

Efecto y control del ruido en la determinación experimental de parámetros dinámicos de máquinas síncronas

Laura L. Juárez-Caltzontzin¹

Tomás I. Asiaín-Olivares²

Daniel Ruiz-Vega²

¹Departamento de Ingeniería de Distribución,
Subdirección de Programación,
Comisión Federal de Electricidad.
Paseo de la Reforma 164 - 4º Piso
Col. Juárez, CP 06600, México, DF.
MEXICO.

²Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',
Col. Lindavista, CP 07738, México, DF.
MEXICO.

correo electrónico (email): lcalt_juarez@yahoo.com.mx
yeriak1@yahoo.com.mx
drv_liege@yahoo.com

Recibido el 19 de febrero de 2010; aceptado el 17 de enero de 2011.

1. Resumen

El propósito de este trabajo es presentar el diseño de un filtro digital para eliminar las componentes de alta frecuencia de las corrientes de fase obtenidas a partir de la prueba de corto circuito trifásico con la máquina síncrona operando en vacío. En este trabajo se utilizó el programa de computadora digital "ParametrosMS" para obtener los parámetros dinámicos de la máquina síncrona [1], [2]. Con el se obtuvieron resultados satisfactorios en el análisis de los oscilogramas de corrientes eléctricas de máquinas de polos lisos y salientes; sin embargo, se observó que el programa no realizaba de manera adecuada el análisis de señales con ruido. En este trabajo se presenta el diseño y la implementación de una subrutina de filtrado de ruido al programa y se analizan dis-

tintas alternativas para la solución del problema dado. Los resultados de la aplicación del filtro a mediciones con ruido se comparan con los resultados previos sin ruido para la micromáquina síncrona de polos salientes.

Palabras clave: componente de alta frecuencia, filtro digital, periodo de muestreo, señal con ruido, parámetros de la máquina síncrona.

2. Abstract (Effect and Control of Noise in the Experimental Determination of Dynamic Parameters in Synchronous Machines)

The purpose of this work is to present the design of a digital filter to eliminate the high frequency components of machine phase currents, obtained in the sudden short circuit test applied to an unloaded synchronous machine. In this work, a computer program called "ParametrosMS" was used to obtain the dynamic parameters of the synchronous machine [1,2]. Satisfactory results were obtained in the analysis of salient pole and round rotor machines oscillograms; however, it was observed that the program did not allow analyzing noisy signals adequately. This work presents the design and implementation of a noise filtering subroutine to the program, and analyzes the different alternative solutions to this problem. The results of applying the filter to the noisy measurements are compared to the ones previously obtained for the salient pole synchronous micromachine.

Key words: high frequency component, digital filter, sampling rate, noisy signal, synchronous machine parameters.

3. Introducción

La determinación de los parámetros dinámicos de máquinas síncronas es un problema de interés actual, tanto para las grandes compañías suministradoras de energía eléctrica como para las empresas privadas que cuentan con generadores propios para abastecer parcialmente o la totalidad de su carga. De la exactitud de dichos parámetros dependerá la veracidad de los estudios de corto circuito y estabilidad relacionados con la máquina síncrona.

Existen distintas metodologías para llevar a cabo esta tarea. En [2] se desarrolló el programa de computadora digital "ParametrosMS", que calcula los parámetros dinámicos de la máquina síncrona a partir de los resultados de la prueba de corto circuito súbito funcionando en vacío, y se presentaron los resultados para las máquinas de polos lisos y salientes a tensión plena y tensión reducida. A pesar de que los resultados obtenidos en las primeras pruebas fueron satisfactorios (las señales de entrada medidas no contenían ruido), en el análisis de pruebas subsecuentes se observó que, debido a la metodología empleada para calcular las envolventes de las corrientes de fase (basada en [3]), las señales con ruido no pueden ser procesadas de manera adecuada por el programa antes mencionado.

En el análisis de los oscilogramas de las corrientes de corto circuito pueden ocurrir situaciones que invaliden los resultados del análisis de las corrientes de corto circuito utilizando la metodología descrita en [3] e implementada en [2]. Es conocido que el modelo matemático de la corriente de corto circuito es el mostrado en la ecuación siguiente.

$$i_a = U_m \left[\frac{1}{X_d} + \left[\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right] e^{-t/T_d'} + \left[\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right] e^{-t/T_d''} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) - \frac{U_m}{2} \left[\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right] e^{-t/T_a} \cos \lambda - \frac{U_m}{2} \left[\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right] e^{-t/T_a} \cos(2\omega_0 t + \lambda)$$

donde U_m es el voltaje en las terminales de la máquina antes del cortocircuito.

λ es el ángulo de defasamiento al inicio del cortocircuito.

ω_0 es la frecuencia síncrona.

X_q'' es la reactancia subtransitoria en el eje en cuadratura.

Para una detección temprana de problemas de ruido es necesario graficar los datos de entrada (figura 1) a fin de observar si las mediciones tienen anomalías debidas a defectos de fabricación o a componentes armónicas de alta frecuencia (ruido) e interferencia electromagnética durante la prueba [4].

En la figura 1 se muestran las corrientes de fase obtenidas después de aplicar un corto circuito trifásico a una máquina de polos salientes de 4.5 kVA a tensión plena. El tiempo de muestreo de la señal es de 0.2 ms.

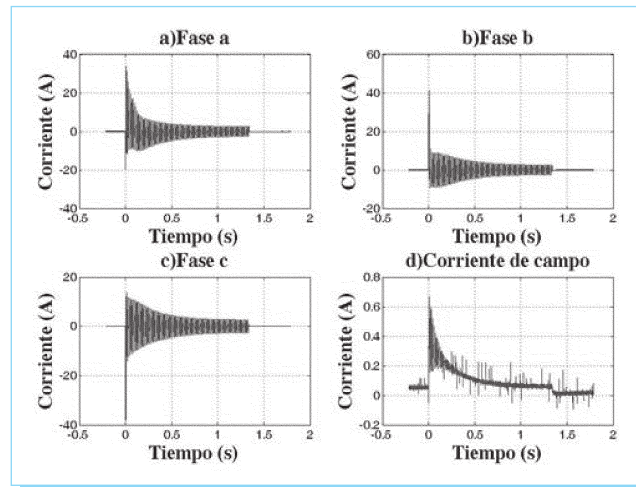


Fig. 1. Corrientes de corto circuito en las fases y el campo obtenidas directamente de la prueba de corto circuito trifásico.

A simple vista sólo se puede apreciar que existe distorsión armónica en la corriente de campo, sin embargo, en la figura 2 se muestra una ampliación de la corriente de la fase a, que contiene componentes de alta frecuencia que no se observaron cuando la frecuencia de muestreo fue de 2 ms, debido a que se aumenta la frecuencia de muestreo en el instrumento de medición se registran los cambios rápidos de la señal que se pierden con frecuencias más pequeñas.

Debido a esta situación, surgió la necesidad filtrar las señales de entrada del programa. En [4] se analiza este fenómeno y se

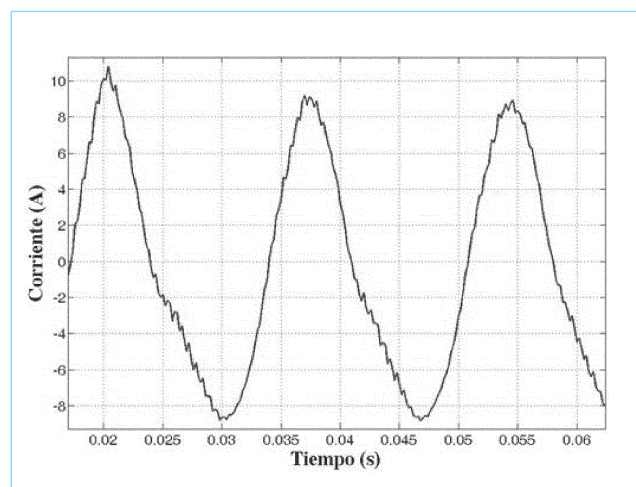


Fig. 2. Acercamiento de la fase a: señal con ruido.

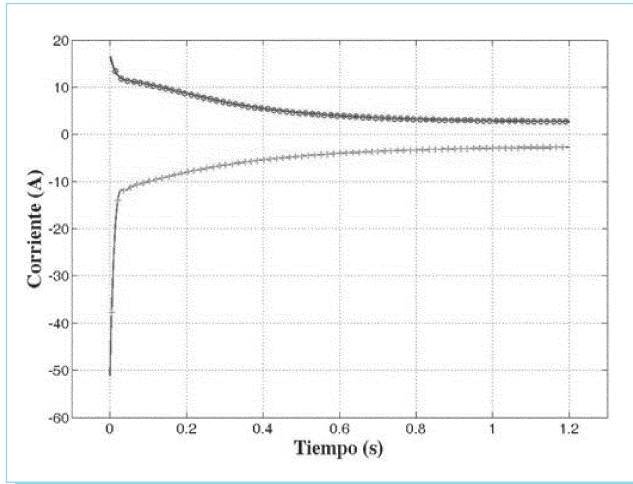


Fig. 3. Envolventes superior e inferior de la corriente de la fase C sin ruido: o Puntos máximos (envolvente superior)
+ Puntos mínimos (envolvente inferior)

propone el uso de un filtro digital para eliminar el ruido de la señal de entrada. En el presente trabajo se propone la implementación de un filtro "pasa-bajos" que se incluyó en el programa "ParametrosMS" y permitió analizar pruebas con periodos de muestreo menores y obtener resultados adecuados.

4. Efecto del ruido

Una señal con ruido es aquella que contiene valores aleatorios indeseables o que no tienen significado en el sistema que se está analizando además de la señal fundamental deseada. En esta sección se analiza el efecto que tiene el ruido de la señal de entrada en los resultados que se obtienen con el programa "ParametrosMS".

El programa "ParametrosMS" tiene una subrutina para calcular las envolventes superior e inferior de las corrientes de fase (figura 3), que básicamente es una subrutina de búsqueda de puntos máximos y mínimos que requieren ser sincronizados en el tiempo para determinar un valor máximo y uno mínimo en cada instante de tiempo, lo que se logra por medio de una interpolación con "splines" cúbicos; de este modo se calculan las envolventes superior e inferior de las corrientes de corto circuito tal como lo describe [3]. A partir de dichas envolventes y utilizando distintas subrutinas (que se detallan en la sección 6) se pueden obtener los modelos lineales de las componentes de CD y los modelos transitorio y subtransitorio de las tres fases haciendo una regresión lineal para después hallar los parámetros dinámicos de la máquina (reactancias y constantes de tiempo) [3, 5]. Debido a la utilización de la metodología

mencionada se observa que cuando la señal no contiene ruido se obtienen envolventes superior e inferior similares a las de la figura 3, obtenidas para la fase c de la máquina de polos salientes, con las mismas características mencionadas en § 1. La curva de cruces es la envolvente inferior y la curva con ceros es la envolvente superior. Se puede notar que las envolventes están bien definidas, sin discontinuidades o cambios súbitos de dirección y sincronizadas en el tiempo.

Por el contrario, en la figura 4 se presentan las envolventes superior e inferior obtenidas para la corriente de la misma fase c utilizando una señal de entrada con ruido. Nuevamente la curva de cruces es la envolvente inferior y la curva con ceros la envolvente superior sincronizadas en el tiempo, la razón para que las envolventes no estén bien definidas y tengan cambios bruscos de dirección es que el programa selecciona los valores máximos y mínimos con base en un aumento o disminución del valor numérico de las mediciones; si se toma como referencia a la figura 2 se puede notar que el programa considera como valores máximos y mínimos de la envolvente de corriente a los de las componentes de alta frecuencia, lo que explica el hecho de que en la figura 4 se encuentren puntos máximos en lo que debiera ser la envolvente inferior y puntos mínimos en la envolvente superior, lo que impide el procesamiento de los datos para hallar los parámetros de la máquina.

5. Filtrado

Cualquier instrumento de medición está sujeto a fenómenos indeseables que provocan ruido en la señal que se mide tales

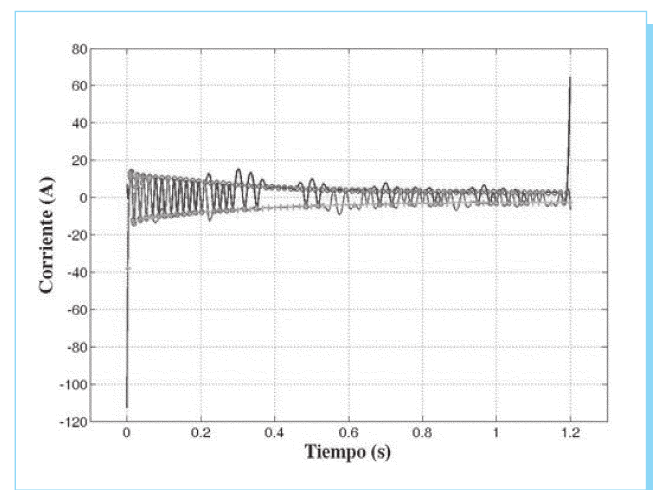


Fig. 4. Envolventes superior e inferior de la corriente de la fase C con ruido: o Puntos máximos (envolvente superior)
+ Puntos mínimos (envolvente inferior).

como las condiciones ambientales del lugar en donde se esté realizando la medición o fenómenos electromagnéticos como radio interferencias. La cantidad de ruido que se transmite a la señal depende de manera importante del tipo de datos que se están midiendo y de la sensibilidad del dispositivo de medición. En algunos casos es posible reducir el nivel de ruido controlando las condiciones ambientales pero en los casos en que el ruido es parte de la señal medida, como en la figura 2, es necesario realizar un filtrado de la señal. En este trabajo se muestran dos formas de eliminar o disminuir el ruido de la señal de entrada: cambiando el periodo de muestreo o utilizando una subrutina de filtrado de los datos de entrada.

A. Periodo de muestreo

El muestreo de una señal continua consiste en representar una señal $x(t)$ por un número discreto de puntos $t = nT$ donde T es el periodo de muestreo, que es el tiempo entre cada muestra, y n es un número entero que establece la posición en el tiempo de cada muestra [6].

En la figura 5 se muestra la corriente de campo de una máquina síncrona de polos salientes con las características ya mencionadas. El periodo de muestreo es de 0.2 ms para un tiempo total de 2.004 s con un tiempo de retraso de 0.2 s; el número total de muestras es de 10 020 puntos. La señal tiene un alto contenido de ruido debido a la sensibilidad del instrumento de medición y las corrientes de fase registran componentes de alta frecuencia. En la figura 6 se muestra la corriente de campo con un periodo de muestreo de 2 ms para el

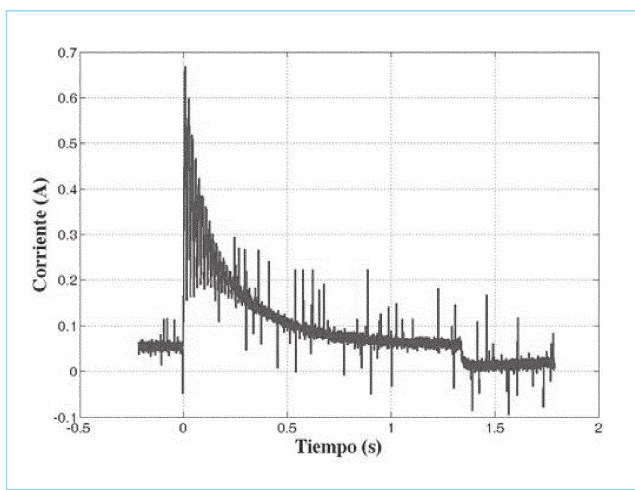


Fig. 5. Corriente de campo con un periodo de muestreo de 0.2 ms.

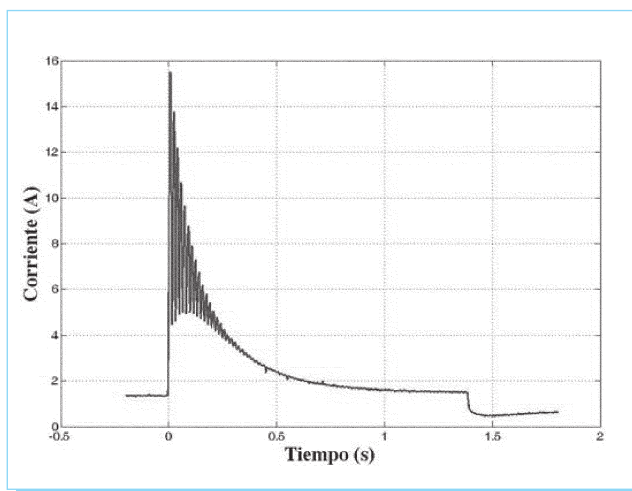


Fig. 6. Corriente de campo con un periodo de muestreo de 2 ms.

mismo tiempo total y de retraso; el número total de muestras es de 1002 puntos. La señal contiene menos cantidad de ruido, sin embargo las corrientes de fase sólo registran frecuencia fundamental.

El ruido que contiene el campo se debe al método de medición, ya que la corriente de campo fue medida indirectamente por medio del voltaje en una resistencia fija de bajo valor [7] por lo que las partes móviles y las conexiones contribuyen también de manera importante a la inclusión de ruido. Por el contrario, las corrientes de fase fueron medidas directamente.

Sin embargo, sólo se puede disminuir el periodo de muestreo al momento de la prueba y dependiendo del rango del instrumento de medición, por lo que en la mayoría de los casos no es factible aplicar esta solución después de realizar la prueba.

B. Filtros

Los filtros son una clase particular de sistemas lineales invariantes en el tiempo. De manera típica, el contenido espectral de información de una señal ocupa una banda de frecuencias finita y, para obtener la información deseada de la señal que se esté analizando, es necesario un sistema selector de frecuencias. Estrictamente hablando, el término filtro selectivo de frecuencia sugiere un sistema que permita pasar ciertas componentes de frecuencia y que elimine otras pero, en un contexto más amplio, cualquier sistema que modifique ciertas frecuencias con relación a otras es llamado filtro [8]. El diseño de un filtro involucra tres escenarios [9]:

- (1) La especificación de las propiedades deseadas del sistema.
- (2) La aproximación de las especificaciones utilizando un sistema causal de tiempo discreto
- (3) La realización o aproximación de la función de transferencia mencionada en el punto anterior mediante la implementación física del sistema.

Con frecuencia, el funcionamiento de un filtro se simula empleando técnicas y herramientas computacionales y se utiliza para filtrar una señal digital que generalmente se deriva de una señal continua en el tiempo mediante un muestreo periódico seguido de una conversión analógico-digital, se ha vuelto una práctica común referirse a los filtros de tiempo discreto como filtros digitales. La respuesta a la frecuencia de un filtro está caracterizada por una banda de paso y una banda de corte. Las frecuencias dentro de la banda de paso se transmiten prácticamente sin o con muy poca distorsión mientras que las frecuencias dentro de la banda de corte son rechazadas: Los filtros pueden ser entonces de distintos tipos: pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda o de banda suprimida, dependiendo si permiten el paso de frecuencias bajas, altas, inmediatas o todas las frecuencias intermedias respectivamente. Debido a las características del sistema que se desea filtrar en este trabajo (las señales de corriente que contienen componentes de ruido de alta frecuencia) se seleccionó como la opción adecuada un filtro pasa-bajos, por lo que se definirán las características principales de este tipo de filtros.

Se considera un filtro pasa-bajos ideal al que transmiten todas las frecuencias dentro de la banda de paso sin ninguna distorsión y que rechaza todas las frecuencias dentro de la banda de corte; se asume que la transición entre la banda de paso y la de corte tiene longitud cero. El interés principal es la transmisión fiel de la información de la señal que contenga las frecuencias limitadas por una banda de frecuencias definida por $0 \leq \omega \leq \omega_c$. De manera más específica, la respuesta a la frecuencia de un filtro pasa-bajos ideal con una frecuencia de corte ω_c está definida por:

$$H(j\omega) = \begin{cases} e^{-j\omega t_0} & , -\omega_0 \leq \omega \leq \omega_c \\ 0 & , |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (1)$$

A pesar de que un filtro pasa-bajos ideal es un concepto meramente teórico, su estudio provee un marco de referencia para el diseño de un filtro real.¹ Existen distintos tipos de filtros pasa-

¹ De manera práctica, para implementar un filtro se debe tener en cuenta que las características ideales de un filtro no son posibles por lo que se deben tener tolerancias prácticas o "desviaciones" preestablecidas que limiten a las condiciones ideales (transmisión de todas las frecuencias de la banda de paso, cero distorsión y longitud de la banda de transición cero).

bajos que podrían ser utilizados. En este trabajo se seleccionó un filtro tipo Butterworth [9] por poseer ciertas ventajas deseables para este sistema, como tener una amplitud de respuesta máxima plana en la banda de paso (es decir, una ganancia casi plana), y otras características que se enlistan a continuación:

- Los límites de la banda de paso están definidos como la frecuencia en que la respuesta a la amplitud es 0.707 veces el valor máximo.
- La respuesta a la amplitud de este filtro decrece de manera monotónica en la banda de transición y en la de corte.
- No existen restricciones en la respuesta de fase [6].

De la manera más general, la función de transferencia del filtro Butterworth está definida por:

$$H(s) = \frac{\pm 1}{D(s)} \quad (2)$$

El polinomio $D(s)$ depende de la frecuencia de corte y del orden del filtro: entre más alto sea el orden, mayor será la precisión que se obtenga del filtro. En la literatura existen listados de los polinomios del denominador para (2) y en la subrutina implementada en este trabajo, se utilizó una función de Matlab® para obtener los polos del filtro Butterworth y el denominador y numerador de la función de transferencia en función del orden del filtro (se seleccionó el de cuarto orden por guardar las características deseadas para el problema en específico).

De manera más específica, la función de transferencia de un filtro Butterworth de orden N es:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left[\frac{\omega}{\omega_c} \right]^{2N}} \quad (3)$$

La función de aproximación (1) satisface la condición de que $H(j\omega)$ es una función par de ω [9]. El parámetro ω_c es la frecuencia de corte.

Para poder diseñar un filtro es necesario conocer la función de transferencia en función de la frecuencia de la forma $H(s)$ expresada como una función de la variable compleja s , haciendo $j\omega = s$ y multiplicando por su complejo conjugado [9]:

$$H(s)H(-s) = \frac{1}{1 + \left[\frac{s}{j\omega_c} \right]^{2N}} \quad (4)$$

Las raíces del polinomio del denominador están situadas en el plano complejo como se indica a continuación:

$$s = j\omega_c(-1)^{1/2N} = \omega_c e^{j\pi(2k+N-1)/2N} \quad (5)$$

para valores de $k = 0, 1, \dots, 2N-1$ y son los polos de la función de transferencia (4).

El filtro Butterworth implementado en Matlab® para este trabajo debe permitir el paso de las señales de 60Hz y rechazar las componentes de alta frecuencia. Fue probado para las señales con ruido, y uno de los resultados se muestra en la figura 7 que es un acercamiento de la señal de corriente filtrada de la fase a aproximadamente para el mismo periodo que el mostrado en la figura 2. Se observa notablemente que el ruido de alta frecuencia se elimina y la forma de onda se mejora considerablemente, a pesar de que la señal filtrada no es una senoide perfecta, permite al programa continuar con sus funciones.

6. Programa mejorado

En la figura 8 se muestra el diagrama de flujo del programa de computadora, mejorado al incluir la subrutina de filtrado (bloque 2*). Las funciones que ejecutan las subrutinas en los diferentes bloques se describen a continuación:

- Bloque 1*: Se solicitan los datos de entrada de las señales de corriente de las tres fases y del campo de la máquina en estudio y se grafican para observar posibles anomalías o deformaciones.
- Bloque 2*: Se solicita la confirmación para filtrar la señal en caso de contener ruido y se imprimen las señales filtradas.
- Bloque 3*: Se seleccionan los valores máximos y mínimos para las ondas de corriente de cada fase a fin de sincronizar las envolventes.

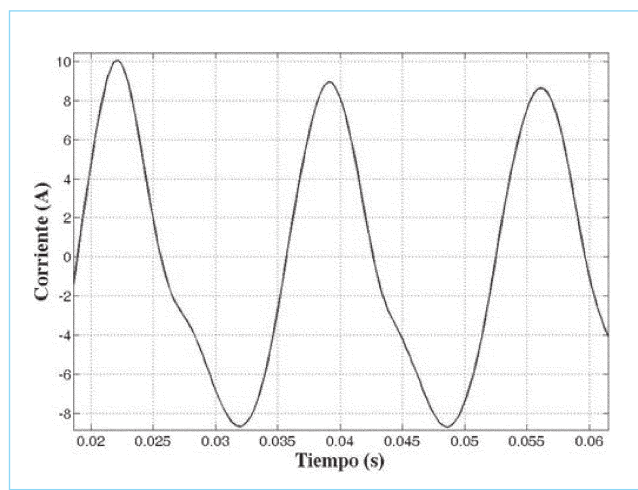


Fig. 7. Acercamiento de la fase a: señal filtrada.

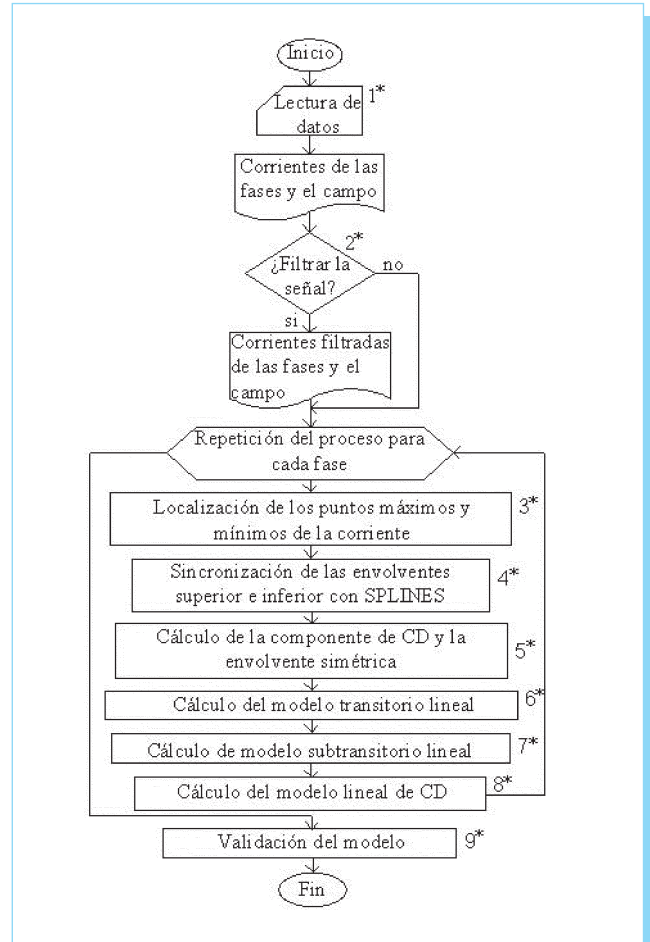


Fig. 8. Diagrama de flujo del programa "ParametrosMS" mejorado.

- Bloque 4*: Se sincronizan los puntos máximos y mínimos utilizando splines cúbicos.
- Bloque 5*: Se obtiene el modelo lineal de la componente de CD y la corriente simétrica.
- Bloque 6*: Se obtiene el modelo lineal de la máquina para el periodo transitorio con de una regresión lineal.
- Bloque 7*: Se obtiene el modelo lineal de la máquina para el periodo subtransitorio con una regresión lineal.
- Bloque 8*: Se obtiene el modelo lineal de la componente de CD.
- Bloque 9*: Se validan los resultados obtenidos.

7. Resultados

Los resultados obtenidos para una micromáquina de polos salientes de 4.5 kVA, con una tensión de línea de 220V y probada a tensión reducida, se presentan de la figura 9 a la 19.

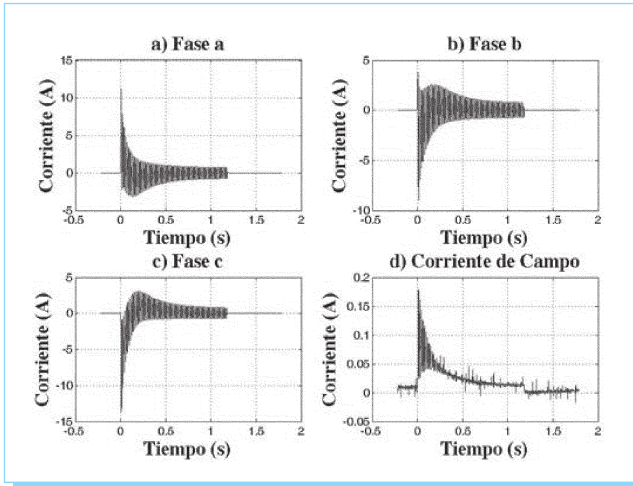


Fig. 9. Corrientes de corto circuito en las fases y el campo filtradas.

En la figura 9 se muestran las corrientes medidas filtradas, y en la figura 10 las corrientes de fase, envolventes, componentes de de CD para la fase a (se omiten las de las fases b y c pero el método de obtención es el mismo). En las figuras 11 y 12 se muestran las gráficas de las corrientes simétricas eficaces que se obtienen con el bloque 5*.

Para el filtro implementado en el bloque 2*, en este caso específico, la frecuencia de corte de $60 \cdot 2\pi$ rad/s y la función de transferencia del filtro es: (6)

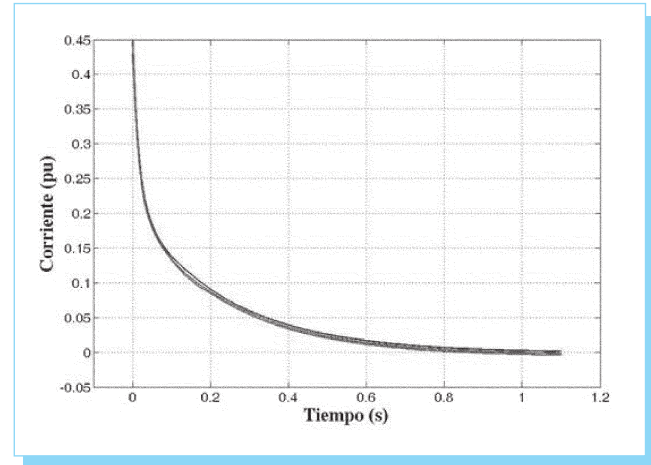


Fig. 11. Envolventes simétricas eficaces de las tres fases.

$$H(s) = \frac{0.0004166s^4 + 0.001666s^3 + 0.0025s^2 + 0.0004166}{s^4 + 3.181s^3 + 3.861s^2 - 2.112s + 0.4383} \quad (6)$$

Las componentes de CD obtenidas para las tres fases con el bloque 5* se muestran en la figura 13. En las figuras 14 y 15 se presentan los modelos subtransitorio (bloque 6*) y transitorio (bloque 7*) respectivamente para las tres fases y la envolvente simétrica promedio. El modelo de las componentes de CD obtenidas en el bloque 8* se incluye en la figura 16. En este punto del programa, se calculan los parámetros dinámicos de la máquina. Para validar los resultados obteni-

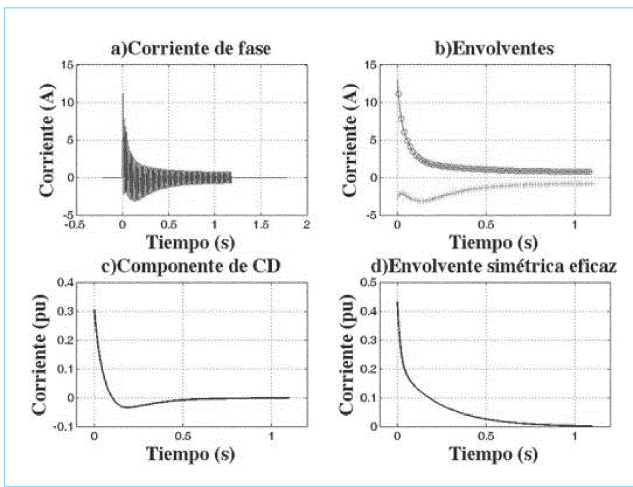


Fig. 10. Fase a: envolventes, componente de CD y envolvente de la corriente simétrica eficaz.

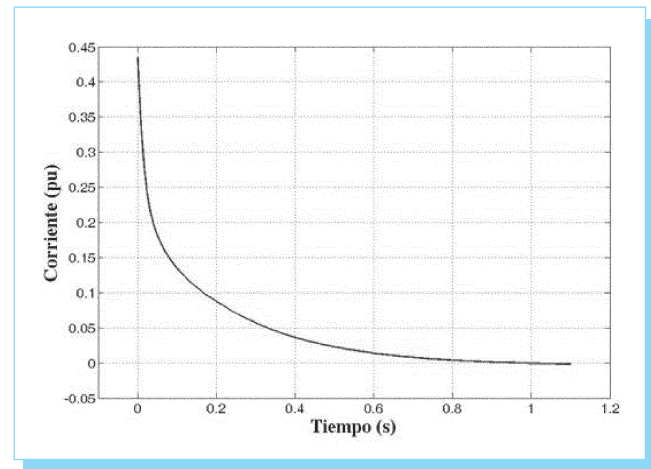


Fig. 12. Envolvente simétrica eficaz promedio.

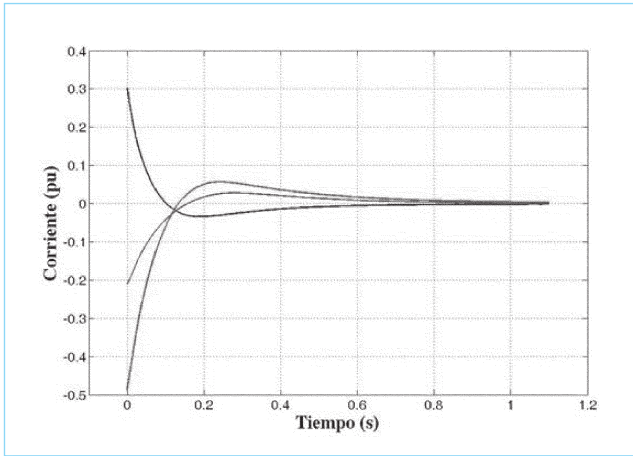


Fig. 13. Componentes de CD de las tres fases.

dos, el primer método aceptado en [3] es la comparación asintótica en el tiempo de cada una de las fases, que se realiza en el bloque 9* y se observa en la figura 17, la cual muestra un ajuste adecuado.

Finalmente, la segunda validación consiste en graficar juntas la señal de corriente medida y la calculada (véase figura 18) a partir de los resultados obtenidos. En la figura 19 se muestra dicha comparación. Se utilizó un ángulo $\lambda = 240^\circ$ y un factor de $X_q^* = 1.6 X_d^*$ para calcular la corriente en línea sólida. Se puede observar que las gráficas no se aproximan exactamente, pero, a diferencia de las obtenidas para la mis-

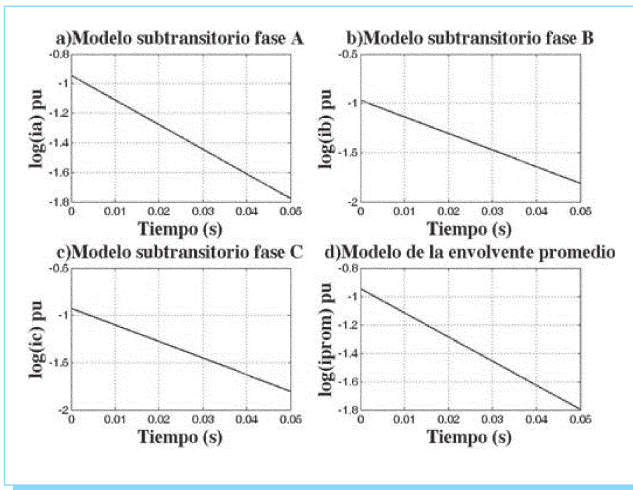


Fig. 14. Modelo lineal subtransitorio.

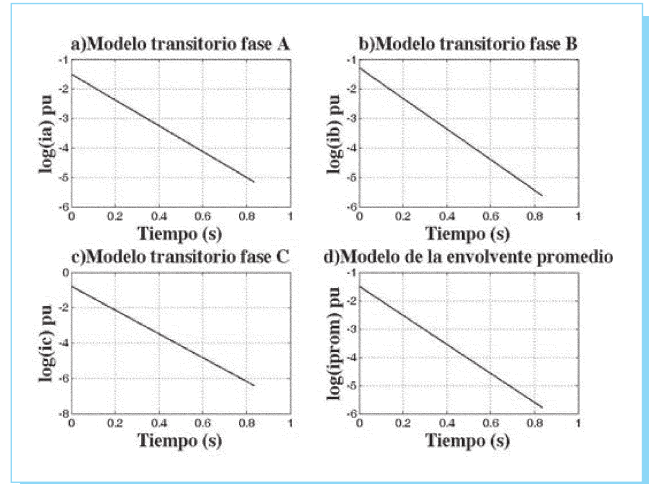


Fig. 15. Modelo lineal subtransitorio.

ma máquina con un periodo mayor de muestreo y presentadas en [2] se observó un mejor ajuste.

En las tablas 1 y 2 se concentran los parámetros de las micromáquinas de polos salientes analizadas con el programa "ParametrosMS" a tensión reducida y tensión plena respectivamente, para las corrientes de fase filtradas con el filtro Butterworth de 4° orden. Estos resultados se pueden comparar con los obtenidos anteriormente en [10] (tablas 3 y 4) sin la subrutina de filtrado y para señales de entrada con un periodo de muestreo mayor.

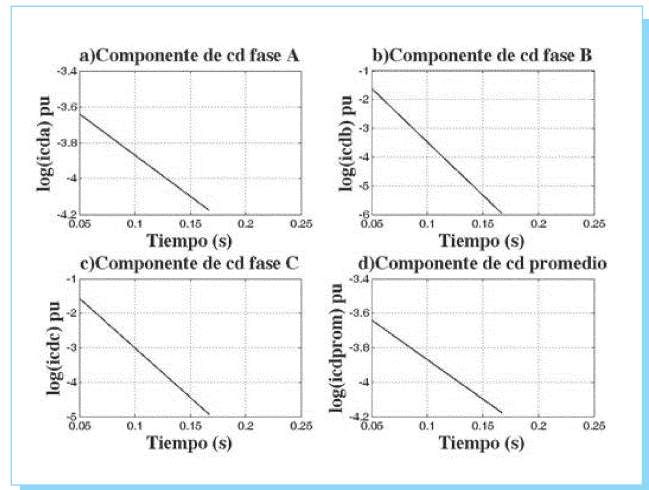


Fig. 16. Modelo lineal subtransitorio.

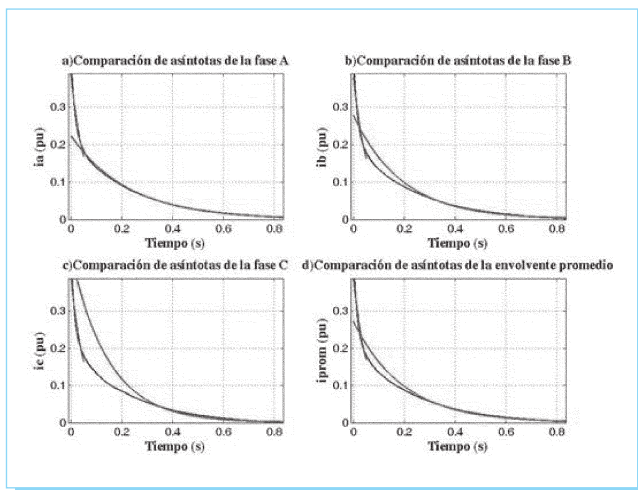


Fig. 17. Fase a: envolventes, componente de CD y envolvente de la corriente simétrica eficaz.

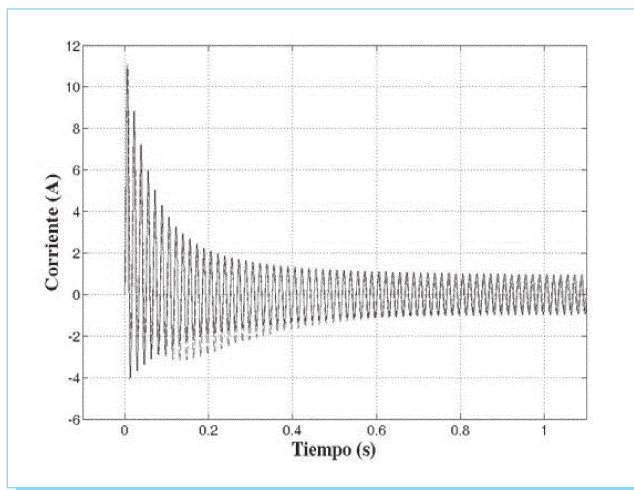


Fig. 19. Fase a: envolventes, componente de CD y envolvente de la corriente simétrica eficaz.

8. Conclusiones

Con la implementación del filtro digital para las señales que contienen los datos de entrada del programa "ParametrosMS" se amplía la capacidad de análisis del mismo ya que no es necesario aumentar el periodo de muestreo para eliminar el ruido, sino que el programa automáticamente filtra las señales de corriente.

En este trabajo se eligió el filtro Butterworth de 4º orden para llevar a cabo los fines deseados debido a varios factores:

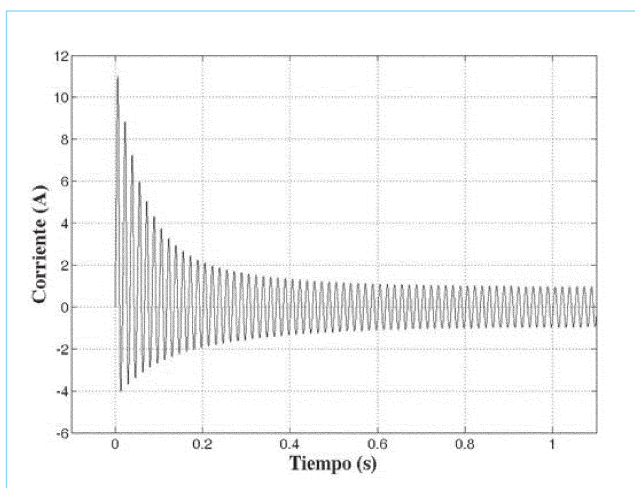


Fig. 18. Fase a: envolventes, componente de CD y envolvente de la corriente simétrica eficaz.

Tabla 1. Parámetros en pu de la máquina de polos salientes a tensión reducida utilizando el criterio IEC. Corrientes de fase filtradas con el filtro Butterworth de 4º orden.

Parámetro	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio	Envolvente promedio
X_d (p.u.)	3.7779	3.5927	3.4053	3.5920	---
X_q (p.u.)	2.2667	2.1556	2.0432	2.1552	---
X_d' (p.u.)	1.1118	0.9198	0.3424	0.7913	0.5961
T_d' (s)	0.2280	0.1922	0.1484	0.1895	0.1484
X_d'' (p.u.)	0.4557	0.4251	0.3326	0.4045	0.3366
X_q'' (p.u.)	0.2734	0.2551	0.1996	0.2427	---
T_d'' (s)	0.0601	0.0594	0.0571	0.0589	0.0588
T_a (s)	0.2183	0.0269	0.0348	0.0933	---

Tabla 2. Parámetros en pu de la máquina de polos salientes a tensión plena utilizando el criterio IEC. Corrientes de fase filtradas con el filtro Butterworth de 4º orden.

Parámetro	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio	Envolvente promedio
X_d (p.u.)	3.4197	3.5342	3.4765	3.4768	---
X_q (p.u.)	2.0518	2.1205	2.0859	2.0861	---
X_d' (p.u.)	0.6420	0.9546	0.4680	0.6882	0.8106
T_d' (s)	0.1818	0.2338	0.2109	0.2088	0.2109
X_d'' (p.u.)	0.3573	0.3851	0.3999	0.3808	0.3855
X_q'' (p.u.)	0.5716	0.6161	0.6398	0.6092	0.6168
T_d'' (s)	0.0296	0.0578	0.0430	0.0435	0.0424
T_a (s)	-0.1141	0.0385	-0.0814	0.0237	---

Tabla 3. Parámetros en pu de la máquina de polos salientes a tensión reducida utilizando el criterio IEC obtenidos en [10] (Corrientes de fase medidas con un periodo de muestreo mayor).

Parámetro	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio	Envolvente promedio
X_d (p.u.)	5.4900	4.6530	5.2800	5.1410	---
X_q (p.u.)	3.2940	2.7918	3.1680	3.0846	---
X_d' (p.u.)	0.8430	0.4682	0.4704	0.5939	0.8124
T_d' (s)	0.2932	0.2208	0.3008	0.2716	0.2882
X_d'' (p.u.)	0.1759	0.1325	0.1805	0.1630	0.0911
X_q'' (p.u.)	0.2814	0.2120	0.2888	0.2608	0.1457
T_d'' (s)	0.0611	0.0584	0.0509	0.0568	0.0564
T_a (s)	0.0256	0.0988	0.0350	0.0531	---

Tabla 4. Parámetros en pu de la máquina de polos salientes a tensión plena utilizando el criterio IEC obtenidos en [10] (Corrientes de fase medidas con un periodo de muestreo mayor).

Parámetro	Fase A	Fase B	Fase C	Promedio	Envolvente promedio
X_d (p.u.)	3.0046	2.8920	2.9065	2.9344	---
X_q (p.u.)	1.8027	1.7352	1.7439	1.7606	---
X_d' (p.u.)	0.7903	0.5212	0.2823	0.5313	0.4894
T_d' (s)	0.2075	0.1721	0.1657	0.1818	0.1657
X_d'' (p.u.)	0.2750	0.2725	0.3037	0.2837	0.2593
X_q'' (p.u.)	0.4400	0.4360	0.4859	0.4539	0.4148
T_d'' (s)	0.0195	0.0591	0.0358	0.0381	0.0325
T_a (s)	1.0831	0.0618	-2.8635	1.3361	---

su respuesta es adecuada y tiene una ganancia casi plana, Matlab® cuenta con una función específica que permite implementarlo de manera sencilla y hacerlo compatible con el resto del programa. Se seleccionó el filtro de 4° orden debido a que, si bien al aumentar el orden del polinomio la respuesta es más precisa, las señales de entrada no contenían componentes de muy alto orden como podrían tener señales digitales para otros propósitos y un filtro de mayor orden no representaría una precisión mucho mayor y si resulta antieconómico en tiempo computacional.

Los parámetros obtenidos con las señales filtradas se ajustan más a los obtenidos en [10] para la prueba de tensión plena, una de las razones es que para la prueba a tensión reducida, las corrientes de las tres fases no tenían un mismo tiempo inicial por lo que se tuvo que agregar un retraso adicional a la señal de entrada para sincronizarlas.

La constante de armadura T_a se calculó con mucha mayor precisión ya que en [10] se obtenían valores muy grandes. Los resultados de este trabajo inicial en la aplicación de filtros son muy interesantes, y las diferencias observadas entre los resultados de las tablas 1 y 2 con los de las tablas 3 y 4 están actualmente en estudio para determinar la mejor manera de realizar las mediciones en el desarrollo de la prueba. Adicionalmente se estudia también el ajuste del filtro para disminuir la diferencia entre ambos conjuntos de parámetros (con filtro y con muestreo más grande), y el efecto del defasamiento producido por el filtro, el cual modificó ligeramente los ángulos para realizar la comparación de la figura 19. También se puede mencionar que se puede utilizar filtrado adaptivo a los registros con lo cual se mejoraría los resultados obtenidos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el financiamiento otorgado por el CONACyT en el proyecto núm. 83701. También agradecen por las becas PIFI y CONACyT para realizar estudios de maestría otorgadas al primer autor.

9. Referencias

- [1] Juárez, L., Asiain, T. I., y Ruiz D., "Programa para determinar los parámetros dinámicos de máquinas síncronas", *Memorias del 5° Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, Instituto Politécnico Nacional, México, DF, noviembre 10-14, 2008.
- [2] Juárez-Caltzontzin, L. L., "Determinación de los parámetros dinámicos de máquinas síncronas por medio de un programa de computadora digital". tesis de licenciatura, ESIME-Zacatenco, IPN, México, 2008.
- [3] Kamwa, I., Pilote, M., Carle, H. Viarouge, P. Mpanda-Mabwe, B. Crappe, M., "Computer Software to Automate the Graphical Analysis of Sudden Short Circuit Oscillograms of Large Synchronous Machines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, núm. 3, pp. 399-406, septiembre, 1995.
- [4] Kamwa, I., Pilote, M., Carle, H. Viarouge, P. Mpanda-Mabwe, B. Crappe, y Mahfoudi, R., "Experience with Computer-Aided Graphical Analysis of Sudden-Short-Circuit Oscillograms of Large Synchronous Machines" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, núm. 3, pp. 407-414, septiembre, 1995.
- [5] Kimbark, E. W., *Power System Stability: Synchronous Machines*. Dover Publications Inc., 1956.
- [6] Ziemer, R. E., Tranter, W. H., y Fannin D. R., *Signals and Systems. Continuous and Discrete*, Macmillan Publishing Co., 1983.

- [7] Mejía-Ramírez A., y Trinidad-Hernández, G., "Determinación de parámetros dinámicos en máquinas síncronas a escala utilizando la prueba convencional en el dominio del tiempo", tesis de licenciatura, ESIME-Zacatenco IPN, México, 2007.
- [8] Oppenheim, A. V., y Schaffer, R. W., *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall Inc., 1989.
- [9] Haykin, S. y Van Venn, B., *Signals and Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [10] Juárez-Caltzontzin, L. L., Trinidad-Hernández, G., Asiaín-Olivares T. I., y Ruiz-Vega, D., "Theoretical and Experimental Analysis of the Short Circuit Current Components in Salient Pole Synchronous Generators" *Proceedings 11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering (11CHLIE)*, 1-4 julio, 2009, Zaragoza, España.
- [11] Naidoo, R. M. y Pillay, P., "A nonlinear adaptive filter for improved power system operation and protection", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004.

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

758 revistas

16 610 números

205 429 artículos a texto completo

www.redalyc.uaemex.mx