

Impacto de la distorsión armónica en la configuración ideal del campo magnético rotacional en máquinas trifásicas

Impact of harmonic distortion on the ideal configuration of the rotational magnetic field in three-phase machines

Recibido: 24 de agosto de 2024

Aprobado: 18 de diciembre de 2024

Cómo citar: L. K. Gualdrón Godoy, L. D. Pabón Fernandez, J. del C. Santiago Guevara, I. Torres Chavez, and D. A. Mejía Bugallo, "Impacto de la Distorsión Armónica en la Configuración Ideal del Campo Magnético Rotacional en Máquinas Trifásicas", *Mundo FESC*, vol. 15, no. 31, pp. 54–76, Jan. 2025, doi: 10.61799/2216-0388.1765.

Laury Katherine Gualdrón-Godoy^{1*}



Ingeniero Eléctrico,
laury.gualdron@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0009-0008-3339-2799>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Luis David Pabón-Fernandez²



Magíster en Controles Industriales,
davidpabon@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0003-1788-4781>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Jose del Carmen Santiago-Guevara³



Magister en Gestión de Proyectos,
josesantiago@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-4792-453X>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Ivaldo Torres-Chavez⁴



Doctor en Ingeniería Electrónica,
ivaldo.torres@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0003-4409-2616>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Diego Armando Mejía-Bugallo⁵



Magíster en Controles Industriales,
diego.mejia@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-0392-5741>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

***Autor para correspondencia:**

laury.gualdron@unipamplona.edu.co



Impacto de la distorsión armónica en la configuración ideal del campo magnético rotacional en máquinas trifásicas

Resumen

Este trabajo analiza cómo la presencia de armónicos influye en la integridad del campo magnético rotatorio en máquinas eléctricas trifásicas. Mediante simulaciones con corrientes distorsionadas, se evalúa el efecto específico de cada componente armónico en la forma del campo magnético resultante. Se observó que los armónicos homopolares no alteran el campo magnético giratorio, mientras que los de secuencia positiva inducen deformaciones internas y los de secuencia negativa provocan deformaciones hacia el exterior. Además, se discuten técnicas de mitigación activa y se examinan tanto la secuencia como el espectro armónico en profundidad. Los hallazgos subrayan que la distorsión armónica puede reducir el par y la eficiencia en sistemas eléctricos trifásicos.

Palabras clave: Campo Magnético Giratorio, Distorsión Armónica, Máquinas Eléctricas, Eficiencia Energética, Simulación.

Impact of harmonic distortion on the ideal configuration of the rotational magnetic field in three-phase machines

Abstract

This study analyzes how the presence of harmonics influences the integrity of the rotating magnetic field in three-phase electrical machines. Through simulations with distorted currents, the specific effect of each harmonic component on the shape of the resulting magnetic field is evaluated. It was observed that homopolar harmonics do not alter the rotating magnetic field, while positive-sequence harmonics induce internal deformations, and negative-sequence harmonics cause outward deformations. Additionally, active mitigation techniques are discussed, and both harmonic sequence and spectrum are examined in depth. The findings highlight that harmonic distortion can reduce torque and efficiency in three-phase electrical systems.

Keywords: Rotating Magnetic Field, Harmonic Distortion, Electrical Machines, Energy Efficiency, Simulation.

Introducción

La importancia del estudio de estos componentes en las máquinas eléctricas rotativas radica en que estos perjudican la eficiencia energética, el desgaste, la sobrecarga, la fiabilidad y la estabilidad de la energía. Asimismo, la investigación de estos aspectos resulta esencial para cumplir con las regulaciones y normas en el sector eléctrico, así como para desarrollar y mantener sistemas eléctricos y maquinaria de manera adecuada. [1]

Los armónicos eléctricos constituyen elementos sinusoidales presentes en la corriente o el voltaje, que caracterizan una forma de onda distorsionada. Esta distorsión es la combinación de una onda a frecuencia fundamental y ondas cuyas frecuencias son múltiplos de esta. La operación de dispositivos electrónicos no lineales, como rectificadores, variadores de velocidad y fuentes de alimentación conmutadas, introduce componentes sinusoidales no deseados en la corriente eléctrica. Además, iluminaciones no incandescentes, la saturación de transformadores y la generación distribuida de energía, como sistemas fotovoltaicos y aerogeneradores, pueden contribuir a la generación de armónicos en la red eléctrica.[2]

El estudio de la perturbación mencionada se sustenta en la teoría de Fourier, la cual establece que cualquier función periódica puede descomponerse en ondas senoidales, englobando una onda fundamental y diversas armónicas. Las ondas simétricas exhiben armónicos impares, mientras que las asimétricas pueden presentar armónicas pares.[3]

La distorsión armónica puede impactar el campo magnético rotativo de las máquinas eléctricas, al introducir componentes de frecuencia no fundamental en la corriente, provocando fluctuaciones en el flujo magnético. Estas pueden dar lugar a diversos efectos indeseados, tales como pérdidas adicionales en los núcleos magnéticos, generación de torque no deseado en las máquinas, además de la posibilidad de ocasionar vibraciones y ruidos.[4]

En la actualidad, gran parte del estudio de la implicación de los armónicos en máquinas eléctricas se ha centrado en la influencia de las diversas corrientes armónicas motores de inducción, enfocándose en los filtros tanto activos como pasivos para mitigar los armónicos en sistemas que requieren un control preciso del movimiento [5]. Este aspecto es importante en aplicaciones que van desde el diagnóstico médico hasta equipos de automatización de oficinas, dado el creciente énfasis en la compatibilidad electromagnética (EMC). La estrategia activa implica la incorporación de un filtro de línea activo con un circuito de corrección del factor de potencia en la entrada del convertidor de energía. Además, se emplean controladores que procesan señales diferenciales, mejorando de esta manera la inmunidad al ruido. [6]

Otros estudios se han centrado en los controladores de velocidad para motores que generan corrientes armónicas que distorsionan el voltaje y aumentan el riesgo de resonancia. Este fenómeno se origina en la electrónica de potencia presente en los controladores, la cual emite armónicos hacia la red de alimentación. Ciñéndonos a la normativa para garantizar un funcionamiento adecuado, resulta esencial evaluar y controlar las emisiones de armónicos en las instalaciones eléctricas que emplean controladores de velocidad para motores.[7]

De igual forma, el problema de la distorsión armónica en la corriente de controladores de alta potencia, que utilizan modulación de ancho de pulso de fuente de corriente, es que la baja frecuencia de conmutación del convertidor y la reducida inductancia en una corriente distorsionada puede llevar a la resonancia del sistema a ciertas velocidades del motor. Cuando se produce la resonancia, se introducen inter armónicos en el sistema de accionamiento, lo que afecta negativamente la calidad de la energía eléctrica en la red y provoca fluctuaciones excesivas del par electromagnético en el motor. Es por esto, que algunos trabajos proponen métodos de control basado en la impedancia virtual de la corriente de enlace continua para mitigar los efectos perjudiciales de la resonancia causada por la distorsión armónica. [8]

La relevancia de comprender tanto las fuentes de armónicos ya existentes como las emergentes, así como sus posibles impactos en los sistemas eléctricos, ha hecho que la comunidad científica tenga gran interés en estos temas, sociedades como la IEEE Power Engineering Society y la Industry Application Society, se han centrado en la identificación de los efectos de los armónicos, la definición de procedimientos de medición aceptables, y el establecimiento de bases apropiadas para los procedimientos de control y los estándares en este ámbito.[9]

El calentamiento, la pérdida de vida útil y la generación de torque inverso representan inconvenientes significativos en máquinas eléctricas como transformadores, máquinas de inducción y síncronas, efectos que han sido ampliamente estudiados, sin embargo, existe una carencia de estudios exhaustivos que analicen la afectación específica del campo magnético rotatorio ideal causas por la distorsión armónica. Este campo magnético, intrínseco a las máquinas eléctricas rotacionales, juega un papel crucial en la comprensión del funcionamiento de los motores y generadores eléctricos. La falta de investigación en esta área dificulta la comprensión completa de los impactos de la distorsión armónica en las maquinas eléctricas.[10]

Este estudio analiza cómo los armónicos presentes en la corriente eléctrica distorsionan el campo magnético giratorio ideal de las máquinas trifásicas. Mediante simulaciones en MATLAB/Simulink con un modelo de máquina de devanados concentrados, aplicamos la transformada de Clarke para evaluar individualmente el impacto de los armónicos de secuencia positiva, negativa y homopolar. Los resultados revelan patrones característicos de deformación del campo magnético según el tipo de armónico, proporcionando información valiosa para diagnosticar y mitigar estos efectos en aplicaciones industriales

reales, donde la distorsión armónica puede comprometer el rendimiento de los equipos.

Revisión Literaria y Metodología

Campo magnético giratorio y distorsión armónica

El campo magnético rotatorio hace referencia al giro de la densidad del flujo magnético alrededor de un eje específico; se presenta en máquinas eléctricas rotativas de corriente alterna, por lo general en máquinas con corrientes bifásicas en cuadratura y en máquinas trifásicas como se ilustra en la Fig. 1, en donde tres campos desfasados 120 grados y creados por corrientes trifásicas se combinan y generan un exclusivo campo magnético que rotara alrededor del estator.

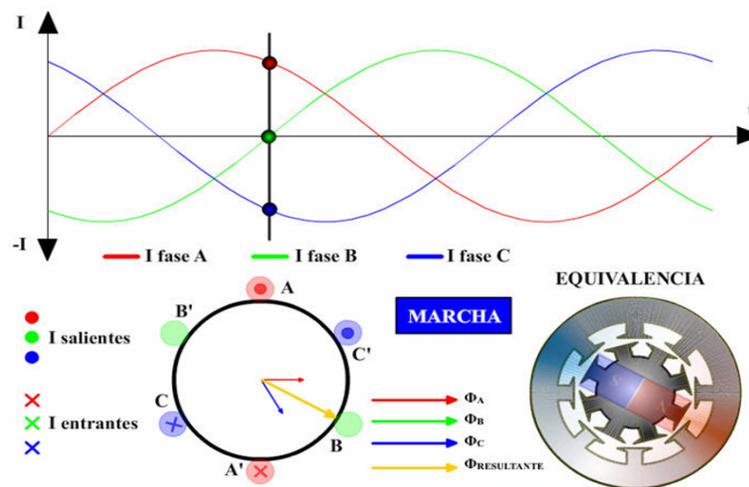


Fig. 1. Distribución magnética rotacional de una maquina trifásica [11]

Este campo magnético rotatorio mantiene una velocidad constante conocida como velocidad síncrona, la cual está relacionada con la frecuencia de la corriente alterna. La interacción del campo magnético con los conductores y las bobinas presentes en máquinas permite la conversión de energía, ya sea en motores o en generadores para generar movimiento o electricidad respectivamente.

Los fundamentos del estudio armónico radican en la teoría de series de Fourier, herramienta que permite desagregar señales periódicas complejas en componentes sinusoidales elementales de variada magnitud y desfase.

En sistemas eléctricos, las cargas no lineales generan armónicos en la corriente que puede tener un impacto en cuanto a parámetros relevantes de la energía eléctrica, generando afectaciones y problemas como la sobrecarga de equipos, la pérdida de eficiencia energética y el calentamiento de los conductores [12].

Para el caso de las maquinas eléctrica rotativas el componente armónico, tienen diferentes

impactos afectando la vida útil, la temperatura, la perdida de eficiencia, entre otros. La Fig. 2 ilustra un caso del espectro armónico de corriente de un ciclo convertidor que alimenta una máquina eléctrica, en este espectro se observa la presencia de las diferentes componentes de la distorsión presente. La distribución de los armónicos en términos de amplitud y fase con respecto a la frecuencia fundamental proporciona directrices para la evaluación e implementación de técnicas de mitigación de los armónicos.

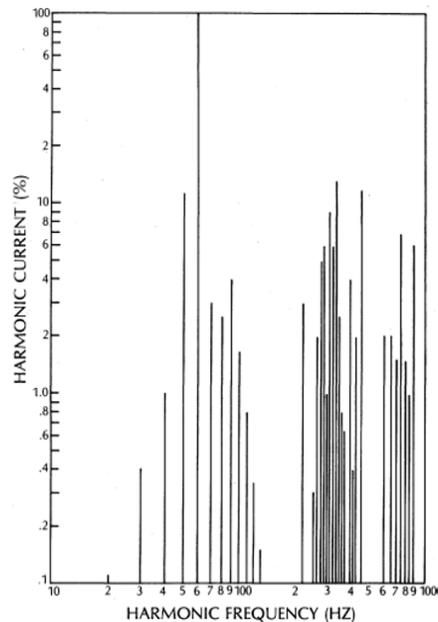


Fig. 2 Espectro característico de los armónicos de corriente de entrada en un convertidor de seis pulsos operando con una frecuencia de salida de 5 Hz [12].

Los armónicos en sistemas trifásicos son ondas sinusoidales con frecuencias múltiplos de la fundamental, clasificándose en tres tipos según su secuencia. Los de secuencia positiva (4°, 7°, 10°, etc.) giran igual que la onda base y se generan en cargas no lineales como variadores de velocidad. Los de secuencia negativa (2°, 5°, 8°, etc.) rotan en sentido opuesto, distorsionando las formas de onda, mientras los homopolares (3°, 6°, 9°, etc.) permanecen en fase y surgen por desequilibrios en cargas monofásicas.

Cada tipo de armónico afecta diferentemente las máquinas eléctricas. Los positivos mantienen la rotación, pero pueden causar sobrecalentamientos, los negativos generan pares opuestos que reducen eficiencia, y los homopolares producen pérdidas adicionales. Esta clasificación se representa mediante diagramas fasoriales que muestran su comportamiento rotacional respecto al fundamental, siendo clave para análisis técnicos.

Entender estas características es vital para mitigar sus efectos. Mientras los homopolares no alteran el campo magnético giratorio, los positivos y negativos deforman su estructura, afectando par motor y rendimiento. Identificar su origen permite implementar filtros activos u otras soluciones que mejoren la calidad de potencia en instalaciones industriales.

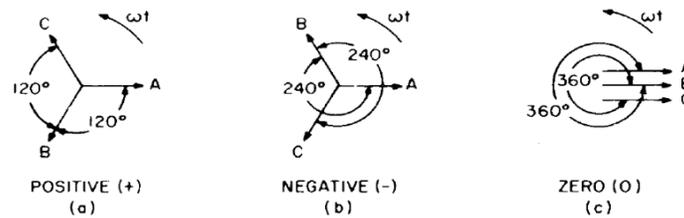


Fig. 3 Rotación fasorial de armónicos [13]

La distinción entre estos tipos de armónicos es esencial para comprender su impacto en la calidad de la energía eléctrica y en los equipos conectados a la red.[14]

La Transformada de Clarke

La Transformada de Clarke realiza la conversión de las señales trifásicas a coordenadas Alpha, beta y cero que son estacionarias. Una propiedad destacada de esta transformación es que la componente cero se ubica de manera perpendicular al plano espacial definido por la trayectoria trazada por los vectores de tensión o corriente, siempre y cuando estos sean balanceados y simétricos [15]. La representación matricial correspondiente se expresa de la siguiente manera:

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

Se utilizará la transformada de Clarke con el fin de calcular las componentes alfa y beta del campo magnético rotatorio y poder obtener la forma de este campo alrededor de la superficie del rotor. Para llevar a cabo este cálculo, es necesario eliminar la constante $\sqrt{(2/3)}$, conocida como "potencia constante", que se emplea en el análisis de voltajes y corrientes para preservar la potencia. No obstante, en el contexto del campo magnético, el interés reside en obtener su magnitud real. Por lo tanto, en esta aplicación específica, se establece esta constante en un valor de uno, como se indica en la ecuación. (2).

$$\begin{bmatrix} B_\alpha \\ B_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \\ B_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Modelo de la máquina de devanados concentrados

La máquina alterna trifásica objeto de este estudio, opera con corrientes que comparten la misma magnitud y están desfasadas entre sí 120 grados. Cuando estas corrientes atraviesan un devanado trifásico, compuesto por tres bobinas concentradas, generan

un campo magnético rotativo de magnitud constante igual a 1.5 veces el campo pico de una de las bobinas.

Para comprender este principio, la Fig. 4 muestra el campo magnético rotativo mediante un estator que alberga tres bobinas identificadas como A'-A, B'-B y C'-C, cada una separada por un ángulo de 120 grados. Esta representación ilustra de manera efectiva una maquina trifásica de devanados concentrado junto con el campo magnético rotativo en el estator, visualizándolo con un polo norte y un polo sur producto de la adición de los tres campos punzantes generados por las tres bobinas. Estos polos magnéticos realizan una rotación mecánica alrededor de la superficie del estator por cada ciclo eléctrico de la corriente aplicada [16]

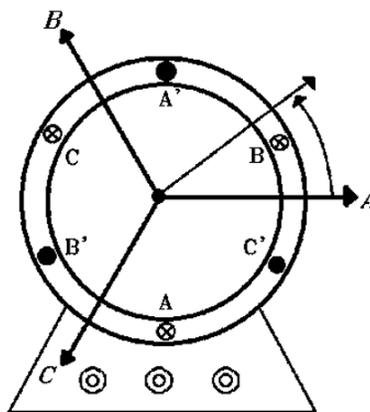


Fig. 4 Ejes del estator de una maquina trifásica

Arquitectura para la simulación

En la Fig. 5, se presenta el esquema de la simulación, en ella se aprecia los bloques fundamentales que componen el modelo de la maquina y la transformación necesaria para obtener la forma del campo magnético rotatorio ideal generado por el estator de la máquina.

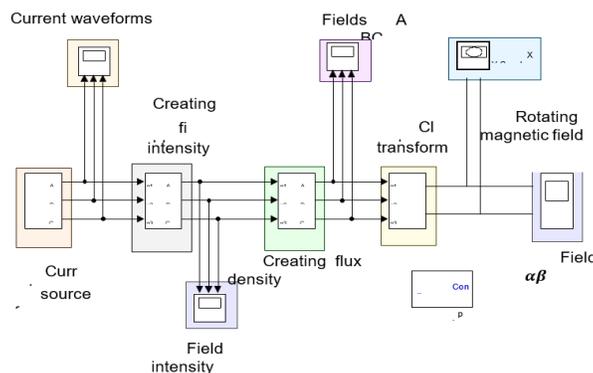


Fig. 5 Esquema de simulación

En el esquema, las fuentes de corrientes distorsionadas se generaron mediante el solapamiento de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias. En este estudio, se consideraron fuentes distorsionadas con los primeros 50 armónicos, ya que el estándar IEE519 sugiere que el orden cincuenta sea la cota superior al evaluar el contenido armónico.[17]

En el segundo bloque se genera la intensidad del campo magnético a través de una ganancia, según la ecuación (3). En esta, " N " denota el número de vueltas del devanado de una fase," l " representa la longitud magnética promedio de la máquina, e " I " la corriente asociada a cada una de las fases. Los valores de "N" y "l" se determinaron específicamente para que se adapte al modelo de estudio, estableciendo la siguiente relación:

$$H = \frac{N}{l} I = H = \frac{50}{0.2} I \quad (3)$$

El tercer bloque, a través de la ley de Ampere-Maxwell que describe el comportamiento de los campos electromagnéticos, crea la densidad de flujo teniendo en cuenta la permeabilidad promedio del acero eléctrico de grano orientado [18], estableciendo la siguiente relación:

$$B = \mu \cdot H$$

$$B = 1700 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \quad (4)$$

Con las densidades de flujo se implementa la transformada de Clarke, basada en la ecuación matricial (2). En el proceso de modelado, se emplearon ganancias para definir y ajustar cada uno de los coeficientes presentes en la transformación matricial. A través de esta configuración, se logra la conversión de los campos originales de cada bobina a sus equivalentes en el espacio de coordenadas alfa y beta, que en este caso representan el espacio físico alrededor del estator, la suma de estas componentes da lugar al campo magnético rotatorio generado en el estator de la máquina.

Resultados

Durante la primera etapa de simulación, se estudió cómo diferentes componentes armónicas afectan la forma del campo magnético rotatorio en una máquina eléctrica trifásica. Para ello, se introdujeron armónicos en la corriente con niveles relativos del 10%, 30%, 40% y 50% respecto a la componente fundamental. Se generaron gráficos en el plano α - β (alfa-beta) para visualizar la forma del campo bajo distintos niveles de distorsión, evaluando su comportamiento en tres zonas clave: la región lineal (representada en negro), la región nominal (en azul) y la región que supera el nivel nominal (en rojo).

Este análisis permitió observar con mayor claridad cómo se deforma el campo rotacional ante la presencia de armónicos y qué tan significativa es dicha deformación en función

de su intensidad. Los efectos observados se detallan en los resultados que se presentan más adelante.

Como punto de partida, se realizó una simulación base considerando únicamente corrientes sinusoidales ideales alimentando el estator. Bajo estas condiciones, como se muestra en la Figura 6, el campo magnético generado describe un círculo perfecto, cuya magnitud alcanza aproximadamente 1.5 veces el valor pico del campo generado por una sola fase. Esta configuración sirve como referencia para contrastar los efectos introducidos por las componentes armónicas en los siguientes escenarios.

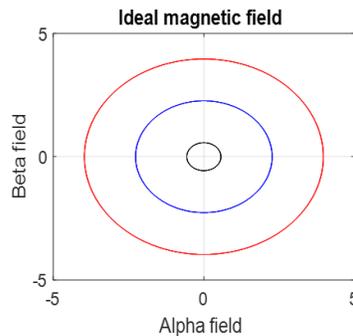


Fig. 6 Forma del campo magnético rotatorio ideal

La Fig. 7 presenta la forma del campo magnético rotatorio en cuatro escenarios de distorsión del armónico de orden 2, que es de secuencia negativa. Cada subfigura representa una variación en la intensidad y la forma del campo magnético, se observa cómo la distorsión en la corriente alterna afecta la simetría y la amplitud del campo magnético, alejando su forma del círculo ideal generando la forma de un triángulo que a medida que se aumenta la magnitud del armónico se pronuncia más.

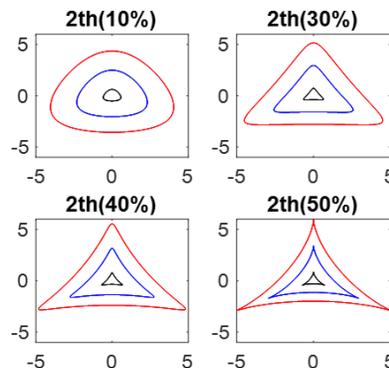


Fig. 7. Influencia de la distorsión del segundo armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 8, se muestra el campo magnético rotatorio con distorsión proveniente del tercer armónico. Es notable señalar que este armónico no ejerce ninguna deformación en el campo magnético rotacional por lo que es de secuencia homopolar, por tanto todas las formas de los campos magnético rotacionales son círculos perfectos.

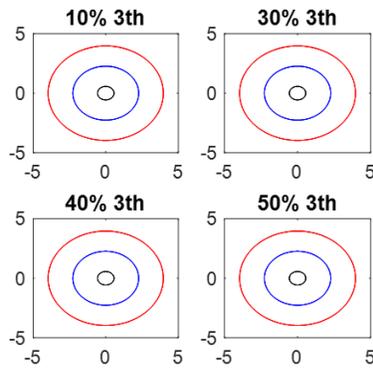


Fig. 8 Influencia de la distorsión del tercer armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

La Fig. 9, muestra el campo magnético rotatorio con distorsión del cuarto armónico que es de secuencia positiva. Cada sub figura ilustra cambios en la forma del campo magnético, generando tres envolvimientos hacia adentro en los diferentes escenarios de simulación, estos se pronuncian más a medida que aumenta la distorsión armónica.

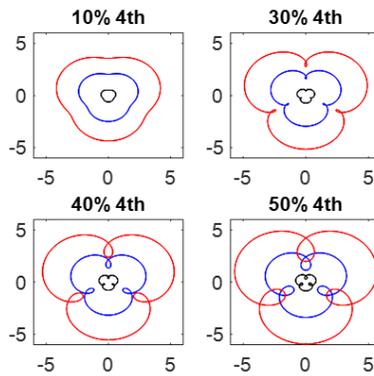


Fig. 9 Efecto por distorsión del cuarto armónico sobre las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 10, se muestra el campo magnético rotatorio con distorsión del quinto armónico que es de secuencia negativa. Cada sub figura ilustra cambios en el campo magnético que generan 6 envolvimientos hacia afuera que se pronuncia más a medida que aumenta la magnitud del armónico.

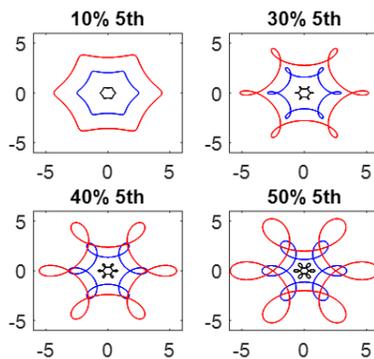


Fig. 10 Influencia de la distorsión del quinto armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 11, se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del sexto armónico, el cual es de secuencia homopolar por lo que no genera distorsión.

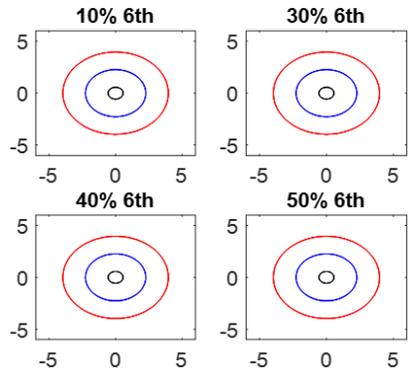


Fig. 11 Influencia de la distorsión del sexto armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 12, se muestra el campo magnético rotacional generado por la distorsión del séptimo armónico que es de secuencia positiva. Cada sub figura ilustra cambios en el campo magnético rotacional creando seis envolvimientos hacia adentro en las diferentes zonas que se pronuncian más a medida que aumenta la distorsión armónica.

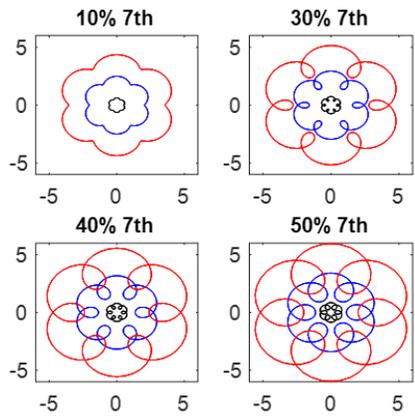


Fig. 12 Influencia de la distorsión del séptimo armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 13, se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del octavo armónico de secuencia negativa. Cada sub figura ilustra cambios en el campo magnético rotacional generando nueve envolvimientos hacia afuera en las diferentes zonas y se pronuncian más a medida que aumenta la distorsión armónica.

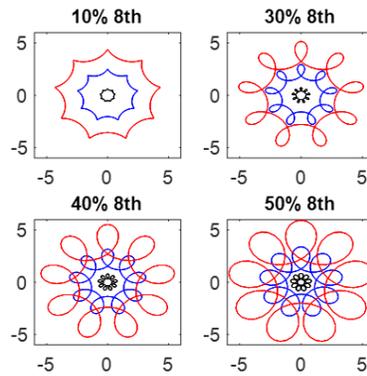


Fig. 13 Influencia de la distorsión del octavo armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 14, se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del noveno armónico, el cual es de secuencia homopolar por lo que no genera distorsión.

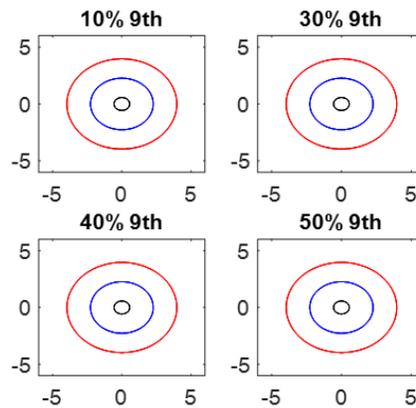


Fig. 14 Influencia de la distorsión del noveno armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

La Fig. 15, muestra el campo magnético rotacional con distorsión del décimo armónico de secuencia positiva. Cada sub figura ilustra nueve envoltimientos hacia adentro en las diferentes zonas.

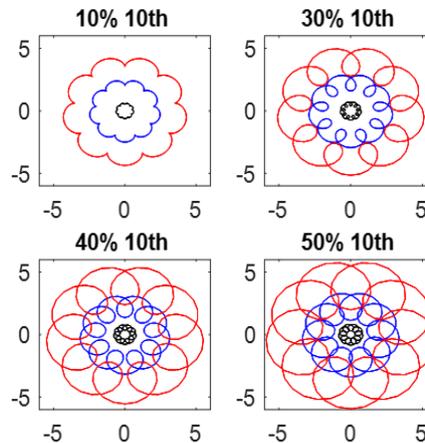


Fig. 15 Influencia de la distorsión del décimo armónico en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 16, se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del onceavo armónico de secuencia negativa. Cada sub figura ilustra 12 envolvimientos hacia afuera.

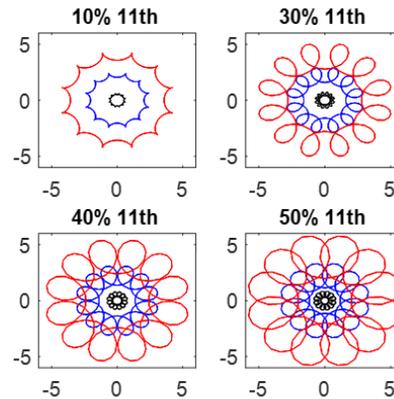


Fig. 16 Influencia de la distorsión del armónico número 11 en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 17, se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del treceavo armónico de secuencia positiva. Cada sub figura ilustra cambios en el campo magnético que generan 12 envolvimientos hacia adentro.

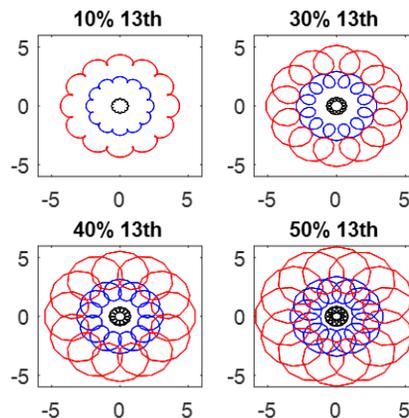


Fig. 17 Influencia de la distorsión del armónico número 13 en las formas del campo magnético rotatorio.

En la Fig. 18, se muestra el campo magnético rotacional con distorsión del catorceavo armónico de secuencia negativa. Cada sub figura ilustra cambios en el campo magnético que generan 15 envolvimientos hacia afuera en las diferentes zonas.

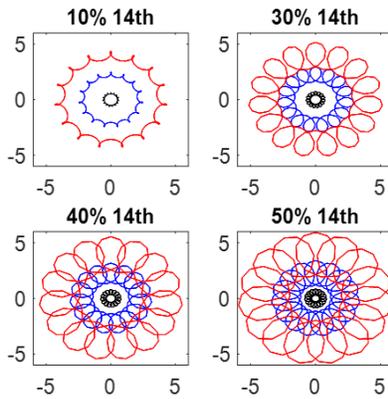


Fig. 18 Influencia de la distorsión del armónico número 14 en las formas del campo magnético rotatorio.

Seguidamente se presentan los resultados de la distorsión generada, en la forma del campo magnético rotacional, por los armónicos del 15th al 20th, se puede observar la repetición de los mismos patrones en dependencia de la secuencia del armónico.

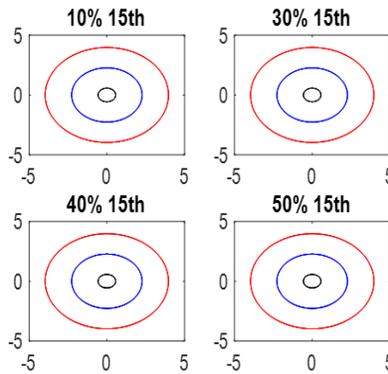


Fig. 19 Formas del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 15

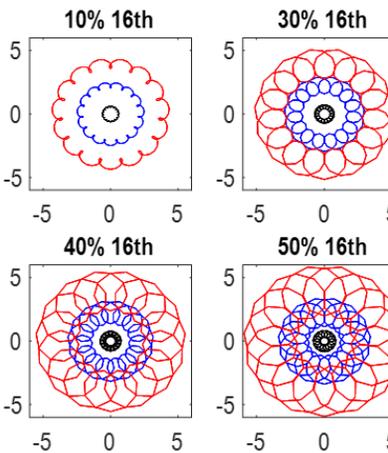


Fig. 20 Formas del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 16

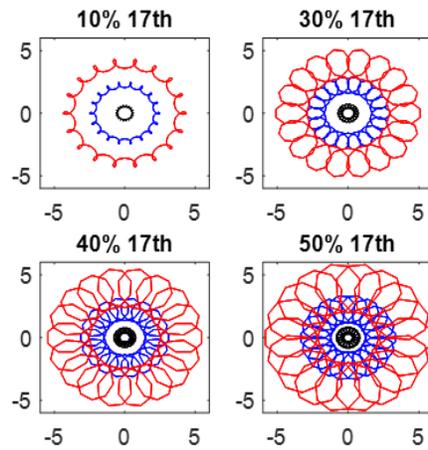


Fig. 21 Formas del campo magnético rotacional causadas por la distorsión del armónico 17

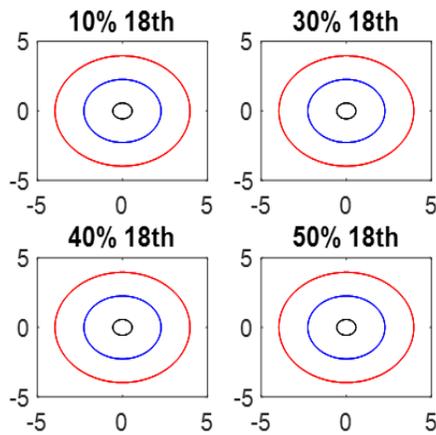


Fig. 22. Perturbaciones en las formas del campo magnético rotacional inducidas por la distorsión del armónico 18.

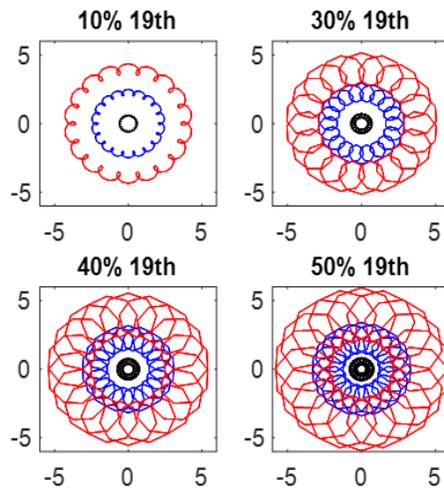


Fig. 23 Perturbaciones en las formas del campo magnético rotacional inducidas por la distorsión del armónico 19.

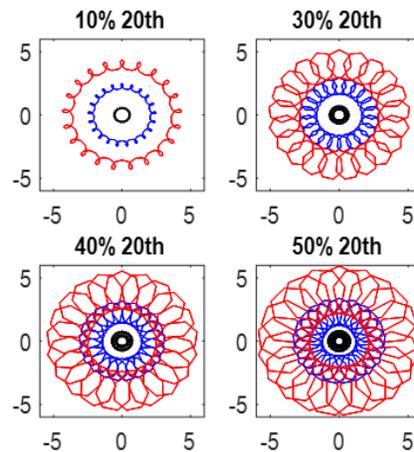


Fig. 24 Perturbaciones en las formas del campo magnético rotacional inducidas por la distorsión del armónico 20.

En la segunda fase de la simulación, se integraron armónicos específicos, tales como el 5th, 7th, 11th y 13th, se variaron las magnitudes incrementándolas progresivamente y se permutó el armónico dominante, con el fin de determinar la prevalencia de este sobre los demás, en cuanto a la forma del campo magnético rotacional obtenido.

Como muestra de los resultados, en la Fig. 25, se muestra la forma del campo magnético rotacional con la combinación del armónico 5th, 7th, 11th y 13th, en este caso el armónico 5th es el predominante, por lo que la forma generada tiene seis envoltimientos hacia afuera.

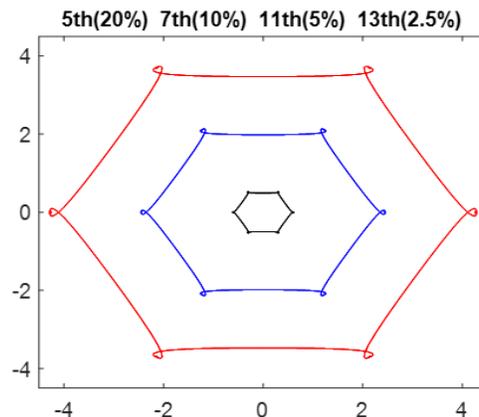


Fig. 25 Perfil del campo magnético rotacional con la combinación del armónico 5th (20%), 7th (10%), 11th (5%) y 13th (2.5%)

En la Fig. 26 el campo magnético rotacional revela la influencia de los armónicos 5th, 7th, 11th y 13th, con un incremento en sus magnitudes en referencia al caso anterior. Se destaca la predominancia de seis envoltimientos hacia afuera; no obstante, se generan pequeños picos en estos envoltimientos debido a la influencia de los otros armónicos.

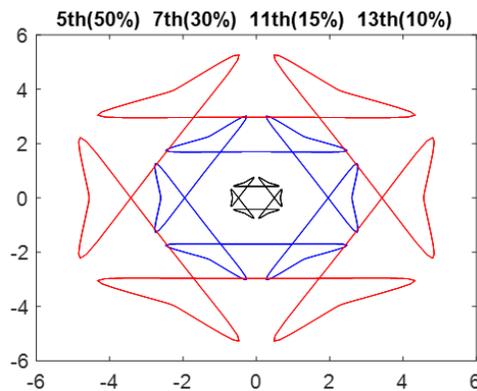


Fig. 26 Perfil del campo magnético rotacional con la combinación del armónico 5th (50%), 7th (30%), 11th (15%) y 13th (10%)

En la Fig. 27, se muestra nuevamente la influencia de los armónicos 5th, 7th, 11th y 13th, pero en este caso el armónico 7th, de secuencia positiva, es el dominante, esto hace que persista la presencia de seis envolvimientos, con la diferencia de que ahora se generan hacia adentro. De igual forma al caso anterior, se crean pequeños picos en los envolvimientos a causa de la influencia de los otros armónicos.

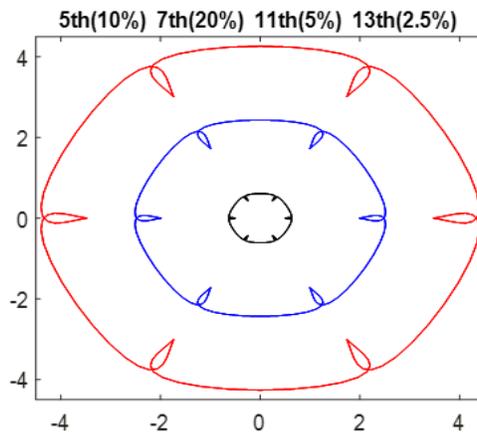


Fig. 27 Perfil del campo magnético rotacional con la combinación del armónico 5th (10%), 7th (20%), 11th (5%) y 13th (2.5%)

En la Fig. 28, se presenta la forma del campo magnético rotacional bajo la influencia de los armónicos 5th, 7th, 11th y 13th, en este caso el armónico 11th, de secuencia negativa, es el de mayor magnitud. Se observa la presencia de 12 envolvimientos hacia afuera de la circunferencia como comportamiento predominante

Se observa un incremento en el porcentaje de distorsión. A pesar de este aumento, la predominancia de seis envolvimientos hacia afuera, no obstante, se generan un tipo de auto envolvimiento en cada ciclo de los seis y esto sucede porque realiza un envolvimiento hacia adentro.

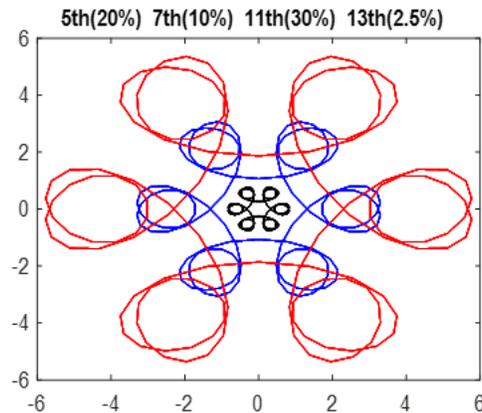


Fig. 28 Perfil del campo magnético rotacional con la combinación del armónico 5th (20%), 7th (10%), 11th (30%) y 13th (2.5%)

En la Fig. 29, La representación del campo magnético rotacional revela la influencia de los armónicos 5th, 7th, 11th y 13th. Se destaca que, al considerar el armónico 13th de secuencia positiva, se observa un incremento en el porcentaje de distorsión al 50%. A pesar de este aumento, la predominancia de 14 envolvimientos con combinación de ciclos hacia afuera y hacia adentro.

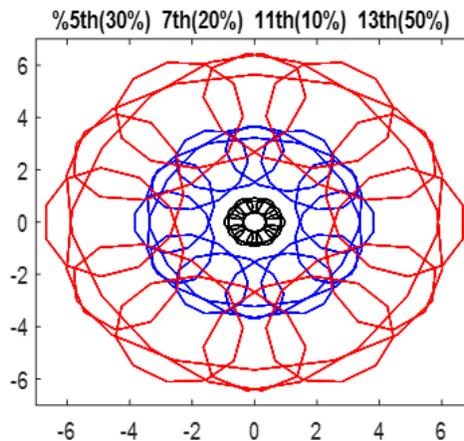


Fig. 29 Perfil del campo magnético rotacional con la combinación del armónico 5th (30%), 7th (20%), 11th (10%) y 13th (50%)

Los resultados muestran un comportamiento diferenciado según el tipo de armónico. Los homopolares (3° , 6° , 9° ...) no distorsionan el campo magnético rotacional debido a su sincronización perfecta en fase, cuyos efectos se contrarrestan mutuamente como ondas que se cancelan entre sí. Este fenómeno preserva intacta la simetría circular del campo. Por otro lado, los armónicos de secuencia positiva (4° , 7° , 10° ...) generan un patrón de deformación interno característico, donde el campo desarrolla pliegues hacia su centro cuyo número aumenta progresivamente: el armónico 4° produce 3 pliegues, el 7° genera 6, y el 11° crea 9, siguiendo una relación matemática precisa con el orden armónico.

$$n = h-1 (4)$$

Donde,

n = número de envolvimientos

h = armónico

Los armónicos de secuencia negativa (2°, 5°, 8°, etc.) producen un efecto peculiar en el campo magnético: este desarrolla deformaciones hacia el exterior de su trayectoria circular normal, como si la onda "se abultara" hacia afuera. Curiosamente, cada armónico superior aumenta este efecto de manera predecible - el 2° armónico crea 3 deformaciones, el 5° genera 6 y el 8° produce 9, siguiendo una secuencia donde el número de deformaciones aumenta en 3 con cada incremento del orden armónico. Este patrón revela una relación matemática clara entre la frecuencia del armónico y la distorsión del campo magnético.

$$n = h+1 (5)$$

n = número de envolvimientos

h = armónico

Al combinar los armónicos (5th, 7th, 11th y 13th) con diversos porcentajes, se produce una interacción entre ellos. Aunque se combinan entre sí, prevalece el número de envolvimientos generados por el armónico de mayor porcentaje, la presencia de los demás variara la forma de los envolvimientos.

Conclusiones

Los armónicos homopolares presentes en la corriente trifásica no ejercen influencia sobre la generación del campo magnético rotacional ideal, dado que su efecto neto se cancela al no producir componentes de flujo que contribuyan a la rotación del campo. Por esta razón, no inducen deformaciones perceptibles en su geometría.

En cuanto a los armónicos de secuencia positiva, se evidenció que inducen alteraciones geométricas del campo magnético rotatorio en forma de envolventes dirigidas hacia el interior del contorno circular ideal. La cantidad de estas deformaciones presenta una relación directa con el orden del armónico, aproximada por la expresión $n=h-1$, donde n representa el número de pliegues observados y h el orden del armónico. Este comportamiento revela que a mayor orden, se incrementa la complejidad geométrica del patrón resultante.

Por otro lado, los armónicos de secuencia negativa generan distorsiones que se manifiestan como ondulaciones o envolventes proyectadas hacia el exterior del círculo ideal del campo magnético. En este caso, la cantidad de envolventes también crece con el orden del armónico, siguiendo la relación $n=h+1$. Este tipo de armónicos, por su naturaleza inversa en rotación, tienden a producir deformaciones más notorias en comparación con los de secuencia positiva.

Adicionalmente, se identificó que combinaciones de armónicos consecutivos de distinta secuencia, separados por un armónico homopolar (por ejemplo: 2.^o-4.^o, 5.^o-7.^o, 8.^o-10.^o orden), inducen una misma cantidad de envolventes en el campo magnético (3, 6, 9, respectivamente). Sin embargo, las deformaciones generadas por los armónicos de secuencia negativa presentan una mayor prominencia geométrica, evidenciando una influencia más severa sobre la estructura ideal del campo magnético rotacional.

Financiamiento

Esta investigación se desarrolló con el apoyo de los grupos de investigación Sistemas Energéticos y LOGOS adscritos a la Universidad de Pamplona.

Referencias

- [1] "HITACHI ABB POWER GRIDS", Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <http://bit.ly/ABBUniversityMadrid>
- [2] Sebastian Carrasquilla Becerra, "ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN REDES RESIDENCIALES," 2017, Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/46da6066-1b95-4923-98aa-4c168ed8ec14/content>
- [3] D. Armonica, S. Ponente, and I. Eugenio Téllez Ramírez, "*PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGIA*."
- [4] "ARMÓNICOS: Análisis de perturbaciones | Electricistas.cl" Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: <https://electricistas.cl/armonicos-analisis-de-perturbaciones/>
- [5] J. R. Vázquez, J. L. Flores, P. Salmerón, and S. P. Litrán, "*Diseño de filtros pasivos, activos e híbridos para la compensación armónica de cargas trifásicas no lineales*".
- [6] R. scholar, U. L. I. Manoj Kumar Pandey, Institute of Electrical and Electronics Engineers, University of Auckland, IEEE Industrial Electronics Society, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications 10 2015.06.15-17 Auckland, and ICIEA 10 2015.06.15-17 Auckland, A Technique to Minimize the Effect of Current Harmonics in a Brushless DC Motor Drive. Auckland, New Zealand: 2015 *IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* .
- [7] H. F. Llacza Robles, "Efectos de los armónicos en motores eléctricos al controlar su velocidad," 2013. Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/1946>

- [8] Y. Zhang and Y. W. Li, "Investigation and suppression of harmonics interaction in high-power PWM current-source motor drives," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 2, pp. 668–679, Feb. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2310955.
- [9] A. Baghini, "*Handbook of Power Quality*," 2008.
- [10] E. F. Fuchs, D. L. Roesler, and K. P. Kovacs, "Aging of electrical appliances due to harmonics of the power system's voltage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, no. 3, pp. 301–307, 1986, doi: 10.1109/TPWRD.1986.4308007.
- [11] "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_giratorio.html
- [12] "*IEEE Working Group on Power System Harmonics**," 1983.
- [13] "Effects of Harmonic Currents on Power System Part 2 - Electrical Engineering Fundamentals." Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <https://eefundamentals.com/effects-of-harmonic-currents-on-power-system-part-2/>
- [14] J. Dariel Arcila, "ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS." [Online]. Available: <http://www.ieb.com.co>
- [15] E. A. , U. F. A. J. Cano Plata, *Sistemas eléctricos en régimen no sinusoidal. Colombia: Universidad Nacional de Colombia*, 2022.
- [16] Stephen J. Chapman, "*Máquinas eléctricas* (5a. ed)," 2012.
- [17] "IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014)," pp. 1–31, 2022.
- [18] H. Wang, C. Li, B. Cai, T. Zhu, N. Chukwuchekwa, 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.