



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA ANÁLISIS DINÁMICO

José David Álvarez Privado

Asesorado por el Ing. Rony Otoniel Castillo García

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA
SÍNCRONA PARA ANÁLISIS DINÁMICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSÉ DAVID ÁLVAREZ PRIVADO

ASESORADO POR EL ING. RONY OTONIEL CASTILLO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA ANÁLISIS DINÁMICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 4 de mayo de 2006.



José David Álvarez Privado



REF. EIME 28. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; José David Alvarez Privado titulado: "IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SINCRONA PARA ANÁLISIS DINÁMICO", procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Guillermo Antonio Puente Romero'.



GUATEMALA, 27 DE ABRIL 2011.



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 29. 2010
Guatemala, 02 de AGOSTO 2010.


Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA
SINCRONA PARA ANÁLISIS DINÁMICO, del estudiante, José
David Alvarez Privado, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador de Potencia

JLPR/sro



Guatemala, 27 de abril del 2010

Ingeniero
Guillermo Bedoya
Coordinador del Área de Potencia
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC

Estimado Ingeniero Bedoya:

De acuerdo con la designación hecha por la Dirección de la Escuela Mecánica Eléctrica , me permito informarle que he tenido a bien asesor el Trabajo de Gradación titulado: **Identificación de Parámetros de la Máquina Síncrona para Análisis Dinámico**, desarrollado por el estudiante **JOSÉ DAVID ALVAREZ PRIVADO**, Carné **97-12441** y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo remitiéndole a la Coordinación del Área de Potencia para el tramite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme,

Atentamente,



Ing. Rony Castillo Garcia
Asesor

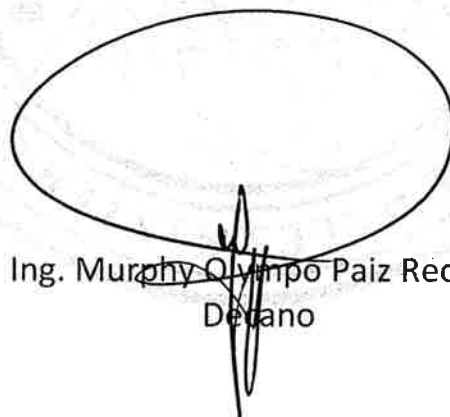




DTG. 229.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA ANÁLISIS DINÁMICO**, presentado por el estudiante universitario **José David Álvarez Privado**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 23 de mayo de 2012.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi amparo y fortaleza durante toda mi vida. Gracias mi Señor.
- Mis padres** Por su amor incondicional, paciencia y comprensión; por la fe depositada en mí, por ser ejemplos de carácter y actitud, con mucho cariño este éxito se lo dedico a ellos.
- Mi hermano** Que con su disciplina y tenacidad ha sido un ejemplo para mí. Le agradezco su apoyo, comprensión y cariño.
- Mi familia** Por sus consejos, apoyo y cobijo en todos estos años de lucha.
- Mis amigos** Por su lealtad y cariño, por estar presentes en los buenos y malos momentos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	1
1.1. Pasos básicos en el proceso de identificación.....	2
1.2. Revisar y seleccionar la disposición del experimento.....	2
1.3. Diseño del experimento	4
1.3.1. Medición de la función de respuesta en frecuencia	5
1.3.2. Diseño de la señal de excitación.....	6
1.3.3. Preprocesamiento	7
1.4. Identificación.....	7
1.4.1. Elección de una clase de modelo.....	8
1.4.2. Selección de la complejidad del modelo	8
1.4.3. Impacto de las condiciones iniciales o transitorias	8
1.5. Validación o verificación	9
1.6. Selección del esquema de identificación	10
2. MODELACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.....	13
2.1. Requerimiento de modelación de la máquina síncrona	13
2.2. Tipos de modelos	15
2.3. Estructura del modelo de eje directo	20

2.4.	Estructura del modelo de eje en cuadratura	28
2.5.	Modelos de orden superior.....	29
3.	PRUEBA DE RESPUESTA EN FRECUENCIA A ROTOR PARADO	33
3.1.	Condiciones para las pruebas de respuestas en frecuencia a rotor parado y requerimientos de la instrumentación.....	34
3.2.	Configuración de la prueba.....	35
3.3.	Parámetros medibles de la prueba.....	38
3.4.	Procedimiento de la prueba.....	40
3.4.1.	Posición del rotor en la prueba del eje directo y eje en cuadratura	42
3.5.	Pruebas de eje directo.....	43
3.5.1.	Medición $Z_d(s)$	43
3.5.2.	Medición $sG(s)$	47
3.5.3.	Medición $Z_{af0}(s)$	48
3.6.	Pruebas del eje en cuadratura.....	49
4.	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS	53
4.1.	Interpretación de los datos de prueba	54
4.1.1.	Estructura	54
4.1.2.	Procedimiento de ajuste de la curva	56
4.1.3.	Modelo de mínimos cuadrados no lineal.....	56
4.2.	Procedimiento para la identificación de los parámetros del circuito de la máquina síncrona.....	60
4.3.	Resultados de la identificación	63
4.3.1.	Eje directo.....	63
4.3.2.	Eje en cuadratura	67

5. VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS IDENTIFICADOS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA	71
5.1. Conversión de datos de parámetros de circuito equivalente a inductancias dinámicas estándar	72
5.2. Simulación	76
5.3. Análisis	78
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	89
APÉNDICES	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de bloque de un sistema dinámico línea.....	6
2.	Circuito equivalente de eje directo incluyendo el transformador ideal....	21
3.	Circuito equivalente de eje directo incluyendo un devanado de amortiguamiento.....	22
4.	Selección de modelos de generador de varios grados de complejidad..	27
5.	Circuito equivalente del eje en cuadratura que incluye un solo devanado de amortiguamiento.....	28
6.	Modelo del circuito del eje directo generalizado para pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado.....	30
7.	Modelo del circuito del eje en cuadratura generalizado para pruebas de respuesta frecuencia a rotor parado.....	30
8.	Prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado.....	33
9.	Configuración de la prueba para medición en el eje directo $Z_d(s)$	35
10.	Configuración de la prueba para medición en el eje directo $sG(s)$	36
11.	Configuración de la prueba para medición en el eje directo $Z_{afo}(s)$	36
12.	Configuración de la prueba para medición en eje directo $\Delta v_{arm}/ \Delta i_{arm}$	37
13.	Posición del rotor para la prueba del eje directo.....	43
14.	Impedancia del eje directo.....	44
15.	Inductancia operacional del eje directo.....	46
16.	Función de transferencia de armadura a campo del eje directo.....	48
17.	Impedancia de transferencia de armadura a campo del eje directo.....	49
18.	Inductancia operacional del eje en cuadratura.....	51

19.	Circuito equivalente del eje directo de segundo orden.....	54
20.	Circuito equivalente del eje en cuadratura con dos circuitos de amortiguamiento.....	55
21.	Inductancia operacional $L_d(s)$ eje directo, modelo 2.2 contra datos SSFR.....	58
22.	Función de transferencia de armadura a campo $sG(s)$ eje directo modelo 2.2 contra datos SSFR.....	59
23.	Inductancia operacional $L_q(s)$ eje en cuadratura, modelo 2.2 contra datos SSFR.....	60
24.	Diagrama unifilar de una sección del SNI.....	79
25.	Potencia de San José en simulación 1, contra modelo 2.2 simulación 2.....	80
26.	Frecuencia de Chixoy en simulación 1, contra simulación 2.....	81
27.	Potencia de Chixoy en simulación 1, contra simulación 2.....	81
28.	Voltaje en la barra de Guate-Sur 230, en la simulación 1 contra la simulación 2.....	82
29.	Error porcentual entre la diferencia de la respuesta transitoria de San José y el modelo 2.2.....	83

TABLAS

I.	Parámetros estándar.....	75
II.	Parámetros nominales y estándar del modelo 2.2 y San José.....	76
III.	Estadísticos: diferencias y errores del modelo 2.2.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ángulo entre el campo magnético de la fase a y el campo magnético del devanado de campo.
L_a, R_a	Autoinductancia de la fase en la armadura y resistencia de fase en la armadura.
T''_d, T''_q	Constante de tiempo subsubtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura en corto circuito.
T'''_{do}, T'''_{qo}	Constante de tiempo subsubtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura en circuito abierto.
T''_d, T''_q	Constante de tiempo subtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura en corto circuito.
T''_{do}, T''_{qo}	Constante de tiempo subtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura en circuito abierto.
T'_d, T'_q	Constante de tiempo transitorio del eje directo y eje en cuadratura en corto circuito.
T'_{do}, T'_{qo}	Constante de tiempo transitorio del eje directo y eje en cuadratura en circuito abierto.

T_{kd}	Constantes de tiempo en el numerador y denominador de la inductancia operacional y las impedancias de transferencia del eje directo $L_d(s)$, $sG(s)$, $Z_{fd}(s)$.
T_{kq}	Constantes de tiempo en el numerador y denominador de la inductancia operacional del eje en cuadratura $L_q(s)$.
$i_{armadura}$	Corriente de armadura.
i	Corriente de devanado.
i_d, i_q	Corrientes en terminal del estator en el eje directo y en cuadratura.
ψ	Flujo encadenado del devanado.
Ψ_d, Ψ_q	Flujos encadenados del estator del eje directo y en cuadratura.
f_{min}	Frecuencia mínima.
$u(t)$	Función de entrada en el dominio del tiempo.
$y(t)$	Función de salida en el dominio del tiempo.
$sG(s)$	Función de transferencia operacional de estator a campo.
$Z_{fd}(s)$	Impedancia de campo con el circuito de armadura en corto circuito.

L_l	Inductancia de dispersión del estator (para el eje directo y cuadratura).
$L_{afo}(s)$	Inductancia de transferencia de armadura a estator con las terminales de armadura en circuito abierto.
L_{ab}	Inductancia mutua de fase a fase.
L_f	Inductancia mutua del devanado de campo.
L_{fkd}	Inductancia mutua entre el devanado de campo y los devanados de amortiguamiento del eje directo referidos al estator.
L_{ad}, L_{aq}	Inductancia mutua entre los ejes directos y en cuadratura del estator al rotor: L_{adu}, L_{aqu} medidas en condiciones no saturadas; $L_{ad}(0), L_{aq}(0)$ medidas a frecuencia cero durante las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado.
L_m	Inductancia mutua pico de la fase en la armadura al devanado de campo.
L_d, L_q	Inductancia síncrona del eje directo y en cuadratura: L_{du}, L_{qu} medida en condiciones no saturadas; $L_d(0), L_q(0)$ medidas a frecuencia cero durante las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado.
L'''_d, L'''_q	Inductancia subsubtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura.

- L''_d, L''_q Inductancia subtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura.
- L'_d, L'_q Inductancia transitoria del eje directo y eje en cuadratura.
- $L_d(s), L_q(s)$ Inductancias operacionales del eje directo y en cuadratura, vistas desde las terminales del estator.
- N_p Número de polos magnéticos en la máquina.
- X''_d, X''_q Reactancia subsubtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura.
- X_l Reactancia de dispersión del estator (para el eje directo y en cuadratura).
- X_{ad}, X_{aq} Reactancia mutua entre los ejes directos y en cuadratura del estator al rotor: X_{adu}, X_{aqu} medidas en condiciones no saturadas; $X_{ad}(0), X_{aq}(0)$ medidas a frecuencia cero durante las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado.
- X_d, X_q Reactancia síncrona del eje directo y en cuadratura: X_{du}, X_{qu} medida en condiciones no saturadas; $X_d(0), X_q(0)$ medidas a frecuencia cero durante las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado.
- X''_d, X''_q Reactancia subtransitoria del eje directo y el eje en cuadratura.
- X'_d, X'_q Reactancia transitoria del eje directo y eje en cuadratura.

N_{afd}	Relación de vueltas.
R_{kd}, L_{kd}	Resistencia e inductancia de dispersión del devanado de amortiguamiento del eje directo donde $k = 1, 2, \dots, n$. donde k es el número de devanados de amortiguamiento.
R_{kq}, L_{kq}	Resistencia e inductancia de dispersión del devanado de amortiguamiento del eje en cuadratura donde $k = 1, 2, \dots, n$. donde k es el número de devanados de amortiguamiento.
R_{fd}, L_{fd}	Resistencia e inductancia de dispersión del devanado de campo referidos al estator.
e'_{fd}, i'_{fd}	Valores reales de voltaje y corriente de campo medido en las terminales de los devanados de campo.
ω_m, ω	Velocidad angular mecánica y eléctrica.
$V, V_{armadura}$	Voltaje del devanado de armadura.
e_{fd}, i'_{fd}	Voltaje y corriente de campo reflejado en los devanados de armadura entre el campo por la relación de vueltas del devanado de armadura del eje directo.

GLOSARIO

Identificación de sistemas	Es el arte y ciencia de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de valores observados de entrada y salida.
Inductancia	Es una medida de la capacidad de un dispositivo de almacenar energía en forma de campo magnético.
Máquina síncrona	Es una máquina eléctrica rotativa que convierte energía mecánica en eléctrica o viceversa. Se utiliza para generar la mayor parte de la energía que es consumida por los usuarios de la red eléctrica.
Modelo	Es la relación que existe entre magnitudes observadas, esta relación puede ser una relación matemática pero puede ser también una tabla o una gráfica. Un modelo puede ayudar en la predicción de propiedades o comportamiento de un objeto.

RESUMEN

Con la introducción de computadoras de alta velocidad, fue posible calcular el campo magnético en todas las partes de la máquina síncrona. Utilizando el método de elementos finitos, este conduce a una exacta descripción de la máquina síncrona, pero el número de parámetros fácilmente alcanza varios miles. Por esa razón, el método de elementos finitos es muy útil para lograr comprender la máquina durante la etapa de diseño, pero este método es muy lento para propósitos de simulación. En simulación, y especialmente para aplicaciones de control, donde el modelo debe de ser evaluado en tiempo real, es importante mantener un número de parámetros limitado, reduciendo así el esfuerzo computacional.

Por otro lado, la identificación es el arte y técnica de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada y salida. Esta técnica puede ser vista como la interfaz entre las aplicaciones del mundo real y el mundo matemático de la teoría de la abstracción de modelos. Construir modelos desde datos observados, es un elemento fundamental en la ciencia.

En este trabajo se utilizan las técnicas de identificación para conocer los parámetros dinámicos de la máquina síncrona, las cuales están expresadas en la Normativa IEEE-115-1995 a través de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado (SSFR). La prueba se ha convertido en una alternativa a las pruebas de corto circuito, teniendo la ventaja de que esta no somete a esfuerzos mecánicos ni dieléctricos a la máquina síncrona.

Una vez conocidos los parámetros, se utilizarán para realizar una simulación dinámica, comprobando la respuesta del modelo contra un modelo ya conocido que funcione en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Conocer los conceptos generales de la identificación de sistemas y la implementación de una metodología para obtener los parámetros dinámicos de la máquina síncrona.

Específicos

1. Desarrollar el modelo dinámico no saturado de la máquina síncrona, utilizando la teoría de dos ejes de Park.
2. Estudiar la disposición, requerimientos y condiciones del equipo instrumental que se necesita para la toma de datos, en la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado.
3. Definir las funciones de transferencia del eje directo y el eje en cuadratura que se extraerán de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado de la máquina síncrona.
4. Conocer el método de ajuste de la curva de las funciones de transferencia del eje directo y en cuadratura, por medio de la técnica de mínimos cuadrados no lineales extraídos de la salida del experimento de respuesta en frecuencia a rotor parado.

5. Conocer las técnicas de conversión de parámetros para la determinación de los parámetros de circuito equivalente e inductancias estándar de la máquina síncrona.
6. Simular el modelo identificado de la máquina síncrona para conocer su respuesta dinámica y calcular la calidad de los parámetros, identificados a través de un análisis de error.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se estudia la metodología así como la determinación de los parámetros dinámicos de la máquina síncrona utilizando el modelo 2.2 (no saturado) definido en la normativa IEEE 1110-2002; tomando en cuenta que los métodos utilizados se basan en la identificación de sistemas. Al obtener los datos de salida de un experimento y conociendo la estructura del modelo de la máquina síncrona, se calculan las inductancias operacionales, los parámetros de circuito equivalente y las inductancias estándar. La verificación de los resultados se realiza simulando la máquina síncrona identificada sobre el SNI de Guatemala, comparando su respuesta transitoria contra los parámetros de una máquina que opera actualmente en el SNI.

Una introducción sobre la teoría de identificación se desarrolla en el Capítulo 1, los pasos, el diseño de funciones de excitación, así como la recomendación del mejor esquema de identificación. En el capítulo 2, se describe el modelo dinámico no saturado de la máquina síncrona, utilizando el enfoque de la teoría de dos ejes, así como muestra la estructura de modelos patrón que se utilizan en las simulaciones dinámicas. El capítulo 3 explica el experimento establecido para conocer los parámetros de la máquina síncrona conocido como respuesta en frecuencia a rotor parado; aquí se describen las condiciones que debe de reunir el experimento para alcanzar una buena recolección de datos.

El núcleo de la identificación se desarrolla en el capítulo 4, aquí se conocen las técnicas de ajuste de la curva a los datos experimentales, así como la metodología para el cálculo de los parámetros de los generadores. La

verificación de los datos obtenidos en el anterior capítulo se realiza en el capítulo 5 que, mediante un análisis de error, compara la respuesta dinámica de la máquina síncrona identificada.

Los objetivos para tener un modelo de la máquina síncrona pueden ser muchos así como las técnicas aplicadas. Algunos de estos objetivos pueden ser: lograr mayor comprensión sobre el complejo funcionamiento electromagnético de la máquina, para simulación dentro de un sistema de potencia y también para propósitos de control.

1. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación es una técnica poderosa para construir modelos exactos de sistemas complejos. Consiste en cuatro pasos básicos, que están interrelacionados:

- Diseño del experimento
- La construcción de un modelo
- La estimación de los parámetros extraídos desde las mediciones
- Verificación o validación del modelo seleccionado

La modelación se basa en el uso apropiado de habilidades y conocimientos especializados por parte de personas expertas en un campo de estudio, que deciden qué aproximaciones se pueden hacer, sugiriendo cómo manipular el sistema, para revelar los aspectos importantes. En consecuencia, la modelación debe ser ejecutada por los propios expertos. Naturalmente, esto requiere de herramientas para extraer información de interés. Sin embargo, la mayor parte de los expertos no están familiarizados con la teoría de identificación y se esforzarán en cada nueva situación, con las mismas dificultades, mientras desarrollan sus propias técnicas de identificación, perdiendo tiempo en problemas que ya están resueltos en la literatura de identificación.

En el campo de la distribución, transmisión y generación de electricidad, la identificación se ha utilizado para conocer los parámetros de cargas, líneas de transmisión y máquinas eléctricas.

En el área de máquinas síncronas se ha utilizado la identificación para la estimación de parámetros, utilizando las pruebas estándares establecidas, como la de cortocircuito trifásico, respuesta a la función paso, respuesta en frecuencia a rotor parado y estimaciones en línea.

1.1. Pasos básicos en el proceso de identificación

Las distintas fases del proceso identificación son las siguientes:

- Revisar la disposición del experimento
- Diseño del experimento
- Preprocesamiento de los datos
- Paso de identificación
- Validación de los resultados

Cada una de estas fases se desarrolla en las secciones siguientes.

1.2. Revisar y seleccionar la disposición del experimento

En muchos casos, una identificación comienza con los datos que están disponibles en el lugar. Se debe inspeccionar la disposición del experimento y revisar cómo fueron reunidos los datos.

A menudo se puede mejorar significativamente realizando cambios muy simples en la configuración: ¿Están los amplificadores instalados apropiadamente? ¿Qué preprocesamiento se realiza con los datos iniciales? ¿Cuáles son las propiedades de los sensores que son usados para obtener los datos iniciales? ¿Está el proceso operando bajo condiciones estacionarias?

Cada uno de estos aspectos puede tener un impacto considerable en la calidad total de los datos.

Una visita al lugar del experimento puede revelar complicaciones inesperadas que serían detectadas solamente tiempo después acarreado con esto un desperdicio tiempo, dinero y esfuerzo. Por ejemplo, los datos pueden obtenerse con una meta específica en mente, sin poner atención a los efectos provocados por los disturbios de las señales o a la mala instalación, que eventualmente hacen que los datos sean inservibles para los propósitos de modelación pretendidos.

Una típica configuración de la instrumentación consiste de: un generador de señales, un equipo de adquisición de datos y una parte de procesamiento de datos, el cual extrae los parámetros de interés. La tecnología de sensores y actuadores están conectados cercanamente a la aplicación, por lo que gran cantidad de energía es transferida a ellos comparada con el equipo de adquisición de datos (amplificación, atenuación, filtraje, muestreo y cuantización), estando estos acoplados débilmente, ya que pequeñas cantidades de energía son transferidas desde el experimento.

No es fácil dar reglas generales para los sensores y actuadores, aunque es siempre digno de atención revisar la linealidad, la desviación y la dispersión de estos dispositivos. Estas cuestiones están íntimamente ligadas a la calibración de la configuración. Una buena identificación crea esquemas para reducir los impactos de errores estocásticos, pero los errores sistemáticos deben ser eliminados, ya sea por un procedimiento apropiado de calibración que minimice estos errores o para incluirlos en el modelo como parámetros desconocidos.

¿Qué opción es la óptima? depende fuertemente en el esfuerzo que es necesario hacer para cada una de las soluciones. En general, la calidad del modelo mejora con la calidad de las mediciones. La identificación no debe ser una excusa para hacer mediciones descuidadas, aunque se pueden abrir nuevas posibilidades para extraer información necesaria bajo las peores condiciones de operación.

1.3. Diseño del experimento

La segunda fase en el proceso de identificación es el diseño de la señal de excitación. A veces, el investigador no puede influenciar de ninguna forma el proceso. Aún así, se debe revisar si la naturaleza de la fluctuación tiene suficiente información para dar, al menos, una identificación exitosa. En todos los demás casos una señal de excitación debe ser seleccionada.

Esto crea inmediatamente una serie de preguntas: ¿Qué nivel de excitación debe ser aplicado? ¿Qué banda de frecuencia debe ser excitada? En una fase inicial del proceso de identificación se puede solamente utilizar información previa para colocar estos valores. Los experimentadores del proceso pueden tener un buen conocimiento de los valores aceptables aplicados al experimento. Para algunos dispositivos, los valores nominales dados en los manuales del usuario pueden ayudar. Si ninguna de esta información está disponible, una prueba inicial puede dar la información requerida. En este caso solo se puede esperar que la experiencia individual ayude a prevenir sobrecargas peligrosas en el dispositivo.

Una segunda cuestión es la linealidad del dispositivo. Es importante conocer si es o no satisfecha la suposición de linealidad.

Si el investigador está seguro, no es necesario revisar las distorsiones no lineales; si el investigador no está seguro, es mejor utilizar excitaciones para detectar su presencia.

Si no se detectan linealidades significativas, se deben reflejar con cuidado en los objetivos del proceso de modelación: ¿Tiene la intención de extraer sistemas lineales subyacentes o está interesado en una mejor aproximación lineal? Un diseño de excitación apropiado debe de estar de acuerdo con las respuestas que se den a la pregunta anterior. En el primer caso, la amplitud debe ser hecha lo más pequeña posible; de lo contrario, la excitación debe representar la clase de excitación que será aplicada al dispositivo.

Una tercera cuestión general que debe ser resuelta es la selección entre excitación periódica y arbitraria. La imposición de periodicidad puede ser una fuerte restricción en algunas aplicaciones. Sin embargo, cada vez que se realice, ofrece varias ventajas en el resto de los procesos de identificación. Los requerimientos del experimento (sincronización, medición de un número entero de periodos) deben de ser satisfechos para tomar todas las ventajas de la periodicidad.

Finalmente, es necesario revisar si los experimentos serán hechos bajo condiciones de retroalimentación. Esto puede ser explícito o estar implícitamente presente.

1.3.1. Medición de la función de respuesta en frecuencia

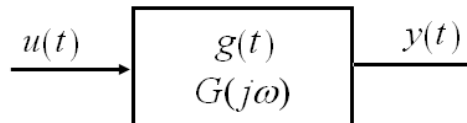
La medición de la respuesta en frecuencia, es un paso intermedio en el proceso de identificación.

La complejidad del problema de modelación es visualizado antes de empezar el modelo paramétrico. La calidad de las mediciones es evaluada en una fase temprana.

Si se considera un sistema dinámico lineal $G(j\omega)$ entre la entrada $u(t)$ y la salida $y(t)$ como se muestra en la figura 1, la modelación paramétrica requiere de varias decisiones tales como las deseleccionar el orden de numerador y denominador de $G(s)$. De modo que se aconseja tener una buena idea acerca del sistema que está siendo probado.

La información puede ser extraída de funciones impulso, paso o periódicas. Una función de respuesta en frecuencia consiste de funciones de transferencia $G(j\omega_k)$ en un conjunto de frecuencias discretas $\omega_k, k = 1, \dots, F$.

Figura 1. **Diagrama de bloque de un sistema dinámico lineal**



Fuente: OGATA, K. Ingeniería de control moderno. 2003. p.493.

1.3.2. **Diseño de la señal de excitación**

Un consejo muy importante que se debe tomar en cuenta es que la función de excitación para la determinación de la función de respuesta en frecuencia, sea una señal periódica, debido a que simplifica el trabajo de identificación.

La señal que se utilizará específicamente para el presente estudio es una señal eléctrica (corriente y voltaje). Los rangos de frecuencia necesarios para la prueba son, aproximadamente, de 0.001 a 10Hz para sistemas con constantes de tiempo grandes. El rango de frecuencia para sistemas de constantes pequeñas está entre 0.1 a 1000Hz; este rango es el utilizado para estudios de máquinas eléctricas según las normativa actual.

1.3.3. Preprocesamiento

Los datos iniciales obtenidos durante el experimento, necesitan de ser preprocesados antes de empezar el paso de identificación de mayor demanda computacional. Esto no solo facilita la revisión de anomalías en los datos y malos experimentos en una fase temprana del proceso de identificación, sino también provee una idea más profunda de la complejidad del problema (observar la función de respuesta en frecuencia), y hacer lo posible en separar los diferentes aspectos paralelos (como las tendencias y sesgos de los sensores) de la tarea principal, que es extraer los parámetros lineales del modelo con base en los datos.

1.4. Identificación

Solamente hasta el cuarto paso se llega finalmente al núcleo del procedimiento de identificación, donde un modelo paramétrico es extraído de los datos preprocesados.

Tal como en los pasos anteriores, varias decisiones deberán ser hechas por el usuario. Entre ellos se discutirá la elección de una clase de modelo, la selección de la complejidad del modelo y el impacto de las condiciones iniciales o transitorias.

1.4.1. Elección de una clase de modelo

En un primer paso se debe elegir una clase de modelo: si se quiere obtener un modelo continuo en el tiempo (interpretación física de los resultados) o un modelo discreto en el tiempo. Recordar que esta decisión debe de concordar con la selección de la configuración del experimento. De otra manera, se necesitarán modelos complejos.

1.4.2. Selección de la complejidad del modelo

Durante el proceso de identificación, no solamente los parámetros necesitan ser estimados sino también el orden del modelo debe de ser seleccionado. Existe una serie de estimaciones simplificadas, con un incremento de la sensibilidad al ruido (regresión lineal, método mínimos cuadrados), que hacen posible estimar todo el trabajo de modelación en un solo paso. Estos resultados pueden ser usados para obtener una idea inicial de la complejidad requerida.

1.4.3. Impacto de las condiciones iniciales o transitorias

Durante la identificación y la validación es importante salvaguardarse contra el impacto de las condiciones iniciales (dominio del tiempo) efectos de dispersión (dominio de la frecuencia) en los datos y el modelo. Ambos efectos pueden incluirse en el modelo por medio de la incorporación adicional de términos transitorios. Estos efectos tienen un impacto de segundo orden en la calidad del modelo que será identificado. Por esta razón, se aconseja al investigador añadir estos términos adicionales a su modelo cada vez que excitaciones arbitrarias sean usadas.

Para excitaciones periódicas, los transitorios deben considerarse solo si períodos de números no enteros son medidos, (y no pueden ser extraídos de los datos iniciales) o las mediciones no pueden ser hechas bajo condiciones de estado estable.

1.5. Validación o verificación

Al final del proceso de identificación, se debe revisar si el modelo identificado es válido, verificable o no. Idealmente, el modelo estimado debe ser uno, pero el investigador debe darse cuenta de que el modelo “exacto” es solamente un concepto idealizado. La mayoría de los sistemas en la vida real no puede describirse exactamente por una relación de función de transferencia. Por otra parte, debido a que un sistema preciso nunca es conocido, no se es capaz de contestar esa pregunta. Por esta razón, se debe enfocar en preguntas más realistas como: ¿Describe bien el modelo a los datos? ¿Se ajusta el modelo a mis necesidades? Estas preguntas pueden ser apropiadamente contestadas.

A veces no es necesario extraer toda la información de los datos, especialmente cuando esto puede conducir a modelos muy complejos. En esta etapa el investigador puede especificar un nivel de error aceptable, y una vez que este nivel es alcanzado, el modelo no será más incrementado.

La verificación de un modelo se realiza para asegurar este se programó correctamente, los algoritmos fueron implementados apropiadamente y que además no contiene errores y descuidos. La verificación asegura que la especificación es completa.

La verificación no asegura que el modelo soluciona problemas importantes, se ajuste a requerimientos de un conjunto de especificaciones del mismo y que refleje correctamente el comportamiento de procesos en el mundo real.

La validación, por otro lado, busca asegurar que el modelo satisface los requerimientos previstos en términos de los métodos empleados y los resultados obtenidos. El objetivo principal de la validación es que el modelo sea útil en el sentido de que el modelo trate el problema correcto, provea información precisa acerca del sistema que se está modelando y hacer que dicho se utilice realmente, ya que muestra el comportamiento bastante cercano a los procesos reales.

1.6. Selección del esquema de identificación

El objetivo de esta sección es crear una selección apropiada entre muchos posibles esquemas de identificación. Contestando unas cuantas preguntas, el investigador es guiado a escoger un buen método que puede resolver sus problemas. Debe quedar claro que esto no garantiza la resolución de cualquier problema, pero al menos la probabilidad para el éxito será maximizado. Dichas preguntas son:

- ¿Cuál será el problema a resolver? ¿Por qué razón necesitó un modelo? Se consideran dos posibles respuestas. La primera es que un controlador digital basado en modelo será diseñado sobre las bases del modelo de identificación. La otra posibilidad consiste en otras alternativas, por ejemplo, diseñar modelos para simulación, o más general, modelos de subestructuras que pueden estar en cascada

modelos para interpretación física o para identificar parámetros físicos tales como: amortiguación y frecuencias resonantes.

- ¿Se quiere construir un modelo discreto o un modelo continuo? Es claro que para controladores digitales, se necesita un modelo de tiempo discreto. Para otras aplicaciones, ambos dominios son posibles. Por ejemplo, modelos de tiempo discreto son apropiados para hacer simulaciones de tiempo discreto sobre computadoras digitales, mientras que modelos de tiempo continuo son más convenientes para interpretaciones físicas.
- ¿Es la excitación periódica o no periódica? Una opción crucial es escoger el uso de excitaciones periódicas o no periódicas. Se aconseja el uso de excitaciones periódicas; se considera el uso de excitaciones no periódicas como último recurso.
- ¿Cómo el ruido se encuentra en el proceso?: ¿Existe ruido en el proceso, en las mediciones de salida o en la entrada y salida de las mediciones? Para algunos métodos, esto no es importante, pero para otros sí. La identificación con retroalimentación es un problema más tedioso en el diseño de control, que resolver el mismo problema en lazo abierto. La situación más general es que se considere el ruido en las mediciones de entrada y salida. Esto también incluye el problema de la retroalimentación.

2. MODELACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

El estudio de estabilidad en los sistemas de potencia se enfoca en la destreza de mantener la sincronía de la red después de disturbios severos. Sin embargo, con el crecimiento continuo de las interconexiones, el crecimiento en el uso de nuevas tecnologías, y la necesidad de operar los sistemas de potencia en condiciones al límite, hacen que el estudio de la estabilidad en los sistemas de potencia sea de gran importancia.

Las máquinas síncronas pueden ser modeladas con tanto detalle como se necesite en los estudios de estabilidad. Esto incluye la apropiada representación de la dinámica del circuito de campo, el sistema de excitación y los circuitos de amortiguamiento.

2.1. Requerimiento de modelación de la máquina síncrona

Para el análisis de problemas de estabilidad de voltaje y frecuencia, usando simulaciones en el dominio del tiempo, los períodos de estudio están en los rangos de décimas de minuto a varios minutos.

Para mejorar la eficiencia computacional de simulaciones dinámicas de largo período, se utilizan modelos que utilizan perturbaciones singulares para separar la alta o baja dinámica de los sistemas.

No obstante lo anterior, es importante reconocer los siguientes requerimientos especiales en la representación de la máquina síncrona para diferentes categorías de estudios de estabilidad:

- Para disturbios grandes en análisis de estabilidad de ángulo, particularmente para generadores con sistemas de excitación de respuesta alta inicial, los efectos de saturación magnética deben de representarse en forma precisa a nivel de flujos correspondientes a una operación normal. Es importante representar la dinámica del circuito de campo, ya que este tiene influencia significativa en la efectividad de los sistemas de excitación, al momento de mejorar la estabilidad ante grandes disturbios de ángulo.
- Para disturbios pequeños en estudios de estabilidad de ángulo, es importante representar en forma precisa los circuitos de campo, así como los circuitos de amortiguamiento del rotor.
- Para estudios de estabilidad de voltaje, es trascendente la capacidad del generador que suministra potencia reactiva. Durante las condiciones de voltaje bajo en el sistema, la potencia reactiva demandada sobre los generadores puede exceder los límites de la corriente de campo. En esta situación, usualmente la corriente de campo del generador, es automáticamente limitada por los relevadores de sobreexcitación, agravando aún más la situación.
- Los problemas de estabilidad de frecuencia son generalmente asociados con la inadecuada respuesta de los equipos y la pobre coordinación de control y protección. La estabilidad es determinada por la respuesta global del sistema, indicada por la frecuencia media.
- Los modelos de generador usados deben estar representados en forma precisa bajo condiciones de grandes variaciones en el voltaje y

frecuencia; así también los reguladores de voltaje, estabilizadores, protecciones V/Hz, y limitadores de sobreexcitación y baja excitación.

2.2. Tipos de modelos

La máquina síncrona se construye habitualmente con devanados de armadura trifásicos en el estator y un devanado de excitación sobre el rotor. Adicionalmente, los rotores de los generadores síncronos incluyen otros conductores en los cuales las corrientes son inducidas durante los fenómenos transitorios. En algunos casos, estos conductores son intencionalmente incluidos por el diseñador. En otros, éstos son inherentes al diseño de la máquina, como es el caso de las corrientes que pueden ser inducidas en el cuerpo del rotor como en los turbogeneradores de rotor sólido.

En los primeros años de desarrollo de técnicas de análisis de máquinas síncronas, se reconoció que el análisis se simplificaba grandemente si las máquinas eran representadas en un marco rotatorio de referencia con el rotor.

Para este análisis, las corrientes y voltajes de armadura son transformado en dos conjuntos de variables ortogonales, un conjunto alineado con el flujo magnético del devanado de campo, conocido como el eje directo del rotor, y un segundo conjunto alineado a lo largo del rotor, a una posición de 90 grados eléctricos del eje magnético del devanado de campo. Este segundo eje es conocido como el eje en cuadratura del rotor.

Mucha de la simplificación asociada con este acercamiento, tiene su raíz en dos características claves de este análisis:

- Bajo condiciones de operación en estado estable, todas las corrientes y flujos, incluyendo aquellos del devanado rotórico y transformadas del devanado de armadura, tienen valores constantes.
- Escogiendo los dos ejes a 90 grados eléctricos separados, flujos producidos por corrientes en los devanados en un eje, no producen flujos encadenados en el devanado del otro eje. Por lo tanto, estos conjuntos devanados existen ortogonales entre ellos. Esto simplifica grandemente las relaciones de flujo-corriente del modelo y permite una estructura del modelo, consistente en dos redes independientes, una para el eje directo y otra para el eje en cuadratura.

Para el uso de estas transformadas (Transformaciones de Park) se considera una máquina que consiste solamente de tres devanados de armadura y un rotor cilíndrico con un devanado de campo. Usando la terminología para generador, en donde la dirección de referencia de las corrientes de terminal son hacia fuera de las terminales de la máquina, las relaciones flujo-corriente para esta máquina se puede escribir de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ab} & L_m \\ L_{ab} & L_a & L_{ab} & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ab} & L_{ab} & L_a & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_m \cos\theta & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_{fd} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Y las ecuaciones de voltaje quedan de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ e_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ -i_{fd} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_{fd} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

La dependencia con el tiempo de la matriz de inductancias de la ecuación (2.1) se puede ver claramente cuando, bajo condiciones de operación en estado estable, el ángulo depende del tiempo, así:

$$\theta = \left(\frac{N_p}{2} \right) \omega_m t = \omega t \quad (2.3)$$

Cuando S representa una variable que será transformada, las transformaciones de Park se pueden escribir como:

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Aplicando esta transformación a la relación flujo corriente de la ecuación (2.1) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_{fd} \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a - L_{ab} & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_m & 0 \\ 0 & L_a - L_{ab} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}L_m & 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{al} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_{fd} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

El cual puede ser reescrito de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_{fd} \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{af} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ L_{af} & 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{al} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_{fd} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Similarmente, las ecuaciones transformadas de voltaje son:

$$v_d = -i_d R_a - \left(\frac{N_p}{2}\right) \omega_m \Psi_q + \frac{d\Psi_q}{dt} \quad (2.8)$$

$$v_q = -i_q R_a + \left(\frac{N_p}{2}\right) \omega_m \Psi_d + \frac{d\Psi_d}{dt} \quad (2.9)$$

$$e_{fd} = i_{fd} R_f + \frac{d\Psi_{fd}}{dt} \quad (2.10)$$

$$v_0 = -i_0 R_a + \frac{d\Psi_0}{dt} \quad (2.11)$$

En estas ecuaciones, los subíndices d y q se refieren al eje directo y en cuadratura, respectivamente. La presencia de un término adicional, conocida como la componente de secuencia cero, se indica por el subíndice 0. Este término es análogo al término de secuencia cero en el análisis de componentes simétricas. La componente de secuencia cero juega un papel relativamente menor en los estudios de estabilidad (de hecho, no tiene ningún rol en estudios que asuman condiciones balanceadas de operación) y por consiguiente es despreciado en la mayoría de las discusiones introductorias al análisis de estabilidad.

Se debe observar que no hay dependencia en el tiempo de la matriz transformada de inductancias. Además, puede ser claramente visto el desacople entre los dos ejes; la corriente en el eje directo producen solamente flujos en el eje directo y corrientes en el eje en cuadratura produce solamente flujos en el eje en cuadratura.

Además de las ecuaciones dadas anteriormente, la modelación de una máquina síncrona requiere una expresión para el torque electromecánico, para ser usado en los cálculos de la dinámica mecánica. En términos de las variables dq, el torque electromecánico puede ser calculado como:

$$T = \left(\frac{N_p}{2} \right) (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (2.12)$$

Las representaciones de la máquina síncrona puede tomar varias formas: circuito equivalente, función de transferencia, relaciones de corriente-flujo y voltaje-flujo. Cada una de estas formas es equivalente y da los mismos resultados; escoger una de estas representaciones se basa en las preferencias propias del usuario.

También se debe hacer notar que los modelos de eje directo y eje en cuadratura, representan un desacople magnético entre los ejes de cuadratura y eje directo (como se puede ver en el eje, en las ecuaciones 2.6 y ecuación 2.7).

Las representaciones de eje directo y eje en cuadratura están basadas en la suposición de que las corrientes en un eje no producen flujos en el otro eje (o no produce ningún cambio en el flujo del otro eje). En realidad, la no linealidad magnética (saturación magnética) producirá algún grado de acoplamiento entre los ejes. Aunque los modelos que desprecian estos acoplamientos son encontrados inadecuados para muchos estudios, se trabaja actualmente en el desarrollo de técnicas para incorporar los efectos de la no linealidad magnética en los análisis de estado estable y transitorio.

Adicionalmente, en el devanado de campo es común representar otras corrientes sobre el rotor, como los devanados de amortiguamiento, en el eje de cuadratura y eje directo.

2.3. Estructura del modelo de eje directo

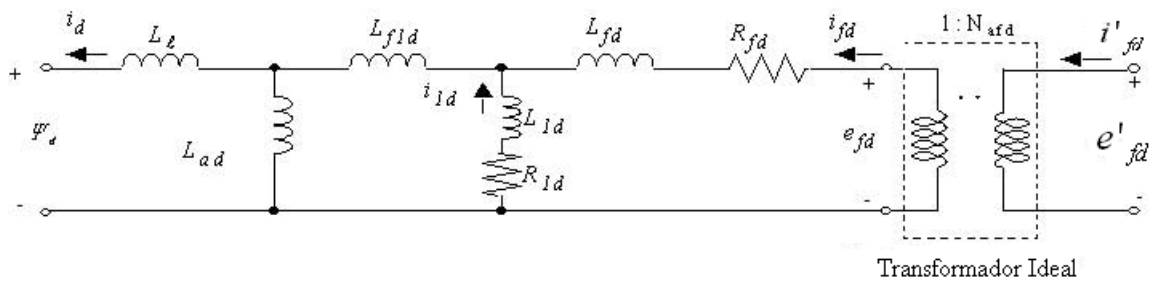
El eje directo de una máquina síncrona incluye dos pares de terminales (puertos). Estos corresponden al devanado de armadura equivalente del eje directo y al devanado de campo.

Una precisa representación del eje directo debe contar enteramente con las características de ambas terminales.

La representación simple del eje directo asume que no hay otras corrientes, aparte de las que existen en el devanado de armadura y el devanado de campo del eje directo.

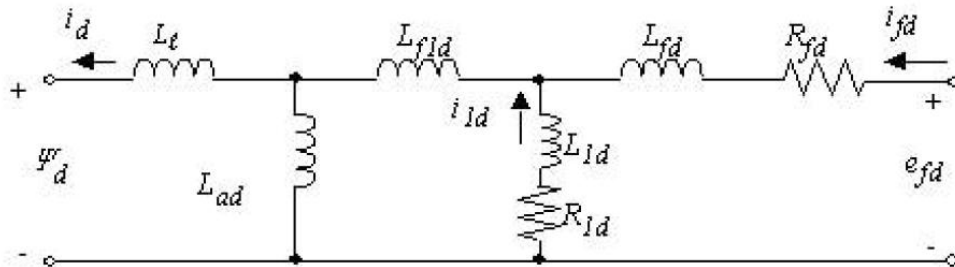
Sin embargo, se sabe que las corrientes de los devanados de amortiguamiento (en el caso de las máquinas de polos salientes) o las corrientes del núcleo del rotor (en el caso de las máquinas de rotor sólido) juegan un rol significativo en determinar las características del eje directo. Por lo tanto, el modelo más común de eje directo incluye un devanado adicional, conocido como de amortiguamiento de eje directo.

Figura 2. **Circuito equivalente de eje directo con transformador ideal**



Fuente: IEEE STD 1110-2002.p.11.

Figura 3. **Circuito equivalente del eje directo con devanado de amortiguamiento**



Fuente: IEEE STD 1110-2002.p.11.

En la figura 2 se muestra la representación del circuito equivalente para el modelo de eje directo con un devanado de amortiguamiento. Este incluye un transformador ideal, que representa el hecho de que hay una relación de vueltas entre la armadura y el devanado de campo, como en el caso del devanado primario y secundario de un transformador. Las variables e'_{fd} y i'_{fd} corresponden a los valores reales de voltaje y corriente de campo que se medirían en las terminales de los devanados de campo. Las variables e_{fd} y i_{fd} correspondientes a los valores de voltaje y corriente, reflejados en los devanados de armadura a través de la relación de vueltas del devanado, N_{afd} .

Es común representar la máquina síncrona usando valores por unidad, más que los valores reales. En cada caso, un circuito equivalente de transformador ideal se puede utilizar o no. El transformador ideal, típicamente se deja afuera del circuito equivalente, resultando en nuevo circuito equivalente que se muestra en la figura 3 en donde el voltaje y corriente de campo se utilizan en términos del devanado de armadura. Se debe tener cuidado de utilizar estos parámetros de campo en términos de la armadura, cuando son convertidos a valores reales.

El circuito equivalente del eje directo de la figura 3 se puede expresar en forma alternativa como la relación flujo-corriente o una función de transferencia. La relación flujo-corriente se puede expresar así:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_{d1d} & M_{fd} \\ M_{d1d} & L_{11d} & M_{f1d} \\ M_{fd} & M_{f1d} & L_{ffd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{1d} \\ i_{fd} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Donde:

$$L_d = L_l + L_{ad} \quad (2.14)$$

$$L_{11d} = L_{1d} + L_{f1d} + L_{ad} \quad (2.15)$$

$$L_{ffd} = L_{fd} + L_{f1d} + L_{ad} \quad (2.16)$$

$$M_{d1d} = L_{ad} \quad (2.17)$$

$$M_{fd} = L_{ad} \quad (2.18)$$

$$M_{f1d} = L_{f1d} + L_{ad} \quad (2.19)$$

La inductancia diferencial de dispersión L_{f1d} indica el hecho de que la inductancia mutua entre el devanado de campo y el devanado de armadura no es necesariamente igual a la que existe entre el devanado de campo y el devanado de amortiguamiento: $M_{f1d} = L_{f1d} + L_{ad}$. Para turbogeneradores L_{f1d} es un valor positivo y para máquinas de polos salientes, L_{f1d} es usualmente negativo. Esto muestra la diferencia física en los acoplamientos entre el circuito de campo y el circuito equivalente del cuerpo del rotor en turbogeneradores, comparados con los generadores hidroeléctricos.

$$v_{1d} = 0 = i_{1d} R_{1d} + \frac{d\Psi_{1d}}{dt} \quad (2.20)$$

Donde R_{1d} representa la resistencia del devanado de amortiguamiento del eje directo. Se debe observar que el voltaje del devanado de amortiguamiento del eje directo es igual a cero debido a que este es un devanado cortocircuitado internamente, sin terminales externas.

La representación de la función de transferencia para esta estructura del modelo, consiste en un conjunto de tres transformadas de Laplace referidos a las cantidades de las terminales de la red de dos puertos del eje directo.

La utilización de las tres transformadas que definen las propiedades de la red no es única y existen muchas posibilidades. Sin embargo, es una práctica común establecer las siguientes funciones de transferencia:

Inductancia operacional de eje directo:

$$L_d(s) \equiv \left. \frac{\Psi_d}{i_d} \right|_{e'_{fd}=0} = L_d \left[\frac{(1+T_{1d}s)(1+T_{2d}s)}{(1+T_{3d}s)(1+T_{4d}s)} \right] \quad (2.21)$$

La función de transferencia entre la corriente de devanado de campo y la corriente del devanado de armadura:

$$sG(s) \equiv \left. \frac{i'_{fd}}{i_d} \right|_{e'_{fd}=0} = sG_0 \left[\frac{(1+T_{5d}s)}{(1+T_{3d}s)(1+T_{4d}s)} \right] \quad (2.22)$$

Luego, la impedancia de entrada del devanado de campo:

$$Z_{fd}(s) \equiv \left. \frac{e'_{fd}}{i'_{fd}} \right|_{\Psi=0} = N_{afd}^2 R_{fd} \left[\frac{(1+T_{1d}s)(1+T_{2d}s)}{(1+T_{6d}s)} \right] \quad (2.23)$$

La segunda y la tercera función de transferencia han sido definidas en términos de cantidades reales más que para valores de referencia, aunque esta elección no es necesaria.

Si el efecto de las terminales de los devanados de campo no son de interés (por ejemplo, si el devanado de campo es excitado por una fuente de voltaje contante) o si no es posible hacer mediciones a las terminales del devanado de campo, el eje directo puede ser considerado como una red simple de un polo y no es necesario determinar la función de transferencia que relaciona el devanado de campo y la armadura. En tal caso, el eje directo es simplemente descrito por la inductancia operacional de eje directo $L_d(s)$.

Esto fue, de hecho, la base para el enfoque tradicional en el cual los modelos de generador fueron desarrollados, basados en las pruebas de armadura con terminales abiertas y en corto circuito.

Se tiene que comprender que aunque los modelos desarrollados de eje directo, bajo ciertas condiciones, incluyen una representación del devanado de campo, no hay razón para esperar que el modelo del comportamiento de la máquina represente los efectos de cambios en el voltaje y corriente en el campo.

En la representación de circuito equivalente de la figura 2, hay ocho parámetros conocidos. Por otro lado, en la función de transferencia que representan las ecuaciones 2.21, 2.22 y 2.23, pueden verse nueve parámetros medibles; hay seis constantes de tiempo y tres coeficientes. Así, podría parecer que por medio de mediciones externas, se determinarían todos los parámetros del circuito equivalente. Sin embargo, este no es el caso y solamente siete de estos nueve parámetros pueden determinarse independientemente.

Para el propósito de realizar un circuito equivalente, no es posible crear un conjunto de mediciones a las terminales del generador que determinen todos los valores de los parámetros de circuito equivalente. Se tiene siempre la libertad de tomar dos valores de parámetros en forma arbitraria (un parámetro más la corriente base del devanado de campo para el circuito equivalente de la figura 3). A pesar de esta elección arbitraria, el modelo resultante tendrá características definidas únicas, una característica esencial en un modelo útil.

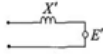
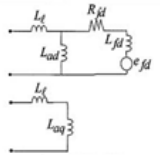
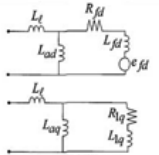
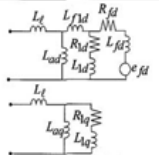
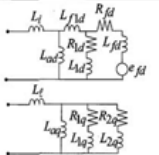
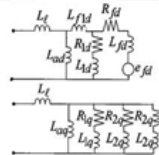
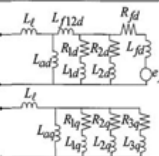
Es práctica común escoger el valor de la inductancia de dispersión de armadura L_l como el parámetro libre, cuando se define el circuito equivalente para la máquina síncrona. Es posible escoger este valor totalmente arbitrario sin afectar la validez del modelo resultante. El procedimiento para la determinación de parámetros es que, los valores de parámetros restantes son calculados en forma consistente, de tal manera que las características de las terminales serán las mismas, independientemente de la elección del valor de la inductancia de dispersión de la armadura. Sin embargo, es común escoger un valor igual o cercano al valor que proporciona el fabricante.

Otros modelos con números variables de devanados de amortiguamiento sobre el eje directo son comúnmente usados. La figura 4 muestra algunos de los que se utilizan en los circuitos equivalentes de la máquina.

El esquema modelo-número de varios modelos tienen la forma “MODELO N.M” donde “N” es un entero que representa el número de devanados rotóricos equivalentes sobre el eje directo y “M” es un valor entero que representa el número de devanados rotóricos equivalentes sobre el eje en cuadratura. Así el modelo 2.1 representa el eje directo de un rotor con dos devanados y el eje en cuadratura con un solo devanado de amortiguamiento.

Estos modelos tienen una gama de representaciones, desde “primer orden”, el cual incluye solamente el devanado de campo sobre el eje directo del rotor, hasta una representación de tercer orden, que incluye el devanado de campo y dos circuitos equivalentes en los devanados de amortiguamiento.

Figura 4. Selección de modelos de generador de varios grados de complejidad

FLUJOS CONSTANTES ENCADENADOS DEL ROTOR	EQUIVALENTE DE THEVENIN 			
EJE-Q → ↓ EJE-D	SIN CIRCUITO DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE	UN CIRCUITO DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE	DOS CIRCUITOS DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE	TRES CIRCUITOS DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE
SOLO CIRCUITO DE CAMPO	 MODELO 1.0	 MODELO 1.1	NO CONSIDERADO	NO CONSIDERADO
CIRCUITO DE CAMPO + UN CIRCUITO DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE	NO CONSIDERADO	 MODELO 2.1	 MODELO 2.2	 MODELO 2.3
CIRCUITO DE CAMPO + DOS CIRCUITOS DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE	NO CONSIDERADO	NO CONSIDERADO	NO CONSIDERADO	 MODELO 3.3

Fuente: IEEE STD 1110-2002.p.15.

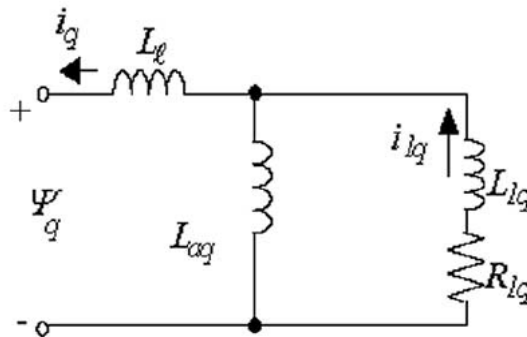
2.4. Estructura del modelo del eje en cuadratura

Debido a que no hay devanado rotórico para las terminales del eje en cuadratura, este necesita ser representado solamente como una red de un puerto. Además de los devanados de armadura del eje en cuadratura, se pueden incluir varios números de devanados de amortiguamiento. La figura 4 muestra algunos de las estructuras usadas para el modelo del eje en cuadratura.

La relación flujo-corriente para el modelo del eje en cuadratura es directamente análoga a los que se representan anteriormente para el eje directo. Por ejemplo, para el modelo en el cual se incluye un solo devanado de amortiguamiento en el eje en cuadratura, el circuito equivalente se muestra en la figura 5 y la relación flujo corriente está dada por:

$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & M_{q1q} \\ M_{q1q} & L_{11q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Figura 5. **Circuito equivalente del eje en cuadratura que incluye un solo devanado de amortiguamiento**



Fuente: IEEE STD 1110-2002.p.33.

De la ecuación de voltaje 2.9, en combinación con la ecuación para el voltaje del devanado de amortiguamiento sobre el eje en cuadratura se obtiene:

$$v_{1q} = 0 = i_{1q}R_{1q} + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} \quad (2.25)$$

Debido a que el circuito del eje en cuadratura solamente tiene un puerto, entonces solamente se necesita una función de transferencia.

La inductancia operacional del eje en cuadratura es:

$$L_q(s) \equiv \frac{\Psi_q}{i_q} = L_q \left[\frac{(1 + T_{1q}s)}{(1 + T_{2q}s)} \right] \quad (2.26)$$

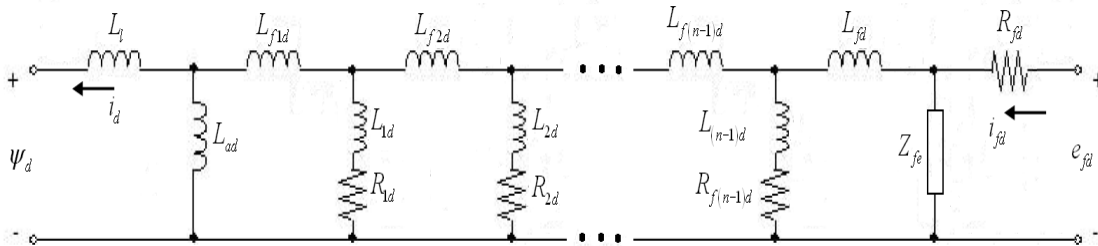
En este caso, la función de transferencia es de primer orden, esto debido a que no hay más que un solo devanado de amortiguamiento sobre el eje en cuadratura en esta forma de modelo.

2.5. Modelos de orden superior

Además de los modelos de máquina síncrona vistos anteriormente, donde usualmente se asumen dos o tres devanados de amortiguamiento, existe una extensión para modelos de orden superior de la máquina síncrona, donde se incluyen circuitos paralelos y diferentes inductancias de dispersión.

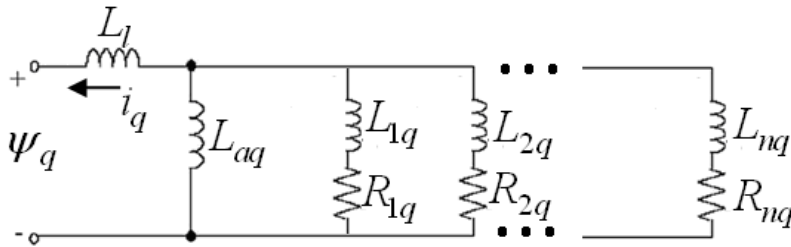
El modelo general de enésimo orden del circuito equivalente de eje directo y en cuadratura, se muestra en la figura 6 y 7. Este modelo se aplica especialmente para las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado.

Figura 6. **Modelo del circuito del eje directo generalizado para pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado**



Fuente: KEYHANI, A. *et al. Identification of High-Order Synchronous Generator Models from SSFR Test Data.* p. 594.

Figura 7. **Modelo del circuito del eje en cuadratura generalizado para pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado**



Fuente: KEYHANI, A. *et al. Identification of High-Order Synchronous Generator Models from SSFR Test Data.* p.594.

La representación de la función de transferencia para esta estructura del modelo generalizado con un ramal Z_{fe} , consiste en un conjunto de tres transformadas de Laplace referido a las cantidades de las terminales de la red de dos puertos del eje directo.

Para obtener la Inductancia operacional de eje directo generalizada se procede de la siguiente manera:

$$L_d(s) \equiv \frac{\Psi_d}{i_d} \Big|_{e'_{fd}=0} = K_d \left[\frac{(1+T_d^1 s)(1+T_d^2 s) \cdots (1+T_d^n s)}{(1+T_{do}^1 s)(1+T_{do}^2 s) \cdots (1+T_{do}^n s)} \right] \quad (2.27)$$

La función de transferencia entre la corriente de devanado de campo y de campo generalizada es:

$$sG(s) \equiv \frac{i'_{fd}}{i_d} \Big|_{e'_{fd}=0} = sG_d \left[\frac{(1+T_D^1 s)(1+T_D^2 s) \cdots (1+T_D^{n-1} s)}{(1+T_{do}^1 s)(1+T_{do}^2 s) \cdots (1+T_{do}^n s)} \right] \quad (2.28)$$

Impedancia de entrada del devanado de campo generalizada:

$$Z_{fd}(s) \equiv \frac{e'_{fd}}{i'_{fd}} \Big|_{\Psi=0} = Z_d \left[\frac{(1+T_d^1 s)(1+T_d^2 s) \cdots (1+T_d^n s)}{(1+T_{DDO}^1 s) \cdots (1+T_{DDO}^{n-1} s)} \right] \quad (2.29)$$

La inductancia operacional del eje en cuadratura generalizada es:

$$L_q(s) \equiv \frac{\Psi_q}{i_q} = L_q \left[\frac{(1+T_{1q}^1 s)(1+T_{1q}^2 s) \cdots (1+T_{1q}^n s)}{(1+T_{2q}^1 s)(1+T_{2q}^2 s) \cdots (1+T_{2q}^n s)} \right] \quad (2.30)$$

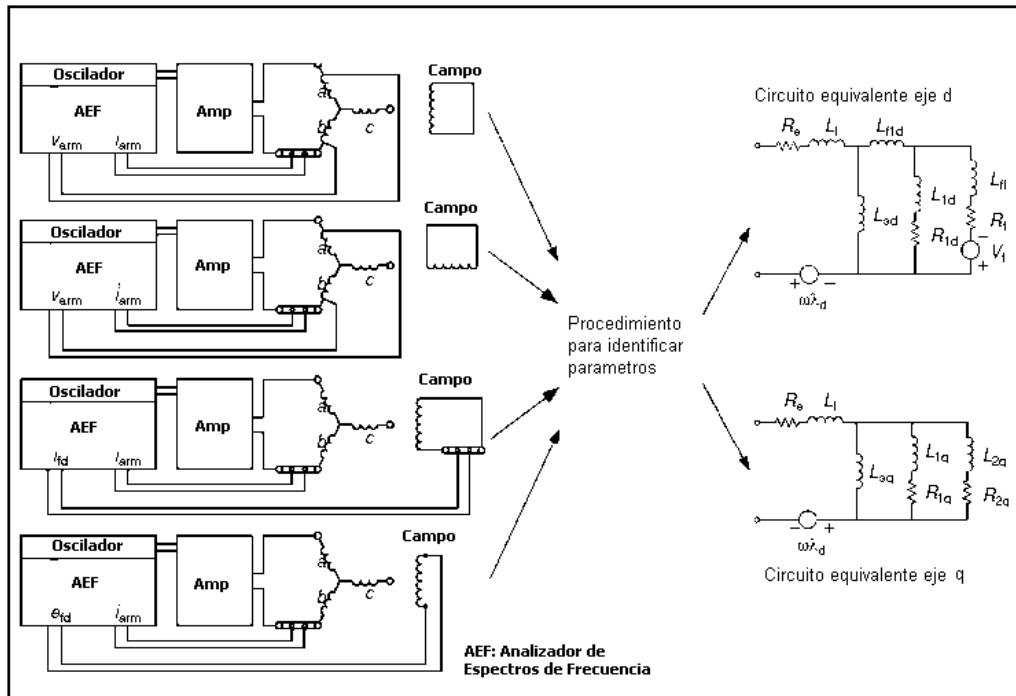
Los superíndices de las ecuaciones 2.27 a 2.30 se utilizan para denotar diferentes constantes de tiempo, estas no representan ninguna operación matemática, donde n representa orden del modelo.

En general, el orden de las funciones de transferencia en donde el circuito de campo está cortocircuitado, es diferente al orden de la función de transferencia donde el circuito de campo está abierto. En particular, la no linealidad por el efecto de corrientes de Eddy, puede ser un poco diferente bajo condiciones de circuito abierto y cerrado de campo. Sin embargo una impedancia extra Z_{fe} , es incluida en el circuito rotórico del eje directo que represente los efectos crecientes de la corriente de Eddy sobre la superficie del rotor durante la prueba de circuito abierto de campo. También se debe observar que cuando la prueba se realiza en corto circuito, el efecto de Z_{fe} se hace más pequeño debido a la pequeña resistencia del devanado R_{fd} .

3. PRUEBA DE RESPUESTA EN FRECUENCIA A ROTOR PARADO

La utilización de la identificación como procedimiento para la determinación de parámetros en distintos sistemas, es utilizada hoy en día extensivamente. En el área de máquinas eléctricas, la identificación se realiza con la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado (SSFR por sus siglas en inglés), la cual está plasmada en la norma IEEE 115-1995, indicando los pasos a seguir en la realización de la identificación. La prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado se muestra en la figura 8:

Figura 8. Prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado.



Fuente: MARTÍNEZ, J.A. *et al.* Parameter Determination for Modeling System Transients Part IV: Rotating Machines. p.2067.

3.1. Condiciones para las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado y requerimientos de la instrumentación

La primera condición que se debe cumplir para la realización de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado de la máquina síncrona, es la de estar apagada, desconectada de su torna flecha y aislada eléctricamente. La unidad transformadora debe de estar desconectada de las terminales de armadura y cualquier devanado de armadura aterrizado debe ser removido. Además, todas las terminales de campo deben de retirarse. Esto se puede conseguir quitando el portaescobillas o, en el caso de las máquinas autoexcitadas, desconectando eléctricamente el excitador del devanado de campo.

Es importante mantener la temperatura de los devanados de armadura a un valor constante durante la medición, especialmente en las pruebas a baja frecuencia, ya que estas son sensibles a la resistencia de armadura. Para este propósito, la máquina debe de ser enfriada lo más cerca posible a la temperatura ambiente y cualquier intercambiador de calor debe de ser apagado.

Debe de ser posible mover el rotor de la máquina a una posición antes de la prueba. Esto es fácilmente ejecutable con un una manivela del torna flecha. Si esto no es posible manualmente, se pueden utilizar gatos mecánicos para la tarea. Aunque una grúa tipo pórtico puede ayudar en hacer movimientos grandes, no es suficientemente meticuloso para los movimientos del eje.

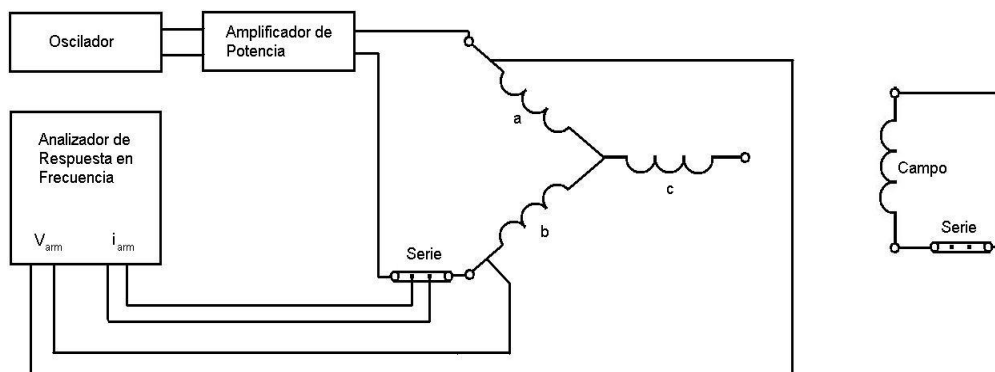
Las mediciones de respuesta en frecuencia deben de efectuarse, más convenientemente, con un analizador de espectros cuando se realizan pruebas a baja frecuencia.

Este tipo de instrumentos medirá las magnitudes y ángulos de dos señales y extraerá solamente las componentes fundamentales de formas de onda distorsionadas. Las especificaciones básicas del analizador deberán incluir mediciones de frecuencia en el rango de 0.001 Hz a 1 kHz, resoluciones de ángulo de por lo menos 0.1 grados y la entrada diferencial debe ser capaz de observar señales de hasta 100 V.

3.2. Configuración de la prueba

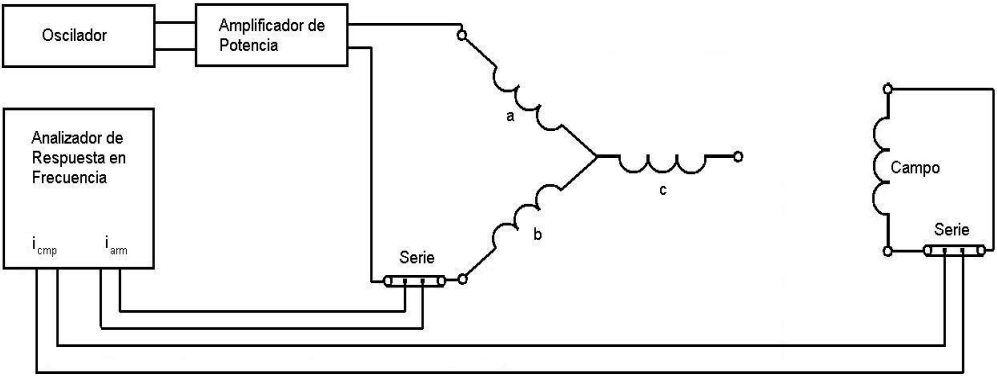
Un oscilador es una parte integral del analizador de espectros de frecuencia, el cual provee una señal de prueba. Esta va a un amplificador y a la salida se conectan las dos terminales de los devanados de armadura del generador. El error de medición de cualquier función de transferencia medida no debe exceder el uno por ciento en ningún punto en la escala de frecuencia. Las distintas formas de conexión se muestran en la figura 9, 10, 11 y 12.

Figura 9. Configuración de la prueba para medición en eje directo de $\Delta e_{arm}/\Delta i_{arm} = Z_d(s)$



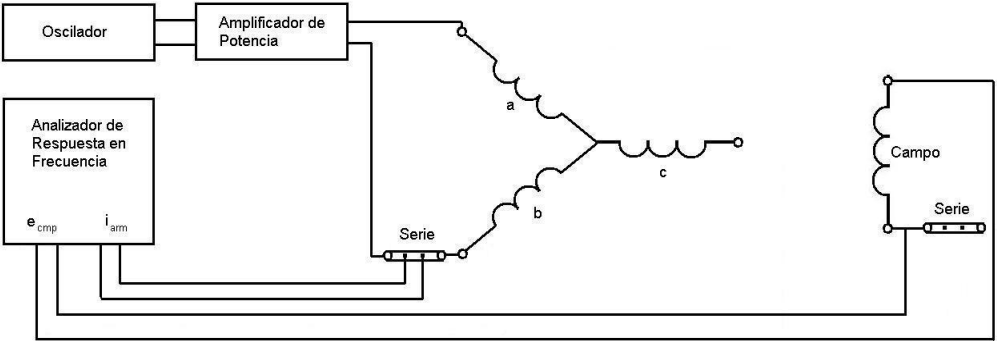
Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.162

Figura 10. Configuración de la prueba para medición en eje directo de $\Delta i_{cmp}/\Delta i_{arm} = sG(s)$



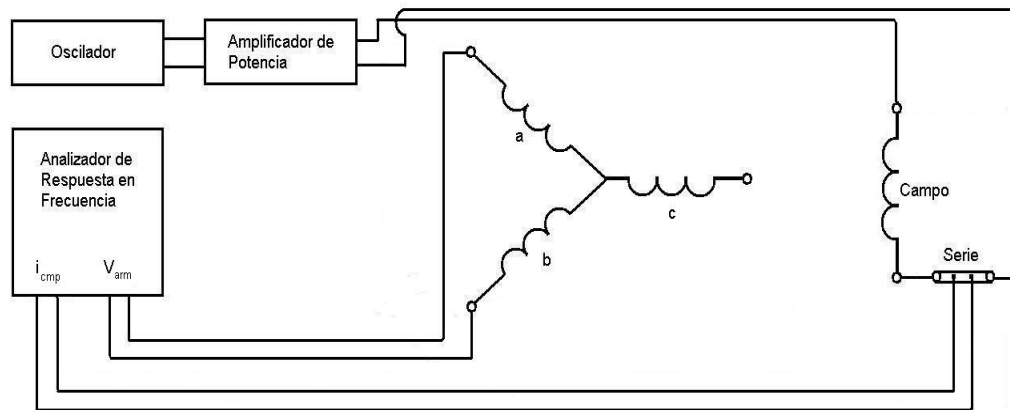
Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.162.

Figura 11. Configuración de la prueba para medición en eje directo de $\Delta e_{cmp}/s\Delta i_{arm} = Z_{afo}(s)$



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.162.

Figura 12. Configuración de la prueba para medición en eje directo de $\Delta v_{arm}/\Delta i_{cmp}$



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.162.

El amplificador de potencia debe crear niveles de señal que sean fácilmente medibles para voltajes y corrientes de los devanados de campo y armadura. Debido a esto, señales arriba de 6 amperios y 4 Voltios rms. son necesarias para maquinas en el rango de los 60 a 120 MW. Las corrientes deben de ser suficientemente pequeñas para despreciar los cambios de temperatura en los circuitos de armadura, campo o amortiguamiento durante la prueba. Voltajes en las terminales de los devanados de armadura y campo no deberán de exceder los voltajes nominales. Normalmente, las corrientes de prueba no deben de exceder del 0.5% de corrientes de armadura.

Se deben tomar precauciones para evitar sobrecargas en las entradas y salidas de los instrumentos.

La impedancia medida en las terminales de los devanados de armadura a bajas frecuencias son aproximadamente dos veces la resistencia de fase de la armadura. La máxima medición de impedancia será de aproximadamente $2(R_2+j\omega L_2)$. Donde R_2 y L_2 son la resistencia y la inductancia de secuencia negativa y ω es la frecuencia angular más grande usada para la prueba. El amplificador y el instrumento de medición deben ser los apropiados para estos rangos de impedancia.

3.3. Parámetros medibles de la prueba

Son cinco los valores utilizados en el desarrollo de la función de transferencia o los modelos equivalentes de eje directo y eje en cuadratura para la máquina síncrona:

- Z_d , La impedancia operacional en eje directo de la máquina síncrona es igual a: $R_a + sL_d(s)$; donde R_a es la resistencia de armadura por fase. El valor corriente directa de R_a es usado porque es medible, y contribuye al valor total de la impedancia significativamente en valores bajos de frecuencia.

$$Z_d(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta e_{fd}=0} \quad (3.1)$$

En términos físicos, se mide como un valor complejo de la relación entrada salida de las señales. En la terminología utilizada generalmente aceptada, el numerador siempre es la señal de entrada.

- **Z_q .** La impedancia operacional en el eje de cuadratura de la máquina síncrona es igual a $R_a + sL_q(s)$, donde R_a es la resistencia de armadura en corriente directa por fase.

$$Z_q(s) = - \left. \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} \right|_{\Omega} \quad (3.2)$$

- **$G(s)$.** El tercer parámetro medible está dado por la relación:

$$G(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{s \Delta e_{fd}(s)} \right|_{\Delta i_d=0} \quad (3.3)$$

Un método alternativo de medir este parámetro se presenta de la siguiente manera:

$$sG(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta e_{fd}(s)} \right|_{\Delta i_d=0} \quad (3.4)$$

La ventaja de la forma de la ecuación 3.4 es que puede ser medida al mismo tiempo que $Z_d(s)$.

- **$Z_{af0}(s)$.** El cuarto parámetro medible en la prueba a rotor parado de la máquina síncrona es la impedancia de transferencia de armadura a campo:

$$Z_{af0}(s) = \left. \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta i_{fd}=0\Omega} \quad (3.5)$$

- **$Z_{fa0}(s)$.** El quinto parámetro medible en la prueba a rotor parado de la máquina síncrona se obtiene excitando el campo con el circuito de armadura abierto, esta es llamada la impedancia de transferencia de campo a armadura:

$$Z_{fa0}(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_{fd}(s)} \right|_{\Delta i_d=0} \quad (3.6)$$

3.4. Procedimiento de la prueba

Durante la prueba de respuesta en frecuencia, la capacidad del generador será reducida respecto de la capacidad en condiciones normales. Por lo tanto, las corrientes y niveles de prueba deben ser mantenidos a niveles suficientemente bajos, para prevenir cualquier posible daño tanto a los componentes del estator como los del rotor.

Los niveles altos de señales, puede ser conseguidos, limitando las salidas máximas de la fuente de poder a niveles iguales o menores que la capacidad a rotor parado del generador. Debe consultarse al fabricante para identificar los límites aplicables.

La magnitud y el ángulo de fase de $Z_d(s)$, $sG(s)$ y $Z_q(s)$ deben de medirse en un amplio rango de frecuencias. La frecuencia mínima (f_{min}) debe de estar en el orden al menos a la correspondiente constante transitoria a circuito abierto del generador, definiéndola así:

$$f_{min} = \frac{0.016}{T'_{do}} \quad (3.7)$$

La máxima frecuencia en la prueba es de 16 veces la frecuencia nominal del generador. Un valor recomendado puede ser 1,000 Hz para máquinas a 60 Hz. Aproximadamente, 10 puntos de medición espaciados en forma logarítmica por década de frecuencia, es una densidad satisfactoria de mediciones. Como ejemplo de mediciones de respuesta en frecuencia de turbogeneradores, 10 pasos/década proveerán una resolución adecuada en el rango de entre 0.01 Hz a 1000 Hz. Sin embargo, para frecuencias más bajas, las mediciones de la impedancia del rotor ($Z_c(s)$ y $Z_q(s)$) en el rango entre 0.001Hz a 0.01Hz, se prefieren resoluciones en la medición de 40 pasos/década.

La diferencia de ángulo entre las señales de voltaje y corriente es muy pequeña y, como la frecuencia decrece, la magnitud es aproximadamente dos veces el valor de la resistencia estática, siendo este un valor relativamente pequeño. Por lo tanto, un gran número de puntos/década es requerido para lograr una precisión efectiva en la medición de la resistencia estática, R_a , en el momento de la prueba de respuesta en frecuencia.

La inductancia mutua entre los devanados de campo y armadura, L_{afd} , se podrán medir también, donde

$$L_{afd} = \frac{2}{3} \frac{1}{s} \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{af0}(s)] \quad (3.8)$$

La forma más directa es obtener la magnitud a bajas frecuencias de la asíntota de la función de transferencia de $\Delta e_{fd}(s)/\Delta i_d(s)$, durante la prueba de eje directo con el circuito de campo abierto. Alternativamente, se puede calcular mediante la multiplicación la asíntota en baja frecuencia de la magnitud $\Delta i_{fd}(s)/\Delta i_d(s)$ por r_{fd} , esta es la resistencia total en el circuito del devanado de

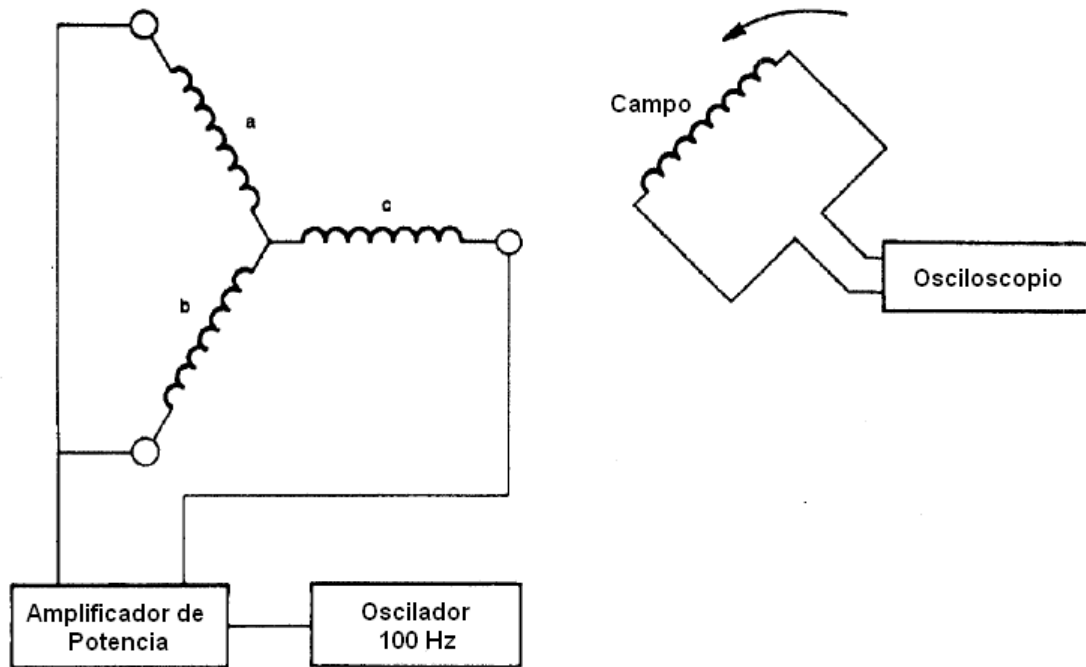
campo durante la medición de $\Delta i_{fd}(s)/\Delta i_d(s)$; al conocer la resistencia del devanado de campo más la resistencia de las conexiones, más la resistencia de contacto y la resistencia de la medición en derivación.

3.4.1. Posición del rotor en la prueba del eje directo y eje en cuadratura

Para la prueba de eje directo, se hace una conexión temporal del amplificador de potencia, como lo muestra la figura 13, llevando el amplificador con una señal senoidal, aproximadamente a 100Hz . Se mide el voltaje inducido en el circuito de campo con un osciloscopio. Mover el rotor lentamente hasta que el campo inducido observado en el osciloscopio sea nulo. En este punto, el eje magnético del devanado de campo está alineado con las conexiones en serie de la fase a y b, que serán usados en la prueba de eje directo.

Para la prueba de eje en cuadratura, se conecta el amplificador de potencia entre las terminales a y b como en las figura 13 y como en las mediciones de eje directo. Se retira la medición de la corriente de campo, y se coloca el oscilador de frecuencia aproximadamente a 100Hz. Se debe observar el voltaje inducido en un osciloscopio y se debe girar suavemente el rotor del generador hasta que el voltaje en el campo se anule. La posición visible del rotor debe cambiar 90 grados mecánicos para una máquina de 2 polos; para una máquina de cuatro polos debe cambiar 45 grados mecánicos.

Figura 13. **Posición del rotor para la prueba de eje directo**



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.167.

3.5. Pruebas de eje directo

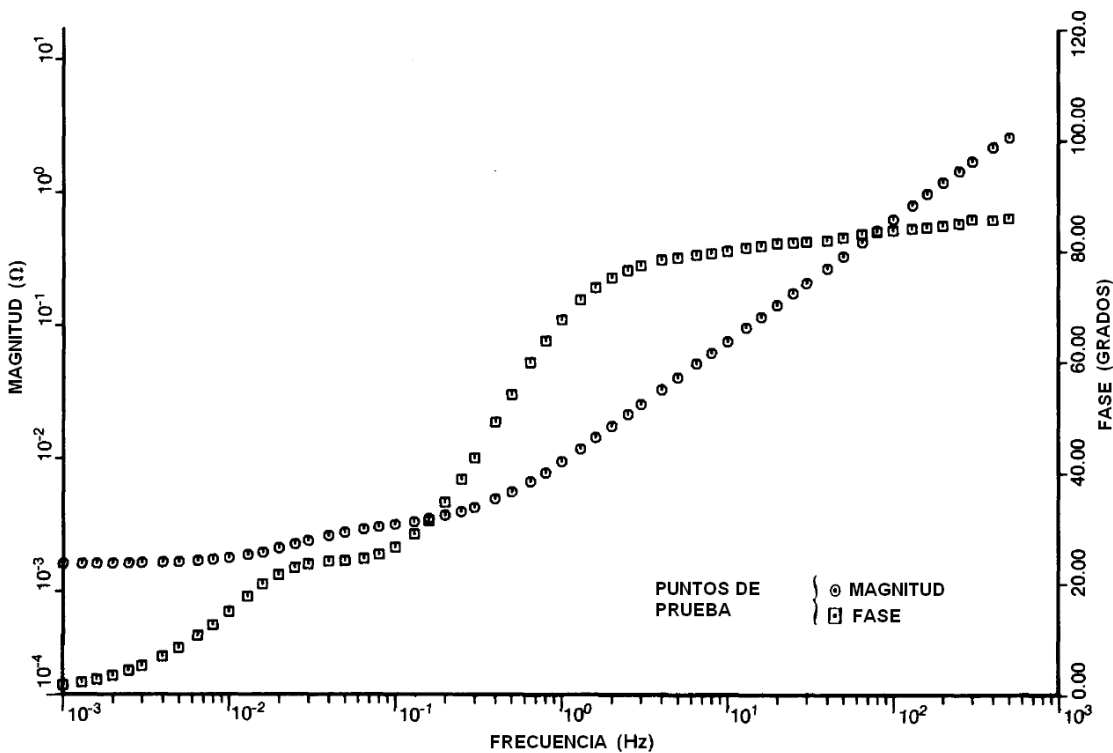
Las pruebas de Eje directo consisten en:

3.5.1. Medición $Z_d(s)$

Según la figura 9 se conecta la salida del amplificador de potencia a las terminales a y b de los devanados de armadura a través de la medición en paralelo. Cortocircuitando el devanado de campo a través de una medición en paralelo no inductiva, se realizan conexiones al devanado de campo.

Lo anterior se puede realizar envolviendo bandas de cobre alrededor de los anillos rozantes teniendo cuidado de no dañar el anillo rozante, ajustando con pernos la derivación con las bandas.

Figura 14. Impedancia del eje directo (Circuito de campo Cortocircuitado).



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.168.

En el caso de autoexcitación, es posible ajustar los pernos a la derivación de los terminales de campo. Finalmente, conectar los instrumentos a las señales de $v_{armadura}$ y $i_{armadura}$ para así medir las cantidades $Z_{armadura} = \Delta v_{armadura}(s) / \Delta i_{armadura}(s)$. Realizar esta medición sobre el rango de frecuencia requerido.

Esto resultará en un conjunto de puntos de pruebas similares a estos en la figura 14. Un rango de frecuencia de 0.001 a 1,000 Hz se ha encontrado que produce resultados aceptables.

Las lecturas del instrumento de medición de la prueba en la configuración de la figura 9 permiten obtener la impedancia operacional de eje directo del estator y la resistencia del estator de la siguiente manera:

$$Z_d(s) = \frac{1}{2} Z_{armadura}(s) \Omega \quad (3.9)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \left\{ \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{armadura}(s)] \right\} \quad (3.10)$$

La inductancia operacional se puede calcular de $Z_d(s)$ y $R_a(s)$ en Henry:

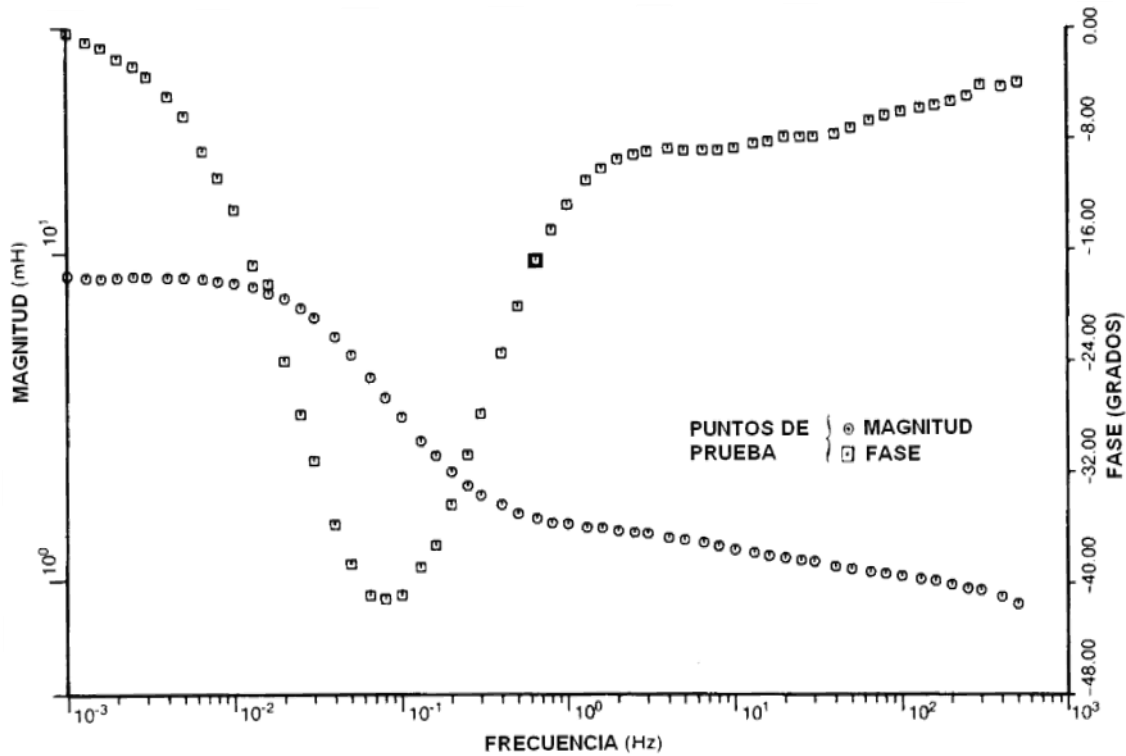
$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_s}{s} \quad (3.11)$$

Donde:

$$s = j\omega \quad (3.12)$$

Esto resultará en un conjunto de puntos similares a los de la figura 15, y completando la prueba de inductancia operacional de eje directo.

Figura 15. Inductancia operacional de eje directo (Circuito de campo cortocircuitado)



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.170.

Para obtener R_a , se debe dibujar la componente real o resistiva de la impedancia como función de la frecuencia y extrapolar a frecuencia cero para obtener la resistencia dc de las dos fases del devanado de armadura en serie, $2R_a$. Tener cuidado en obtener esta resistencia con la mayor exactitud y resolución posible; si no, resultarán errores grandes en valores a bajas frecuencias para inductancias operacionales.

Típicamente, se necesita una resolución en la medición de 1 parte en 1000 a muy bajas frecuencias.

Si los instrumentos utilizados no logran esto, se pueden obtener resultados satisfactorios espaciando las mediciones cercanas al 10, por década y dibujando una línea entre la dispersión de puntos.

La R_a obtenida por este método debe estar cerca al valor de la resistencia de armadura indicada por el fabricante.

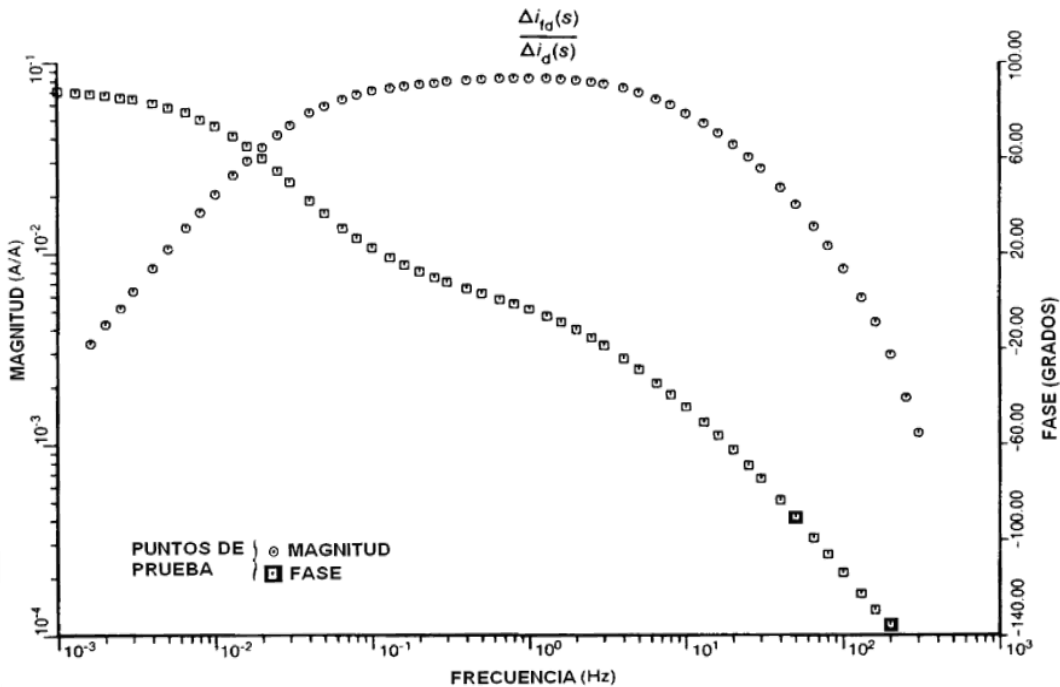
3.5.2. Medición $sG(s)$

Para calcular este parámetro, el instrumento debe conectarse a las terminales de la señal de i_d y $v_{armadura}$ y medir la función de transferencia $\Delta i_{fd}(s)/\Delta i_{arm}(s)$ sobre el rango de frecuencia requerida, luego calcular:

$$\frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{\sqrt{3}\Delta i_{fd}(s)}{2\Delta i_{armadura}(s)} \quad (3.13)$$

El cual seguirá la forma de la figura 16.

Figura 16. Función de transferencia de armadura a campo eje directo



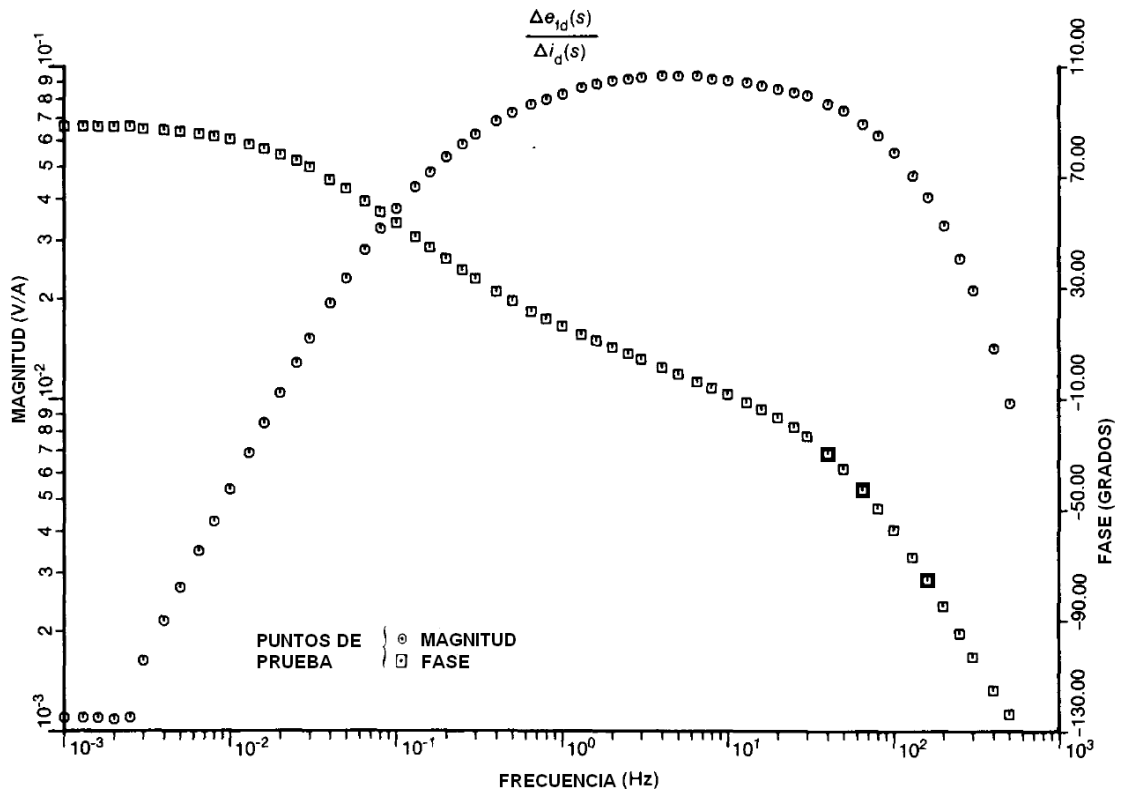
Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.171.

3.5.3. Medición $Z_{af0}(s)$

Finalmente, el último parámetro medible se obtiene abriendo el devanado de campo, removiendo la medición de corriente, y conectando las puntas de prueba i_{fd} y i_{arm} al instrumento de medición. Se mide $\Delta e_{fd}/\Delta i_{arm}$ a la frecuencia necesaria y se calcula:

$$Z_{af0}(s) = \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \right) \quad (3.14)$$

Figura 17. Impedancia de transferencia de armadura a campo eje directo



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.172.

3.6. Pruebas del eje en cuadratura

Para realizar estas pruebas se deben de colocar las conexiones de las señales v_{arm} y i_{arm} para medir $Z_{armq}(s) = \Delta v_{arm}(s) / \Delta i_{arm}(s)$ como se realizan en las prueba de la figura 9.

Las lecturas sobre el rango de frecuencia completo entre 0.001Hz y 1000Hz permitirán obtener la impedancia operacional de eje en cuadratura y la resistencia se calculará de la siguiente manera:

$$Z_q(s) = \frac{1}{2} Z_{armq}(s) \quad (3.15)$$

$$R_a = \frac{1}{2} \left\{ \lim_{s \rightarrow 0} [Z_{armq}(s)] \right\} \quad (3.16)$$

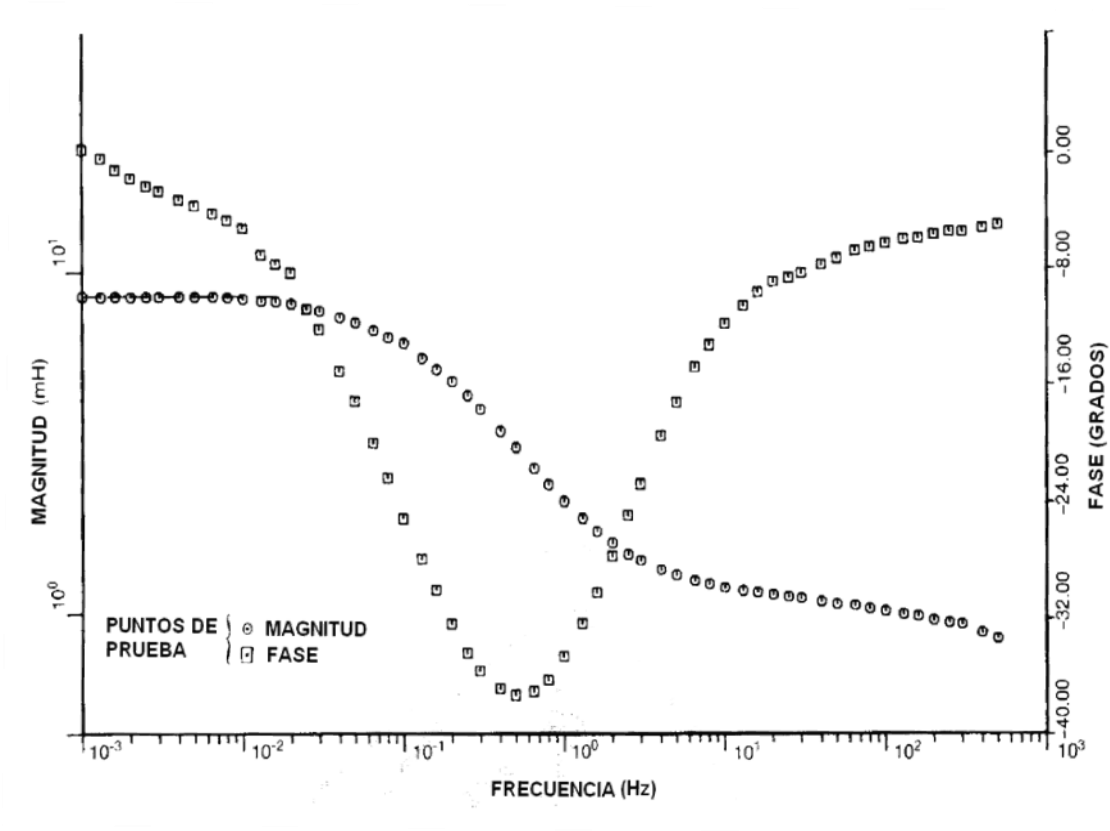
Estas cantidades son graficadas en la figura 18. Z_q y R_a serán usadas para calcular $L_q(s)$:

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \text{ henrys} \quad (3.17)$$

Donde s se define en la ecuación 3.12.

Hay que observar que R_a , en corriente directa de una fase del devanado de armadura, debe ser nominalmente la misma que la obtenida durante la prueba en el eje directo. Sin embargo, debido a la sensibilidad de los resultados en estos valores, se debe de obtener nuevamente usando los datos del eje en cuadratura.

Figura 18. Inductancia operacional de eje en cuadratura.



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.174.

4. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Para la identificación de los parámetros de la máquina síncrona utilizaremos los datos experimentales efectuados a la máquina descrita en la normativa IEEE STD-115 y que se muestran en las figuras 15, 16 y 18. Los parámetros nominales de la máquina se listan a continuación:

Potencia nominal	= 192.3 MVA
Voltaje nominal	= 18.kV
Frecuencia nominal	= 60 Hz
X _{du} (indicado por el fabricante)	= 2.02 p.u.

$$\begin{aligned} \text{Impedancia base de armadura} &= (18)(18)/192.3 \\ &= 1.685 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Inductancia base de armadura} &= 1.685/120\pi \\ &= 4.469 \text{ mH} \end{aligned}$$

$$\text{Reactancia de dispersión del estator} = 0.178 \text{ p.u.}$$

Con base en los datos anteriores, la reactancia mutua de estator a rotor es: $X_{adu}=X_{du}-X_t=1.842 \text{ p.u.}$

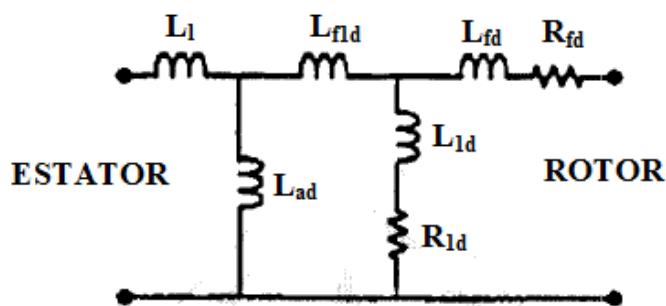
4.1. Interpretación de los datos de prueba

Los pasos para la interpretación de los datos de prueba son los siguientes:

4.1.1. Estructura

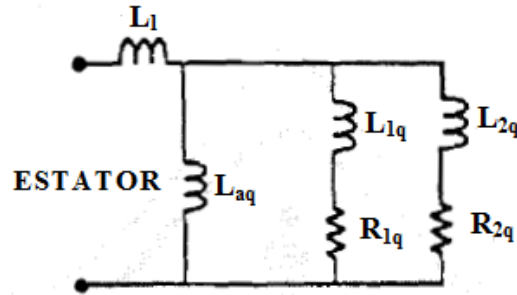
Es posible escoger, para el circuito de eje directo, entre varias estructuras propuestas por la IEEE STD 1110-2002. Estas estructuras se muestran en la figura 4 y son modelos representativos usados comúnmente para ajustar los datos de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado. El modelo escogido para el presente proceso de identificación es el modelo 2.2, el cual contiene dos circuitos de amortiguamiento para el eje en cuadratura y un circuito de campo y otro de amortiguamiento para el eje directo. Estos circuitos se muestran a continuación en las figuras 19 y 20:

Figura 19. Circuito equivalente de eje directo de segundo orden



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.175.

Figura 20. **Circuito equivalente del eje en cuadratura con dos circuitos de amortiguamiento**



Fuente: IEEE STD. 115-1995. p.175.

La función de transferencia que definen los circuitos anteriormente son:

$$L_d(s) = L_d \left[\frac{(1 + T_{1d}s)(1 + T_{2d}s)}{(1 + T_{3d}s)(1 + T_{4d}s)} \right] \quad (4.1)$$

$$sG(s) = sG_0 \left[\frac{(1 + T_{5d}s)}{(1 + T_{3d}s)(1 + T_{4d}s)} \right] \quad (4.2)$$

$$L_q(s) = L_q \left[\frac{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)}{(1 + T_{3q}s)(1 + T_{4q}s)} \right] \quad (4.3)$$

En donde $L_d(s)$ y $L_q(s)$ se calculan a partir de las relaciones:

$$L_d = \frac{Z_d(s) - R_s}{s} \quad (4.4)$$

$$L_q = \frac{Z_q(s) - R_s}{s} \quad (4.5)$$

4.1.2. Procedimiento de ajuste de la curva

Los valores numéricos para los parámetros del circuito equivalente que se obtienen de las pruebas de respuesta en frecuencia a rotor parado, se derivan de las técnicas de ajuste de la curva, aplicables a funciones no lineales (conocidas también como análisis de regresión no lineal). Los algoritmos típicos para ajustes de curvas a funciones no lineales.

Los programas de computación adecuados para esta aplicación, regularmente toman dos formas: la primera de circuito equivalente, requiere cálculos de derivadas parciales de la variable dependiente respecto de cada uno de los parámetros desconocidos y el valor de la variable dependiente escogida.

En la segunda forma, la cual se utiliza en este trabajo, se tiene que calcular solamente el valor de una variable dependiente específica, para cualquier conjunto de parámetros desconocidos. Los parámetros desconocidos pueden ser cualquiera de las constantes de la forma operacional para la variable dependiente.

4.1.3. Método de mínimos cuadrados no lineal

Para este procedimiento de ajuste de la curva, un modelo no lineal está definido como una ecuación que es no lineal en sus coeficientes, o una combinación de coeficientes lineales y no lineales, en forma matricial. Los modelos no lineales están dados por la fórmula:

$$y = f(X, \beta) + \varepsilon \quad (4.6)$$

Donde:

y , es un vector de respuestas de n por 1

f , es una función en términos β y X

β , es un vector de coeficientes de m por n

X , es una matriz de n por m del modelo

ε , es un vector de n por 1 de errores

Los modelos no lineales son más difíciles de ajustar debido a que los coeficientes no pueden ser estimados usando simples técnicas matriciales. Para este caso, un método iterativo es utilizado siguiendo los siguientes pasos:

- Se inicia con valores estimados de los coeficientes. Para algunos modelos no lineales, un enfoque heurístico produce valores iniciales razonables. Para otros modelos no lineales, es utilizado un valor aleatorio entre 0 y 1.
- Se realiza una primera curva para los valores de coeficientes utilizados en el primer paso. El valor de respuesta del ajuste está dado por:

$$y = f(X, \beta) \tag{4.7}$$

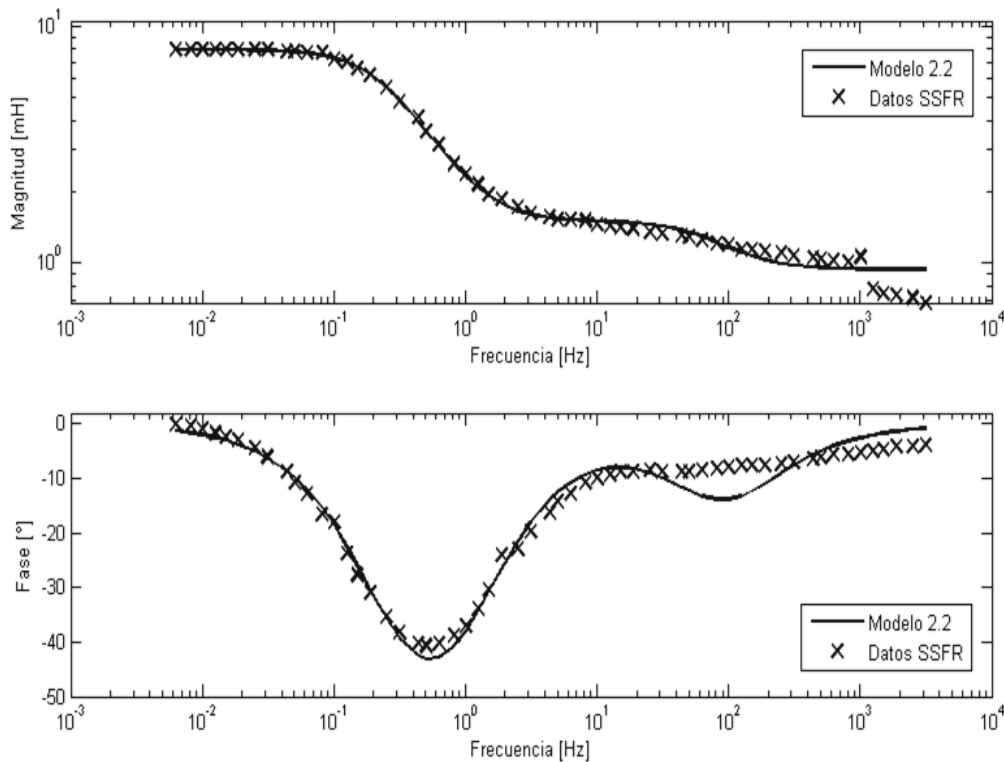
esto implica el cálculo del Jacobiano de $f(X, \beta)$, que es definido como una matriz de derivadas parciales tomados respecto de los coeficientes.

- Ajustar los coeficientes y determinar si el ajuste se debe mejorar. La magnitud del ajuste depende del algoritmo de ajuste.
- Se regresa al paso 2, hasta que el ajuste alcance un criterio especificado de convergencia.

Para el ajuste del modelo 2.2 del circuito equivalente de la máquina síncrona, se han implementado varios programas en el lenguaje tipo “M” del software matemático MATLAB; todos ellos utilizan la función `lsqnonlin`; esta es una rutina contenida en el Optimization Toolbox, función que implementa los pasos anteriores; el código fuente se puede encontrar en el apéndice 1.

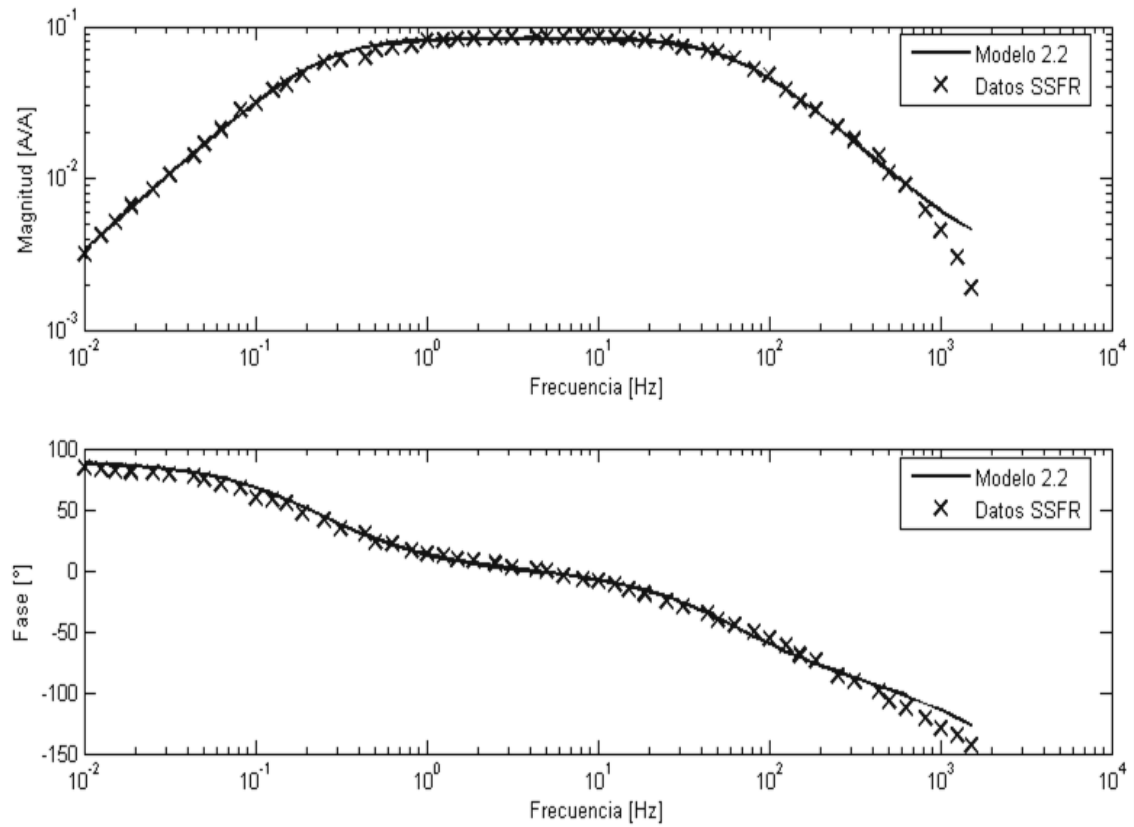
Las figuras 21, 22 y 23 muestran las curvas ajustadas a los valores experimentales, extraídos de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado (SSFR) y para $L_d(s)$, $sG(s)$, y $L_q(s)$.

Figura 21. Inductancia operacional $L_d(s)$ eje directo, modelo 2.2 contra datos SSFR



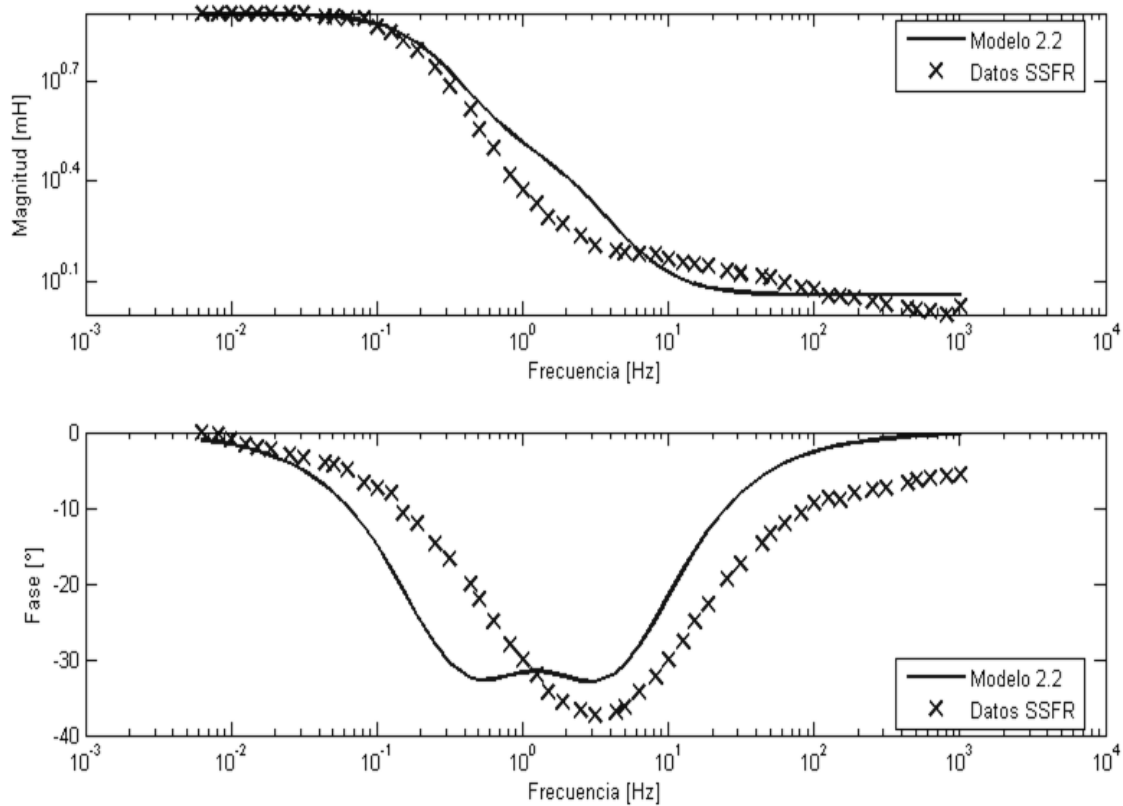
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Función de transferencia de armadura a campo sG(s) eje directo, Modelo 2.2 contra datos SSFR**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Inductancia operacional $L_q(s)$ eje en cuadratura, Modelo 2.2 contra datos SSFR



Fuente: elaboración propia.

4.2. Procedimiento para la identificación de los parámetros del circuito equivalente de la máquina síncrona

Hay varios procedimientos para reducir los datos de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado, a parámetros de modelo; el que se utiliza en esta identificación se basa en la normativa IEEE STD 115. El enfoque siguiente lleva a un modelo de circuito equivalente, que es modelo de parámetros concentrados seleccionados, para tener la misma frecuencia y, por

lo tanto, las mismas características en el dominio del tiempo como las de la máquina síncrona.

Los cálculos se realizarán en voltios, amperios, ohmios y henries. Luego, los elementos resultantes del circuito equivalente son normalizados a valores p.u. referidos a la impedancia base o inductancia base de la máquina.

Los pasos para el eje directo son:

- Asumir el mejor valor estimado para la inductancia de dispersión en la armadura L_l . Típicamente este valor es dado por el fabricante.
- $L_d(0)$ es el valor límite a baja frecuencia de $L_d(s)$

$$L_{ad}(0) = L_d(0) - L_l \text{ henries} \quad (4.8)$$

- Cuando la información en b) ha sido determinada, se debe de utilizar la función de transferencia $Z_{af}(s)$ definida en la ecuación 3.14 para encontrar la relación campo y armadura, como sigue:

$$N_{af}(0) = \left\{ \frac{1}{sL_{ad}(0)} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right] \right\} \quad (4.9)$$

(0) se refiere al límite de baja frecuencia para cada variable respectiva.

La relación de vueltas de la máquina real es el número total de vueltas en el campo dividido por las vueltas de espiras de armadura por fase.

- La resistencia de campo, referida a los devanados de armadura es:

$$R_{fd} = \frac{sL_{ad}(0)}{\lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right\}^2 (N_{af}(0))} \Omega \quad (4.10)$$

- Escoger una técnica iterativa como la de la sección 4.2 para encontrar los elementos del circuito desconocido que producen el mejor ajuste para las funciones de eje directo $L_d(s)$ y $sG(s)$.
- Ajustar L_{ad} calculado en b) para valores no saturados L_{adu} .
- Medir la resistencia de los devanados de campo en las terminales, convertirlas a la temperatura de operación deseada y referirlas al estator.
- Normalizar los elementos del circuito equivalente a valores p.u.
- Para determinar como un valor inicial, la cantidad $i_{fd}(base)$ en sistemas recíprocos, se utiliza la ecuación:

$$i_{fd} = \frac{3}{2} i_a(base) \left[\frac{1}{N_{af}(0)} \right] \quad (4.11)$$

Los pasos para el eje en cuadratura son los siguientes:

- Asumir el mismo valor para la inductancia de dispersión de armadura que fue utilizado para el eje directo.
- $L_q(0)$ es el límite de baja frecuencia de $L_q(s)$

$$L_{aq}(0) = L_q(0) - L_l \text{ henries} \quad (4.12)$$

- Usar una técnica iterativa para encontrar los valores de los elementos de circuito desconocido que producen el mejor ajuste para conocer $L_q(s)$, L_l y $L_{aq}(0)$.
- Convertir $L_{aq}(0)$ a su valor de no saturación L_{aqu}
- Normalizar los elementos del circuito equivalente a valores p.u.

4.3. Resultados de la identificación

Para el cálculo de los parámetros del modelo del eje directo como el eje en cuadratura se implementaron programas escritos en MATLAB. Estos se presentan en el apéndice 1 y, en el apéndice 6 se realiza una conversión de inductancias operacionales a parámetros de circuito equivalente. Los datos extraídos de la figuras 15, 16 y 18 se listan en forma parcial en las tablas del apéndice 2, 3 y 4. Los valores calculados constituyen el modelo no saturado para el eje directo y eje en cuadratura.

A continuación se implementan los pasos descritos en la sección 4.2 para el cálculo de los parámetros.

4.3.1. Eje directo

Empezando con el eje directo se calcula lo siguiente:

- $L_l = 0.795 < \text{mH} = 0.178 \text{ p.u.}$

- De la figura 15 se tiene que:

$$L_d(0)=1.779 \text{ p.u. o } 7.950 \text{ mH}$$

$$L_{ad}(0)=(7.95 - 0.795) \text{ mH} = 7.155 \text{ mH}$$

- De los datos de la figura 17 se obtiene:

$$N_{af}(0) = \frac{1}{sL_{ad}(0)} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{1}{s(0.007155)} (0.0862s)$$

Entonces,

$$N_{af}(0) = \frac{0.0862}{0.007155} = 12.05$$

El límite de baja frecuencia de 0.0862 usado anteriormente se puede obtener a través del ajuste de una simple función de transferencia de primer orden $Ks/1+sT$ a los puntos de prueba a baja frecuencia en la figura 16. Esta función es, en el límite, Ks , como $s(=j\omega)$ se acerca a cero.

- De los datos de la figura 15 se obtiene:

$$R_{fd} = \frac{sL_{ad}(0)}{\lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right) \left(\frac{2}{3} N_{af}(0) \right)} = \frac{s(0.007155)}{(0.3375) \left(\frac{2}{3} \right) (12.05)}$$

$$R = \frac{0.007155}{2.70233} = 0.002643 \Omega, \text{ referido al estator}$$

- El procedimiento iterativo de ajuste de la curva descrito en la sección 4.1.2, producen los siguientes valores para los valores desconocidos:

Modelo 2.2

$$L_{f1d} = 0.117 \text{ mH} \quad L_{fd} = 0.09 \text{ mH}$$

$$L_{1d} = -0.00243 \text{ mH}$$

$$R_{1d} = 0.0463 \Omega$$

Los cálculos para el modelo 2.2 se implementan en un programa de computadora descrito en el apéndice 1.

El voltaje nominal de armadura en la línea del entrehierro de la curva de saturación de circuito abierto, $I_{fb}(\text{base}) = 590 \text{ A dc}$

$$L_{adu} \left[\frac{3}{2} \right] \left[\frac{1}{12.05} \right] \left[\frac{18000\sqrt{2}}{(\sqrt{3})(120\pi)(590)} \right] = 8.225 \text{ mH referido a la armadura}$$

- La medición de la resistencia del devanado de campo, r_{fd} fue 0.2045Ω a 20° , y a 100° :

$$r_{fd} = \left[\frac{234.5 + 100}{234.5 + 20} \right] [0.2045] = 0.2688 \Omega$$

Luego, referido a la armadura a 100°C

$$R_{fd} = 0.2688 \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{1}{N_{af}(0)} \right)^2 = 0.2688 \times \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{1}{12.05} \right)^2 = 0.002777 \Omega$$

- Los valores de los elementos conocidos listados en f) están en ohms y en milihenries y todos han sido referidos a la armadura. Se nota otra vez que:

$$Z_{\text{base}}(\text{armadura}) = 1.685 \Omega$$

$$L_{\text{base}}(\text{armadura}) = 4.469 \text{ mH}$$

Los valores p.u. de todos los elementos deseados son:

Modelo 2.2

$$L_l = 0.795/4.469 = 0.178 \text{ p.u.}$$

$$L_{\text{adu}} = 8.225/4.469 = 0.840 \text{ p.u.}$$

$$L_{f1d} = 0.117/4.469 = 0.117 \text{ p.u.}$$

$$L_{fd} = 0.09/4.469 = 0.162 \text{ p.u.}$$

$$R_{fd} = 0.00277/1.685 = 0.00165 \text{ p.u.}$$

$$L_{1d} = 0.00243/4.469 = -0.0052 \text{ p.u.}$$

$$R_{1d} = 0.0463/1.685 = 0.0275 \text{ p.u.}$$

- La corriente base de armadura, y las corrientes base de campo deben ser establecidas para revisar el valor de $N_{af}(\text{base})$.

$$i(\text{base}) = \left(\frac{192.3}{18\sqrt{3}} \right) \sqrt{2} = 8722.9 \text{ A, Corriente base de armadura}$$

$$i_{fb}(\text{base}) = \frac{3}{2} (8722.9) \left[\frac{1}{12.05} \right] = 1085.8 \text{ A dc}$$

- Conociendo $i_{fd}(base)$ y $i_a(base)$, una verificación sobre $N_{af}(base)$ se puede obtener de la siguiente forma:

$$N_{af}(base) = \frac{3\,8722.9}{2\,1085.8} = 12.05$$

- $i_{fd}(base)$ también es igual $I_{fd}(base) \times L_{adu}$ donde $I_{fd}(base)$ es igual a 590 A en corriente directa. Por lo tanto

$$i_{fd}(base) = 590 \times 1.84 = 1086 \text{ A}$$

- Z_{base} para el campo, referido al estator:

$$Z_{base} = \frac{\text{Voltamperios nominales de la máquina}}{(i_{fd}(base))^2} = \frac{192 \cdot 10^6}{1086} = 163.05$$

Nuevamente se calcula:

$$R_{fd} \text{ p.u.} = \left(\frac{r_{fd}(\text{Corregido a } 100^\circ\text{C})}{163.05} \right) = \frac{0.2688}{163.05} = 0.00168 \text{ p.u.}$$

El cual concuerda muy cerca con los cálculos realizados.

4.3.2. Eje en cuadratura

Los datos del eje en cuadratura son considerados a continuación:

$$L_F = 0.795 \text{ mH}$$

De la figura 18

$$L_q(0) = 7.950 \text{ mH}$$

$$L_{aq}(0) = (7.950 - 0.795)\text{mH} = 7.155 \text{ mH}$$

Se hace notar el hecho de que el valor de prueba de $L_{aq}(0)$ es igual al valor de $L_{ad}(0)$, 7.155 mH.

Usualmente, algún grado de sobresalencia existe en las máquinas de rotor liso debido a la diferencia en los detalles de construcción en las caras de los polos, como oposición al área donde el campo de la ranura de la espira se localiza. En general $L_{ad} > L_{aq}(0)$ (saturado o no saturado).

Si L_l y $L_{aq}(0)$ son conocidos, un procedimiento iterativo, descrito anteriormente para el eje directo, ajusta la curva de la inductancia operacional del eje en cuadratura, dando los siguientes valores para los elementos del modelo 2.2:

$$\begin{aligned} L_{1q} &= 6.045 \text{ mH} \\ R_{1q} &= 0.01355 \Omega \\ L_{2q} &= 0.735 \text{ mH} \\ R_{2q} &= 0.01525 \Omega \\ L_{aq}(0) &= L_{qa}(8.225/7.155) \\ &= 7.155(8.225/7.155) \\ &= 8.225 \text{ mH} \end{aligned}$$

Convirtiendo a valores p.u. el modelo 2.2

$$\begin{aligned}L_l &= (0.795/4.469) = 0.178 \\L_{aqu} &= (8.225/4.469) = 1.840 \\L_{1q} &= (6.045/4.469) = 1.353 \\R_{1q} &= (0.01355/1.685) = 0.00804 \\L_{2q} &= (0.735/1.685) = 0.436 \\R_{2q} &= (0.01525/1.685) = 0.00905\end{aligned}$$

5. VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS IDENTIFICADOS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

Después de identificados los parámetros del circuito equivalente del eje directo y eje en cuadratura del modelo de la máquina síncrona, se verifica el comportamiento dinámico del modelo dentro del Sistema Nacional Interconectado (SNI), realizando simulaciones para esto, y tomando como referencia una máquina que opere actualmente en la red con características similares al modelo propuesto.

Para llevar a cabo esta comprobación se realizan dos simulaciones: en la primera, se insertará un disturbio en una de las barras del SNI, el cual provocará en el generador actual una inestabilidad transitoria, registrado por medio de sus parámetros eléctricos; en la segunda simulación, el modelo se conectará en la barra donde se encontraba el generador actual, bajo las mismas condiciones de la primera simulación, e insertando nuevamente un disturbio en la misma barra, provocando también en el modelo una inestabilidad transitoria, la cual será comparada con los resultados de la primera simulación.

Las conclusiones a las que se llegue, después de las comparaciones, permitirán determinar si la identificación de parámetros del modelo de la máquina síncrona, realizada en el capítulo 4, son una buena representación de la dinámica de un generador.

El proceso de verificación se realizará en los siguientes 3 pasos:

- Para llevar a cabo la simulación se deben traducir los parámetros de circuito equivalentes a reactancias dinámicas estándar, ya que en los últimos 30 años la mayoría de programas de computadoras comerciales y no comerciales para estabilidad transitoria, se han desarrollado bajo estas cantidades; es decir, reactancias y contantes de tiempo transitorias y subtransitorias.
- Escoger el programa de simulación a utilizar, escoger la máquina de referencia en el SIN y ubicar la falla o disturbio que va a generarse dentro de la simulación.
- Análisis de los resultados de la simulación.

5.1. Conversión de datos: de parámetros de circuito equivalente a inductancias dinámicas estándar

Las constantes de tiempo calculadas en el proceso de ajuste de la curva de las funciones de transferencia, $L_d(s)$, $sG(s)$ y $L_q(s)$ del modelo 2.2, se utilizarán para el cálculo de las reactancias dinámicas estándar.

La normativa IEEE STD 115 define los resultados de la prueba de corto circuito en la máquina síncrona como:

$$\frac{1}{L_d(s)} = \frac{1}{L_{ad} + L_l} + \left(\frac{1}{L'_d} - \frac{1}{L_{ad} + L_l} \right) \frac{sT'_d}{1 + sT'_d} + \left(\frac{1}{L''_d} + \frac{1}{L'_d} \right) \frac{sT''_d}{1 + sT''_d} \quad (5.1)$$

$$\frac{1}{L_q(s)} = \frac{1}{L_{aq} + L_l} + \left(\frac{1}{L'_q} - \frac{1}{L_{aq} + L_l} \right) \frac{sT'_q}{1 + sT'_q} + \left(\frac{1}{L''_q} + \frac{1}{L'_q} \right) \frac{sT''_q}{1 + sT''_q} \quad (5.2)$$

De forma similar, las funciones de transferencia para la estructura de los circuitos equivalentes son:

Para el eje directo:

$$L_d(s) = (L_{ad} + L_l) \frac{(1 + sT_{1d})(1 + sT_{2d})}{(1 + sT_{ad})(1 + sT_{4d})} \quad (5.3)$$

Para el eje en cuadratura:

$$L_q(s) = (L_{aq} + L_l) \frac{(1 + sT_{1q})(1 + sT_{2q})}{(1 + sT_{aq})(1 + sT_{4q})} \quad (5.4)$$

Reescribiendo las ecuaciones 5.3 y 5.4 de la forma 5.5 y 5.6, relacionando también las constantes de tiempo transitorio, subtransitorio en circuito abierto y corto circuito:

$$\frac{1}{L_d} = \frac{1}{(L_{ad} + L_l)} \frac{(1 + sT_{3d})(1 + sT_{4d})}{(1 + sT_{1d})(1 + sT_{2d})} = \frac{1}{(L_{ad} + L_l)} \frac{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})}{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)} \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{L_q} = \frac{1}{(L_{aq} + L_l)} \frac{(1 + sT_{3q})(1 + sT_{4q})}{(1 + sT_{1q})(1 + sT_{2q})} = \frac{1}{(L_{aq} + L_l)} \frac{(1 + sT'_{q0})(1 + sT''_{q0})}{(1 + sT'_q)(1 + sT''_q)} \quad (5.6)$$

La ecuación 5.5 y 5.6 se expanden por medio de fracciones parciales:

$$\frac{1}{L_d} = A_{0d} + \frac{A_{1d}}{1 + sT'_d} + \frac{A_{2d}}{1 + sT''_d} \quad (5.7)$$

$$\frac{1}{L_q} = A_{0q} + \frac{A_{1q}}{1 + sT'_q} + \frac{A_{2q}}{1 + sT''_q} \quad (5.8)$$

Cada término de la ecuación 5.7 corresponde a la ecuación 5.1, obteniéndose las siguientes relaciones:

$$A_{1d} = \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L'_d} \quad A_{2d} = \frac{1}{L'_d} - \frac{1}{L''_d} \quad \text{y} \quad A_{0d} = \frac{1}{L'''_d} \quad (5.9)$$

$$A_{1q} = \frac{1}{L_q} - \frac{1}{L'_q} \quad A_{2q} = \frac{1}{L'_q} - \frac{1}{L''_q} \quad \text{y} \quad A_{0q} = \frac{1}{L'''_q} \quad (5.10)$$

Realizando manipulación algebraica, se pueden determinar las inductancias dinámicas del eje directo y el eje en cuadratura:

$$L'_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_d} - A_{1d}\right)} \quad L''_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{L'_d} - A_{2d}\right)} \quad \text{y} \quad L'''_d = \frac{1}{A_{0d}} \quad (5.11)$$

$$L'_q = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_q} - A_{1q}\right)} \quad L''_q = \frac{1}{\left(\frac{1}{L'_q} - A_{2q}\right)} \quad \text{y} \quad L'''_q = \frac{1}{A_{0q}} \quad (5.12)$$

Utilizando los valores obtenidos en el apéndice 1, se realizaron los cálculos según las ecuaciones 5.5 a la 5.12. El procedimiento de cálculo de las reactancias y constantes de tiempo transitorias y subtransitorias, se desarrolla en el apéndice 5, implementándose en código MATLAB.

Los parámetros estándar de la prueba de corto circuito para el modelo 2.2 de la máquina síncrona identificada son las que se muestran en la tabla I.

Tabla I. **Parámetros estándar**

Eje directo				
Inductancia síncrona	Ld	=1.779	pu = 7.95	mH
Reactancia síncrona	xd	=2.9971	Ω =1.7787	pu
Inductancia transitoria	L'd	=0.4295	pu =1.9194	mH
Reactancia transitoria	x'd	=0.7236	Ω =0.4294	pu
Inductancia subtransitoria	L''d	=0.2115	pu =0.9452	mH
Reactancia subtransitoria	x''d	=0.3563	Ω =0.2115	pu
Inductancia subsubtransitoria	L'''d	=0.2115	pu =0.9452	mH
Reactancia subsubtransitoria	x'''d	=0.3563	Ω =0.2115	pu
Constante de tiempo en corto circuito en régimen transitorio	T'd	=0.0085	s	
Constante de tiempo en corto circuito en régimen subtransitorio	T''d	=0.8134	s	
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen transitorio	T'd0	=4.3072	s	
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen subtransitorio	T''d0	=0.0135	s	
Eje en cuadratura				
Inductancia síncrona	Lq	=1.779	pu =7.95	mH
Reactancia síncrona	xq	=2.9971	Ω =1.7787	pu
Inductancia transitoria	L'q	=0.3339	pu =1.4922	mH
Reactancia transitoria	x'q	=0.5625	Ω =0.3339	pu
Inductancia subtransitoria	L''q	=0.2573	pu =1.1499	mH
Reactancia subtransitoria	x''q	=0.4335	Ω =0.2573	pu
Inductancia subsubtransitoria	L'''q	=0.2573	pu =1.1499	mH
Reactancia subsubtransitoria	x'''q	=0.4335	Ω =0.2573	pu
Constante de tiempo en corto circuito en régimen transitorio	T'q	=0.1508	s	
Constante de tiempo en corto circuito en régimen subtransitorio	T''q	=1.6037	s	
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen transitorio	T'q0	=4.5853	s	
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen subtransitorio	T''q0	=0.3646	s	

Fuente: elaboración propia.

5.2. Simulación

La máquina que se escoge para comparar las características transitorias de nuestro modelo 2.2, será la unidad que opera en la Central de Energía San José, debido a las características similares al modelo propuesto. Las características comparativas se muestran en la tabla II.

Tabla II. **Parámetros nominales y estándar del Modelo 2.2 y de San José**

Parámetros	Modelo 2.2	San José	Unidades
Potencia nominal	192.3	132	MVA
Voltaje nominal	18	13.8	kV
Frecuencia nominal	60	60	Hz
Reactancia de dispersión del estator	0.178	0.081	pu
Reactancia síncrona	1.779	2.422	pu
Reactancia transitoria	0.429	0.203	pu
Reactancia subtransitoria	0.212	0.146	pu
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen transitorio	4.307	10.560	s
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen subtransitorio	0.014	0.048	s
Reactancia síncrona	1.779	2.325	pu
Reactancia transitoria	0.334	0.355	pu
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen transitorio	4.585	1.000	s
Constante de tiempo en circuito abierto en régimen subtransitorio	0.365	0.060	s

Fuente: elaboración propia

Los parámetros dinámicos de las unidades generadoras de San José y El Modelo 2.2 se implementarán en el programa comercial de simulación utilizado.

Los casos a simular dentro del SNI, son los siguientes:

- Se crea un incidente en la subestación Guate-Sur, en donde se provoca la apertura de interruptores en la subestación Guate-Sur con una duración de 0.05 segundos, esto causará que el Control Automático de Generación (AGC por sus siglas en inglés) ubicado en las unidades de Chixoy, regule la frecuencia del SNI a valores nominales. La potencia de la Unidad de la Central de Energía San José responderá ante el evento antes descrito, así también el voltaje en la subestación Guate-Sur; estos parámetros se observarán en sus respectivos nodos.
- Los parámetros del modelo 2.2 sustituyen a los del generador de la Central de Energía San José. Se simula nuevamente el incidente descrito anteriormente y se obtendrán las respuestas de potencia y voltaje en los nodos del modelo 2.2 y Guate Sur, respectivamente.

Al ingresar los datos a los modelos estándar dentro del programa de simulación, se necesita introducir los parámetros saturados de las máquinas síncronas, las cuales son obtenidas por el fabricante de cada máquina. Ya que el estudio se centra en la identificación de parámetros no saturados, se toman los parámetros saturados de San José para el modelo 2.2. También, el modelo de las máquinas no tiene ningún control adicional con el objetivo de observar el comportamiento libre de las máquinas.

En la figura 24 se muestra la topología de una sección del SNI, en la parte superior Chixoy, sitio donde se encuentra el AGC, con una X la subestación Guate-Sur, lugar del incidente simulado.

En la parte inferior encerrada en un rectángulo, el modelo 2.2 sustituye a la Central de Energía San José.

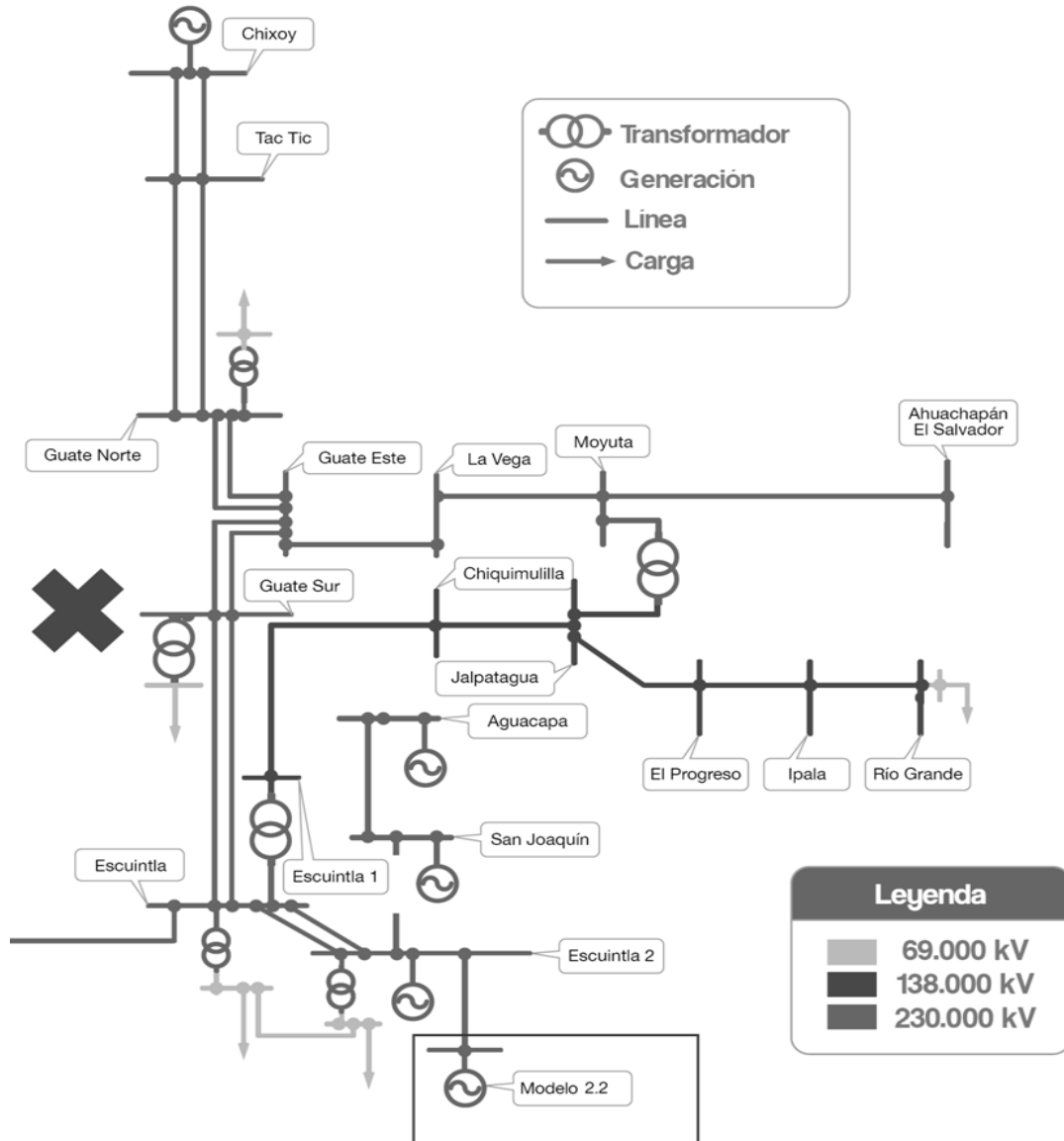
5.3. Análisis

El comportamiento transitorio de los elementos del SNI simulados se muestran en las figuras 25 a 28. Se observa que en los instantes previos al incidente, las potencias entregadas por los generadores Chixoy, San José y el Modelo 2.2 mantienen sus valores constantes.

Una vez inicia el incidente, el voltaje en la barra de Guate-Sur cae a cero, representando así la apertura de interruptores y las Potencias de Chixoy, San José y el modelo 2.2 caen abruptamente. La frecuencia registrada en Chixoy aumenta considerablemente.

Al cerrar nuevamente el interruptor en Guate-Sur, las potencias entregadas por los generadores se recobran pero mantienen un comportamiento oscilante y el voltaje de la barra Guate-Sur empieza a recuperar el voltaje nominal aunque de forma errática.

Figura 24. Diagrama unifilar de una sección del SNI



Fuente: CNEE-PET 2009. p.13.

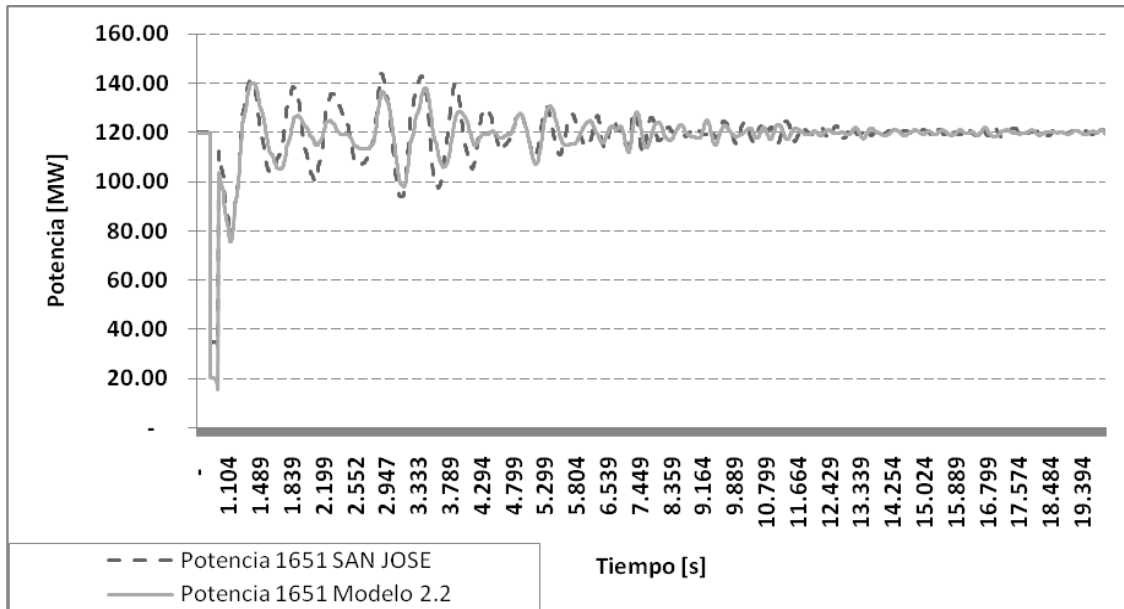
El AGC en Chixoy observa que la frecuencia ha salido de sus valores establecidos, por lo que acciona los controles de las unidades generadoras para restablecer la frecuencia del sistema.

Mientras tanto, la potencia de San José y el Modelo 2.2 amortiguan su comportamiento oscilante y restablecen los valores nominales, aproximadamente 20 segundos después de la falla.

La calidad de la respuesta del modelo 2.2 en la simulación se cuantifica por medio del análisis de error porcentual. El error porcentual entre las potencias de las dos máquinas se calcula por medio de la ecuación 5.13.

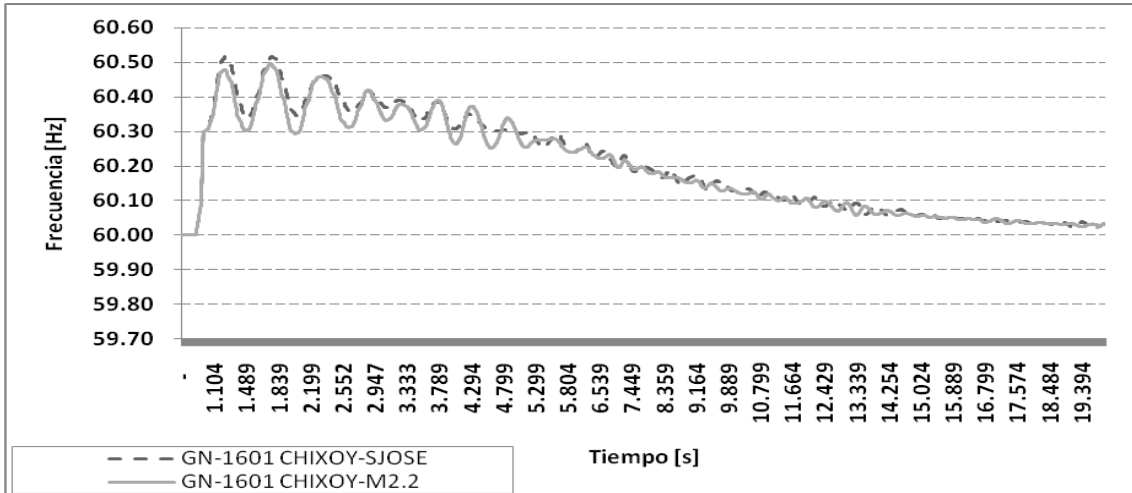
$$error\% = \frac{|P_{San\ José} - P_{M2.2}|}{P_{San\ José}} \quad (5.13)$$

Figura 25. **Potencia de San José en simulación 1 contra Modelo 2.2 simulación 2, ambos en el bus 1651**



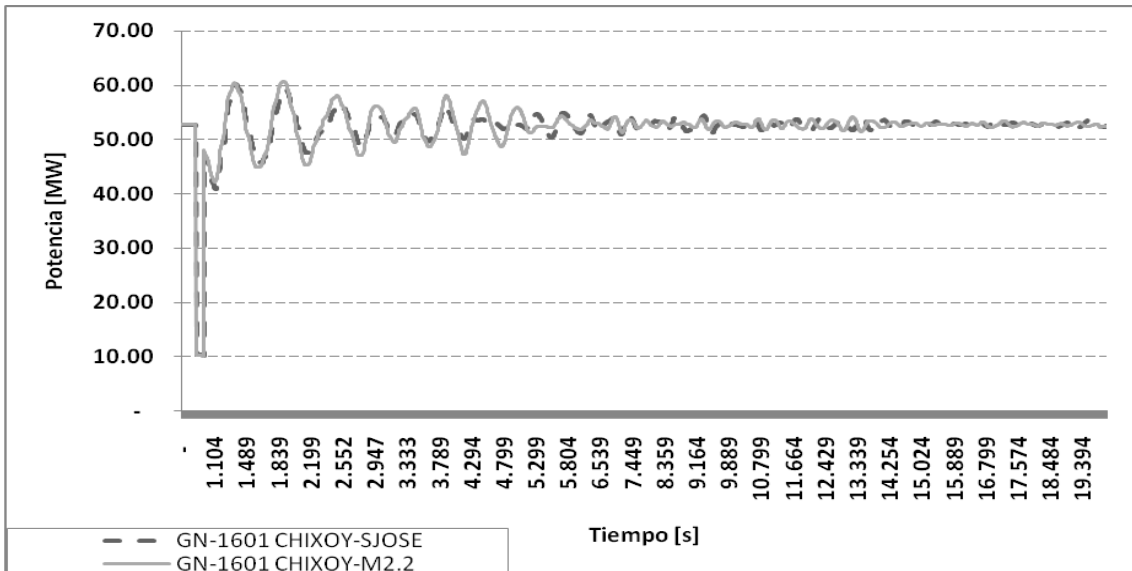
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Frecuencia de Chixoy en simulación 1 contra simulación 2



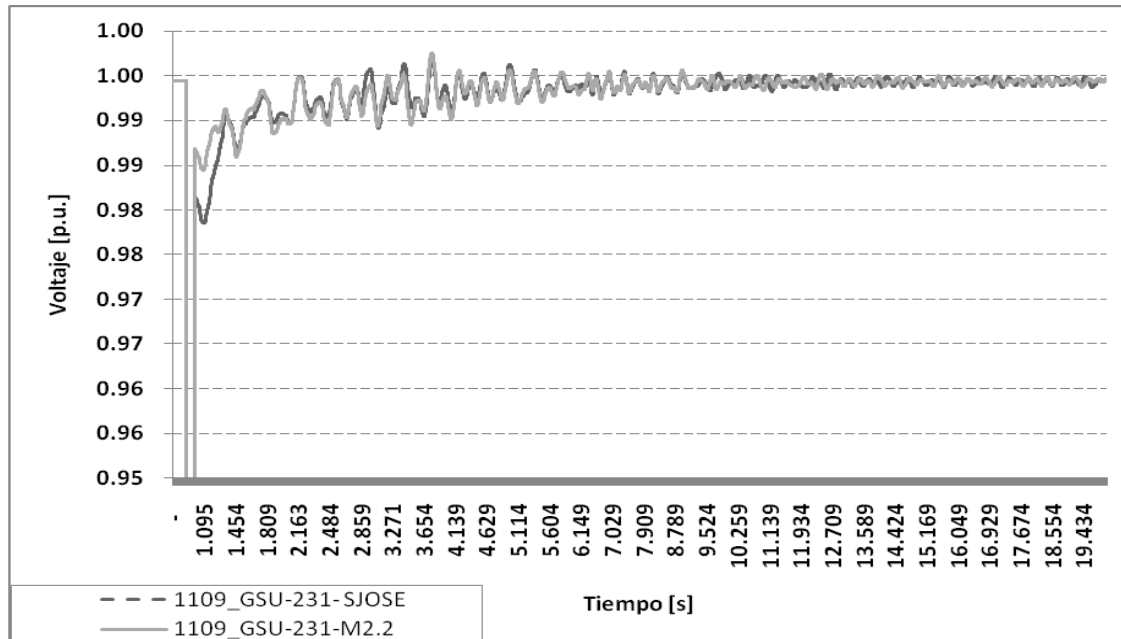
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Potencia de Chixoy en simulación 1 contra simulación 2



Fuente: elaboración propia.

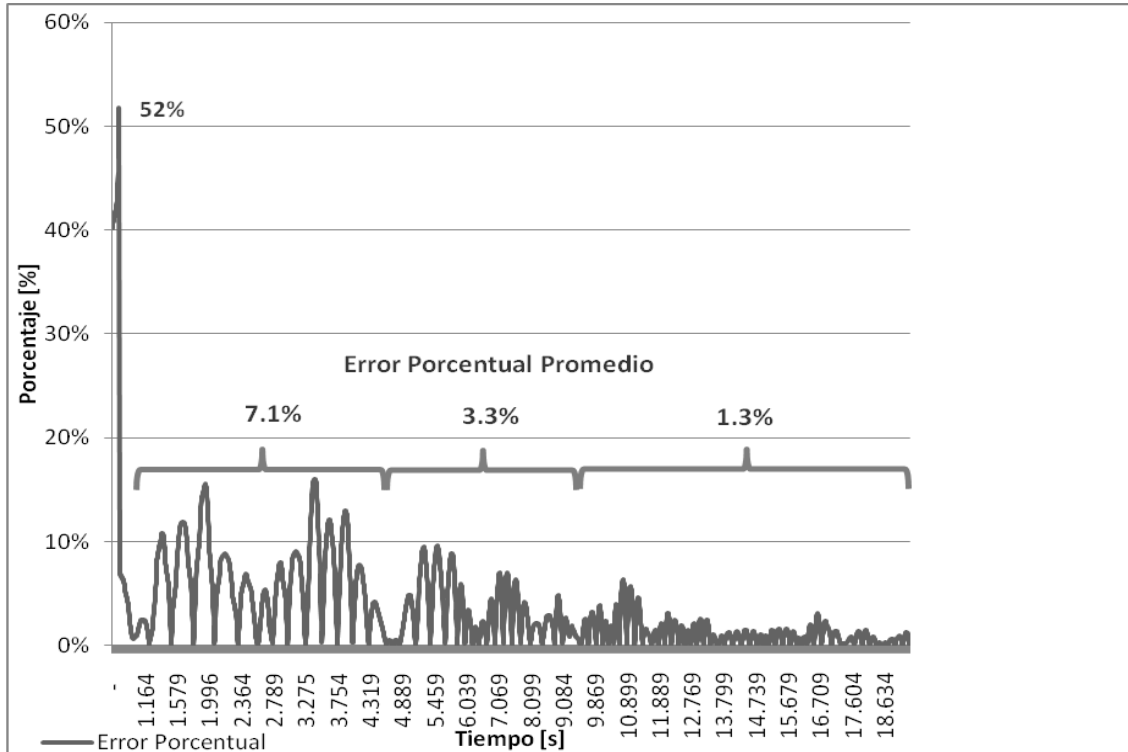
Figura 28. **Voltaje en la barra de Guate-Sur 230 en simulación 1 contra simulación 2**



Fuente: elaboración propia.

La figura 29 muestra el error del modelo, donde se puede diferenciar 4 bandas de comportamiento. En la primera banda ocurre el error máximo de 52%, y esto ocurre al inicio de la simulación, esto podría indicar que el modelo tiende a comportarse muy diferente al modelo de San José; en realidad las potencias comparadas son relativamente bajas en comparación a los valores nominales de potencia; para este caso la potencia de San José es de 32.45 MW y la potencia del modelo 2.2 es de 15.66 MW, correspondiente al instante anterior al cierre del interruptor. En la segunda, tercera y cuarta banda obtiene un error porcentual promedio de 7.1%, 3.3% y 1.3%;, esto muestra que la respuesta de la potencia del modelo 2.2 mejora con el transcurso de la simulación.

Figura 29. Error porcentual entre la diferencia de la respuesta transitoria de San José y el Modelo 2.2



Fuente: elaboración propia.

En la tabla III se muestran los estadísticos de los errores de los datos. Se hace notar que las desviaciones estándar son bastante altas, debido a un alto grado de errores sistemáticos incurridos en la recolección de datos en el proceso de identificación, suposiciones de la teoría de conversión de datos y las características propias de la máquina modelada.

Tabla III. **Estadísticos: diferencias y errores del modelo 2.2**

	Promedio	Desviación estándar
Diferencia	4.02	4.07
Diferencia porcentual	3.76%	5.84%
Error porcentual	3.67%	5.00%

Fuente: elaboración propia.

Para fines de verificación, el comportamiento global de los parámetros del modelo 2.2, reflejados en la medida de error porcentual, se determina que el valor es bajo, siendo del 3.67% en promedio, tomándose como base una incerteza abajo del 5%; este criterio es el mismo utilizado en el capítulo 9, de la referencia 1. Así, los parámetros del modelo, identificados en el capítulo 4, pueden ser utilizados para representar los parámetros de una máquina dentro de una simulación que tenga características operativas similares.

Para fines de validación, el comportamiento de los parámetros del modelo 2.2, probados en esta simulación, no satisfacen la respuesta transitoria de la máquina, debido a que, en los primeros ciclos de simulación se llega a registrar hasta un 52% de error entre la respuesta del modelo de San José y el modelo 2.2 identificado. Además, el error de 52% registrado no es aceptable ya que, por ejemplo, si lo que se está verificando es la respuesta de una máquina para la colocación de valores de disparo de una protección, se espera que los niveles de error sean llevados lo más cercano posible a valores reales, para que las simulaciones puedan predecir o reproducir efectos de forma correcta en el SNI.

CONCLUSIONES

1. La identificación de parámetros dinámicos de la máquina síncrona, contenida en la IEEE-115, es una guía que permite determinar los parámetros operacionales de las funciones de transferencia entre rotor y estator, en un rango de frecuencias de operación lo suficientemente amplio para que los parámetros extraídos representen los fenómenos eléctricos transitorios y de estabilidad.
2. Utilizar 2 funciones de transferencia para ajustar la curva de datos extraídos de la prueba de respuesta en frecuencia a rotor parado, ofrecen una aproximación bastante confiable del Modelo 2.2 de la máquina síncrona.
3. El algoritmo de mínimos cuadrados no lineales es una técnica que proporciona una buena solución al ajuste de las curvas de datos de las funciones de transferencia $L_d(s)$, $L_q(s)$ y $sG(s)$.
4. El modelo 2.2 identificado y simulado en el Sistema SNI bajo un evento transitorio, muestra en promedio un error porcentual de 3.67% con respecto del modelo de una máquina que opera actualmente en el sistema. Verificando así que la metodología utilizada para la representación de los parámetros dinámicos de la máquina síncrona es apropiada.

RECOMENDACIONES

1. Implementar en el laboratorio de máquinas eléctricas las pruebas de respuesta en frecuencia de la máquina síncrona, como herramienta pedagógica en la enseñanza, tanto de los complejos procesos electromagnéticos de la máquina como también para el estudio de sistemas de control.
2. Debe hacerse hincapié en que los principios de la prueba deben de acompañarse con un consciente entendimiento de las destrezas de medición, que se deben de desarrollar para la adecuada interpretación de los resultados obtenidos en los experimentos.
3. Ampliar la identificación de la máquina síncrona en modelos de orden superior o inferior, con el fin de obtener diferentes grados de exactitud en simulaciones dinámicas. El estudio de estos modelos ayudará a adquirir criterios útiles para la modelación de la máquina dentro de los sistemas eléctricos de potencia.
4. Explorar distintas técnicas para el ajuste de curvas de las inductancias operacionales de eje directo, en cuadratura y de la función de transferencia de rotor a estator. Las técnicas de ajuste de curvas como la estimación de máxima verosimilitud, procedimientos no iterativos o técnicas de síntesis de red proporcionan grados de exactitud mayores, así como esfuerzos computacionales eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Plan de expansión del Sistema de Transporte 2008-2018*. Guatemala: CNEE, 2008. 52 p.
2. DANDENO, P.L. *Supplementary definitions & associated test methods for obtaining parameters for synchronous machine stability study simulations*. New York: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980. vol. 99. 1633 p.
3. DROSG, Manfred. *Dealing with uncertainties: a guide to error analysis*. 2d ed. Wien: Springer-Verlag, 2007. 190 p. ISBN: 978-3-642-01383-6.
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses*. IEEE STD 1110-2002. New York: IEEE Press, 2002. 72 p.
5. _____. *Standard glossary of modeling and simulation terminology*. STD.610.3. New York: IEEE Press, 1989. 20 p.
6. _____. *Standard procedures for obtaining synchronous machine parameters by standstill frequency response testing*. STD.115A. New York: IEEE Press, 1987. 28.p.

7. _____. *Test procedures for synchronous machines, Part II Test procedures and parameter determination for dynamic analysis*. IEEE STD 115-1995. New York: IEEE Press, 1995. 200 p.
8. JUNG, Lennart. *Perspectives on system identification*. Suecia: Linköping Universitet Division of Automatic Control, 2008. 13 p.
9. KAMWA, I.; FARZANEH, M. *Data translation and order reduction for turbine-generator models used in Network Studies*. New York: IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997. vol. 12/2, 126 p.
10. _____. et al. *Frequency-Domain maximum likelihood estimation of synchronous machine High-Order Models Using SSFR Test Data*. New York: IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000. vol. 7/3, 536 p.
11. _____.; VIAROUGE, P. *On equivalent circuit structures for empirical modeling of turbine-generators*. New York: IEEE Transactions on Energy Conversion, 1994. vol. 9/3, p. 579-592.
12. KEYHANI, A.; TSAI, H. *Identification of high-order synchronous generator models from SSFR test data*. New York: IEEE Transactions on Energy Conversions, 1994. vol. 9, 603 p.
13. KUNDUR, Prabahashankar. *Power system stability and control*. Palo Alto: McGraw-Hill, 1993. 1167 p. ISBN: 0-07-035958-X.

14. MARTÍNEZ, J.A., et al. *Parameter determination for modeling system transients Part IV: Rotating Machines. Transactions on power delivery*. 2005. vol. 20. 2072 p.
15. The Math Works. *Optimization Toolbox: User Guide*. Natick: The MathWorks Inc., [en línea]. <http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/optim/optim_tb.pdf>. [Consulta en julio 2010].
16. OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. Dormido Canto, Sebastian y Dormido Canto, Raquel (trad.); Dormido Bencomo, Sebastian (Rev. Téc.). 4a ed. Madrid: Pearson Educación, 2003. 956 p. ISBN: 84-205-3678-4.
17. PINTELON, Rik; SHOUKENS, Johan. *System identification: a frequency domain approach*. New York: IEEE Press, 2001. 605 p. ISBN: 0-7803-6000-1.
18. UMANS, S.D., et al. *Modeling of solid rotor turbogenerators Part I & II*. New York: IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, 1978. vol. 97, 291 p.
19. VALKENBURG, M.E. *Análisis de redes*. México: Noriega, 1999. 631 p. ISBN: 968-18-0178-4
20. VANFRETTI, Luigi. *Modelación y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 503 p.

21. VERBEECK, J. *Standstill Frequency Response Measurement and Identification Methods for Synchronous Machines*. Bélgica: Vrije Universiteit Brussel, ELEC. 2000. 224 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Ajuste de los parámetros del modelo: eje directo y eje en cuadratura**

Se debe hacer notar que para el ajuste del modelo son usadas dos funciones de transferencia $L_d(s)$ y $sG(s)$, en lugar de $L_d(s)$, $sG(s)$ y $Z_{af0}(s)$. El enfoque de 3 funciones de transferencia agrega mayor precisión al ajuste del modelo.

Los códigos fuentes utilizados son los siguientes:

Inductancia operacional $L_d(s)$
<pre>%Lectura de datos a ajustar xLd=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\Ldimg.xls' ,1,'E2:E59'); %parte real de Ld yLd=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\Ldimg.xls' ,1,'F2:F59'); %parte imaginaria de Ld S=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\Ldimg.xls',1 ,'A2:A59'); %Frecuencia [Hz] %Dimensionamiento Ld = xLd + i.*yLd; %Variable Compleja, Función de Transferencia Ld Ld = Ld / 1000; % [mH] a [H] S0 = i.*2*pi()*S; %Variable Compleja, S = iw [rad/seg] %Estimación inicial de valores x0=[0.02 0.8 4.0272 0.00154]; %Opciones de configuración de lsqnonlin options optimset('Largescale','on','Diagnostics','on','LevenbergMar</pre>

```

quardt','off');

%Cálculo de constantes de tiempo T1,T2, T3 y T4 utilizando
la función lsqnonlin
[x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin(@ (x)moiLd(x,
S0,Ld),x0,[],[],options);

%Constantes de tiempos calculadas
T1 = x(1);
T2 = x(2);
T3 = x(3);
T4 = x(4);

%Función de transferencia ajustada
Ld0 = 0.00795;
Ldx = (Ld0 * ( (1 + (T1*(S0))).*(1 + (T2*(S0))) ) ) ...
      ./ ...
      ( (1 + (T3*(S0))).*(1 + (T4*(S0))) );
Ldx = Ldx*1000; %[H] a [mH]
Ld = Ld*1000; %[H] a [mH]

%Graficas de datos experimentales vs datos ajustados
%Magnitud y Angulo
subplot(2,1,1); loglog(S*2*pi(),abs(Ldx),'x')
hold on
loglog(S*2*pi(),abs(Ld))
grid off
subplot(2,1,2);
semilogx(S*2*pi(),angle(Ldx)*180/pi(),'x')
hold on
semilogx(S*2*pi(),angle(Ld)*180/pi())
grid off

```

Función de transferencia armadura a campo sG(s)

```

%Lectura de datos a ajustar
S=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\sGimg.xls',1
,'A2:A54'); % Frecuencia [Hz]
xsG=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\sGimg.xls'
,1,'E2:E54'); %parte real de sG
ysG=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\sGimg.xls'
,1,'F2:F54'); %parte imaginaria de sG

%Dimensionamiento

```

```

sG = xsG + i.*ysG; %Variable Compleja, Función de
Transferencia sG
S0 = i.*2*pi()*S; %Variable Compleja, S = iw [rad/seg]

%Estimación inicial de valores
x0=[-0.0005 10 0.0061];

%Opciones de configuración de lsqnonlin
options =
optimset('Largescale','on','Diagnostics','on','LevenbergMar
quardt','off','TolFun',1e-20,'TolX',1e-
21,'MaxIter',10000,'MaxFunEvals',40000);

%Cálculo de constantes de tiempo T3,T4 y T5 utilizando la
función lsqnonlin
[x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin(@(x)moisG(x,
S0,sG),x0,[],[],options);

%Constantes de tiempos calculadas
T5 = x(1);
T3 = x(2);
T4 = x(3);

%Función de transferencia ajustada
sG2 = 0.337;
sGx = (sG2 * S0.*(1 + (T5*(S0))) ) ...
./ ...
( (1 + (T3*(S0))).*(1 + (T4*(S0))) );

%Gráficas de datos experimentales vs datos ajustados
%Magnitud y Ángulo
subplot(2,1,1); loglog(S*2*pi(),abs(sGx),'x')
hold on
loglog(S*2*pi(),abs(sG))
grid off
subplot(2,1,2);
semilogx(S*2*pi(),angle(sGx)*180/pi(),'x')
hold on
semilogx(S*2*pi(),angle(sG)*180/pi())
grid off

```

Inductancia operacional $L_q(s)$

```
%Lectura de datos a ajustar
xLq=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\Lqimg.xls'
,1,'E2:E54'); %parte real de Lq
yLq=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\Lqimg.xls'
,1,'F2:F54'); %parte imaginaria de Lq
S=xlsread('C:\Users\SYJ\Documents\Tesis\Modelo\Lqimg.xls',1
,'A2:A54'); %Frecuencia [Hz]

%Dimensionamiento
Lq = xLq + i.*yLq; %Variable Compleja, Función de
Transferencia Ld
Lq = Lq/1000; % [mH] a [H]
S0 = i.*2*pi()*S; %Variable Compleja, S = iw [rad/seg]

%Estimación inicial de valores
x0=[0.001 0.1 100 5];

%Opciones de configuración de lsqnonlin
options = optimset('Largescale','on','Diagnostics','on',
'LevenbergMarquardt','off','TolFun',1e-21,'TolX',1e-
25,'MaxIter',4000,...
'MaxFunEvals',10000,'Display','final');

%Cálculo de las constantes de tiempo T1q,T2q, T3q y T4q
utilizando la función lsqnonlin
[x,resnorm,residual,exitflag,output]=lsqnonlin(@ (x)moiLq(x,
S0,Lq),x0,[],[],options);

%Constantes de tiempos calculadas
T1q = x(1);
T2q = x(2);
T3q = x(3);
T4q = x(4);

%Función de transferencia ajustada
Lq0 = 0.00795
Lqx = (Lq0 * (1 + (T1q*(S0)))).*(1 + (T2q*S0)) ) ...
./ ...
(1 + (T3q*(S0)).*(1 + (T4q*S0))) ;

Lq = Lq*1000; %[H] a [mH]
Lqx = Lqx*1000; %[H] a [mH]
```

```
%Graficas de datos experimentales vs datos ajustados
%Magnitud y Ángulo
subplot(2,1,1); loglog(S*2*pi(),abs(Lqx),'x')
hold on
loglog(S*2*pi(),abs(Lq))
grid off
subplot(2,1,2);
semilogx(S*2*pi(),angle(Lqx)*180/pi(),'x')
hold on
semilogx(S*2*pi(),angle(Lq)*180/pi())
grid off
```

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Datos de la inductancia operacional $L_d(s)$ extraídos de la figura 3.8. $L_d(s)$ se calcula a partir de la prueba $\Delta e_{arm}/\Delta i_{arm}$ con el campo en corto circuito $\Delta e_{cmp} = 0$, por medio de la relación $L_d(s)=(Z_d(s)-R_a)/s$**

Frecuencia [Hz]	Magnitud [mH]	Ángulo [°]	Componente real	Componente imaginaria
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3.00E-003	7.9942	-3.00	7.9832	-0.4183
4.00E-003	7.9942	-4.33	7.9713	-0.6040
5.00E-003	7.9942	-6.00	7.9504	-0.8356
7.00E-003	7.8423	-8.67	7.7527	-1.1817
8.00E-003	7.8423	-10.67	7.7068	-1.4515
1.00E-002	7.7426	-12.67	7.5541	-1.6977
1.30E-002	7.7426	-16.67	7.4173	-2.2206
1.60E-002	7.2629	-18.00	6.9074	-2.2443
2.00E-002	7.0343	-23.67	6.4427	-2.8236
2.40E-002	6.5984	-27.67	5.8440	-3.0638
3.00E-002	6.1896	-31.00	5.3055	-3.1879
4.00E-002	5.5165	-35.33	4.5003	-3.1903
5.00E-002	4.8231	-38.33	3.7833	-2.9915
7.00E-002	4.1368	-40.33	3.1534	-2.6774
8.00E-002	3.5938	-40.67	2.7259	-2.3419
1.00E-001	3.1622	-40.33	2.4105	-2.0467
1.30E-001	2.6269	-38.67	2.0510	-1.6412
1.60E-001	2.3713	-37.00	1.8938	-1.4271
2.00E-001	2.1544	-34.00	1.7861	-1.2047
2.40E-001	1.9573	-30.33	1.6893	-0.9885
3.00E-001	1.8716	-24.07	1.7089	-0.7632
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos de la función de transferencia de armadura a campo $sG(s)$ extraídos de la figura 3.9. $sG(s)$ se obtiene a partir de la prueba $\Delta i_{cmp}/\Delta i_{arm}$ con el campo en corto circuito $\Delta e_{cmp} = 0$**

Frecuencia [Hz]	Magnitud [A/A]	Ángulo [°]	Componente real	Componente imaginaria
⋮	⋮	⋮	⋮	
3.00E-003	6.60E-003	81	1.03E-003	6.52E-003
4.00E-003	8.50E-003	80	1.48E-003	8.37E-003
5.00E-003	1.05E-002	79	2.00E-003	1.03E-002
7.00E-003	1.40E-002	78	2.91E-003	1.37E-002
8.00E-003	1.70E-002	75	4.40E-003	1.64E-002
1.00E-002	2.10E-002	71	6.84E-003	1.99E-002
1.30E-002	2.80E-002	68	1.05E-002	2.60E-002
1.60E-002	3.10E-002	60	1.55E-002	2.68E-002
2.00E-002	3.80E-002	58	2.01E-002	3.22E-002
2.40E-002	4.20E-002	55	2.41E-002	3.44E-002
3.00E-002	4.80E-002	47	3.27E-002	3.51E-002
4.00E-002	5.80E-002	41	4.38E-002	3.81E-002
5.00E-002	6.10E-002	35	5.00E-002	3.50E-002
7.00E-002	6.30E-002	30	5.46E-002	3.15E-002
8.00E-002	7.10E-002	24	6.49E-002	2.89E-002
1.00E-001	7.30E-002	22	6.77E-002	2.73E-002
1.30E-001	7.60E-002	16	7.31E-002	2.09E-002
1.60E-001	8.10E-002	14	7.86E-002	1.96E-002
2.00E-001	8.20E-002	12	8.02E-002	1.70E-002
2.40E-001	8.30E-002	9	8.20E-002	1.30E-002
3.00E-001	8.40E-002	8	8.32E-002	1.17E-002

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos de la inductancia operacional del eje en cuadratura $L_q(s)$ extraídos de la figura 3.11. $L_q(s)$ se calcula a partir de la prueba $\Delta e_q/\Delta i_q$, por medio de la relación $L_q(s)=(Z_q(s)-R_a)/s$**

Frecuencia [Hz]	Magnitud [mH]	Ángulo [°]	Componente real	Componente imaginaria
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3.00E-003	7.9942	-2.3	7.9876	-0.3254
4.00E-003	7.9942	-3.0	7.9832	-0.4183
5.00E-003	7.9942	-3.4	7.9801	-0.4741
7.00E-003	7.8423	-4.0	7.8232	-0.5470
8.00E-003	7.8423	-4.3	7.8198	-0.5925
1.00E-002	7.7426	-5.0	7.7131	-0.6748
1.30E-002	7.7426	-6.7	7.6902	-0.8988
1.60E-002	7.2629	-7.3	7.2035	-0.9270
2.00E-002	7.0343	-8.0	6.9658	-0.9789
2.40E-002	6.5984	-10.7	6.4844	-1.2213
3.00E-002	6.1896	-12.0	6.0543	-1.2869
4.00E-002	5.5165	-14.7	5.3367	-1.3967
5.00E-002	4.8231	-16.7	4.6205	-1.3833
7.00E-002	4.1368	-20.0	3.8873	-1.4148
8.00E-002	3.5938	-22.0	3.3321	-1.3462
1.00E-001	3.1622	-25.0	2.8659	-1.3364
1.30E-001	2.6269	-28.0	2.3194	-1.2332
1.60E-001	2.3713	-30.0	2.0536	-1.1856
2.00E-001	2.1544	-32.0	1.8270	-1.1416
2.40E-001	1.9573	-34.3	1.6163	-1.1039
3.00E-001	1.8716	-35.7	1.5205	-1.0912
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Conversión de parámetros de inductancias operacionales a inductancias estándar síncronas**

Eje directo
<pre> %Constantes de tiempo (polos y ceros de la función de transferencia Ld) clear; T1 = 0.0085; T2 = 0.8134; T3 = 4.3072; T4 = 0.0135; Ld0 = 1.779; %Valor en p.u. a=[T3 1]; b=[T4 1]; c=[T1 1]; d=[T2 1]; num = conv(a,b); den = conv(c,d); den = Ld0*den; [r,p,k]= residue(num,den); A1d = -1*(r(1)/p(1)); A2d = -1*(r(2)/p(2)); A0d = k; Lxd = 1 / ((1/Ld0)-A1d) %Inductancia transitoria en pu Lxxd = 1 / ((1/Lxd)-A2d) %Inductancia subtransitoria en pu Lxxx = 1/A0d %Inductancia subsubtransitoria en pu Txd = T1 %Constante de tiempo en corto circuito en régimen transitorio Txxd = T2 %Constante de tiempo en corto circuito en régimen subtransitorio T0d = T3 %Constante de tiempo en circuito abierto en régimen transitorio T00d = T4 %Constante de tiempo en circuito abierto en régimen subtransitorio </pre>
Eje en cuadratura
<pre> %Constantes de tiempo (polos y ceros de la función de transferencia 1/Lq) clear; T1q = 0.1508; T2q = 1.6037; </pre>

```

T3q = 4.5853; T4q = 0.3646;

Lq0 = 7.95/4.469; %Valor en p.u.

a=[T3q 1]; b=[T4q 1];
c=[T1q 1]; d=[T2q 1];

num = conv(a,b);
den = conv(c,d);
den = Lq0*den;

[r,p,k]= residue(num,den);

A1q = -1*(r(1)/p(1));
A2q = -1*(r(2)/p(2));
A0q = k;

Lxq = 1 / ( (1/Lq0)-A1q ) %Inductancia transitoria en pu
Lxxq = 1 / ((1/Lxq)-A2q) %Inductancia subtransitoria en pu
Lxxxq = 1/A0q %Inductancia subsubtransitoria en pu
Txq = T1q %Constante de tiempo en corto circuito en régimen
transitorio
Txxq = T2q %Constante de tiempo en corto circuito en
régimen subtransitorio
T0q = T3q %Constante de tiempo en circuito abierto en
régimen transitorio
T00q = T4q %Constante de tiempo en circuito abierto en
régimen subtransitorio

```

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Conversión de inductancias operacionales a parámetros del circuito equivalente**

Eje directo
<pre> %Modeling of Solid rotor turbogenerator - Part I & II %Inicializar las contantes de tiempo de Ld(s) y sG(s) T1= 0.0085;T2= 0.8134; T3= 4.0192;T4= 0.0155; T5= -0.0005; Ld = 1.779; %Inductancia síncrona Ll = 0.178; %Inductancia de dispersión del estator Lad = Ld - Ll; %Inductancia mutua wn = 2*pi*60; %frecuencia nominal en rad/seg %Implementación de las formulas: Ro = ((Lad*Lad)/(wn*Ld*(T3+T4-T1-T2))) a=Ld*(T1+T2)-Ll*(T3+T4); a=a/Lad; b=Ld*T1*T2-Ll*T3*T4; b=b/Lad; c=(T3*T4-T1*T2)/(T3+T4-T1-T2); puLf1d=b-a*T5+T5*T5; %Valores en p.u. puLf1d=((Lad*Lad)/(wn*Ld*(T3+T4-T1-T2)))*... *puLf1d/(c-T5); %Valores en p.u. puRfd=((Lad*Lad)/(wn*Ld*(T3+T4-T1-T2)))*... *(puLf1d+Ro*(2*T5-a)); puRfd=puRfd/(puLf1d+((Lad*Lad)/... (wn*Ld*(T3+T4-T1-T2)))*(T5+c-a)); %Valores en p.u. puLfd=puRfd*(a-T5-puLf1d/((Lad*Lad)/... (wn*Ld*(T3+T4-T1-T2)))); %Valores en p.u. puR1d=((Lad*Lad)/(wn*Ld*(T3+T4-T1-T2)))*... *puRfd/(puRfd-Ro) %Valores en p.u. %Inductancias en p.u. puL1d=puR1d*T5; puL1d=puL1d*wn puLfd=puLfd*wn puLf1d=puLf1d*wn %Inductancias en henrios L1d = puL1d*0.00469 Lfd = puLfd*0.00469 Lf1d = puLf1d*0.00469 %Resistencias en Ohms R1d = puR1d*1.685 </pre>

```
Rfd = puRfd*1.685
```

Eje en cuadratura

```
%IEEE 1110-2002
clear;
%Inicializando las constantes de tiempo en Lq(s)
Tq1 = 0.1508;Tq2 = 1.6037;
Tq3 = 4.5853;Tq4 = 0.3646;
Lq0 = 7.950/4.469; %Inductancia mutua
Ll = 0.795/4.469; %Inductancia de dispersión del estator
Laq = Lq0 - Ll; %Inductancia sincrona
wn=2*pi*60; %Frecuencia nominal en rad/sec
%Implementación de la formula
Fac1 = [Tq1 1];Fac2 = [Tq2 1];
Fac3 = [Tq3 1];Fac4 = [Tq4 1];
Num = conv(Fac1,Fac2);
Den = conv(Fac3,Fac4);
Ope1 = Num-Den*Ll/Lq0;
Ope2 = [Laq/wn 0];
Nz = conv(Ope1,Ope2);
Dz = Den-Num; Nz=Nz(1:3); Dz=Dz(1:2);
Req = Nz(3)/Dz(2);
Nz=Nz/Nz(3); Dz=Dz/Dz(2);
%Cálculo de las raices del polinomio y ordenamiento
Tab =sort(abs(roots(Nz))); Tab=1./Tab;
Tm =sort(abs(roots(Dz))); Tm=1/Tm(1);

%Solución del Sistema lineal de dos ecuaciones
x=[1 1;Tab(1) Tab(2)]\[1 ; Tm]/Req;

%Resultados
puR1q = 1/x(1);puR2q = 1/x(2);
puL1q = wn*puR1q*Tab(1); puL2q = wn*puR2q*Tab(2);
R1q = puR1q*1.685;R2q = puR2q*1.685;
L1q = puL1q*0.004469;L2q = puL2q*0.004469;
```

Fuente: elaboración propia.