

# Metodologías utilizadas en la determinación de los parámetros de la máquina síncrona: una aplicación en línea

Used Methodologies for Synchronous Machine Parameter Identification: An Online Application

ANA MARÍA PÉREZ LONDOÑO

Tecnóloga en Electricidad e Ingeniera Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

anaperez@ohm.utp.edu.co

YIMY ALEXANDER ROMERO RAMÍREZ

Tecnólogo en Electricidad e Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

jarr5@utp.edu.co

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera electricista y M.Sc de la Universidad Tecnológica de Pereira. Docente Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

saperez@utp.edu.co

Fecha de recepción: 14 de septiembre de 2007

Clasificación del artículo: reflexión

Fecha de aceptación: 4 de abril de 2008

**Palabras clave:** máquina síncrona, modelado, identificación de parámetros, sistema de identificación.

**Key words:** synchronous machine, modeling, parameter identification, identification system.

## RESUMEN

Ante la necesidad de emular el comportamiento de la máquina síncrona mediante modelos matemáticos se han utilizado metodologías clásicas que permiten determinar su comportamiento en estado estable y transitorio. A medida que se han propuesto nuevas técnicas que involucran algoritmos con metodologías adaptativas, de inteligencia artificial, entre otros, surge la posibilidad de obtener modelos

más precisos y confiables para un medio cambiante como el de un sistema eléctrico de potencia.

En este artículo se reseña brevemente algunos de los trabajos más representativos, en cuanto a la determinación de los parámetros de la máquina síncrona. Adicionalmente, se presentan los resultados de una implementación realizada en línea sobre una micro máquina en el laboratorio.

## ABSTRACT

Due to necessity to emulate the synchronous machine behavior by using mathematical models, it has used classical methodologies, especially useful for modeling under steady stable and transient conditions. However, new techniques which involve adaptive methodology algorithms, artificial intelligence, among others, it have been proposed to obtain better and reliable synchronous machine

models to adequately work in a dynamic electric power system. In this paper it was showed, a brief summary which contain some of the most representative approaches in the synchronous machine parameter identification. So it is showed the results of a proposed approach for parameter identification, tested in a micro machine, which laboratories are also analyzed.

\* \* \*

## 1. Nomenclatura

La nomenclatura fundamental de este artículo se presenta a continuación.

$D$	Ángulo de par	$R_e, R_e$	Reactancias síncronas de ejes directo y en cuadratura
$\delta_0, D$	Velocidad síncrona y velocidad del rotor	$x'_d$	Reactancia transitoria de eje directo
$D, D$	Constante de inercia y factor de amortiguamiento	$R_e, R_e$	Resistencia y reactancia de la línea de transmisión
$R_e$	Torque mecánico de entrada	$R_e$	Potencia activa trifásica del generador
$x'_d$	Voltaje transitorio terminal en estado estable	$R_e$	Voltaje terminal
$jX_e$	Voltaje de campo en estado estable	$\delta_0$	Voltaje del barraje infinito
$D$	Frecuencia normalizada	$\varphi$	Ángulo de factor de potencia
$T'_{d0}$	Constante de tiempo transitoria de eje directo	$\theta_e$	Ángulo de voltaje terminal
$R_e, R_e$	Corrientes de ejes directo y en cuadratura	$R_e, R_e$	Voltajes de ejes directo y en cuadratura

## 2. Introducción

La utilidad de desarrollar modelos matemáticos de la máquina síncrona, a fin de estudiar su comportamiento eléctrico, magnético y mecánico, en un sistema de potencia está plenamente demostrada, por sus beneficios en el control del sistema de potencia [1]. Los parámetros presentes en estos modelos pueden ser determinados mediante mediciones directas, resultados de los ensayos, análisis, técnicas de estimación o combinación de estas técnicas.

Los parámetros que se determinan en una máquina síncrona dependen del tipo de estudio a realizar (estado estable, transitorio o subtransitorio), y del orden del modelo utilizado (primero, segundo, tercero, quinto y séptimo han sido los utilizados en la literatura) [2]. Es claro que entre mayor sea el orden del modelo, mejores serán los resultados obtenidos al utilizar dicho modelo, pero también mayor la complejidad de los cálculos relacionados con su determinación, debido a la no linealidad del sistema.

La determinación de los parámetros ha sido un tema de interés desde el siglo pasado, que ha motivado a los investigadores a plantear diversas metodologías que van desde las mediciones de variables eléctricas sobre la máquina aislada del sistema, pasando por ensayos que requieren equipos especiales, hasta la utilización de metodologías inteligentes como redes neuronales, algoritmos genéticos, entre otros [4].

En este documento se presenta una breve revisión del estado del arte, con un especial énfasis en las metodologías que utilizan mediciones en línea para la determinación de los parámetros. Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos al utilizar una de estas metodologías en línea sobre una micromáquina síncrona de laboratorio.

### 3. Modelamiento de la máquina síncrona

Debido a la forma de construcción de la máquina, con una estructura conocida como estator de devanados distribuidos, y una estructura móvil denominada rotor, en el cual se albergan los devanados de campo y de amortiguamiento, es necesario definir un sistema de referencia común a ambos. Esta referenciación se realiza en el modelo de Park [5]; las ecuaciones de Park transforman las variables del estator trifásico en un nuevo marco de referencia que se mueve con el rotor. Las nuevas variables son expresadas en términos de los ejes directo  $d$  y en cuadratura  $q$ . La teoría clásica de la máquina síncrona utiliza esta transformación para derivar los circuitos equivalentes y sus correspondientes parámetros.

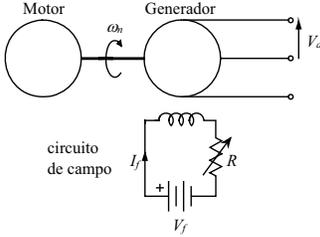
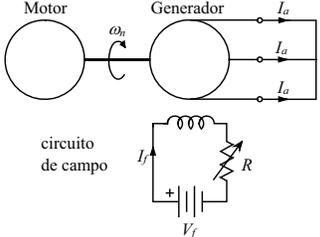
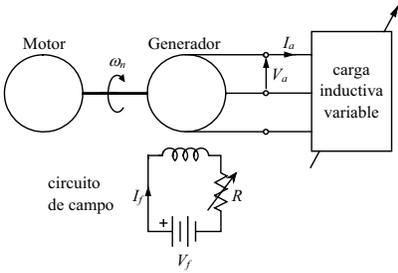
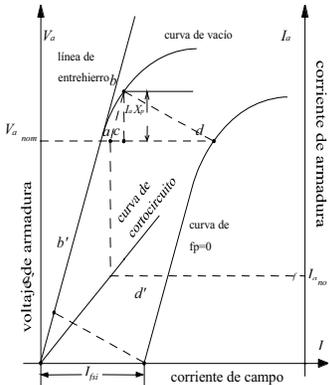
Generalmente los modelos de la máquina están en función de las resistencias de armadura, campo y devanados amortiguadores, de las reactancias de estado permanente  $X$ , transitorias  $X'$  y subtransitorias  $X''$ , según los ejes  $d$  y  $q$  de la máquina, y las constantes de tiempo de circuito abierto y de cortocircuito, transientes y subtransientes que corresponden a estos ejes, además de las variables mecánicas como el coeficiente de inercia  $H$  y factor de amortiguamiento  $D$  [6].

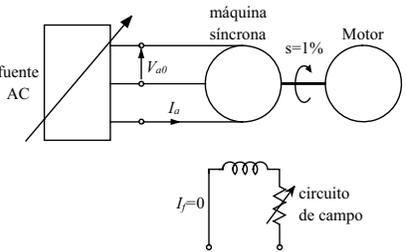
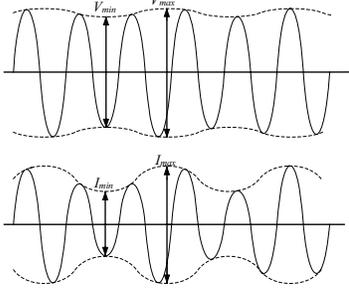
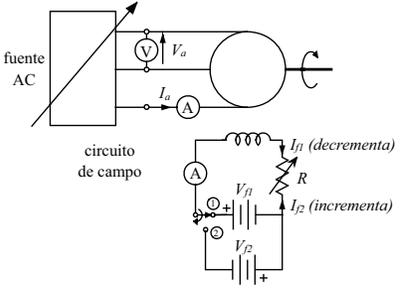
Tradicionalmente los parámetros del generador síncrono han sido datos que el fabricante especifica y que pueden ser verificados mediante pruebas convencionales realizadas fuera de línea, las cuales se pueden definir como clásicas y están especificadas en el estándar IEEE115 [1]. En muchos casos este tipo de ensayos resultan poco prácticos, debido a que los datos determinados de esta forma sólo tienen validez para una determinada condición de operación, y al ser implementados se necesita la desconexión de la máquina de la red lo cual no es posible en todo momento, ya que implicaría la no continuidad del suministro eléctrico y además en algunos casos se puede incurrir en costos elevados debido a la utilización de equipo especializado [7]. Alternativamente existen métodos de identificación en línea que son más atractivos de implementar, debido a la mínima interferencia en la operación normal del generador [3, 6, y 8]. A continuación se presenta una breve revisión del grupo de metodologías clásicas, y las más recientes utilizadas en línea.

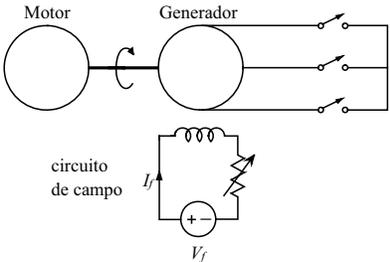
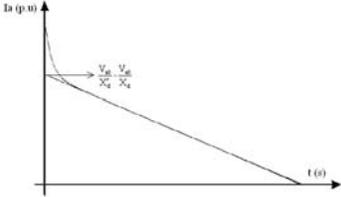
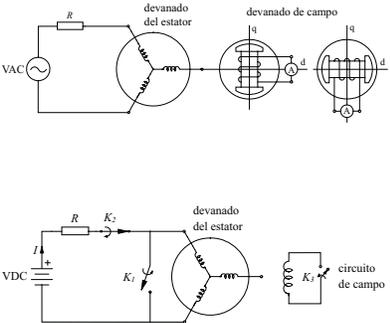
### 4. Revisión de algunas metodologías utilizadas en la determinación de los parámetros en un generador

#### 4.1 Metodologías fuera de línea

Entre las metodologías utilizadas para determinar los parámetros de la máquina, se encuentran aquellas que requieren la desconexión de la máquina del sistema al cual se encuentra interconectado, denominadas como fuera de línea. Generalmente entre sus desventajas se encuentra la indisponibilidad del servicio, debido a la detención de la máquina y los costos asociados a los equipos especializados que se requieren. Entre ellas se encuentran el ensayo de circuito abierto, ensayo de cortocircuito, rechazo de carga, método de deslizamiento, entre otros [1 y 19]. En la tabla 1 se presentan los aspectos más representativos de cada ensayo. La nomenclatura usada en el documento se presenta en el anexo 1.

Ensayo	Procedimiento	Montaje	Resultado
<p><b>Circuito abierto [1]</b></p>	<p>El generador se deja en vacío y se pone a girar a la velocidad nominal. Se incrementa gradual y progresivamente la corriente de campo hasta llegar al 120% del voltaje nominal terminal.</p>		<p>Con la información recopilada se construye la característica de saturación en vacío, así como lo ilustra la figura.</p> 
<p><b>Ensayo de cortocircuito [1]</b></p>	<p>La máquina gira a velocidad nominal, con los terminales del generador cortocircuitados. Se incrementa gradual y progresivamente la corriente de campo</p>		<p>Nota: de las curvas de vacío y cortocircuito se obtiene la reactancia síncrona saturada de eje directo <math>X_{ds}</math> y la reactancia síncrona no saturada de eje directo <math>X_d</math>.</p> 
<p><b>Prueba de factor de potencia cero [1]</b></p>	<p>Se realiza con la máquina operando como generador, con una carga inductiva conectada en sus terminales y girando a velocidad nominal. Se toman lecturas de corriente de campo y voltaje de armadura, incrementados de forma gradual con el reóstato, y a la vez manteniendo constante la corriente de armadura al valor nominal controlando la carga inductiva.</p>		<p>Se determina la reactancia de Potier</p> 

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ensayo a bajo deslizamiento [1]</p>	<p>La máquina es alimentada por una fuente trifásica balanceada a voltaje reducido, con el circuito de campo abierto. La velocidad de rotación debe ser ligeramente menor al valor nominal</p> <p>El voltaje y la corriente de armadura son medidos con un osciloscopio observando las variaciones de amplitud.</p>		<p>Se hallan las reactancias de eje directo <math>X_d</math> y eje en cuadratura <math>X_q</math>.</p> 
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ensayo de excitación negativa [1]</p>	<p>Se opera la máquina como motor y sin carga.</p> <p>El voltaje de prueba aplicado en el estator no debe superar el 75% del voltaje nominal. Inicialmente se aplica una fuente DC con la polaridad indicada y se reduce la corriente de campo hasta llegar a cero. Luego se invierte la polaridad del voltaje de campo y la corriente de campo se incrementa gradualmente, hasta que la máquina se inestabilice.</p>		<p>Se determina la reactancia de eje en cuadratura <math>X_q</math></p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ensayo bajo carga [1], [9]</p>	<p>Para realizar esta prueba la máquina debe estar conectada a la red y debe tener una carga al menos igual a la mitad de la potencia</p>	$X_q = \frac{V_a \tan \delta}{\sqrt{3} I_a (\cos \varphi - \sin \varphi \tan \delta)}$ <p>Donde <math>\delta</math> es el ángulo del par, <math>V_a</math> el voltaje de la armadura, <math>I_a</math> la corriente de armadura y <math>\varphi</math> el ángulo de...</p>	

<p><b>Ensayo de cortocircuito trifásico súbito [1], [18]</b></p>	<p>La máquina debe operar inicialmente en vacío, girar a la velocidad nominal y el voltaje de excitación debe ser constante durante toda la prueba.</p> <p>Se realiza el cortocircuito trifásico y se observa la forma de onda de las corrientes del estator</p>		 <p>Mediante este ensayo se determinan la reactancias de eje directo (<math>X_d, X_d', X_d''</math>) y las constantes de tiempo de la máquina síncrona (<math>T_d', T_d''</math>)</p>
<p><b>Prueba d.c decay o SSTR (StandStill Time Response) [11], [12], [14],[15], [17]</b></p>	<p>Se determinan inicialmente las posiciones del eje directo y eje en cuadratura. El ensayo se realiza con el rotor fijo en las posiciones d y q, aplicando un voltaje DC a dos devanados del estator. Se abre repentinamente K2 y se cierra k1. Sobre la curva decreciente de corriente que se presenta. Se utilizan técnicas de ajuste de curvas</p>		<p>Reactancias de eje directo <math>X_d</math>, eje en cuadratura <math>X_q</math>, reactancias transitorias <math>X'd, X'q</math>, reactancias subtransitorias <math>X''d, X''q</math> y constantes de tiempo (<math>T_d, T_d', T_d'', T_{d0}, T_{d0}''</math>) de la máquina síncrona.</p>

(Continúa tabla en la pág. siguiente)

4.2 Estimación de parámetros de la máquina síncrona con ensayos fuera de línea

Numerosos investigadores han propuesto y desarrollado diversas metodologías en los últimos cincuenta años, relacionadas con la estimación de los parámetros de la máquina síncrona. Entre ellos se encuentra Keyhani, quien en [21] utilizó los datos entregados por el ensayo SSFR para derivar las funciones de transferencia de los ejes  $d$  y  $q$ , utilizando técnicas de ajuste de curvas. Los parámetros del modelo se calculan de las ecuaciones no lineales, las cuales relacionan los parámetros de la máquina

y las constantes de tiempo correspondientes a las funciones de transferencia.

Uno de los pasos más complejos en la aplicación del ensayo SSFR es el uso de técnicas de ajuste para determinar los parámetros del circuito equivalente coincidentes con la respuesta de frecuencia obtenida. Algunas de las técnicas utilizadas son estimación “maximum likelihood”, usada en [22] para obtener un único conjunto de parámetros, cuando los datos contaminados con ruido causan una múltiple estimación de parámetros. Entre otras técnicas están los procedimientos no iterativos para

<p><b>Ensayo de respuesta en frecuencia SSFR (StandStill Frequency Response) [1], [2], [10], [16]</b></p>	<p>Se determinan las posiciones del eje directo y eje en cuadratura.</p> <p>Para determinar las impedancias operacionales se realizan mediciones para un rango de frecuencias de 0.01Hz hasta una frecuencia mayor o igual al doble de la nominal. La variación se hace mediante un oscilador a baja tensión.</p>		<p>Las impedancias operacionales de eje directo (<math>Z_q(s)</math>), de eje en cuadratura (<math>Z_d(s)</math>) y las constantes de tiempo transitoria y subtransitoria (<math>T'_{d0}, T''_{d0}, T'_d, T''_d, T'_{q0}, T''_{q0}, T'_q</math>) de la máquina síncrona.</p>
<p><b>Rechazo de carga [4], [5], [7]</b></p>	<p>Se debe conocer con anterioridad la posición del rotor en eje directo o eje en cuadratura.</p> <p>Para encontrar los parámetros de eje directo, la máquina debe estar sincronizada con el sistema de potencia para luego sub-excitarla haciendo que absorba una considerable carga reactiva, una vez esté en esta condición, se toman valores de corriente de campo, voltaje en la armadura y corriente de armadura.</p> <p>Para determinar los parámetros de eje en cuadratura se retira la carga del generador lentamente y se toman nuevamente lecturas.</p>	<p><math>(R_c, R_e, R_f, i_{q0}, L'_q, R_c, L'_d, T'_{d0}, T'_{q0}, T''_{q0})</math></p>	

Tabla 1. Metodologías realizadas fuera de línea.

la identificación de parámetros dados en [23], técnicas de síntesis de redes [24], entre otros.

En [28] Keyhani utilizó un escalón de tensión como entrada para determinar los parámetros de la cons-

tante de tiempo adquirida y de los circuitos equivalentes. En [29] Tsai, Keyhani, Demcko y Selin, presentaron la utilización de las redes neuronales artificiales para desarrollar un modelo saturado del generador. Los patrones de entrenamiento fueron

obtenidos de la respuesta en línea a pequeñas perturbaciones y el algoritmo ML. La implementación demostró la capacidad de predecir los cambios no lineales de la máquina, así no hayan sido incluidos en el patrón de entrenamiento. En la estimación de los parámetros también se han utilizado metodologías de mínimos cuadrados como en [30]. Como técnicas alternativas a la implementación de SSFR en [31], los autores propusieron una metodología en la cual se utiliza equipo más simple a través de mediciones en el dominio del tiempo.

#### 4.3 Estimación de parámetros de la máquina síncrona con métodos de identificación en línea

Alternativamente, existen técnicas de identificación en línea que ayudan a determinar los parámetros con beneficios operativos y económicos, ya que no se interrumpe el servicio de generación. En [13] se utiliza una red perceptrón multicapa que permite trabajar con modelos no lineales. Esta red tiene como entrada las variables en línea de corriente y voltaje de eje directo y cuadratura ( $R_e, R_f, R_e$ ), corriente y voltaje de campo ( $R_e, R_e$ ) y ángulo de carga  $D$ , entregando como resultado los valores de los parámetros: resistencias e inductancias de eje directo y de eje en cuadratura ( $L_d, L_q$ ).

La identificación de los parámetros de la máquina síncrona, usando una función de base radial (RBFN), se presenta en [25]; en este artículo se propone un identificador para captar las características de operación no lineal, junto con un algoritmo recursivo usado para actualizar los parámetros de la red. Se utiliza un modelo basado en correlaciones para examinar la validez del identificador propuesto.

En [26] se presenta un método para determinar el ángulo de potencia en máquinas de polos salientes, a partir de mediciones de la tensión en los terminales y la distancia en el entrehierro. En el método la señal del sensor del entrehierro es utilizada para detectar el desplazamiento del rotor referenciado a la componente fundamental de la tensión. Adicionalmente, también se considera la determinación

en línea de las reactancias sincrónicas de los ejes directo y de cuadratura, además de los efectos de saturación.

En [27] se presenta un enfoque orientado hacia el desarrollo de una técnica para la estimación del ángulo y la velocidad del rotor, basado en unidades de medición de fasores y utilizado para aseguramiento en estabilidad transitoria o control en tiempo real.

Las técnicas tradicionales de respuesta en frecuencia presentan grandes inconvenientes al momento de su aplicación, debido a la necesidad de disponer largos periodos de medición antes de obtener los parámetros de la máquina síncrona. Para mejorar esto, en [3] se describe una metodología en línea y en el dominio de la frecuencia, en la cual se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para entregar resultados en corto tiempo. Mediante este procedimiento se encuentran las impedancias operacionales  $R_e$  y  $R_e$ , así como las reactancias  $R_e$  y  $R_e$ .

En la referencia [6] se presenta una metodología para determinar los parámetros físicos ( $R_e, R_e, R_e$  y  $D$ ) de un generador síncrono conectado a un barraje infinito, a través de una línea de transmisión, mediante mediciones en línea de potencia activa, voltaje terminal y de campo, corriente de línea y el ángulo del par. Con dichas lecturas se aplica el algoritmo de mínimos cuadrados recursivos para determinar los coeficientes de las funciones de transferencia del modelo de Heffron-Phillips. Finalmente los parámetros del generador se determinan utilizando el método iterativo de Newton-Raphson. Si se utiliza esta metodología, los autores de este artículo determinaron los parámetros de una micro máquina síncrona en un laboratorio. A continuación se presenta en forma detallada, el modelo utilizado, el procedimiento y los resultados obtenidos.

##### 4.3.1 Identificación de los parámetros para un modelo de Heffron Phillips [6]

Se utiliza el modelo matemático no lineal de un generador que es conectado a un barraje infinito a través de una línea de transmisión, así como se ilustra en la figura 1.

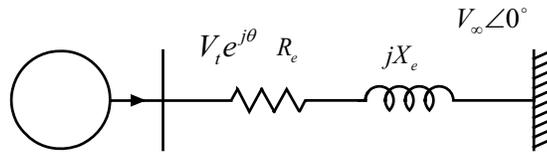


Figura 1. Modelo utilizado.

El modelo no lineal de la máquina se expresa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\delta} = \omega \tag{17}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(T_m - T_e - D \cdot \omega) \tag{18}$$

$$\dot{e}'_t = \frac{1}{T_{e0}}(E_{f0} - e'_t - (x'_d - x'_q) \cdot i'_d) \tag{19}$$

con:  $I_{d0} = \frac{v_d}{K_3}$  ;  $i'_d = \frac{e'_q - v_q}{x'_d}$  ;  $i'_q = \frac{v_d}{x_q}$

En donde  $\omega_0$  es la velocidad angular,  $R_e$  es el torque mecánico de entrada,  $R_e$  es torque electromagnético y  $x'_d$  es el voltaje interno transitorio de eje en cuadratura. La nomenclatura de las demás variables se presenta en el anexo 1.

Este modelo se linealiza alrededor de un punto de operación, como se muestra en las ecuaciones (20) a (22), queda expresado en términos de las constantes ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ ), del modelo de Heffron-Phillips [32] y que están en función de los parámetros físicos del generador y del punto de operación.

$$\nabla \dot{\delta} = \Delta \omega \tag{20}$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{J}(\Delta T_m - K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta e'_t - D \cdot \Delta \omega) \tag{21}$$

$$\Delta \dot{e}'_t = \frac{K_3}{T_f}(\Delta E_{f0} - K_4 \Delta \delta - \Delta e'_t) \tag{22}$$

Posteriormente las ecuaciones (20) – (22), se expresan en un sistema matricial de estado, presentado en (23) y (24), donde se consideran como variables de estado, las variaciones del ángulo del par  $\Delta \delta$ , la

velocidad de la máquina  $\Delta \omega$  y en el voltaje interno transitorio de eje en cuadratura  $\Delta e'_q$ . Como salidas se tienen las variaciones tanto en la potencia eléctrica  $\Delta P_e$  como en el voltaje terminal.

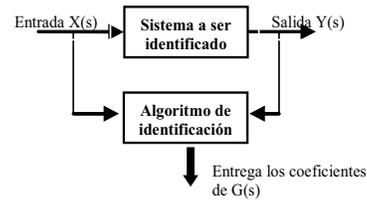
$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_e \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_1}{J} & -\frac{D}{J} & -\frac{K_2}{J} \\ \frac{K_3}{J} & 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_e \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \\ \frac{K_4}{J} & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} \Delta E_{FD} \\ \Delta T_M \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta v_t \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} K_1 & 0 & K_2 \\ K_3 & 0 & K_4 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_e \end{bmatrix} \quad (24)$$

Con este sistema de estados, se determina la matriz  $G(s)$ , dada por  $G(s) = C(sI - A)^{-1}$  y se extraen las funciones de transferencia simbólicas (quedan expresadas en términos de las constantes  $K_1$  a  $K_6$  y los parámetros de la máquina), donde se relaciona a la variación de la potencia eléctrica y el voltaje de campo dada por  $G_{21}(s) = \Delta v_t(s) / \Delta E_{FD}(s)$  y la variación del voltaje terminal con el voltaje de campo dada por  $G_{11}(s) = \Delta P_e(s) / \Delta E_{FD}(s)$ . Es importante aclarar que la variación en el torque mecánico dado por  $\Delta T_M$  se considera nula, sólo se realizarán variaciones en el voltaje. Por esta razón sólo se expresan dos de las cuatro funciones de transferencia.

A fin de disponer de otra herramienta que permita obtener otras relaciones entre las variables anteriormente mencionadas, se recurre a la determinación de las funciones de transferencia numéricas, pero esta vez utilizando algoritmos de identificación en línea.

El orden de cualquier función de transferencia está relacionado con el número de estados necesarios para representar el sistema. Para este caso en particular, las funciones de transferencia son de orden tres y se pueden escribir como una relación de polinomios  $G(s)$ , cuyos coeficientes serán determinados por el algoritmo, con base en lecturas de variables de entrada y salida, como se ilustra en la figura 2.



$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

Figura 2. Identificación de la función de transferencia del sistema.

Para la aplicación que se considera en este artículo, se utilizan las mediciones en línea de potencia activa ( $D$ ) y voltaje terminal ( $R_e$ ), como variables de salida y el voltaje de campo ( $jX_e$ ) como variable de entrada, para determinar unas nuevas funciones de transferencia numéricas dadas por (25) y (26).

$$G_{11}(s) = \frac{\Delta P_e(s)}{\Delta E_{FD}(s)} = \frac{a_{11}^2 s^2 + a_{11}^1 s}{s^3 + a_0^2 s^2 + a_0^1 s + a_0^0} \quad (25)$$

$$G_{21}(s) = \frac{\Delta v_t(s)}{\Delta E_{FD}(s)} = \frac{a_{21}^2 s^2 + a_{21}^1 s + a_{21}^0}{s^3 + a_0^2 s^2 + a_0^1 s + a_0^0} \quad (26)$$

Se pueden emplear diversos métodos para hallar los coeficientes de estas funciones, entre algunos de ellos se encuentran el de proyección ortogonal y mínimos cuadrados. Para la implementación desarrollada se utilizó el algoritmo de mínimos cuadrados recursivos (MCR) [33]. A continuación se presenta un cuadro del resumen del algoritmo.

**Fase 0.** Se inicializa el vector de parámetros de la función de transferencia  $\theta$  y la matriz de covarianza  $P$

**Fase 1.** Se construye la matriz  $\varphi_{t+1}$ , la cual contiene los datos anteriores de potencia activa ( $\Delta P_{\text{máq}} - r_t$ ), voltaje terminal ( $\Delta V_{\text{máq}} - r_t$ ) y del voltaje de campo

( $\Delta E_{\text{máq}} - r_t$ ) de la máquina. 
$$\varphi_{t+1}^T = \begin{bmatrix} -a_{2,t} & -a_{3,t} & -a_{4,t} & a_{2,t} & a_{3,t} & a_{4,t} & 0 & 0 & 0 \\ -r_{2,t} & -r_{3,t} & -r_{4,t} & 0 & 0 & 0 & a_{2,t} & a_{3,t} & a_{4,t} \end{bmatrix}$$

**Fase 2.** Se construye el vector  $\hat{y}_t$  que contiene las salidas actuales de potencia y voltaje terminal  $\hat{y}_t = [r_t \quad r_t]^T$

**Fase 3.** Se calcula la salida estimada dada por  $\hat{y}_{\text{est}} = \varphi_{t+1}^T \hat{\theta}_{t-1}$ , donde  $\theta$  representa el vector que contiene los parámetros de la función de transferencia.

**Fase 4.** Se calcula el error dado por  $\hat{e}_t = \hat{y}_t - \varphi_{t+1}^T \hat{\theta}_{t-1}$ . Si el error es mayor que la tolerancia se actualiza el vector  $\theta$  con el paso 5, de lo contrario finaliza.

**Fase 5.** Para actualizar el vector de coeficientes  $\theta$ , se calcula el vector de ganancia  $L_t$ , donde  $P_{t+1}$  es la matriz de covarianza anterior.

$$L_t = P_{t+1} \varphi_{t+1} (\alpha I + \varphi_{t+1}^T P_{t+1} \varphi_{t+1})^{-1}$$

**Fase 6.** Se actualiza el vector de covarianza  $P_t$  así:

$$P_t = \frac{1}{\alpha} [I - L_t \varphi_{t+1}^T] P_{t+1}$$

donde  $\alpha$  es el factor de olvido.

**Fase 7.** Se actualiza el vector de coeficientes  $\hat{\theta}_t = \hat{\theta}_{t-1} + P_t \varphi_{t+1} \hat{e}_t$

el cual contiene los coeficientes de las funciones de transferencia así:

$$\hat{\theta}_t = [a_0^t \quad a_1^t \quad a_2^t \quad a_3^t \quad a_4^t \quad a_5^t \quad a_6^t \quad a_7^t \quad a_8^t \quad a_9^t]^T$$

**Fase 8.** Se retorna al paso 1.

Una vez determinados los coeficientes numéricos de las funciones de transferencia con (MCR), éstos son igualados con los coeficientes simbólicos dados por las ecuaciones de estado. De esta forma se obtienen algunos parámetros de la máquina en función de las constantes de Heffron Phillips, así como las combinaciones de algunas de ellas, tal como se presenta en las ecuaciones (27) a (33).

$$\frac{D}{J} = \frac{a_{11}^1}{a_{11}^2} \quad (27)$$

$$T_f = \frac{1}{a_0^2 - a_{11}^1/a_{11}^2} \quad (28)$$

$$\frac{K_1}{J} = a_0^1 - \frac{D}{J} \frac{1}{T_f} \quad (29)$$

$$K_6 K_3 = a_{21}^2 T_f \quad (30)$$

$$K_6 K_3 = a_{21}^2 T_f \quad (31)$$

$$\frac{K_4}{J} = \frac{K_1/J - a_0^0 T_f}{K_2 K_3} \quad (32)$$

$$\frac{K_5}{J} = \frac{(K_1/J) K_6 K_3 - a_{21}^0 T_f}{K_2 K_3} \quad (33)$$

Como ya se había mencionado, las constantes K1 a K6 están en función de los parámetros de la máquina y de las condiciones de operación, y según [32] se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{K_1}{J} = \frac{f_d}{J\omega_0} (x_q - x'_d) i_{q0} + \frac{f_q}{J\omega_0} (v_{q0} + x_q i_{d0}) \quad (34)$$

$$K_2 K_3 = \left( \frac{i_{q0}}{\omega_0} + \frac{y_d}{\omega_0} (x_q - x'_d) i_{q0} + \frac{y_q}{\omega_0} (v_{q0} + x_q i_{d0}) \right) \left( \frac{1}{1 + (x_d - x'_d) y_d} \right) \quad (35)$$

$$K_6 K_3 = \left( \frac{v_{q0}}{v_{r0}} - y_d \frac{x'_d v_{q0}}{v_{r0}} + y_q \frac{x_q v_{d0}}{v_{r0}} \right) \left( \frac{1}{1 + (x_d - x'_d) y_d} \right) \quad (36)$$

$$\frac{K_4}{J} = \frac{f_d}{J} (x_d - x'_d) \quad (37)$$

$$\frac{K_5}{J} = \frac{f_q}{J} \frac{x_q v_{d0}}{v_{r0}} - \frac{f_d}{J} \frac{x'_d v_{q0}}{v_{r0}} \quad (38)$$

Donde:

$$f_d = \frac{v_B}{z_e^2} \left( -r_e \cos \delta_0 + (x_e + x_q) \sin \delta_0 \right) ; \quad f_q = \frac{v_B}{z_e^2} \left( r_e \sin \delta_0 + (x_e + x'_d) \cos \delta_0 \right) ; \quad y_d = \frac{x_e + x_q}{z_e^2} ; \quad y_q = \frac{r_e}{z_e^2} ; \quad (39)$$

$$z_e^2 = r_e^2 + (x_e + x_q)(x_e + x'_d)$$

De (34) a (38), se observa que las ecuaciones son no lineales y, por lo tanto es necesario recurrir a un método iterativo como el de Newton Raspón, para resolverlas y así determinar los parámetros físicos de la máquina. El método iterativo implementado utiliza como valores iniciales de los parámetros ( $R_e$ ,  $x'_d$ ,  $R_e$ ,  $D$ ), los datos obtenidos del fabricante. El valor de la resistencia de la línea  $R_e$  normalmente se desprecia para mayor simplicidad en los cálculos y las variables iniciales ( $i_{q0}$ ,  $i_{q0}$ ,  $i_{q0}$ ,  $i_{q0}$ ,  $\delta_0$ ) son adquiridas y calculadas previamente.

Los parámetros faltantes ( $T'_{d0}$ ,  $D$ ) se determinan una vez se halla obtenido la constante  $K_3$ , que se relaciona de acuerdo con la ecuación 39.

$$K_3 = \frac{1}{1 + (x_d - x'_d) \left( \frac{x_e + x_q}{r_e^2 + (x_e + x_q)(x_e + x'_d)} \right)} \quad (39)$$

Donde:

$$T'_{d0} = \frac{T_f}{K_3} \quad (40)$$

$$D = \frac{D}{J} \cdot J \quad (41)$$

### 4.3.1.1 Implementación de la metodología presentada

En esta sección se presenta la configuración experimental realizada en el laboratorio, así como algunos resultados obtenidos con el algoritmo de identificación.

- Configuración experimental: para la implementación de la metodología se utilizó una micro-máquina síncrona de 120VA accionada mediante un motor de impulsión a 1800 RPM y conectada a un barraje infinito a través de una línea de impedancia ( $51.98 + j261.82$ )  $\Omega$ , como se ilustra en la figura 3.

La alimentación del circuito de campo se realiza a través de un excitador de estado sólido, conectado a un regulador automático de voltaje AVR. Éste se

encarga de mantener constante el voltaje en terminales del generador mediante la variación de la corriente en la excitación de la máquina.

Los voltajes terminal  $V_t$  y de campo  $V_f$ , corriente de línea  $I_p$ , potencia activa  $P_e$  y ángulo de par  $\delta$ , se obtienen con un sistema de adquisición de datos, utilizando un tiempo de muestreo de 40 m. Este tiempo fue seleccionado mayor que la frecuencia de muestreo esperada (8.,3 m), debido a que es necesario tener en cuenta el tiempo de ejecución de las rutinas utilizadas de identificación y solución de ecuaciones. Para la medición del ángulo del par se utilizó la implementación desarrollada en [20].

- Verificación del sistema de identificación: a fin de comprobar la efectividad del algoritmo de estimación utilizado, se sometió la máquina a diferentes perturbaciones de tipo eléctrico. En la gráfica 1 se presenta una comparación de las señales de tensión en terminales y potencia activa de la máquina, con respecto a las salidas estimadas por el algoritmo, cuando se realizan variaciones sucesivas en el voltaje de campo de la máquina. Además se ilustra el error relativo entre dichas medidas.

De la figura 4 se observa un buen desempeño del estimador programado, lo cual se ratifica con el promedio en el error relativo, presentado en las gráficas.

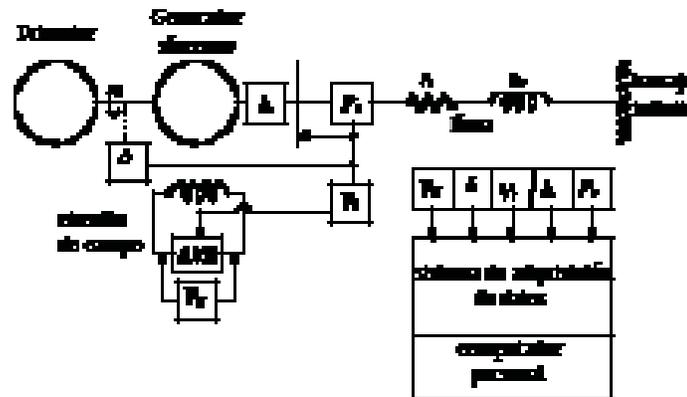
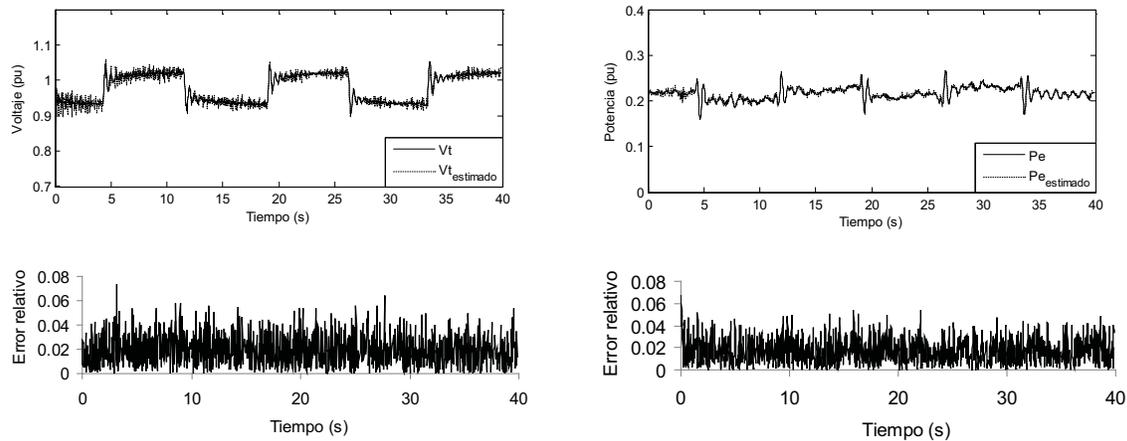


Figura 3. Configuración experimental.



**Gráfica 1.** Respuesta de voltaje terminal y potencia activa de la máquina y del sistema de identificación ante variaciones en el voltaje de campo.

- Identificación de parámetros: a continuación se presentan tres casos para la máquina, a fin de determinar la variación de los parámetros, de acuerdo con la variación del punto de operación. Inicialmente se determinan los parámetros para condiciones nominales; posteriormente, se ilustran dos condiciones en las que se realizan variaciones en el voltaje de referencia, para puntos de operación diferentes a condición nominal. Es importante aclarar que para los dos últimos casos no se cuentan con datos de la máquina obtenidos por alguna otra metodología. Los únicos datos que se tenían fueron los dados por el fabricante, que generalmente se consideran obtenidos bajo condiciones nominales de operación. Por tal motivo, en esta parte de las pruebas no se realiza una validación de la metodología, ya que no se dispone de patrón.

Sin embargo, se realizaron dichos casos para propósitos de ilustración de la variabilidad de los parámetros.

## 5. Pruebas y resultados

### 5.1. Caso 1. Generador síncrono bajo condiciones nominales

Los valores identificados de los parámetros físicos del generador bajo condiciones nominales y los dados por el fabricante se presentan en la tabla 2.

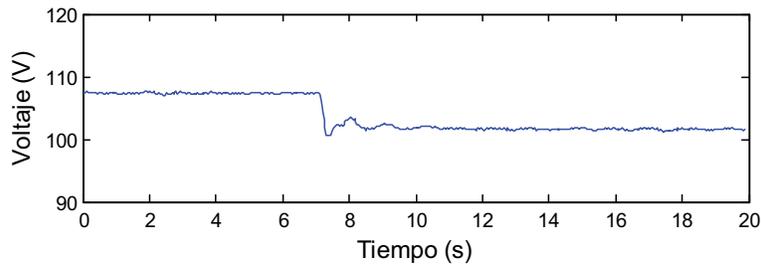
Se compararon los datos del fabricante con los obtenidos en el laboratorio, en consecuencia, se puede observar una gran aproximación de estos últimos con los valores reales. Lo anterior evidencia la utilidad de la metodología implementada, al obtener los parámetros de la máquina sin interrumpir su funcionamiento.

Parámetro	Estimado	Dado por el fabricante	Error
$X_d$ (pu)	0,3560	0,3500	-1,7143E-02
$X_q$ (pu)	0,3245	0,3416	5,0059E-02
$X'_d$ (pu)	0,0839	0,0875	3,5632E-02
$X_e$ (pu)	0,7273	0,7273	0,0000E-02
$H$ (s)	0,3100	0,3108	2,5740E-02
$T'_{do}$ (s)	2,9549	3,0000	1,5033E-02
$D$ (N.m.s)	0,0015	0,0010	-5.0000E-01

**Tabla 2.** Comparación de los parámetros conocidos y estimados.

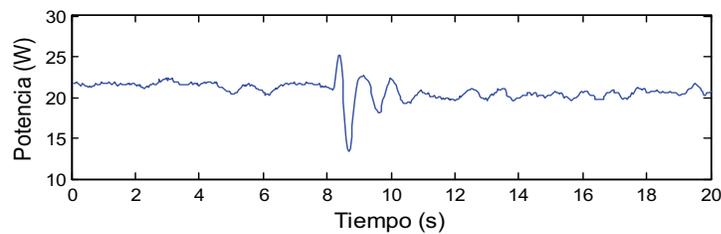
## 5.2. Caso 2. Variación en el punto de operación (incremento en el voltaje de referencia)

Para verificar los parámetros físicos de la máquina bajo una condición de operación diferente a la nominal, se realizó una variación del 9,1% en el voltaje de referencia, para un punto de operación correspondiente a  $P = 22 \text{ W}$ ,  $Q = 31.6 \text{ VAR}$ ,  $V_t = 101\text{V}$ ,  $\delta=0.1876^\circ$ . La variación en el voltaje terminal se aprecia en la gráfica 2.



**Gráfica 2.** Variación en el voltaje terminal ante una variación ascendente del 9,1% en el voltaje de referencia.

La oscilación presentada en la potencia de la máquina se ilustra en la gráfica 3.



**Gráfica 3.** Respuesta en potencia del generador ante una variación ascendente del 9,1% en el voltaje de referencia.

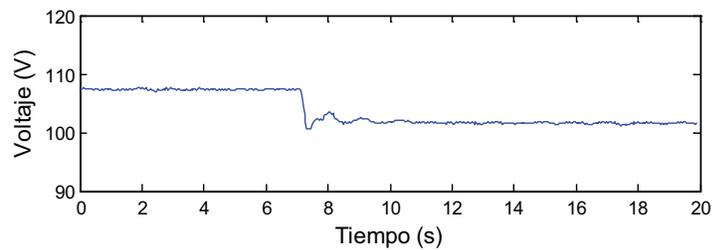
Para comparar los valores de los parámetros antes y después de la perturbación, se tomaron datos para los instantes de tiempo de 4s y 14s como se muestra en la tabla 3.

Parámetro	Valor del parámetro a un tiempo t	
	t=4 s	t= 14 s
$X_d$ (pu)	0.36725	0.40566
$X_q$ (pu)	0.32918	0.41745
$X'_d$ (pu)	0.08927	0.09233
$X'_e$ (pu)	0.72735	0.72735
$H$ (s)	0.47321	0.47769
$T'_{d0}$ (s)	3.79964	3.91821
$D$ (N.m.s)	0.00121	0.00122

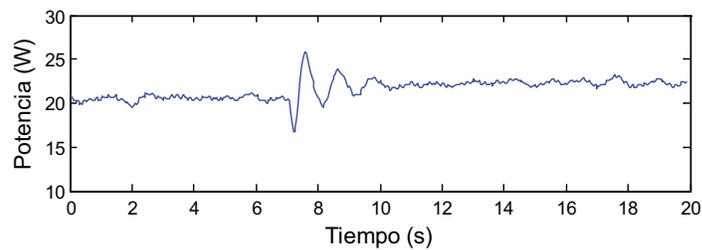
**Tabla 3.** Parámetros obtenidos para una variación ascendente en el voltaje de referencia.

## 5.3 Caso 3. Variación en el punto de operación (decremento en el voltaje de referencia)

Para el punto de operación  $P = 19.97 \text{ W}$ ,  $Q = 32.19 \text{ VAR}$ ,  $V_t = 109.96 \text{ V}$ ,  $\delta = 2.833^\circ$  se realizó un decremento en el voltaje de referencia del 8% y se obtuvieron los resultados de las gráficas 4 y 5.



**Gráfica 4.** Variación en el voltaje terminal ante una variación descendente del 8% en el voltaje de referencia.



**Gráfica 5.** Respuesta en potencia del generador ante una variación descendente del 8% en el voltaje de referencia.

Los valores de los parámetros antes y después de la perturbación tomados para un tiempo arbitrario se muestran en la tabla 4.

En las tablas 3 y 4 se observa que los parámetros físicos que presentan mayor variación cuando existen perturbaciones son las reactancias de eje directo

( $X_d$ ) y de eje en cuadratura ( $X_q$ ). Las variaciones anteriores son previsible, debido a causas tales como la saturación, variación de temperatura, entre otros, que se presentan en menor o mayor proporción según la magnitud de la perturbación.

Parámetro	Valor del parámetro a un tiempo t	
	t= 4 s	t= 14 s
$X_d$ (pu)	0,23795	0,27173
$X_q$ (pu)	0,25257	0,31985
$X'd$ (pu)	0,10778	0,11912
$X_e$ (pu)	0,72735	0,72735
H (s)	0,53957	0,54836
$T'd0$ (s)	3,28573	3,35464
D (N.m.s)	0,00138	0,00141

**Tabla 3.** Parámetros obtenidos para una variación descendente en el voltaje de referencia.

## 6. Conclusiones

En este artículo se presenta una breve reseña de algunas metodologías fuera de línea y en línea, utilizadas en la identificación de parámetros de la

máquina síncrona. Adicionalmente, se presenta la implementación de una metodología de identificación en línea, que permite obtener los parámetros de un modelo de tercer orden para un generador síncrono, dado por el modelo de Heffron-Phillips.

El método de identificación garantiza el normal comportamiento de la máquina, al no aislarla del sistema de potencia, lo cual permite realizar un seguimiento continuo de sus parámetros tanto ante condiciones normales de operación (aumento de temperatura, saturación, entre otros) como ante perturbaciones externas.

Las características fundamentales del método son:

- Entrega rápida de resultados para cualquier condición de funcionamiento;
- Bajos costos de operación, debido a que las variables medidas no requieren de equipos de alto precio, y
- Implementación flexible para las empresas generadoras de energía.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1]. IEEE Standard 115-1995. *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*. USA.
- [2]. Campos, S.; Asiaín, T. y Ruiz de la Vega, D. (2005) Determinación de los parámetros dinámicos de una máquina síncrona de laboratorio utilizando el método de respuesta a la frecuencia. 9º Conferencia Hispano-Lusa de Ingeniería Eléctrica, Marbella, España.
- [3]. Shen, S.; Zhu S. and Han. B. (November, 1991) Identification of Parameters of Synchronous Machine and Excitation System by On-Line Test. IEE International conference on advances in power system control, operation and management, Hong Kong.
- [4]. Da Costa. J. (June, 2002) "Identification of Synchronous Machine Parameters Using Load Rejection Test Data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17, (2), 242-247.
- [5]. Rengifo, E. y Sánchez, O. (Octubre de 2003) Metodología para obtener los parámetros de un generador con un equipo de adquisición de señales. Simposio Nacional de Generación y Comercialización de Energía Eléctrica (área capacitación y transferencia tecnológica, Pereira).
- [6]. Karrari, M., and Malik, O.P. (2004) Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator from Online Measurements. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (2), 407-415.
- [7]. Da Costa, J. (1997) Synchronous Machines Parameters Identification Using Load Rejection Test Data. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*.
- [8]. Fairbairn. R. (May, 1992) On Line Measurement of Synchronous Machine Parameters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28, (3).
- [9]. Narayan, C. y El-Serafi. A.M. (May, 2004) Experimental Methods for Measuring the Q-Axis Saturation Characteristics of Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- [10]. Da Costa E. y Jardini, J. (December, 2004) A Standstill Frequency Response Method for Large Salient Pole Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (4).
- [11]. Turner P., A.; Reece A. and Macdonald, D. (December, 1989) The D.C Decay Test for Determining Synchronous Machine Parameters: Measurement and Simulation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 4, (4).
- [12]. Vicol, L.; Xuan, T.; Wetter, R.; Simmond, J. and Viorel, I. (June, 2006) On the Identification of the Synchronous Machine Parameters Using Standstill D.C Decay Test. Greece: ICEM.
- [13]. Pillutla, S. and Keyhani, A. (September, 1999) Neural Network Based Modeling of Round Rotor Synchronous Generator Rotor Body Parameters from Operating Data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 13, (3).
- [14]. Groza. V. (February, 2003) Experimental Determination of Synchronous Machine Reactances from DC Decay Standstill. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52, (1).
- [15]. Biró, K.; Szabó, L.; Iancu, V.; Hedesiu, H. and Barz, V. (May, 2001) On the Synchronous Machine Parameter Identification. *Proceedings of Workshop on Electrical Machines Parameters*. Technical University of Cluj-Napoca.
- [16]. Rivera, C.; Carrasco, J. y Cantú, H. (Sin fecha) Determinación de parámetros de la máquina síncrona mediante pruebas de respuesta en frecuencia. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- [17]. Sellschopp, F. y Arjona, M. (2005) A Tool for Extracting Synchronous Machines Parameters from the DC Flux Decay Test. *Computers and Electrical Engineering*, 31.
- [18]. Xuan, M.T.; Simon, J.J.; Schwery, A. and Regli, P. (2003) *Fully Automated Parameter Identification for Synchronous Machines*. Cavtat (Croatia): Hydropower & Dams.
- [19]. Thaler, G. y Wilcox., M. (1984) *Máquinas eléctricas: estado dinámico y permanente*. México: Editorial Limusa S.A.
- [20]. Pérez, A., Romero Y., y Pérez S. (Mayo de 2007) Determinación en línea del ángulo de carga de un generador síncrono. *Scientia et Technica, año XIII* (34), 37-41.
- [21]. Keyhani, A. y Tsai, H. (Sin fecha) Identification of High-Order Synchronous Generator Models from SSFR Test Data. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 9 (3), 593-603.

- [22]. Keyhani, A., Hao, S. and Dayal, G. (September, 1989) Maximum Likelihood Estimation of Solid Rotor Synchronous Machine Parameters from SSFR Test Data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 4 (3), 551-558.
- [23]. Henschel, S. and Dommel, H.W. (May, 1999) Noniterative Synchronous Machine Parameter Identification from Frequency Response Tests. *IEEE Trans. Power Syst*, 14 (2), 553-560.
- [24]. Verbeek, J. Pintelon, R. and Guillaume, P. (September, 1999) Determination of Synchronous Machine Parameters Using Network Synthesis Techniques. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 14 (3), 310-314.
- [25]. Abido, M. (1997) On-line Identification of a Synchronous Machine Using a Radial Basis Function Network. Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico.
- [26]. Despalatovic, M. y Jadric, M. (2004) On-Line Hydrogenerator Power Angle and Synchronous Reactances Determination Based on Air Gap Measurement. IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSC'04).
- [27]. Del Angel, M.; Glavic, M. and Wehenkel, L. (2003) Using Artificial Neural Networks to Estimate Rotor Angles and Speeds from Phasor Measurements. *IEEE Proceedings of Intelligent Systems Applications to Power Systems*.
- [28]. Tumageanian, A. and Keyhani, A. (June, 1995) Identification of Synchronous Machine Linear Parameters from Standstill Step Voltage Input Data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10 (2), 232-240.
- [29]. Tsai, H.; Keyhani, A.; Demcko, J.A. and Selin, D.A. (December, 1995) Development of a Neural Network Based Saturation Model for Synchronous Generator Analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10 (4), 617-624.
- [30]. Eitelberg, E. and Harley, R.G. (March, 1987) Estimating Synchronous Machine Electrical Parameters From Frequency Response Tests. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, EC-2 (1), 132-138.
- [31]. Boje, E.S.; Balda, J.C. and Harley, R.G. (March, 1990) Time-Domain Identification of Synchronous Machine Parameters from Simple Standstill Tests. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5 (1), 164-175.
- [32]. Sauer, P. and Pai, M. (1998) *Power System Dynamics and Stability*. Prentice Hall.
- [33]. Goodwin, G. and Sang, K. (1984) *Adaptive Filtering, Prediction and Control* Prentice Hall.



Palacio de Justicia (carrera 6 con calle 11), s. f.

Fuente: anónimo, en archivo José Vicente Ortega Ricaurte (Sociedad de Mejoras y Ornato de Bogotá).