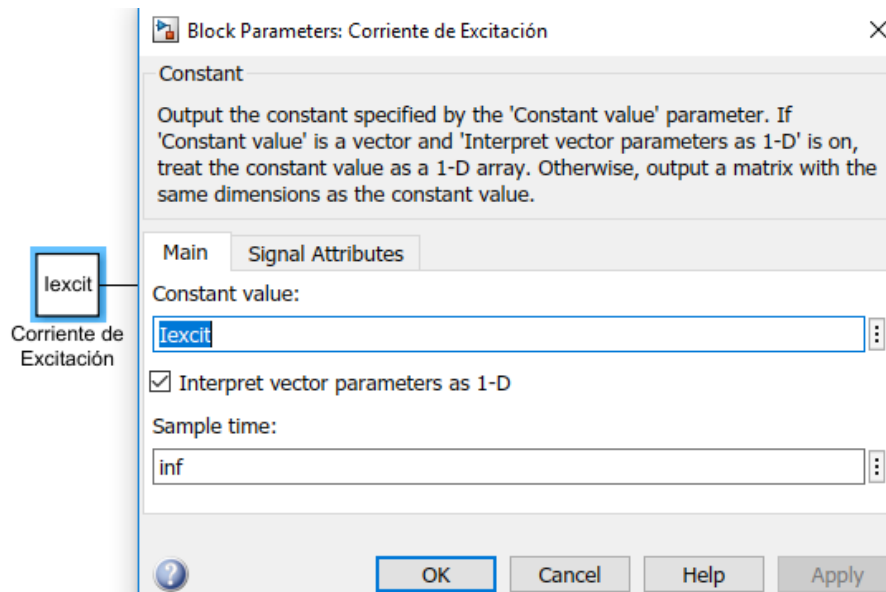
3.2.7 **Construcción prueba curva en V.** La Fig. 53 muestra los bloques utilizados en simulink para la prueba.

Fig. 53 Bloques para la Prueba Curva en V en Simulink



Corriente de excitación: Se utilizó el bloque Constant, para representar la corriente de excitación constante. Ver Fig. 54.

Fig. 54 Bloque de Corriente de Excitación para la Prueba de Curva en V



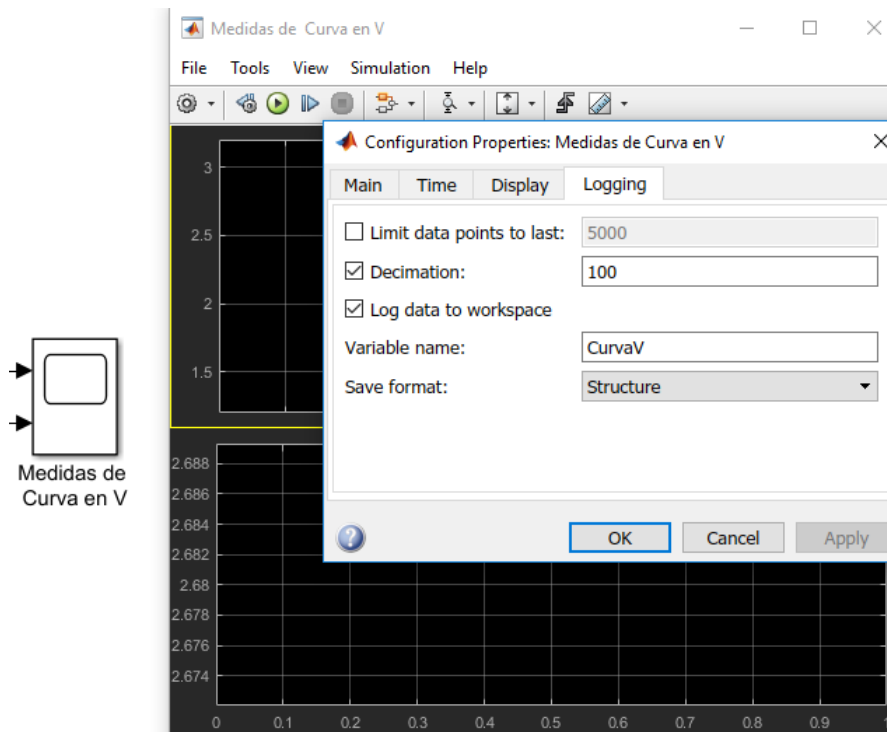
Velocidad [pu]: Se utilizó el bloque *Constant*, para representar la velocidad en por unidad.

Medidor de tensión: Medir la tensión en terminales utilizando el bloque *Voltage Measurement*.

Carga variable RC: Se utilizó el bloque *Three-Phase Series RLC Branch*, que representa una carga RC variable.

Mediciones relación de curvas en V: Se utilizó el bloque *Scope* configurándolo con dos entradas, y activando el registro de datos al espacio de trabajo de Matlab de la siguiente manera. Como se muestra en la Fig. 55.

Fig. 55 Configuración del Bloque Scope para la Prueba de Curva en V



Los datos de las Fig. 53, Fig. 54 y Fig. 55 se presentarán con más detalle en los **ANEXO M** y **ANEXO N**.

Para el uso correcto de los archivos de simulación, se creó un protocolo que se encuentra en el **ANEXO O**.

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los datos de la máquina DL 1026AN en el laboratorio.

Tabla 1 Parámetros del Generador Síncrono del Laboratorio UIS.

Parámetro	Valor
Tensión Nominal	220 V
Corriente Nominal	3.9 A
Potencia Nominal	1.5 kVA
Velocidad Nominal	1800 rpm
Tensión Campo	200 V
Corriente Campo	1.7 A
Frecuencia	60 Hz

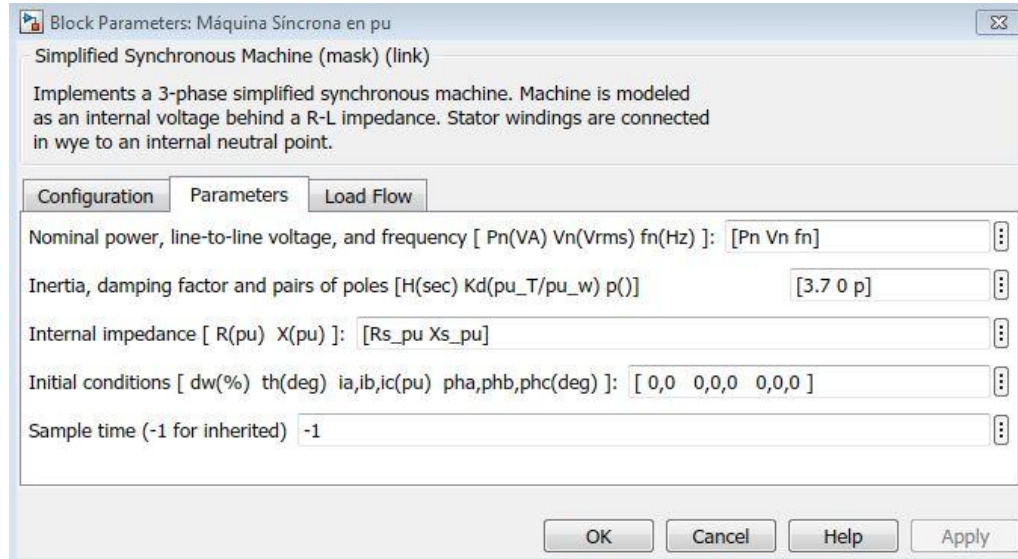
Fuente Laboratorio de Máquinas Eléctricas UIS.

- Resistencia de aislamiento entre bobina W y tierra: 5.81 [M Ω]
- Resistencia de aislamiento entre bobina U y tierra 7.98 [M Ω]
- Resistencia de aislamiento entre bobina V y tierra 6.71 [M Ω]
- Devanado de campo con respecto a tierra: 7.77 [M Ω]
- Resistencia del devanado W: 1.3 [Ω]
- Resistencia del devanado U: 1.3 [Ω]
- Resistencia del devanado V: 1.3 [Ω]
- Resistencia de campo: 126.3 [Ω]
- Inductancia del devanado W: 28.8 [mH]
- Inductancia del devanado W: 31.5 [mH]
- Inductancia del devanado W: 30.7 [mH]
- Rs en pu= 0.0403 [pu]
- Xs en pu = 0.9266 [pu]

Para los parámetros de la máquina síncrona, se realizaron medidas en el laboratorio UIS anteriormente mencionadas, que son insertadas en el bloque de máquina síncrona en simulink, algunos parámetros se debieron asumir tales como: la inercia

y el factor de amortiguamiento, los cuales se dejaron por defecto del bloque. Ver Fig. 56.

Fig. 56 Parámetros Bloque Máquina Síncrona en Simulink

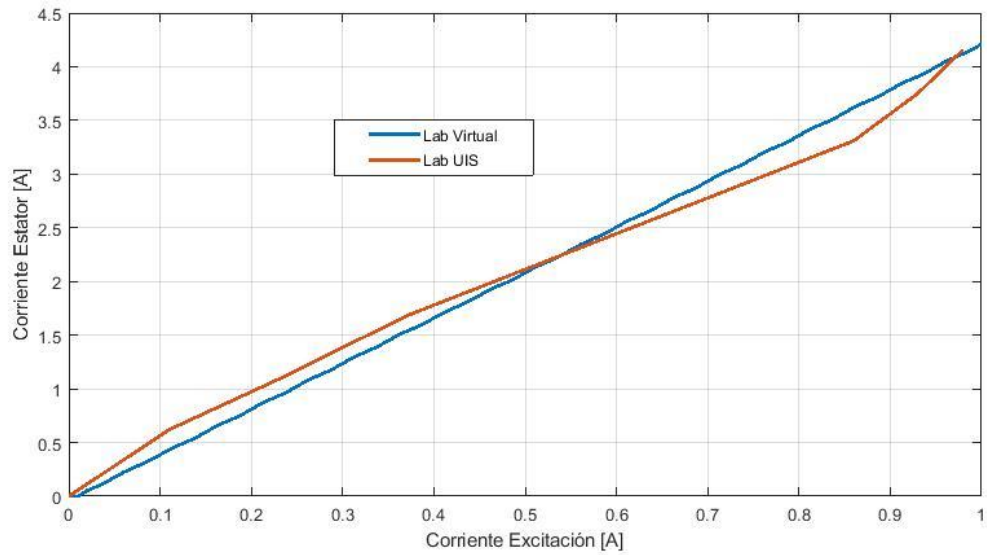


Para la simulación de las cargas, los valores fueron extraídos del **ANEXO P**.

4.1 COMPARACIÓN PRUEBA CORTOCIRCUITO

Como se observa en la figura 67, el comportamiento del archivo correspondiente a la prueba de cortocircuito presenta una buena aproximación con respecto a la prueba realizada en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus. Con un error mínimo del 1.01%, un error máximo del 5.54% y un error medio del 1.93%.

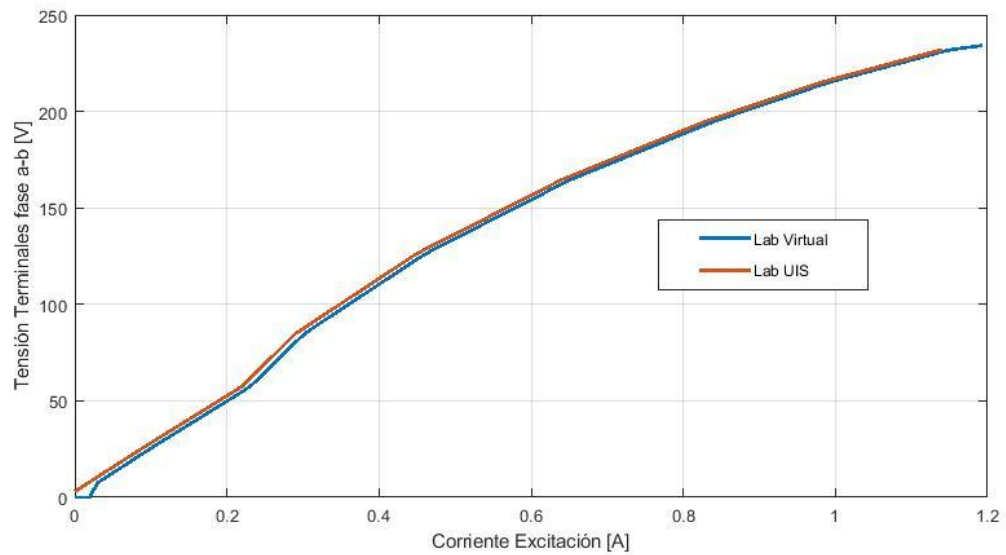
Fig. 57 Comparación Prueba Curva Cortocircuito



4.2 COMPARACIÓN PRUEBA CIRCUITO ABIERTO

En la Fig. 58 se logra observar un comportamiento similar al comparar los datos de la prueba de circuito abierto de ambas modalidades de laboratorio. Con un error mínimo del 0.3%, error máximo del 3.8% y un error medio del 1.78%.

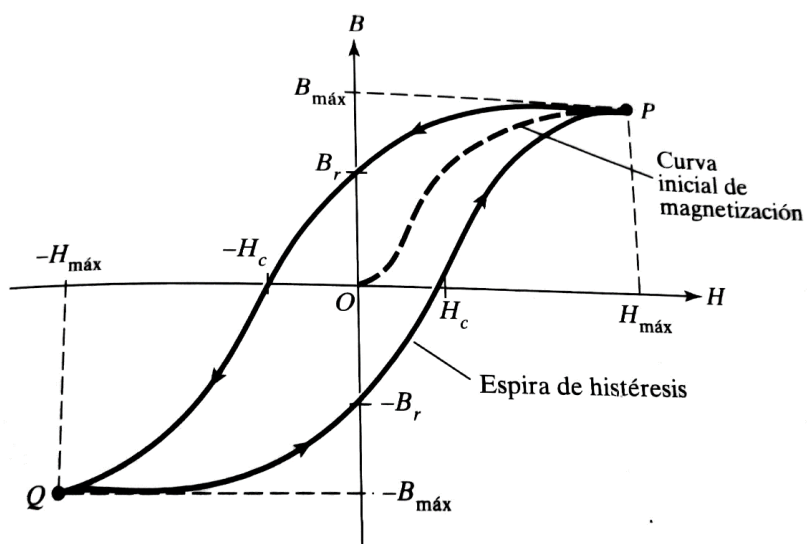
Fig. 58 Comparación Prueba Curva Circuito Abierto



La curva de circuito abierto del laboratorio virtual (color azul), no presenta una tensión remanente tal como la prueba del laboratorio de máquinas eléctricas, debido a que simulink presenta un comportamiento es ideal durante la simulación, estableciendo así un estado virgen de la máquina y por lo tanto sigue la curva inicial de magnetización, tal como se ilustra en la Fig. 59 explicado en Sadiku¹³.

¹³ SADIKU, Matthew N. Elementos de Electromagnetismo, 3 ed. Oxford University Press, 2002, Cap 8.

Fig. 59 Curva de Magnetización

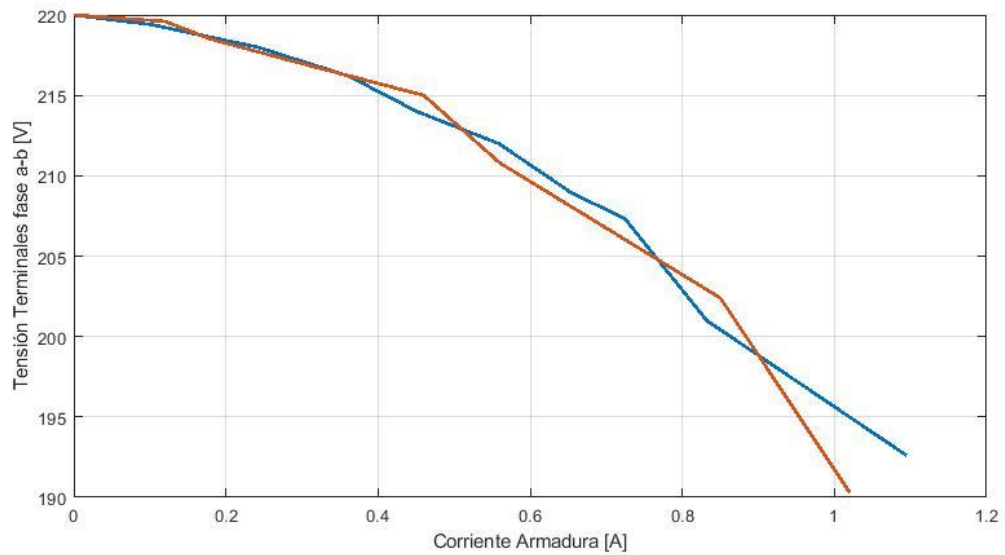


Fuente SADIKU, Matthew N. Elementos de electromagnetismo, 3 ed. Oxford University Press, 2002, Cap 8.

4.3 COMPARACIÓN CURVA EXTERNA

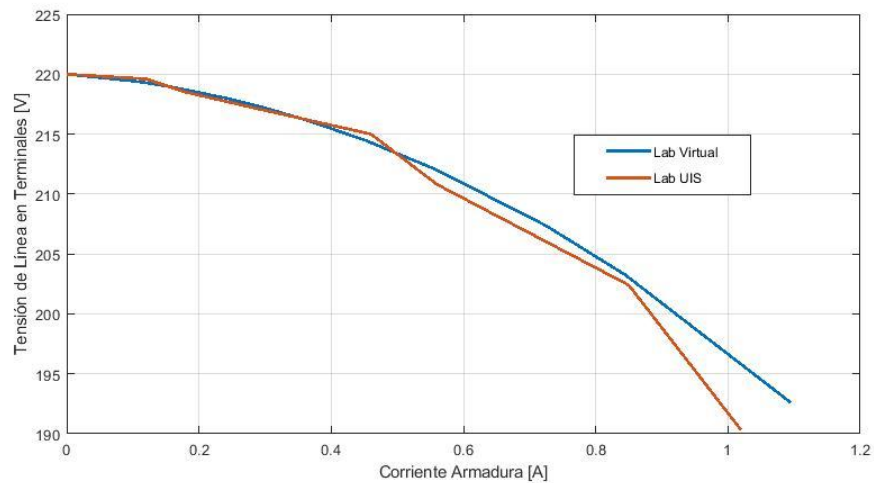
En la Fig.60 se percibe una perturbación significativa en el momento del cambio de carga, por ello se busca ajustar un poco el modelo.

Fig. 60 Comparación Curva Externa



4.3.1 **Resultados prueba curva externa con el modelo ajustado.** En la Fig. 61, se presenta la comparación de los resultados de la prueba curva externa, con los resultados del laboratorio de máquinas eléctricas del campus.

Fig. 61 Resultados del Modelo Ajustado en la Prueba Curva Externa



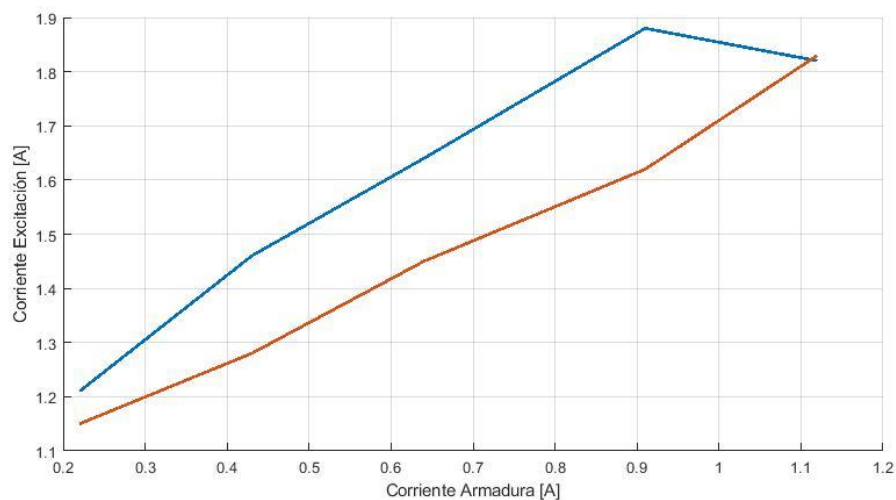
En la Fig. 61 se logra una mejora en el comportamiento con respecto a la Fig. 60 para la curva externa obtenida en el laboratorio virtual, donde se obtiene una línea

curva sin tantas perturbaciones. Mejorando el error mínimo del 0.87% al 0.68%, un error máximo del 4.18% al 3.15% y un error medio del 3.27% al 1.73%.

4.4 COMPARACIÓN CURVA RELACIÓN REGULACION

La Fig. 62, presenta la comparación de las curvas de relación de regulación para el tipo de carga inductiva. Se presentan puntos un poco alejados de la curva obtenida en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus.

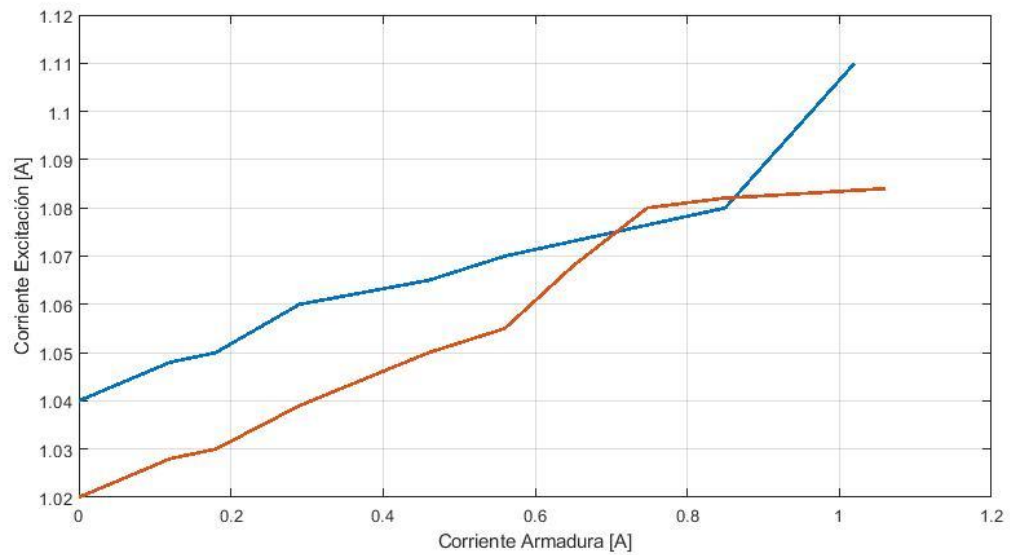
Fig. 62 Comparación Prueba Curva Relación de Regulación Carga Tipo Inductiva



Fuente Autores.

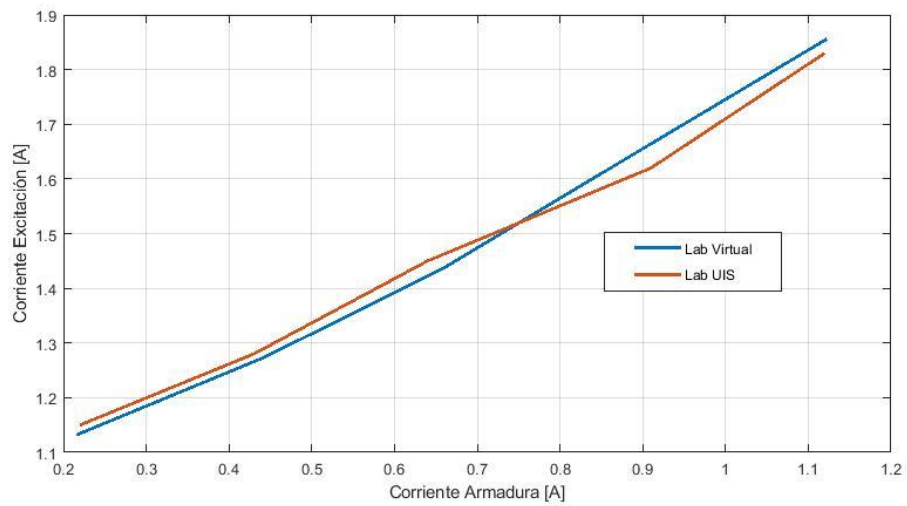
La Fig. 63, presenta la comparación de las curvas de relación de regulación para el tipo de carga resistiva. Se presenta un comportamiento bastante cercano a la curva que se obtiene de la prueba realizada en el laboratorio de máquinas eléctricas, pero no se percibe una tendencia como se plantea en la Guía de Laboratorio Máquinas Eléctricas de Luis Alfonso Díaz.

Fig. 63 Comparación Prueba Curva Relación de Regulación Carga Tipo Resistiva



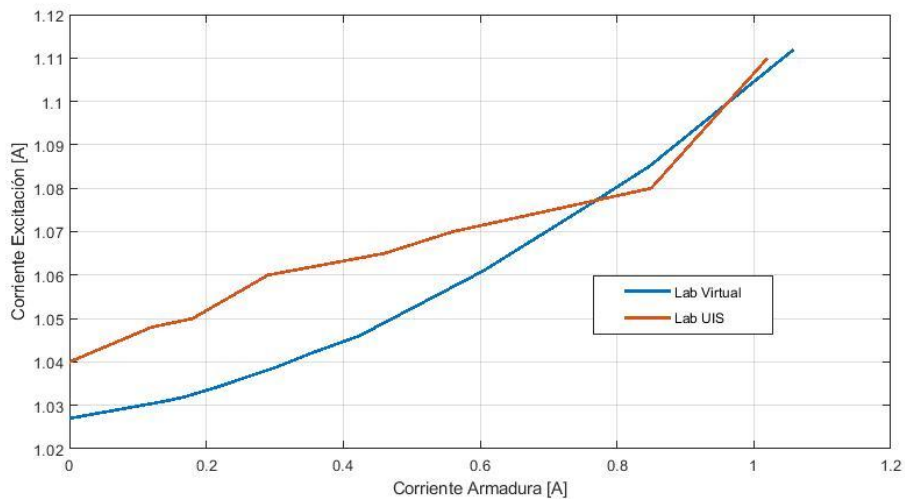
4.4.1 Resultados prueba curva relación de regulación con el modelo ajustado. Luego de ajustar el modelo, configurando con más pasos de cargas, tratando de buscar un suavizado en la curva de relación de regulación para carga inductiva, se percibe una mejora con respecto a la Fig. 64. Mejorando el error mínimo del 4.57% al 0.67%, un error máximo del 13.07% al 3.78% y un error medio del 10.17% al 1.47%.

Fig. 64 Resultado del modelo Ajustado Prueba Curva Relación de Regulación Carga Inductiva



Para la prueba de relación de regulación con tipo de carga resistiva, se ajusta el modelo logrando una tendencia similar (figura 65) a la planteada en la guía de laboratorio máquinas eléctricas de Luis Alfonso Díaz. Mejorando el error mínimo del 0.13% al 0.09%, un error máximo del 2.77% al 2.26%, un error medio del 1.38% al 1.08%.

Fig. 65 Resultado del modelo Ajustado Prueba Curva Relación de Regulación Carga Resistiva



4.5 COMPARACIÓN CONEXIÓN GENERADORES EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS

Gracias al subsistema de sincronismo que solo permitirá la conexión de los dos generadores cumpliendo sus condiciones, se logra mediante un método similar al realizado en el laboratorio del campus.

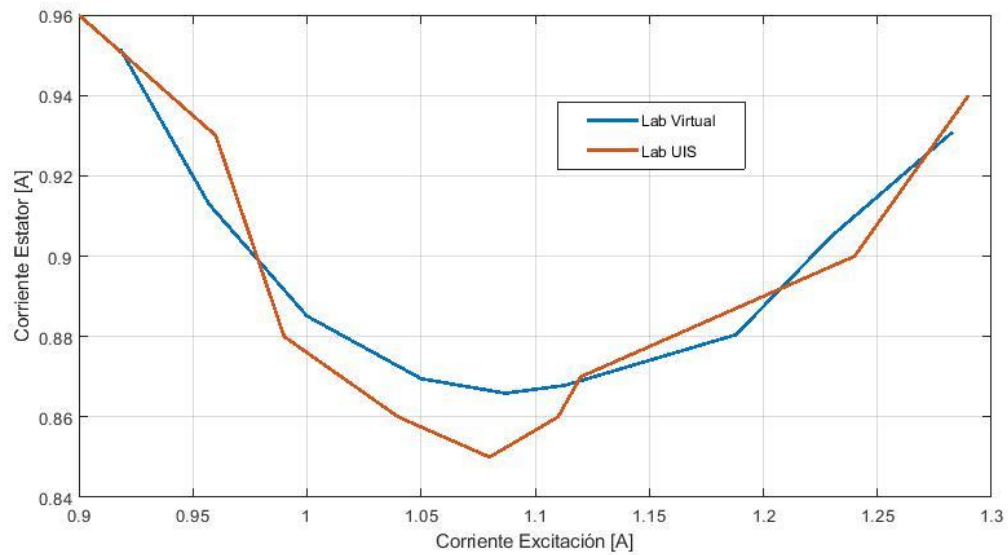
4.6 COMPARACIÓN GENERADOR SÍNCRONO A LA RED

Al igual que en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus, se puede conectar el generador a la red una vez cumpla las condiciones de sincronismo planteadas en el subsistema. Una vez conectada a la red se puede manipular la potencia suministrada variando el parámetro potencia mecánica y la corriente de excitación del campo, comprobando esto con las mediciones de potencia activa y reactiva a la salida del generador.

4.7 COMPARACIÓN CURVA EN V

En la Fig. 66, la curva en V obtenida en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus universitario (color azul) es una gráfica un poco limitada debido a que se tienen pasos grandes entre los valores de carga.

Fig. 66 Comparación Prueba Curva en V



Sin embargo, en el laboratorio virtual (color rojo) se puede simular mejor cambio de cargas en terminales, para obtener una mejor curva en V del generador síncrono. Presentando un error mínimo del 0.22%, un error máximo del 1.88% y un error medio del 1.27%.

4.8 COMPARACIÓN GENERAL

Con el fin de resaltar algunos aspectos generales del laboratorio virtual y el laboratorio de máquinas eléctricas del campus universitario, se ha realizado la Tabla 2.

Tabla 2 Comparación General

ÍTEM	LABORATORIO DEL CAMPUS	LABORATORIO VIRTUAL
<i>Tensión nominal de la maquina</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
<i>Corriente nominal de la máquina</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>
<i>Corriente de corto nominal</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>
<i>Velocidad nominal</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>

<i>Fuente CC del campo</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>
<i>Control de la corriente de arranque</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
<i>Cantidad de muestras para las curvas</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
<i>Incertidumbre de las medidas</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
<i>Disposición de equipos</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
<i>Disponibilidad Laboratorio</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>
<i>Versatilidad de la máquina</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>

En la tabla 3, se hace una comparación más específica de algunos aspectos de los laboratorios.

Tabla 3 Comparación Laboratorio del Campus y Laboratorio Virtual.

ÍTEM	LABORATORIO DEL CAMPUS	LABORATORIO VIRTUAL
<i>Valores de corriente de la fuente AC en el laboratorio</i>	<i>Presenta limitaciones en estos valores.</i>	<i>Si</i>
<i>Valores de corriente de excitación del campo.</i>	<i>Se presenta una gama de valores no muy amplias.</i>	<i>Si.</i>
<i>Banco de carga resistiva.</i>	<i>Si, un banco fijo de 7 valores.</i>	<i>Se puede crear un banco de muchos valores.</i>
<i>Banco de carga inductiva.</i>	<i>Si, un banco fijo de 7 valores.</i>	<i>Se puede crear un banco de muchos valores.</i>
<i>Banco de carga capacitiva.</i>	<i>Si, un banco fijo de 7 valores.</i>	<i>Se puede crear un banco de muchos valores.</i>
<i>Método Sincronización.</i>	<i>Método de las tres lámparas</i>	<i>Se logra realizar un arreglo de bloques</i>
<i>Acople de otra máquina para el arranque de la máquina síncrona.</i>	<i>Es indispensable el uso de un motor, para el arranque de la máquina</i>	<i>No es necesario otra máquina para el arranque.</i>

5. CONCLUSIONES

En relación con lo expuesto, se hizo la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones con respecto a los de las prácticas realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas del campus universitario, siendo una experiencia práctica e idónea de apropiación del conocimiento. No obstante, la implementación de la propuesta de este trabajo de grado traerá una sustancial comodidad al estudiante, por cuanto se evidenciará ventajas, como la fijación de parámetros constantes durante la prueba, tales como la velocidad en el rotor, la amplitud de la tensión y la corriente de excitación.

Otra gran ventaja que presenta este laboratorio virtual es poder llevar la máquina a condiciones extremas, permitiendo el análisis de escenarios que en el laboratorio convencional de la universidad no se podría estudiar por las limitaciones del laboratorio.

También, al tener un banco de cargas con más valores, se logra obtener una curva mucho más acertada a las planteadas en la Guía de Laboratorio de Máquinas Eléctricas, debido a que se arrojan más puntos para las gráficas.

Finalmente, y reiterando el beneficio y bondades que generará el laboratorio virtual, el estudiante encontrará a disposición una nueva herramienta ágil y fácil de manejar que reducirá los tiempos en graficar y cálculos que conlleva la realización de una prueba.

6. RECOMENDACIONES

Se espera hacer un buen impacto con el trabajo realizado para la comunidad universitaria, e incentivarlos a la creación de más laboratorios virtuales en las diferentes áreas, para así lograr un proceso de aprendizaje más versátil con las diferentes herramientas computacionales y/o softwares que están a disposición en la Universidad Industrial de Santander. Las cuales permitirán abarcar escenarios que no se podrían experimentar debido a las limitaciones de los laboratorios, y así lograr comprender algunas temáticas desde otro punto de vista.

Dejando claro que los laboratorios virtuales son alternativas de estudio, y no buscan reemplazar u omitir las experiencias que se perciben de manera presencial al realizar prácticas en los laboratorios.

BIBLIOGRAFÍA

ALLER CASTRO, José Manuel. Introducción a la teoría general de las maquinas eléctricas rotativas. España, Universidad Simón Bolívar, 2000.

CHAPMAN, Stephen J. Máquinas eléctricas, 3 ed. McGraw-Hill, 2000.

DIAZ, Luis Alfonso. Guía de Laboratorio Máquinas Eléctricas.

FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, Charles, UMANS, Stephen. Máquinas Eléctricas, 6 ed. McGraw-Hill, 2005

FRAILE MORA, Jesús. Maquinas eléctricas, 5ed. McGraw-Hill, 2003.

GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Hüseyin R. Máquinas eléctricas y transformadores, 3ed. Alfaomega, 2003.

IEEE Standard 115-1995. IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines. USA.

KRAUSE, P.C. Analysis of Electric Machinery, 2ed. McGraw-Hill, 1986.

KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994.

Mathworks Inc., 2002.

Mathworks Inc. Using Simulink. E.E.U.U. The MathWorks, 2002

SAADAT, Hadi. Power system analysis. E.E.U.U McGraw-Hill Higher Education, 2002.

SADIKU, Matthew N. Elementos de electromagnetismo, 3 ed. Oxford University Press, 2002.

ANEXOS

ANEXO O: Protocolo del Laboratorio Virtual.

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

Objetivo de la prueba

Obtener la curva de cortocircuito

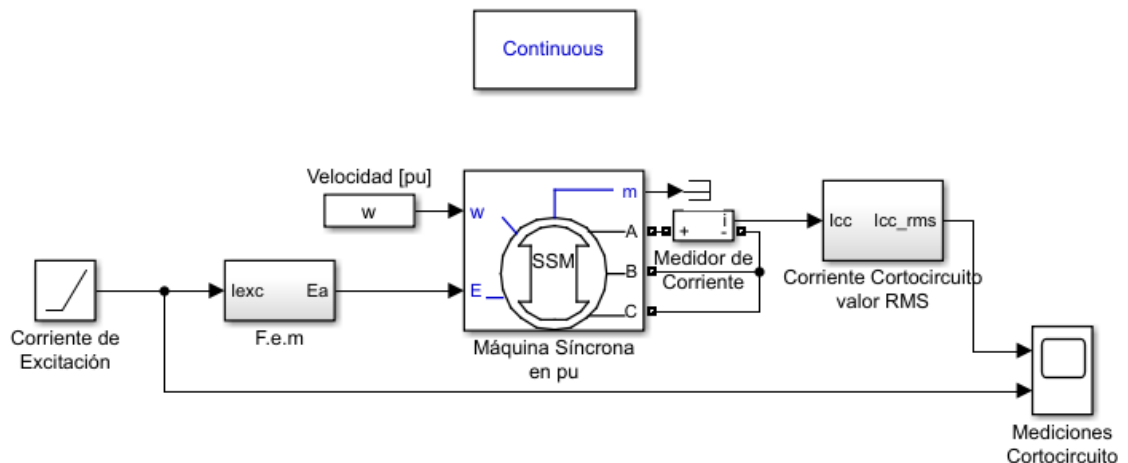
Tareas

Determine los valores de corriente cortocircuito al variar la corriente de excitación.

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_A_Prueba_Cortocircuito.slx. (Ver Fig. 66).

Fig. 67 Visualización del ANEXO A.



Configure los parámetros de la prueba abriendo el archivo ANEXO_B_Script_Cortocircuito.m. Observe los valores de cada una de las variables y defina el valor máximo de corriente excitación (I_{exc}), teniendo en cuenta que las unidades de este valor son en amperios.

Preste atención al bloque medidor de corriente que mide la corriente de cortocircuito, y su señal entra al subsistema *Corriente Cortocircuito valor RMS*, que se encarga de calcular el valor rms de la señal, finalmente entra al scope *Mediciones Cortocircuito*, al igual que la *Corriente de Excitación*, recopilando los datos y llevarlos al script, para la realización de la curva cortocircuito.

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Objetivo de la prueba

Obtener la curva de circuito abierto.

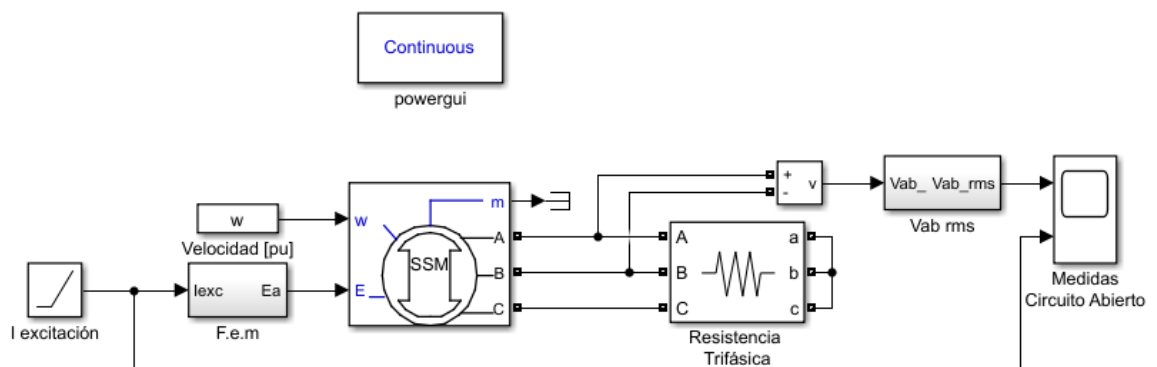
Tareas

Determine los valores de tensión en terminales al variar la corriente de excitación.

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_C_Prueba_Circuito_Abierto.slx. (Ver Fig. 67).

Fig. 68 Visualización del ANEXO C.



Configure los parámetros de la prueba abriendo el archivo ANEXO_D_Script_Circuito_Abierto.m. Observe los valores de cada una de las variables y defina el valor máximo de corriente excitación (I_{exc}), teniendo en cuenta que las unidades de este valor son en amperios.

Debe fijar que la resistencia trifásica conectada en los bornes de la maquina síncrona, tiene un valor alto de resistencia exigida por simulink para simular la prueba, el medidor de tensión entre las dos fases, su señal entra al subsistema *Vab rms* para calcular el valor rms de la señal de tensión y entra al scope *Medidas Circuito Abierto* al igual que la *Corriente de Excitación*, recopilando los datos y llevarlos al script, para la realización de la curva de circuito abierto.

PRUEBA CURVA EXTERNA

Objetivo de la prueba

Obtener la curva externa.

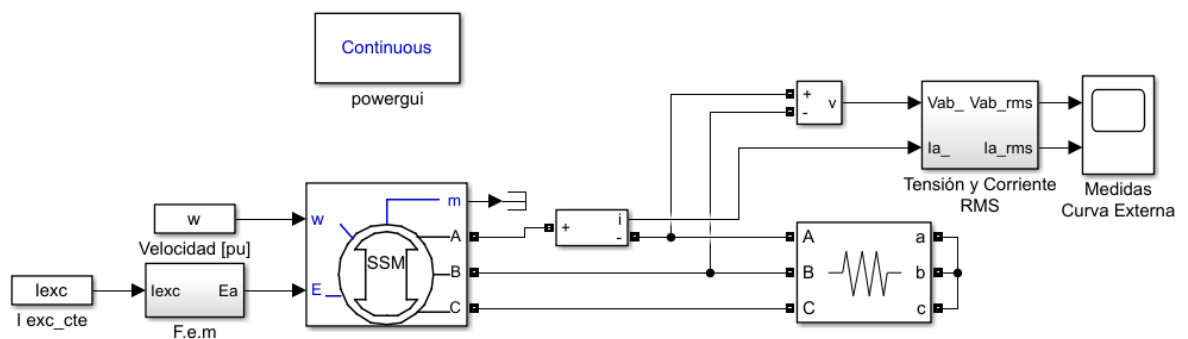
Tareas

Obtener el cambio de la tensión en bornes al variar la carga manteniendo la corriente de excitación y velocidad constante.

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_E_Prueba_Curva_Externa.slx. (Ver Fig. 68).

Fig. 69 Visualización del ANEXO E.



Ejecute el archivo *ANEXO_F_Script_Curva_Externa.m*, con el fin de cargar los parámetros del bloque *Máquina Síncrona en pu*, y cierre por ahora los archivos que éste genere.

Cambie el valor de la resistencia del bloque de carga, a un valor de $1e7$ [ohms], varíe el valor del bloque constante I_{exc_cte} hasta que logre una tensión de 127[V], visualizándolo en el scope *Medidas Curva Externa*, luego deje fijo este valor de corriente de excitación y configure de nuevo el valor de la carga, pero esta vez ingrese la variable R, dicha variable se puede ver en el script.

Ejecute el script y visualice la curva externa, que mostrará el comportamiento de la tensión en bornes al variar la corriente de armadura.

PRUEBA CURVA RELACIÓN DE REGULACIÓN

Objetivo de la prueba

Obtener la curva relación de regulación.

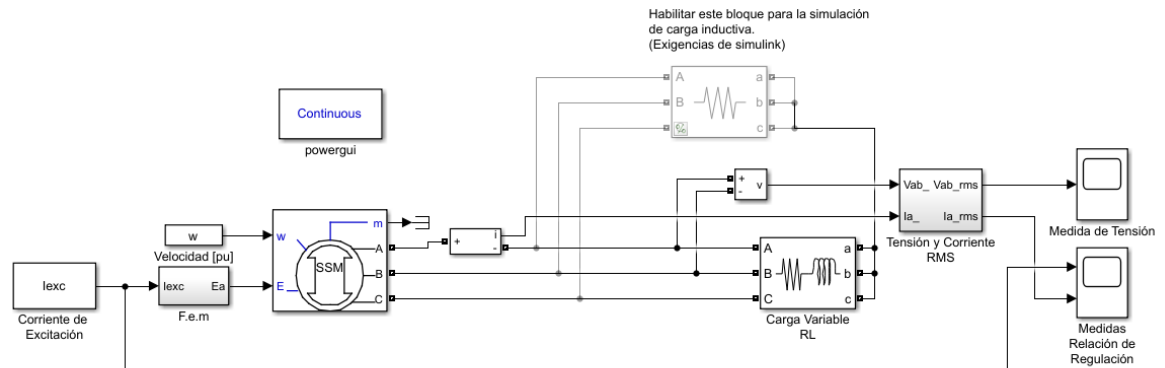
Tareas

Obtener el cambio de la corriente de excitación al variar la corriente de armadura, manteniendo constante la tensión y la velocidad.

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_G_Prueba_Relación_Regulación.slx. (Ver Fig. 69).

Fig. 70 Visualización del ANEXO G.



Ejecute el archivo ANEXO_H_Script_Relacion_Regulacion.m con el fin de cargar los parámetros del bloque *Máquina Síncrona en pu*, y cierre por ahora los archivos que éste genere.

Cambie el valor del bloque *Carga Variable RL*, por un valor inicial ya sea carga inductiva o carga resistiva, luego ejecute la simulación y compruebe con el scope *Medidas de Tensión*, la tensión en terminales sea la nominal. Sino es así, varíe el valor del bloque constante denominado *Corriente de Excitación*, hasta lograr la tensión nominal.

Realice el proceso iterativo anterior recopilando los valores tanto de carga y de corriente de excitación, para guardarlos en el vector Rc o Lc e lex_ respectivamente.

Asegúrese de cargar los valores del tipo de carga que desea simular, ya sea resistiva (vector Rc en el script) o carga inductiva (vector Lc en el script), y de hacer los cambios respecto en el ciclo *for*, si es necesario.

Por último, ejecute el script nuevamente para obtener la curva de relación de regulación según el tipo de carga empleada.

PRUEBA CONEXIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS

Objetivo de la prueba

Conectar en paralelo los dos generadores.

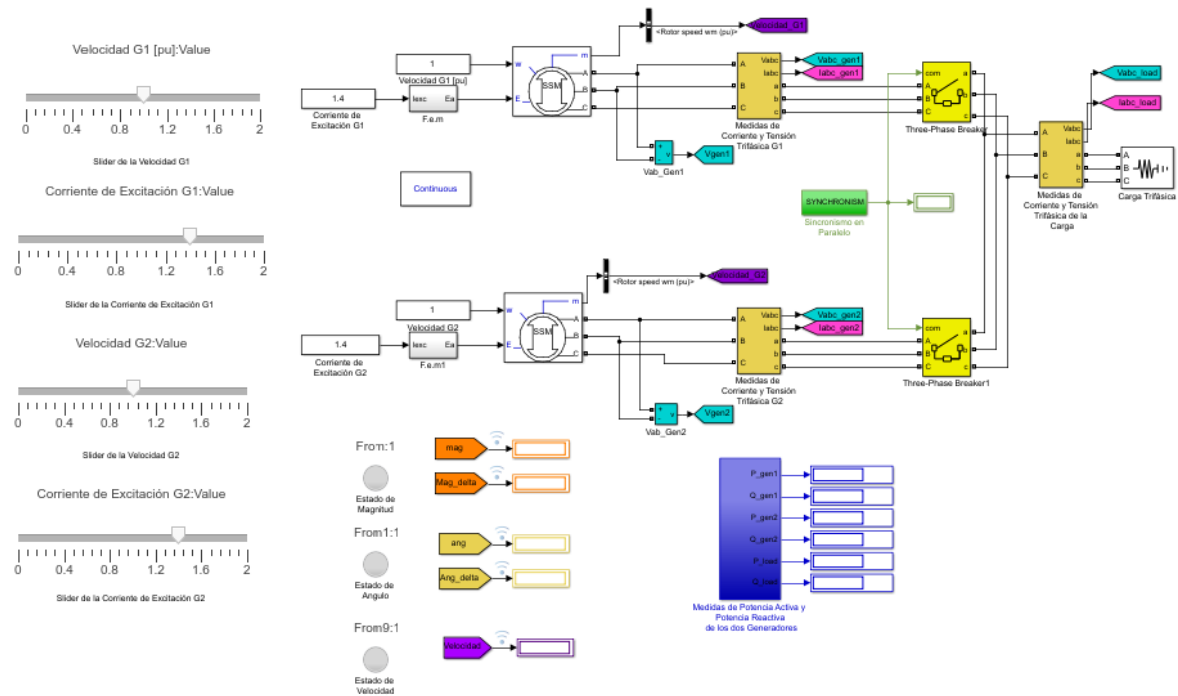
Tareas

Valide las condiciones de sincronismo (frecuencia, fase y magnitud de tensión).

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_I_Prueba_Generadores_Paralelo.slx. (Ver Fig. 70).

Fig. 71 Visualización del ANEXO I.



Configure los parámetros de la prueba abriendo el archivo ANEXO_J_Script_Generadores_Paralelo.m. Observe los valores de cada una de las variables y ejecútelo.

Ejecute el archivo simulink, luego varíe la corriente de excitación de ambos generadores con el bloque *slider excitación* y logre que la tensión en terminales sea

igual, posteriormente varíe la velocidad hasta llegar a la nominal de cada generador con el bloque *slider velocidad*, para mantener una misma frecuencia ya que la velocidad es proporcional a la frecuencia.

Visualice que los bloques de las lámparas estén de color verde, indicando que los generadores están en sincronismo.

Estando ya en sincronismo, varíe la potencia activa que entrega el generador1 modificando la corriente de excitación con el bloque *slider excitación*, y observe que pasa con la potencia activa del generador2.

Varíe la potencia reactiva que entrega el generador1 modificando la corriente de excitación con el bloque *slider velocidad*, y observe que pasa con la potencia reactiva del generador2.

Por último, asegúrese que los dos generadores suplan la carga.

PRUEBA CONEXIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO A UNA RED

Objetivo de la prueba

Conectar el generador síncrono con la red.

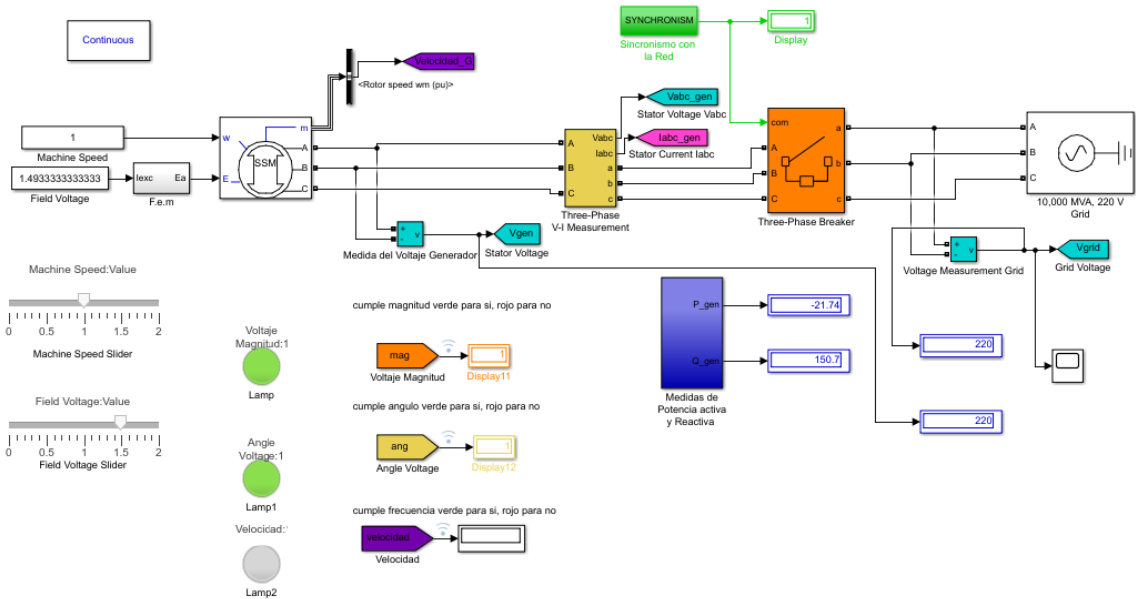
Tareas

Valide las condiciones de sincronismo (frecuencia, fase y magnitud de tensión).

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_K_Prueba_Generador_Red.slx. (Ver Fig. 71).

Fig. 72 Visualización del ANEXO K.



Configure los parámetros de la prueba abriendo el archivo ANEXO_L_Script_Generador_Red.m. Observe los valores de cada una de las variables y ejecútelo.

Ejecute el archivo Prueba_Generador_Red.slx, luego, varíe la corriente de excitación del generador con el bloque *slider excitación*, y logre que la tensión en terminales sea igual a la de la red, posteriormente, varíe la velocidad hasta llegar a la nominal del generador con el bloque slider velocidad, con el fin de mantener una misma frecuencia ya que la velocidad es proporcional a la frecuencia.

Visualice que los bloques de las lámparas estén de color verde, indicando que el generador está en sincronismo con la red.

Estando ya en sincronismo, varíe la potencia activa que entrega el generador modificando la corriente de excitación con el bloque *slider excitación*, y observe cómo se comporta la máquina síncrona con respecto a la red.

PRUEBAS CURVA EN V

Objetivo de la prueba

Obtener la curva en V.

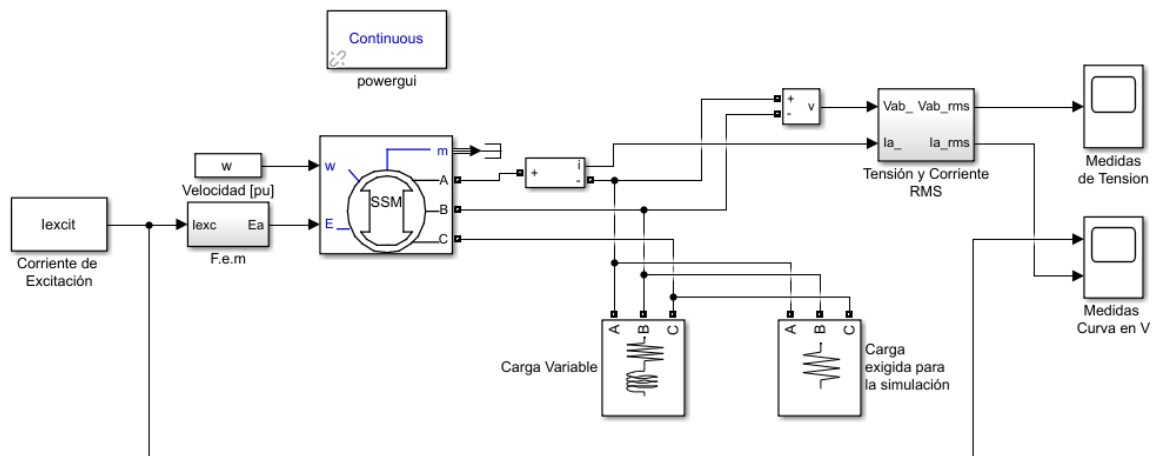
Tareas

Determine la corriente de armadura en función de la corriente de excitación al variar el factor de potencia de la carga, manteniendo constante la tensión y velocidad de la máquina.

Instrucciones de uso

Abra el archivo ANEXO_M_Prueba_Curva_V.slx (Ver Fig. 72)

Fig. 73 Visualización del ANEXO M.



Ejecute el archivo ANEXO_N_Script_Curva_V.m con el fin de cargar los parámetros del bloque *Máquina Síncrona en pu*, y cierre por ahora los archivos que éste genere.

Cambie el valor del bloque *Carga Variable*, por un valor inicial de potencia activa que va a mantener constante. Luego, ejecute la simulación y compruebe con el scope *Medidas de Tension*, la tensión en terminales sea la nominal. Si no es así, varíe el valor del bloque constante denominado *Corriente de Excitación*, hasta lograr la tensión nominal.

Cambie el valor de potencia reactiva, ya sea inductiva o capacitiva, recopilando los valores de carga y corriente de excitación. Luego, realice lo mismo, pero para el otro tipo de carga no seleccionado anteriormente. Guarde en el vector R_c , L_c e I_{camp} respectivamente los valores obtenidos.

Por último, ejecute el script nuevamente para obtener la curva en v del generador síncrono.

ANEXO P: Información de Cargas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

La Tabla 4 muestra los valores de carga resistiva.

Tabla 4 Valores de Carga Resistiva en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Posición	Resistencia	Potencia disipada por fase
1	840 [W]	58 [W]
2	600 [W]	80 [W]
3	350 [W]	138 [W]
4	240 [W]	200 [W]
5	150 [W]	330 [W]
6	120 [W]	410 [W]
7	97 [W]	500 [W]

Fuente Laboratorio de Máquinas Eléctricas UIS.

La Tabla 5 muestra los valores de carga capacitiva.

Tabla 5 Valores de Carga Capacitiva en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Posición	Capacitancia 1	Capacitancia 2	Potencia disipada por fase
1	2,5 F	3 [μ F]	46 [VAr]
2	5 F	5 [μ F]	91 [VAr]
3	8 F	8 [μ F]	146 [VAr]
4	12,5 F	12,5 [μ F]	228 [VAr]
5	15 F	15,5 [μ F]	275 [VAr]
6	20 F	20,5 [μ F]	364 [VAr]
7	29 F	28,5 [μ F]	510 [VAr]

Fuente Laboratorio de Máquinas Eléctricas UIS.

La Tabla 6 muestra los valores de carga inductiva.

Tabla 6 Valores de Carga Inductiva en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Posición	Inductancia	Potencia disipada por fase
1	1,56 [H]	83,5 [VAr]
2	0,76 [H]	167 [VAr]
3	0,51 [H]	250 [VAr]
4	0,38 [H]	333 [VAr]
5	0,30 [H]	420 [VAr]
6	0,255 [H]	500 [VAr]

Fuente Laboratorio de Máquinas Eléctricas UIS.

La Tabla 7 presenta la incertidumbre de los equipos utilizados en el laboratorio.

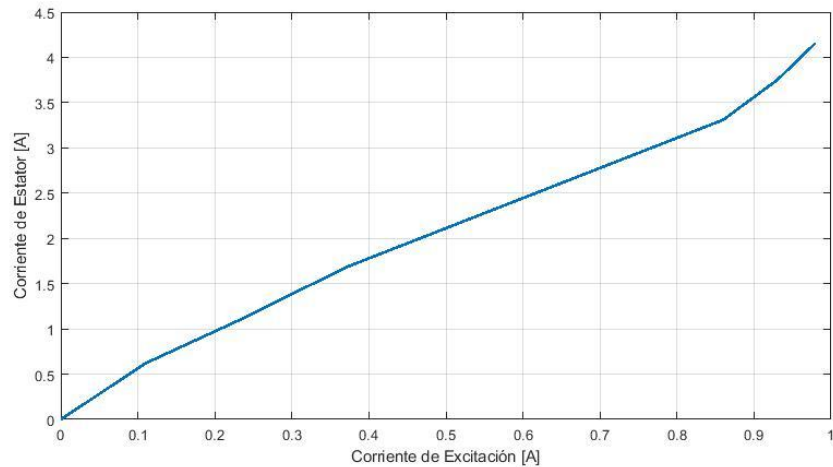
Tabla 7 Incertidumbre de los Equipos de Medida en el Laboratorio.

Equipo	Medida	Rango	Incertidumbre
Multímetro Fluke 117	Tensión AC	600 [V]	2% + 3
Pinza Amperimétrica AMPROBE ACDC- 52NAV	Corriente AC	99.99 [A]	+/- (1.5% + 5dgt)
	Corriente DC	99.99 [A]	+/- (1.5% + 0.2 A)
Vatímetro Trifásico UNIT-T UT267B	Tensión AC	600 [V]	+/- (1.5%rdg+3dgt)
	Corriente AC	20 [A]	
	Potencia Activa	12 [kW]	+/- (3%rdg+3dgt)
	Potencia Reactiva	12 [kVAR]	
	Potencia Aparente	12 [kVA]	
Factor de Potencia	-1 ~ +1	+/- 0.03	

ANEXO R RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN LABORATORIO DE LA UIS
CURVAS CARACTERISTICAS DE CORTOCIRCUITO Y EN CIRCUITO ABIERTO.

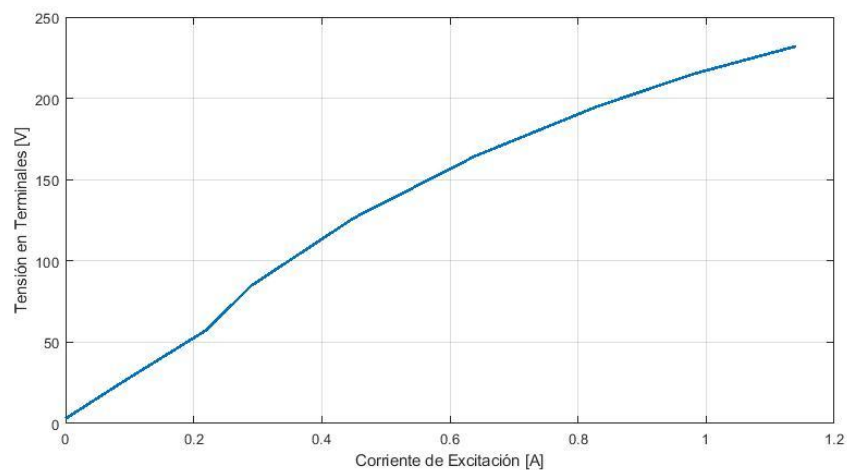
En la Fig. 74 se presenta la curva característica de cortocircuito.

Fig. 74 Curva de Cortocircuito en el Laboratorio UIS



En la Fig. 75 se presenta la curva característica en vacío.

Fig. 75 Curva de Circuito Abierto en el Laboratorio UIS



A partir de la característica de cortocircuito y en vacío, se obtuvo la relación de cortocircuito, definida como la relación de la corriente de excitación requerida para producir la tensión nominal en vacío (I_{ex_1}) y la corriente de excitación necesaria para producir la corriente nominal en cortocircuito (I_{ex_2}). Conocida la relación de cortocircuito, es posible obtener fácilmente la impedancia síncrona en por unidad, donde la impedancia síncrona es igual al inverso a la relación de cortocircuito.

$$Relación_{coci} = \frac{I_{ex_1}}{I_{ex_2}} = \frac{1.023}{0.948} = 1.0789$$

$$Z_{S_{pu}} = \frac{1}{Relación_{coci}} = \frac{1}{1.0789} = 0.9269 [pu]$$

A partir de la impedancia síncrona y la resistencia síncrona, se halla la reactancia síncrona

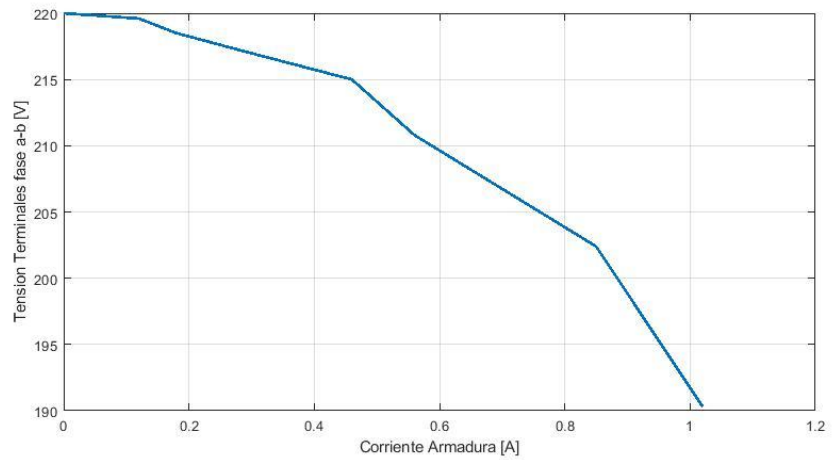
$$Z_{S_{pu}} = \sqrt{R_{S_{pu}}^2 + X_{S_{pu}}^2}$$

$$X_{S_{pu}} = \sqrt{Z_{S_{pu}}^2 - R_{S_{pu}}^2} = \sqrt{0.9269^2 - 0.0403^2} = 0.9260 [pu]$$

CURVA CARACTERISTICA EXTERNA.

En la Fig. 76 se muestra la curva característica externa del laboratorio de la UIS.

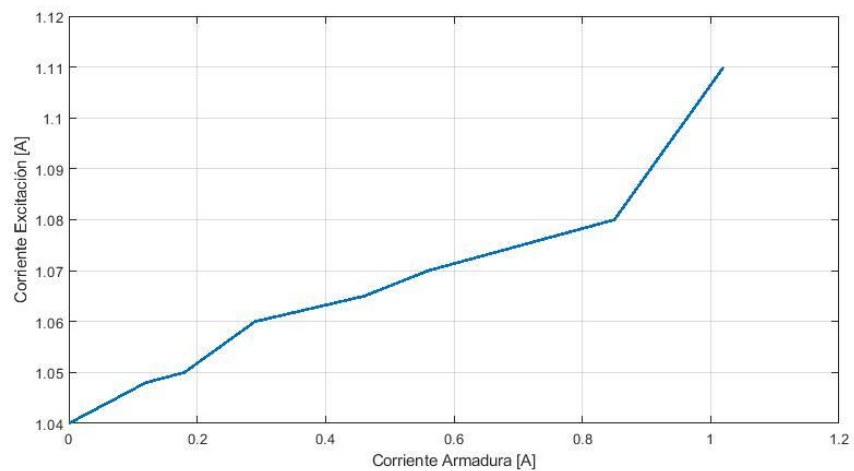
Fig. 76 Curva Característica Externa en el Laboratorio UIS



CURVA CARACTERISTICA DE REGULACIÓN.

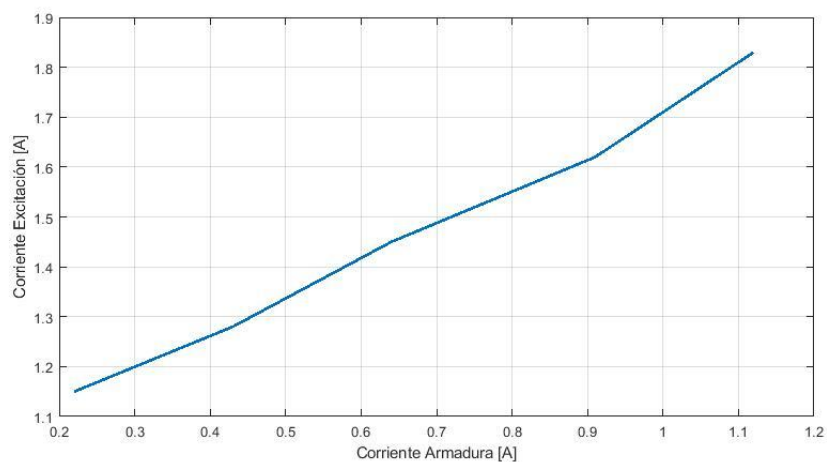
En la Fig. 77 se muestra la curva característica de regulación para carga resistiva del laboratorio de la UIS.

Fig. 77 Curva Característica de Regulación para Carga Resistiva en el Laboratorio UIS



En la Fig. 78 se muestra la curva característica de regulación para carga inductiva del laboratorio de la UIS.

Fig. 78 Curva Característica de Regulación para Carga Inductiva en el Laboratorio UIS



En la Tabla 8 se presenta los valores de regulación de tensión, para distintos tipos de carga.

Tabla 8 Regulación de Tensión en el Laboratorio UIS

Carga S=0.25 [pu]	Tensión Terminales [pu]	Tensión Inducida [pu]	Regulación de Tensión [%]
Fp: 0.86 atraso	1	1.1375	13.75 %
Fp: 0.95 atraso	1	1.099	9.9 %
Fp: 1	1	1.03	3 %
Fp: 0.95 adelanto	1	0.963	-3.7 %
Fp: 0.86 adelanto	1	0.916	-8.4 %

PRUEBA CONEXIÓN EN PARALELO DE DOS GENERADORES SINCRONOS.

La repartición de potencia activa para una carga resistiva se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Repartición de Potencia para Carga Resistiva en el Laboratorio

	Pg1	Pg2	Pc	Qg1	Qg2	Qc	Sg1	Sg2	Sc	Fpg1	Fpg2	Fpc
	[W]	[W]	[W]	[VAr]	[VAr]	[VAr]	[VA]	[VA]	[VA]			
Fase U	15	35	41	0	0	0	15	35	41	1	1	1
Fase V	14.5	32.2	41.2	0	0	0	14.5	32.2	41.2	1	1	1
Fase W	17.4	36.1	41.6	0	0	0	17.4	36.1	41.6	1	1	1
Fase U	32.5	18.6	41.4	0	0	0	32.5	18.6	41.4	1	1	1
Fase V	35.3	17.7	40.9	0	0	0	35.3	17.7	40.9	1	1	1
Fase W	31.4	17.9	40.9	0	0	0	31.4	17.9	40.9	1	1	1

Los dos generadores alimentan la carga resistiva conectada, y asumen las pérdidas de los conductores necesarias para el montaje que no son tenidas en cuenta.

La repartición de potencia activa y potencia reactiva para una carga resistiva e inductiva se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Repartición de Potencia Activa y Reactiva para Carga RL en el Laboratorio

	Pg1	Pg2	Pc	Qg1	Qg2	Qc	Sg1	Sg2	Sc	Fpg1	Fpg2	Fpc
	[W]	[W]	[W]	[VAr]	[VAr]	[VAr]	[VA]	[VA]	[VA]			
Fase U	59.5	57.3	113.4	9.4	14.8	24.1	60.2	59.1	115.9	0.999	0.97	0.978
Fase V	65	50.7	113.1	8.4	20.1	28.2	65.1	57.8	116.6	0.999	0.965	0.97
Fase W	60.3	51	110.6	8.1	20.3	29.7	60.4	57.8	114.5	0.999	0.913	0.966
Fase U	39.7	77.1	114.4	12.1	14	26.4	41.5	84.4	117.5	0.956	0.914	0.974

Fase V	43.	74.2	115.2	12.6	9.8	20.4	45.5	82.5	117	0.956	0.924	0.985
Fase W	40.	73	111.3	12.4	13	24.6	42.5	80.6	115.8	.956	.906	.961

En la Fig. 79 se evidencia la conexión de los dos generadores síncronos alimentando la carga.

Fig. 79 Montaje en Paralelo de los dos Generadores alimentando una Carga en el Laboratorio UIS



CURVA EN V.

En la Fig. 80 se muestra la curva en v del laboratorio de la UIS.

Fig. 80 Curva en V en el Laboratorio UIS

