

ROTATIONAL MAGNETIC FIELD UNDER THE EFFECT OF SATURATION IN ROTATIONAL THREE-PHASE ELECTRICAL MACHINES

CAMPO MAGNÉTICO ROTACIONAL BAJO EL EFECTO DE LA SATURACIÓN EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTACIONALES TRIFÁSICAS

Luis David Pabón Fernandez¹, Aldo Pardo García²,
Diego Armando Mejía Bugallo³, Laury Katherine Gualdrón Godoy⁴

¹MSc., Universidad de Pamplona, Grupo LOGOS, Pamplona, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-1788-4781>.

²PhD., Universidad de Pamplona, Grupo Automatización y Control, Pamplona, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-2040-9420>.

³MSc., Universidad de Pamplona, Grupo LOGOS, Pamplona, Colombia, <https://orcid.org/0000-0002-0392-5741>.

⁴Ing., Universidad de Pamplona, Grupo LOGOS, Ingeniería Eléctrica, Pamplona, Colombia, <https://orcid.org/0009-0008-3339-2799>.

diego.mejia@unipamplona.edu.co

Cite this article as: L. Pabón Fernández, A. Pardo García, D. Mejía Bugallo, L. Gualdrón Godoy “*Campo Magnético Rotacional Bajo El Efecto De La Saturación En Máquinas Eléctricas Rotacionales Trifásicas*”, *Prospectiva*, Vol. 23 N° 2 2025.

Recibido: 14/05/2025 / Aceptado: 30/07/2025

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i2.3818>

RESUMEN

El campo magnético rotacional pertenece a los temas clásicos de la literatura, en cuanto a máquinas eléctricas rotativas en corriente alterna, sin embargo, desde la literatura se ha asumido que este describe un círculo perfecto alrededor del estator. Estudios previos han utilizado modelos para estimar el comportamiento del flujo dentro de la máquina, pero no se esclarece la forma de la trayectoria del campo magnético frente a la presencia de saturación o armónicos. El presente artículo muestra el modelamiento de un estator trifásico de una máquina eléctrica de devanados concentrados, de paso diametral, de dos polos, a 60 Hz, construida con chapas magnéticas cuya curva de imanación representa el comportamiento no lineal del núcleo. El objetivo del modelo es evaluar la forma del campo magnético rotacional, obtenida frente a

diferentes escenarios de operación dentro de la curva de magnetización, para esto, las densidades de flujo trifásicas se proyectan en el plano α - β haciendo uso de la transformada de Clarke; en donde se evalúa la forma de la trayectoria del campo magnético giratorio. El análisis se profundiza con las proyecciones de las componentes α - β sobre un marco referencial síncrono dq, mediante la utilización de la transformada de Park. Para obtener conclusiones se aplicó la transformada rápida de Fourier a las componentes del campo magnético rotacional en dq y a las densidades de flujo magnético originales, estableciendo las respectivas relaciones con las formas del campo magnético rotacional obtenidas. La herramienta utilizada para el estudio fue el entorno de simulación Simulink de Matlab, en él se demuestra que el campo magnético adquiere una forma hexagonal conforme la saturación va tomando relevancia, esto debido a la deformación por armónicos presentes en las densidades de flujo y a la aparición de armónicos en la proyección del campo magnético en el eje directo.

Palabras clave: Campo magnético rotacional, Distorsión armónica, Máquinas eléctricas trifásicas, Transformada de Clarke, Transformada de Park.

ABSTRACT

The rotational magnetic field belongs to the classic topics of literature, regarding rotating electric machines in alternating current, however, from the literature it has been assumed that it describes a perfect circle around the stator. Previous studies have used models to estimate the behavior of the flow inside the machine, but the shape of the magnetic field face to the presence of saturation or harmonics is not clarified. This article shows the modeling of a three-phase stator of an electrical machine with concentrated windings, diametral pitch, two poles, at 60 Hz, built with magnetic material whose magnetization curve represents the nonlinear behavior of the core. The objective of the model is to evaluate the shape of the rotational magnetic field, obtained in front of different operating scenarios of the magnetization point, for this, the three-phase flux densities are projected in the α - β plane using the Clarke transform; where the shape of the rotating magnetic field is evaluated. The analysis is deepened with the projections of the α - β components on a synchronous reference frame dq, through the use of the Park transform. To obtain conclusions, the fast Fourier transform was applied to the components of the rotational magnetic field in dq and to the original magnetic flux densities, establishing the respective relationships with the shapes of the rotational magnetic field obtained. The tool used for the study was the environment Simulink of Matlab, which demonstrates that the magnetic field acquires a hexagonal shape as saturation becomes relevant, this due to the harmonic deformation present in the flux densities and the appearance of harmonics in the projection of the magnetic field on the direct axis.

Keywords: Clarke Transform, Harmonic distortion, Park transform, Rotational magnetic field, Three-phase electrical machine.

1. INTRODUCCIÓN

La saturación magnética es un fenómeno presente en materiales ferromagnéticos, que se genera cuando los dominios (pequeños volúmenes de material en donde los momentos magnéticos están orientados en una misma dirección) están en su totalidad alineados con la intensidad de campo externa aplicada sobre el material [1], en este punto el crecimiento de la intensidad de campo externo no provocará que la densidad de flujo total crezca de forma representativa, debido a que los dominios ya están alineados y el campo de imanación propio no aumentará [2].

Todas las máquinas eléctricas rotacionales de corriente alternan, operan bajo el principio del campo magnético rotacional, que clásicamente se define como un campo magnético que gira o rota dentro de la máquina [3]. En una máquina trifásica las corrientes que fluyen a través de los devanados del estator están

desfasadas 120 grados eléctricos entre sí. Estas corrientes generan campos magnéticos individuales que, al superponerse, crean un campo magnético resultante que rota alrededor del estator, en una trayectoria circular perfecta con una magnitud igual al 150% del campo pico generado por cada fase [4,5].

El comportamiento de este campo en máquinas eléctricas ha sido ampliamente estudiado, pues es el fundamento de la operación de las máquinas rotativas de corriente alterna [6], recientemente se han presentado estudios relacionados con la distribución de las densidades de flujo dentro de las máquinas, se han determinado modelos de tres dimensiones para determinar cómo se comporta el flujo magnético al interior de la máquina [7,8] incluso estudios recientes y avanzados han planteado estrategias novedosas basadas en este campo para detectar, fallas en las máquinas eléctricas rotativas y para determinar puntos de posibles alteraciones en las condiciones normales de operación [9,10,11]. Sin embargo, en cuanto a la forma ideal de la trayectoria, no se han realizado estudios que permitan identificar la variación de la forma del fasor espacial del campo magnético durante la rotación, frente a la presencia de armónicos o frente a las no linealidades existentes como la saturación magnética.

La saturación magnética de los núcleos de las máquinas eléctricas puede generar distorsiones armónicas en las densidades de flujo, y por tanto deformar las tensiones inducidas y las corrientes generadas, por lo que la comprensión de los efectos de la saturación y la distorsión armónica [12], es de gran importancia en el área de los motores, generadores y transformadores eléctricos [13]. El entendimiento de como la distorsión armónica puede tener en algunas ocasiones su causa en las no linealidades del núcleo de las máquinas eléctricas, y por tanto de la saturación magnética [14], es de suma importancia para esclarecer el impacto de la misma dentro de las máquinas eléctricas permitiendo conocer sus causas, efectos y soluciones [15], en el caso particular del campo magnético será relevante determinar como la saturación puede afectar la forma de la trayectoria alrededor del estator y por ende tener diferentes efectos como en el torque electromagnético, la corriente absorbida u otros.

Debido a la relevancia del campo magnético rotacional, la presencia de saturación en las máquinas eléctricas rotativas trifásicas y la importancia de la distorsión armónica en las redes eléctricas, el presente artículo mostrará la deformación que sufre el campo magnético rotacional a causa de la saturación, identificando los armónicos presentes en las proyecciones del Campo magnético en diferentes ejes referenciales, este análisis se realiza a través del modelado de una maquina eléctrica utilizando las transformadas de Clarke, Park y Fourier.

2. CAMPO MAGNÉTICO ROTACIONAL EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS

El campo magnético rotatorio en máquinas eléctricas, es un campo creado por la interacción de las densidades de flujo generadas por las tres fases de un devanado trifásico, o por dos devanados en el caso de las máquinas bifásicas en cuadratura. Este campo gira a la misma velocidad de la frecuencia eléctrica de la red, y si la alimentación es equilibrada, la forma que este describe teóricamente es un círculo perfecto, con una magnitud equivalente a 1.5 veces el campo magnético pico de una de las fases [16], para máquinas trifásicas, y equivalente al campo pico de una de las fases, para máquinas bifásicas en cuadratura, conocidas como máquinas monofásicas, ya que la alimentación se hace con fase y neutro y a través de diferentes estrategias como el uso de un condensador, la corriente de una bobina se desfasa 90° con respecto a la otra, generando un sistema en cuadratura [17].

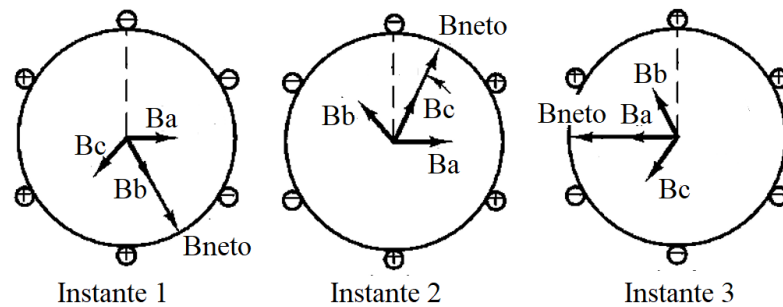
Este campo es fundamental para el funcionamiento de los motores eléctricos en corriente alterna, ya que el campo del inductor (en la mayoría de los casos el rotor), generado por una excitación en máquinas síncronas, o por inducción en máquinas asíncronas, intentará alinearse con el campo giratorio del estator, produciendo un torque electromagnético que genera el movimiento del rotor de la máquina [18,19]. De igual forma, en generadores eléctricos en alterna, el campo magnético rotatorio es creado por las corrientes que salen del

generador hacia las cargas, por lo que este campo atrasará al campo del inductor, generando un torque electromagnético que se opone al movimiento. Tanto en generadores como en motores de corriente alterna, el campo magnético rotatorio aparecerá, solo diferenciándose en el adelanto o en el atraso que tenga con respecto al campo inductor [20].

En la figura 1 se muestra el principio de operación del campo magnético rotacional en una máquina trifásica, se observan tres instantes, en los cuales la orientación del campo resultante y su magnitud depende de la interacción de los tres campos generados por los devanados de cada una de las fases. En los tres instantes la magnitud del campo magnético es la misma pero su orientación va cambiando, percibiéndose una rotación en sentido de las manecillas de reloj. Por convención, en una máquina eléctrica alimentada con secuencia positiva su campo magnético rotatorio girará en sentido contrario de las manecillas del reloj [5].

Figura 1. Campo magnético rotatorio evaluado en tres instantes. Fuente: Autor.

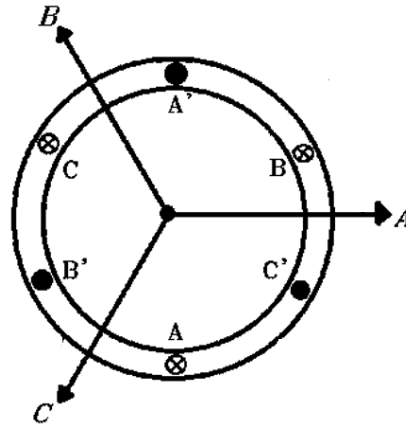
Figure 1. Rotating magnetic field evaluated at three instants. Source: Author.



3. MÉTODOS Y RESULTADOS

Para la realización del estudio, se modeló una máquina trifásica bipolar, con un estator de devanados concentrados, es decir las bobinas de cada una de las fases solo utilizan un par de ranuras; con un paso equivalente al paso polar, por lo que los devanados serán de paso diametral, lo que corresponde con un ángulo de 180° eléctricos entre el lado inicial y el lado final de la bobina de fase. Esta constitución del estator hace que el factor de distribución y de paso de la máquina sean de uno, por lo que el número de espiras efectivas por fase es el número de vueltas de la bobina de una fase. La máquina será simétrica y equilibrada, por lo que las tres fases tendrán el mismo número de vueltas y estarán desfasadas entre sí 120° mecánicos. La figura 2, muestra el esquema del estator de la máquina y la orientación de los campos magnéticos de cada fase.

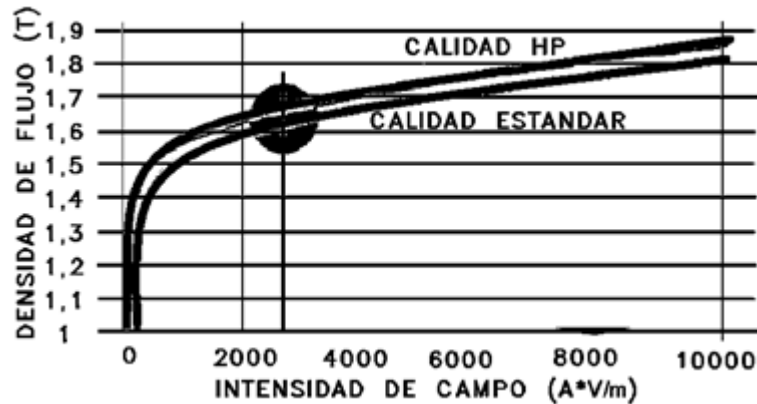
Figura 2. Estator de la máquina y orientación de los campos. Fuente: Autor.
Figure 2. Stator of the machine and orientation of the fields. Source: Author.



Nótese que la orientación geométrica de los campos corresponde a una “secuencia negativa”, ya que el campo de la fase B adelanta al campo de la fase A, esta orientación no tiene correspondencia con la secuencia de alimentación de la máquina, que será de secuencia positiva. La “secuencia negativa” de la orientación de los campos se establece para que el sentido de rotación magnético se de en sentido contrario de las manecillas del reloj, y corresponda con el sentido de rotación normal de los fasores, por lo que el campo magnético giratorio se podría considerar un fador espacial.

Para el caso particular de este estudio, la máquina tendrá 50 espiras por cada bobina de fase y una longitud media de la trayectoria magnética de 20 cm y una profundidad de 15 cm, lo que corresponde con un pequeño motor eléctrico de 180 vatios a 120 Voltios y una corriente nominal de 2 A. Como el objetivo del estudio es ver el efecto de la saturación en la forma del campo magnético rotacional, se considera que el estator de la máquina está construido con laminaciones de material ferromagnético de calidad HP, el cual tiene un punto de saturación de 1.68T, una mejora presentada con respecto a las laminaciones de calidad estándar. La figura 3 muestra la curva de magnetización presentada por el fabricante de este tipo de material ferromagnético. La curva superior corresponde a las laminaciones de calidad HP, y la curva de más bajo nivel a la chapa de calidad estándar [21].

Figura 3. Curva de magnetización de láminas ferromagnéticas de calidad HP. Fuente: Waelzholz [21].
Figure 3. Magnetization curve of HP-grade ferromagnetic sheets. Source: Waelzholz [21].



Modelo de la máquina

El estator descrito anteriormente se alimentará con un sistema trifásico de corrientes equilibradas en secuencia positiva, que corresponden con (1), (2) y (3).

$$i_a(t) = i_p * \text{sen}(w * t) \quad (1)$$

$$i_b(t) = i_p * \text{sen}\left(w * t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$i_c(t) = i_p * \text{sen}\left(w * t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

Donde i_p es la corriente pico por fase, w es la velocidad angular de la red y t es el tiempo.

Para el caso de estudio, la frecuencia de la red es 60 Hz, por lo que la velocidad angular corresponde con $120 * \pi$ rad/s, la corriente pico al ser ondas sinusoidales es $\sqrt{2}$ veces el valor RMS de la corriente. Estas corrientes generarán las fuerzas magnetomotrices en cada una de las fases según (4).

$$F = N * i \quad (4)$$

Donde N es el número de vueltas del devanado de una fase y F la fuerza magnetomotriz de fase en (A*vuelta/m). Estas fuerzas harán que el material ferromagnético experimente una intensidad de campo magnético externo correspondiente con (5).

$$H = \frac{F}{l} \quad (5)$$

Donde H es la intensidad de campo en A*vuelta y l es la longitud media en metros.

Estas intensidades de campo harán que los dominios magnéticos del material se orienten y creen un campo de imanación propio (M), creando una densidad de flujo total (B) dentro del material ferromagnético de la máquina. Para determinar estas densidades de flujo por fase se debe tener en cuenta la no linealidad del núcleo y la saturación.

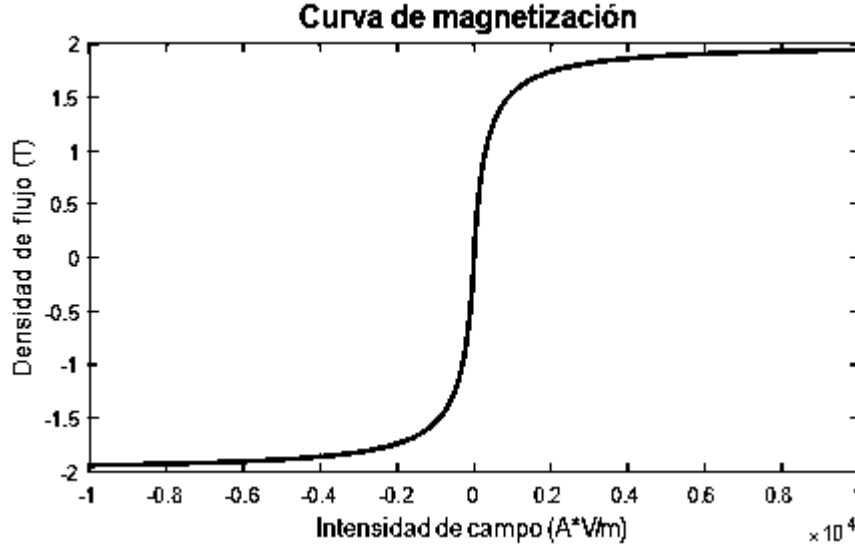
La saturación en materiales ferromagnéticos ocurre cuando el material no puede incrementar sus campos magnéticos, pues todos sus dominios magnéticos están alineados en una dirección específica. Esta situación en los materiales ferromagnéticos es modelada a través de la curva de imanación de la muestra, para el estudio en cuestión es más conveniente emplear una expresión analítica que relacione B con H . Una ecuación típica es la ecuación de Fröelich [17]:

$$B = \frac{aH}{1 + bH} \quad (6)$$

Donde B es la densidad de flujo en Teslas(T), a y b son constantes adimensionales obtenidas del laboratorio.

En particular la laminación utilizada en la máquina objeto de este estudio, tiene una curva de magnetización extendida hacia los dos cuadrantes de operación (Ya que la máquina opera en corriente alterna), como se ilustra en la figura 4.

Figura 4. Curva de magnetización Extendida de las láminas ferromagnéticas de calidad HP. Fuente: Autor.
Figure 4. Extended magnetization curve of HP-grade ferromagnetic sheets. Source: Author.



La ecuación de Fröelich ajustada a la curva de magnetización, presentada en la figura 3 y extendida en la figura 4, corresponde al sistema de ecuaciones dado por (7) y (8).

$$B = \frac{0.0067H}{(1 + 0.0033H)} \text{ para } H \geq 0 \quad (7)$$

$$B = \frac{-0.0067H}{(-1 + 0.0033H)} \text{ para } H < 0 \quad (8)$$

Con las anteriores ecuaciones y las ondas de intensidad de campo externo, creadas por las corrientes y las bobinas del estator, se puede determinar la onda de densidad de flujo que crea cada una de las fases. El campo magnético rotacional será el resultado de la adición de las tres ondas de densidad de flujo. Para poder determinar la forma del campo magnético rotacional de la máquina, se descompondrá el campo resultante en una componente proyectada sobre un eje horizontal (B_∞) y sobre un eje en cuadratura (B_β), esto corresponde con lo que clásicamente se ha descrito como la transformada de Clarke [22].

La Transformada de Clarke es un procedimiento matemático que convierte las señales trifásicas a-b-c en coordenadas α - β -0. La componente 0 está orientada de manera perpendicular al plano espacial definido por el plano α - β . En el caso de que los fasores en análisis sean equilibrados y balanceados, esta componente es completamente nula. La transformada es especialmente útil para el análisis de corrientes y voltajes en máquinas eléctricas y corresponde a la expresión matricial (9), según [4, 22].

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

En donde, x_a , x_b y x_c hacen referencia a los fasores trifásicos de la corriente, voltaje o para este caso densidades de flujo; x_α y x_β son las proyecciones en los ejes del sistema referencial $\alpha\beta$. La componente

cero no se expresa, ya que las corrientes y la máquina en estudio son equilibrados y balanceados. El anterior sistema se puede condensar de la siguiente forma:

$$[x_{\alpha\beta}] = k \cdot [x_{abc}] \quad (10)$$

La constante k en la transformada de Clarke, clásicamente en la literatura, ha tomado dos valores en el análisis de sistemas trifásicos: $K = \sqrt{2/3}$ es conocida como la constante de “potencia constante”, ya que es utilizada para analizar voltajes y corrientes manteniendo la potencia igual en el sistema abc y en el sistema $\alpha\beta$. $k=2/3$ es conocida como constante de “magnitud constante”, ya que es utilizada para analizar voltajes y corrientes y su efecto es mantener la magnitud en el sistema abc y $\alpha\beta$, es decir, el fasor resultante de la transformación tendrá una magnitud igual a la magnitud pico de una de las fases. Para la aplicación en este estudio, se desea obtener la magnitud real de la adición de los tres campos, por lo que la constante se adopta con un valor de uno. La forma del campo magnético rotacional se obtiene en el plano alfa beta, adicionando las dos componentes en cuadratura.

Como análisis adicional, se transformaron las componentes del campo magnético rotacional alfa beta, en un eje referencial que, rota a la velocidad síncrona, con el fin de observar el comportamiento de las proyecciones en el eje d y q. Para esto se utiliza la transformada de Park, que establece un nuevo marco de referencia en el que los ejes dq rotan con una velocidad angular constante en relación con α - β . Esto provoca una rotación en un sistema de referencia espacial. (11) presenta la transformación de Park [22].

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde θ representa el ángulo de rotación del eje referencial. Este puede ser calculado con la expresión 12:

$$\theta = w * t \quad (12)$$

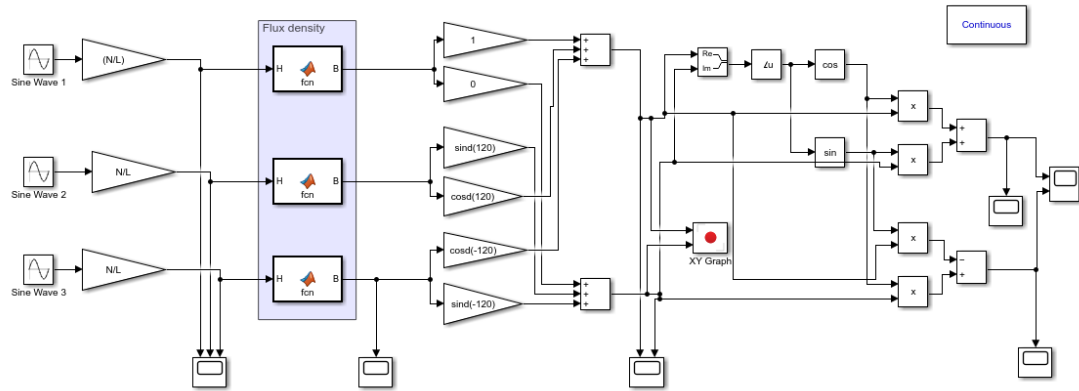
En la anterior ecuación w representa la velocidad angular de la máquina en rad/s. En el caso de este estudio se utilizará la referencia síncrona, por lo que la frecuencia a utilizar será de 60 Hz y la referencia estará determinada por la ecuación 13.

$$w = 2\pi * f \quad (13)$$

Esquema de simulación.

El modelo descrito anteriormente se llevó al entorno de simulación Simulink de Matlab, la Figura 5 presenta el esquema de este modelo.

Figura 5. Modelo de simulación. Fuente: Autor.
Figure 5. Simulation model. Source: Author.



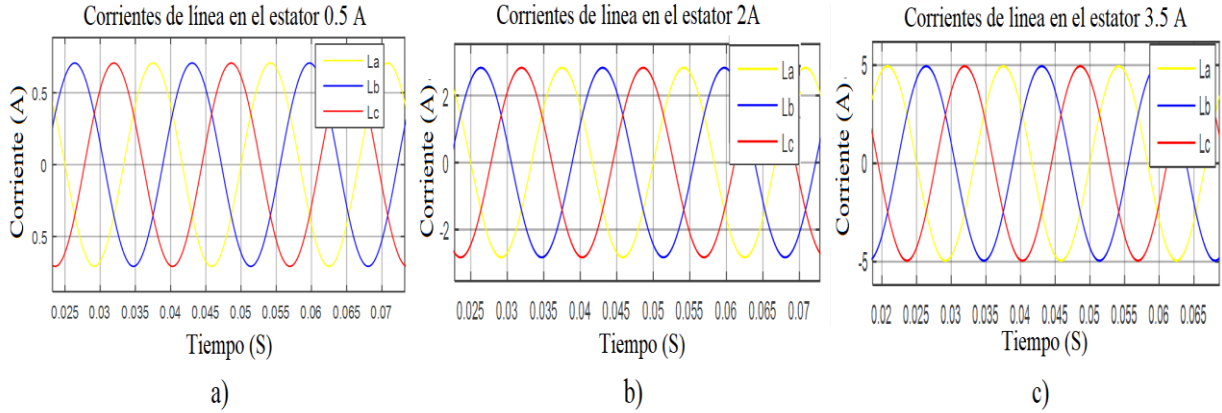
En primera instancia se presentan las corrientes sinusoidales de alimentación, seguida del modelo de la creación de la intensidad de campo externo, estas van al modelo de la magnetización del material ferromagnético, para crear las densidades de flujo, que a través de la transformada de Clarke generarán el campo magnético rotacional, a partir de las componentes B_α y B_β . Posterior estas componentes se llevan a la transformada de Park con referencia síncrona para observar el comportamiento de las proyecciones en el eje d y q. Adicionalmente a través del bloque Power Gui y su transformada rápida de Fourier (FFT), se analiza el contenido armónico de las densidades de flujo de cada fase y de las proyecciones del eje directo y en cuadratura del campo magnético en el marco referencial síncrono.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder determinar el efecto que la saturación ejerce sobre la forma del campo magnético rotacional, se realizaron diferentes simulaciones con corrientes eficaces que van desde la zona lineal hasta entrar en una saturación fuerte. Para evidenciar los resultados, en el artículo se muestran tres escenarios: el primero con una corriente eficaz estatórica de 0.5 A rms, estando en la zonal lineal, es decir, la máquina opera por debajo del codo de la curva de saturación, el segundo con 2 A rms, como corriente nominal, por lo que la máquina operará en el codo de la curva y el tercer caso con 3.5 A rms, por la región superior al codo de la curva de magnetización. La figura 6 muestra las formas de onda de las corrientes en los tres escenarios.

Figura 6. Formas de onda de corriente a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

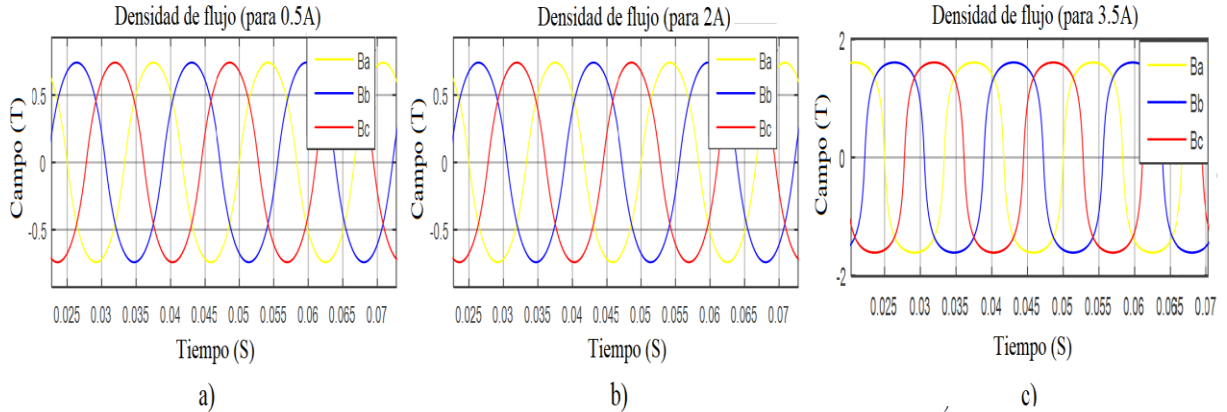
Figure 6. Current waveforms a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



Estas corrientes generaron las densidades de flujo magnético mostradas en la figura 7.

Figura 7. Formas de onda de las densidades de flujo por fase a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

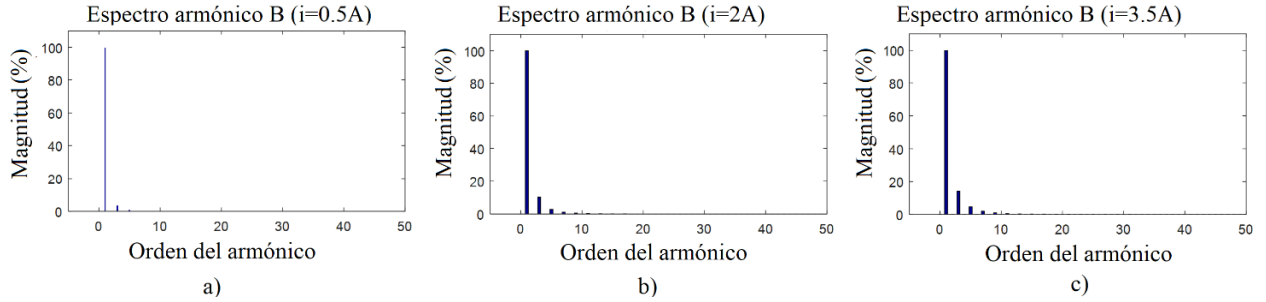
Figure 7. Flux density waveforms per phase a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



Como se puede observar en la figura, a medida que el punto de operación sube en la curva de magnetización, las formas de onda de las densidades de flujo se van deformando, dejan de ser una onda sinusoidal para pasar a ser ondas achatadas en las crestas y en los valles, esta deformación va acompañada de la aparición de armónicos en el espectro de las densidades de flujo. La figura 8 muestra el espectro armónico resultado de la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT) a la forma de onda de la densidad de fase.

Figura 8. Espectro armónico de las densidades de flujo por fase a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

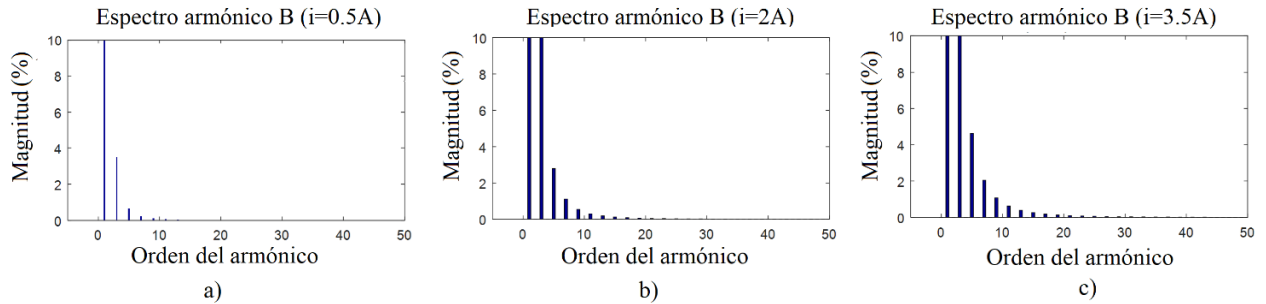
Figure 8. Harmonic spectrum of the flux densities per phase a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



Es claro que a medida que el nivel de saturación del núcleo va aumentando, en el espectro armónico de la onda de densidad de flujo los armónicos impares van apareciendo, siendo las presencias más fuertes los órdenes 3th, 5th, 7th y 9th. La aparición de estos se debe al achatamiento experimentado por la densidad de flujo debido a la saturación del material ferromagnético, la figura 9 muestra una ampliación del eje de las ordenadas en cada uno de los espectros, con el fin de mostrar de forma más clara los componentes armónicos presentes.

Figura 9. Ampliación del espectro armónico de las densidades de flujo por fase a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

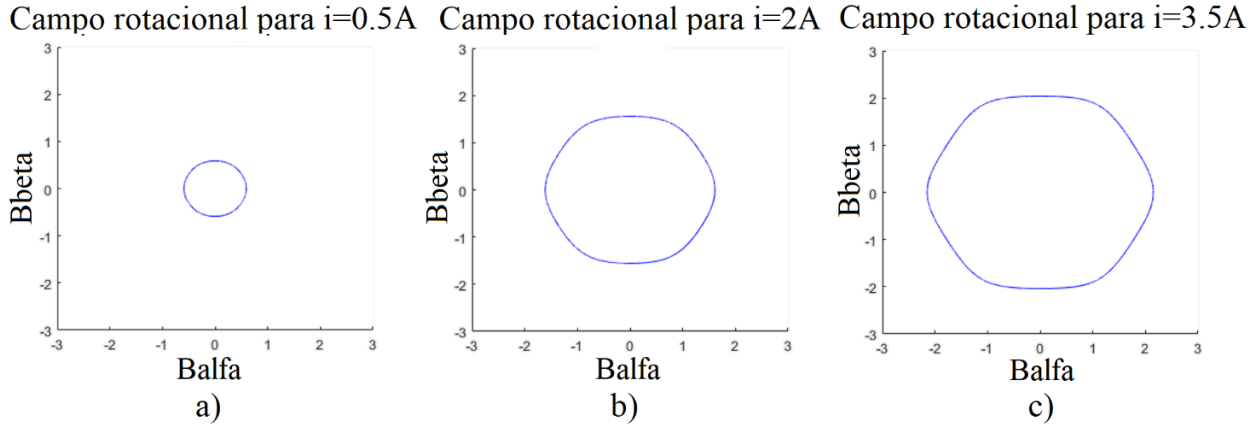
Figure 9. Magnified harmonic spectrum of the flux densities per phase a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



La interacción de las tres densidades de flujo genera el campo magnético rotacional en el estator de la máquina, la figura 10 muestra la forma del campo magnético rotacional en el plano α - β , para los tres escenarios de simulación.

Figura 10. Forma del campo magnético rotacional a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

Figure 10. Shape of the rotating magnetic field a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.

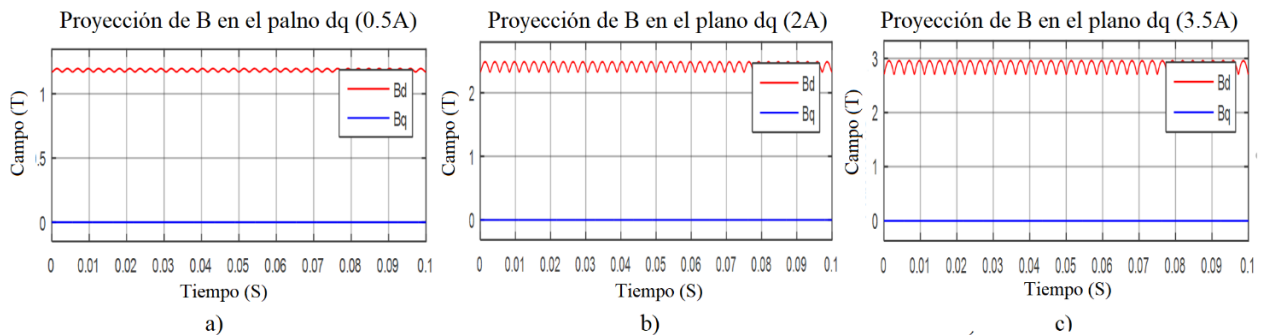


Claramente se observa que la forma del campo magnético rotacional, para puntos de operación por debajo del codo de la curva de magnetización es un círculo perfecto, sin embargo, en la condición nominal de la máquina, cuando el material ferromagnético se encuentra en el codo de la magnetización, este campo empieza a mostrar una forma hexagonal en su rotación, llegando a formar un hexágono bien definido cuando el núcleo está completamente saturado.

Los resultados de aplicar la transformada de Park a las componentes B_α y B_β del campo magnético rotacional, utilizando la referencia síncrona, se presenta en la figura 11 para los tres escenarios, en donde se muestran las evoluciones temporales de las componentes del campo, en el eje directo (B_d) y en cuadratura (B_q).

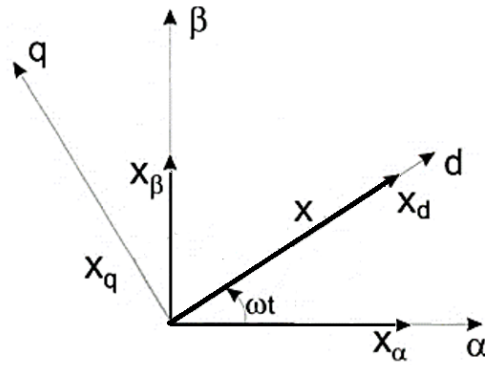
Figura 11. Proyección del campo magnético rotacional en la referencia síncrona dq a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

Figure 11. Sh. Projection of the rotating magnetic field in the synchronous dq reference frame a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



La proyección en el plano dq muestra que la componente B_q es cero, esto se da porque el eje referencial d se posa sobre el campo magnético rotacional, y como el ángulo de giro corresponde con el ángulo dado por la velocidad angular de la red, el campo magnético rotacional estará siempre sobre el eje directo (d), lo que anulará cualquier posible componente en el eje en cuadratura (q). Este hecho se ilustra en el diagrama fasorial espacial de la figura 12, en donde el campo se representa por el fasor espacial X.

Figura 12. Diagrama fasorial de la transformación dq. Fuente: Autor.
Figure 12. Phasor diagram of the dq transformation. Source: Author.



De igual forma, se puede observar que en el eje directo el campo magnético toma el nivel pico de la inducción de fase multiplicado por 1.5, con la presencia de un rizado. Si se observa a detalle cada uno de los escenarios se determina que el rizado tiene la misma frecuencia aumentando su magnitud conforme el núcleo se satura.

Realizando el análisis de la transformada rápida de Fourier para el campo en el eje directo, se obtiene que hay una gran componente de armónico cero, que corresponde con la magnitud del campo, sin embargo, aparecen componentes armónicas de diferente orden, en la tabla 1 se resume el contenido espectral de los tres escenarios, en porcentaje de la componente de directa (DC), es decir del armónico cero.

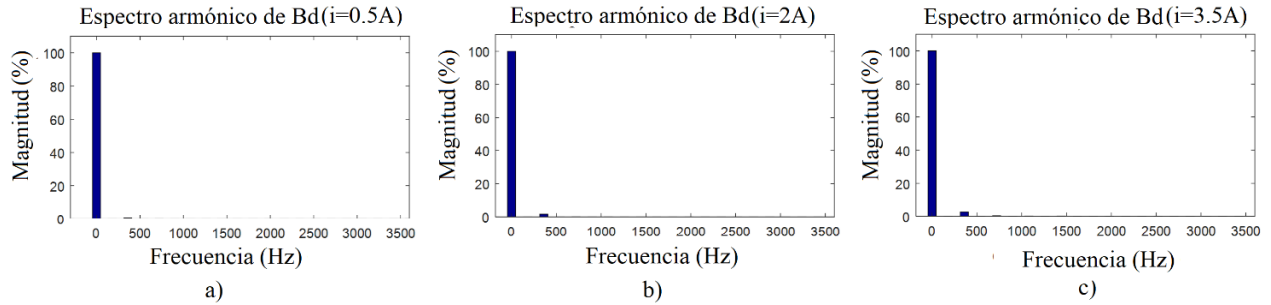
Tabla 1. Contenido armónico del campo en el eje directo. Fuente: Autor.
Table 1. Harmonic content of the field in the direct axis. Source: Author.

Orden del armónico	Frecuencia (Hz)	Caso		
		0.5 A	2 A	3.5 A
Componente DC	0	100%	100%	100%
1	360	1.09%	3.15%	3.94%
2	720	0.08%	0.51%	0.92%
3	1080	0.02%	0.14%	0.32%
4	1440	0%	0.05%	0.14%
5	1800	0%	0.02%	0.07%

En la anterior tabla se observa la aparición de armónicos pares e impares, en el espectro del campo en el eje directo, de igual forma, se destaca que la frecuencia fundamental corresponde con 6 veces la frecuencia de la red, es decir que el armónico 1 tiene una frecuencia de 360 Hz, lo que correspondería con el armónico 6 de la corriente. De esta manera los armónicos que hacen presencia con más intensidad son el 1th, 2th y 3th, que corresponderían con el armónico 6th, 12th y 18th a la frecuencia fundamental de la red. La figura 13 presenta el espectro armónico del campo en el eje directo en cada uno de los casos, como porcentaje de la componente de DC.

Figura 13. Espectro armónico del campo en el eje directo a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

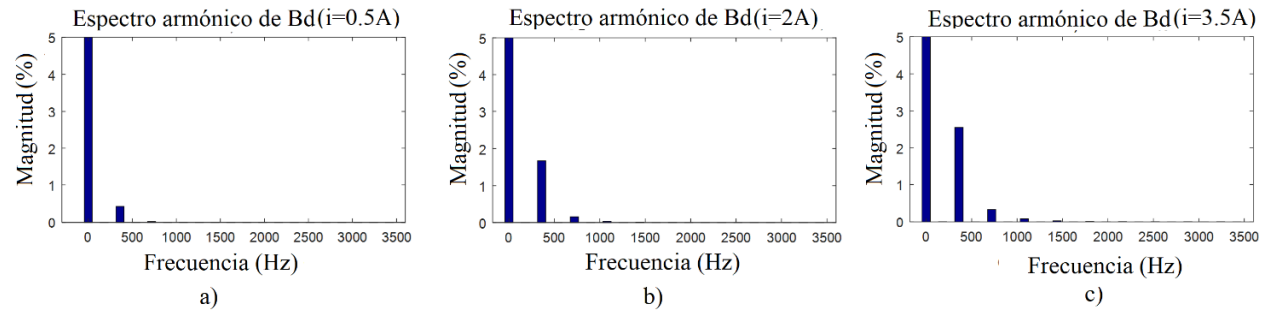
Figure 13. Harmonic spectrum of the field on the direct axis a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



En la figura 14 se muestra una ampliación del espectro armónico, con el fin de dar más claridad visual en cuanto a las componentes presentes en la proyección del campo magnético sobre el eje directo.

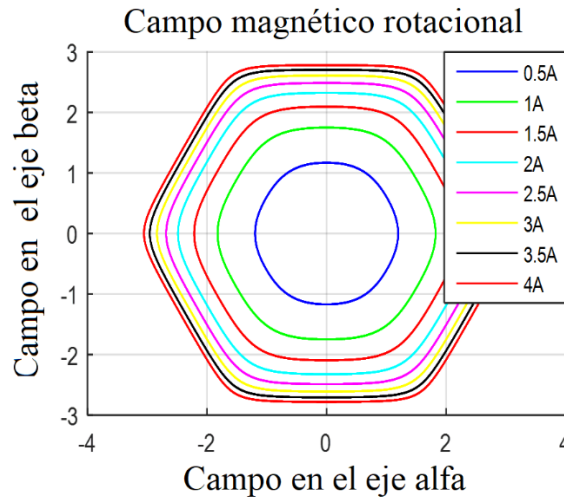
Figura 14. Ampliación del espectro armónico de las densidades de flujo en el eje directo a) por debajo del codo de la curva de magnetización b) en el codo de la curva c) por encima del codo de la curva. Fuente: Autor.

Figure 14. Magnified harmonic spectrum of the flux densities in the direct axis a) below the knee of the magnetization curve b) at the knee of the curve c) above the knee of the curve. Source: Author.



De este análisis se desprende que la forma hexagonal, presentada por el campo magnético rotacional, se debe a la aparición de una componente de frecuencia de 6 veces la frecuencia de la red, en el rizado del campo del eje directo, correspondiente a los 6 lados de la forma del campo magnético rotacional. A medida que la saturación del núcleo se va haciendo más fuerte, los armónicos 1,2,3 y 4 en el rizado van tomando más relevancia y la forma del hexágono en el campo magnético rotacional se va definiendo más. Para validar esto, la figura 15 muestra el campo magnético rotacional generado por corrientes que varían desde 0.5 A hasta 4 A rms en intervalos de 0.5 A. Se observa la evolución hacia una forma hexagonal, resultado de la distorsión que aparece en las densidades de flujo por fase.

Figura 15. Formas del campo magnético rotacional para un amplio rango de corrientes. Fuente: Autor.
Figure 15. Shapes of the rotating magnetic field for a wide range of currents. Source: Author.



La forma hexagonal de la trayectoria del campo magnético rotacional, sugiere que hay instantes en donde la magnitud del campo es más grande que en otras, por lo que se afectará el torque de la máquina, ya que el par electromagnético inducido, como motor o como generador, es proporcional a las magnitudes de los campos del estator y rotor, este hecho sugiere que la saturación al deformar la trayectoria puede generar rizados en el torque. De igual forma, el hecho de que el campo magnético sea desigual en algunas zonas del estator, esto puede repercutir en la deformación de las fems inducidas, en el caso de motores de inducción, por lo que abre un campo para determinar las afectaciones que se tendrían en las máquinas reales a causa de la deformación del campo magnético rotacional.

5. CONCLUSIONES

Se evidenció que la saturación magnética provoca una deformación en el campo magnético rotacional, generando patrones hexagonales debido a la aparición de componentes armónicos en la densidad del flujo. Este fenómeno surge debido a que el vector de inducción (B) deja de ser sinusoidal al alcanzar regiones de saturación, aplanándose en los valles y las crestas.

En relación a lo anterior, el aumento de la corriente, en cercanías a la saturación, resulta en la generación de armónicos impares en el espectro de la densidad de flujo de cada fase, a medida que el punto de operación se eleva en la curva de magnetización los armónicos h_3 , h_5 , h_7 , h_9 y h_{11} , surgen debido a la no linealidad del núcleo.

Confirmando este comportamiento mediante el análisis en el plano referencial síncrono dq , de las proyecciones del campo magnético rotacional, donde se observó que no hay componente del campo en el eje en cuadratura (B_q) en ninguno de los casos estudiados. Esta ausencia se atribuye a la selección del ángulo del marco referencial dq como el mismo ángulo del campo magnético.

Además, el análisis espectral mostró que los armónicos presentes en el eje directo poseen una frecuencia fundamental de 360Hz, correspondiente a seis veces la frecuencia fundamental de la red de 60Hz, en correspondencia con la forma hexagonal del campo alrededor del estator. A pesar de la distorsión, el nivel máximo de THD %, indicando una afectación moderada.

Finalmente, para futuras investigaciones, se recomienda incorporar el ciclo de histéresis en el análisis para obtener una comprensión más profunda de los efectos de la saturación en el campo magnético rotacional. Además, es necesario incluir el efecto de los devanados distribuidos, comunes en las máquinas eléctricas trifásicas, para obtener un modelo más preciso de la máquina y su respuesta a la saturación, de igual forma estudiar el efecto sobre el torque de la máquina y sobre la forma de las fuerzas electromotrices inducidas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Lu, W. Zheng, and Q. Jiang, "Saturation Magnetization of Ferromagnetic and Ferrimagnetic Nanocrystals at Room Temperature," *J. Phys. D: Appl. Phys*, vol. 40, pp. 320–325, Jan. 2007, doi: 10.1088/0022-3727/40/2/006.
- [2] D. Rodriguez-Sotelo, M. Rodriguez-Licea, A. G. S. Sánchez, A. Espinosa, and F. Perez-Pinal, "Advanced Ferromagnetic Materials in Power Electronic Converters: A State of the Art," *IEEE Access*, vol. PP, p. 1, Mar. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2982161.
- [3] S. D. Bittencourt, L. L. Cerva, L. Schaeffer, M. de M. Dias, J. C. K. de Verney, and J. L. Cezar, "Development of electrical machine with magnets and cores obtained by powder metallurgy," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 29, no. 3, pp. 80–90, 2017, doi: 10.1016/j.ctmat.2017.09.001.
- [4] M. A. Rodriguez Pozueta, *Máquinas Eléctricas*. Universidad de Cantabria, 2018.
- [5] J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*. 2009.
- [6] S. Yue, Y. Li, C. Zhang, and Q. Yang, "Considerations of the Magnetic Field Uniformity for 2-D Rotational Core Loss Measurement," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 901–907. doi: 10.1109/ECCE.2019.8913047.
- [7] I. Zamudio-Ramirez, R. A. Osornio-Rios, J. A. Antonino-Daviu, H. Razik, and R. Romero-Troncoso, "Magnetic Flux Analysis for the Condition Monitoring of Electric Machines: A Review," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 18, no. 5, pp. 2895–2908, May 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3070581.
- [8] Y. J. L. C. C. G. Z. and Q. X. Y. Li, "Rotational magnetic properties of silicon steel laminations by 3-D magnetic properties measurement," in *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai, China, 2015.
- [9] E. Mazaheri and J. Faiz, "Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines: An overview," *IET Electr Power Appl*, vol. 16, Nov. 2021, doi: 10.1049/elp2.12157.
- [10] F. Haghjoo and A. Hasani, "A new air gap flux-based technique to detect loss of field in synchronous generators," *IET Electr Power Appl*, vol. 18, p. n/a-n/a, Jan. 2024, doi: 10.1049/elp2.12410.
- [11] H. Yaghibi, *A novel Flux-Based Method for Synchronous Generator Loss of Excitation Protection*. 2010.
- [12] X. Liang and C. A.-B.- Karim, "Harmonics and Mitigation Techniques Through Advanced Control in Grid-Connected Renewable Energy Sources: A Review," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 4, pp. 3100–3111, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2823680.
- [13] C. A. Barrera-Singaño and A. D. Valenzuela-Santillán, "Métodos de simulación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia Harmonic simulation methods in power systems," *Iteckne*, vol. 17, pp. 73–82, 2020.

- [14] M. A. Mazzeletti, P. D. Donolo, C. M. Pezzani, M. O. Oliveira, G. R. Bossio, and C. H. De Angelo, "Stator Faults Detection on Induction Motors Using Harmonic Sequence Current Components Analysis," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 5, pp. 726–734, Jun. 2021, [Online]. Available: <https://latam.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/3938>
- [15] G. C. Lazaroiu, M. Costoiu, C. Carstea, N. Golovanov, O. Udrea, and M. Roscia, "Power quality management in a syderurgic factory," in *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014, pp. 54–57. doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842884.
- [16] J. M. Aller, *MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS: Introducción a la teoría general*. Equinoccio, 2006.
- [17] J. F. Mora, *Máquinas eléctricas*, 5th ed. Mc Graw Hill, 2003.
- [18] T. G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, and L. M. Tolbert, "Direct torque control of induction machines using space vector modulation," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 28, no. 5, pp. 1045–1053, 1992, doi: 10.1109/28.158828.
- [19] H. Hu and Y. Li, "Applications of induction motor drive based on DTC in railway traction," in *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, 2002, pp. 2285–2289 vol.4. doi: 10.1109/ICPST.2002.1047191.
- [20] M. Vasudevan and R. Arumugam, "Different viable torque control schemes of induction motor for electric propulsion systems," in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, 2004, pp. 2728–2737 vol.4. doi: 10.1109/IAS.2004.1348861.
- [21] Waelzholz, "Mayor eficiencia gracias a la chapa magnética de alta permeabilidad," <https://www.waelzholz.com/es/steel-materials/electrical-steel-strip/hp-cdw-permr-grades.html>.
- [22] A. Abdul and A. Altahir, *Park and Clark Transformations Park and Clark Transformations: A Short Review*. 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.20287.46241.