

# Determinación de los Parámetros Dinámicos de una Máquina Síncrona de Laboratorio Utilizando el Método de Respuesta a la Frecuencia

Salvador Campos

Tomás I. Asiaín

Daniel Ruiz-Vega

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación  
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos"

Edificio Z-4 1<sup>er</sup> piso, Col. Lindavista. C.P. 07738, México D.F. MEXICO  
Tel: +52 55 57 20 6000 ext. 54626 Fax: ext. 54218

e-mail: scamp-64@hotmail.com, tiaol234@hotmail.com, drv\_liege@yahoo.com

**Resumen.** Este artículo tiene como objetivo principal presentar el método para la obtención de los parámetros eléctricos de las máquinas síncronas mediante pruebas de respuesta en el dominio de la frecuencia con el rotor en reposo, aplicado a una máquina síncrona de laboratorio de 5 KVA. Este método está basado en la obtención de las constantes de tiempo transitoria y subtransitoria de circuito abierto y de corto circuito de eje directo y de cuadratura ( $T'_{d0}$ ,  $T''_{d0}$ ,  $T'_d$ ,  $T''_d$ ,  $T'_{q0}$ ,  $T''_{q0}$ ,  $T'_q$ ,  $T''_q$ ), respectivamente, mediante un ajuste de curvas, a partir de datos obtenidos mediante pruebas. Finalmente se obtienen los parámetros eléctricos de los modelos equivalentes de los circuitos de eje directo y de cuadratura de la máquina.

## Palabras llave

Parámetros dinámicos de máquinas síncronas, prueba de respuesta a la frecuencia.

## 1. Introducción

Al utilizar pruebas normalizadas en el dominio del tiempo se confía ampliamente en las mediciones de transitorios largos en máquinas síncronas, debido a que estas son susceptibles a cualquier cambio en la saturación durante el curso del transitorio medido. También es necesario tomar en cuenta que la precisión y la resolución con la cual un transitorio simple puede ser medido es frecuentemente insuficiente para proporcionar los detalles requeridos para modelar el rotor de hierro sólido de un turbogenerador. El método de prueba descrito a continuación, evita ambos problemas, además de que proporciona datos completos tanto del *eje d* como del *eje q*, a diferencia de las pruebas en el dominio del tiempo que solo entregan datos en el *eje d* [1].

El método utilizado en el presente trabajo emplea datos obtenidos de pruebas en el dominio de la frecuencia que describen la respuesta de los flujos de la máquina ante los cambios voltaje de campo y corriente del estator en ambos ejes, directo y de cuadratura de una máquina

síncrona. Algunas *ventajas* del método es que éste puede ser realizado en planta ó en el sitio de generación, además de que no existe riesgo de daño al ser probada la máquina y proporciona parámetros completos en ambos ejes, directo y de cuadratura [5].

## 2. Modelo dinámico de la máquina síncrona

Un conjunto completo de parámetros eléctricos para un generador síncrono puede ser obtenido a partir de cuatro funciones de transferencia y el valor de la inductancia de dispersión del devanado del estator. El procedimiento de prueba y el análisis de datos serán discutidos en las secciones siguientes empleando los circuitos equivalentes de los ejes *d* y *q*, mostrados en las figuras 1a y 1b, aunque el método es igualmente aplicable a otras estructuras de modelos [2, 6, 7].

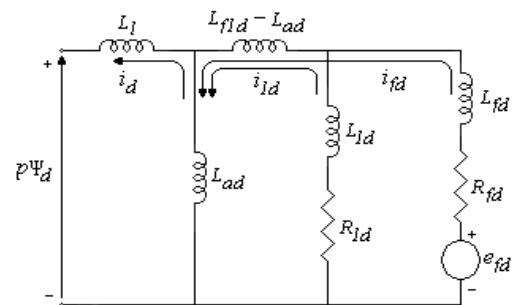


Fig. 1a: Circuito equivalente de eje directo.

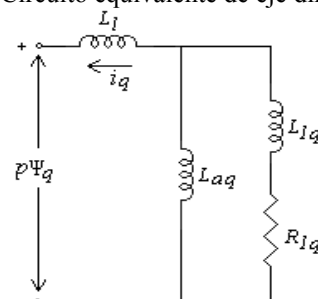


Fig. 1b: Circuito equivalente del eje de cuadratura.

### 3. Definiciones

Las definiciones que se mencionan a continuación son importantes cuando se trabaja la respuesta a la frecuencia de las máquinas síncronas. Las convenciones en el eje  $d$  se muestran en la figura 1a; las del eje  $q$  se muestran en la figura 1b [4].

$L_d(s)$  **Inductancia operacional del eje directo:** es la razón de la transformada de Laplace de los enlaces de flujo de la armadura en el eje directo con respecto a la transformada de Laplace de la corriente del eje directo, con el campo en cortocircuito.

$L_q(s)$  **Inductancia operacional del eje en cuadratura:** es la razón de la transformada de Laplace de los enlaces de flujo de la armadura en el eje en cuadratura con respecto a la transformada de Laplace de la corriente en el eje en cuadratura.

$G(s)$  **Función de transferencia de la armadura con respecto al campo:** es la razón de la transformada de Laplace de los enlaces de flujo de la armadura en el eje directo con respecto a la transformada de Laplace del voltaje de campo, con la armadura en circuito abierto.

### 4. Medición de parámetros con el rotor en reposo

#### A. General.

Las cantidades arriba mencionadas pueden ser obtenidas de otros parámetros medidos con la máquina fuera de servicio. Los tres parámetros principales mencionados a continuación relacionan entre sí las tres definiciones previamente listadas [2,5].

La impedancia operacional en el eje directo ( $Z_d(s)$ ) es igual a  $R_a + sL_d(s)$ , donde  $R_a$  es la resistencia relevante de armadura por fase. Este valor es obtenido en el límite de baja frecuencia como se verá en la sección de resultados, su contribución a la impedancia total es solo significativa a bajas frecuencias.

$$Z_d(s) = -\frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta e_{fd}=0} \quad (1)$$

La impedancia operacional del eje de cuadratura ( $Z_q(s)$ ) es igual a  $R_a + sL_q(s)$ , donde  $R_a$  es la resistencia de corriente directa de armadura por fase.

$$Z_q(s) = -\frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} \quad (2)$$

Las dos cantidades antes mencionadas son las impedancias en el punto de conducción de la armadura. Una tercer cantidad esta dada por la siguiente relación:

$$G(s) = -\frac{\Delta e_d(s)}{s\Delta e_{fd}(s)} \Big|_{\Delta i_d=0} \quad (3)$$

Un método alternativo para medir este parámetro es el siguiente:

$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta e_{fd}=0} \quad (4)$$

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

La cuarta medición de parámetros a máquina parada es la impedancia de transferencia entre la armadura y el campo:

$$Z_{af0}(s) = -\frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta i_{fd}=0} \quad (5)$$

#### B. Condiciones de la máquina para pruebas de respuesta a la frecuencia con máquina parada.

La máquina debe desconectarse eléctrica y mecánicamente, y debe estar aislada eléctricamente. El transformador debe estar desconectado de las terminales de la armadura y cualquier devanado de armadura que este aterrizado debe desconectarse. Además, todas las conexiones en las terminales del campo deben ser desconectadas y debe ser posible cambiar el rotor de la máquina a una posición exacta previo a la prueba [5].

#### C. Mediciones requeridas.

Las magnitudes y la fase de las cantidades deseadas,

$$Z_d(s), Z_q(s), \text{ y } \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)}$$

son medidas sobre un rango de frecuencias. La frecuencia mínima ( $f_{\min}$ ) debe ser al menos del orden menor que la magnitud correspondiente a la constante de tiempo transitoria de circuito abierto del generador, que es:

$$f_{\min} \approx \frac{0.016}{T'_{do}} \quad (6)$$

La frecuencia máxima para la prueba debe ser algo más grande que un par de veces la frecuencia nominal del generador que esta a prueba, tal vez 200 Hz para una máquina de 60 Hz. Aproximadamente 10 puntos de prueba, espaciados logarítmicamente, por década de frecuencia, es una densidad de medidas satisfactoria [5].

La inductancia mutua entre los devanados de la armadura y el campo,  $L_{afd}$ , también será medida, donde:

$$L_{afd} = \lim \left[ \left( \frac{1}{s} \right) Z_{af0}(s) \right] \quad (7)$$

#### D. Conexiones e instrumentación.

Las mediciones deberán ser hechas con instrumentos funcionalmente equivalentes a un analizador de funciones de transferencia, ó analizador de señales digitales. Tales instrumentos miden las magnitudes y los ángulos de fase

relativos de dos señales y extraen solamente la componente fundamental de cualquier forma de onda distorsionada [2,3,5].

El equipo utilizado para la elaboración de estas pruebas fue el siguiente:

Generador  
 ALTERNADOR EDUCACIONAL.  
 Marca General Electric  
 Tipo AHI  
 Volts 110/220                      Amps 26.3/13.5  
 Hz 50/60                              Fases 3 ó 6  
 RPM 1000/1200  
 Excitación CC  
 Volts 125                              Amps 3.3

Fuente regulada de potencia  
 POWER SYSTEM SIMULATOR  
 Marca doble  
 Modelo f2251

Analizador de señales  
 DYNAMIC SIGNAL ANALYZER  
 Marca HEWLETT PACKARD (hp)  
 Modelo 35665A

Resistencia de medición (2 pzas.)  
 Marca AVC  
 4mΩ

*E. Ajustes de pruebas típicas.*

El amplificador de potencia debe crear niveles de señales voltaje y corriente fácilmente medibles para los devanados de armadura y de campo. Las pruebas de corriente deberán ser suficientemente pequeñas para evitar cambios de temperatura en la armadura, campo o circuitos de amortiguamiento durante la prueba. Los voltajes en las terminales de los devanados de armadura y de campo no deberán exceder los niveles de voltaje nominales.

Se deben observar las precauciones normales para evitar entradas y salidas de sobrecarga en los instrumentos. La impedancia medida en las terminales de la armadura en frecuencias muy bajas serán aproximadamente dos veces la resistencia de fase de la armadura. La impedancia máxima medida será aproximadamente  $2(R_2 + j\omega L_2)$ , donde  $R_2$  y  $L_2$  son la resistencia y la inductancia de secuencia negativa, y  $\omega$  es la frecuencia angular más alta usada para la prueba. Ambos, el amplificador de potencia y los instrumentos de medición, deberán ser los adecuados conforme a este rango de impedancias [5].

*F. Pruebas para posicionar el rotor en el eje d.*

Temporalmente se conecta el amplificador de potencia como se muestra en la figura 3. Se ajusta el amplificador con aproximadamente 100 Hz, y se mide el voltaje de campo inducido con un osciloscopio, dando vuelta la rotor del generador lentamente hasta que voltaje de campo inducido observado en el osciloscopio sea nulo (aproximadamente cero) [2, 3, 5].

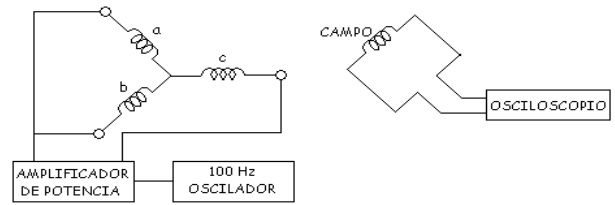


Fig. 2: Posicionamiento del rotor para pruebas de eje directo.

*G. Pruebas para posicionar el rotor en el eje q.*

Se conecta el amplificador de potencia entre las fases *a* y *b* como se muestra en la figura 3 para las mediciones de eje directo, se retira la resistencia de medición de corriente de campo y ajustamos las frecuencia del oscilador a aproximadamente 100 Hz. Observar el voltaje de campo inducido en un osciloscopio y girar el rotor del generador suavemente hasta que se logre un voltaje inducido de campo nulo (cero). El rotor esta ahora posicionado para ejecutar las pruebas del eje de cuadratura.

*H. Precisión de las mediciones.*

Mediciones de corriente en la resistencia de medición son utilizadas para medir la corriente de prueba suministrada al devanado de armadura, y la corriente de campo inducida. Los valores nominales de la resistencia de medición deberán coincidir con las corrientes mínima y máxima que aparezcan en los devanados respectivos [2,3,5].

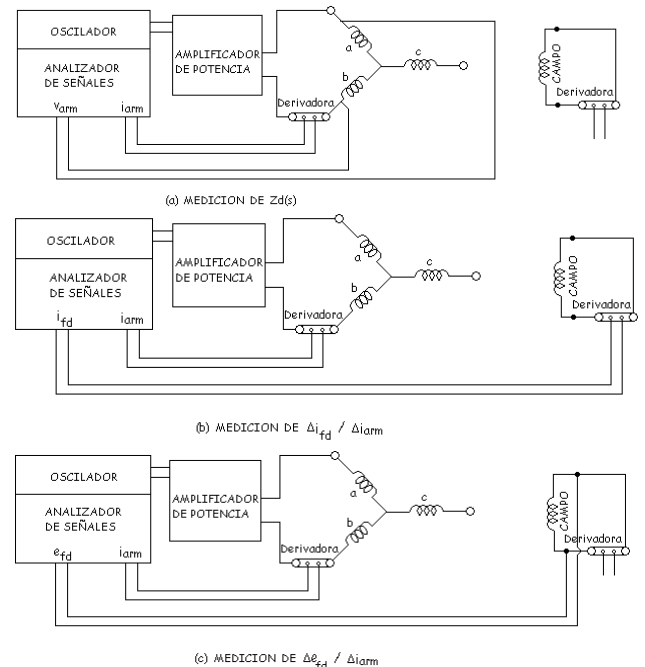


Fig. 3: Diagramas de prueba para mediciones de eje directo.

*I. Seguridad de la máquina.*

Debe tomarse en cuenta que durante las pruebas de respuesta en función de la frecuencia a máquina parada, la

capacidad del generador será reducida con respecto a su capacidad en condiciones normales de operación. Por lo tanto, los niveles de prueba de corrientes y voltajes deben mantenerse en niveles suficientemente bajos para evitar cualquier posible daño de cualquiera de los componentes estator o rotor.

## 5. Resultados

### A. Pruebas de eje directo.

Las mediciones hechas a la máquina síncrona de 5 KVA de Laboratorio serán utilizadas para ilustrar un análisis típico de los datos de prueba. La siguiente información está disponible de las pruebas a rotor parado: la magnitud y fase ó las partes real e imaginaria de  $Z_d(s)$ ,  $Z_q(s)$ ,  $\Delta V_{fd}/\Delta I_d$  y  $\Delta I_{fd}/\Delta I_d$  en varios puntos entre 0.001 Hz y 1 KHz, más los valores de  $L_{afd}$  en densidades altas y bajas.

$L_d(s)$ . Referente a la figura 3(a), se conecta la salida del amplificador de potencia a las terminales  $a$  y  $b$  del devanado de armadura a través de la resistencia de medición. Con el devanado de campo cortocircuitado a través de una resistencia de medición no inductiva, se conectan las señales que conducen  $v_{arm}$  e  $i_{arm}$  al instrumento de medición tal que las cantidades medidas sean  $Z_{arm}(s) = \Delta v_{arm}(s)/\Delta i_{arm}(s)$ . Al realizar esta prueba da como resultado un conjunto de puntos los cuales se muestran en la figura 4.

Calculando la inductancia operacional en Henrys:

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (8)$$

donde  $Z_d(s) = \frac{1}{2} Z_{arm}(s)$

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

y  $s = j\omega$

Esto da como resultado un conjunto de puntos que se muestran en la figura 5, y completa la prueba para la inductancia operacional de eje directo.

$sG(s)$ . Ahora se conecta el instrumento a las señales de  $i_{fd}$  y  $v_{arm}$ , figura 3(b), y se mide la función de transferencia  $\Delta i_{fd}(s)/\Delta i_{arm}(s)$  sobre el rango de frecuencia requerido. Entonces, se calcula:

$$\frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{\sqrt{3}\Delta i_{fd}(s)}{2\Delta i_{arm}(s)} \quad (9)$$

lo cual conduce a la gráfica que se muestra en la figura 6.

$Z_{af0}(s)$ . Finalmente, abriendo el devanado de campo quitando la resistencia de medición de corriente en el campo y conectando la señal que conduce a

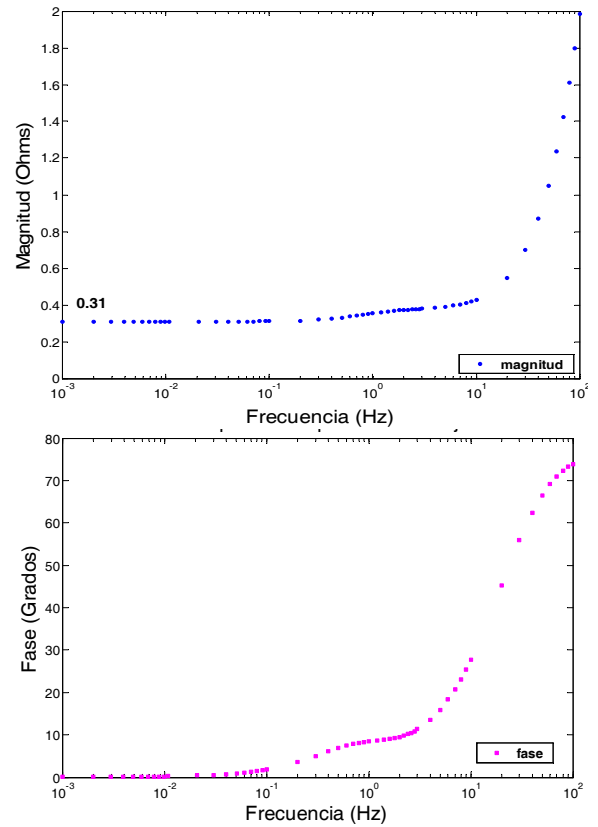


Fig. 4: Magnitud y fase de la impedancia operacional de eje directo.

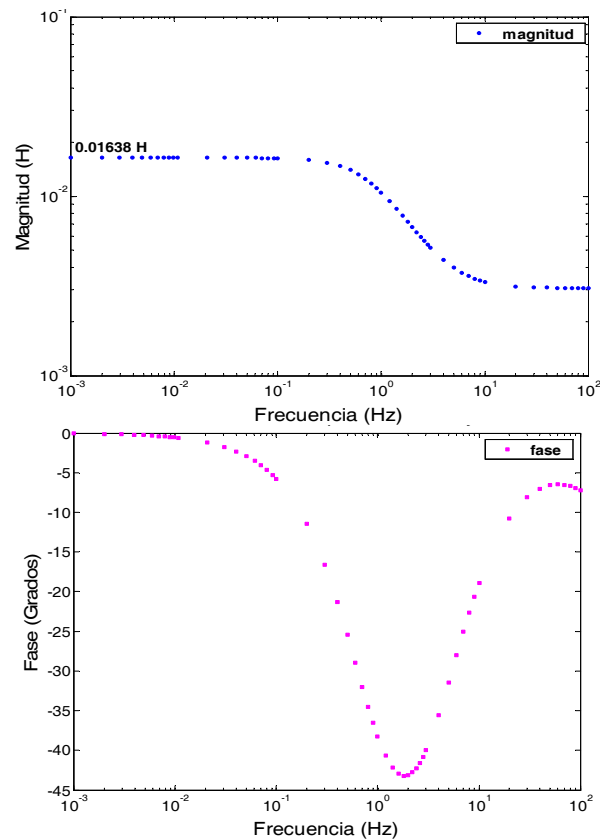


Fig. 5: Magnitud y fase de la inductancia operacional de eje directo.

$i_{fd}$  e  $i_{arm}$  al instrumento de medición, figura 3(c). Se realizan mediciones de  $\Delta e_{fd} / \Delta i_{arm}$  en el número de frecuencias necesarias, y se calcula:

$$Z_{af0}(s) = \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_{arm}(s)} \right) \quad (10)$$

La prueba anterior conduce a los puntos graficados en la figura 7. Esto completa las pruebas de eje directo.

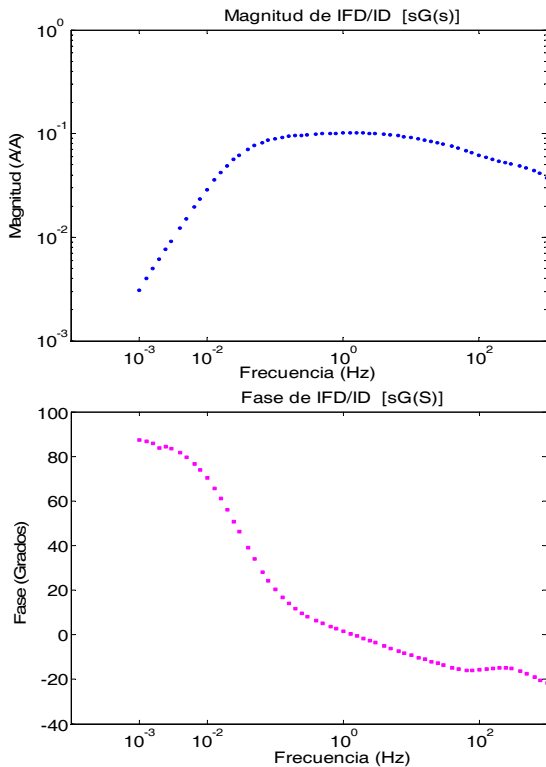


Fig. 6: Magnitud y fase de la función de transferencia Ifd/Id [sG(s)]

### B. Pruebas de Eje de Cuadratura.

Se conectan las señales que conducen  $v_{arm}$  e  $i_{arm}$  al instrumento de medición tal que las cantidades medidas sea  $Z_{arm}(s) = \Delta v_{arm}(s) / \Delta i_{arm}(s)$ , como fue hecho en el eje directo, figura 3(a). Se mide  $Z_{armq}(s)$  sobre el rango completo de frecuencias y se calcula:

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \quad \text{henrys} \quad (11)$$

donde

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

y

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

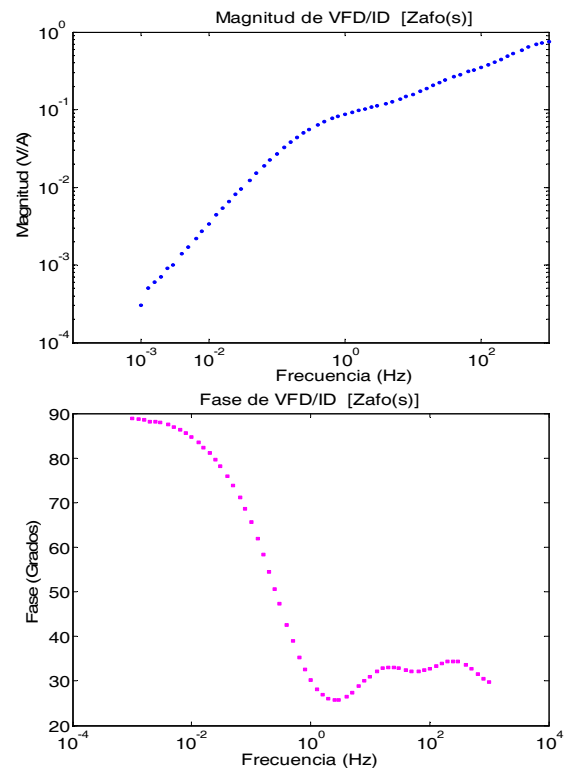


Fig. 7 Magnitud y fase de la función de transferencia Vfd/Id [Zafo(s)]

Observar que  $R_a$ , la resistencia de corriente directa de una fase del devanado de armadura, debería ser normalmente la misma que la obtenida durante las pruebas de eje directo. Sin embargo, por la sensibilidad de los resultados de este valor, esta debería ser obtenida de nuevo usando los datos del eje  $q$  y las técnicas descritas en la sección de procedimiento de la prueba en caso de cambio en la temperatura del devanado se ha alterado su valor desde las pruebas del eje  $d$ . Los resultados graficados para  $Z_q(s)$  y  $L_q(s)$  se muestran en las figuras 8 y 9.

## 6. Procedimiento de ajuste de curvas

Los valores numéricos para los parámetros del circuito equivalente se obtienen a partir de los resultados de las pruebas de respuesta a la frecuencia mediante técnicas de ajuste de curvas aplicables a funciones no lineales (también conocidas como análisis de regresión no lineal).

Los programas de computadora adecuados para esta aplicación normalmente tienen dos formas. En la primera forma el usuario debe calcular solo los valores de una variable dependiente específica -  $L_d(s)$ , por ejemplo - para cualquier conjunto de parámetros desconocidos [3]. Los parámetros desconocidos pueden ser cualquiera de las constantes que aparecen en la forma operacional para la variable dependiente; por ejemplo,

$$L_d(s) = \frac{L_d(0)(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} \quad (12)$$

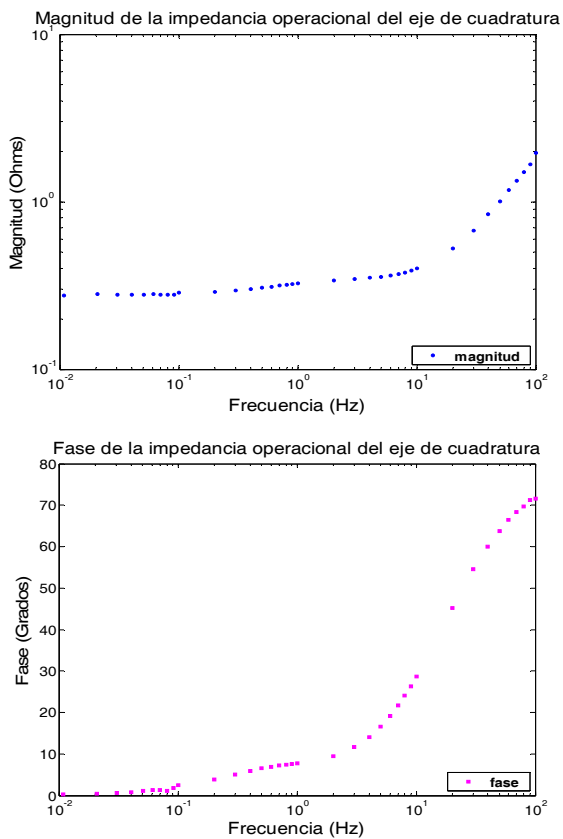


Fig. 8: Magnitud y fase de la impedancia operacional del eje de cuadratura.

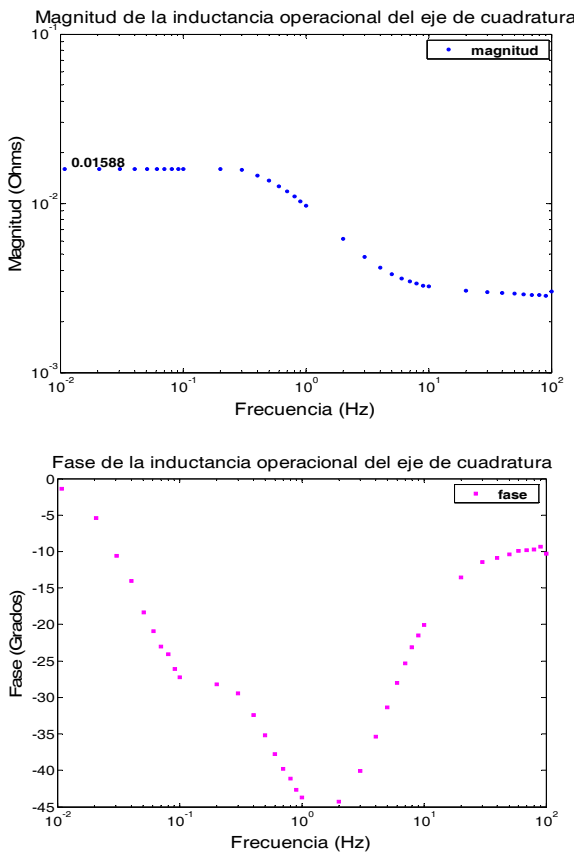


Fig. 9: Magnitud y fase de la inductancia operacional del eje de cuadratura.

para el eje directo, ó los elementos de circuito equivalente actual (ver figura 1.a). La segunda forma requiere calcular tanto la derivada parcial de la variable dependiente con respecto a cada uno de los parámetros desconocidos como el valor desconocido de la variable independiente. Cualquiera de estas técnicas puede ser utilizada para ajustar las curvas de las funciones de transferencia de los ejes directo y de cuadratura.

En este trabajo se utilizó un programa de regresión no lineal que calcula el valor de los parámetros dinámicos en términos de las reactancias y constantes de tiempo escrito en [8]. La estructura general de este programa se muestra en el diagrama de flujo presentado en el Apéndice.

Se consideraron dos modelos principales de la máquina síncrona:

- El modelo estándar, el cual considera que la inductancia periférica  $L_{pl}$  (que representa la inductancia mutua entre el devanado de campo y el devanado amortiguador) en el circuito equivalente del eje directo es nula.
- El modelo SSFR que obtiene un valor diferente de cero para la inductancia periférica.

El programa de computadora obtuvo los valores de los parámetros de ambos modelos utilizando los datos obtenidos en las pruebas de respuesta a la frecuencia descritas anteriormente. Como referencia, se comparan los valores de estos parámetros con los parámetros que se obtuvieron utilizando la prueba convencional de corto circuito [9]. La comparación de los valores obtenidos se hace en la Tabla 1

Tabla 1.: Comparación de los parámetros obtenidos utilizando el método convencional (Modelo 1 estándar) y el método de respuesta a la frecuencia (Modelos 2 SSFR y 3 estándar).

Reactancias y Constantes de Tiempo			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
$L'_d$	0.291	0.5512	0.2341
$L''_d$	0.262	0.3494	0.15812
$L'_q$	0.277	0.436	0.4934
$T'_{do}$	67.01 ms	156.8034 ms	156.8034 ms
$T''_{do}$	0.11 ms	0.2057 ms	0.2057 ms
$T'_d$	10.77 ms	28.94 ms	28.94 ms
$T''_d$	0.099 ms	0.116 ms	0.116 ms
$T'_{go}$	0.41 ms	16.1376 ms	16.1376 ms
$T''_q$	0.1 ms	5.68 ms	5.68 ms
Parámetros del circuito equivalente			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
$L_d$	1.80	1.2762	1.2762
$L_q$	1.137	1.2372	1.2372
$L_{ad}$	1.620	1.1486	1.1486
$L_{aq}$	0.957	1.11	1.11
$L_l$	0.180	0.12762	0.12762
$L_{fd}$	0.1172	0.5868	0.1191
$R_{fd}$	25.924	14.024	8.085
$L_{pl}$		0.08423	
$L_{ld}$	0.3037	0.1733	0.0055
$R_{ld}$	3,754.54	2,775.25	551.77
$L_{lq}$	0.10834	0.4267	0.4934
$R_{lq}$	2,598.40	95.225	107.24

En la Tabla 1 los modelos 1 y 3 corresponden al modelo estándar, mientras que el modelo 2 es representado por un modelo SSFR.

En la tabla 1 se puede observar que la máquina síncrona que fue utilizada es una máquina convencional de baja capacidad, ya que sus constantes de tiempo subtransitorias son muy pequeñas.

## Conclusiones.

Las pruebas precedentes han sido ejecutadas con el devanado de campo alineado de una manera particular para las pruebas de eje directo o para el eje de cuadratura. Es importante decir que estos datos son solo una etapa intermedia en el proceso de encontrar el modelo global, el cual debe ser completado mediante el cálculo de los parámetros dinámicos utilizando algún método matemático, como en este caso se empleó la regresión no lineal.

También, es interesante ver como este tipo de pruebas experimentales parámetros eléctricos de los circuitos equivalentes mediante constantes de tiempo en ambos ejes directo y de cuadratura utilizando un ajuste de curva adecuado.

Además, se obtuvieron los parámetros dinámicos de dos modelos de la máquina síncrona: el estándar (en el que la inductancia periférica  $L_{pl}$  es considerada nula) y el modelo SSFR (identificado como Modelo 2 en la Tabla 1).

Los parámetros dinámicos se obtienen en términos de reactancias y constantes de tiempo (sistema no recíproco en por unidad) y en términos de los elementos de los circuitos equivalentes (sistema recíproco). Los parámetros obtenidos mediante la prueba de respuesta a la frecuencia se compararon con los obtenidos utilizando la prueba convencional en el tiempo, en la que se aplica un corto circuito trifásico en las terminales del generador, funcionando en vacío.

Se espera continuar con este trabajo utilizando ya sea una máquina real de gran capacidad o una micromáquina para mejorar los resultados experimentales.

## Referencias

- [1] ANSI / IEEE Std 115 – 1983, IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines.
- [2] Coulters, M.E.; Watson Wilfred, “Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981, Ontario Hydro Research Division, Toronto, Ontario, Canada
- [3] “Determination of Synchronous Machine Stability Study Constants”, EPRI Report EL 1424: Vol 1, Sep 1980, Westinghouse Electric Corporation and Vol 2, Dec 1980, Ontario Hydro (two of four reports on EPRI Project 997).
- [4] IEEE Joint Working Group on Determination of Synchronous Machine Stability Constants-Supplementary

Definitions and Associated Test Methods for Obtaining Parameters for Synchronous Machine Stability Study Simulations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, Jul/Aug 1980, pp 1625-1633.

[5] IEEE Std 115A-1987: “IEEE Standard Procedures for Obtaining Synchronous Machine Parameters by Standstill Frequency Response Testing (Supplement to ANSI/IEEE Std 115-1983, IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines).

[6] Canay, I.M. “Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagrams of the Synchronous Machine”, IEEE Trans PAS-88.

[7] Sen, S. K. and Adkins, B. “The Application of the Frequency Response Method to Electrical Machines”, Proc IEE, 103C, 1956, p. 378.

[8] S. Campos (2005). “Determinación de los Parámetros Eléctricos de las Máquinas Síncronas en Función de la Frecuencia” Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-IPN, México D. F., México.

[9] D. Ruiz (1996). “Efecto de los Modelos de Motores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia”. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-IPN, México D. F., México

## Autores.



**Campos Hernández Salvador.** Nació en Cabinda, Michoacán México. Es egresado del Instituto Tecnológico de Morelia como Ingeniero Industrial en Ingeniería Eléctrica en 1988. Actualmente esta inscrito en el programa de posgrado en la sección de graduados de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, SEPI-ESIME-IPN, Unidad Zacatenco, México.



**Asiaín Olivares Tomás Ignacio.** Ingeniero Electricista egresado de la ESIME-IPN. Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Sección de Graduados e Investigación de la ESIME-IPN (1991). Actualmente labora como profesor investigador de tiempo completo y exclusivo en la SEPI-ESIME-IPN en el grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos en Redes Interconectadas y Máquinas Eléctricas.



**Daniel Ruiz Vega.** Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana, México en 1989. Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-IPN, México en 1996. Doctor en Ciencias Aplicadas de la Universidad de Lieja, Bélgica en el 2002. Actualmente labora como profesor investigador de tiempo completo y exclusivo en la SEPI-ESIME-IPN en el grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos en Redes Interconectadas y Máquinas Eléctricas.

## Apéndice

El procedimiento general que lleva a cabo el programa de regression no lineal empleado para obtener los parámetros de la máquina síncrona a partir de los datos de la prueba de respuesta a la frecuencia a rotor parado se presenta en el diagrama de flujo de la figura A. Este programa fue escrito en la tesis por el primer autor [8].

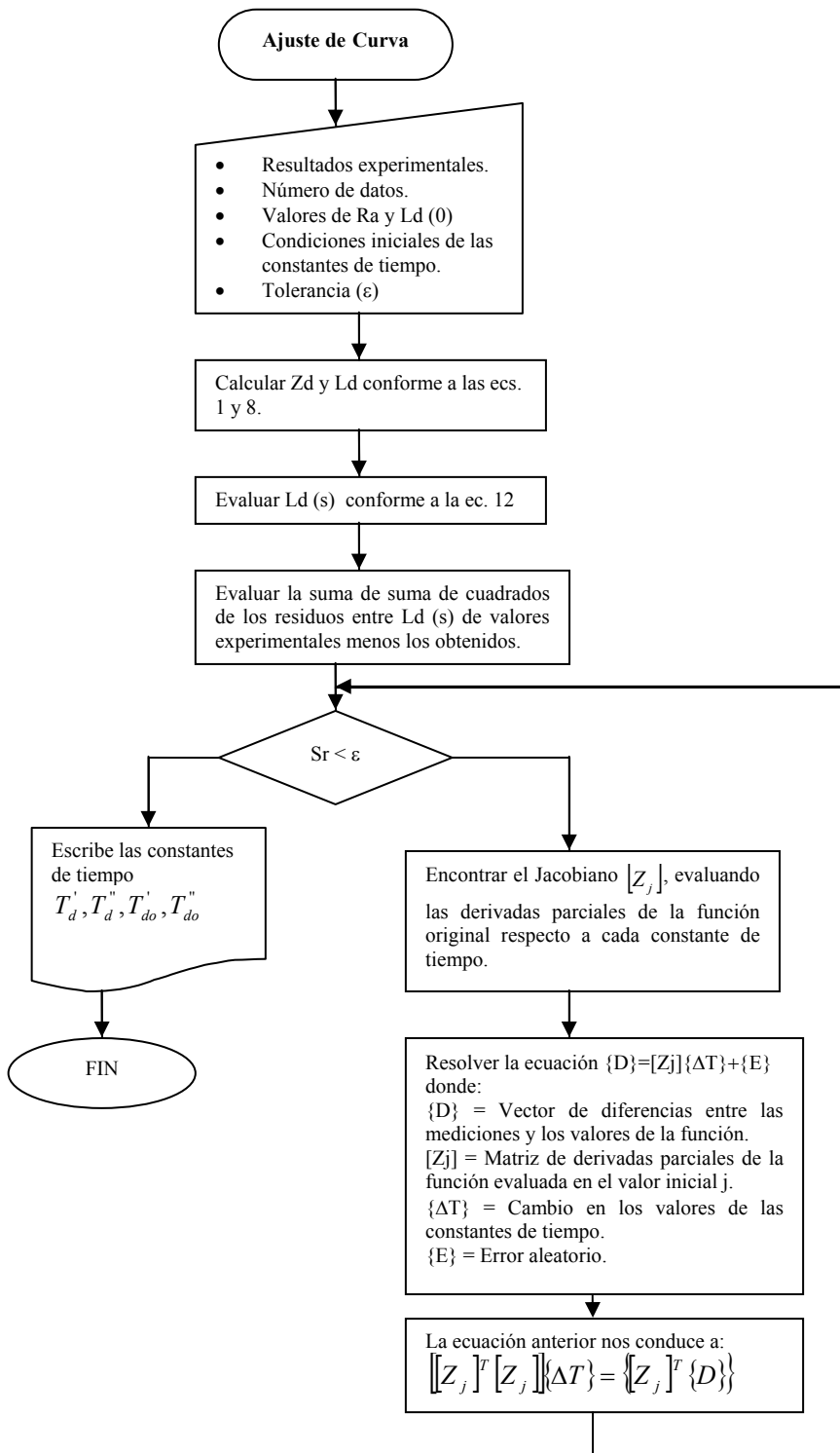


Figura A: Diagrama de flujo del programa de regresión no lineal