



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE UNA MÁQUINA
HEXAFÁSICA DE IMÁN PERMANENTE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: BRIAN DAVID QUINTEROS ANDRADE

TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, DR.

Cuenca - Ecuador
2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Brian David Quinteros Andrade con documento de identificación N° 0302410253, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 7 de julio del 2023

Atentamente,



Brian David Quinteros Andrade

0302410253

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Brian David Quinteros Andrade con documento de identificación N° 0302410253, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo académico: “SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE UNA MÁQUINA HEXAFÁSICA DE IMÁN PERMANENTE”, el cuál ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 7 de julio del 2023

Atentamente,



Brian David Quinteros Andrade
0302410253

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE UNA MÁQUINA HEXAFÁSICA DE IMÁN PERMANENTE”, realizado por Brian David Quinteros Andrade con documento de identificación N° 0302410253, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 7 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro
0151561800

Resumen- En este trabajo se realiza la modelación de la máquina síncrona de imán permanente hexafásica, utilizando el método de los elementos finitos utilizando el programa ELMER. Primero se definen las características de la máquina hexafásica de imán permanente. Posteriormente se define la geometría tanto del estator como la del rotor, produciendo el mallado con el algoritmo GMSH. Este se exporta al programa Elmer de elementos finitos. Seguidamente se realiza el modelo de estado estacionario para observar los resultados, utilizando el programa de post-procesamiento Parabién. Finalmente se genera la simulación transitoria, verificando la precisión de los flujos magnéticos obtenidos se exportan al programa MATLAB para realizar el análisis del par eléctrico, las corrientes y voltajes de las bobinas del estator.

Palabras Claves: Máquina síncrona hexafásica, Máquina de imán permanente, Elementos finitos.

Abstract: This work presents the modeling of a six-phase permanent magnet synchronous machine using the finite element method and the ELMER software. The characteristics of the permanent magnet six-phase machine are first defined, followed by the definition of the stator and rotor geometry and the meshing process using the GMSH algorithm. The resulting mesh is then exported to the Elmer finite element program. A steady-state model is created to observe the results, which are then analyzed using the Paraview post-processing program. Subsequently, a transient simulation is generated to verify the accuracy of the magnetic flux obtained through the modeling process. Finally, the simulation results are exported to MATLAB for analysis of the electrical torque, stator currents, and voltages.

Keywords: Six-phase machine, Permanent magnet synchronous machine, Finite elements, Space vector model, Voltage behind reactance model.

Simulación Mediante Elementos Finitos de una Máquina Hexafásica de Imán Permanente

Brian D. Quinteros
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
bquinteros@est.ups.edu.ec

José M. Aller
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
jaller@ups.edu.ec

Resumen—En este trabajo se realiza la modelación de la máquina sincrónica de imán permanente hexafásica, utilizando el método de los elementos finitos utilizando el program ELMER. Primero se definen las características de la máquina hexafásica de imán permanente. Posteriormente se define la geometría tanto del estator como la del rotor, produciendo el mallado con el algoritmo GMSH. Este se exporta al progrma Elmer de elementos finitos. Seguidamente se realiza el modelo de estado estacionario para observar los resultados, utilizando el programa de post-procesamiento Paraview. Finalmente se genera la simulación transitoria, verificando la precisión de los flujos magnéticos obtenidos mediante esta modelación. Los resultados de la simulación se exportan al programa MATLAB para realizar el análisis del par eléctrico, las corrientes y los voltajes de las bobinas del estator.

Keywords—Máquina sincrónica Hexafásica, Máquina de imán permanente, Elementos finitos.

NOMENCLATURE

MP	Máquina polifásica
DSP	Procesadores digitales
IP	Imán Permanente
MSIP	Máquina síncrona de imanes permanentes
BLDC	Máquina de imán permanente sin escobillas
VBR	Modelo voltaje detrás de la reactancia

I. INTRODUCCIÓN

El concepto de máquina multifásica apareció por primera vez en el año 1969 [1], siendo utilizada para la generación de energía [2], [3]. El estudio de este tipo de máquina empezó acelerar en el año 1990, debido a los avances que se tiene en el ámbito de la propulsión eléctrica [4]. Las maquinas polifásicas (MP) han sido limitadas por las redes eléctricas trifásicas que están desarrolladas a nivel mundial. Sin embargo, con la aparición de los DSP (Procesadores Digitales) y los avances significativos en la electrónica de potencia, se desarrolló un gran interés por este tipo de máquinas [5].

La máquina polifásica (MP) se ha estudiado durante muchos años [6]. Sus limitaciones técnicas se han podido superar en gran medida debido al desaqrrollo de los componentes electrónicos de alta potencia [2], [7], [8]. Estos convertidores electromecánicos tienen como ventajas: tamaño compacto [1], reducción de las pulsaciones de par [9], operación confiable [10], alta eficiencia [2], [11], tolerancia a fallas [1], potencia reducida por fase y alta confiabilidad [12].

El interés por las máquinas polifásicas (MP), es decir, aquellas que tienen más de tres fases, está relacionado con la división de potencia (corriente o tensión) entre más fases, mayor densidad de potencia y mayor fiabilidad [13], [14]. Las máquinas polifásicas (MP) de cinco o seis fases son las más útiles e interesantes debido a las ventajas antes mencionadas [15].

Las máquinas polifásicas son más tolerantes a fallas debido a los grados adicionales de libertad [16]. Debido a estas razones las máquinas multifásicas, en especial las de Imán Permanentes (IP), se están introduciendo rápidamente en diferentes mercados industriales, que va desde generadores de alta potencia y voltaje, hasta sistemas de propulsión híbridos de bajo voltaje [13], [17]. Estas máquinas ofrecen una alternativa competitiva para las aplicaciones de gran potencia como: propulsión de barcos [17], vehículos ferroviarios [18], incluso en aplicaciones de menor potencia como: vehículos eléctricos [19], aeroespaciales, donde la tolerancia a fallas que estas máquinas proporciona es importante [17]. También, se utiliza como generadores como es en el caso de la generación eólica [20], esto se debe a que trabajan con velocidad variable [16].

Las máquinas de corriente alterna de imanes permanentes (PMAC) se clasifican en máquinas síncronas de imanes permanentes (MSIP) y máquinas de imanes permanentes sin escobillas (BLDC) [21].

Existen numerosos estudios donde se describen diferentes topologías de la máquina multifásica, métodos de modelado, diseño y técnicas de control [1], [13], [16], [22], [23].

En [1] se plantea que para el desplazamiento espacial entre dos fases consecutivas cualesquiera es $2\pi/n$ donde n es el número de fases. Esta idea surge de que cualquier máquina de n fases requiere dos corrientes para control independiente del par y flujo. Mientras tanto en [18], se proponen dos formas de realización de la máquina PM multifásica. La primera de flujo radial y rotor doble donde se trata de combinar las características positivas de estas máquinas y de flujo radial, lo cual ayuda a evitar el problema del yugo grueso del estator. La otra forma es la tradicional de una máquina trifásica de doble rotor.

Por otro lado, en [23] los autores proponen desarrollar el modelo de voltaje detrás de la reactancia (VBR), considerando un sistema de seis fases, con un rotor de imán permanente de polo salientes y simétrico (MSIP). En este trabajo se utiliza

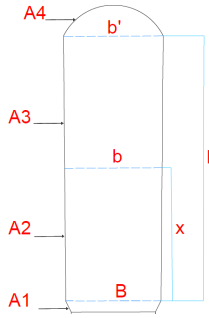


Figura 1. Geometría de la ranura del estator

un enfoque de vectores espaciales.

En [24] los autores realizan un análisis de la viabilidad de una máquina hexafásica de Imán permanente (IP) equipada con un devanado trifásico doble.

La investigación propuesta en este trabajo se fundamenta en el modelamiento de un motor hexafásico de imán permanente, utilizando el programa ELMER para el modelado en elementos finitos en 3D. El objetivo de esta investigación consiste en comparar los resultados de este método con los obtenidos mediante equivalentes circuitales de la máquina eléctrica.

En este artículo se presenta la metodología utilizada para el modelo de elementos finitos tanto para el estator como para el rotor de la máquina. Luego se presentan los resultados de las simulaciones. Seguidamente se analizan los resultados y se presentan las conclusiones.

II. METODOLOGÍA

II-A. Descripción de la Geometría

Para la creación de la geometría se pueden utilizar varios programas tipo CAD, por ejemplo: GMSH, Inventor, FreeCAD, Salome, etc. En este proyecto se utiliza la herramienta GMSH, la cual ofrece ventajas importantes para generar la geometría y producir el mallado, en 2D o en 3D [25].

II-A1. Modelo del estator: La creación de la geometría del estator se fundamenta en el modelo de la máquina eléctrica de imán permanente [25].

Tabla I
DATOS DEL ESTATOR EN CM

A_4	A_1	B	l	b'	A_c
251,36	35,25	70,5	35,1	25,3	1681,29

En la Tabla I se pueden observar los datos principales necesarios para realizar el cálculo del centro de la ranura del estator, utilizando el método de los trapecios. Así mismo, se incluyen las ecuaciones que describen la geometría del estator de la Fig. 1:

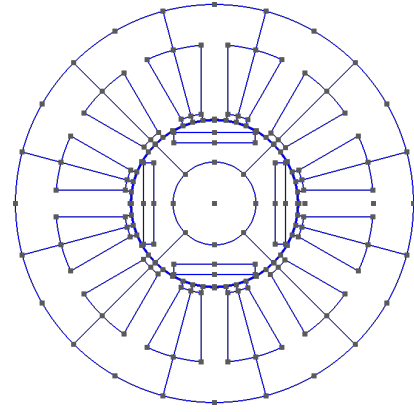


Figura 2. Geometría completa de la máquina

$$\begin{aligned}
 A_4 &= A_2 - A_3 - A_1 \\
 A_c &= A_2 + A_3 \\
 A_2 &= \frac{(b + b') * x}{2} \\
 A_3 &= \frac{(B + b) * (l - x)}{2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Con los datos de la Tabla I se obtiene $x = 23,458$; $b = 55,508$:

Con el conocimiento de las dimensiones de la máquina, se procede a crear la geometría del estator mediante la plataforma de GMSH. En el Algoritmo 1, se ingresan los datos para la geometría del estator y densidad de la malla. En el

Algoritmo 1 Ingreso de Datos

```

1 %Datos para geometria del estator
2 Rstatout=96; % Radio externo del estator
3 bd = 21; % Ancho del diente del estator
4 hstot = 36 % Altura total de la ranura del estator
5 Pmedio = 23,45 % punto medio
6 Gap = 0,6
7 % Datos densidad de malla
8 meshgap = Gap/2
9 meshfine = 0,5
10 meshnormal = 3
11 meshcoarse =10

```

Algoritmo 2, se realiza un bucle, para crear toda la geometría del estator. Todos los puntos deben girar a la enésima posición de la ranura formando toda la geometría como se observa en la Fig. 2

Algoritmo 2 Bucle for

```

1 %Bucle for para toda la geometria del Estator
2 for it in 1:11
3 Rotate (0,0,1), (0,0,0), it*(Pi/6);
4 Duplicata (Surface(22,24,28,30,26));
5 End for

```

II-A2. Modelo del rotor: A continuación se desarrolla la geometría del rotor. La Tabla II-A2 muestra los principales parámetros para el modelado del rotor.

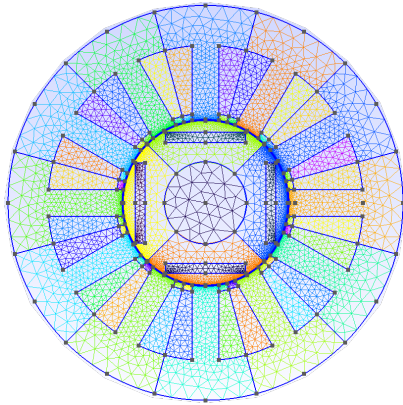


Figura 3. Mallado

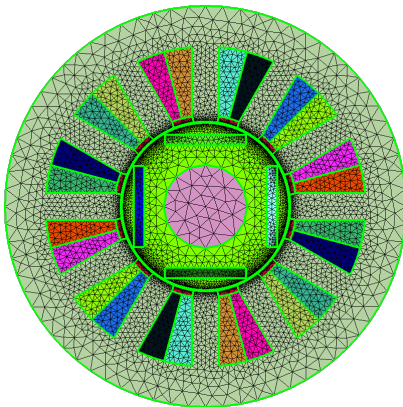


Figura 4. Modelo de maquina Hexafásica importada en Elmer GUI

Tabla II
DATOS DE LA GEOMETRÍA DEL ROTOR

$R_{rot_{in}}$	$R_{rot_{out}}$	w_{PM}	h_{PM}	h_{wedge}
20	40	39	4.9	3

Con los valores de la tabla II-A2, se genera los puntos, tanto del rotor como de los Imanes y al final se realiza el bucle para definir la geometría del rotor, tal como se muestra en la Fig. 2.

II-A3. Mallado GMSH: Posteriormente se ingresan todas las entidades físicas que constituye la geometría de la máquina de imán permanente, en el Algoritmo 3. De esta forma, se genera la malla para la geometría del rotor y estator.

Algoritmo 3 Mallado del la geometría del estator y rotor

```

1 %Limite exterior
2 Physical Curve(22) = 101, 100, 72, 71, 43, 42, 20, 217,216,
   188, 187, 159, 158, 130, 129;
3 %Limite deslizante
4 Physical Curve(23) = 1180, 1181, 1221, 1226,1198, 1193,
   1212, 1207;
5 Mesh 2;

```

En la Fig.3 se presenta el resultado del mallado de la geometría del rotor y del estator.

II-B. Programación en Elmer

El proceso de resolución comienza con la preparación de un archivo de entrada del solucionador (SIF), que contiene ajustes para el modelo, definición de las regiones físicas y de las condiciones de borde, selección de los materiales, parámetros específicos del solucionador y configuraciones para los solucionadores numéricos, tanto directos como iterativos. En Fig.4, se observa el modelo de la máquina hexafásica importada en Elmer GUI.

En el Algoritmo 4 se coloca el encabezado, las contantes y materiales que se utilizaran en la simulación en ELMER. Posteriormente se incluyen en el modelo las condiciones de contorno y la fuerzas en los cuerpos. La primera condición es el límite exterior, que define el potencial magnético cero, el cual se especifica por la condición de límite de Dirichlet. La segunda condición de limite, define la superficie deslizante y el movimiento del rotor se obtiene mediante la reasignación de la malla.

Algoritmo 4 Estructura Archivo SIF

```

1 %%% ENCABEZADO %%%
2 !Header;
3 CHECK KEYWORDS Warn;
4 Mesh DB "PMSMs6" ; % se llama a la malla
5 Include Path "Materials"; %incluye la carpeta Materiales
6 Results Directory "results"; %incluye la carpeta Resultados
7 End
8 %%% CONSTANTES %%%
9 Constants;
10 Permittivity of Vacuum = 8.8542e-12;
11 End
12 %%% MATERIALES %%%
13 Material 1;
14 Name = "Air";
15 Relative Permeability = 1;
16 End
17 Material 2;
18 Name = "Iron";
19 Inlcude BH;
20 End

```

A continuación, se define los solucionadores que se utilizan en el modelo. ElmerSolver es un módulo que realiza cálculos sobre la malla o los datos de campo. En el mismo se pueden simular diferentes solucionadores:

- **Solver 1:** se utiliza para hacer girar la malla del rotor y verificar que la superficie deslizante esté correctamente definida en el modelo.
- **Solver 2:** calcula el potencial magnético vectorial, una vez que se ha fijado la malla para una nueva posición.
- **Solver 3:** es el solucionador principal que calcula el potencial magnético vectorial A en geometría 2D.
- **Solver 4 y 5:** guarda los campos resueltos en formato VTU para poder utilizarlos en el post-procesamiento. También se almacenan los resultados del par escalar calculado en cada instante de tiempo.

II-C. Post-procesamiento

En esta etapa se utiliza el programa ParaView como post-procesador de ELMER, para la visualización de la densidad de flujo y de las líneas de flujo de la máquina hexafásica. luego

se guarda los datos en MATLAB para su procesamiento y visualización de resultados tales como par eléctrico, corrientes y voltajes en cada una de las fases.

II-D. Modelo Transitorio

En el Algoritmo 5, se ingresan los parámetros de la MSIP.

Algoritmo 5 Parámetros de la MSIP

```
1 %%% Parametros %%%
2 f = 60; %[rad/s el.] Frecuencia Electrica.
3 V= 256 %[V] Voltaje
4 wm = 1800/60 *2*pi; % frecuencia mecanica (rad/s.mech.)
5 pp=2; % numero de pares de polos
6 B_PM = 1.17; % [T] densidad de flujo remanente
7 mu_PM = 1.06; % Permeabilidad relativa de los PM
8 H_PM = B_PM/(mu_PM*pi*4d-7); %[A/m] magnetizacion de PM
9 Nph = 256; % Numero de vueltas de fase
10 Scs = 0.00117B3; % [m^2] area del lado de la bobina
11 sigma_PM = 1/(1.4d6); %[1/(Ohm*m)] conductor electrico
12 L_ew = 0.0062 % inductancia de fase de devanado
```

En el Algoritmo 6, se realiza el cambio del tipo de simulación para análisis transitorio del modelo desarrollado. El tamaño del paso de tiempo es $40/f$, lo que representa 40 pasos de tiempo durante un periodo eléctrico.

Algoritmo 6 Encabezado de la simulación transitoria

```
1 include transient_params.dat
2 Simulation Type = Transient;
3 Timestepping Method = BDF;
4 BDF Order = 2;
5 Timestep Sizes = $1/(f)/180;
6 Timestep Intervals = 181;
7 Output Intervals = 1;
8 End
```

En el Algoritmo 7 se muestra las fuerzas sobre los núcleos utilizadas para esta simulación. En Body Force 1, se define las fuentes de los circuitos eléctricos y se define el Voltaje pico en 256 V.

Algoritmo 7 Fuerzas corporales

```
1 %%% Fuerzas corporales %%%
2 Body Force 1
3 Name = "Circuit"
4 A_a = Variable time
5 RealMATC"256*sqrt(2)*sin((tx(0)-tx(1))*2*pi*f)"
6 B_b = Variable time
7 RealMATC"256*sqrt(2)*sin((tx(0)-tx(1))*2*pi*f-pi/3)"
8 C_c = Variable time
9 RealMATC"256*sqrt(2)*sin((tx(0)-tx(1))*2*pi*f-2*pi/3)"
10 D_d = Variable time
11 RealMATC"256*sqrt(2)*sin((tx(0)-tx(1))*2*pi*f-pi)"
12 E_e = Variable time
13 RealMATC"256*sqrt(2)*sin((tx(0)-tx(1))*2*pi*f-4*pi/3)"
14 F_f = Variable time
15 RealMATC"256*sqrt(2)*sin((tx(0)-tx(1))*2*pi*f-5*pi/3)"
16 End
```

Posteriormente se ingresan todos los elementos de la geometría que forman la MSIP. En el Algoritmo 8 se muestra una fase de la máquina. Se asocian las piezas con las diferentes ecuaciones, materiales y fuerzas en los elementos.

Algoritmo 8 Cuerpos para la simulación transitoria en el tiempo

```
1 %%% fases %%%
2 %A+
3 Body 1;
4 Target Bodies(1) = 1;
5 Name = "A+";
6 Equation = 1;
7 Material = 1;
8 End
```

En el Algoritmo 9, se muestran los componentes utilizados en los circuitos. Cada componente tiene su propia resistencia R_s y número de vuelta N_s .

Algoritmo 9 Componentes

```
1 %%% fases %%%
2 Component 1
3 Name = String A_plus
4 Body = Integer 1
5 Coil Type = String Stranded
6 Number of Turns = Real $ Nph/2
7 Resistance = Real $ Rs End
```

A continuación se definen las ecuaciones del circuito del estator en el archivo *transient-params.dat*. En el Algoritmo 10 se muestra el circuito para la fase A. El número de circuitos son 25, de los cuales 24 son para representar las bobinas del estator y uno para el rotor.

Algoritmo 10 Circuitos

```
1 Circuits = 25
2 ! Fase A
3 ! Matriz A x + Bx = Source
4 $ C.1.variables = 6
5 $ C.1.perm = zeros(C.1.variables)
6 $ C.1.A = zeros(C.1.variables, C.1.variables)
7 $ C.1.B = zeros(C.1.variables, C.1.variables)
8 $ C.1.Mre = zeros(C.1.variables, C.1.variables)
9 $ C.1.Mim = zeros(C.1.variables, C.1.variables)
```

Se asume que los circuitos son devanados simétricos. El diagrama del circuito se presenta en la Fig.6.

Para finalizar el circuito, en el Algoritmo 11, se observa que para cada elemento se define la tensión aplicada, la impedancia del circuito y su fuerza electromotriz. Además se muestra la corriente de la bobina.

Algoritmo 11 Variables de los Circuitos

```
1 % se define las variables de los circuitos
2 $ C.1.name.1 = "i_su"
3 $ C.1.name.2 = "v_su"
4 $ C.1.name.3 = "i_component(11)"
5 $ C.1.name.4 = "v_component(11)"
6 $ C.1.name.5 = "i_ewu"
7 $ C.1.name.6 = "v_ewu"
```

II-E. Modelo circuital

Se utiliza la siguiente expresión para las ecuaciones de voltaje para el modelo de la máquina de polo saliente de seis

fases MSIP [23].

$$[v_{a-f}] = [R_{a-f}] [i_{a-f}] + \frac{d}{dt} [\lambda_{a-f}] \quad (2)$$

donde,

$$[\lambda_{a-f}] = [L_{a-f}(\theta)] [i_{a-f}] + [\lambda_{pm}(\theta)]$$

El par eléctrico se expresa como [23]:

$$\begin{aligned} \tau_e = \frac{\partial W'_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} [i_{a-f}]^T \frac{\partial}{\partial \theta} [L_{a-f}(\theta)] [i_{a-f}] \cdots \\ \cdots + \frac{\partial}{\partial \theta} [\lambda_{pm}(\theta)] [i_{a-f}] \end{aligned} \quad (3)$$

La transformación a vectores espaciales en potencia [23] es,

$$\begin{aligned} \vec{x}_s = \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \quad \alpha \quad \alpha^2 \quad \alpha^3 \quad \alpha^4 \quad \alpha^5] [x_{a-f}]^T = \\ = \frac{1}{\sqrt{3}} [x_a + \alpha x_b + \alpha^2 x_c + \alpha^3 x_d + \alpha^4 x_e + \alpha^5 x_f] \end{aligned} \quad (4)$$

donde,

$$\alpha = e^{j\frac{\pi}{3}} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5)$$

En las máquinas de seis fases, la excitación de secuencia positiva es la que se utiliza para entregar el par al eje de la máquina. Este componente de secuencia se obtiene utilizando la siguiente expresión [23]:

$$\begin{aligned} \vec{f}(t) = f_x + j f_y = \frac{1}{\sqrt{3}} [f_a + \alpha f_b + \alpha^2 f_c \cdots \\ \cdots + \alpha^3 f_d + \alpha^4 f_e + f_f] \end{aligned} \quad (6)$$

donde:

$$[\tau] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & \frac{-1}{\sqrt{12}} & \frac{-1}{\sqrt{12}} & \frac{-1}{\sqrt{12}} & \frac{-1}{\sqrt{12}} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & \frac{-1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

La transformación entre las coordenadas primitivas (a, b, c, d, e, f) y las coordenadas (x, y) se puede lograr con [23]:

$$[f_{xy}] = [\tau] [f_{abcdef}] \quad (8)$$

$$[f_{abcdef}] = [\tau]^t [f_{xy}] \quad (9)$$

Para el modelo VBR, los siguientes términos corresponden a la inductancia en cada bobina [23]:

$$Z_s(s) = R_s + \frac{L_d + L_q}{2} s \quad (10)$$

La ecuación (11) corresponde con el voltaje detrás de la reactancia [23].

$$\begin{aligned} \vec{e}_s = e^{j\theta} \left[\frac{(L_d - L_q)}{2} \frac{d\vec{i}_s^{r*}}{dt} + j \frac{d\theta}{dt} (L_d - L_q) \vec{i}_s^{r*} \cdots \right. \\ \left. \cdots + j \frac{d\theta}{dt} \sqrt{3} \lambda_f \right] \end{aligned} \quad (11)$$

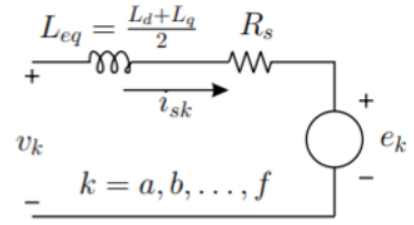


Figura 5. Resultado del modelo VBR

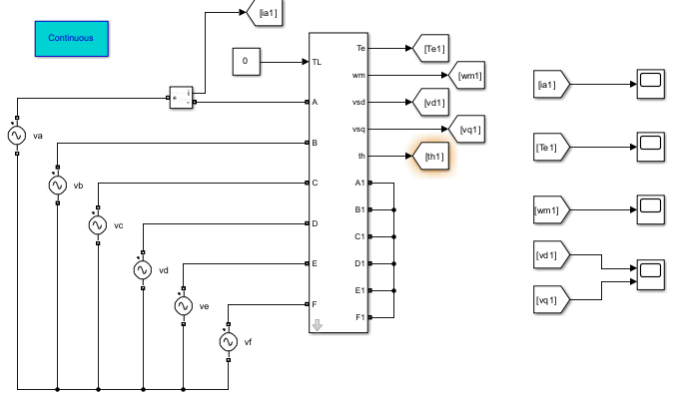


Figura 6. Resultado del modelo VBR en SIMULINK

Separando de (11) la parte real e imaginaria, se obtiene:

$$\begin{aligned} e_x = \frac{(L_d - L_q)}{2} \left[\frac{di_{sd}}{dt} \cos(\theta) + \frac{di_{sd}}{dt} \sin(\theta) \right] + \cdots \\ \cdots + w_r (L_d - L_q) [i_{sq} \cos(\theta) - i_{sd} \sin(\theta)] \cdots \\ \cdots - \omega_r \sqrt{3} \lambda_f \sin(\theta) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} e_y = \frac{(L_d - L_q)}{2} \left[\frac{di_{sd}}{dt} \sin(\theta) + \frac{di_{sd}}{dt} \cos(\theta) \right] + \cdots \\ \cdots + w_r (L_d - L_q) [i_{sd} \cos(\theta) - i_{sq} \sin(\theta)] + \cdots \\ - \omega_r \sqrt{3} \lambda_f \cos(\theta) \end{aligned} \quad (13)$$

donde,

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{V_{sd} - R_s i_{sd} + L_q i_{sq} \omega_r}{L_d} \quad (14)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{v_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_r (L_q i_{dr} + \sqrt{3} \lambda_f)}{L_q} \quad (15)$$

En la Fig. 5 se muestra el modelo equivalente por fase para una máquina síncrona de seis fases [23].

La Fig. 6, muestra la implementación en Simulink utilizada para el modelo VBR en la fase a de la máquina [23].

III. RESULTADOS

III-1. Resultados de régimen permanente: En la Fig. 7, se observa el flujo magnético y las líneas de flujo del modelo de la máquina hexafásica.

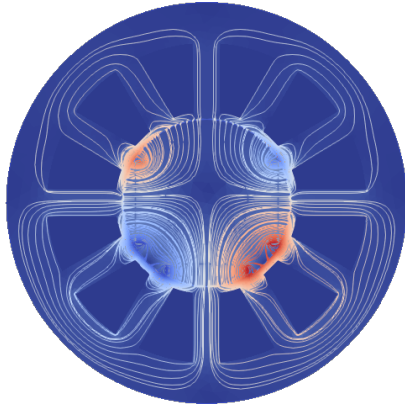


Figura 7. Flujo Magnético

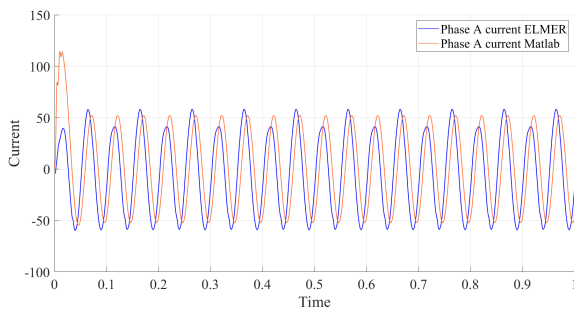


Figura 8. Corriente de fase A

V. CONCLUSIONES

En este estudio se llevó a cabo la modelación de una máquina sincrónica de imán permanente hexafásica utilizando el método de los elementos finitos con el programa ELMER. Para ello, se definieron las especificaciones de la máquina y se creó la geometría del rotor y el estator mediante el algoritmo GMSH, el cual fue exportado a Elmer FEM. Se desarrolló un modelo de simulación en estado estacionario y se verificó su validez mediante el programa de post-procesamiento Paraview. También se realizó una simulación transitoria para comprobar la precisión de los flujos magnéticos obtenidos. Los resultados de régimen permanente difieren entre un 20 % entre ambas simulaciones debido a la imprecisión en el ajuste de los parámetros en ambos modelos. Finalmente, se exportaron los resultados al programa MATLAB para analizar el par eléctrico, las corrientes y los voltajes de las bobinas del estator.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca, así como al grupo de Investigación en Energía, por las facilidades ofrecidas para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] E. Levi, M. Jones, and S. N. Vukosavic, "A series-connected two-motor six-phase drive with induction and permanent magnet machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 121–129, 2006.
- [2] Z. Wang and L. Chang, "A hybrid control method for six-phase permanent synchronous machine," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 575–578, 2008.
- [3] R. F. Schiferl and C. M. Ong, "Six-Phase Synchronous Machine with AC and DC Stator Connections, Part II: Harmonic Studies and a Proposed Uninterruptible Power Supply Scheme," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-3, no. 8, pp. 48–49, 1983.
- [4] E. Levi, "Multiphase electric machines for variable-speed applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, 2008.
- [5] R. O. Lyra and T. A. Lipo, "Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1351–1360, 2002.
- [6] D. Ye, J. Li, J. Chen, R. Qu, and L. Xiao, "Study on steady-state errors for asymmetrical six-phase permanent magnet synchronous machine fault-tolerant predictive current control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 640–651, 2020.
- [7] G. Valente, L. Papini, A. Formentini, C. Gerada, and P. Zanchetta, "Radial Force Control of Multisector Permanent-Magnet Machines for Vibration Suppression," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 7, pp. 5395–5405, 2018.
- [8] G. Sala, G. Valente, M. D. Nardo, M. Degano, P. Zanchetta, and C. Gerada, "Power-Sharing Control in Bearingless Multi-Sector and Multi-Three-Phase Permanent Magnet Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 10, pp. 9070–9080, 2021.
- [9] G. R. Catuogno and G. O. Garcia, "Conversion of Three-phase Commercial Machines into Six-phase Machines for Didactic and Research Purposes," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 2, pp. 467–475, 2018.
- [10] W. Zhang, B. Du, T. Li, and S. Cui, "Harmonic Current Suppression of Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Hybrid Control Strategy," *2020 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, SCEMS 2020*, vol. 1, pp. 698–702, 2020.
- [11] H. Lu, Z. Fan, Y. Shang, S. Shao, H. Xue, and Y. Tan, "A Simplified Method of Sensorless Control of the Permanent Magnet Synchronous Machine," *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2020 ECCE Asia*, no. 1, pp. 2272–2277, 2020.

III-2. Comparación de resultados de régimen transitorio:

En la Fig.8, se muestra la comparación de la corriente de una fase de la máquina hexafásica utilizando el modelo circuital y el modelo de elementos finitos.

IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Fig. 7, se puede apreciar el flujo magnético del modelo de la máquina hexafásica. Los valores de densidad de flujo se encuentran dentro de los esperados para la simulación y se observa que las líneas son continuas sobre la superficie deslizante y tangenciales en los límites interior y exterior. Además, la periodicidad y simetría de las líneas permiten verificar que el modelo ha sido resuelto de manera correcta.

Por otro lado, en la Fig. 8, se muestra una comparación entre las corrientes calculadas mediante el programa de elementos finitos y la simulación circuital. Se puede observar un error de aproximadamente un 20 % en la amplitud de las corrientes y un 2 % en la fase. La frecuencia coincide perfectamente en ambas simulaciones. Estos errores pueden deberse, a las diferencias entre los métodos utilizados y al número limitado de pasos posibles en la modelación de elementos finitos. Otra causa de estos errores es el ajuste de los parámetros en cada uno de los modelos. Además, los tiempos requeridos para este tipo de modelación dificultan la obtención de una mayor precisión. También es importante destacar que en la modelación de ELMER se desprecian algunos parámetros que son considerados en la modelación circuital.

- [12] K. Klimkowski, M. Gwozdziwicz, and M. Dybkowski, "Analysis of the vector control algorithm for new concept of Permanent Magnet Synchronous Machines in wide speed range," *2017 International Symposium on Electrical Machines, SME 2017*, 2017.
- [13] R. Kianinezhad, B. Nahid-Mobarekeh, L. Baghli, F. Betin, and G. A. Capolino, "Modeling and control of six-phase symmetrical induction machine under fault condition due to open phases," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 5, pp. 1966–1977, 2008.
- [14] W. Zhong, H. Yu, M. Hu, Z. Shi, and Q. Liu, "Study on a Novel Pseudo-Six-Phase Linear Flux-Switching Permanent-Magnet Machine for Direct Drive," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 4–7, 2016.
- [15] J. A. Riveros, F. Barrero, M. J. Duran, B. Bogado, and S. Toral, "Estimation of the electrical parameters of a five-phase induction machine using standstill techniques. Part II: Practical implications," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2, no. 1, pp. 3674–3679, 2011.
- [16] P. F. Gonçalves, S. M. Cruz, and A. M. Mendes, "Predictive current control of six-phase permanent magnet synchronous machines with modulated virtual vectors," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2019-October, pp. 6229–6234, 2019.
- [17] P. F. Goncalves, S. M. Cruz, and A. M. Mendes, "Disturbance Observer Based Predictive Current Control of Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines for the Mitigation of Steady-State Errors and Current Harmonics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 130–140, 2022.
- [18] J. Wang, R. Qu, and L. Zhou, "Dual-rotor multiphase permanent magnet machine with harmonic injection to enhance torque density," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, pp. 3–6, 2012.
- [19] Q. Shen, N. Sun, G. Zhao, X. Han, and R. Tang, "Design of a permanent magnet synchronous motor and performance analysis for subway," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, pp. 5–8, 2010.
- [20] W. Li and M. Cheng, "Investigation of influence of winding structure on reliability of permanent magnet machines," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 87–95, 2020.
- [21] L. Parsa and H. A. Toliyat, "Fault-tolerant five-phase permanent magnet motor drives," *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 2, pp. 1048–1054, 2004.
- [22] Y. Demir and M. Aydin, "A Novel Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Asymmetric Stator Winding," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, 2016.
- [23] J. M. Aller, J. A. Restrepo, J. C. Viola, and J. R. Mayor, "Simplified Voltage Behind Reactance model for the Six-phase Open-End Salient Pole PMSM," *ICEM 2020 Proceedings*, pp. 1–6, 2020.
- [24] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Six-phase supply feasibility using a PM fractional-slot dual winding machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 5, pp. 2042–2050, 2011.
- [25] P. Ponomarev, "FEM Modeling of PMSMs Using Elmer," *Lappeenranta University of Technology, Laboratory of Electrical Drives Technology*, no. May, pp. 1–10, 2014.