

MODELAJE EN MÁQUINAS SINCRÓNICAS DE POLOS SALIENTES DE 220 MVA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO CARUACHI PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS

Ing. Estéves Héctor José
Serv. Eléctricos, PDVSA
Estevesh@pdvsa.com

M.Sc. Alexander Millán
C.V.G. EDELCA
almillan@edelca.com.ve

M.Sc. Juan Toledo
C.V.G. EDELCA
Jtoledo@edelca.com.ve

SINOPSIS

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de simulaciones aplicadas a modelos computacionales a escala de los Generadores Sincrónicos de Polos Salientes del Proyecto Hidroeléctrico Caruachi, a través de la aplicación del Método de Elemento Finito (MEF) en dos (2) dimensiones. Para la obtención de dichos Parámetros se ejecutó en el software CAD Flux2D 4.0 la Prueba de Respuesta de Frecuencia con la Máquina en Reposo (SSFR), Característica de Corto Circuito (SCC) y la Característica de Vacío (OCC), además se presentan los resultados de los Parámetros no saturados que permitieron validar la geometría de los modelos aplicados. Una vez obtenidos los valores experimentales, se verificaron con los datos entregados por el fabricante, debido a que la Unidad Generadora N°1 de Caruachi será instalada en su totalidad a mediados del año entrante (2003), por lo tanto los datos de diseño se tomaron sólo como referencia temporal.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio está comprendido por etapas que permiten obtener un modelo computacional del Generador Sincrónico y a partir de éste calcular por medio de ensayos y cálculos matemáticos los valores de los parámetros característicos de este tipo de Máquinas Eléctricas. La metodología aplicada para conseguir las expresiones específicas para la realización de los cálculos, está basada en la aplicación de las leyes físicas concernientes a cada caso, desarrolladas mediante técnicas matemáticas apropiadas, hasta llegar a una ecuación general de fácil aplicación. Para cada una de las simulaciones se consideró las inductancias de dispersión, corriente de circulación entre polos, efecto piel, entre otros factores que influyen significativamente en los resultados definitivos.

2. DESARROLLO:

2.1 PARÁMETROS DE UN GENERADOR

Para garantizar el funcionamiento integral de un generador de energía eléctrica, cada una de las partes que lo conforman es sometida a diversas pruebas, desde el momento de su fabricación hasta su máximo periodo de vida útil. Una vez que los generadores, los equipos de excitación y los equipos auxiliares están listos para entrar en operación, se les aplica un conjunto de pruebas de montaje en el sitio, con la finalidad de determinar si el generador ha sido debidamente ensamblado, instalado y que se hayan ejecutados correctamente los ajustes requeridos para la operación comercial, una manera de referencia es la determinación y comparación de los *Parámetros del Generador*, debido a que en función de estos es que se garantiza el correcto funcionamiento de los equipos. Además en estas pruebas se busca verificar las características eléctricas principales de las unidades para determinar si cumplen con las especificaciones del contrato.

2.2 GENERADORES DE CARUACHI

Los Hidrogeneradores en estudio poseen las siguientes características:

Tabla 1: Características de Placa de los Generadores de Caruachi.

GENERADORES DE CARUACHI	
Potencia	220 MVA
Tensión	13.8 KV
Velocidad	94.74 RPM
Corriente de armadura nominal	9204 AMP
Corriente de campo a plena carga	1646 AMP
N° Polos	76
N° Ranuras	576
N° de fases	3
N° de grupos paralelos por fase	4
EntreHierro	20.5 mm
N° Dev Amortiguadores/polo	6



Figura 1: Rotor de la Unidad Generadora N°1 de Caruachi

2.3 PARÁMETROS NO SATURADOS

Estos cálculos se realizaron sobre los ejes “d” y “q” de la Máquina Síncrona en estudio, utilizando dos (2) modelos, a través de la aplicación Magnetostática del Flux2d.

2.3.1 Modelo de un (1) Polo

Inicialmente se realizó la representación más simple de la máquina, es decir, el modelo de un (1) polo. Figura 2.

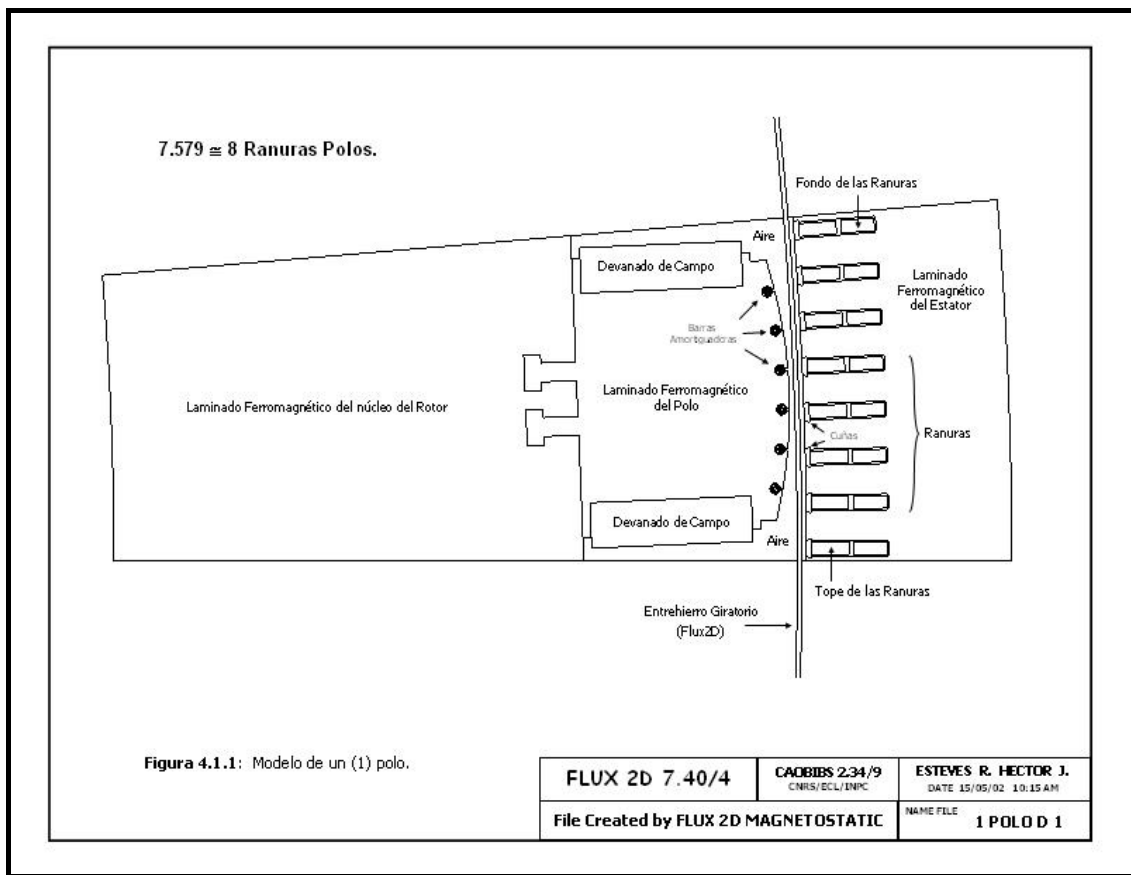


Figura 2: Modelo de un (1) polo.

Existe un total de 7.579 ranuras por cada polo (se tomó 8 ranuras por cada polo para la construcción del modelo). Aunque el modelo de 19 polos es el ideal para realizarle los ensayos, es más conveniente usar en ocasiones el modelo de un (1) polo, sobre todo por el tiempo de procesamiento y memoria en el computador.

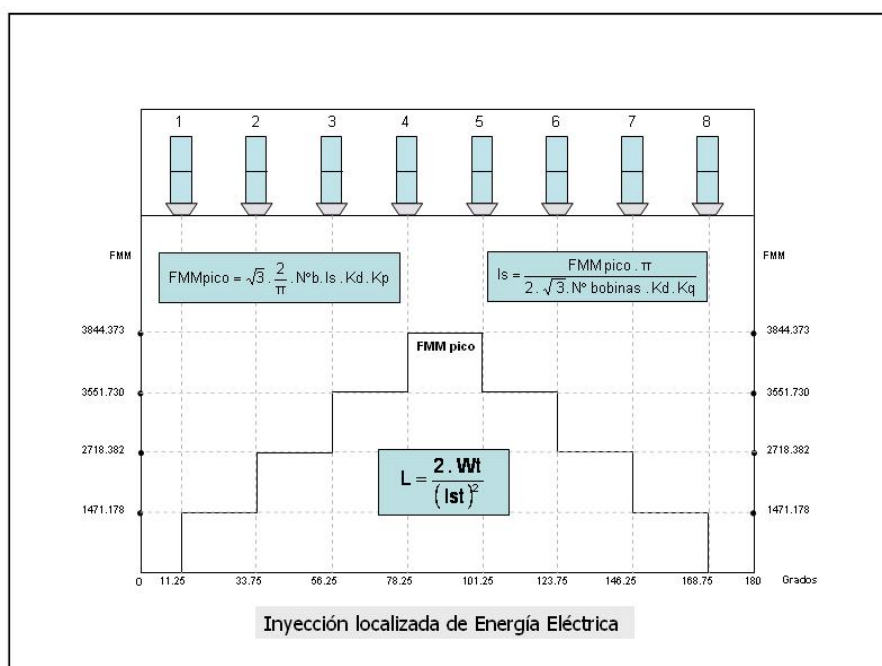


Figura 3: Distribución de Fuerza Magneto Motriz.

Como es necesario encontrar una distribución equivalente del devanado del estator que sea generada por una fuente externa que excite al sistema de manera análoga al Devanado Distribuido de la máquina real, se debe inyectar una corriente localizada en cada ranura del modelo, produciendo una FMM esparcida espacial y/o simétricamente a través de las ranuras que forman parte de esta fracción de la máquina. Ver figura 4.

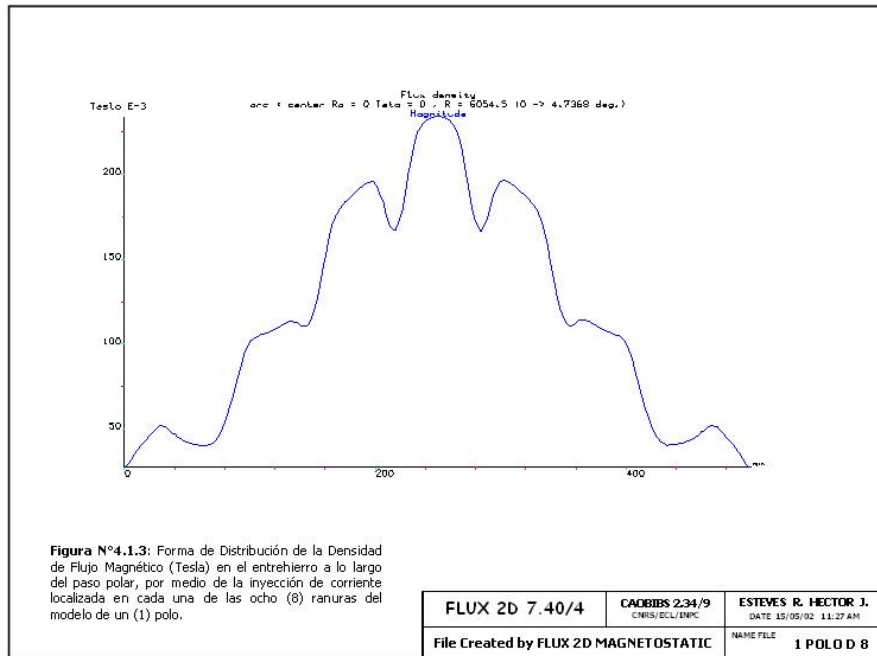


Figura 4: Distribución de la FMM - Flux2d.

2.3.2 Modelo de 19 Polos

Este modelo representa un cuarto (1/4) de la máquina, además existe un número entero de ranuras/polos (144 ranuras, 19 polos) y se cumple con la periodicidad del Devanado Estático, siendo esta configuración, la fracción de la máquina mínima donde están presentes estas propiedades, consecuentemente no se realizó ninguna aproximación, lo que supone resultados más ciertos que en el modelo de un (1) polo. Ver figura 5.

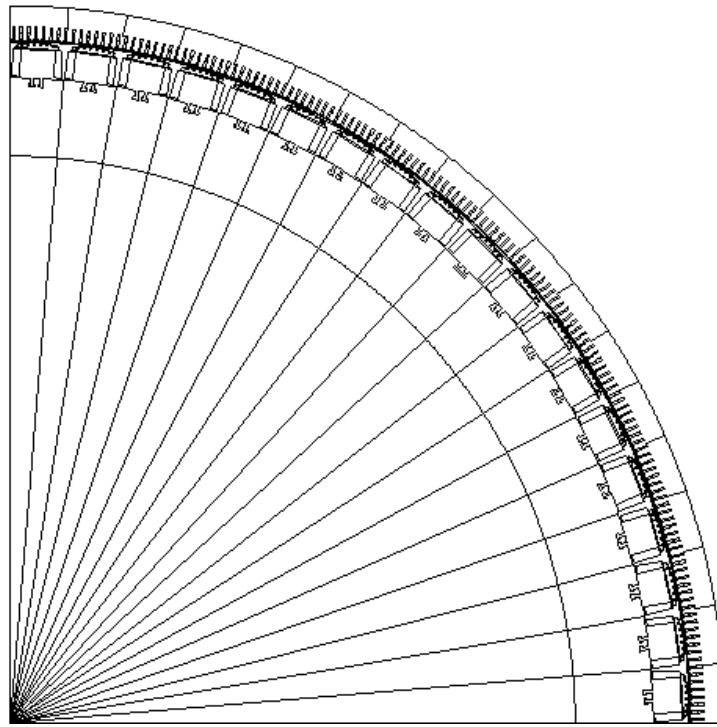


Figura 5: Modelo de 19 polos.

Luego de realizar el Cálculo de las inductancias para cada modelo se determinó que tanto afecta la aproximación de 7.579 ranuras a 8 en el modelo de un (1) polo.

Tabla 2: Comparación entre Modelos.

RESULTADOS DE LOS MODELOS DIGITALES			
Parámetro	Modelo de un polo	Modelo de 19 polos	Desviación (%)
L_d (pu)	0.96	0.97	1.03
L_q (pu)	0.69	0.69	0.00

2.4 ANÁLISIS DINÁMICOS

Con la intención de considerar efectos presentes en la SSFR se realizaron modelos aislados para simular fenómenos dinámicos presentes en el Generador; tales como el Efecto Piel.

2.4.1 Modelo de la Ranura del Estator

Este modelo fue usado para determinar el Efecto Piel en el Devanado Estatórico (ver figura 6).

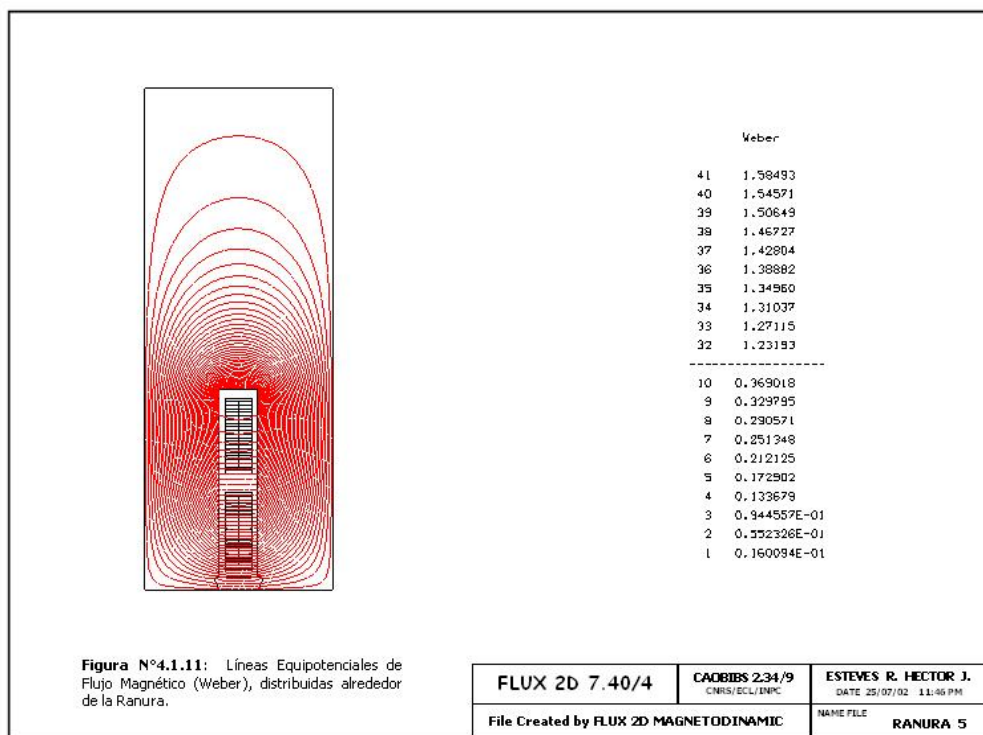


Figura 6: Líneas Equipotenciales de Flujo Magnético (Weber), distribuidas alrededor de la Ranura.

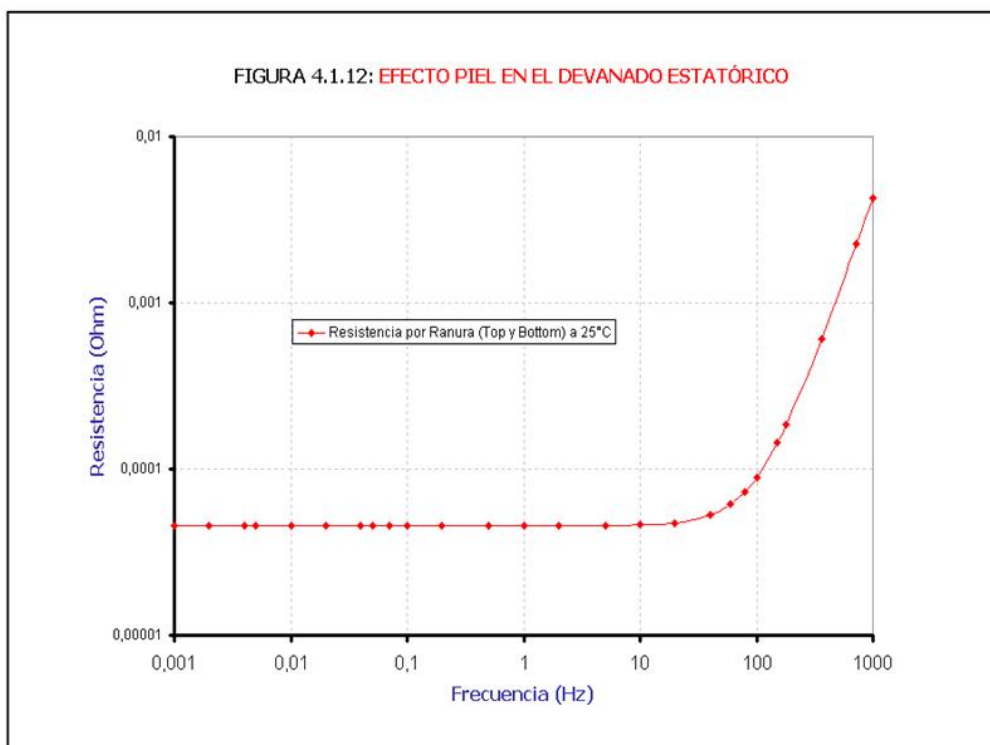


Figura 7: Efecto Piel en el Devanado de Armadura.

2.4.2 Modelo del Devanado de Campo

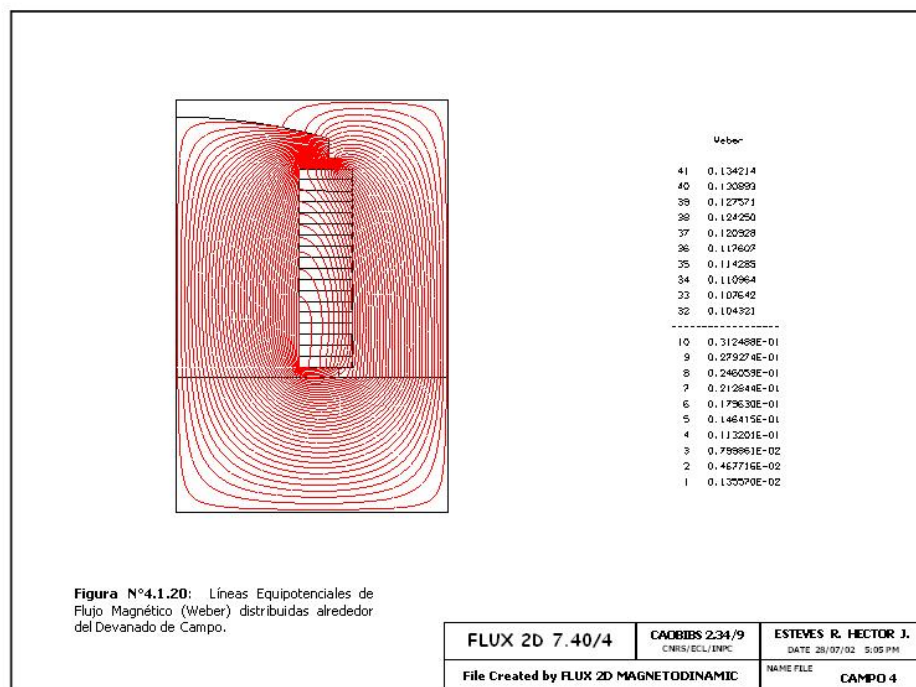


Figura 8: Líneas Equipotenciales de Flujo Magnético (Weber), distribuidas alrededor del Campo.

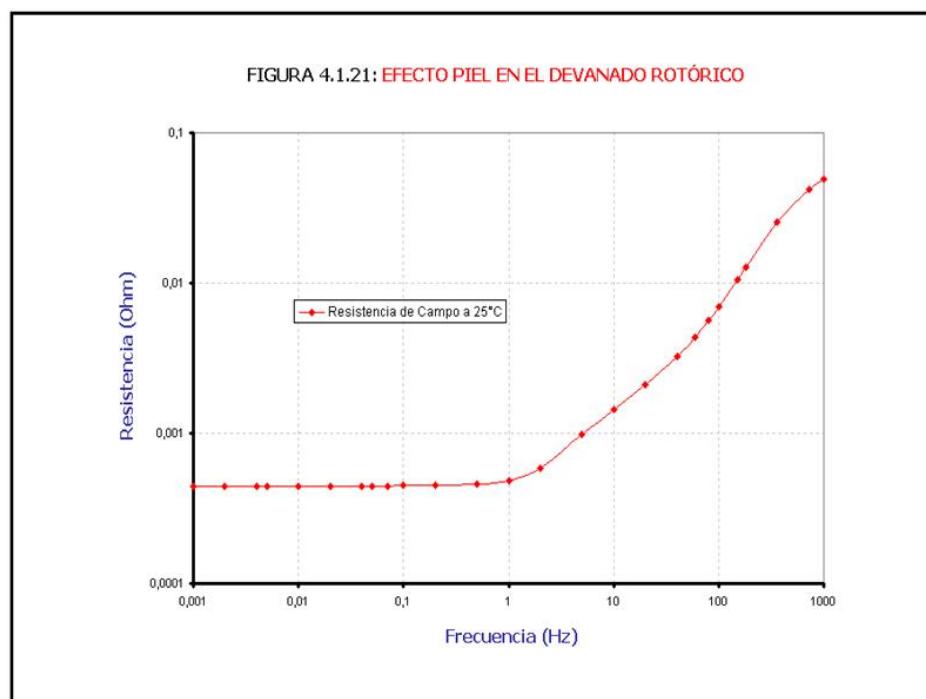


Figura 9: Efecto Piel en el Devanado de Campo.

2.4.3 SSFR

El procedimiento seguido para la realización de esta prueba está descrito el STD 115 de la IEEE.

La obtención de los parámetros de un modelo a partir de los datos obtenidos en el ensayo de la SSFR de la máquina estudiada requiere el ajuste de datos a un modelo previamente seleccionado para obtener coeficientes que reflejen el valor de los parámetros de la máquina, para esto es necesario manipular una cantidad considerable de información y el uso de procedimientos iterativos o métodos numéricos, lo que hace necesario utilizar una herramienta de cálculo adicional. La herramienta es un programa para computadora elaborado en un lenguaje orientado a objetivos (Matlab), en el que se usa el procedimiento de obtención del modelo preliminarmente escogido. Esto nos permitió obtener las curvas de magnitud y fase del generador bajo premisas en función del número de orden de la función de transferencia y error de los resultados, atendiendo recomendaciones de la IEEE y estudios previos.

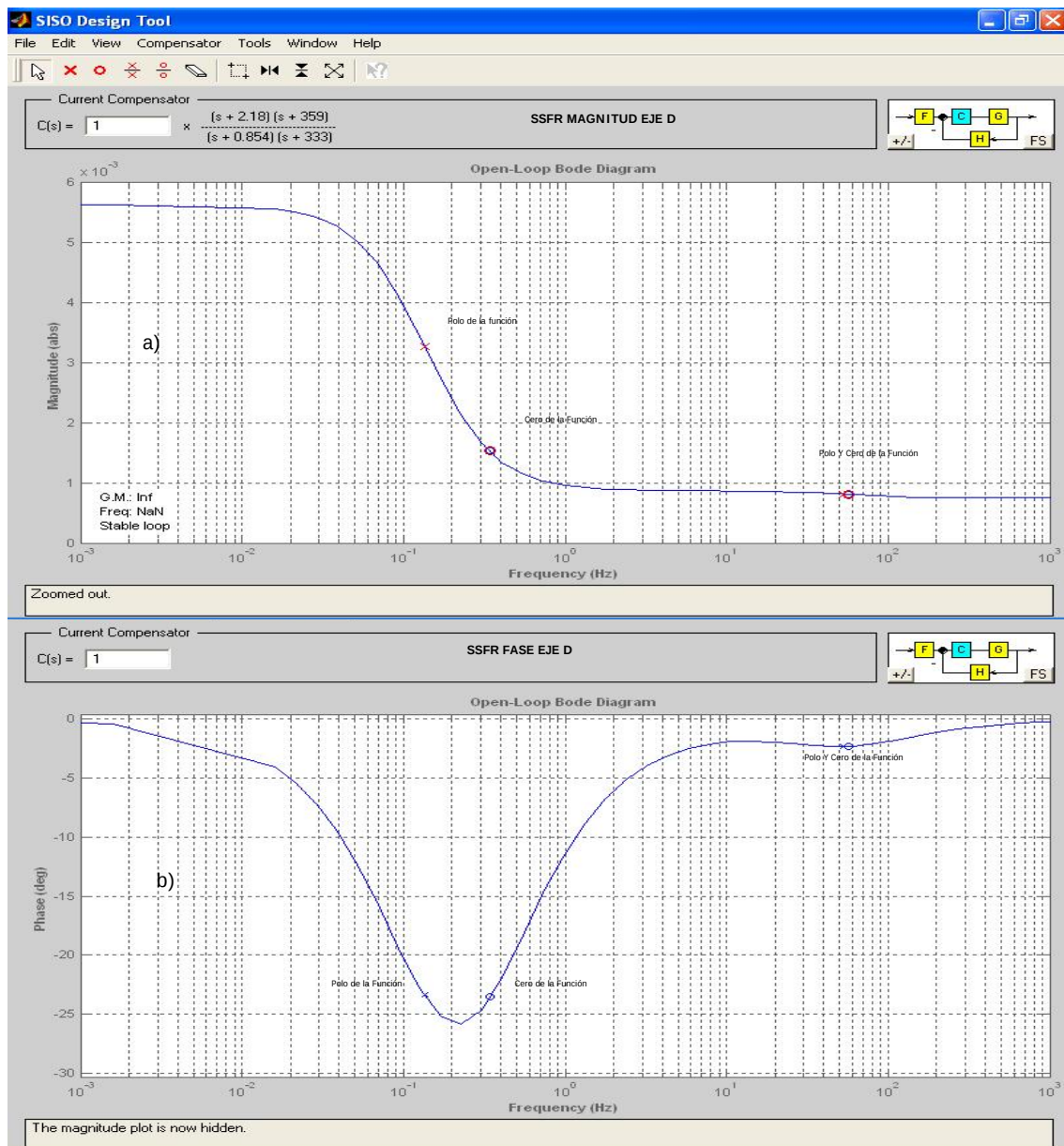


Figura 10: SSFR eje “d” a) Magnitud; b) Fase.

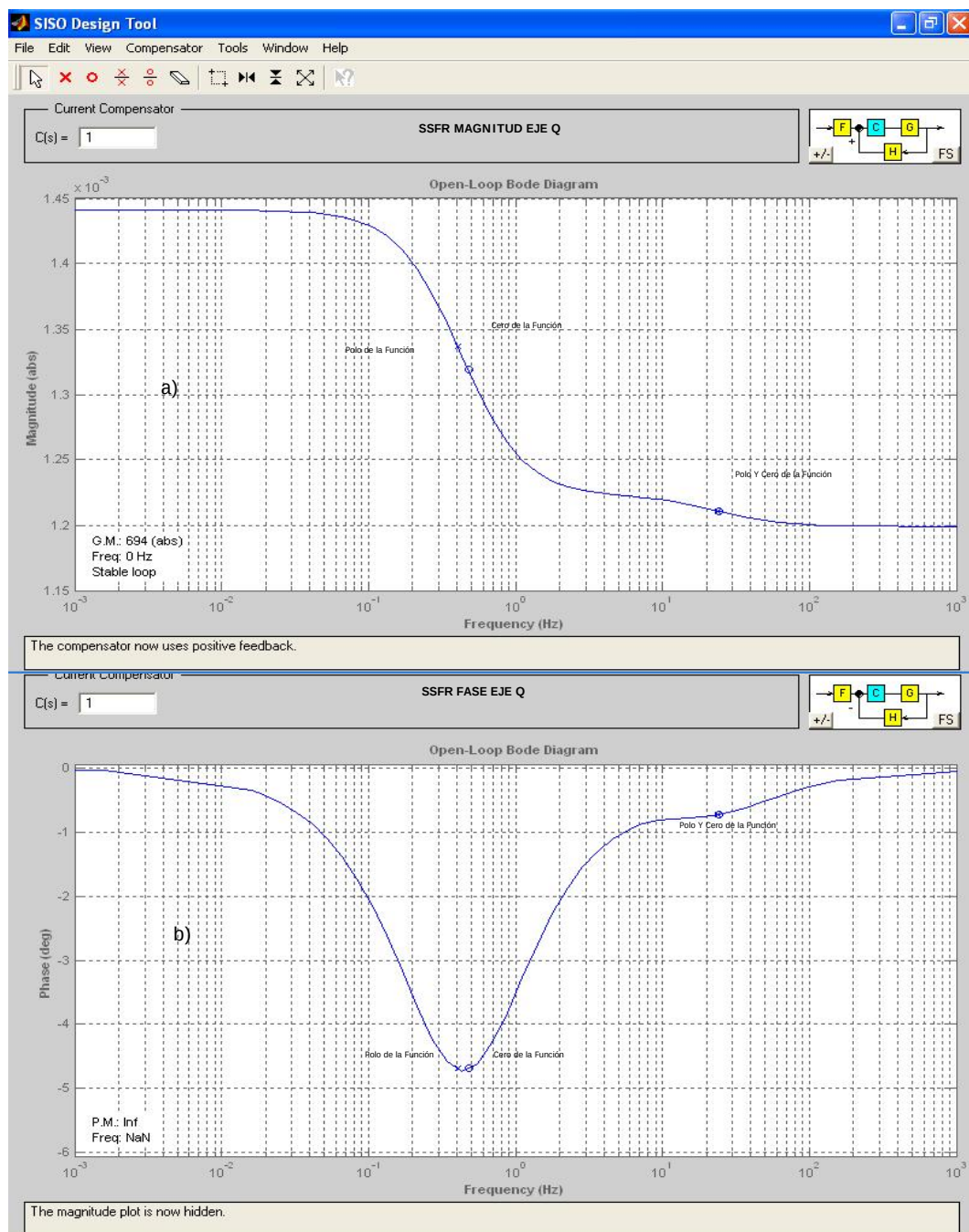


Figura 11: SSFR eje “q” a) Magnitud; b) Fase.

Tabla 3: Parámetros de la SSFR en el eje “d”.

VALORES PARA EL EJE DIRECTO D		
Parámetro	Modelo Flux2d	Valor en p.u.
T'_d	0.46 s	--
T''_d	0.0027 s	--
T'_{do}	1.17 s	--
T''_{do}	0.0030 s	--
L_d	0.0020469 Henrys	0.89
L'_d	0.0010670 Henrys	0.46
L''_d	0.0007737 Henrys	0.33

Tabla 4: Parámetros de la SSFR en el eje “q”.

VALORES PARA EL EJE DIRECTO Q		
Parámetro	Modelo Flux2d	Valor en p.u.
T’q	0.3320s	--
T’’q	0.0065 s	--
T’qo	0.392 s	--
T’’qo	0.0066 s	--
Lq	0.00144 Henrys	0.63
L’q	0.001392 Henrys	0.60
L’’q	0.0012105 Henrys	0.52

El MEF se basa en el estudio de una o varias variables por medio de aproximaciones numéricas, que a través de procesos de cálculos matemáticos deben ser continuamente ajustados con valores referenciales; debido a esto y a estudios previos realizados [2] y antecedentes de tesis doctorales, se estima que los valores obtenidos en sitio tengan una desviación porcentual dada con respecto a los valores alcanzados por medio de los modelos digitales. En la SSFR estas desviaciones son causados principalmente en los valores transitorios, donde el Efecto Piel en el laminado del acero (rotor y estator) influye significativamente en el comportamiento final de los parámetros estudiados, dicha alteración no puede ser compensada en estos momentos por la falta de estos valores para la fecha y limitaciones en la herramienta de cálculo empleada; por lo cual se deberá realizar una etapa de ajuste del modelo cuando se obtengan los valores de SSFR en sitio, con la intención de obtener un modelo que represente lo más exacto posible a cada Generador Síncrono real que ha sido ensamblado para la operación comercial.

2.5 OCC

Cabe destacar que debido a la falta de la curva de saturación de los núcleos laminados del estator, rotor y polo, no suministrada por el fabricante, se realizaron los ensayos para un valor constante de permeabilidad relativa en los aceros ($\mu_r=8400$), y por tal motivo no es posible observar la saturación magnética en el acero. En otras palabras las simulaciones permitieron obtener la línea de entrehierro de la máquina en estudio [5].

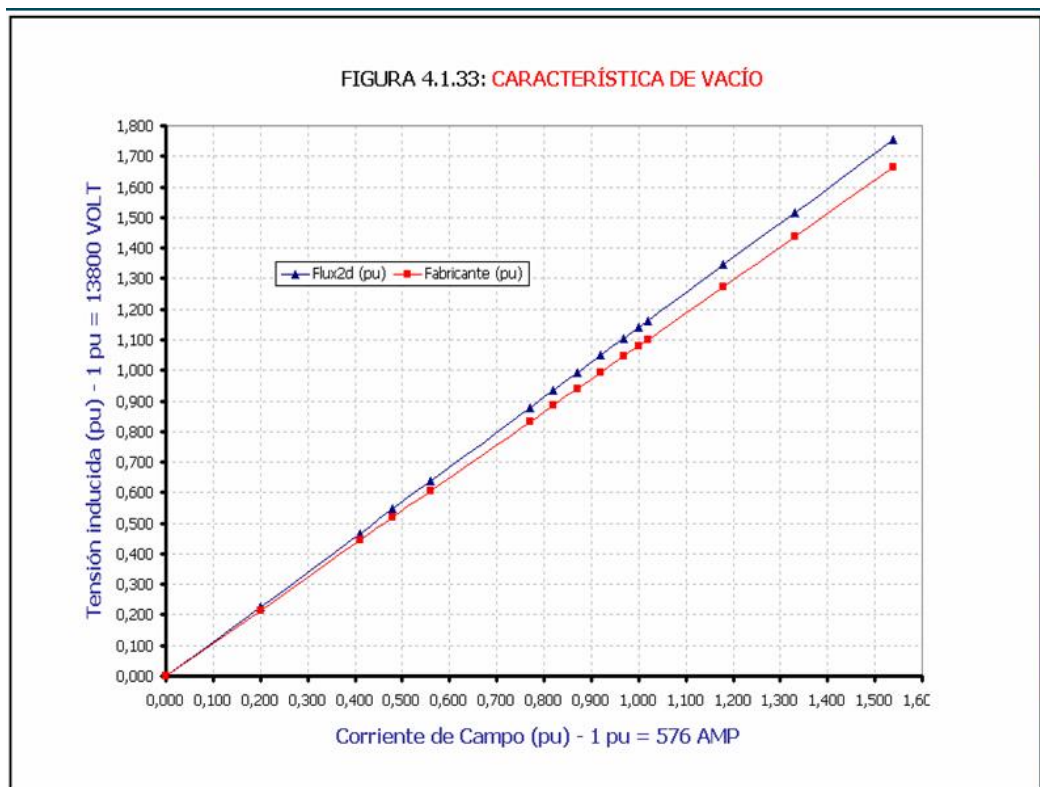


Figura 12: OCC de las Máquinas de Caruachi.

2.6 SCC

Esta prueba conjuntamente con la OCC, permiten obtener la Reactancia Sincrónica de la Máquina [7].

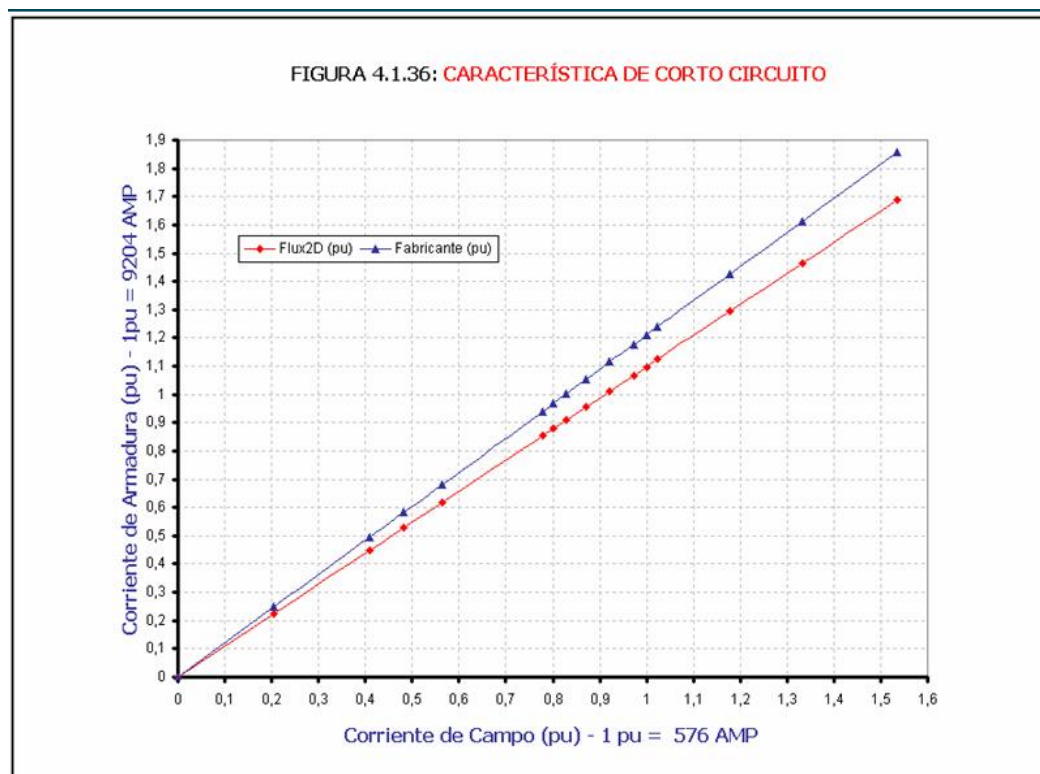


Figura 13: SCC de las Máquinas de Caruachi.

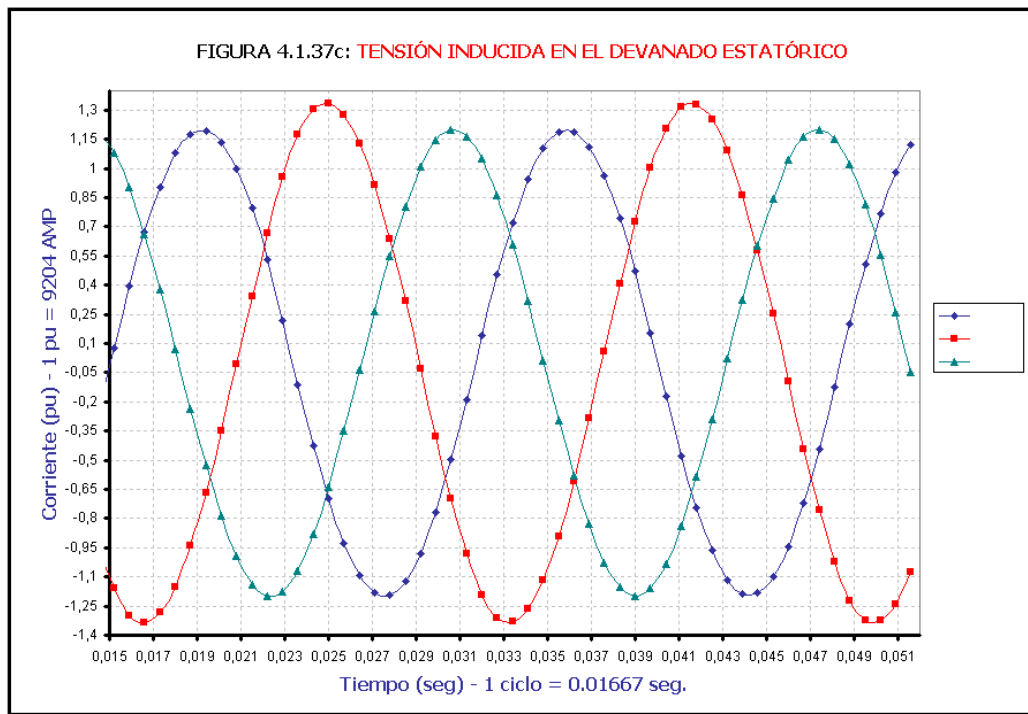


Figura 14: Corriente de Armadura - SCC.

Para esta prueba se usó el modelo de 19 polos en la aplicación Transitorios Magnéticos y por medio del circuito externo, se logró la interconexión del Devanado de Armadura. El valor resistivo de los “coil” usados en Flux2D, se obtuvo en el Efecto Piel del modelo de la Ranura del Estator para 60 Hz.

2.7 REACTANCIA SINCRÓNICA

A partir de los resultados de la OCC y SCC se calcula la Reactancia Sincrónica del Generador.

Este cálculo es realizado para diferentes corrientes de campo y los resultados son mostrados en la figura 15.

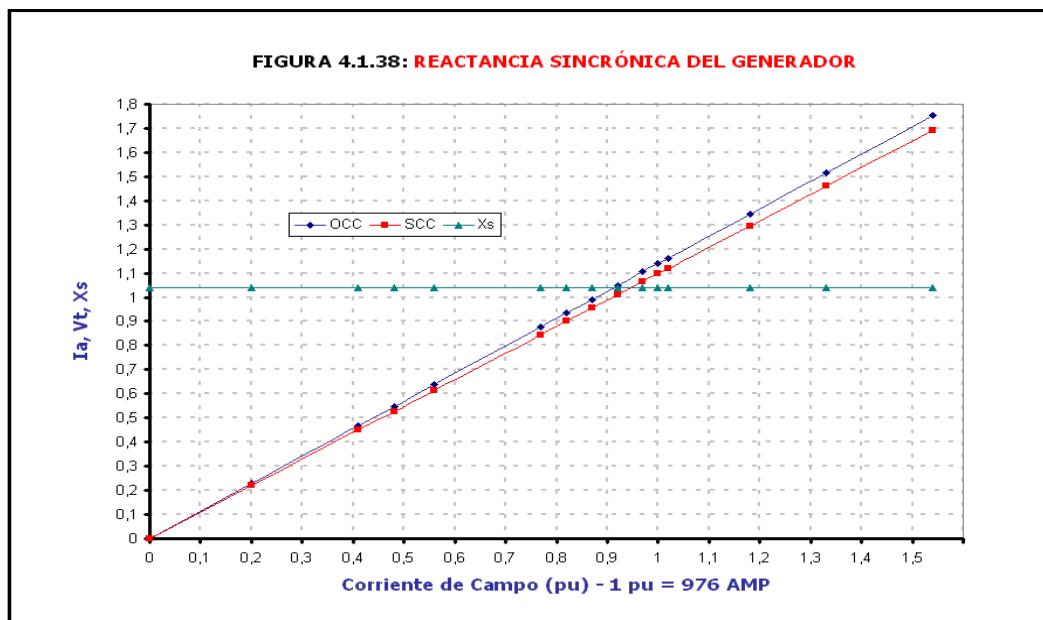


Figura 15: Reactancia Sincrónica – Flux2D

3. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el cálculo de los Parámetros de los Generadores Sincrónicos de Polos Salientes del Proyecto Hidroeléctrico Caruachi, se concluye lo siguiente:

1. La representación general de los modelos digitales empleados a través del MEF son una buena referencia de la máquina en estudio, a causa de que los valores entregados por las simulaciones son bastante similares a la referencia, según fue comprobado durante el transcurso de la validación.
2. En los últimos tiempos a existido una tendencia generalizada que evidencia con datos sólidos y concluyentes que los resultados de simulaciones basadas en el MEF son más cercanas a la realidad (los valores tomados en sitio), que los valores indicados en la hoja de datos entregada por el fabricante, debido a esto se tendrá que esperar por la culminación de la Unidad número 1 de Caruachi, y poder comparar con los valores verdaderos. Por ahora se toma al diseñador sólo como referencia temporal a la hora de realizar estas simulaciones.
3. El estudio del MEF a través del programa computacional Flux2D certificó un medio ordenado para la cimentación de una solución aproximada a una aplicación compleja en análisis dinámicos y/o estáticos de la máquina estudiada. La característica modular del software permitió además que un mismo modelo fuese usado para representar una amplia gama de situaciones, sólo con añadir dispositivos o variantes.
4. La aproximación de 8 ranuras asumida en el modelo de un polo, no afecta significativamente la exactitud de los resultados esperados (ver tabla 4.1). Por lo tanto y en base a los resultados se concluye que el modelo de un polo puede ser usado como una fracción real (y no aproximada) de la máquina, sin acarrear algún tipo de error.
5. Se evidenció en el ensayo SSFR, que para altos valores de frecuencia el Efecto Piel en el laminado de los tres aceros (núcleo del estator, rotor y del rotor) perturba de manera considerable los resultados. Por trabajar en modelos de dos (2) dimensiones, para esta etapa del proyecto de afinación de los modelos digitales hacia el prototipo real de la Máquina Sincrónica, no fue posible considerar este tipo de efecto.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Institute Of Electrical And Electronics Engineers: "Test Procedures For Synchronous Machines". Comité de Maquinas Eléctricas de la IEEE. ANSI/IEEE Std 115-1995.
- [2] AZUAJE, Carlos: "Advances In Hydrogenerator Models". Thesis Doctoral. Instituto Politécnico Rensselaer. Troy, New York, 1997.
- [3] KRAUSS, L.: "Signal Processing Toolbox for use with Matlab". Editorial Shure, J.N. Little. November 1993.
- [4] KUNDOR, Prabha: "Power System Stability and Control". Editorial McGraw-Hill, Inc. Palo Alto, California 1994.
- [5] KOSTENKO, M y PIOTROVSKI, L.: "Máquinas Eléctricas Vol. 2". Montaner y Simon, S.A. Barcelona España, 1979.

- [6] FITZGERALD, A. E. y KINGSLEY, C.: “Máquinas Eléctricas”. Editorial McGraw Hill. México 1994.
- [7] CHAPMAN, Stephen: “Máquinas Eléctricas”. Editorial McGraw Hill Interamericana, S.A.. Santa fé de Bogotá, Colombia, 2000.
- [8] AMAYA, Martha Cecilia: “Determinación de los Parámetros de una Máquina Sincrónica Mediante la Simulación de los Ensayos de Corto Circuito Trifásico Súbito y Restablecimiento de Tensión por el Mef”. Tesis de Maestría. Universidad del Valle, Bogotá, Colombia. 2002.
- [9] MILLAN, Alexander: “Análisis de Armónicos de Corriente en los Generadores Sincrónicos de la Central Hidroeléctrica Macagua II”. Tesis de Mestría. Instituto Politécnico “Antonio José de Sucre” Vice-rectorado de Puerto Ordaz, 2001
- [10] FLUX2D: “User's Guide Version 7.40. Finite Element Análisis”. Magsoft, USA. Copyright 1999.
- [11] TOLEDO, Juan: “Modelización, Determinación Y Análisis De Los Campos Electromagnéticos En Los Sistemas De Transmisión Por El Método De Elementos Finitos”. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas, Venezuela. 2000.
- [12] BOZORTH, Richard: “Ferromagnetism”. Editorial Board. IEEE, Press. New York, USA. 1993.

MICROBIOGRAFÍAS DE LOS AUTORES

Héctor J. Esteves R, obtuvo el título de Ingeniero Electricista (Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice Rectorado de Puerto Ordaz, 2002), Actualmente realiza una Maestría (Generación y Transmisión, 2004). Su Tesis de Pregrado obtuvo el primer lugar en el área de Sistemas de Potencia premio IEEE-Inelectra en el 2003. Su experiencia profesional abarca el manejo de paquetes computacionales de simulaciones numéricas y operación de sistemas eléctricos de potencia. Desde 2003 se desempeña como Supervisor del Centro de Operaciones T&D Eléctrica Morichal Edo. Monagas y sus principales áreas de interés son: Compensación de Sistemas Eléctricos de Potencia, Simulación de Máquinas Eléctricas, Elaboración de Partidas y análisis de precios unitarios.

Juan Toledo H, (S'89-M'01) nació en Caracas, DF, Venezuela en 1961. Se graduó de Ingeniero Electricista en la Universidad Simón Bolívar USB en 1992. Obtuvo el título de Magíster Scientiarum MSc, opción Sistemas de Potencia en la Universidad Central de Venezuela UCV en el 2000. Desde 1991 se desempeña en CVG. EDELCA. En los actuales momentos se encuentra ejerciendo labores en el Dpto. de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingeniería de Construcción en el Proyecto Hidroeléctrico Caruachi como Ingeniero de Proyectos IV. Es miembro de las siguientes instituciones CIV, AVIEM, IEEE-PES, IEEE-Magnetics, AsoVac, CIGRE, SVMNI.

Alexander J. Millán R, se graduó de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vicerrectorado de Pto. Ordaz, UNEXPO. Obtiene su título de Magíster Scientiarum MSc en Generación y Transmisión de Energía en la misma institución en el 2001. Es profesor ordinario de la UNEXPO-Pto. Ordaz en Pregrado y Postgrado. En los actuales momentos se encuentra ejerciendo funciones como ingeniero de pruebas en el Dpto. de Investigación y Pruebas de Generación adscrito a la División De Ingeniería de Mejoras de Generación de CVG. EDELCA.