

Interfaz Gráfica para el análisis de pérdidas en el diseño de máquinas eléctricas

Graphical Interface for Loss Analysis in Electrical Machine Design

Maykop Pérez Martínez^{I,*}, Josnier Ramos Guardarrama^{II}

^IUniversidad de Concepción, Chile

^{II}Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE. Cuba

*Autor de la correspondencia: maykoperez@udec.cl

Recibido: 23 de mayo de 2025

Aprobado: 2 de julio de 2025

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

Este trabajo presenta una herramienta computacional interactiva desarrollada en MATLAB para el análisis de pérdidas en el hierro en máquinas eléctricas, centrada en el cálculo específico del diente del estator. Se implementó un modelo de dos términos que contempla pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, ajustado con datos del acero M210-27A. La interfaz permite ingresar parámetros geométricos, eléctricos y materiales, calcular pérdidas específicas y totales, visualizar resultados en tablas dinámicas y gráficos, y exportar informes técnicos en formato PDF. Los resultados confirman la dependencia cuadrática de las pérdidas con la densidad de flujo y la frecuencia, siendo las corrientes parásitas predominantes a frecuencias elevadas. Esta herramienta resulta útil tanto en el diseño preliminar de máquinas eléctricas como en entornos educativos, permitiendo realizar análisis paramétricos rápidos y trazables. La validación del modelo y los resultados gráficos demuestran la precisión y aplicabilidad de la solución propuesta.

Palabras clave: pérdidas en el hierro, histéresis, corrientes parásitas, máquinas eléctricas, MATLAB, interfaz gráfica.

This study presents an interactive computational tool developed in MATLAB for analyzing iron losses in electrical machines, with a focus on the specific calculation of stator tooth losses. A dual-term model was implemented, accounting for both hysteresis and eddy current losses, calibrated using data from M210-27A steel. The interface allows users to input geometric, electrical, and material parameters; compute specific and total losses; visualize results through dynamic tables and graphs; and export technical reports in PDF format. The results confirm the quadratic dependence of losses on magnetic flux density and frequency, with eddy current losses becoming dominant at higher frequencies. This tool is valuable for both preliminary electrical machine design and educational environments, enabling rapid and traceable parametric analyses. Model validation and graphical results demonstrate the precision and applicability of the proposed solution.

Keywords: Iron losses, hysteresis, eddy currents, electric machines, MATLAB, graphical interface.

INTRODUCCIÓN

Las pérdidas en el núcleo magnético, denominadas también pérdidas en el hierro, representan uno de los factores más estudiados y relevantes en el análisis y diseño de máquinas eléctricas rotativas. Desde los primeros desarrollos de generadores y motores en el siglo XIX, estas pérdidas se han identificado como una fuente inevitable de disipación de energía, directamente relacionada con la eficiencia, la estabilidad térmica y la vida útil de los equipos. En el ámbito del diseño de máquinas eléctricas, el estudio de las pérdidas adquiere especial relevancia, ya que incide en parámetros clave como el rendimiento energético, la distribución de temperatura y la confiabilidad a largo plazo.

Cómo citar este artículo:

Maykop Pérez Martínez y Josnier Ramos Guardarrama. Interfaz Gráfica para el análisis de pérdidas en el diseño de máquinas eléctricas. Ingeniería Energética. Vol. 46(2025): publicación continua. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Entre los tipos de pérdidas que deben considerarse destacan las pérdidas por corrientes parásitas, las pérdidas de proximidad y aquellas originadas por la circulación no deseada de corriente. Para abordarlas, es esencial emplear metodologías de cálculo precisas, que permitan optimizar el diseño y garantizar un funcionamiento eficiente de los equipos. Los fundamentos teóricos de las pérdidas en el núcleo magnético fueron establecidos por autores clásicos como Fitzgerald, Kingsley y Umans [1], quienes describieron los mecanismos de magnetización cíclica y sus efectos energéticos. Sus trabajos identificaron la histéresis magnética y las corrientes parásitas como los principales fenómenos responsables de las pérdidas en materiales ferromagnéticos. Por otra parte, el desarrollo de nuevos materiales, como los aceros eléctricos de grano orientado y los núcleos de alta resistencia marcaron un cambio importante, permitiendo reducciones significativas en las pérdidas del núcleo.

No obstante, las tendencias actuales en diseño de máquinas eléctricas, como la miniaturización de componentes, el incremento en las variaciones de frecuencias de operación, electrónica de potencia y los exigentes estándares de eficiencia energética, han revitalizado el estudio de estas pérdidas. Este renovado interés ha impulsado investigaciones que combinan los principios clásicos con modernas técnicas de simulación a partir de modelos más detallados y herramientas de análisis más flexibles. Uno ejemplo de ello, como señala los investigadores de la referencia [2], es que en el diseño de máquinas eléctricas de alta eficiencia se pueden alcanzar reducciones de hasta el 40% en las pérdidas por corrientes parásitas en núcleos laminados. Este notable avance se logra mediante la implementación de aleaciones avanzadas de hierro-silicio con recubrimientos aislantes nanocristalinos. La importancia de esta solución técnica radica en su doble beneficio: no solo disminuye significativamente las pérdidas en el núcleo, sino que además mejora sustancialmente la estabilidad térmica del equipo y prolonga su vida útil.

En este contexto, es necesario entender los distintos tipos de pérdidas presentes en las máquinas eléctricas, sus mecanismos físicos, y los métodos utilizados para su estimación. Entre las principales se encuentran:

- **Pérdidas por proximidad y corrientes parásitas:** Estas pérdidas se originan principalmente en los devanados y son críticas en máquinas eléctricas de alta densidad de potencia y alta frecuencia. Los efectos de proximidad incrementan la resistencia efectiva del conductor, elevando la disipación térmica y reduciendo la vida útil del aislamiento. Por otro lado, las corrientes parásitas (Corrientes de Eddy) inducidas en los hilos individuales del devanado pueden llegar a ser significativas, especialmente en configuraciones de ranura concentrada o bajo condiciones de alta densidad de corriente y elevada saturación magnética [3-5].
- **Pérdidas en el hierro o de núcleo:** Incluyen pérdidas por histéresis, corrientes parásitas y pérdidas excesivas. Son altamente dependientes de la frecuencia y la densidad de flujo magnético, y su modelado preciso es esencial para el diseño eficiente, especialmente en materiales avanzados o impresos en 3D. [6-9]
- **Pérdidas por circulación de corriente:** Se presentan en máquinas síncronas de imanes permanentes y pueden incrementar las pérdidas óhmicas en los devanados, especialmente bajo condiciones de alta frecuencia [5,10-13].
- **Pérdidas mecánicas y de fricción:** Como la fricción del aire en el rotor, que puede ser relevante en máquinas de alta velocidad [14].

En correspondencia diversos métodos han sido desarrollados para el cálculo y modelado de estas pérdidas entre los que se encuentran:

- **Modelos analíticos y de circuito equivalente:** Permiten cálculos rápidos y flexibles de pérdidas por proximidad y circulación de corriente, facilitando la optimización en etapas tempranas del diseño [15].
- **Métodos basados en elementos finitos:** Ofrecen alta precisión para el cálculo de pérdidas en el hierro y corrientes parásitas, aunque con mayor demanda computacional [16, 17].
- **Modelos mejorados para pérdidas en el hierro:** Incorporan la variabilidad de los coeficientes de histéresis y corrientes parásitas en función de la frecuencia y la inducción, reduciendo errores respecto a modelos convencionales. [18].
- **Mapas de eficiencia:** El modelado de mapas de eficiencia permite visualizar el impacto de las pérdidas en función del par y la velocidad, facilitando la comparación entre diferentes topologías de máquinas [19, 20].
- **Optimización térmica:** El análisis de pérdidas está estrechamente ligado al diseño de sistemas de enfriamiento y a la gestión térmica de la máquina [14].

A pesar de ello, aún se reconoce la necesidad de contar con recursos interactivos que integren modelos de cálculo confiables con interfaces amigables, para permitir evaluar rápidamente el impacto de parámetros electromagnéticos y geométricos sobre las pérdidas internas de la máquina. Este tipo de herramientas no solo favorece la comprensión profunda del fenómeno, sino que también sirve de apoyo al diseño preliminar y a la enseñanza universitaria en cursos de máquinas eléctricas, diseño electromagnético y eficiencia energética.

En este trabajo, se presenta una interfaz gráfica interactiva desarrollada en MATLAB que permite simular, calcular y analizar las pérdidas en el hierro en el diente del estator de una máquina de inducción de dos polos. La herramienta permite:

- Ingresar parámetros geométricos y eléctricos personalizables;
- Calcular las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas basadas en datos reales del material M210-27A;
- Visualizar tablas y gráficos dinámicos de resultados;
- Exportar automáticamente los informes en formato PDF con datos y gráficos comparativos.

El objetivo es ofrecer una solución accesible, didáctica y útil tanto en entornos educativos como en diseño preliminar de máquinas eléctricas, facilitando el análisis paramétrico de pérdidas magnéticas y la toma de decisiones fundamentadas en datos.

En las secciones siguientes se describe el modelo teórico implementado, el diseño de la interfaz gráfica, los resultados bajo diferentes escenarios de operación y un análisis de sensibilidad que evidencia el impacto de la frecuencia y la densidad de flujo sobre las pérdidas totales.

METODOLOGÍA

Modelo de cálculo de pérdidas en el hierro

El cálculo de las pérdidas magnéticas en el núcleo del estator se basa en la separación clásica de componentes por tipo de fenómeno físico: pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. En esta investigación se adoptó un modelo de dos términos, ampliamente aceptado en la literatura por su equilibrio entre precisión y simplicidad computacional [21, 22], como se muestra en la ecuación (1):

$$P_{je} = P_h + P_e = k_h \cdot f \cdot B^2 + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (1)$$

Donde:

P_h : pérdidas por histéresis [W/kg]

P_e : pérdidas por corrientes parásitas [W/kg]

k_h : coeficiente de histéresis [W/kg·Hz·T²], determina cuánto aumentan las pérdidas por histéresis con la frecuencia y el flujo.

k_e : coeficiente de corrientes parásitas [W/kg·Hz²·T²], representa el efecto de la frecuencia al cuadrado en las corrientes parásitas, que son más sensibles a variaciones rápidas del campo magnético.

f : frecuencia de operación [Hz]

B : densidad de flujo magnético máximo [T]

Este modelo permite evaluar la influencia combinada de la frecuencia y la densidad de flujo sobre las pérdidas magnéticas. Los coeficientes fueron ajustados experimentalmente utilizando información técnica del fabricante, que se muestra en la tabla 1, del material M210-27A, un acero eléctrico de grano no orientado ampliamente utilizado en máquinas de inducción.

Tabla 1. Tabla de pérdidas del material

B (T)	W/kg 50 Hz	VA/kg 50 Hz	A/m 50 Hz	W/kg 100 Hz	W/kg 200 Hz	W/kg 400 Hz	W/kg 1000 Hz	W/kg 2500 Hz
0,1	0,02	0,05	26,2	0,04	0,07	0,17	0,72	2,97
0,2	0,06	0,14	33,2	0,14	0,28	0,71	2,78	11,1
0,3	0,12	0,24	38,3	0,29	0,61	1,53	5,88	23,4
0,4	0,19	0,36	43,2	0,46	1,02	2,58	9,82	39,4
0,5	0,28	0,50	48,5	0,66	1,50	3,84	14,6	59,1
0,6	0,37	0,66	54,7	0,88	2,05	5,29	20,2	83,2
0,7	0,47	0,85	62,0	1,12	2,67	6,93	26,8	112
0,8	0,59	1,08	71,1	1,40	3,35	8,75	34,3	146
0,9	0,72	1,37	83,0	1,70	4,09	10,8	42,9	187
1,0	0,86	1,74	99,2	2,04	4,92	13,1	52,7	235
1,1	1,02	2,24	124	2,41	5,86	15,6	63,9	293
1,2	1,22	3,06	171	2,86	6,95	18,6	76,8	349
1,3	1,45	4,77	283	3,42	8,29	22,2	92,0	—
1,4	1,75	10,7	888	4,15	9,97	26,6	111	—
1,5	2,04	32,4	1937	4,92	11,7	31,4	134	—
1,6	2,25	80,3	4209	5,03	12,0	32,3	—	—
1,7	2,36	163	7688	—	—	—	—	—
1,8	2,27	297	12808	—	—	—	—	—

Los valores adoptados para los coeficientes fueron los siguientes:

- $k_h = 0,023639 \text{ W}/(\text{kg}\cdot\text{Hz}\cdot\text{T}^2)$
- $k_e = 2,816258 \cdot 10^{-5} \text{ W}/(\text{kg}\cdot\text{Hz}\cdot\text{T}^2)$

Estos valores se estimaron mediante ajuste de los datos de pérdidas de la tabla 1, para diferentes valores de frecuencia. A continuación, se detalla el procedimiento:

Supuestos del modelo

Se asume una dependencia de las pérdidas como se muestra en la ecuación (2):

$$P_{fe}(f, B) = k_h \cdot f \cdot B^2 + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (2)$$

Para un valor fijo de B, se factoriza como se muestra en la ecuación (3):

$$\frac{P_{fe}(f, B)}{B^2} = k_h \cdot f + k_e \cdot f^2 \quad (3)$$

Entonces de la tabla 1, se seleccionaron diferentes valores de frecuencia pérdidas para un campo de inducción magnética constante 1 T en este caso, con el objetivo de ajustar los coeficientes del modelo. La tabla 2, proporciona los datos seleccionados de pérdida específica para distintas frecuencias.

Tabla 2. Datos seleccionados para el cálculo de los coeficientes

Frecuencia f [Hz]	Pfe [W/kg]
50	0,86
100	2,04
200	4,92
400	13,1
1000	52,7
2500	235

Se resolvió este sistema mostrado en las ecuaciones (4), por mínimos cuadrados utilizando MATLAB. Los datos se organizaron en una matriz de regresores con las variables de frecuencia y frecuencia al cuadrado para obtener la solución. El ajuste se realizó sobre los seis puntos seleccionados, lo que permitió minimizar el error cuadrático medio.

$$\begin{bmatrix} k_h \\ k_e \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

Donde:

$$X = \begin{bmatrix} f_1 & f_1^2 \\ f_2 & f_2^2 \\ \vdots & \vdots \\ f_n & f_n^2 \end{bmatrix} : \text{ es la Matriz de regresores}$$

$$Y = \begin{bmatrix} P_{fe,1} \\ P_{fe,2} \\ \vdots \\ P_{fe,n} \end{bmatrix} : \text{ es el Vector de pérdidas}$$

En la figura 1, se muestra la curva comparativa entre los datos del fabricante y el modelo ajustado para el valor supuesto de B, como se puede observar el ajuste es preciso especialmente en el rango entre 50 y 1000 Hz, que es el más relevante para aplicaciones industriales típicas.

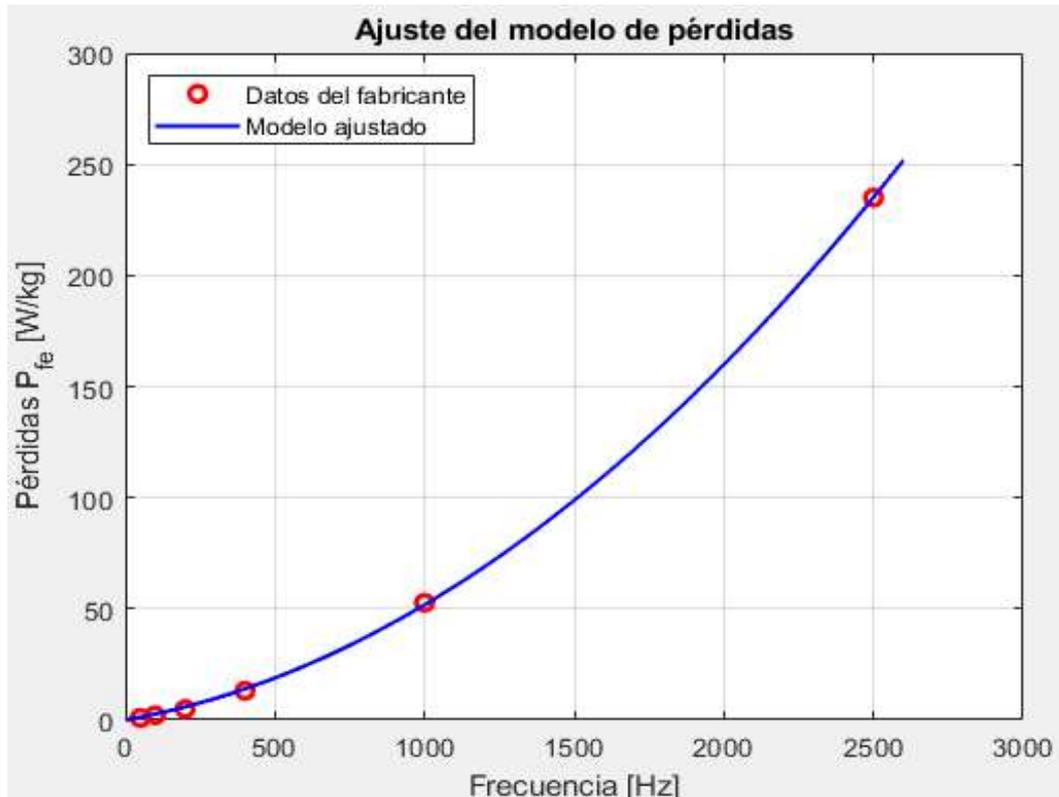


Fig. 1. Curva comparativa de ajuste del modelo

Caracterización geométrica del diente del estator

Como caso de estudio se consideró una sección del diente del estator de una máquina de inducción de 2 polos, con las dimensiones que se muestran en la figura 2, en la tabla 3, se muestran los valores.

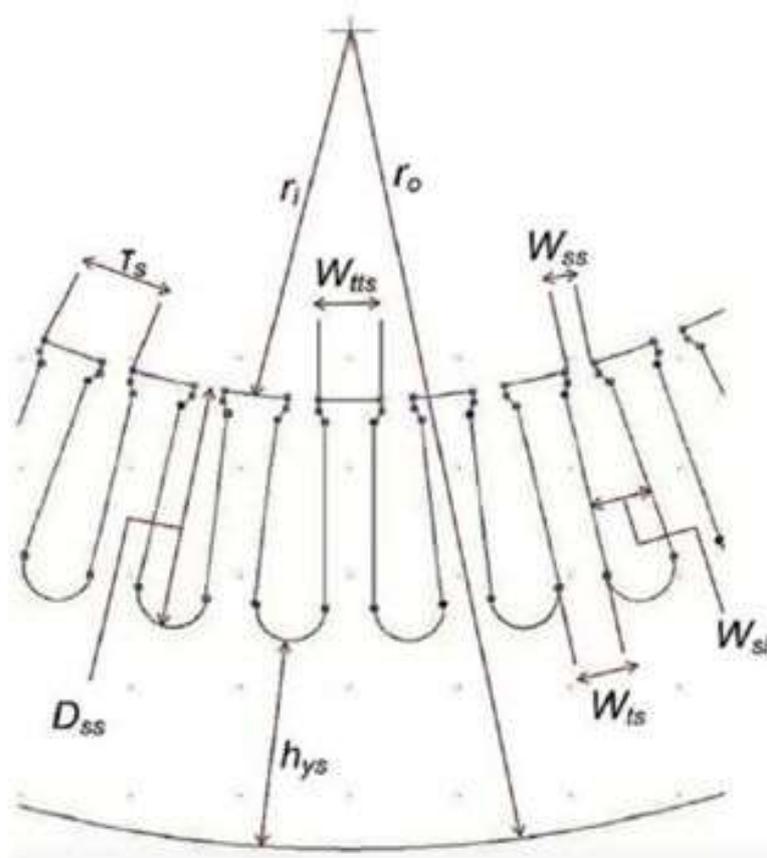


Fig. 2. Dimensiones de sección del diente del estator

Tabla 3. Dimensiones de las partes existentes del estator

Parte / Símbolo	Dimensión	Unidad
Número de ranuras, Ss	54	unidades
Radio interno, ri	0,0738	m
Diámetro interno, Di	0,1476	m
Radio externo, ro	0,1150	m
Diámetro externo, Do	0,2300	m
Longitud axial, lax	0,1030	m
Espesor del yugo, hys	0,0190	m
Ancho de apertura de ranura, Wss	0,00288	m
Ancho del diente saliente, Wtts	0,00571	m
Ancho del diente, Wts	0,0045	m
Ancho de ranura, Wsl	0,0056	m
Paso de ranura, ts	0,0086	m
Profundidad de ranura, Dss	0,0200	m
Área de ranura, as	109,9	mm ²

El volumen del diente del estator fue determinado a partir de las dimensiones proporcionadas en la Tabla 3. Esta tabla describe las dimensiones físicas de las partes del estator para una máquina de inducción de 2 polos con 54 ranuras. En particular, se utilizaron los siguientes parámetros descritos por las ecuaciones (5 y 6):

$$A = W_{ts} \cdot D_{ss} \quad (5)$$

$$V = A \cdot l_{ax} \cdot k_p \quad (6)$$

Es importante destacar que para estos cálculos se supuso que el diente es de sección rectangular constante. Además, se consideró la densidad del material M210-27A igual a $\rho=7600 \text{ kg/m}^3$ y por tanto la masa del diente se calcula como se muestra en la ecuación (7):

$$m = \rho \cdot V \quad (7)$$

Esta masa se utiliza como factor de escala para convertir las pérdidas específicas (W/kg) obtenidas del modelo en pérdidas absolutas por diente (W), como se muestra en las ecuaciones (8 y 9):

$$P_{h,abs} = P_h \cdot m \quad (8)$$

$$P_{e,abs} = P_e \cdot m \quad (9)$$

Cabe destacar que este valor corresponde a un solo diente; para evaluar el estator completo debe multiplicarse por el número total de dientes.

Implementación computacional

Para facilitar la evaluación interactiva de las pérdidas bajo distintas condiciones operativas, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) en el entorno MATLAB. Esta herramienta permite al usuario ingresar los siguientes parámetros:

- Frecuencia de operación [Hz]
- Densidad de flujo magnético [T]
- Largo axial y del diente [mm]
- Densidad del material [kg/m^3]
- Factor de apilamiento
- Coeficientes k_h y k_e

Al presionar el botón de cálculo, la aplicación:

1. Convierte todas las unidades al sistema internacional (SI).
2. Calcula el volumen y la masa efectiva.
3. Evalúa las pérdidas por tipo y la pérdida total.
4. Muestra los resultados en una tabla dinámica.
5. Grafica comparativamente las pérdidas totales contra frecuencia para distintos valores de B.
6. Permite exportar automáticamente los resultados como un archivo PDF, que incluye:
 - Tabla con resultados numéricos.
 - Gráfica comparativa.
 - Título personalizado del análisis.

En la figura 3, se muestra la interfaz gráfica de la GUI desarrollada para su primera versión

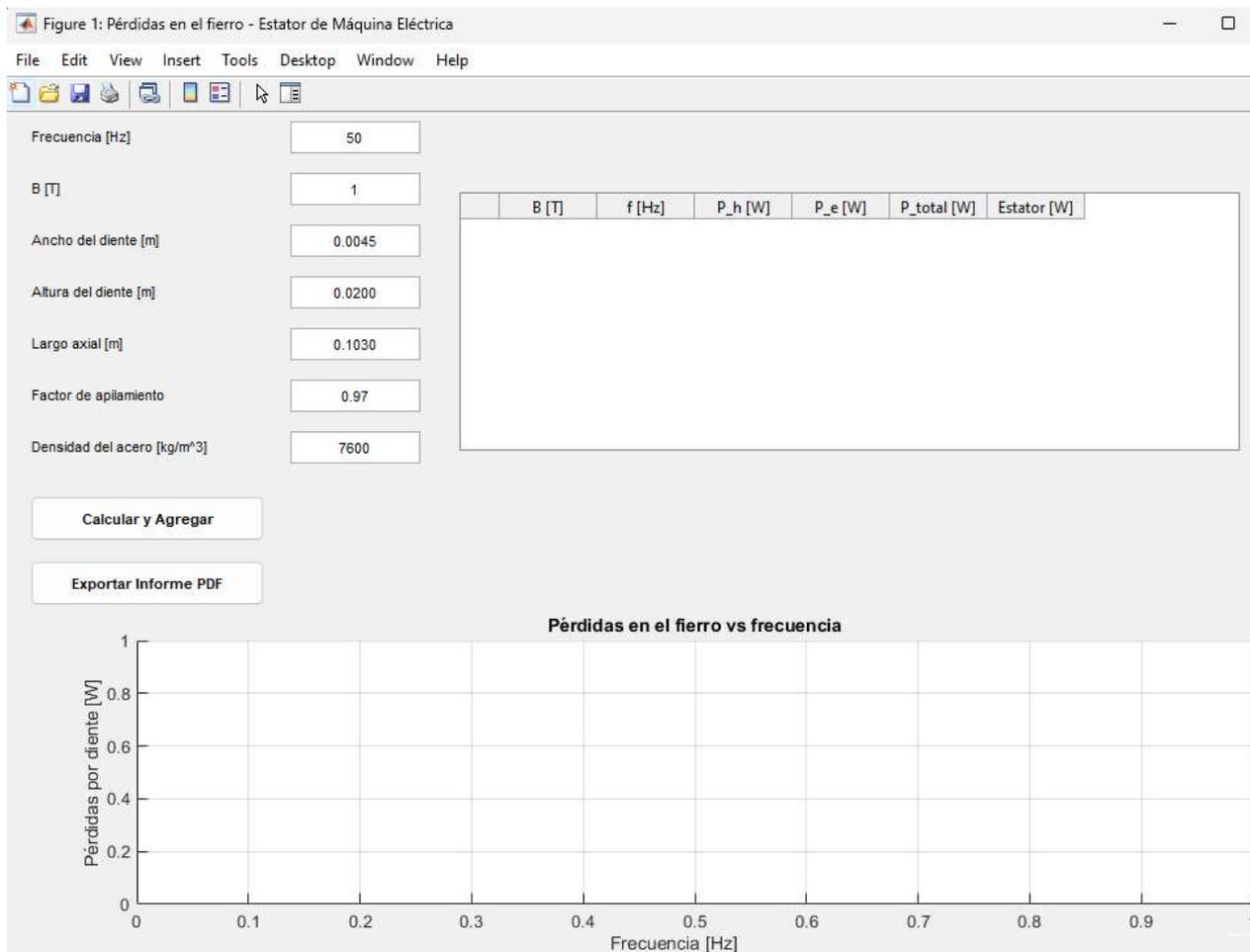


Fig. 3. Interfaz gráfica de la GUI pérdidas en el hierro – Estator de una maquina eléctrica versión 1

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las pérdidas en el hierro en función de la densidad de flujo y la frecuencia

En los resultados de la simulación a través de la interfaz, que se muestran en la figura 4 y 5, se observa el efecto combinado de la frecuencia y la densidad de flujo magnético sobre las pérdidas en el hierro. Al comparar los resultados para $B=0,6$ T, $0,8$ T y $1,0$ T, se observa que el aumento de B tiene un efecto cuadrático en la magnitud de las pérdidas.

	B [T]	f [Hz]	P _h [W]	P _e [W]	P _{total} [W]	Estator [W]
1	0.6000	50	0.0291	0.0017	0.0308	1.6638
2	0.8000	100	0.1034	0.0123	0.1157	6.2482
3	1	400	0.6462	0.3079	0.9541	51.5227

Fig. 4. Resultados de las pérdidas obtenida con la GUI



Fig. 5. Pérdidas en el hierro versus frecuencia para distintos valores de B

Además, a frecuencia menores de 100 Hz, las pérdidas por histéresis representan entre el 89% y 95% del total de pérdidas en el hierro, como se observa en la figura 4, para $B = 0,6 \text{ T}$ a 50 Hz $P_h = 0,0291 \text{ W}$ y $B = 1,0 \text{ T}$ a 100 Hz $P_h = 0,1034 \text{ W}$. Este comportamiento es consistente con el modelo planteado (ecuación 1) en el cual se aprecia que las pérdidas por histéresis son proporcionales a B^2 en este caso, lo que confirma la relación de dependencia cuadrática de las pérdidas por histéresis con la densidad de flujo magnético. En este rango, las pérdidas por corrientes parásitas son menores que el 15%, dado su carácter proporcional cuadrático con la frecuencia. A medida que la frecuencia supera los 100 Hz, estas pérdidas aumentan, para contribuir con un 11% a las pérdidas totales (P_{total}), obsérvese en la figura 4 que para $B = 0,8 \text{ T}$ a 100 Hz $P_e = 0,0123 \text{ W}$ y aumentan hasta un 32% para $B = 1,0 \text{ T}$ a 400 Hz ($P_e = 0,3079 \text{ W}$). No obstante, las por histéresis siguen siendo significativa, un 68% del total en este último caso.

Por otro lado, para frecuencias mayores que 400 Hz, se evidencia un aumento de las pérdidas totales las cuales son atribuibles por la combinación de la dependencia cuadrática de la frecuencia y la inducción magnética. Este resultado corrobora la necesidad de optimizar el diseño magnético mediante el empleo de láminas delgadas y/o materiales mejorados magnéticamente. Por otra parte, a frecuencias menores que 100 Hz, al disminuir B disminuye las pérdidas sin comprometer significativamente el rendimiento. Por otra parte, se debe señalar que el cálculo de pérdidas magnéticas se implementó mediante un enfoque por diente, basado en la geometría real del estator especificada en la figura 2 y tabla 3. Para determinar las pérdidas totales en el estator los resultados por diente se extrapolaron considerando los 54 dientes del diseño, como se muestra en la ecuación (10):

$$P_{estator} = 54 \cdot P_{diente} \quad (10)$$

A partir de los parámetros geométricos proporcionados en la tabla 2, ancho del diente $W_{ts}=4,5 \text{ mm}$, altura del diente $D_{ss}=20 \text{ mm}$ y largo axial del estator $l_{ax}=103 \text{ mm}$, la GUI obtiene el área transversal del diente de $A = 90 \text{ mm}^2$. Considerando un factor de apilamiento de $k_p=0,97$, el volumen útil del diente es igual a $V=8990 \text{ mm}^3$, excluyendo el espacio ocupado por aislamiento y ventilación. Multiplicando este volumen por la densidad del acero M210-27A $\rho=7600 \text{ kg/m}^3$, se determina una masa por diente de $m=0,0683 \text{ kg}$. Este valor fue utilizado como factor de escala para convertir las pérdidas específicas (W/kg) obtenidas del modelo en pérdidas absolutas (W), tanto a nivel de diente como de estator completo.

CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el desarrollo de una herramienta computacional basada en MATLAB para el análisis y estimación de pérdidas en el hierro en el diseño de máquinas eléctricas, específicamente en el diente del estator. A partir de la formulación de un modelo simplificado de dos términos, que considera tanto las pérdidas por histéresis como las pérdidas por corrientes parásitas, se logró integrar una interfaz gráfica interactiva que permite calcular pérdidas específicas y absolutas en función de parámetros geométricos, materiales y operacionales. Los principales aportes pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Validación del modelo de pérdidas: Se ajustaron los coeficientes k_h y k_e utilizando datos del fabricante para el material M210-27A, obteniendo una buena correspondencia con el comportamiento esperado en función de la frecuencia y la densidad de flujo magnético. La regresión mostró que las pérdidas por corrientes parásitas se vuelven dominantes a altas frecuencias.
2. Flexibilidad y adaptabilidad de la herramienta: La GUI permite al usuario ingresar libremente parámetros geométricos del diente, propiedades del material y condiciones de operación. Esto facilita su aplicación a distintas configuraciones de máquinas eléctricas sin necesidad de modificar el código base.
3. Análisis visual y comparativo: El entorno gráfico implementado muestra curvas acumuladas de pérdidas por diente para distintos valores de B , permitiendo visualizar claramente la evolución de las pérdidas con la frecuencia y la influencia de la densidad de flujo. La tabla de resultados se actualiza de forma dinámica y se integra automáticamente en el informe final.
4. Exportación de resultados técnicos: La herramienta permite generar informes en formato PDF que incluyen la tabla de datos calculados y los gráficos correspondientes. Esto brinda trazabilidad y facilidad de documentación para fines académicos, docentes o de validación preliminar en diseño industrial.
5. Aplicabilidad práctica y docente: La herramienta es útil tanto para el análisis técnico en etapas tempranas de diseño de máquinas eléctricas, como para fines formativos en asignaturas relacionadas con máquinas, materiales magnéticos o eficiencia energética.

REFERENCIAS

- [1] Fitzgerald, A., *et al.* "Electric Machinery". MC GRAW HILL EDUCATION (UK), 7th edition. United Kingdom. 2013. ISBN: 978-1-259-25466-6. Disponible en: <https://goo.su/wAOi>
- [2] Gundabattini, E., *et al.* "A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines". Ain Shams Engineering Journal. 2021, vol. 12, n. 1, p. 495-505. ISSN 2090-4479. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.014>
- [3] Yuan, Y., *et al.* "Analysis of Proximity Loss of Electrical Machines Using Mesh-Based Magnetic Equivalent Circuit". IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2024, vol. 10, n. 4, p. 9467 - 9477. ISSN 1558-0016. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3383845>

- [4] Staton, D., *et al.* "Computationally Efficient Strand Eddy Current Loss Calculation in Electric Machines". IEEE Transactions on Industry Applications. 2019, vol. 55, n. 4, p. 3479 - 3489. ISSN 1939-9367. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2903406>
- [5] Gerada, C., y Golovanov, D. "Analytical Methodology for Modelling of Circulating Current Loss in Synchronous Electrical Machines With Permanent Magnets". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2022, vol. 37, n. 1, p. 220-231. ISSN 0885-8969. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tec.2021.3091811>
- [6] Kocsis, B., *et al.* "Iron Loss Calculation Methods for Numerical Analysis of 3D-Printed Rotating Machines: A Review". Energies. 2023, vol. 16, n. 18. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en16186547>
- [7] Ionel, D., *et al.* "On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines". IEEE Transactions on Industry Applications. 2025, vol. 42, n. 3, p. 658 - 667. ISSN 1939-9367. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.872941>
- [8] McGilp, M., *et al.* "Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel". IEEE Transactions on Industry Applications. 2006, vol. 43, n. 6, p. 1554-1564. ISSN 1939-9367. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIA.2007.908159>
- [9] Fiorillo, F., *et al.* "An improved estimation of iron losses in rotating electrical machines". IEEE Transactions on Magnetics. 1991, vol. 27, n. 6, p. 5007 - 5009. ISSN 0018-9464. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/20.278722>
- [10] Li, L., *et al.* "A Computationally Efficient Semi-Analytical Method for Circulating Current Loss of High Speed Permanent Magnet Machines". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2024, vol. 39, n. 1, p. 675 - 687. ISSN 0885-8969. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3312648>
- [11] Hoole, J., *et al.* "Designing for Conductor Lay and AC Loss Variability in Multistrand Stator Windings". IEEE Transactions on Industry Applications. 2023, vol. 59, n. 2, p. 1394-1404. ISSN 1939-9367. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3202762>
- [12] Vahaj, A., y Tahanian, H. "Total Stator Copper Loss Calculation in large Synchronous Generators with Hybrid Modeling". 4th International Conference on Electrical Machines and Drives, Iran. 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICEMD64575.2024.10963433>
- [13] Zhang, L., y Wu, R. "Stator Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for New Energy Vehicles". 5th International Conference on Smart Grid and Energy Engineering, Beijing, China. 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/SGEE64306.2024.10865951>
- [14] Fang, J., *et al.* "Loss Calculation and Thermal Analysis of Rotors Supported by Active Magnetic Bearings for High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016, vol. 63, n. 4, p. 2027-2035. ISSN 1939-9367. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2500188>
- [15] Yuan, Y., *et al.* "Fast Calculation of Proximity Loss Induced by Harmonic Current in Electrical Machines Using Magnetic Equivalent Circuit". 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Fukuoka, Japan. 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.23919/ICEMS60997.2024.10920914>
- [16] Svetlizky, D., *et al.* "Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials". Materials Science & Engineering A. 2022, vol. 840. ISSN 1873-4936. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142967>
- [17] Rossi, D., *et al.* "Investigation of the build orientation effect on magnetic properties and Barkhausen Noise of additively manufactured maraging steel 300". Additive Manufacturing. 2021, vol. 38. ISSN 2214-7810. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101827>
- [18] Tiismus, H., *et al.* "Hysteresis Measurements and Numerical Losses Segregation of Additively Manufactured Silicon Steel for 3D Printing Electrical Machines". Applied Sciences. 2020, vol. 10, n. 18. ISSN 2076-3417. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app10186515>
- [19] Tiismus, H., *et al.* "State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines". Additive Manufacturing. 2022, vol. 55. ISSN 2214-7810. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102778>
- [20] Rens, J., *et al.* "Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses". World Electric Vehicle Journal. 2020, vol. 11, n. 24. ISSN 2032-6653. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>
- [21] Tsuchida, Y., y Yano, T. "Relationship Between Temperature Control and Iron Loss Reduction by Secondary Current Heating Method". IEEE Transactions on Magnetics. 2024, vol. 60, n. 9. ISSN 0018-9464. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2024.3422817>
- [22] Weibo, Z., *et al.* "A Core Loss Calculation Method for DC/DC Power Converters Based on Sinusoidal Losses". IEEE Transactions on Power Electronics. 2023, vol. 38, n. 1, p. 692-702. ISSN 0885-8993. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3199041>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Maykop Pérez Martínez: <https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

Diseño y programación de software empleados en la investigación. Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Josnier Ramos Guardarrama: <https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

Diseño y programación de software empleados en la investigación. Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.