

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MAGNETOTÉRMICO EN LAS MÁQUINAS SINCRÓNICAS DE POLOS SALIENTES DE 220 MVA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Sergio M. Pereira de Figueiredo

ing_spf@yahoo.com

Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vice-rectorado Pto. Ordaz, UNEXPO. Pto. Ordaz, Edo. Bolívar. Venezuela.

Alexánder J. Millán Rodríguez

almillan@edelca.com.ve

Centro de Investigaciones Aplicadas-CIAP. Central Hidroeléctrica Macagua.

CVG. Electrificación del Caroní, C. A., EDELCA, Pto. Ordaz, Edo. Bolívar. Venezuela.

Juan Toledo Hernández

jtoledo@edelca.com.ve

Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Proyecto Hidroeléctrico Caruachi. Módulo 5.

Telf: +58-286-9607084, FAX: +58-286-9607137.

CVG. Electrificación del Caroní, C. A., EDELCA, Pto. Ordaz, Edo. Bolívar. Venezuela.

RESUMEN: Las Máquinas Eléctricas Rotativas utilizadas en la generación de energía eléctrica son estructuras complejas, que están sujetas a esfuerzos mecánicos, eléctricos, magnéticos y térmicos de magnitud variable. El sistema de aislamiento es el más susceptible a ser dañado debido a esos factores. La vida útil de la máquina depende en gran medida de la capacidad de servicio del sistema de aislamiento, conduciéndolo con el paso de los años a la existencia de fallas y deterioro de sus elementos.

En este trabajo se desarrollaron los modelos digitales para examinar la distribución del campo magnético y comportamiento térmico en operación continua y bajo diferentes condiciones de carga en los hidrogeneradores de polos salientes de 220 MVA de la Central Hidroeléctrica Caruachi, ubicada al sur-este de Venezuela en la cuenca del bajo Caroní. Se consideraron las corrientes de armadura y campo, las pérdidas por Histéresis y Corrientes de Foucault. La geometría contempla regiones como devanado de campo, armadura y amortiguador, núcleo del estator, rotor y polo, Air-Gap y aislantes. Se obtuvo una aproximación de la distribución de temperatura y el comportamiento del campo magnético para los diferentes escenarios considerados. Se constató, que el estudio térmico debe ser analizado empleando herramientas con aplicaciones en 3-D, ya que la distribución de temperatura no es uniforme y simétrica en toda la estructura, sin embargo, fue posible obtener un aproximado en función de las condiciones de carga. Adicionalmente se verificó que la variación del radio del rotor incrementa o disminuye el rizado en la onda de densidad de flujo medida en el entrehierro. Se observó que la distribución de corrientes en las barras del estator se ve afectada por la variación de la frecuencia, presentando una distribución no uniforme a lo largo de cada barra.

PALABRAS CLAVE: *Hidrogenerador, Simulación Magneto-Térmica, Análisis de Elemento Finito.*

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de calor presentes en las Máquinas Síncronas se deben a la resistencia que ofrecen los conductores eléctricos al paso de la corriente, lo cual se conoce como Efecto Joule ($I^2.R$), y a las pérdidas en el acero, siendo consideradas para este estudio las debidas a las corrientes de Foucault y Ciclo de Histéresis.

La densidad de flujo fue evaluada para variaciones uniforme del entrehierro, y las simulaciones Magnetotérmicas se efectuaron por medio de la modelación en Elemento Finito de una porción de los Generadores Síncronos de Polos Salientes del Proyecto Hidroeléctrico CARUACHI, ésta corresponde a la geometría exacta de un polo con ubicación adecuada, de forma que se encuentre un número entero de ranuras frente a la cara polar. Adicionalmente, se presentan los resultados de los niveles de temperatura alcanzados bajos diferentes condiciones de carga simuladas a través de la aplicación SST-FLUX2D.

2. MODELOS

A pesar que la máquina a ser modelada contiene 76 Polos y 576 Ranuras y una distribución fraccionaria del devanado de armadura en el estator, y que la periodicidad del devanado se obtiene a 1/4 de generador; el modelo utilizado fue el de 1 Polo, con una aproximación de 8 ranuras por polo.

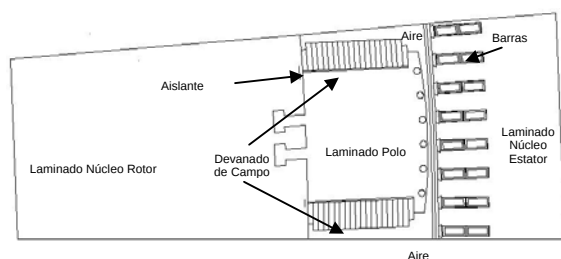


Figura 1. Modelo de 1 polo y 8 ranuras con ubicación en eje directo.

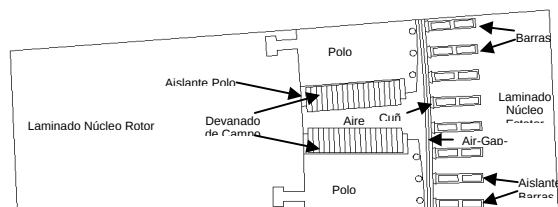


Figura 2. Modelo de 1 polo y 8 ranuras con ubicación en el eje de cuadratura.

Tabla 1. Características de los Generadores

PARÁMETROS	
Potencia	220 MVA
Voltaje	13.8 kV
Corriente de Armadura	9204 A
Factor de Potencia	0.85
Corriente de Campo	1646 A
Número de Polos	76
Número de Ranuras	576

Número de Circuitos en Paralelo	4
Número de Fases	3
Número de barras Amort. por Polo	6
Entrehierro	20.5 mm
Velocidad	94.74 rpm

3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

El proceso de validación consta de dos evaluaciones en las cuales se comparan parámetros no saturados y mapa de densidad de flujo del campo principal, para esto se contó con los resultados de las pruebas en sitio de la Unidad Número 1 y los entregados por el fabricante.

3.1. Parámetros no saturados

Por medio de la comparación de parámetros no saturados X_d y X_q entregados por el fabricante y los obtenidos a través del análisis de elemento finito en dos dimensiones, fue posible validar los modelos. Para el análisis de elemento finito se simuló una distribución aproximada de corriente localizada en el estator, a fin de reproducir el comportamiento sinusoidal de la onda de densidad de flujo, sin considerar la reacción de armadura y los efectos de los armónicos presentes durante la operación continua de las unidades.

En la tabla 2 se presenta los resultados obtenidos para eje “d” y “q”, siendo comparados con los resultados obtenidos con los modelos desarrollados en [1].

Tabla 2. Parámetros no saturados.

Parámetro	Eje “d”	Eje “q”
Energía Almacenada (Joule)	104.619	381.553
Reactancia (ohm)	0.86	0.627
Reactancia en P.U	0.99	0.72
Desviación de [1]	-3.12	-4.34
Desviación al Fabricantes	-10	-12.5

En la figura 3 se presenta el comportamiento de las líneas de flujo equipotencial obtenidas durante el proceso de determinación de los parámetros no saturados.

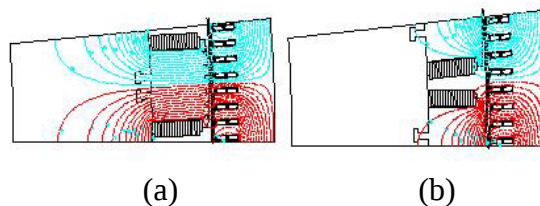


Figura 3. Líneas de flujo equipotencial (a) eje directo y (b) eje de cuadratura.

En la figura 4, se presenta el vector de potencial y densidad de flujo en el punto medio del entrehierro.

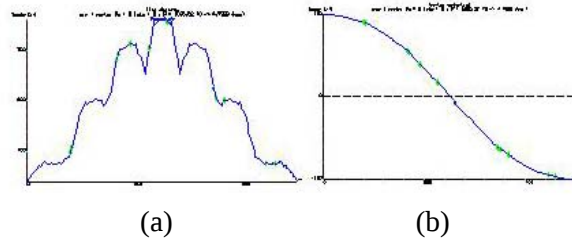


Figura 4. (a) Densidad de flujo en el entrehierro. (b) Vector de densidad de flujo

3.2. Campo principal

En la figura 5, se presenta la comparación gráfica del mapa de densidad de flujo entregada por El Fabricante y la obtenida a través de la inyección localizada en el estator y la obtenida por medio del devanado inductor. En la tabla 3 se muestran los resultados.

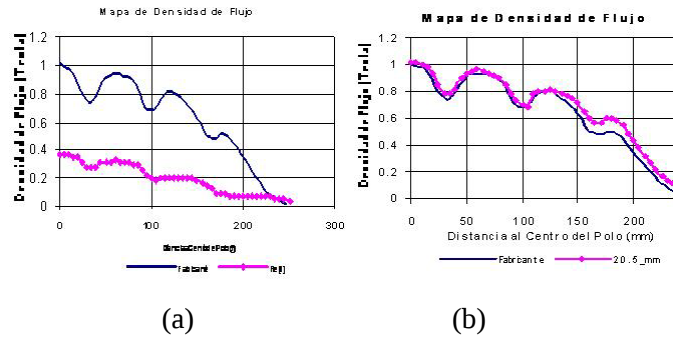


Figura 5 (a) Desviación entre la densidad de flujo con inyección en el estator. (b) Inyección campo principal.

Tabla 3. Resultados con inyección de corriente en el devanado de campo.

	$I_{DCVacio}$	$B_{M\acute{a}x}$ (T)	Desviación %
Flux2d-MEF	927 A	1.01386	-0.58
Fabricante	---	1.008	---

4. VARIACIÓN DE ENTREHIERRO

El ranurado existente en el núcleo del estator, produce un rizado en la densidad de flujo que emana de las superficies polares, rizado que se incrementa a medida que la relación w/g se incrementa [2], lo cual es representativo de una disminución del entrehierro con un incremento en la magnitud de la densidad de flujo, ya que la reluctancia disminuye y se facilita el salto del vector de potencial de flujo.

La variación de entrehierro se realizó de forma uniforme y radial, sin deformar las expansiones polares, lo cual se logró al incrementar el radio del núcleo del rotor.

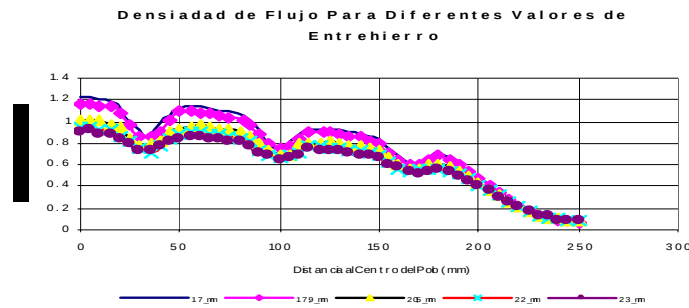


Figura 6 Densidad de flujo magnético con variación de entrehierro.

5. SIMULACIONES DE TRANSITORIOS MAGNÉTICOS

Las simulaciones realizadas bajo la aplicación SST (Steady State Thermal) de Flux2d, únicamente consideran la potencia disipada por efecto Joule en los circuitos eléctrico y las pérdidas del núcleo del estator, suministradas por el fabricante; lo anterior indica que no se toma en cuenta el calentamiento producto de la inducción de corrientes por armónicos u otros efectos que puedan variar la temperatura del generador.

5.1. Modelo de ranura

Los efectos convectivos presentes en los ductos de ventilación, son aplicados en la zona interior del estator, correspondiente al air-gap y en la parte exterior del núcleo, de manera que se pueda obtener una distribución de temperatura a lo largo de todo el núcleo, siendo ajustados los coeficientes convectivos hasta obtener rangos aproximados a las temperatura registradas por los detectores resistivos de temperatura instalados en las unidades.

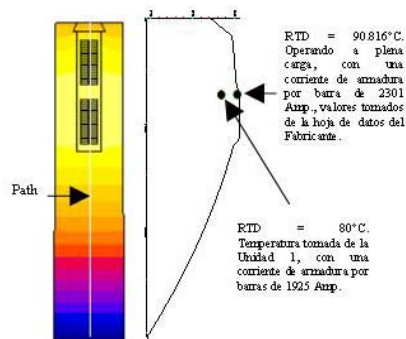


Figura 7. Distribución de temperatura 2D-MEF en una ranura y sección de núcleo magnético

5.2. Modelo de un polo

La herramienta computacional empleada no está diseñada para evaluar fluidos en movimiento, por lo que es necesario excluir el Air-Gap, ya que este será considerado como un sólido, afectando por conducción la distribución de temperatura que presenta el rotor.

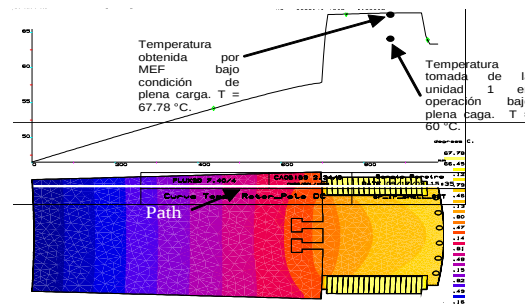


Figura 8. Distribución de temperatura modelo de 1 polo

6. ANÁLISIS DINÁMICO

Las simulaciones dinámicas fueron orientadas a la verificación de la distribución de corriente en las barras alojadas en las ranura, considerando un primer caso en el cual las corrientes presentan la misma dirección y ángulo, un segundo caso en el cual se toma en cuenta que existen barras en una ranura con corrientes de diferentes fases.

6.1. Caso A

En la figura 9 se presenta el comportamiento magnético debido a las corrientes de armadura presentes bajo condición de plena carga.

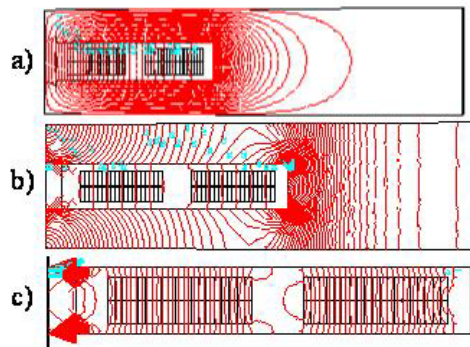


Figura 9 a) Líneas de flujo equipotencial, b) Densidad de flujo, c) Intensidad de campo.

6.2. Caso B

En la figura 10 se puede observar que las magnitudes difieren entre la barra superior e inferior, esto atribuido a que las líneas de flujo producidas por la corriente de armadura en la barra superior tienen una menor concentración de líneas de flujo gracias a la presencia de material magnético por donde propagarse.

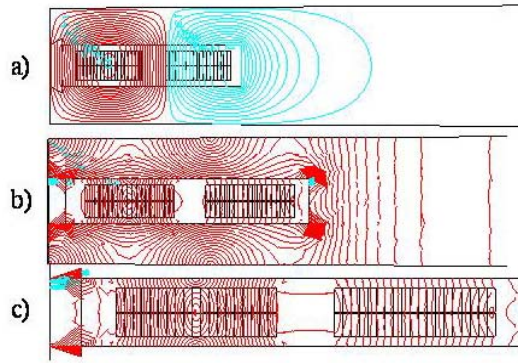


Figura 10. a) Líneas equipotenciales de flujo, b) Densidad de flujo, c) Intensidad de campo.

La densidad de flujo presenta un comportamiento diferente, al igual que la intensidad de flujo, lo cual se debe a la dirección de las corrientes en cada barra, siendo éstas en oposición y de fases distintas.

7. VARIACIÓN DE FRECUENCIA

Por último se realizó una variación de frecuencia con intervalos de 200 Hz hasta llegar a 1000 Hz, con lo que se observa que la distribución de corriente en una barras se ve alterada bajo la presencia de corrientes con frecuencias iguales a múltiplos aditivos de la fundamental, siendo el caso de los amónicos inducidos al sistema provenientes de los distintos tipos de cargas que alimenta el sistema de CVG-EDELCA.

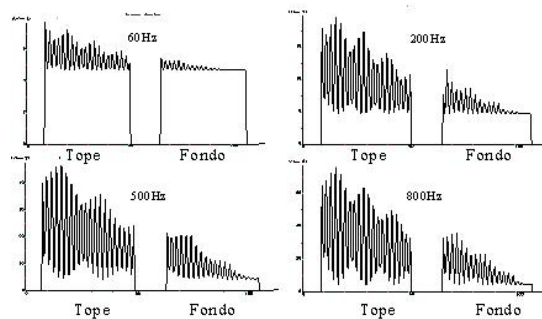


Figura 11. Curvas de densidad de corriente tomada en dirección radial en el modelo de una ranura

8. CONCLUSIONES

La geometría de 1 Polo y 8 ranuras, puede ser empleada para realizar cualquier estudio en el dominio eléctrico y magnético, ya que se demostró, mediante la comparación de parámetros no saturados (X_d y X_q), que la desviación se encuentra por el orden del 1%, lo cual se considera aceptable.

Se pudo corroborar la expuesto en [2], que al variar la distancia radial del entrehierro " g ", el rizado en la onda de densidad de flujo, que emana de la superficie polar, se acentúa, lo cual se traduce en un incremento de pérdidas y calentamiento en las caras polares en general o las que presenten deformaciones.

Mediante la aplicación de la técnica de MEF-2D, fue posible realizar simulaciones aproximadas, en su aplicación SST, del comportamiento térmico presente en la estructura del generador, siendo considerada la potencia disipada en el núcleo del estator debidas a las pérdidas en el hierro y las pérdidas en el cobre, tanto para el devanado de campo como armadura.

Mediante la aplicación Magnetodinámico de Flux2d, fue posible determinar la distribución de corriente en las barras del devanado de armadura, para una corriente correspondiente a plena carga y frecuencia de 60 Hz. Observándose que la menor densidad de corriente se encuentra en la parte central de la barra. Distribución debida al efecto piel presente para la frecuencia establecida. El efecto piel para valores de frecuencia mayores, tiende a incrementar la resistencia de los devanados y aumentar la región central de menor disipación, traducándose a la vez en un incremento de temperatura y limitación de capacidad de la máquina.

Se pudo comprobar que el incremento de la frecuencia modifica la distribución de corriente en las barras, obteniendo con esto aumento de la resistencia y por ende un incremento de las pérdidas por efecto Joule, traducido en temperaturas superiores a las de diseño.

9. REFERENCIAS

- [1]. Estéves R. Héctor J.,: “*Determinación De Los Parámetros De Las Máquinas Sincrónicas De Polos Salientes Del Proyecto Hidroeléctrico Caruachi Aplicando El Método De Elemento Finito*”. Tesis de Grado. Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vice-rectorado Pto. Ordaz, UNEXPO. Pto. Ordaz, Edo. Bolívar. Venezuela. 2002.
- [2]. Idrogo, Esly y Mayén, José.,: “*Calentamiento De Polos Y Barras Amortiguadoras En Los Generadores De Guri*”. *IV Jornadas Profesionales de EDELCA*. Macagua. CVG. Electrificación del Caroní, C. A., EDELCA. Pto. Ordaz, Edo. Bolívar. Venezuela. 1998.
- [3]. A.F. Armor y M.V.K. Chari.,: “*Heat Flow In The Stator Core Of Large Turbine-Generators By The Method Of Three-Dimensional Finite Elements*”. Parte 1: Analysis by Scalar Potential formulation. Parte 2: Temperature Distribution in the Stator Iron. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, N° 5, Sept.-Oct. 1976.
- [4]. Azuaje P. Carlos J.,: “*Advances in Hydrogenerator Models*”. Tesis Doctoral. Instituto Politécnico Rensselaer. Troy, New York, 1997.
- [5]. Toledo, H. Juan.,: “*Modelización, Determinación Y Análisis De Los Campos Electromagnéticos En Los Sistemas De Transmisión Por El Método De Los Elementos Finitos*”. Tesis de Maestría. Comisión de Estudios de Postgrado. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas, Venezuela. Enero 2000.
- [6]. Millán R. Alexánder J.,: “*Análisis De Armónicos De Corriente En Los Generadores Sincrónicos De La Central Hidroeléctrica Macagua II*”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vice-rectorado Pto. Ordaz. UNEXPO. División de Postgrado. Pto. Ordaz, Edo. Bolívar. Venezuela. Octubre 2001.