



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

**ESTUDIO Y ANÁLISIS ELECTROMAGNÉTICO EN COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE GENERADORES
SÍNCRONOS DE POLOS SALIENTES UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

**Diodomiro B. Luque
UNICAMP**

**Ernesto Ruppert Filho. (*)
UNICAMP**

RESUMEN

Este trabajo utiliza las técnicas de los elementos finitos en el análisis electromagnético de la máquina síncrona. Es de interés: la identificación de parámetros, el comportamiento en corto-circuito trifásico repentino desde el punto de vista de distribución de flujo magnético.

Se analizaron varios procedimientos de ensayos descritos en (8) y (9). Es posible con el uso de herramientas computacionales estudiar el comportamiento electromagnético del generador síncrono con la finalidad de mejorar un determinado proyecto de diseño, disminuir pérdidas magnéticas, optimizar la densidad de flujo magnético y así en reducir el tiempo de proyecto como también el costo del mismo.

PALABRAS-CLAVES

Generadores síncronos, método de los elementos finitos (MEF), distribución de flujo magnético, determinación de parámetros.

1.0 - INTRODUCCIÓN

Actualmente los generadores síncronos son los responsables en su gran mayoría por la producción de energía en el mundo. Varios estudios de comportamiento dinámico en sistemas eléctricos son realizados a través de simulaciones matemáticas donde el generador se convierte en la parte más importante del modelo, esto se debe al interés principalmente en determinar adecuadamente los parámetros transitorios y que éstos a su vez conlleven a obtener una respuesta que pueda representar eficazmente un determinado modelo dinámico. Estos parámetros pueden ser determinados a través de una combinación de análisis de resultados obtenidos por diferentes ensayos como son: ensayo de circuito abierto, ensayo de corto circuito repentino cuando la máquina está en la condición de vacío, ensayos de respuesta en frecuencia (SSFR), ensayos de carga simétrica y asimétrica, ensayo en pequeñas señales, disminución de corriente directa (DC decay) entre otros.

El proyecto clásico de máquinas eléctricas se inicia por lo general con una determinada configuración mecánica donde algunas de las dimensiones ya son conocidas. A partir de una configuración inicial predeterminada de la máquina proyectada -que constituye una primera aproximación- se busca obtener las fuerzas magnetomotrices, la distribución de los flujos concatenados y de dispersión. Actualmente, son necesarios procedimientos de cálculo de proyecto cada vez más eficientes y el uso de herramientas computacionales se hace absolutamente necesarias. Por esta razón se desarrollaron técnicas de dimensionamiento utilizando métodos de elementos finitos (MEF) apoyándose en modelos preliminares cuyas relaciones son obtenidas a través de la ley de similitud (1).

Mediante el uso del método de los elementos finitos es posible calcular la distribución de flujo magnético en toda la superficie física de la máquina, obteniendo así el valor de la densidad de flujo magnético en todos los puntos de la máquina a través de la solución de las ecuaciones envueltas en el cálculo. A través de esos resultados obtenidos podemos ajustar las dimensiones físicas del generador síncrono e incluir también los resultados del cálculo mecánico e térmico de la máquina. Por otro lado, se debe considerar una configuración apropiada para las regiones del estator y rotor para así satisfacer las especificaciones técnicas de dimensionamiento de la máquina que son necesarias en el proyecto de diseño eléctrico. Por lo tanto, es necesario entender la relación existente entre configuración física propiamente dicha, las características eléctricas y distribución de flujo del generador síncrono.

El estudio analítico del comportamiento de las máquinas síncronas en régimen permanente y régimen transitorio requieren una adecuada representación de los parámetros en el circuito equivalente así como también de los valores característicos de la máquina. El método tradicional sugiere una serie de ensayos para un determinado comportamiento a fin de obtener tales parámetros (8) y (9).

La idea básica de este trabajo es realizar el análisis electromagnético estudiando el comportamiento de la distribución de flujo magnético, utilizando para tal el método de los elementos finitos. Las características geométricas del modelo utilizado y sus valores nominales están referidas en [6]. Es de interés el estudio y el análisis de la distribución de flujo en las condiciones de: régimen permanente y comportamiento dinámico (transitorio). Existen en el mercado diferentes herramientas computacionales basados en elementos finitos que dan soporte para realizar este tipo de estudios. Para realizar un modelo a través de este método se requiere conocer los datos geométricos y las propiedades físicas de los circuitos eléctricos y magnéticos que envuelven a la máquina. En seguida se debe realizar un pre-procesamiento y posterior cálculo mediante MEF. Las respuestas obtenidas por este método pueden ser utilizadas para optimizar el proyecto de diseño de nuevas máquinas o usarlas en máquinas ya existentes sin ninguna limitación y riesgo que involucra un ensayo real. Actualmente, estos análisis se realizan mediante un determinado procedimiento aún no normalizado, los cuales se describirán más adelante.

2.0 - MODELO COMPUTACIONAL

2.1 Consideraciones preliminares

Para realizar el estudio y análisis de una máquina usando las técnicas de los elementos finitos se requiere tener en cuenta algunos criterios de dimensionamiento y técnicas de proyecto. Antes de hacer un análisis con el MEF, se estudia analíticamente el comportamiento del generador síncrono; tal estudio se completa con diversas hipótesis simplificadoras que permiten evaluar aproximativamente las grandezas electromagnéticas envueltas. De esa forma, a través de un análisis sucesivo mediante los elementos finitos serán evidenciados los eventuales errores, además de los diversos resultados analíticos y numéricos estos pueden ser confrontados para evaluar la incidencia de la simplificación adoptada tanto en el estudio analítico así como en el modelo MEF. La evaluación mediante MEF debe considerar el volumen, la carga eléctrica, la carga magnética impuesta en el proyecto, la permeabilidad del material, la configuración de los dientes del estator, el dimensionamiento de los polos del rotor cuidando la dispersión magnética para evitar pérdidas. En el trabajo haremos referencia de esas relaciones que tienen que ver con el análisis y estudio del generador síncrono.

En la figura 1 se muestra una estructura simplificada del proceso de modelamiento basado en elementos finitos.



FIGURA 1 – Estructura simplificada

El procedimiento de simulación a través del método de los elementos finitos (MEF) por lo general se realiza en 3 etapas principales:

1. Pre-procesamiento:
 - Representación de las dimensiones físicas del modelo
 - Selección de los materiales que lo componen
 - Configuración de la corriente de excitación y el tipo de arrollamiento del estator
2. Generación de la solución
 - Generación adecuada de mallas
 - Condiciones de frontera (Dirichlet y Neumann)
3. Post-procesamiento
 - Análisis de resultados

- Determinación de parámetros
- Circuito equivalente

La etapa de pre-procesamiento consiste en preparar los datos iniciales para el cálculo a través del método de los elementos finitos. Una lista de comandos son generados con la finalidad de representar adecuadamente el modelo en estudio, esto se realiza basándose en un conocimiento detallado de los datos geométricos y las propiedades físicas de los circuitos eléctricos y magnéticos de la máquina síncrona. A seguir, en la figura 2 se muestra un esquema que representa los pasos necesarios en la etapa de pre-procesamiento.

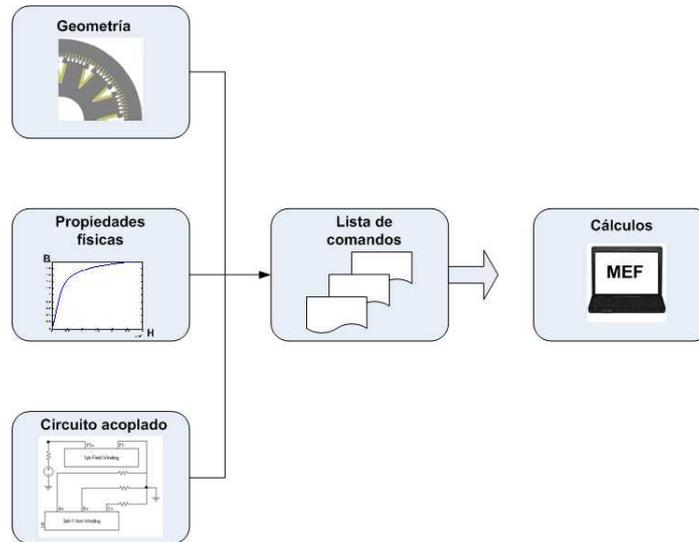


FIGURA 2 – Etapa de pre-procesamiento

Para la segunda etapa existe la posibilidad de usar diversos recursos computacionales, en nuestro caso, los cálculos son realizados usando "GenAC" y FEMM, dos programas basados en elementos finitos (2) y (3). Las características de estos dos programas se complementan, el primero es utilizado para realizar cálculos dinámicos y el segundo es utilizado para realizar cálculos en régimen permanente.

La etapa de post-procesamiento se ocupa de sistematizar los resultados obtenidos del MEF ver figura 3. Estos resultados sirven para construir el circuito equivalente de la máquina mediante la determinación de parámetros, en el caso de comportamiento dinámico las constantes de tiempo y también para otros propósitos de análisis. Mediante el análisis de la corriente de campo para las condiciones nominales de tensión y corriente de estator podemos obtener todos los parámetros del circuito equivalente (4). Dependiendo de las características constructivas del rotor, se puede determinar las grandezas y obtener el circuito equivalente basándose en un modelo de una, dos o tres constantes de tiempo. En principio, cuanto más constantes de tiempo, habrá mayor aproximación a los resultados obtenidos mediante los ensayos. Para un generador con rotor de polos salientes dos constantes de tiempo son suficientes (7). Es posible definir un modelo con más de dos constantes de tiempo pero los cálculos se hacen cada vez más complejos.

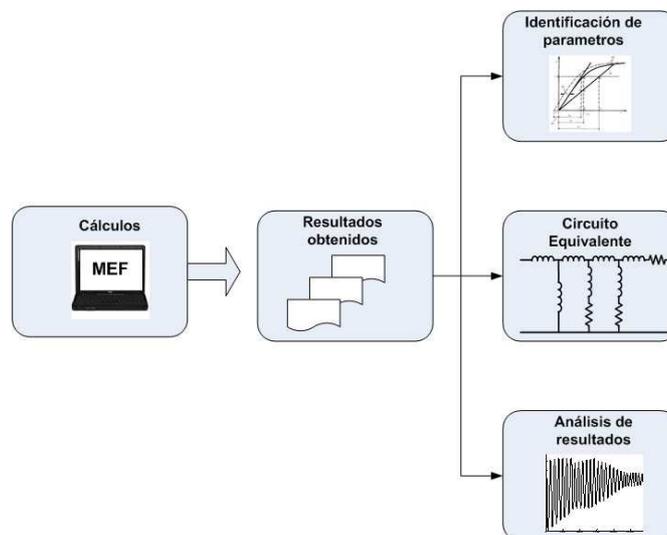


FIGURA 3 – Etapa de post–procesamiento

2.2 Modelamiento usando MEF

Para realizar un adecuado modelo basado en el método de los elementos finitos en relación a los nodos y tamaño de elementos triangulares debemos tomar especial atención a la generación de mallas, pues, si excedemos en colocar elementos en espacios menos significativos aumentaremos el tiempo de procesamiento y en muchos casos esto no es conveniente principalmente en máquinas de grande tamaño, por lo tanto se debe tener en cuenta un criterio de compensación entre estos dos parámetros a fin de mitigar las deficiencias en ambas partes. Inicialmente suele realizarse un mallado grotesco lo cual dará una idea general sobre la cantidad de elementos utilizados para luego ir incrementando hasta obtener un modelo acorde a los requerimientos de nuestro análisis. Por otro lado algunas herramientas computacionales ofrecen la opción de mallado automático esto no es una garantía de que el modelo está siendo mallado adecuadamente pues dependiendo del tipo de estudio a realizarse la región de interés puede ser diferente. Por otro lado, herramientas con éstas características son útiles porque proporcionan un soporte inicial a los usuarios no familiarizados con este tipo de trabajo.

La característica geométrica de la máquina desde el punto de vista tridimensional requiere también de modelos MEF en 3D. Hoy en día es posible realizar estudios de esta naturaleza pero aún siguen siendo restrictivos principalmente en aplicaciones donde los cálculos son repetitivos. Esta es una de las razones por las cuales se opta por trabajar con modelos en dos dimensiones (2D).

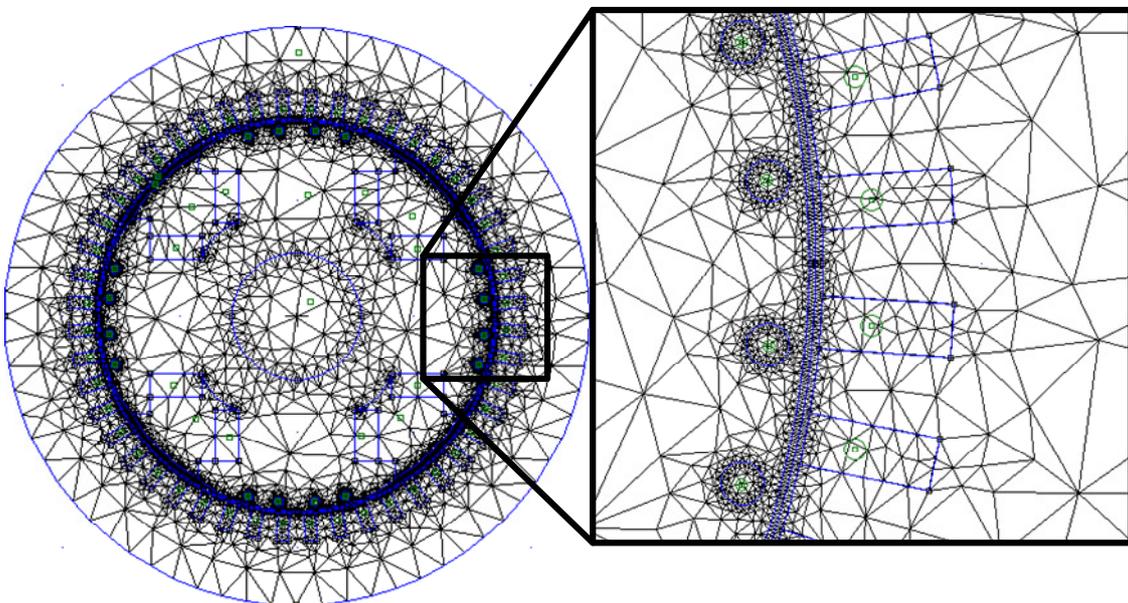


FIGURA 4 – Optimización del mallado

La figura 4 muestra un ejemplo de mallas optimizadas, podemos observar en el detalle mostrado que se coloca un número mayor de mallas en el espacio del entrehierro y en las ranuras del estator ligeramente mayor al de la región del estator pues en nuestro caso es el lugar interés para el análisis electromagnético, pues se desea que el vector de campo magnético en la región del entrehierro sea radial al estator y consecuentemente maximizar su magnitud, aunque esto sea una hipótesis meramente ideal. Además, un adecuado mallado en esta región nos indicará con mayor detalle el grado de dispersión de flujo magnético que pueda existir gracias al elevado número de elementos impuestos.

Un problema a enfrentar en los modelos 2D es representar las regiones conocidos como cabezas de bobina en inglés "end-winding" tanto para el rotor así como para el estator, esto se resuelve haciendo una serie modelos particulares, con la finalidad de obtener un valor aproximado de las dispersiones que existen en estas regiones. Este mismo procedimiento se puede realizar para las barras amortiguadoras de los polos salientes.

2.3 Metodología de análisis electromagnético

Estudio del generador síncrono mediante el uso del método de los elementos finitos en 2D supone realizar un análisis solamente en la sección frontal de la máquina, despreciando en esta etapa el efecto de borda y suponiendo que se repetirá el comportamiento de la máquina para toda la región longitudinal de la máquina. En otras palabras se supone una simetría en el plano (x, y) , en consecuencia el vector potencial $\mathbf{A} = (0, 0, A_z)$ y la densidad de corriente $\mathbf{J} = (0, 0, J_z)$, tienen sólo componentes en el eje z , mientras que el vector de inducción $\mathbf{H} = (H_x, H_y, 0)$, y el campo magnético $\mathbf{B} = (B_x, B_y, 0)$, tienen componentes sobre el plano (x, y) (5).

3.0 - ANALISIS DE RESULTADOS

Los valores nominales del generador y sus especificaciones técnicas se muestran resumidas en la tabla 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1 – Características nominales del generador síncrono

Potencia nominal	188 kVA
Tensión nominal	380 V
Corriente nominal de estator	285 A
Factor de potencia	0,8
Velocidad	1800 rpm

Tabla 2 – Especificaciones técnicas del generador síncrono de polos salientes

	Estator	Rotor	Unidades
Entrehierro		2,5	[mm]
Frecuencia		60	[Hz]
Número de polos		4	
Número de fases		3	
Número de ranuras	48		
Diámetro Externo	500	336	[mm]
Diámetro Interno	341	110	[mm]
Longitud	230	230	[mm]
Materiales	S-18	S-18	
Eje		S-45	
Barras por polo (Damper)		4	

3.1 Cálculo de las características en vacío

Para realizar el análisis en vacío alimentamos el devanado de campo con una corriente constante considerando el número de espiras por ranura. Los devanados de estator conocidos como devanados de armadura son considerados en abierto, por tanto no existe corriente circulando en sus devanados lo que se caracteriza como una conductibilidad nula. Tanto estator como rotor son representados por las características B-H del material ferromagnético utilizado. Definido las condiciones de frontera para el modelo en estudio se calcula la densidad de flujo y el flujo concatenado con los devanados distribuidos adecuadamente en las tres fases del estator y también la fuerza electro motriz (fem) inducida. En la figura siguiente observamos la densidad de flujo en la región del entrehierro el cual nos sirve para calcular los armónicos que se ven inducidos en la fuerza electro motriz.

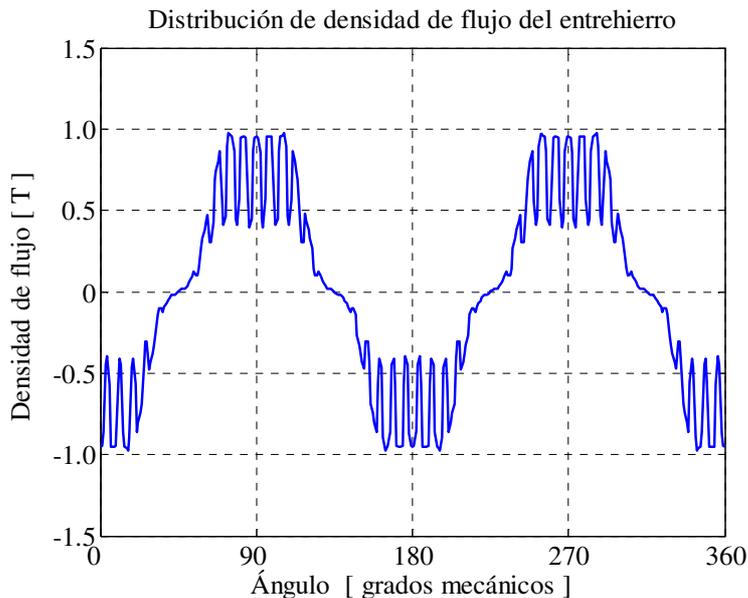


FIGURA 5 – Densidad de flujo en el entrehierro

La ecuación generalizada para obtener el flujo concatenado basado en MEF considera el vector potencial magnético “**A**” para su cálculo. La ecuación siguiente es utilizada para la determinación de flujo concatenado.

$$\Lambda_j = 2pL_{fe} \frac{n_q}{n_{pm}} \sum_{q=1}^{Q/2p} k_{jq} \frac{1}{S_q} \int_{S_q} A_z dS \quad j = a, b, c \quad (1)$$

Donde $2p$ indica el número de polos, L_{fe} indica la longitud del hierro en sentido axial, Q indica el número total de ranuras del generador, $Q/2p$ es el número de ranuras por polo, k_{jq} es el coeficiente que determina si el conductor de la ranura pertenece o no a la j -ésima fase, n_q indica el número de conductores en cada ranura, n_{pm} el número de conductores paralelos de la máquina, S_q es la sección de la ranura y A_z el vector potencial magnético.

Para obtener la fuerza electro motriz (fem) inducida buscamos determinar el flujo concatenado máximo sobre la fase “a”, esto significa haber escogido el eje polar directo “d” sobrepuesto al eje de la fase “a” es decir el ángulo entre ambos es cero, es en esta condición y con la velocidad de rotación constante es obtenida el valor eficaz de fem inducida E_a . En la figura 6a, se muestra el flujo concatenado de las fases a,b,c en la región del entrehierro, en la figura 6b, se representa la transformación del flujo concatenado para los ejes d-q. Esta transformación de $f(a,b,c)$ para $f(d,q)$ simplifica los cálculos subsecuentes.

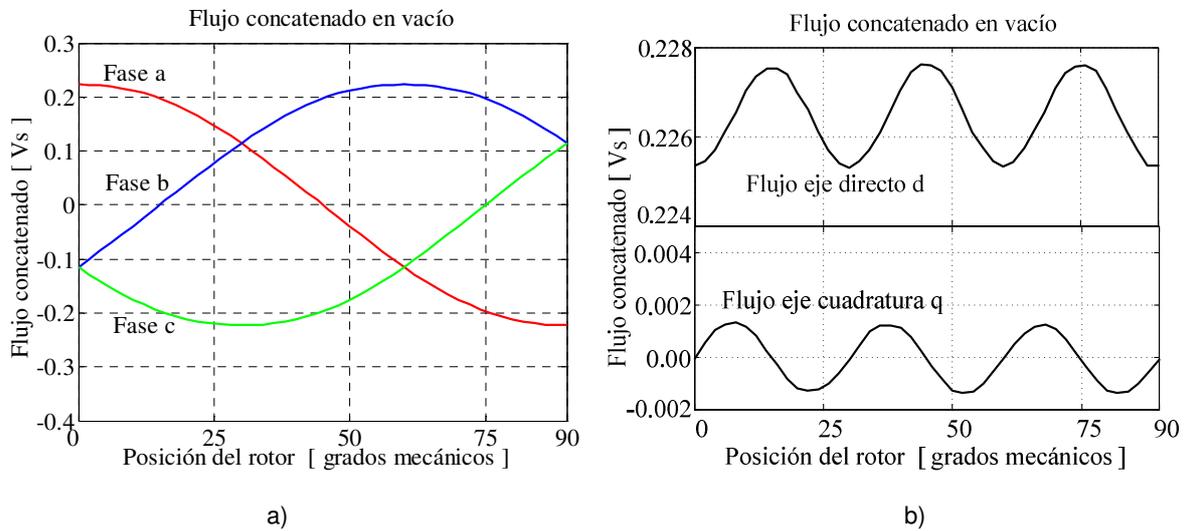


FIGURA 6 – Flujo concatenado: a) fases a,b,c y b) flujo d-q

3.2 Determinación de parámetros

Los parámetros de generador síncrono son obtenidos a partir de los ensayos: en vacío, corto circuito, saturación en vacío, pequeño deslizamiento, corto circuito repentino y auxiliándose de los diagramas de Potier referenciados en las normas (8) y (9). Además para calcular las inductancias, son usados las ecuaciones de flujo concatenado de la inducción al entrehierro en el post-procesamiento del método de los elementos finitos a partir de la ecuación siguiente:

$$\Lambda_j = \sum L_j I_j \quad j = d, q \quad (2)$$

Donde d, q corresponde al eje directo y de cuadratura. El valor de la inductancia de eje directo y de cuadratura se calculan separadamente, en esta condición el flujo concatenado inducido al entrehierro utilizado representa solo el valor de la fundamental, siendo menos sensible al contenido armónico de la fuerza magnetomotriz. Para considerar la inductancia de dispersión realizamos el cálculo mediante la ecuación de energía magnética.

$$W = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{2} LI^2 \right) \quad (3)$$

La inductancia obtenida a través de esta ecuación considera la inductancia de dispersión. Por tanto, esta inductancia de dispersión es obtenida de las ecuaciones 2 y 3.

En la figura 7 se muestra las curvas características de los ensayos para la determinación de parámetros usando (8) y (9).

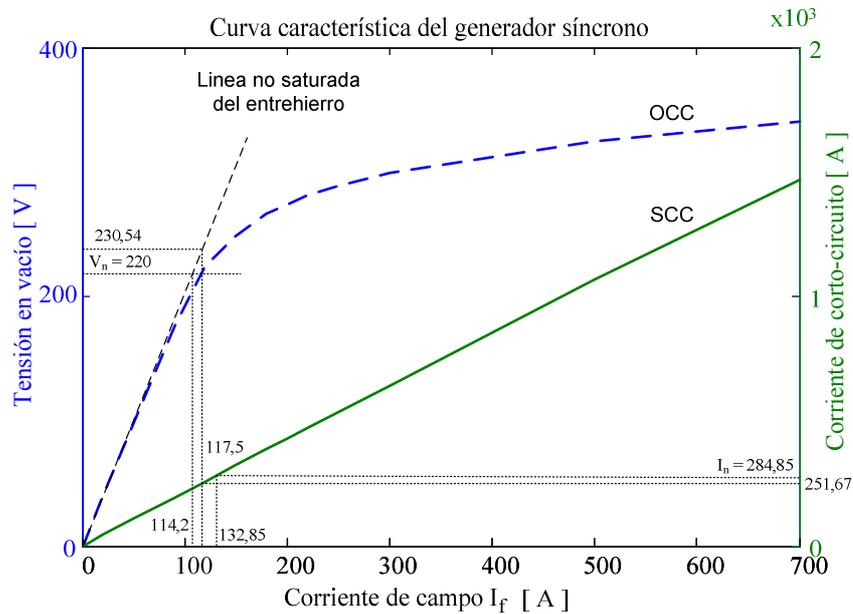


FIGURA 7 – Curvas características para determinar

Los valores obtenidos mediante los procedimientos anteriores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 – Parámetros del generador síncrono por unidad (pu)

$R_a = 0,0150$	$X_d = 1,1181$	$X'_d = 0,095$	$X''_d = 0,0445$
$R_f = 0,0202$	$X_q = 0,5373$	$X_l = 0,0897$	$X''_q = 0,0491$

3.3 Análisis en régimen transitorio

Todos los datos obtenidos en régimen transitorio están en por unidad (pu). En esta parte se analiza el transitorio de corto-circuito trifásico repentino para una tensión nominal en la etapa de pre-falta. Este tipo de estudio puede ser implementado directamente en la herramienta computacional a fin de observar el comportamiento del flujo concatenado, el flujo de dispersión y la densidad de campo durante el tiempo crítico de corto circuito repentino.

3.3.1 Corto-circuito trifásico repentino

El proceso de modelamiento de este método desde el punto de vista de montaje en bloques en la etapa de pre-procesamiento se asemeja a los modelos tradicionales estudiados por ejemplo mediante simulink o simpowersystem de Matlab. En condiciones de régimen permanente es simulado la condición de carga nominal con una impedancia terminal de 1 pu, esta impedancia es subsecuentemente corto-circuitada para una carga paralela con una resistencia extremadamente pequeña (0,0001 pu). El sistema fue implementado para una carga tal que el generador síncrono alimente potencia nominal.

Una vez alcanzada la condición de régimen permanente durante un breve tiempo se aplica el corto-circuito y luego se retira el corto-circuito a fin de simular el breve tiempo al que debe estar expuesto una máquina en condiciones reales.

En la figura 8 a) y b) se pueden observar las distribuciones de flujo en los casos de régimen permanente y de corto circuito repentino, en caso de la figura 8b es mostrado para un instante de tiempo post-falta, observándose un claro efecto de saturación tanto en el estator así como en el rotor.

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento de la corriente de fase-a y el comportamiento de la corriente de campo durante el corto-circuito repentino definido anteriormente. En el tiempo de $t = 2,5$ segundos se realiza el corto-circuito repentino y se retira esta condición cuando $t = 3$ segundos. En la figura 9 se puede observar que el pico de la corriente de corto circuito es 4 veces su valor nominal en pu aproximadamente. En ese mismo instante la densidad de flujo concatenado en el estator es atrapada creando una elevada componente fundamental, su comportamiento frente al corto circuito muestra un disturbio inducido que hace que se incremente

considerablemente la densidad de corriente en el rotor. Estas informaciones son utilizadas en el análisis de proyecto a fin de predecir al aumento de temperatura en las componentes del generador síncrono.

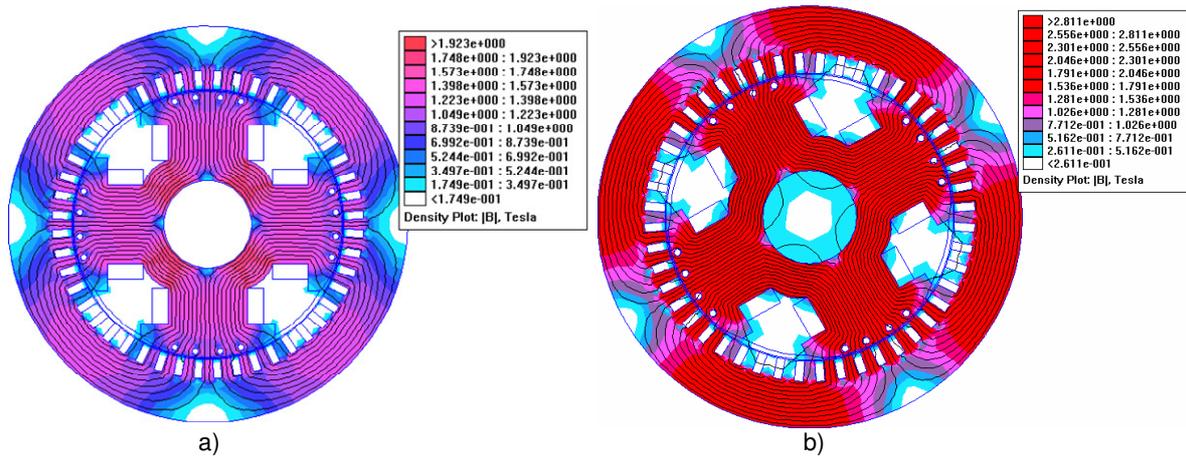


FIGURA 8 – Densidad de campo en: a) régimen permanente y b) corto-circuito repentino

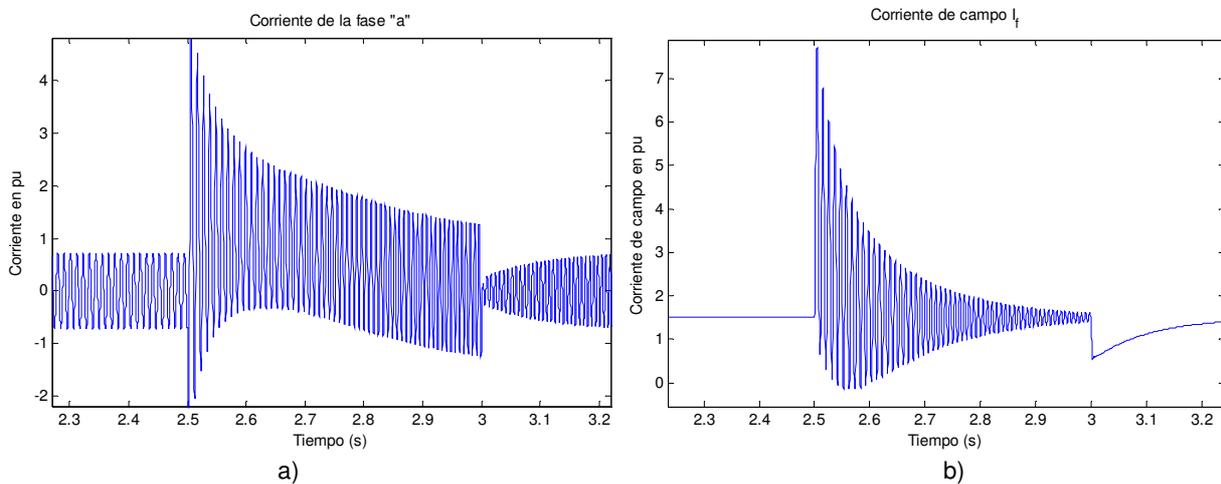


FIGURA 9 – a) Corriente de corto-circuito en la fase “a” del generador síncrono. b) Corriente de campo.

4.0 - CONCLUSION

Un modelo computacional de corto-circuito repentino basado en elementos finitos ha sido desarrollado para analizar el comportamiento dinámico de las máquinas síncronas. La distribución de campo da lugar a un mejor entendimiento sobre el complejo fenómeno físico que ocurre en el generador durante un corto-circuito repentino. Este método permite cuantificar el efecto de saturación en los dientes del estator y en las barras de amortecimiento así determinar pérdidas como también el aumento de la temperatura en todos los conductores y su debida determinación de parámetros en los modelos de eje d-q.

5.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) N. BIANCHI, S. BOLOGNANI. “Metodologie di Progettazione delle Macchine Elettriche” CLEUP, 2000.
- (2) GENAC, MAGNEFORCE. Versión Trial. <http://www.magneforcess.com/genac.htm>
- (3) FEMM, Versión 3.3 Free-software. <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>
- (4) I.M. CANAY. “Determination of model parameters of synchronous machines”. IEEE Proc. Vol. 130, Pt. B, No2, 1983.
- (5) Nicola Bianchi, “Electrical Machine Analysis Using Finite Elements” Edition: 2005 CRC Press.
- (6) J. K. SYKULSKI, C. E. KIM. “Harmonic Analysis of Output Voltage in Synchronous Generator Using Finite-Element Method Taking Account of the Movement”. IEEE transactions on magnetics, vol. 38, no. 2, march 2002.
- (7) K. WEEBER. “Determination of Dynamic Parameters of Large Hydro-Generators by Finite-Element Simulation of Three-phase Sudden Short-circuit Tests”. GE Hydro, Generator Engineering, Peterborough, Canadá.
- (8) IEEE: STD 1158-1995. “IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines”.
- (9) CEI 60034-4. “Rotating electrical machines Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests”.