

Diseño y Análisis Paramétrico de Máquinas Sincrónicas de Excitación Híbrida Mediante el Método de Elementos Finitos en Dos Dimensiones

Criollo Deysi, Polo Karina, Quilumba Franklin, Imbaquingo Carlos
Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Resumen – En este documento se presenta el análisis paramétrico de máquinas sincrónicas de excitación híbrida (HESM, Hybrid Excitation Synchronous Machine). Luego de conocer las características físicas, eléctricas y magnéticas de las HESM se desarrolla el diseño de las mismas, empleando el método de elementos finitos. Con la ayuda de FEMM 2D se realizan los diseños de máquinas de seis y ocho polos cuya dirección del flujo magnético, cambie de tipo tangencial a radial, lo que se consigue con la ayuda de un campo magnético generado por un bobinado de excitación.

Se vincula MATLAB con FEMM 2D a través de una interfaz gráfica, para parametrizar dimensiones, materiales, intensidad de corriente en el bobinado de excitación y tipo de carga en el estator.

Se ejecutan las respectivas simulaciones con las que se obtienen datos necesarios para calcular las reactancias sincrónicas. Finalmente, se comparan estos resultados con las reactancias sincrónicas calculadas por FEMM 2D.

Índices – Máquina Sincrónica de Excitación Híbrida, Método de Elementos Finitos, Flujo Tangencial a Radial, Bobinado de Excitación, Imanes Permanentes.

I. INTRODUCCIÓN

El primer estudio en mención de la HESM es relativamente nuevo y fue presentado en 1988 por la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (USRR) utilizada como fuente de energía, la universidad de Wisconsin de los Estados Unidos desarrolló máquinas HESM de 3kW y 10kW entre el 2000 y 2002 y el Colegio Técnico de Japón una de 0.75kW en el 2001 [1]. En los últimos años, la atención hacia HESM ha ido en aumento debido a las ventajas que presenta Las Máquinas Sincrónicas de Excitación Híbrida (HESM, Hybrid Excitation Synchronous Machine), tienen la capacidad de fusionar las ventajas de la Máquina Sincrónica de Imanes Permanentes (PMSM, Permanent Magnet Synchronous Machine) y de las Máquinas Sincrónicas de Excitación Eléctrica (EESM, Electric Excitation Synchronous Machine), evitando así sus deficiencias individuales. Por lo tanto, estas máquinas poseen un mejor desempeño debido a su fácil control, bajas pérdidas y trabajo con corrientes menores en el bobinado de excitación [2].

Las EESM tienen la facilidad de controlar el campo magnético con un bobinado de excitación, de manera que se consigue una buena regulación del campo magnético; por el contrario, se producen grandes pérdidas por efecto Joule, por lo que se tiene una baja eficiencia en la máquina.

Las PMSM poseen ventajas debido a que el bobinado de excitación es sustituido por imanes permanentes. Resultando en una considerable reducción del volumen de

la máquina. Al tener alta densidad magnética por los imanes, se eliminan las pérdidas en el cobre del rotor, aumentando la eficiencia de la máquina; sin embargo, realizar un control del campo magnético en el entrehierro es una tarea complicada, por lo que es difícil conseguir la regulación de voltaje como generador y la variación de velocidad como motor.

Del análisis general de las dos máquinas anteriores, las HESM amplían el rango de regulación del campo magnético [3], [4].

II. ESTRUCTURA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN

A. Estructura de la Máquina Sincrónica de Excitación Híbrida con flujo Tangencial a Radial (T/R HESM)

La T/R HESM está conformada por dos partes, tal como la máquina sincrónica de la cual proviene, que son la móvil y la fija separadas por el entrehierro.

La parte móvil de la máquina está compuesta por:

- Eje del rotor: Transfiere la energía mecánica generada a través de energía eléctrica hacia la carga que se desea mover.
- Imanes permanentes: Generan el campo magnético constante.
- Bobinados de campo: Generan el campo magnético variable controlado por la corriente de excitación.
- Núcleo del rotor: Es el medio que permite el paso del flujo magnético.

La parte estática está conformada por:

- Núcleo del estator: Origina el flujo magnético cuando las bobinas son recorridas por corrientes eléctricas.
- Bobinas del inducido: Generan el voltaje cortando las líneas del campo magnético que cruzan el entrehierro.

En la Fig. 1 se muestra una T/R HESM de cuatro polos.

En base a la estructura indicada anteriormente se realiza el diseño de las máquinas de seis y ocho polos. Para tener una visión más clara sobre las T/R HESM diseñadas, se presenta un modelo en 3D de acuerdo a las Figs. 2 y 3.

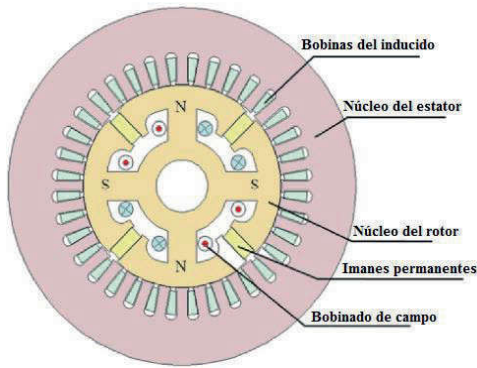


Fig. 1 Estructura T/R HESM de cuatro polos [5]

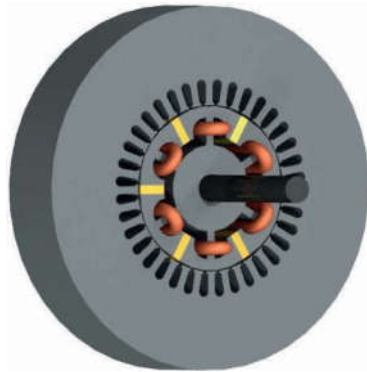


Fig. 2 Estructura T/R HESM de Seis Polos



Fig. 3 Estructura T/R HESM de Ocho Polos

B. Principio de Operación

La T/R HESM posee dos fuentes de magnetización:

- Una proveniente de los imanes permanentes que crea un flujo constante en el entrehierro.
- Y la otra del bobinado de excitación DC que regula el flujo ajustando su distribución en el entrehierro.

Los imanes permanentes se colocan inclinados, como se indica en la Fig. 4. Para que las líneas de campo se repelan y vayan en dirección radial se necesita colocar los polos iguales de diferentes imanes uno frente a otro.

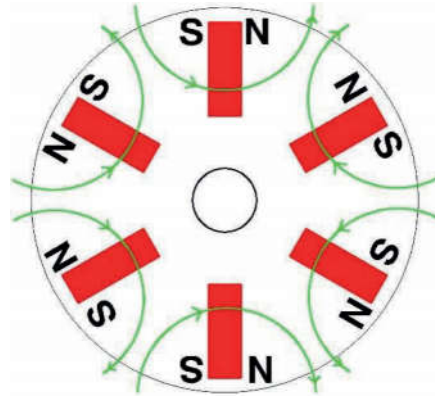


Fig. 4 Flujo Concentrado

Al no existir excitación eléctrica en la T/R HESM, los imanes permanentes son los únicos que producen líneas de campo, realizando la siguiente trayectoria: Polo norte del imán → Pie del polo del rotor → Diente del rotor → Núcleo del rotor → Diente del rotor → Pie del polo del rotor → Polo sur del imán, como se observa en la Fig.5 [2].

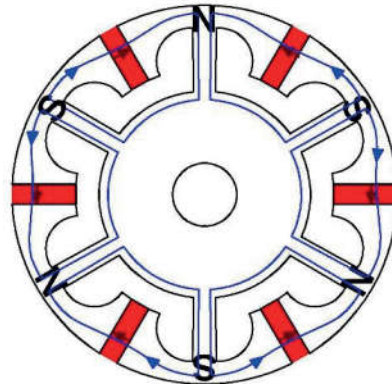


Fig. 5 Flujo Tangencial

En el pie de polo se colocan bobinas por las cuales se hace circular un valor determinado de corriente continua, la misma que produce un campo magnético con sentido radial, como se observa en la Fig. 6.

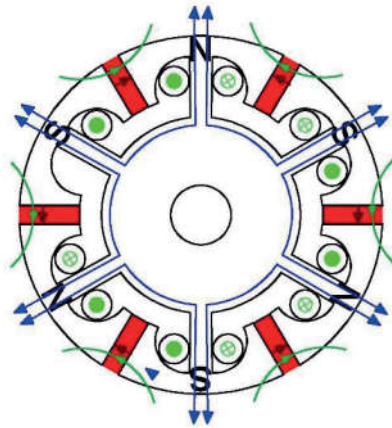


Fig. 6 Flujo Radial

Cuando la corriente de excitación fluye a través de los bobinados de campo, se forman dos trayectorias magnéticas, como se describe a continuación:

La primera, está relacionada con las bobinas de campo y es: Diente del rotor → Pie del polo del rotor → Entrehierro → Núcleo del estator → Entrehierro → Pie del polo del rotor → Diente del rotor → Núcleo del rotor → Diente del rotor, mientras que la segunda, está relacionada con los imanes permanentes y es: Polo norte del imán → Pie del polo del rotor → Entrehierro → Núcleo del estator → Entrehierro → Pie del polo del rotor → Polo sur del imán [2].

Tanto los flujos producidos por los imanes permanentes como por el bobinado de excitación, produce un flujo resultante que atraviesa el entrehierro, el mismo que se controla con la corriente de excitación aplicada a las bobinas de campo.

Los principios mencionados anteriormente se cumplen para las T/R HESM de seis y ocho polos.

III. PARAMETRIZACIÓN DE LAS T/R HESM

Se describe el método utilizado para parametrizar las Máquinas Sincrónicas de Excitación Híbrida con flujo Tangencial a Radial.

Método de Elementos Finitos: Este método numérico consiste en discretizaciones múltiples de un sistema, máquina o dispositivo hasta llegar a un sistema de ecuaciones algebraicas.

El sistema resultante se construye como un equivalente que consiste de bloques o elementos finitos (que contienen información del sistema, como geometría, materiales, condiciones de frontera) sobre los cuales se resuelven las ecuaciones, considerando figuras geométricas como triángulos, cuadrados, etc.

Posteriormente se construye una matriz de tamaño igual al número de variables que se presentan en cada elemento, de lo cual se obtiene una relación algebraica lineal en lugar de una ecuación diferencial.

Con la finalidad de realizar estudios de ingeniería y colaborar con el avance profesional, se desarrolla una interfaz gráfica, que es un software elaborado con programación estructurada en MATLAB. La interfaz permite parametrizar datos necesarios como dimensiones, materiales, forma del rotor, conductores y excitaciones que conforman las T/R HESM. Posteriormente se realiza el análisis electromagnético con la ayuda del programa de elementos finitos FEMM 2D.

Para realizar el modelado de las máquinas de seis y ocho polos se toma como referencia el modelo de la T/R HESM de cuatro polos citado en [2], el mismo que trabaja bajo estándares europeos, es decir frecuencia de 50 HZ y voltajes aproximados a 220 V en fase y 380 V en línea.

Con el fin de realizar un análisis comparativo, las máquinas modeladas trabajan bajo estos mismos estándares.

Para determinar las características adecuadas de las máquinas en estudio se realizan un sin número de simulaciones realizadas para cada máquina, se obtienen las características geométricas, eléctricas y los materiales con los que se consigue un modelo adecuado, con la parametrización establecida se realiza el análisis de las máquinas.

Cabe mencionar, que los valores escogidos para obtener los diseños apropiados de las máquinas en estudio, presentan un rango de medidas establecidas, debido a que el análisis se orienta a generación

distribuida. En la Tabla I se muestran los datos para realizar las simulaciones.

TABLA I
PARÁMETROS DE DISEÑO T/R HESM

		SEIS POLOS	OCHO POLOS
DIMENSIONES	Radio del Rotor	65 mm	70 mm
	Longitud Entrehierro	0.75 mm	1.1 mm
	Longitud Máquina	163 mm	126.5 mm
MATERIALES	Imanes Permanentes	NdFeB 32 MGOe	NdFeB 32 MGOe
	Núcleo Máquina	1006 Steel	1006 Steel
BOBINADO DE EXCITACIÓN	Calibre Conductor	20 AWG	20 AWG
	Corriente	2.5 A	3 A
ESTATOR	Número Ranuras	36	24
	Calibre Conductor	14 AWG	14 AWG

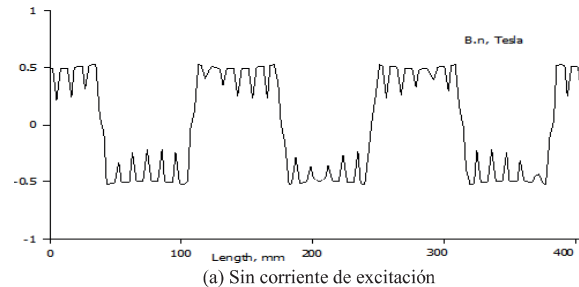
IV. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Análisis en Vacío

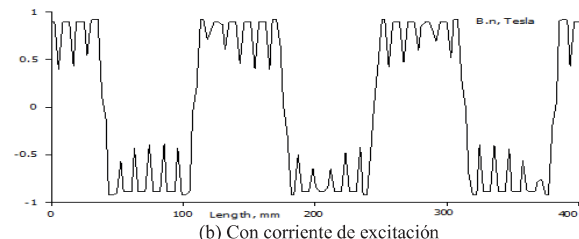
El análisis en vacío se realiza en rotor cilíndrico y modificado.

Las máquinas de rotor cilíndrico se caracterizan por tener el entrehierro constante, lo que provoca que la forma de onda de la densidad de flujo magnético del entrehierro tenga una forma trapezoidal; esto significa que existe un índice de distorsión armónica (THD) alto.

Para la máquina de seis polos, se observa en la Fig. 7 (a) que la densidad flujo sin excitación de campo alcanza un valor de 0.5 T, mientras que en la Fig. 7(b) este valor se incrementa a 0.89 T con el efecto de la excitación de campo, lo que significa un incremento del flujo en el entrehierro del 78%.



(a) Sin corriente de excitación



(b) Con corriente de excitación

Fig. 7 Densidad de flujo magnético T/R HESM Seis Polos – Rotor Cilíndrico

Lo mismo sucede en la máquina de ocho polos, la densidad de flujo magnético en el entrehierro sin el efecto de la corriente de excitación DC alcanza un valor de 0.57 T como se observa en la Fig. 8 (a), mientras que al combinar los efectos de los imanes permanentes y la

corriente de excitación, la densidad de flujo es 0.95 T como se indica en la Fig. 8 (b), lo que significa un incremento del flujo en el entrehierro del 67%.

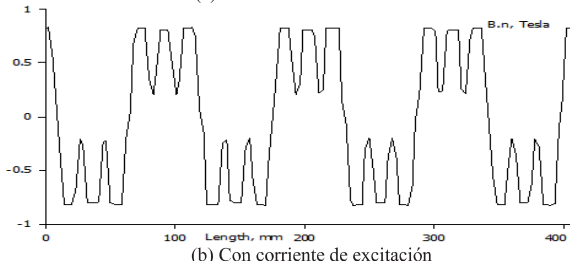
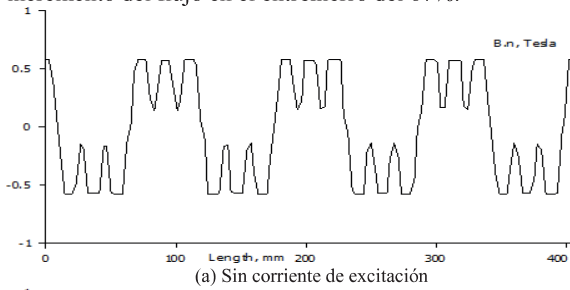
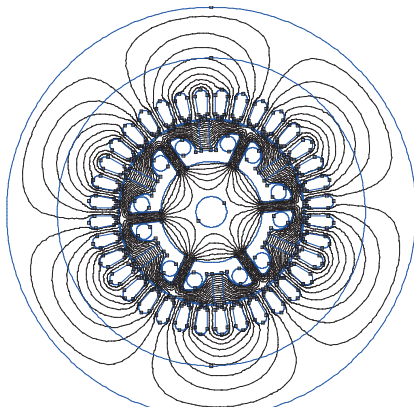


Fig. 8 Densidad de flujo magnético T/R HESM Seis Polos – Rotor Cilíndrico

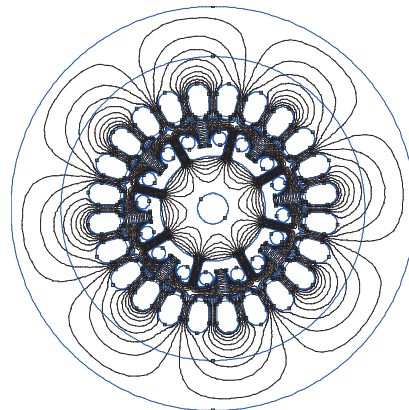
Cuando no existe corriente de excitación, se forma un lazo de flujo magnético en el núcleo del rotor, el mismo que se genera por la acción de los imanes permanentes. Además existe una pequeña cantidad de flujo magnético que atraviesa el entrehierro, cuya trayectoria es desde el pie de polo hacia el estator [2], [5]. En las Fig. 9 (a), se muestra la trayectoria del flujo magnético que tiene la máquina de seis polos cuando la corriente de excitación es cero.



(a) T/R HESM de Seis Polos

Fig. 9 Líneas de campo magnético sin corriente de excitación

La trayectoria del flujo magnético que tiene la máquina de ocho polos cuando la corriente de excitación es cero, se muestra en las Fig. 9 (b).

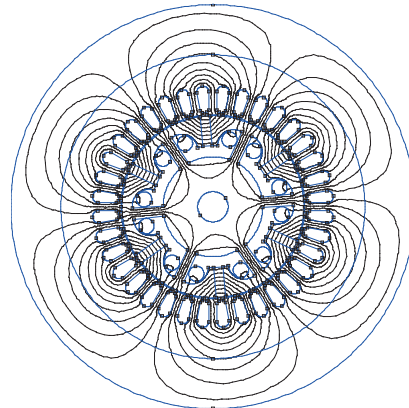


(b) T/R HESM de Ocho Polos

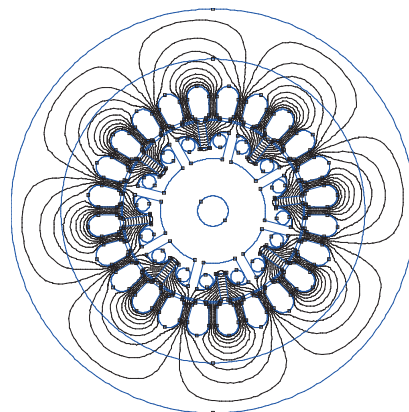
Fig. 9 Líneas de campo magnético sin corriente de excitación

Posteriormente se realiza el análisis colocando una corriente de excitación DC en las bobinas del rotor, siendo esta de 2.5 A para la máquina de seis polos y de 3 A para la de ocho polos.

El flujo magnético ahora es generado por los imanes permanentes y la corriente de campo DC, los mismos que se suman en el entrehierro para formar el campo magnético principal el cual se controla con la corriente de excitación. Para las T/R HESM, este efecto se puede observar en la Fig. 10 (a) y (b),



(a) T/R HESM de Seis Polos



(b) T/R HESM de Ocho Polos

Fig. 10 Líneas de campo magnético con corriente de excitación

En las máquinas de rotor modificado, con el fin de que la densidad de flujo magnético en el entrehierro tenga una forma de onda senoidal, se construyen expansiones polares, tal que el entrehierro sea variable, el mismo que tiene menor valor en el centro del polo y un máximo valor en los extremos de la expansión. Este análisis se realiza bajo los mismos parámetros de diseño, utilizados en rotor cilíndrico.

En la Fig. 11 (a) y (b) se muestran las formas de onda senoidales de la densidad de flujo magnético de las T/R HESM.

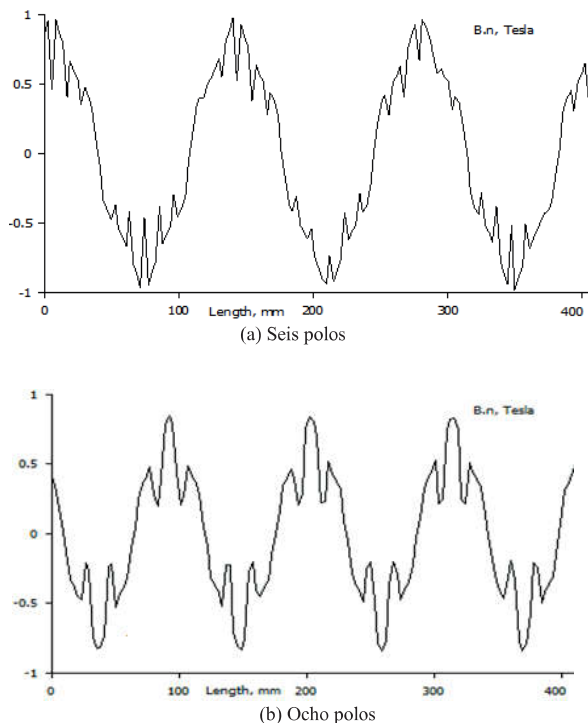


Fig. 11 Densidad de flujo magnético T/R HESM Rotor Modificado

B. Análisis con Carga

Se realiza el análisis con tres tipos de carga: resistiva, inductiva y capacitiva. Con dicho análisis se obtiene voltajes, corrientes, torques y formas de onda.

Cuando opera la máquina con carga, se producen varios campos magnéticos los mismos que provienen de: el bobinado del rotor, los imanes permanentes y de las corrientes que circulan en el inducido al conectar una carga a los terminales del generador.

El campo producido por la corriente de carga genera un torque opuesto al giro de la máquina, el que se compensa con la ayuda externa de potencia mecánica. El efecto creado por dicho campo se conoce como reacción de inducido.

1) *Carga Resistiva:* Para obtener carga resistiva se toma en cuenta el desfase que existe entre el voltaje en bornes \bar{V}_ϕ y el voltaje en vacío \bar{E} . Se trabaja con una intensidad de corriente igual a: $\bar{I}_\phi = 1.4142/\sqrt{2}$ A, como se muestra en la Fig. 12.

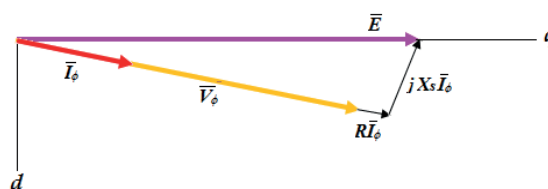


Fig. 12 Diagrama fasorial carga Resistiva

El voltaje y la corriente de la fase U de las máquinas en estudio se muestran en la Fig. 13.

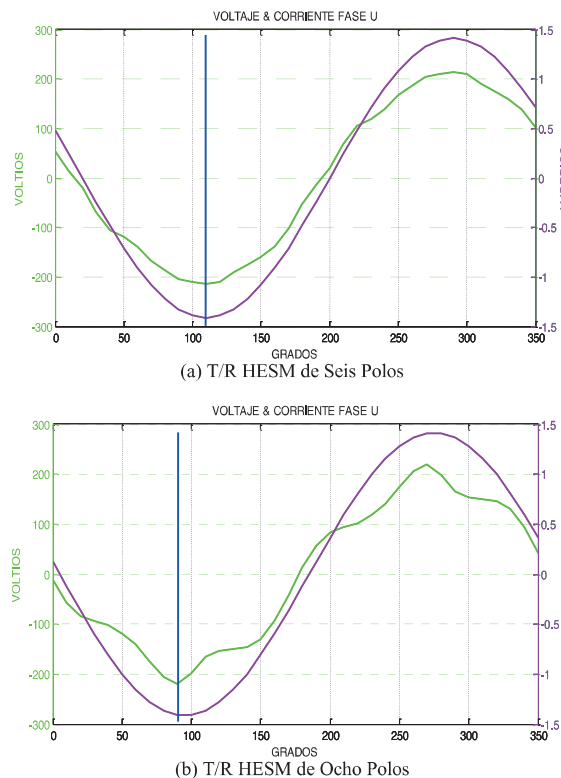


Fig.13 Intensidad de corriente y Voltaje de la Fase U

En la Tabla II se muestran los datos obtenidos luego de las respectivas simulaciones.

TABLA II
DATOS OBTENIDOS CARGA RESISTIVA

	Seis Polos	Ochos Polos
\bar{E} [V]	155.6133 -0°	156.1748 -0°
\bar{I}_ϕ [A]	1 -10°	1 -5°
\bar{V}_ϕ [V]	151.8005 -10°	154.8151 -5°

2) *Carga Inductiva:* Para el análisis con carga inductiva se debe tomar en cuenta que la corriente se encuentre en atraso con respecto al voltaje en bornes, tal como se indica en la Fig. 14.

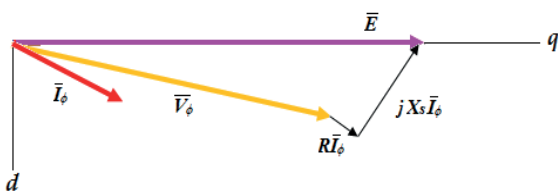


Fig. 14 Diagrama fasorial carga Inductiva

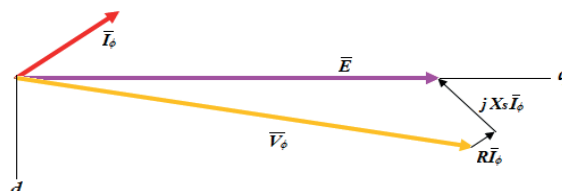
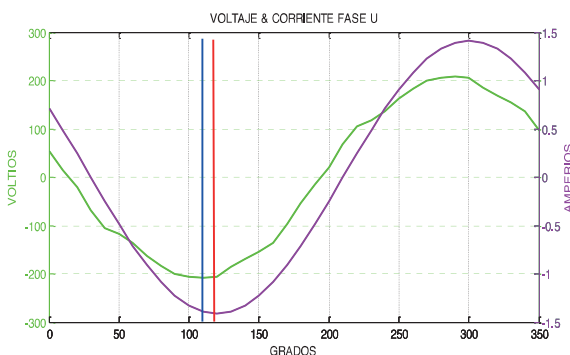
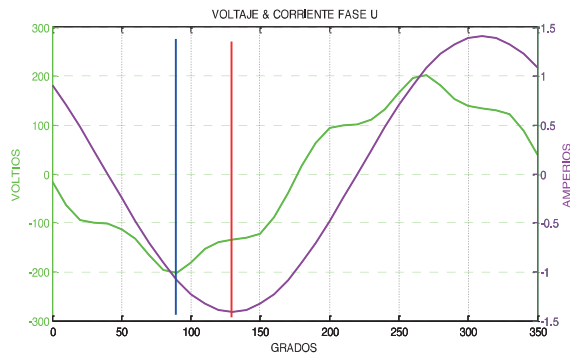


Fig. 16 Diagrama fasorial carga Capacitiva

En la Fig. 15 se indica la forma de onda de voltaje y corriente de la fase U, en donde se aprecia el desfase existente.



(a) T/R HESM de Seis Polos



(b) T/R HESM de Ocho Polos

Fig.15 Intensidad de corriente y Voltaje de la Fase U

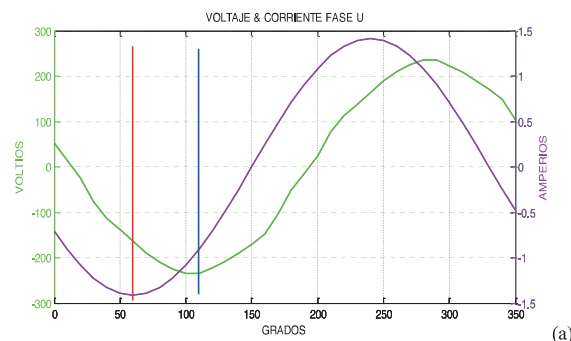
En la Tabla III se muestran los datos obtenidos luego de las respectivas simulaciones.

TABLA III
DATOS OBTENIDOS CARGA INDUCTIVA

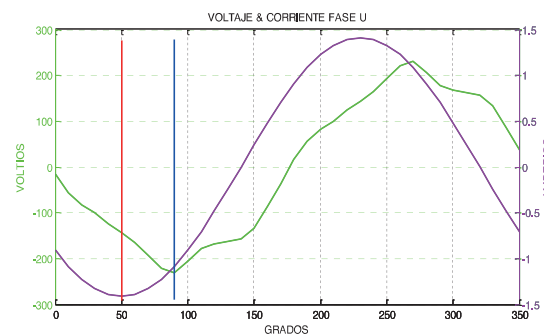
	Seis Polos	Ochos Polos
\bar{E} [V]	155.6133 -0°	156.1748 -0°
\bar{I}_ϕ [A]	1 -20°	1 -45°
\bar{V}_ϕ [V]	147.5210 -10°	143.5617 -5°

3) *Carga Capacitiva*: Para el análisis con carga capacitiva se debe tomar en cuenta que el voltaje en bornes esté en atraso con respecto a la corriente. Como se muestra en la Fig. 16.

La Fig. 17 indica la forma de onda de voltaje y corriente de la fase U, en donde se aprecia el desfase entre estas.



(a) T/R HESM de Seis Polos



(b) T/R HESM de Ocho Polos

Fig.17 Intensidad de corriente y Voltaje de la Fase U

En la Tabla IV se muestran los datos obtenidos luego de las respectivas simulaciones.

TABLA IV
DATOS OBTENIDOS CARGA CAPACITIVA

	Seis Polos	Ochos Polos
\bar{E} [V]	155.6133 -0°	156.1748 -0°
\bar{I}_ϕ [A]	1 40°	1 35°
\bar{V}_ϕ [V]	166.1012 -5°	163.3476 -5°

En la Tabla V se indican algunos parámetros de las T/R HESM.

TABLA V
PARÁMETROS ADICIONALES DE LAS T/R HESM

HESM	SEIS POLOS	OCHO POLOS
Velocidad [rpm]	1000	750

Velocidad [rad/s]	104.7	78.5
Voltaje de Línea [V]	370.0568	342.4876
Torque [N m]	-10.39	-16.0567
Potencia [kW]	1.08	1.26

V. REACTANCIA SINCRÓNICA

A. Cálculo con el Circuito Equivalente

La Reactancia Sincrónica se obtiene al resolver el circuito equivalente de la Fig. 18.

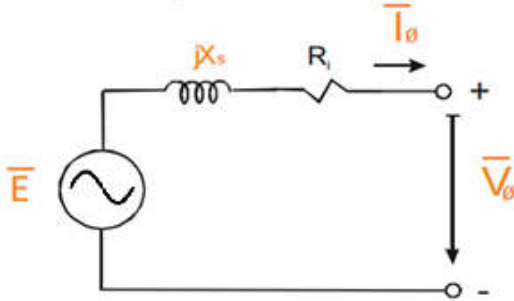


Fig.18 Circuito equivalente de la máquina Sincrónica

Al resolver el circuito equivalente, se obtiene el valor de la impedancia:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{E} - \bar{V}_\theta}{\bar{I}_\theta} \quad (1)$$

La inductancia sincrónica se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$X_s = 2\pi f L_s \quad (2)$$

En donde:

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} \quad (3)$$

TABLA VI
REACTANCIA SINCRÓNICA DE LAS T/R HESM

	Seis Polos	Ocho Polos
Reactancia Sincrónica	85.91 mH	43.326 mH

B. Cálculo mediante el Método de Eje Directo y Cuadratura

Mediante el uso de la herramienta FEMM 2D, se obtiene la reactancia sincrónica a través de la energía magnética almacenada. Se alinea el flujo magnético del efecto de reacción de inducido al eje directo, y después se alinea al eje de cuadratura [6]. La distribución de las líneas de flujo magnético en cada eje se puede observar en la Fig. 19.

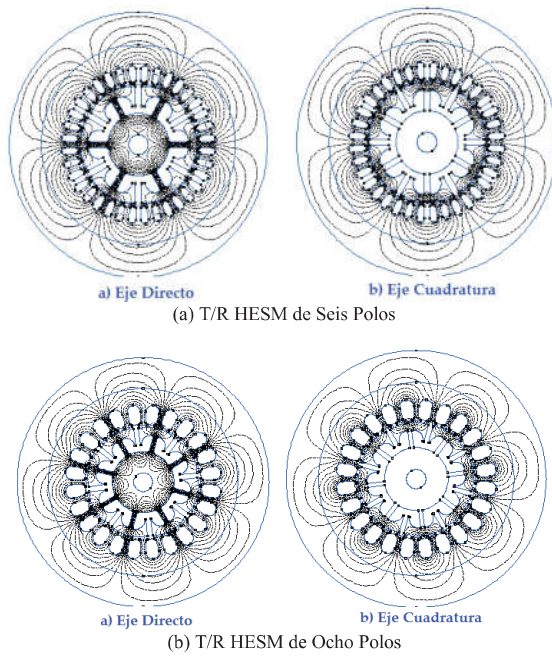


Fig.19 Líneas de Flujo sobre los ejes directo y cuadratura

De la simulación en el FEMM 2D se obtiene los valores de energía almacenadas en la máquina, y al reemplazarlos en la ecuación, se obtiene la inductancia tanto en el eje directo como en el de cuadratura.

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (4)$$

En la TABLA VII se muestran los resultados obtenidos:

TABLA VII
REACTANCIA SINCRÓNICA DE LAS T/R HESM

	Seis Polos	Ocho Polos
Reactancia Sincrónica	79.54 mH	45.07 mH

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial al Ing. Carlos Imbaquingo, y al Dr. Franklin Quilumba quienes nos han ayudado con sus conocimientos, orientaciones, su gran colaboración y paciencia en las inquietudes presentadas. Gracias por guiarnos y por su gran colaboración, en la realización del presente proyecto.

VII. REFERENCIAS

- [1] C. -h. Zhao y Y.-g. Yan, "A review of development of hybrid excitation synchronous machine, Industrial Electronics" IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005.
- [2] Z. Shushu, L. Chuang, X. Yihao y Z. Xiang, "Characteristics and Experimental Study on a Novel Tangential/Radial Hybrid Excitation Synchronous Machine", IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010.
- [3] C. Imbaquingo, "Análisis paramétrico mediante el método de elementos finitos de una máquina síncrona de excitación híbrida", Trabajo fin de Máster, Universidad de Zaragoza, 2013.
- [4] R. Mbayed, "Contribution to the Control of the Hybrid Excitation Synchronous Machine for Embedded Applications", Université de Cergy Pontoise, 2012.

- [5] Z. Shushu, L. C. Chuang, Y. Xu y M. Yundong, "Design and Experimental Study of a Novel Two-stage Brushless Hybrid Excitation Synchronous Machine", Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [6] J. F. Gieras, E. Santini y M. Wing, «"Calculation of Synchronous Reactances of Small Permanent-Magnet Alternating-Current Motors: Comparison of Analytical Approach and Finite Element Method with Measurements", IEEE Transactions on Magnetics, 1998.

VIII. BIOGRAFÍAS



Deysi Criollo Caiza.- Nació en Píllaro provincia de Tungurahua el 25 de octubre en 1985. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son Máquinas Eléctricas, Teoría Electromagnética y Energías Renovables.



Karina Polo Soria.- Nació en la ciudad de Tulcán provincia del Carchi el 04 de mayo en 1985. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son Máquinas Eléctricas, Teoría Electromagnética y Energías Renovables.



Franklin L. Quilumba.- Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador, en el 2008. Realizó sus estudios de posgrado en la Universidad de Texas Arlington, en Arlington, Estados Unidos de América, donde obtuvo el grado de Master of Science y el título de Doctor of Philosophy Ph.D. in Electrical Engineering en el 2014. Desde el 2014, el Dr. Quilumba es parte del cuerpo docente de la Escuela Politécnica Nacional, donde es Profesor Agregado. Sus áreas de interés son análisis, operación, estabilidad y control de sistemas eléctricos de potencia, modelación de carga, planeación de generación y transmisión; respuesta de la demanda; y predicción de carga.



Carlos Imbaquingo.- Obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, en el 2010. Realizó su Maestría en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el grado de Máster en Ciencias en Energías Renovables y Eficiencia Energética en el 2013.