

Influencia de la distorsión armónica en el rizado del torque electromagnético de máquinas eléctricas asíncronas.

Influence of harmonic distortion on electromagnetic torque ripple of asynchronous electrical machines.

Laury Katherine Gualdrón-Godoy¹, Aldo Pardo-García², Luis David Pabón-Fernández³,
Jorge Luis Díaz-Rodríguez⁴, Edison Andrés Caicedo-Peñaranda⁵

^{1,2,3,4,5}Universidad de Pamplona, Pamplona - Colombia

ORCID: ¹[0009-0008-3339-2799](https://orcid.org/0009-0008-3339-2799), ²[0000-0003-2040-9420](https://orcid.org/0000-0003-2040-9420), ³[0000-0003-1788-4781](https://orcid.org/0000-0003-1788-4781), ⁴[0000-0001-7661-8665](https://orcid.org/0000-0001-7661-8665),
⁵[0000-0003-4557-1061](https://orcid.org/0000-0003-4557-1061)

Recibido: 07 de septiembre de 2023.

Aceptado: 05 de diciembre de 2023.

Publicado: 01 de enero de 2024.

Resumen- El artículo presenta un estudio del impacto de las corrientes armónicas en el par electromagnético de las máquinas eléctricas rotacionales asíncronas, junto con la relación de la ondulación del torque con la forma del campo magnético rotacional. Para esto se realizó el modelado, en Simulink de Matlab, de una máquina trifásica de inducción, la cual se alimentó con corrientes distorsionadas y con el uso de las transformadas de Clarke y Park se obtuvieron las formas del campo magnético rotacional y del torque electromagnético de la máquina; con el fin de realizar los respectivos análisis y comparativos de la forma del torque con la del campo rotativo. Los resultados resaltan cómo los armónicos influyen en las operaciones incorrectas y en las oscilaciones torsionales, pues se observa una relación entre los envolventes del campo magnético rotacional y las ondulaciones en el torque. Se concluye que los armónicos homopolares no generan deformación del torque, mientras que los armónicos de secuencia positiva y negativa si introducen ondulaciones en el par. El estudio pretende mejorar la comprensión de la relación entre el par electromagnético y el campo magnético rotacional, para clarificar los efectos que la distorsión armónica genera en las máquinas de inducción.

Palabras clave: campo magnético rotacional, distorsión armónica, espectro armónico, par electromagnético, máquinas eléctricas.

Abstract— This paper shows a study on the impact of harmonic currents on the electromagnetic torque of asynchronous rotational electrical machines, along with the relationship between torque ripple and the shape of the rotational magnetic field. To achieve this, a three-phase induction machine was modeled in Matlab Simulink and fed with distorted currents. Using Clarke and Park transformations, the shapes of the rotational magnetic field and the machine's electromagnetic torque were obtained to carry out respective analyses and comparisons of the torque and the rotational field. The results highlight how harmonics influence improper operations and torsional oscillations, showing a correlation between the envelopes of the rotational magnetic field and torque ripples. It is concluded that zero-sequence harmonics do not cause torque deformation, while positive and negative sequence harmonics introduce torque ripples. The study aims to enhance the understanding of the relationship between electromagnetic torque and the rotational magnetic field to clarify the effects of harmonic distortion on induction machines.

Keywords: rotational magnetic field, harmonic distortion, harmonic spectrum, electromagnetic torque, electrical machines.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: laury.gualdron@unipamplona.edu.co (Laury Katherine Gualdrón Godoy).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: L. K. Gualdrón-Godoy, A. Pardo-García, L. D. Pabón-Fernández, J. L. Díaz-Rodríguez y E. A. Caicedo-Peñaranda, "Influencia de la distorsión armónica en el rizado del torque electromagnético de máquinas eléctricas asíncronas", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 1, pp. 204-220 2024, doi: [10.15649/2346030X.4655](https://doi.org/10.15649/2346030X.4655)

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un interés pronunciado en el estudio de los efectos de la distorsión armónica en los diferentes sistemas eléctricos, ya que el tema de calidad de la energía ha tomado una relevancia fundamentada en la búsqueda de la optimización del suministro y la eficiencia energética [1], [2].

En el área de las máquinas eléctricas la distorsión armónica ha sido ampliamente estudiada, determinando causas, efectos y posibles soluciones; dentro de los múltiples estudios [3] se ha encontrado que la presencia de armónicos tiene un impacto en el torque electromagnético de las máquinas eléctricas, estos pueden generar un torque adicional provocando operaciones incorrectas en los motores, al igual que un aumento del calentamiento debido a pérdidas en el cobre y el acero, afectando la eficiencia y generando oscilaciones torsionales [4].

De igual forma, se ha determinado que los armónicos de secuencia positiva y negativa influyen en la eficiencia y el funcionamiento de las máquinas de inducción, aumentando las pérdidas, afectando el deslizamiento y la eficiencia de ellas [5].

Estos armónicos son los responsables de generar el “ripple” en el torque electromagnético, impactando su perfil y junto con la saturación influyendo en la forma del voltaje inducido, algunos estudios disponen modelos que identifican fuentes y predicen el comportamiento de los contenidos armónicos en el torque electromagnético, así como de métodos de estimación que ofrecen información precisa sobre el perfil de torque [6]. Debido a estos efectos, el control adecuado de los armónicos en el voltaje inducido se vuelve crucial, especialmente bajo condiciones de carga, cuando la máquina se satura magnéticamente debido a la presencia de torques de reacción y reluctancia. Comprender el comportamiento de los armónicos en el voltaje inducido bajo carga es esencial para mejorar el control del rendimiento del motor. [7].

En otras líneas de investigación, se ha utilizado un modelo analítico general no lineal de motores, para analizar el rizado del torque electromagnético y el campo magnético. Este modelo considera la saturación y los armónicos espaciales y temporales del campo, con el objetivo no solo de tener en cuenta la variación de los parámetros electromagnéticos causados por el funcionamiento de vehículos eléctricos, sino también de explicar teóricamente la frecuencia y el orden del rizado del torque [8].

De igual forma, debido a que las condiciones de operación de los motores en vehículos eléctricos híbridos son más complejas en comparación con los motores estándar, han existido investigaciones recientes que buscan abordar las mejoras necesarias para reducir la variación y el rizado del torque electromagnético en todas las condiciones operativas de estos motores [8]. La influencia de la distorsión armónica en el rizado del torque electromagnético de máquinas eléctricas asíncronas y su relación con diseños mecatrónicos avanzados, como órtesis de rodilla, subraya la importancia de optimizar sistemas complejos en diversas aplicaciones tecnológicas [9], [10].

Otro campo muy importante de investigación referente a armónicos y máquinas eléctricas, son los distintos métodos para el control de accionamientos de motores de inducción [11]. Se aborda la influencia de los armónicos en las máquinas eléctricas mediante el Control Directo de Par (DTC), resaltando la comparación con distintas técnicas de control, como el Control Orientado al Campo (FOC). En el ámbito de accionamientos multifásicos, se ha aplicado el DTC, ofreciendo una perspectiva integral de las estrategias de control y sus implicaciones en el rendimiento de las máquinas eléctricas. Además, se destaca el impacto del campo magnético con armónicos en el rizado del torque, subrayando la influencia de los armónicos en la generación de pulsaciones de torque y la distorsión del campo magnético [12]. El efecto de los armónicos del campo magnético en el torque electromagnético varía durante los estados transitorios, con bajas y altas frecuencias instantáneas de la corriente del rotor. Este impacto es especialmente relevante durante arranques directos en línea, desenchufes, frenado por inyección y caídas de voltaje prolongadas. Además, se destaca que los armónicos del campo magnético pueden generar oscilaciones rápidas en el torque electromagnético, lo que puede resultar en ruido, vibraciones y representar un riesgo si la frecuencia de las oscilaciones se acerca a la frecuencia natural mecánica del motor. [10].

La relación entre la disminución de las pérdidas de energía en redes de distribución y el control del torque electromagnético en máquinas eléctricas asíncronas refleja la necesidad de tecnologías avanzadas que optimicen el rendimiento y la sostenibilidad en sistemas eléctricos. Asimismo, los avances en la modelación de vibraciones en turbogeneradores complementan esta discusión, destacando cómo el análisis matemático y la visualización de datos de resonancia sub-síncrona pueden mejorar la estabilidad y prevenir el deterioro de componentes críticos en sistemas eléctricos [13], [14].

En este contexto, el objetivo principal del presente artículo es dar una explicación al rizado del torque electromagnético, desde la forma del campo magnético rotacional generada por la presencia de armónicos en la corriente de alimentación de las máquinas eléctricas asíncronas. Para lograr esto, se llevó a cabo una simulación de un motor de inducción, al cual se le introdujeron corrientes distorsionadas. Durante este proceso, se examinó la influencia de cada armónico en el rizado del torque electromagnético y la deformación del campo magnético ideal. Este análisis se realizó utilizando la transformada de Clarke, explorando de manera detallada los efectos específicos de los armónicos de secuencia positiva, negativa y homopolares. La investigación sobre la transferencia de calor en motores de combustión interna y el análisis de la distorsión armónica en máquinas eléctricas, aunque abordan fenómenos distintos, comparten un enfoque común en la utilización de simulaciones para optimizar el rendimiento de sistemas complejos [15], [16]. La simulación se llevó a cabo mediante el software Simulink de Matlab.

II. MARCO TEÓRICO

a. Campo magnético giratorio

El campo magnético rotacional, en las máquinas eléctricas trifásicas, es un campo que gira a una velocidad constante llamada velocidad de sincronismo. Su principio de funcionamiento se basa en la adición de campos magnéticos generados por bobinas estratégicamente ubicadas, separadas 120° entre sí y alimentadas por corrientes trifásicas equilibradas. A través de la suma de estos campos se genera un único campo magnético que gira alrededor del estator de la máquina, permitiendo el funcionamiento de los motores eléctricos. La

Figura 1 muestra los campos magnéticos individuales y el campo magnético rotacional de una máquina trifásica de dos polos. [17].

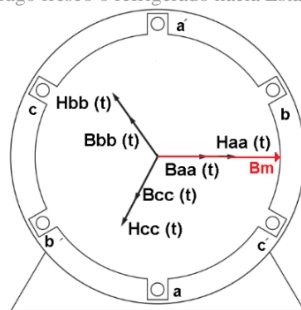


Figura 1: Campo magnético rotacional de una maquinas trifásica.
Fuente: Elaboración propia.

b. Distorsión armónica

La distorsión armónica se fundamenta en la teoría de series de Fourier, que permite la descomposición de cualquier forma de onda periódica en componentes sinusoidales con frecuencias específicas, simplificando así el análisis de la señal [18]. La distorsión armónica en señales eléctricas se presenta cuando aparecen componentes de frecuencia no deseada, llamados armónicos, estos son ondas sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental [19]. Los armónicos en sistemas eléctricos surgen principalmente por la interacción de cargas no lineales, introduciendo distorsiones en la señal original, además cambios en la eficiencia de los sistemas y perturban la calidad de la corriente eléctrica. Controlar y comprender estos armónicos es crucial para preservar la eficiencia y calidad en los sistemas eléctricos, previniendo posibles impactos adversos en el rendimiento de los equipos y las redes. [20]. En el contexto específico de las máquinas eléctricas rotativas, los armónicos desencadenan diversos efectos. La Figura 2 ejemplifica un escenario del espectro armónico en la corriente de un ciclo convertidor que suministra energía a un motor eléctrico, mostrando claramente las distintas componentes de la distorsión presentes. [21].

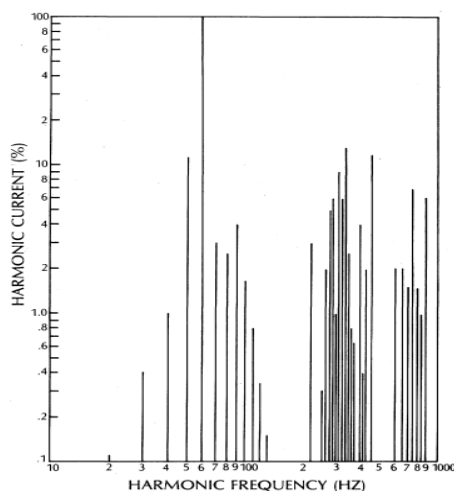


Figura 2: Armónicos de corriente de un ciclo convertidor de seis pulsos con una frecuencia de salida de 5 Hz.
Fuente: [20].

Los armónicos en sistemas eléctricos trifásicos se clasifican en tres categorías diferentes: armónicos de secuencia positiva, negativa y homopolar, cada una con atributos específicos que impactan las máquinas eléctricas de forma diferente. [22].

Los armónicos de secuencia positiva (por ejemplo, 4, 7, 10, 13, 16, etc.) comparten la misma rotación de fase que el sistema fundamental, y su origen se vincula a cargas no lineales como convertidores de potencia y variadores de velocidad. Por otro lado, los armónicos de secuencia negativa (2, 5, 8, 11, 14, etc.) presentan una rotación de fase opuesta. Finalmente, los armónicos de secuencia homopolar (3, 6, 9, 12, etc.) exhiben fase entre líneas y pueden generarse debido a cargas monofásicas desbalanceadas o sistemas de distribución con desequilibrios. [23].

Actualmente se han desarrollado diversas investigaciones acerca del impacto de los armónicos en el torque electromagnético [24], [25], [26]. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 3, donde se presenta una comparación del torque, analizando su comportamiento tanto con saturación como sin saturación, mostrando la forma de la fuerza electromotriz, llevando a cabo un estudio de la interacción de los armónicos [8]. Sin embargo, los estudios realizados no permiten correlacionar la distorsión del torque con la deformación que sufre el campo magnético rotacional a causa de la presencia de armónicos. Es importante señalar que, para el propósito de este artículo, no se ha tenido en cuenta la saturación.

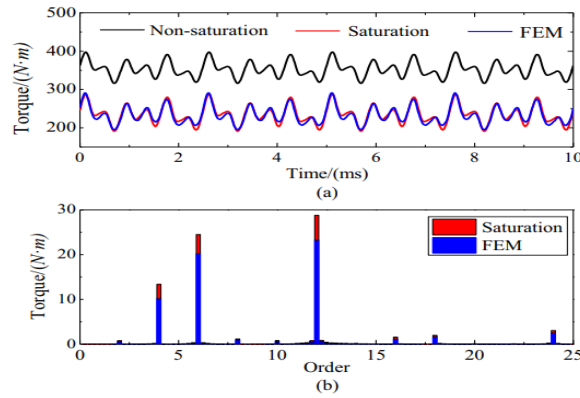


Figura 3: Torque medio con y sin saturación. Fuente: [8].

III. METODOLOGIA

a. Modelo de simulación

En la Figura 4 se presenta el modelo de la simulación que muestra principalmente un motor de inducción alimentado por fuentes de tensión distorsionadas, se pueden observar los bloques fundamentales para obtener la representación visual del torque electromagnético, así como la forma del campo magnético rotacional generado por el estator de la máquina.

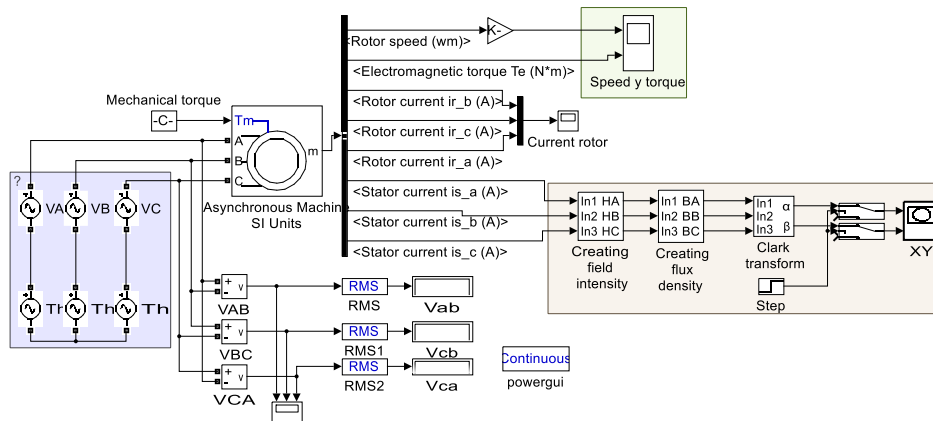


Figura 4: Esquema de simulación del motor de inducción. Fuente: Elaboración propia.

En el modelo, las fuentes de voltaje distorsionado de fase, se generaron mediante la superposición de fuentes sinusoidales con diferente frecuencia según el caso, como se observa en la Figura 5. En la parte derecha de la figura se muestran las formas de onda de las corrientes distorsionadas a partir de los 0.2s para ver el estado estable y evitar el estado transitorio del arranque de la máquina.

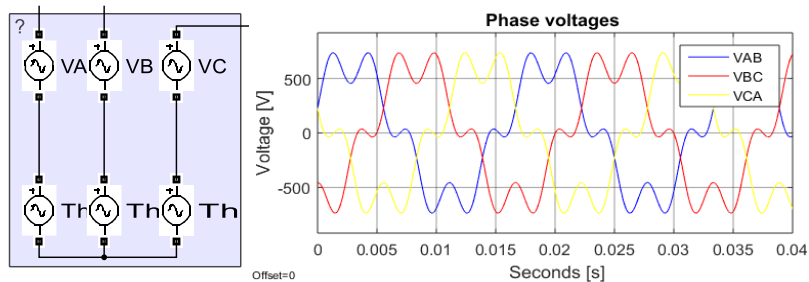


Figura 5: Voltajes de fase. Fuente: Elaboración propia.

La máquina alimentada por las fuentes distorsionadas es un motor de inducción modelado en Simulink de Matlab y no considera los efectos de la saturación, los parámetros del motor se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del motor de inducción.

Potencia	5HP
Voltaje pico	460V
Frecuencia	60Hz
Velocidad de los campos magnéticos	1800rpm
Velocidad mecánica del eje del motor	1750rpm
Resistencia del estator	1.115 ohm
Inductancia	0.005974H
Resistencia del rotor	1.083 ohm
Inductancia mutua	0.2037 H

Fuente: Elaboración propia.

Del bloque del motor se deriva un visualizador del torque electromagnético de la máquina, donde se enfocarán los resultados a partir de los 0.2s, con el fin de omitir el estado transitorio y ver el comportamiento del par en estado permanente; cómo se puede observar en la Figura 6 en donde este estado inicia en 0.15s.

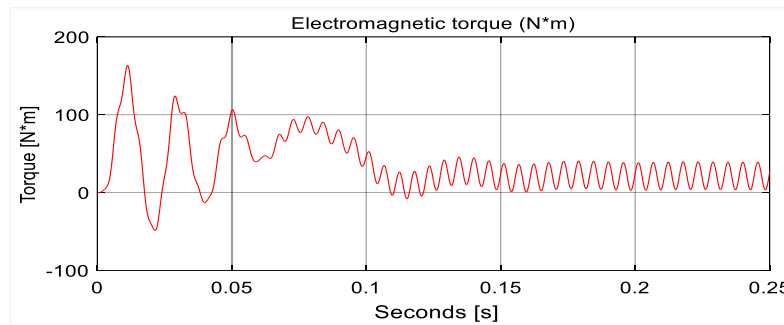


Figura 6: Torque electromagnético.

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, las corrientes del estator distorsionada, se analizarán en el estado permanente como se observa en la figura 7.

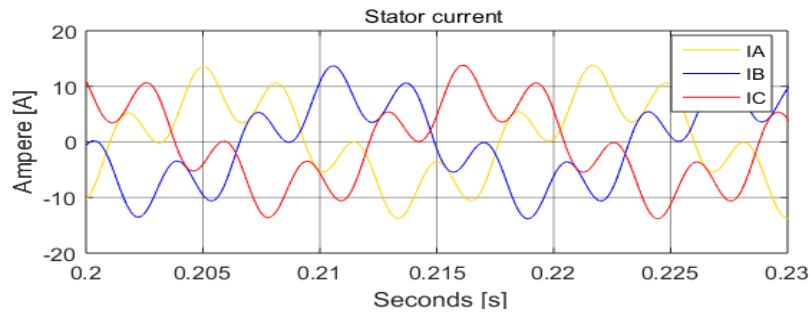


Figura 7: Corrientes del estator distorsionadas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la creación de la forma del campo magnético rotacional se estableció el modelo presentado en la figura 8, en donde a partir de las corrientes del estator se genera la intensidad del campo magnético mediante una ganancia, relacionada con el número de vueltas del devanado y la longitud magnética como se observa en la ecuación (1).

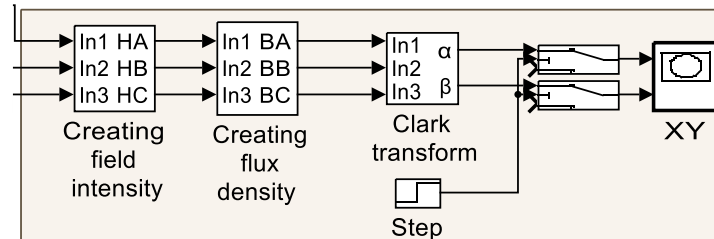


Figura 8: Creación del campo magnético rotacional.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esto se crea la densidad de flujo, utilizando la permeabilidad promedio del acero eléctrico, estableciendo la siguiente relación [27].

$$H = \frac{N}{\ell} I = H = \frac{50}{0.7} I \tag{1}$$

$$B = 1700 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \tag{2}$$

Posterior a esto se utiliza la transformada de Clarke para convertir los campos originales de cada bobina a coordenadas alfa y beta, utilizando la ecuación matricial de transformación (3), generando así el campo magnético rotatorio en el estator de la máquina.

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

IV. RESULTADOS

Con el modelo anterior se realizaron diferentes escenarios de simulación, en los cuales se determinó como primera instancia la relación entre la distorsión armónica presente en la corriente y la forma del campo magnético rotacional; y en segunda instancia la relación existente entre la forma del campo magnético rotacional y la deformación del torque electromagnético.

Relación de la distorsión de la corriente y la forma del campo magnético rotacional.

Para determinar esta relación se inyectaron corrientes distorsionadas con un solo armónico, cuya magnitud corresponde al 30% de la fundamental, permitiendo establecer patrones en la forma del campo magnético rotacional causados por la distorsión de la corriente. Estos patrones encontrados se relacionan con la secuencia del armónico simulado, como se muestra en los siguientes resultados:

Secuencia positiva

Como primer resultado se presentan las formas del campo magnético rotacional obtenidas con armónicos de secuencia positiva. En la figura 9 se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del cuarto armónico, generando tres envolvimientos hacia adentro.

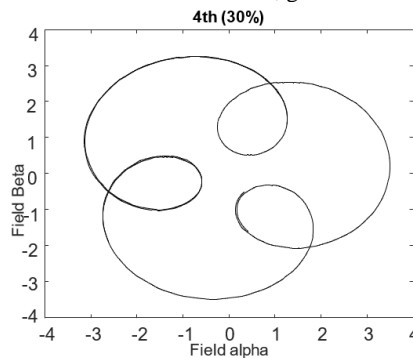


Figura 9: Forma del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 4.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10 se muestra el campo magnético rotacional generado por la distorsión del 7th armónico, creando seis envolvimientos hacia adentro.

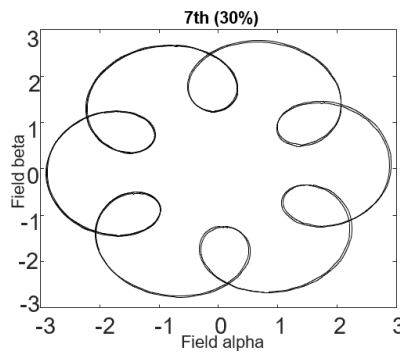


Figura 10: Forma del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 7.
Fuente: Elaboración propia.

Secuencia negativa

Como segundo resultado se presentan las formas del campo magnético rotacional obtenidas con armónicos de secuencia negativa. En la

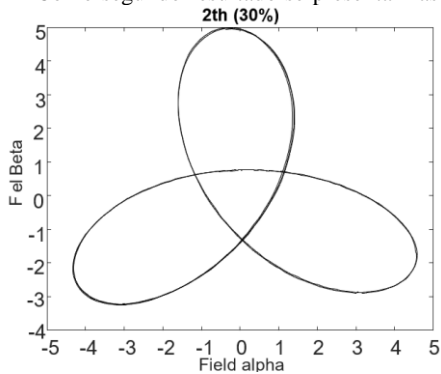


Figura 11, se muestra la forma del campo magnético rotacional alrededor del estator, frente a la distorsión provocada por el segundo armónico de la corriente. Esta figura presenta los cambios en el campo magnético como tres envolvimientos hacia afuera del círculo ideal.

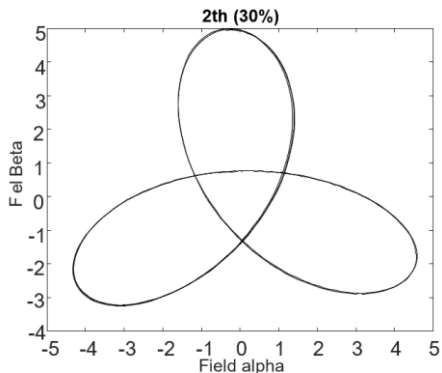


Figura 11: Forma del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 2.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12 se muestra el campo magnético rotacional frente a la distorsión generada por el quinto armónico de la corriente; como se puede observar el campo magnético presenta 6 envolvimientos hacia afuera de la circunferencia ideal.

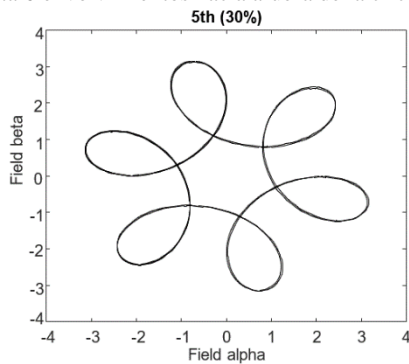


Figura 12: Forma del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 5.
Fuente: Elaboración propia.

Secuencia homopolar

Como tercer resultado se presentan las formas del campo magnético rotacional obtenidas con armónicos de secuencia homopolar. La

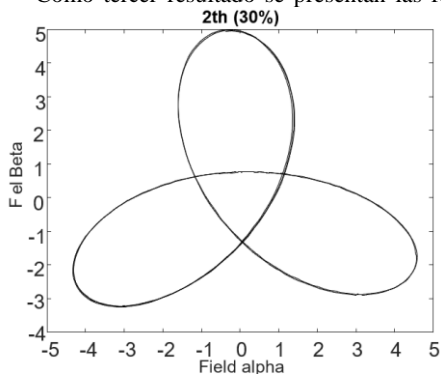


Figura 11 muestra la forma del campo magnético rotacional con la distorsión generada por el tercer armónico de la corriente, como se puede observar la forma del campo es ideal, ya que es un círculo perfecto, por lo que el armónico no causa ningún efecto.

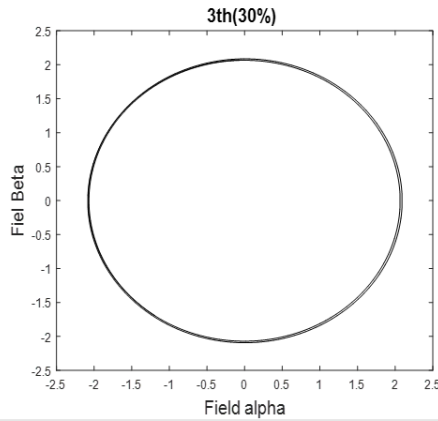


Figura 13: Forma del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 3.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 14

Figura 14 muestra el campo magnético rotacional frente a la distorsión del noveno armónico de la corriente, como se puede observar no se genera ninguna deformación.

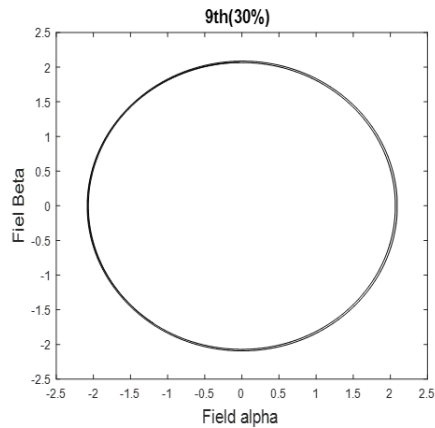


Figura 14: Forma del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 6.
Fuente: Elaboración propia.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a las formas evaluadas del campo magnético rotacional, se puede establecer que: los armónicos de secuencia positiva (4th, 7th, 10th, 13th, 16th, etc.), presentan un patrón en el cual la forma del campo realiza envolvimientos hacia el interior del círculo. La cantidad de estos envolvimientos se incrementan con el orden del armónico; por ejemplo, con el armónico 4, se observan tres envolvimientos, mientras que con el armónico 7, se registran 6, y con el armónico 10, se presentan 9, y así sucesivamente. Esta secuencia pone de manifiesto una correlación significativa entre el orden del armónico y el número de envolvimientos, como se describe en la siguiente expresión:

$$n = h - 1 \tag{4}$$

Donde,

n = número de envolvimientos

h = armónico

De manera similar, en los armónicos de secuencia negativa (2th, 5th, 8th, 11th, 14th, etc.), se aprecia que la forma del campo magnético rotacional presenta envolvimientos, en este caso, orientados hacia el exterior del círculo. Es notable que la cantidad de estos envolvimientos aumenta progresivamente con el número del armónico. Por ejemplo, con el armónico dos, se evidencian tres envolvimientos hacia afuera; con el armónico 5, se registran 6; con el armónico 8, se observan 9, y así sucesivamente. Esta secuencia revela una relación significativa entre el orden del armónico y el número de envolvimientos, conforme la expresión:

$$n = h + 1 \tag{5}$$

A partir de los resultados previos también se puede concluir que los armónicos homopolares (3th, 6th, 9th, 12th, 15th, etc.) de corriente no provocan distorsiones en la configuración del campo magnético rotacional. Debido a que estos armónicos están en fase, su combinación no introduce irregularidades; sus contribuciones se anulan mutuamente, generando así un campo magnético rotacional circular.

Análisis de la deformación del torque en estado permanente

Con el fin de analizar el impacto de la distorsión armónica de la corriente, en la forma del torque electromagnético de un motor de inducción y relacionarlo con la deformación que sufre el campo magnético rotacional en estado permanente, los resultados presentados a continuación se muestran a partir de los 0.2 segundos, para evitar transitorios asociados al arranque del motor y permitir la visualización en estado estable.

Sin distorsión armónica

Como primer resultado se muestran los comportamientos de las variables cuando no existe distorsión en la alimentación. La Figura 15 muestra la forma de onda de la corriente del estator como una sinusoidal sin ninguna deformación.

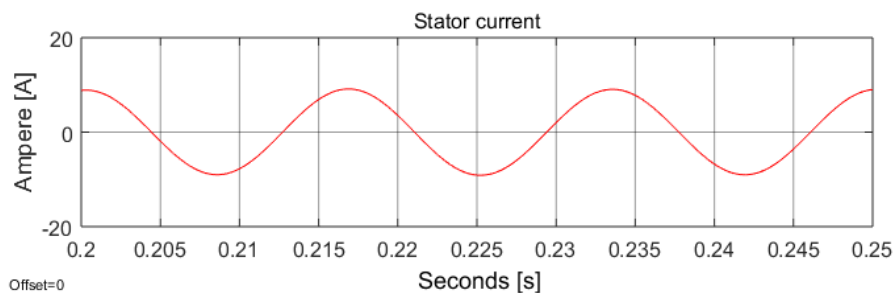


Figura 15: Corriente del estator sin distorsión armónica.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se presenta el espectro armónico de la corriente del estator, destacando solo la presencia del armónico fundamental y un porcentaje mínimo de distorsión, causada por el efecto intrínseco del motor y no como resultado de la alimentación.

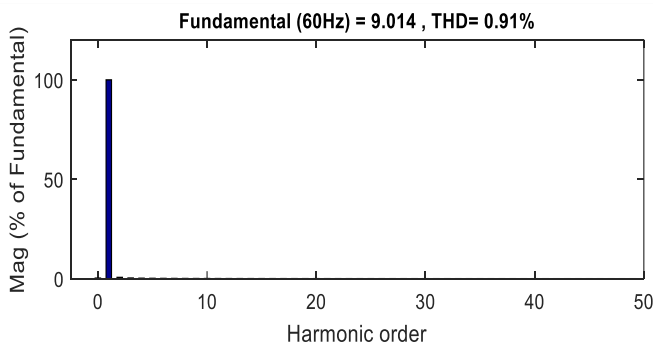


Figura 16: Espectro del efecto sin distorsión armónica.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 ilustra como la forma del campo magnético rotacional es un círculo perfecto, cuya magnitud corresponde a 1.5 veces el campo magnético pico creado por una de las fases.

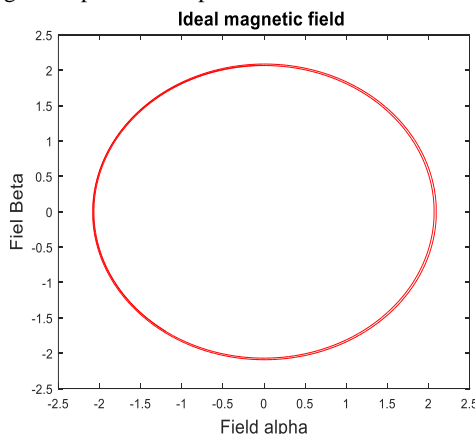


Figura 17: Campo magnético rotacional sin distorsión.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 se presenta la evolución de la forma del torque electromagnético del motor de inducción. Inicialmente la curva exhibe la zona de arranque de la máquina, que se refleja como un transitorio, después de esto se observa el estado estable a partir del tiempo de 0.2 segundos.

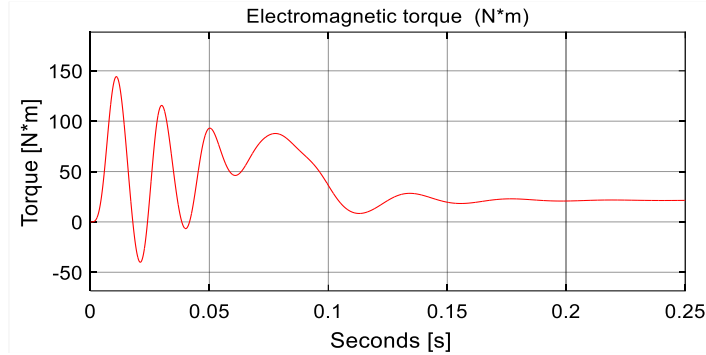


Figura 18: Torque electromagnético sin distorsión armónica.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 18, no existe en el torque ningún tipo de rizado en el estado estable, debido a que no hay presencia de distorsión en la corriente de alimentación.

Armónicos de secuencia positiva

Como muestra del efecto de los armónicos de secuencia positiva, se analizó la influencia del armónico 4th y 7th. En la Figura 19 se presenta la corriente del estator frente a la distorsión del armónico 4.

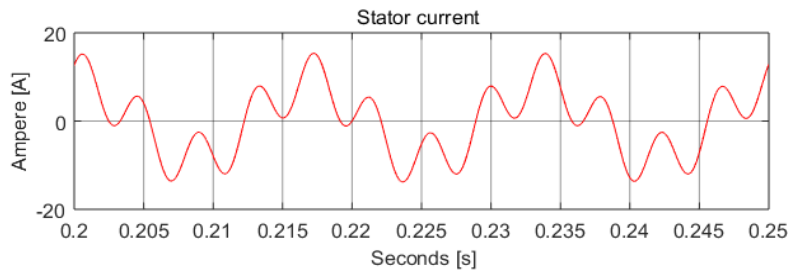


Figura 19: Corriente del estator por efecto de la distorsión del armónico 4.
Fuente: Elaboración propia.

En la

Figura 20 se presenta el espectro armónico de la corriente de una línea, con un total de

distorsión armónica (THD) del 70.06%.

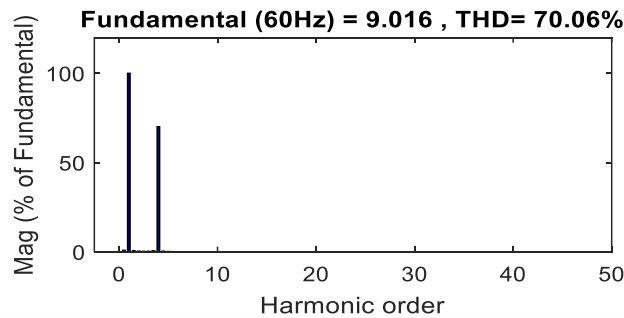


Figura 20: Espectro armónico por efecto de la distorsión del armónico 4.
Fuente: Elaboración propia.

La

Figura 21 muestra la forma del campo magnético rotacional frente a la distorsión del cuarto armónico, el cual genera tres envolvimientos hacia adentro.

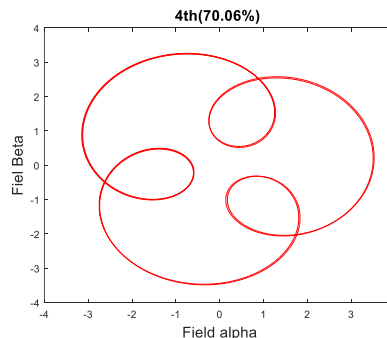


Figura 21: Campo magnético rotacional por efecto de la distorsión del armónico 4.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 22 muestra la evolución de la forma del torque electromagnético, claramente se observa que en el estado estable el par experimenta un rizado, caracterizado por oscilaciones cíclicas.

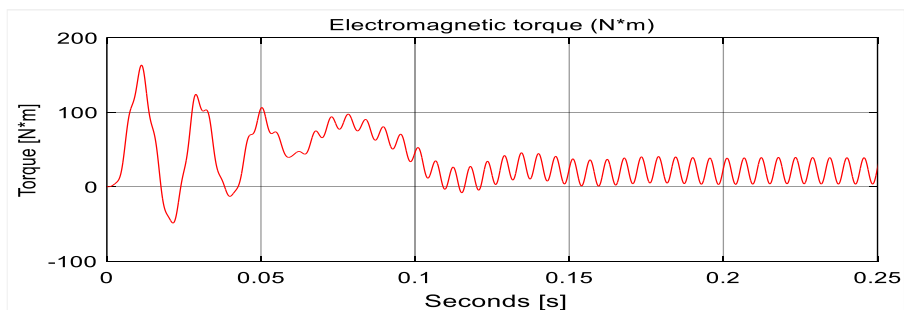


Figura 22: Torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 4.
Fuente: Elaboración propia.

Una ampliación, para un tiempo equivalente a un ciclo de la onda de corriente, del torque electromagnético se observa en la figura 24. En esta se logran establecer tres oscilaciones completas en el rizado del par.

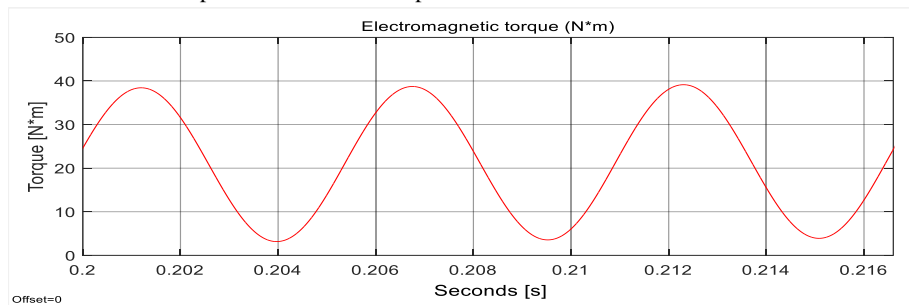


Figura 23: Ampliación del torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 4.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la anterior figura, el número de oscilaciones corresponde con el número de envoltimientos realizados por el campo magnético rotacional.

Para el armónico 7 la

Figura 24 muestra la corriente del estator de manera distorsionada.

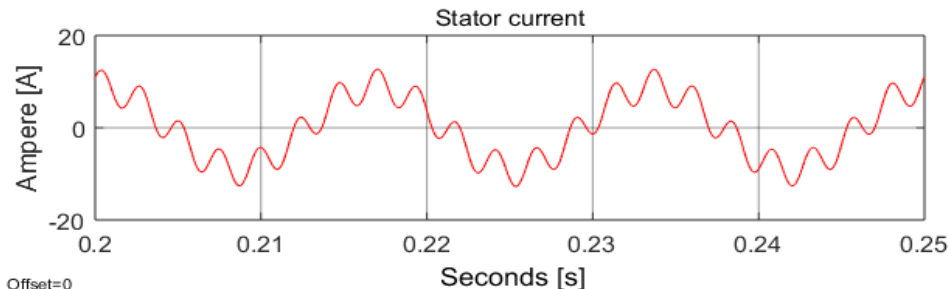


Figura 24: Corriente del estator por efecto de la distorsión del armónico 7.
Fuente: Elaboración propia.

El espectro armónico de la corriente se muestra en la Figura 25 con un THD del 39.78.06%. que corresponde a la magnitud del armónico 7.

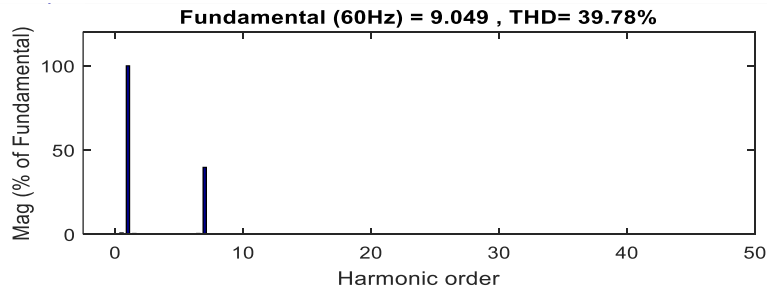


Figura 25: Espectro armónico por efecto de la distorsión del armónico 7.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26, se muestra la forma del campo magnético rotacional frente a la distorsión del séptimo armónico, generando seis envoltimientos hacia adentro.

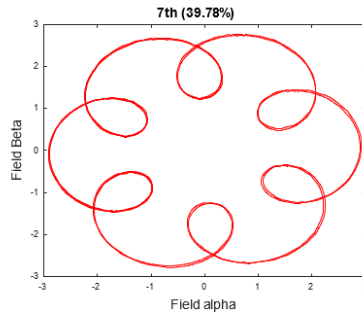
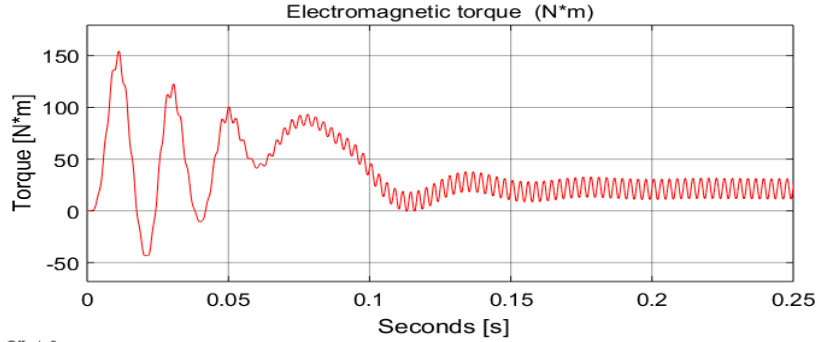


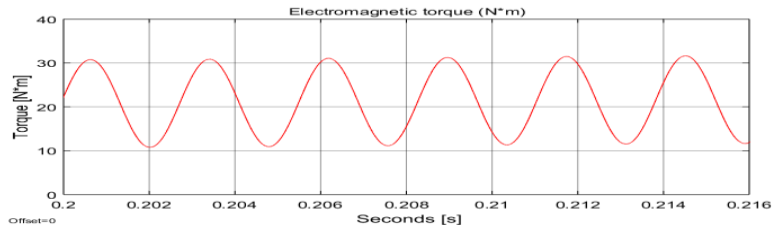
Figura 26: Campo magnético rotacional por efecto de la distorsión del armónico 7.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 presenta la forma del torque electromagnético, en esta se evidencia la aparición de un rizado en el estado estable cuya causa es la presencia del armónico 7.



Offset=0
Figura 27: Torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 7.
Fuente: Elaboración propia.

Una ampliación, para un tiempo equivalente a un ciclo completo de la onda de corriente, del torque electromagnético se observa en la Figura 28. En esta se logran establecer seis oscilaciones completas en el rizado del par.

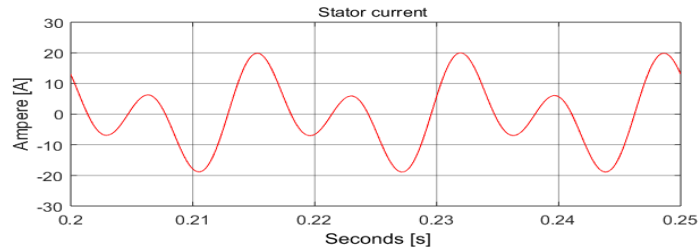


Offset=0
Figura 28: Ampliación del torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 7.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la anterior figura, el número de oscilaciones corresponde con el número de envoltimientos realizados por el campo magnético rotacional.

Frente armónicos de secuencia negativa

En la Figura 29 se presenta la corriente del estator distorsionada por el armónico dos.



Offset=0
Figura 29: Corriente del estator por efecto de la distorsión del armónico 2.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30, se presenta el espectro armónico de la corriente de una línea, con un THD del 136.68%, que corresponde a la magnitud del armónico dos. Esta distorsión tan alta en la corriente se debe a la respuesta del motor frente a las tensiones de línea, obtenidas del sistema trifásico en estrella, en donde cada voltaje de fase tiene un segundo armónico de magnitud del 30% de la fundamental.

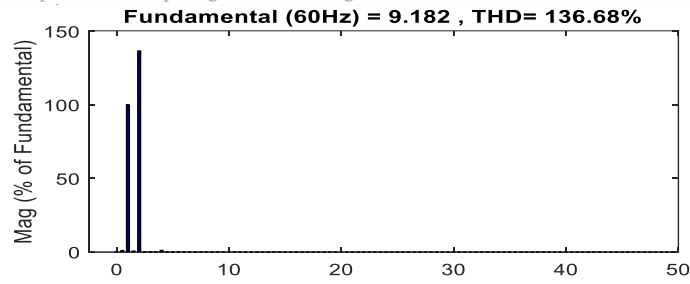


Figura 30: Espectro armónico por efecto de la distorsión del armónico 2.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 31, se muestra la forma del campo magnético rotacional, generada por las corrientes distorsionadas previamente descritas. Se puede observar que la forma del campo tiene tres envolvimientos hacia el exterior de la circunferencia ideal.

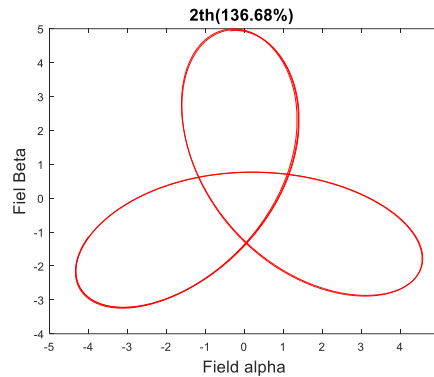


Figura 31: Campo magnético rotacional por efecto de la distorsión del armónico 2.
Fuente: Elaboración propia.

La forma del torque electromagnético del motor se muestra en la Figura 32, en donde se observa que el rizado del par es muy alto, presentándose instantes de tiempo en los cuales el torque total es negativo; esto se debe a que el armónico 2 en la corriente es superior a la fundamental, como se mostró previamente.

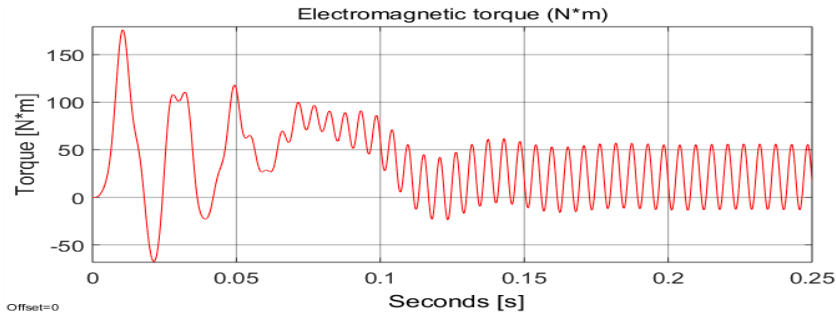


Figura 32: Torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 2.
Fuente: Elaboración propia.

Una ampliación, para un tiempo equivalente a un ciclo completo de la onda de corriente, del torque electromagnético se observa en la Figura 33, en este tiempo se logran establecer tres oscilaciones completas en el rizado del par.

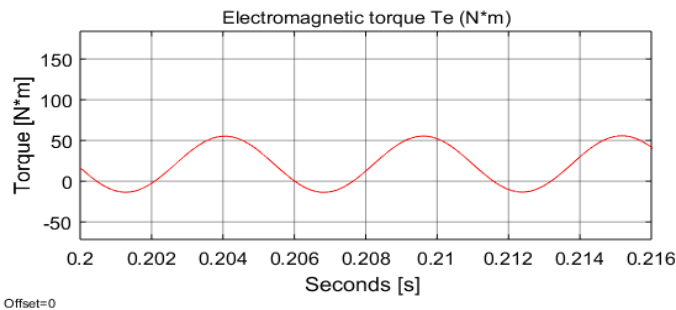


Figura 33: Ampliación del torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 2.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la anterior figura, el número de oscilaciones corresponde con el número de envolvimientos realizados por el campo magnético rotacional.

Como segunda muestra de la influencia de los armónicos de secuencia negativa, se analizó el efecto del armónico 5 con una magnitud del 30% de la fundamental en el voltaje de fase. Esta tensión generó una corriente cuyo espectro armónico se muestra en la

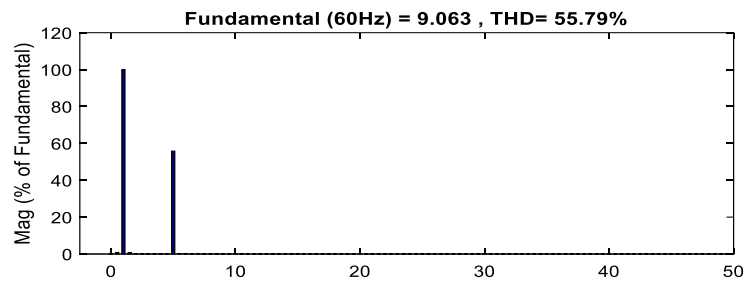


Figura 34.

Figura 34: Espectro armónico por efecto de la distorsión del armónico 5.
Fuente: Elaboración propia.

Estas corrientes generan la forma del campo magnético rotacional mostrada en la Figura 35, en donde se puede observar la presencia de seis envolvimientos hacia afuera de la circunferencia ideal.

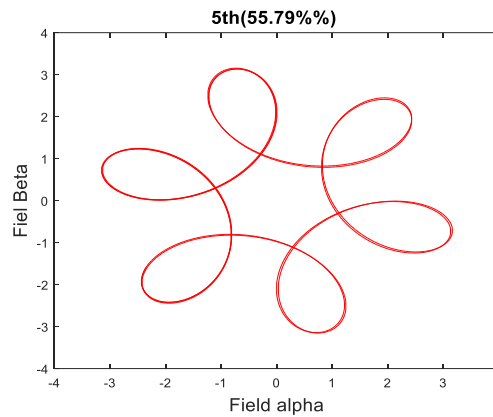


Figura 35: Campo magnético rotacional por efecto de la distorsión del armónico 5.
Fuente: Elaboración propia.

La forma del torque electromagnético del motor se muestra en la Figure 36. Se observa que el rizado del par es muy alto; esto se debe a la fuerte presencia del armónico 5 en la corriente.

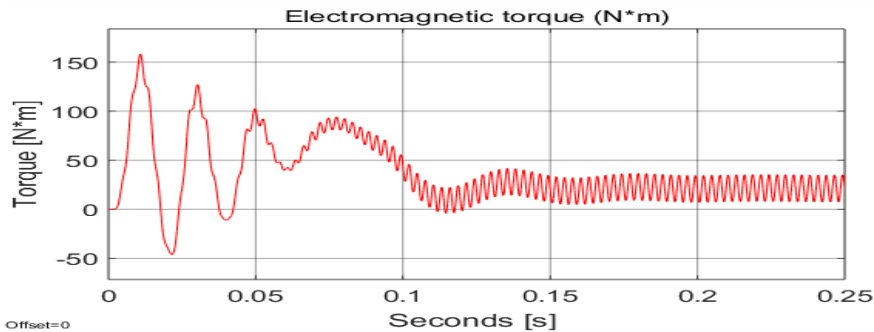


Figure 36: Torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 5.
Fuente: Elaboración propia.

Una ampliación, para un tiempo equivalente a un ciclo completo de la onda de corriente, del torque electromagnético se observa en la Figura 37 , en este tiempo se logran establecer seis oscilaciones completas en el rizado del par

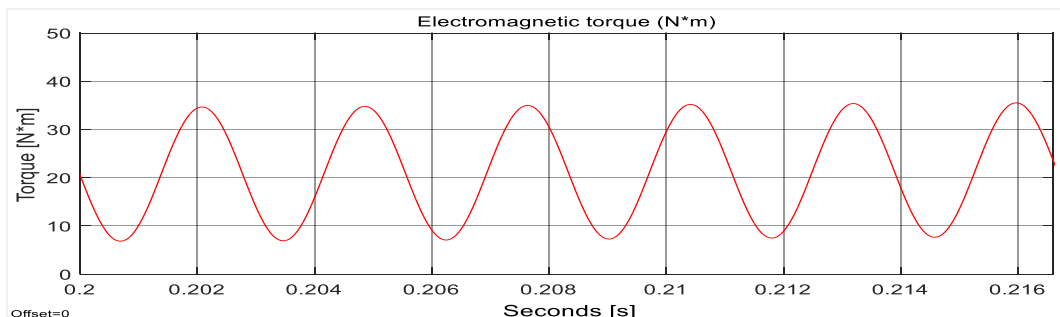


Figura 37: Ampliación del torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 5.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la anterior figura, el número de oscilaciones corresponde con el número de envolvimientos realizados por el campo magnético rotacional.

Frente armónicos de secuencia homopolar

Se presentarán a continuación los resultados del armónico tres, que es de secuencia homopolar, donde se ve reflejado que no existe ninguna distorsión en el campo magnético rotacional, por lo tanto, el torque tampoco presentará ningún rizado.

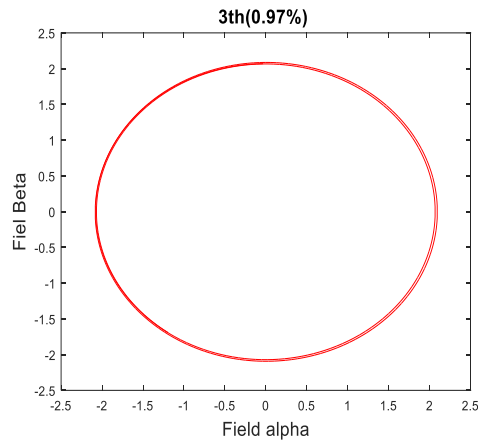


Figura 38: Campo magnético rotacional por efecto de la distorsión del armónico 3.
Fuente: Elaboración propia.

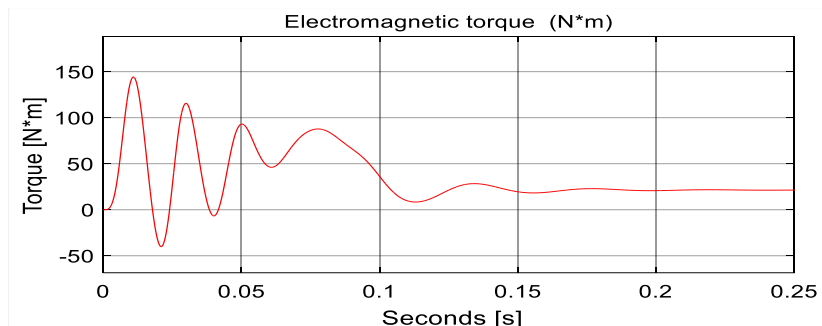


Figura 39: Torque electromagnético por efecto de la distorsión del armónico 5.
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento anterior tanto para el campo magnético rotacional como para el torque se extiende a todos los armónicos homopolares, es decir los múltiplos de tres llamados triplens. Estos armónicos en corrientes eléctricas no generan distorsión significativa en el campo magnético rotacional en máquinas trifásicas de inducción, esto se debe a que la suma de los armónicos no contribuye a la corriente de secuencia cero, que es la responsable de desequilibrios. Por lo tanto, los armónicos triplens son los menos perjudiciales para el campo magnético y el torque electromagnético.

VI. CONCLUSIONES

La presencia de armónicos homopolares no induce perturbaciones en el campo magnético rotacional ideal y en el torque electromagnético, ya que al estar en fase se anulan y no generan distorsión en la forma de la rotación del campo. Los armónicos de secuencia positiva generan envolvimientos hacia el interior del círculo ideal y se originan en función del orden, expresado por $n = h-1$, donde n representa el número de envolvimientos y h denota el orden del armónico.

Los armónicos de secuencia negativa provocan envolvimientos hacia el exterior del círculo ideal. Similar al caso anterior, estos envolvimientos se determinan a partir del orden, $n = h+1$, donde n constituye el número de envolvimientos y h es el orden del armónico. El torque electromagnético en una máquina de inducción se ve perturbado por la presencia de armónicos en la corriente, tanto por los armónicos de secuencia positiva como los de secuencia negativa, generan un rizado en la forma del torque de la máquina.

El número de involucramientos presentados por el campo magnético rotacional es el mismo para armónicos de secuencia positiva y negativa, consecutivos con un armónico homopolar intermedio, ejemplo 2th-4th (3 involucramientos), 5th-7th (6 involucramientos) y 8th-10th (9 involucramientos).

La presencia de armónicos de secuencia positiva o negativa genera distorsión de la forma del torque electromagnético en estado estable, el número de ondulaciones en el torque corresponde con el número de involucramientos generados por el campo magnético rotacional.

Para armónicos de secuencia positiva y negativa con el mismo número de involucramientos, el de secuencia negativa reflejará el rizado más fuerte en la forma del torque electromagnético.

VII. REFERENCIAS

- [1] R. A. de Oliveira and M. H. J. Bollen, "Deep learning for power quality," *Electric Power Systems Research*, vol. 214, p. 108887, Jan. 2023, doi: [10.1016/J.EPSR.2022.108887](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108887).
- [2] P. Remigio-Carmona et al., "Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 2328, vol. 15, no. 7, p. 2328, Mar. 2022, doi: [10.3390/EN15072328](https://doi.org/10.3390/EN15072328).
- [3] A. Kutsyk, M. Korkosz, M. Semeniuk, and M. Nowak, "An Influence of Spatial Harmonics on an Electromagnetic Torque of a Symmetrical Six-Phase Induction Machine," *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3813, vol. 16, no. 9, p. 3813, Apr. 2023, doi: [10.3390/EN16093813](https://doi.org/10.3390/EN16093813).
- [4] Gilberto Reyes Calderon, "Armónicos en sistemas de distribución de energía eléctrica," Nuevo Leon, 1996.
- [5] M. Alizadeh Bidgoli and A. Hajizadeh, "Harmonic distortion effect of large-scale hydropower storage based on doubly fed induction machine in power system," *Emerging Trends in Energy Storage Systems and Industrial Applications*, pp. 385–407, Jan. 2023, doi: [10.1016/B978-0-323-90521-3.00017-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90521-3.00017-X).
- [6] M. Chowdhury, A. Gebregergis, M. Islam, and T. Sebastian, "Analysis of harmonic contents in induced voltage and electromagnetic torque in interior permanent magnet synchronous machines under loaded condition," *Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013*, pp. 260–267, 2013, doi: [10.1109/IEMDC.2013.6556262](https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556262).
- [7] Q. CHEN, H. SHENG, and T. ZHANG, "An improved nonlinear onboard adaptive model for aero-engine performance control," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 36, no. 10, pp. 317–334, Oct. 2023, doi: [10.1016/J.CJA.2022.12.005](https://doi.org/10.1016/J.CJA.2022.12.005).
- [8] X. Chen, J. Hu, K. Chen, and Z. Peng, "Modeling of electromagnetic torque considering saturation and magnetic field harmonics in permanent magnet synchronous motor for HEV," *Simul Model Pract Theory*, vol. 66, pp. 212–225, Aug. 2016, doi: [10.1016/J.SIMPAT.2016.02.012](https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2016.02.012).
- [9] D. Torres, R. Chaves, S. Cortes, y J. Arcos Legada, «Diseño mecatrónico de una órtesis flexible de rodilla para rehabilitación», *RCTA*, vol. 2, n.º 40, pp. 134–141, sep. 2022, doi: [10.24054/rcta.v2i40.2361](https://doi.org/10.24054/rcta.v2i40.2361).
- [10] J. A. Echeverría-Villar, J. Martínez-Román, and L. Serrano-Iribarnegaray, "Transient harmonic torques in induction machines: Measurement and impact on motor performance," *Electrical Engineering*, vol. 94, no. 2, pp. 67–80, Jun. 2012, doi: [10.1007/S00202-011-0216-4](https://doi.org/10.1007/S00202-011-0216-4).
- [11] Z. Chen, T. Shi, Z. Lin, Z. Wang, and X. Gu, "Analysis and Control of Current Harmonic in IPMSM Field-Oriented Control System," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 37, no. 8, pp. 9571–9585, Aug. 2022, doi: [10.1109/TPEL.2022.3155243](https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3155243).
- [12] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri, "Direct Torque Control for induction machines: A technology status review," *Proceedings - 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2013*, pp. 117–129, 2013, doi: [10.1109/WEMDCD.2013.6525172](https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2013.6525172).
- [13] D. . Pérez García, F. . García Reina, y D. . Hernández Eduardo, «Disminución de las pérdidas de energía eléctrica por distribución usando una tecnología novedosa de mediciones y control para la toma de decisiones», *RCTA*, vol. 2, n.º 34, pp. 144–150, jul. 2019, doi: [10.24054/rcta.v2i34.75](https://doi.org/10.24054/rcta.v2i34.75).
- [14] J. P. . Rojas Suarez, Z. C. . Nieto, y M. . Vergel Ortega, «Eficiencia y modelo de vibraciones en máquina turbogenerador», *RCTA*, vol. 1, n.º 35, pp. 109–115, feb. 2020, doi: [10.24054/rcta.v1i35.50](https://doi.org/10.24054/rcta.v1i35.50).
- [15] Y. Ortiz Sanchez, E. G. Flórez Serrano, y R. I. Laguado Ramírez, «Simulación multidimensional de transferencia de calor en un compresor de combustión interna en el encendido», *RCTA*, vol. 3, n.º 2, pp. 155–162, ago. 2020, doi: [10.24054/rcta.v3iEspecial.881](https://doi.org/10.24054/rcta.v3iEspecial.881).
- [16] A. D. . Morales Rojas y I. D. . Bedoya Caro, «Estudio numérico del efecto de las variables de control en la autoignición del gas de síntesis en un motor HCCI estacionario para microgeneración», *RCTA*, vol. 1, n.º 35, pp. 79–88, feb. 2020, doi: [10.24054/rcta.v1i35.46](https://doi.org/10.24054/rcta.v1i35.46).
- [17] Stephen J. Chapman, "Máquinas eléctricas (5a. ed)," 2012.
- [18] H. Marcelo, L. Valarezo, and S. Domingo, "Rectificación de Señales Mediante la Serie de Fourier," *Revista Científica*, vol. 7, no. 25, pp. 178–193, Aug. 2022, doi: [10.29394/SCIENTIFIC.ISSN.2542-2987.2022.7.25.9.178-193](https://doi.org/10.29394/SCIENTIFIC.ISSN.2542-2987.2022.7.25.9.178-193).
- [19] "1.5.1.- Generación de un campo magnético giratorio. | E09.- Máquinas rotativas de corriente alterna." Accessed: Dec. 29, 2023. [Online]. Available: <https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/E/E09/es IEA E09 Contenidos/website 151 generacin de un campo campo magntico girator io.html>.
- [20] "IEEE Working Group on Power System Harmonics*," 1983.
- [21] "Convertidor directo | How it works, Application & Advantages." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/es/convertidor-directo/>.
- [22] "An Introduction to Harmonics – Technical Articles." Accessed: Jan. 16, 2023. [Online]. Available: <https://eepower.com/technical-articles/an-introduction-to-harmonics/#>.
- [23] J. Dariel Arcila, "ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS." [Online]. Available: <http://www.ieb.com.co>.
- [24] A. Kutsyk, M. Korkosz, M. Semeniuk, and M. Nowak, "An Influence of Spatial Harmonics on an Electromagnetic Torque of a Symmetrical Six-Phase Induction Machine," *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3813, vol. 16, no. 9, p. 3813, Apr. 2023, doi: [10.3390/EN16093813](https://doi.org/10.3390/EN16093813).
- [25] H. G. Beleiu et al., "Effects of voltage unbalance and harmonics on drive systems with induction motor," vol. 16, no. 1, pp. 381–391, 2022, doi: [10.1080/16583655.2022.2064670](https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2064670).

- [26] J. Hu, Y. Yang, M. Jia, Y. Guan, C. Fu, and S. Liao, "Research on Harmonic Torque Reduction Strategy for Integrated Electric Drive System in Pure Electric Vehicle," *Electronics* 2020, Vol. 9, Page 1241, vol. 9, no. 8, p. 1241, Aug. 2020, doi: [10.3390/ELECTRONICS9081241](https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS9081241).
- [27] H. Wang, C. Li, B. Cai, T. Zhu, N. Chukwuekwa, and G. Huo, "Effect of Ball Scribing on Relative Permeability of Grain-oriented Electrical Steel," *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.*, vol. 26, no. 5, pp. 618–622, 2013, doi: [10.1007/s40195-013-0021-3](https://doi.org/10.1007/s40195-013-0021-3).