

Análisis del factor de Carter en sistemas diente-ranura mediante simulación FEMM y evaluación numérica con MATLAB

Analysis of the Carter factor in tooth-slot systems using FEMM simulation and numerical evaluation with MATLAB

Maykop Pérez Martínez^{1,*}, 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: 28 de febrero de 2025

Aprobado: 15 de mayo de 2025

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



RESUMEN/ABSTRACT

El presente estudio aborda el análisis del factor de Carter en sistemas magnéticos tipo diente-ranura, mediante un enfoque combinado de simulación numérica con el software FEMM y análisis computacional en MATLAB. Se realizaron dos tipos de comparaciones sistemáticas: en la primera, se mantuvo constante el ancho del diente, mientras que en la segunda se fijó el ancho del entrehierro y se modificó el ancho del diente. En ambos casos, se evaluó el factor de Carter utilizando tanto métodos analíticos como simulaciones numéricas. Los resultados fueron procesados y visualizados en MATLAB, permitiendo un análisis detallado de las diferencias entre ambos enfoques. Las gráficas generadas reflejan el comportamiento del flujo magnético y su sensibilidad frente a las variaciones geométricas, proporcionando así una base sólida para optimizar el diseño de máquinas eléctricas. El estudio demuestra la utilidad de integrar herramientas numéricas y analíticas para incrementar la precisión del modelado magnético.

Palabras clave: Factor de Carter, FEMM, circuito magnético, diseño de máquinas eléctricas, entrehierro, simulación numérica.

The present study addresses the analysis of the Carter factor in tooth-slot type magnetic systems, using a combined approach of numerical simulation via FEMM software and computational analysis with MATLAB. Two types of systematic comparisons were carried out: in the first, the tooth width was kept constant while the air gap width was varied; in the second, the air gap width was fixed and the tooth width was modified. In both cases, the Carter factor was evaluated using both analytical methods and numerical simulations. The results were processed and visualized in MATLAB, enabling a detailed analysis of the differences between the two approaches. The generated plots reflect the behavior of the magnetic flux and its sensitivity to geometric variations, thus providing a solid foundation for optimizing the design of electrical machines. The study demonstrates the usefulness of integrating numerical and analytical tools to improve the accuracy of magnetic modeling.

Keywords: Carter factor, FEMM, magnetic circuit, electrical machine design, air gap, numerical simulation.

INTRODUCCIÓN

En pleno siglo XXI, el avance tecnológico ha impulsado el uso intensivo de disciplinas como la electrónica, la mecatrónica, el control aplicado y la inteligencia artificial, las cuales se han convertido en pilares fundamentales de la industria moderna. Dentro de este contexto, el modelamiento del comportamiento de las máquinas eléctricas adquiere una relevancia crítica, ya que estas son componentes esenciales en sectores industriales, de automatización, robótica y domótica, entre otros.

Cómo citar este artículo:

Maykop Pérez Martínez y Josnier Ramos Guardarrama. Análisis del factor de Carter en sistemas diente-ranura mediante simulación FEMM y evaluación numérica con MATLAB. Ingeniería Energética. Vol. 46(2025): publicación continua. ISSN 1815-5901.

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

Las máquinas eléctricas, presentes en diversas versiones y aplicaciones, son esenciales para el funcionamiento de sistemas automatizados, desde líneas de producción industrial hasta sistemas de gestión energética en edificios inteligentes. Dada su importancia, resulta indispensable comprender a fondo sus modelos de comportamiento para optimizar su diseño, control y eficiencia. Por ello, el estudio de los parámetros que caracterizan estos dispositivos—como resistencias, inductancias, constantes de tiempo y curvas de rendimiento se vuelve una herramienta fundamental para los ingenieros de perfil eléctrico [1, 2]. Además, con la creciente demanda de soluciones energéticas sostenibles y sistemas más eficientes, el análisis preciso de las máquinas eléctricas permite no solo mejorar su desempeño, sino también integrarlas en entornos de Industria 4.0, donde la conectividad y el big data juegan un papel determinante. En este sentido, contar con modelos matemáticos y simulaciones confiables facilita la toma de decisiones en el diseño de sistemas complejos, reduciendo costos y tiempos de implementación [3].

En ese sentido, un aspecto necesario a tener en cuenta en el diseño de estas máquinas es la configuración del circuito magnético, el cual determina el rendimiento, la eficiencia y la confiabilidad del dispositivo [4]. Dentro del circuito magnético, en particular, el entrehierro que se define como el espacio entre el estator y el rotor, desempeña un papel determinante en el valor del campo magnético de trabajo. Este campo atraviesa el entrehierro para establecer el acoplamiento electromagnético que da lugar al par motor. Debido a que el entrehierro suele estar compuesto por aire o materiales no magnéticos con baja permeabilidad, su presencia, aunque físicamente pequeña introduce una reluctancia significativa en el circuito magnético, afectando directamente el flujo magnético y, por lo tanto, la densidad de flujo útil y por ende en la eficiencia general de la máquina [5, 6].

Es por ello que, en el diseño de las máquinas eléctricas rotativas, uno de los aspectos más significativos a tener en cuenta es modelar con precisión el comportamiento del campo magnético en el entrehierro[7]. En la práctica, las superficies del estator y el rotor no son lisas; presentan ranuras y dientes diseñados para alojar los devanados y mejorar la distribución del flujo magnético. Sin embargo, esta geometría ranurada provoca una distribución no uniforme del campo magnético en el entrehierro, generando concentraciones y dispersión de líneas de flujo. Como resultado, el entrehierro efectivo—el que realmente influye en el comportamiento magnético de la máquina—difiere del entrehierro físico [8, 9].

Para corregir este efecto, se introduce el factor de Carter, su objetivo es modificar el entrehierro físico por un entrehierro efectivo que represente de forma real la trayectoria del flujo. Por lo que es una herramienta analítica que ajusta la longitud del entrehierro para reflejar los efectos de las ranuras. Este factor permite una estimación más precisa de la reluctancia total del circuito magnético. Matemáticamente, el factor de Carter se expresa como la razón entre la densidad de flujo máxima y la densidad de flujo promedio en el entrehierro. Su valor depende de la geometría de las ranuras y dientes, así como de la longitud del entrehierro [10, 11]. El valor del factor de Carter es mayor que 1 y depende de la geometría de las ranuras y dientes, así como de la proporción entre el paso polar y el ancho del diente. Su uso es fundamental para mejorar la estimación de la reluctancia y, por tanto, para diseñar sistemas más eficientes y con menor pérdida por dispersión magnética [12].

Por otro lado, es importante destacar que, el impacto del factor de Carter en el diseño es fundamentalmente importante en máquinas de alta precisión o alta densidad de potencia, donde incluso pequeñas inexactitudes en el modelado magnético pueden afectar significativamente el comportamiento eléctrico y térmico del dispositivo [13, 14]. Ahora bien, los modelos analíticos clásicos del factor de Carter se basan en simplificaciones geométricas para permitir su cálculo mediante fórmulas cerradas. Un modelo ampliamente utilizado considera el efecto de las ranuras en una máquina idealmente simétrica, suponiendo flujo unidimensional. Estos modelos analíticos permiten realizar estimaciones rápidas y son especialmente útiles en la fase inicial de diseño. Sin embargo, su precisión puede verse comprometida por la simplificación de las condiciones de borde, la uniformidad del material y la bidimensionalidad del análisis. En máquinas reales, donde las ranuras no son idénticas o donde los materiales presentan saturación no lineal, estas aproximaciones resultan insuficientes [15, 16].

No obstante, si bien el uso del factor de Carter ajusta matemáticamente la longitud del entrehierro para compensar los efectos de la ranuración, su implementación analítica puede volverse limitada cuando se requiere modelar configuraciones geométricas más complejas o condiciones de operación no ideales. En este contexto, surge el método del entrehierro equivalente como una extensión conceptual y práctica que busca representar el efecto global de la distorsión del campo magnético mediante un entrehierro uniforme ficticio, cuya longitud se ajusta para igualar la densidad de flujo promedio que se obtendría en una máquina ideal. Esta técnica no reemplaza al factor de Carter, sino que lo complementa, ya que ambos métodos tienen como objetivo mejorar la precisión del cálculo de la reluctancia total del sistema a partir de representaciones más realistas del comportamiento magnético en el entrehierro.

Es importante señalar que, a pesar de su utilidad, el cálculo analítico del factor de Carter se basa en suposiciones simplificadas que pueden no reflejar con precisión las configuraciones reales de diseño. Por ello, se recurre a métodos numéricos como el análisis por elementos finitos (FEM), que permite modelar con gran detalle los efectos geométricos y materiales en sistemas magnéticos. En este sentido para este estudio, se emplea el software FEMM (Finite Element Method Magnetics), una herramienta de código abierto que resuelve problemas de campos magnéticos bidimensionales en geometrías arbitrarias. El software FEMM en su versión libre ofrece ventajas importantes, como la capacidad de modelar distribuciones espaciales del flujo magnético y calcular la inducción magnética con alta resolución. No obstante, presenta también limitaciones significativas: al ser un software libre con enfoque didáctico, no calcula directamente el factor de Carter ni proporciona herramientas específicas para determinar la reluctancia efectiva a partir de variaciones locales del campo en el entrehierro. Esta carencia limita su utilidad en el análisis detallado de los efectos de las ranuras en el comportamiento magnético de la máquina [17, 18].

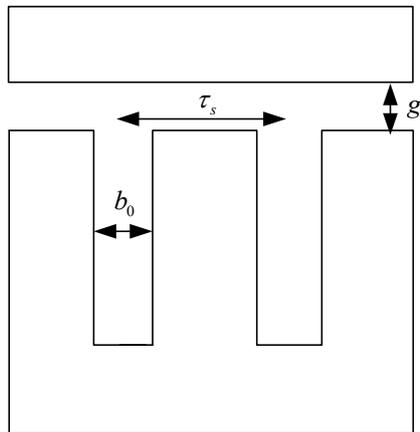
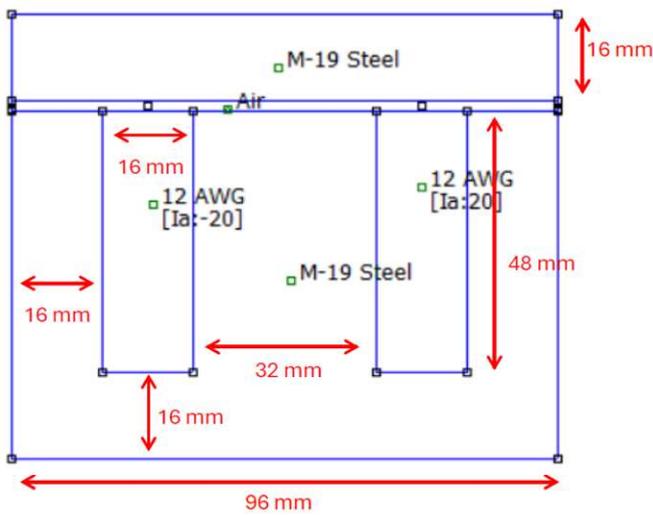
Ante esta limitación, se propone el desarrollo de una herramienta complementaria en MATLAB, orientada a procesar los datos obtenidos mediante simulaciones FEMM, la cual permite analizar estadísticamente los resultados, calcular promedios y visualizar gráficamente el comportamiento del campo magnético. Esta combinación de herramientas numéricas posibilita una validación rigurosa del modelo analítico, y permite evaluar con mayor claridad el impacto de las variables geométricas en el rendimiento magnético. De esta forma, se busca no solo validar los modelos clásicos, sino también enriquecer el proceso de diseño de máquinas eléctricas mediante herramientas accesibles y precisas.

En correspondencia, el estudio contempla dos escenarios experimentales:

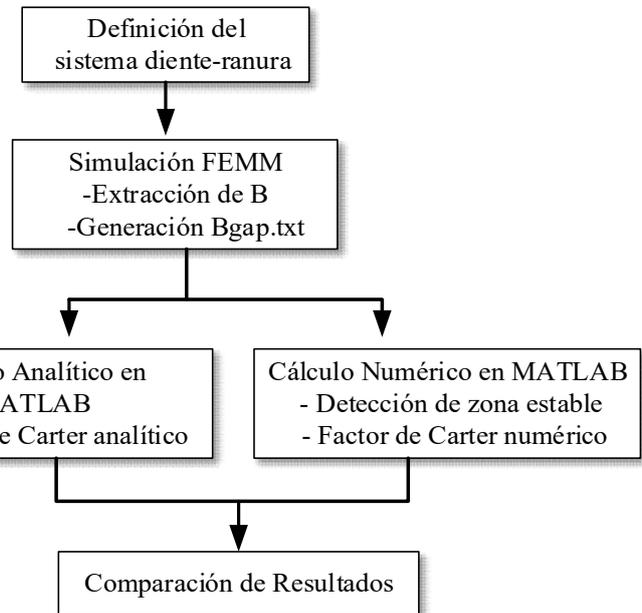
- En el primero, se mantiene constante el ancho de ranura, mientras se varía la longitud del entrehierro.
- En el segundo, se mantiene constante la longitud del entrehierro y se modifica el ancho de ranura.

METODOLOGÍA

El presente estudio se centra en el análisis del factor de Carter, de forma analítica y numérica, en un sistema diente-ranura típico de máquinas eléctricas, como el que se muestra en la figura 1 a). Para ello, se ha diseñado una metodología en tres etapas principales: simulación numérica, cálculo analítico y análisis computacional complementario, a partir del desarrollo de una aplicación en MATLAB. En la figura 1 b), se muestra gráficamente el diagrama de flujo del proceso metodológico, desde las etapas de definición geométrica hasta la comparación de resultados.



a)



b)

Fig. 1. a) Sistema diente-ranura tomado como ejemplo; b) Diagrama de flujo del proceso metodológico

Configuración del sistema y parámetros geométricos

El sistema analizado corresponde a una sección representativa del entrehierro de una máquina rotativa, que incluye dientes y ranuras. Para el análisis de comparativo de los resultados se consideran como ya se mencionó los siguientes escenarios experimentales:

- Se mantiene constante el ancho del diente, mientras se varía la longitud del entrehierro: se considerará que la longitud del entrehierro tomará valores de 1 mm, 2 mm y 3 mm, mientras que el ancho de ranura se mantendrá constante en 16 mm.
- Se mantiene constante la longitud del entrehierro, y se modifica el ancho de ranura: se considerará que la longitud del entrehierro tiene un valor de 1 mm, mientras que el ancho de ranura tomará valores de 17 mm y 20mm.

Es importante señalar que en ambos escenarios el paso de ranura se fijó en 48 mm.

Simulación numérica mediante FEMM

Se utilizó el software FEMM para realizar simulaciones bidimensionales del campo magnético en el entrehierro. Las simulaciones se ejecutaron en condiciones estacionarias, modelando la región diente-ranura con materiales ideales y condiciones de frontera simétricas. En cada caso, se exportó la distribución del vector inducción magnética a lo largo del entrehierro, generando un archivo de datos el que sirve base para el análisis en la aplicación desarrollada en MATLAB.

Cálculo analítico del factor de Carter

Para el cálculo analítico del factor de Carter, se utilizó la ecuación (1), basada en geometría diente-ranura como la mostrada en la figura 1, de acuerdo con lo expuesto por las referencias [19, 20]:

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - b_0 + \frac{4g}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi b_0}{4g} \right]} \quad (1)$$

Donde:

b_0 : Ancho de ranura

τ_s : Paso de ranura

g : Largo del entrehierro

Herramienta computacional en MATLAB

Debido a las limitaciones del software FEMM para calcular directamente el factor de Carter, tanto analítica como numéricamente, se desarrolló una herramienta complementaria en MATLAB con interfaz gráfica de usuario (GUI). Esta aplicación fue diseñada para automatizar el proceso de análisis, facilitar la interpretación de los resultados de FEMM y permitir la comparación cuantitativa del factor de Carter analítico y numérico bajo las mismas condiciones geométricas. La aplicación permite al usuario ingresar los parámetros geométricos esenciales del sistema: ancho del diente, paso de ranura y longitud del entrehierro. A partir de estos datos, se calcula automáticamente el factor de Carter analítico utilizando la ecuación (1). Adicionalmente, el programa solicita al usuario cargar el archivo de salida generado por FEMM, el cual contiene los valores de la inducción magnética a lo largo del entrehierro en una trayectoria definida sobre la geometría simulada. Estos datos permiten realizar el análisis numérico del factor de Carter mediante la estimación del valor máximo y promedio del vector inducción magnética, a partir de la ecuación (2):

$$k_c = \frac{B_{m\acute{a}x}}{B_{medio}} \quad (2)$$

Para mejorar la precisión del análisis, se implementó un algoritmo que identifica automáticamente la zona estable dentro de la distribución de la inducción magnética generada por el software FEMM, para de esta forma asegurar que el valor máximo de la inducción magnética calculado represente de forma confiable el efecto exacto de concentración de flujo magnético inducido por la geometría ranurada. El programa finalmente presenta:

- Los valores numéricos del factor de Carter analítico y numérico.
- El porcentaje de diferencia relativa entre ambos.
- Una visualización gráfica de la distribución de la inducción magnética, incluyendo la línea de valor promedio, y la zona estable destacada visualmente.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Con el objetivo de exponer los efectos geométricos del sistema diente-ranura en el comportamiento del campo magnético en el entrehierro, se analizaron los resultados a partir de dos enfoques complementarios: el cálculo analítico del factor de Carter mediante la ecuación (1) y su estimación numérica basada en los datos simulados con FEMM y procesados mediante la herramienta desarrollada en MATLAB. Los resultados se organizan en función de los dos escenarios planteados:

1. **Escenario 1: Variación del largo del entrehierro, manteniendo constante el ancho de ranura $b_0=16$ mm**
Se consideraron tres configuraciones con valores de entrehierro de 1 mm, 2 mm y 3 mm. En todos los casos, el paso de ranura se mantuvo en 48mm. El objetivo fue evaluar cómo una mayor distancia entre estator y rotor afecta la uniformidad del campo magnético y, por consiguiente, la estimación del factor de Carter.
2. **Escenario 2: Variación del ancho de ranura b_0 , manteniendo constante la longitud del entrehierro $g=1$ mm**
Se utilizaron configuraciones con $b_0=17$ mm y $b_0=20$ mm, conservando nuevamente un paso de ranura de 48mm. Este segundo escenario permitió estudiar cómo la proporción ranura-diente incide en la distorsión del flujo magnético y en la diferencia entre el modelo analítico y el numérico.

Escenario 1: Variación del largo del entrehierro g , manteniendo constante el ancho de ranura $b_0=16$ mm

- Entrehierro igual a 1 mm

En la figura 2 a), se muestra el modelo diente-ranura implementado en el software FEMM, en la figura 2 b), se muestra la distribución del campo magnético obtenida mediante simulación FEMM, en la figura 2 c), se muestra la gráfica de distribución del campo magnético en el entrehierro. Ahora bien, en la figura 2 b), se aprecia con claridad una mayor concentración de líneas de flujo magnético en la zona central del diente, lo cual evidencia una acumulación local del campo magnético en esa región. A medida que se avanza hacia los bordes del diente, las líneas de flujo se abren y se distribuyen de forma más difusa, lo que indica una disminución progresiva de la intensidad del campo. Esta distribución asimétrica del flujo genera un campo magnético no uniforme en el entrehierro, en contraste con las suposiciones de uniformidad que se adoptan en modelos ideales. Este análisis es fundamental en el diseño electromagnético, ya que incide directamente en el cálculo de la reluctancia magnética total del sistema. Si se considerara únicamente la longitud física del entrehierro sin tener en cuenta los efectos de concentración y dispersión del flujo, se incurriría en errores significativos: por un lado, una posible sobreestimación del flujo útil; por otro, una subestimación de las pérdidas por dispersión.

Esto se debe a que el camino real que recorre el flujo magnético no sigue la trayectoria geoméricamente más corta. La concentración del flujo en el centro del diente y su dispersión en los bordes y las ranuras modifica la geometría efectiva del campo, provocando una subestimación de la reluctancia si no se aplica una corrección adecuada. Es en este contexto donde adquiere relevancia el uso del factor de Carter, que ajusta el valor del entrehierro físico para representar un entrehierro equivalente, más acorde con el comportamiento magnético real del sistema. Además, la concentración del campo magnético en las zonas dentadas genera regiones de alta densidad de flujo, lo que incrementa localmente la reluctancia al reducir el área efectiva de paso del flujo. Simultáneamente, la dispersión del campo en las regiones de ranura genera trayectorias más largas y de menor intensidad, lo que también aumenta la longitud efectiva del trayecto magnético.

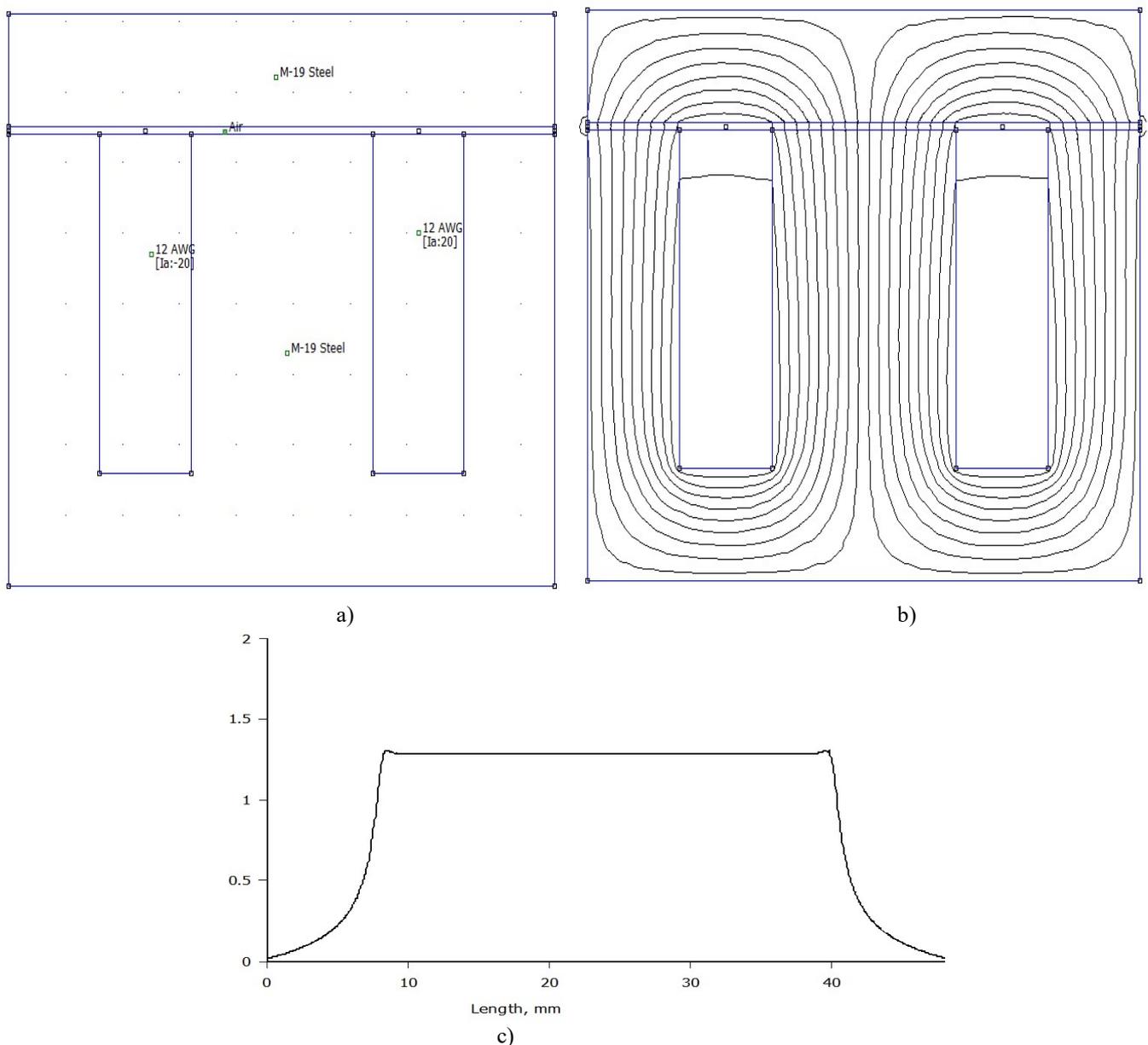


Fig. 2. Modelo diente-ranura implementado en el software FEMM para $g=1$ mm

En la figura 3, se muestra la interfaz gráfica de la aplicación que se desarrolló con el software MATLAB para completar el software FEMM en el análisis del factor de Carter analítico y numérico. Es importante señalar que, a modo de validación al comparar las gráficas de distribución campo magnético en el entrehierro de la figura 2 c), con la proporcionada con la aplicación, curva en azul figura 3, son idénticas lo que corrobora la utilidad de la aplicación propuesta. Por otro lado, la línea roja discontinua muestra el valor promedio campo magnético en el entrehierro y la línea verde horizontal indica la zona estable del campo magnético, es decir, la región donde el campo permanece prácticamente constante (y de valor máximo) sobre el centro del diente, estos valores permitieron calcular el factor de Carter numérico como se indicó en la ecuación.

La forma cuadrada y estable de la curva azul entre posiciones 10 y 40 m refuerza que el campo en el centro del entrehierro es prácticamente uniforme, una condición ideal para que el modelo analítico del factor de Carter sea exacto. La transición suave en los extremos (antes del 10 y después del 40) muestra cómo el flujo se dispersa al entrar o salir del área del diente, confirmando los efectos típicos de borde. Además, dentro de los resultados que muestra la aplicación está el cálculo de factor de Carter analítico y numérico en este caso 1,3590 y 1,3664 respectivamente, para una diferencia de 0,55%. Esta diferencia es muy baja, lo cual indica una alta concordancia entre el modelo analítico y la simulación FEMM, al menos en esta configuración. La diferencia es inferior al 1 %, lo que sugiere que el modelo analítico es suficientemente preciso para representar los efectos geométricos en esta condición específica. Aunque el valor numérico del factor de Carter es ligeramente mayor, esta diferencia se explica por la distribución real del campo, que considera aspectos que el modelo analítico —basado en geometrías simplificadas— no toma en cuenta. Por ejemplo, las asimetrías mínimas en la transición del flujo, las condiciones de borde en FEMM y las limitaciones del modelo logarítmico empleado en la fórmula analítica.

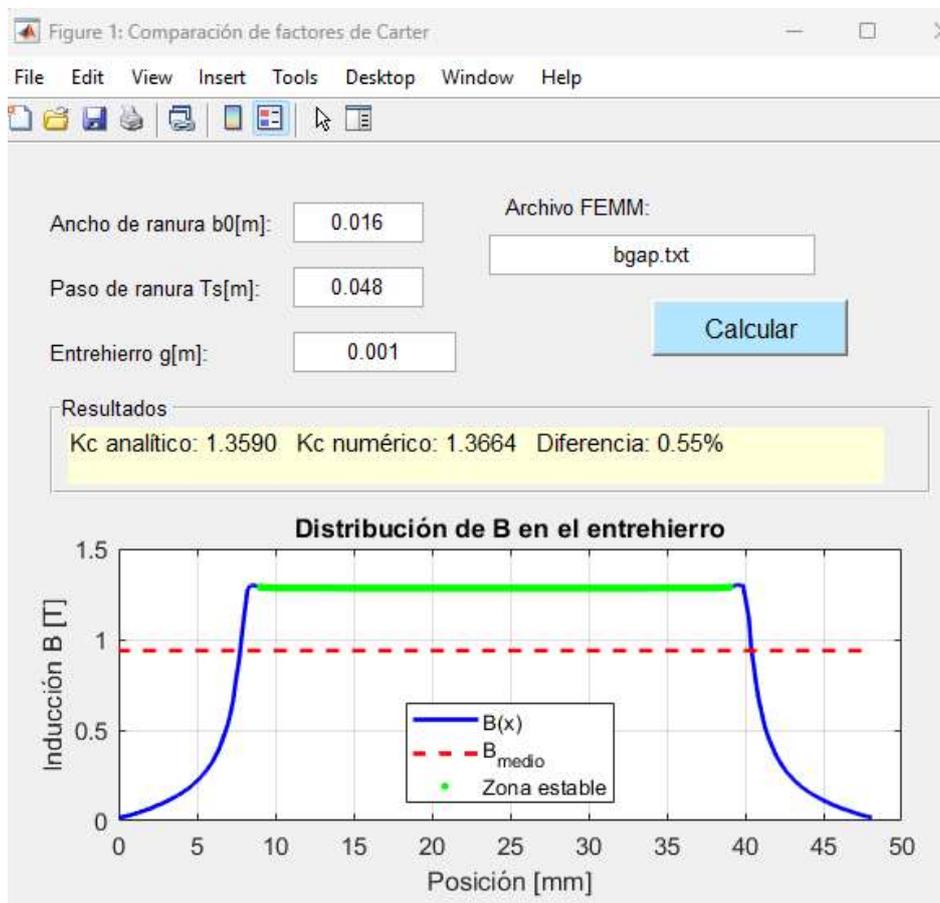
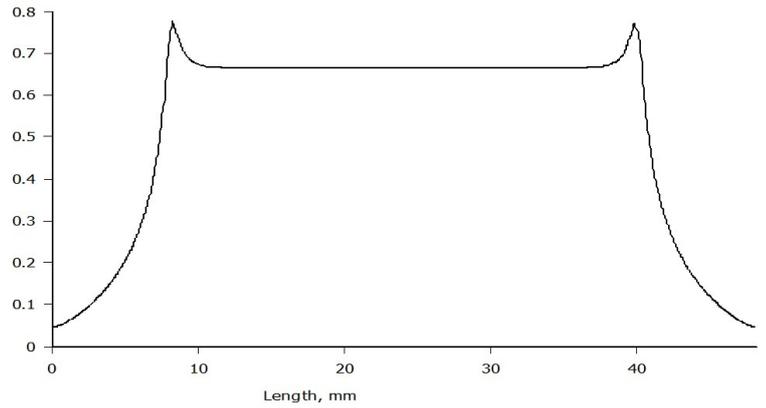
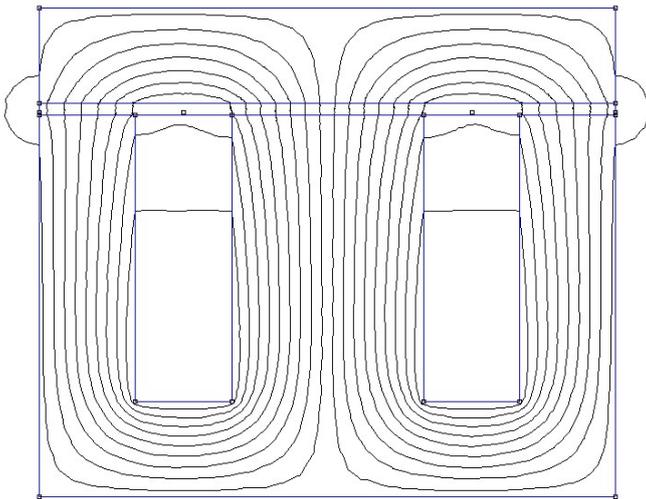


Fig. 3. Resultados de la aplicación para el entrehierro de 1 mm

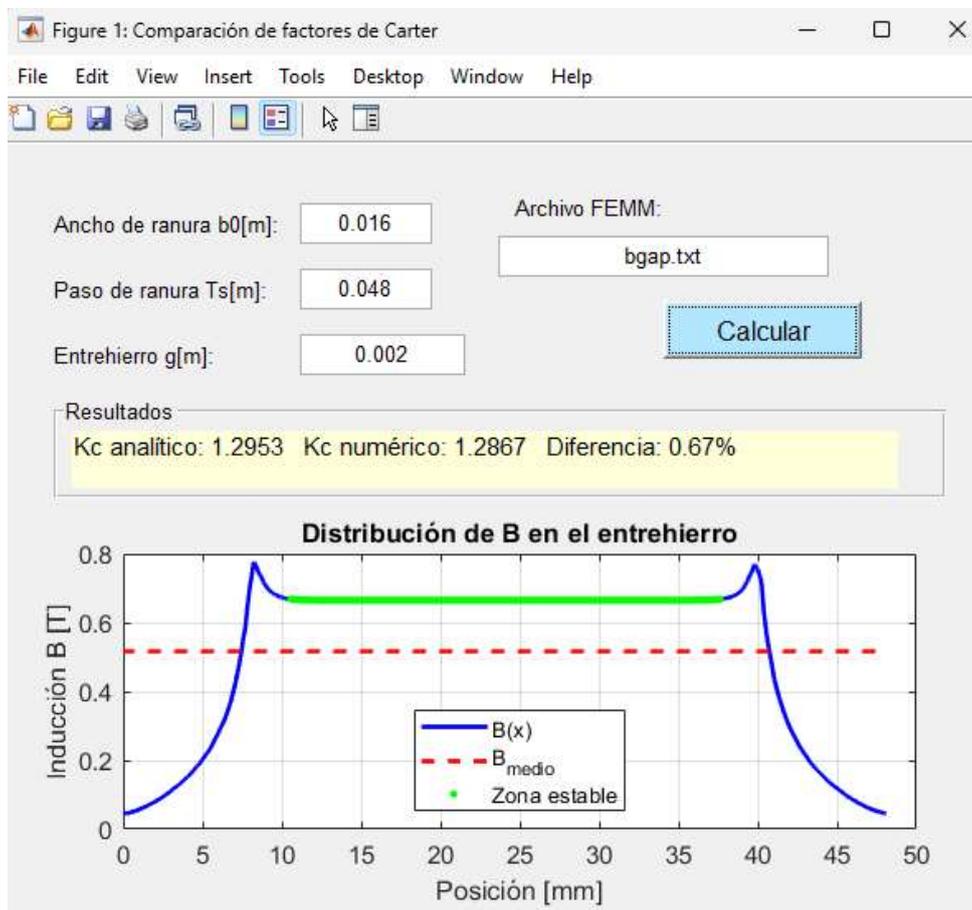
Entrehierro igual a 2 mm

En la figura 4 a), se muestra la distribución del campo magnético obtenida mediante simulación FEMM, en la figura 4 b), se muestra la gráfica de distribución del campo magnético en el entrehierro y en la figura 4 c), se muestran los resultados de la aplicación propuesta. Como puede observar la diferencia relativa entre el factor de Carter analítico y numérico es de 0,67 % lo que indica que a medida que el entrehierro aumenta, el modelo analítico pierde precisión progresivamente al no representar completamente la mayor dispersión del flujo en configuraciones con entrehierros más grandes, aunque sigue dentro de un margen aceptable. Además, puede observarse que el valor máximo del campo magnético disminuye respecto al caso anterior. Esto se debe a que, al aumentar la longitud del entrehierro, la reluctancia también aumenta, lo cual reduce el flujo magnético. Por otro lado, al aumentar el entrehierro, se observa una mayor dispersión del campo magnético en los bordes, lo cual sugiere una disminución del área efectiva de concentración de flujo.



a)

b)

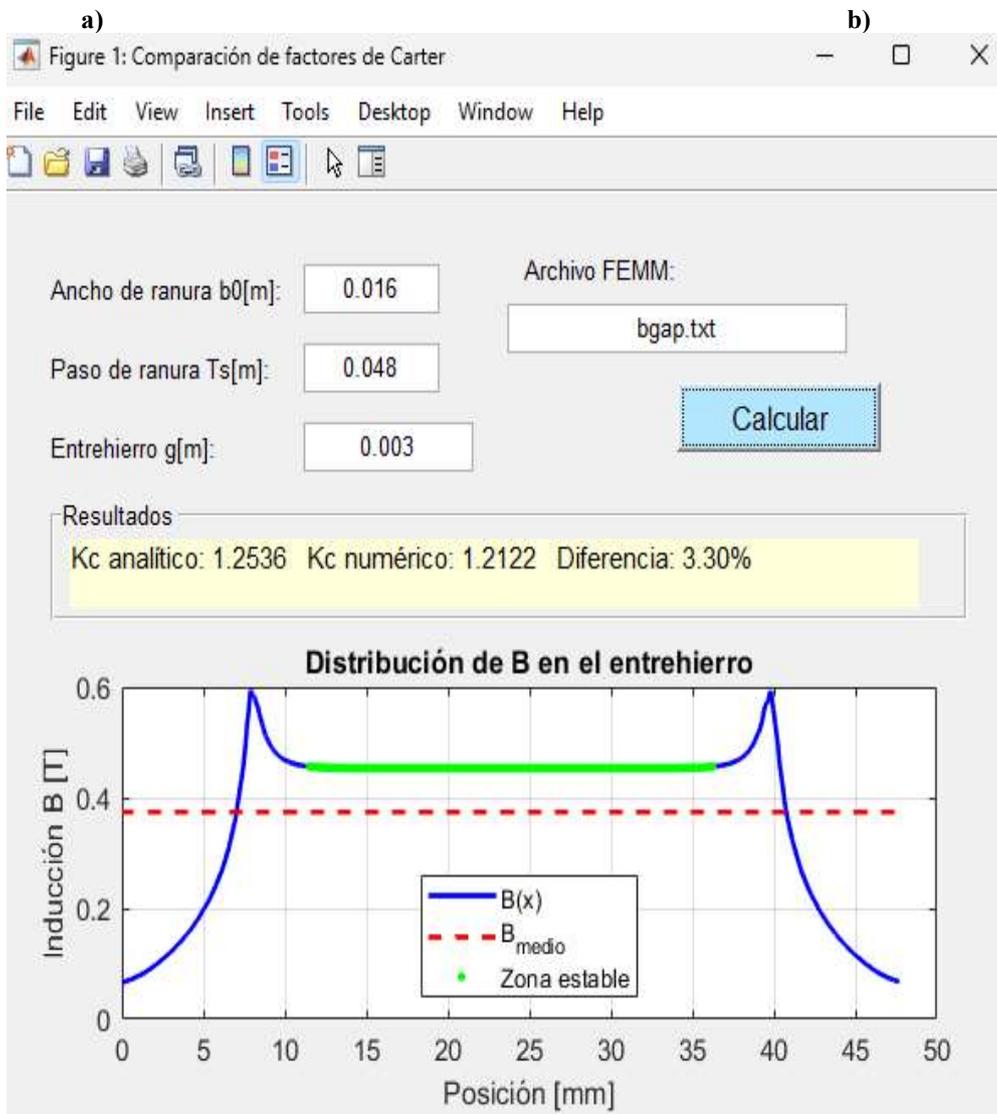
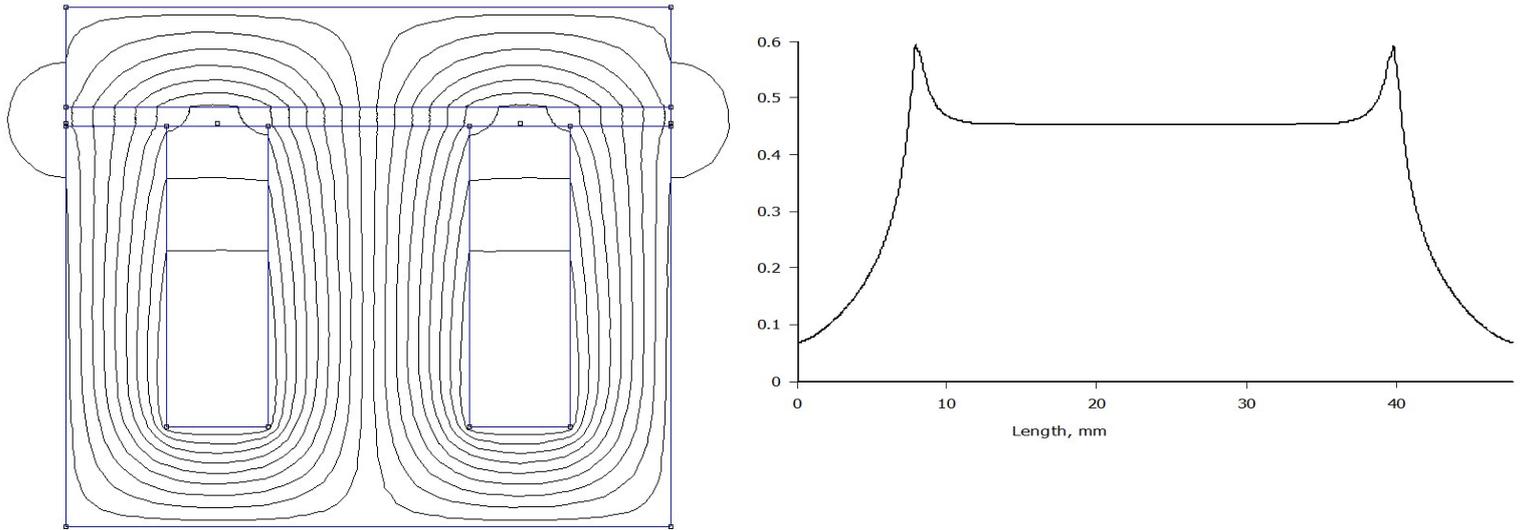


c)

Fig. 4. Resultados para el entrehierro de 2 mm

Entrehierro igual a 3 mm

En la figura 5 a), se muestra la distribución del campo magnético obtenida mediante simulación FEMM, en la figura 5 b), se muestra la gráfica de distribución del campo magnético en el entrehierro y en la figura 5 c), se muestran los resultados de la aplicación propuesta. Como era de esperarse el modelo analítico del factor de Carter comienza a presentar desviaciones importantes respecto al valor numérico cuando el entrehierro se incrementa. En este caso, la diferencia es del 3,30 %. También, el valor máximo campo magnético en el entrehierro disminuyó, lo cual es esperable, ya que un entrehierro mayor implica una reluctancia magnética mayor y, por tanto, una reducción en el flujo total para una misma magneto motriz. Por otra parte, la curva de distribución de campo magnético indica una mayor dispersión del flujo magnético en las zonas de borde.



c) **Fig. 5.** Resultados para el entrehierro de 3 mm

En la tabla 1, se muestran de manera resumida los valores analíticos y numéricos del factor de Carter sí como sus diferencias porcentuales para este escenario.

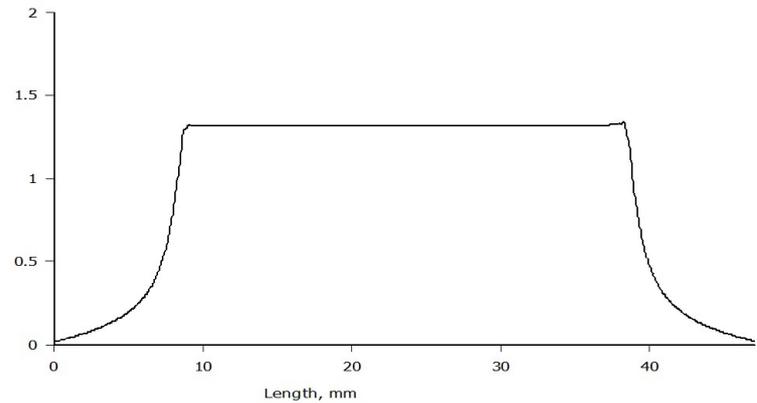
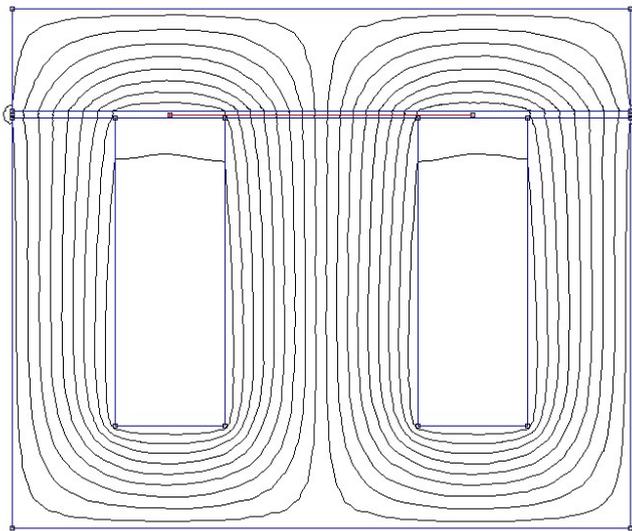
Tabla 1. Comparación del factor de Carter para diferentes valores de entrehierro g , manteniendo $b_0=16$ mm y $T_s = 48$ mm

Entrehierro g (mm)	Ancho de diente b_0 (mm)	Paso de ranura T_s (mm)	k_C analítico	k_C numérico	Diferencia (%)
1	16	48	1,3590	1,3664	0,55
2	16	48	1,2953	1,2867	1,37
3	16	48	1,2536	1,2122	3,30

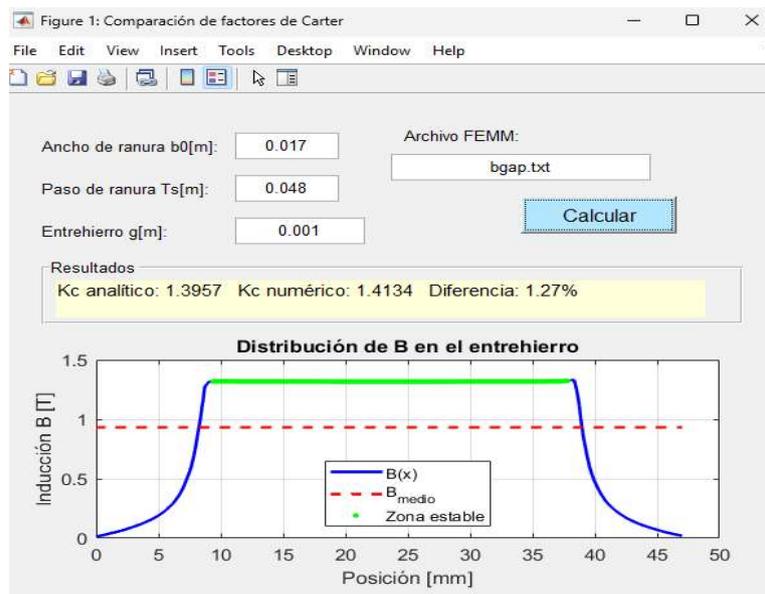
Escenario 2: Variación del ancho de ranura b_0 , manteniendo constante la longitud del entrehierro $g=1$ mm

Ancho de ranura $b_0=17$ mm

En la figura 6 a), se muestra la distribución del campo magnético obtenida mediante simulación FEMM, en la figura 6 b), se muestra la gráfica de distribución del campo magnético en el entrehierro y en la figura 6 c), se muestran los resultados de la aplicación propuesta. Puede observarse que el aumento del ancho de la ranura conduce a una mayor distorsión del campo magnético, que se refleja en un aumento del factor de Carter, tanto en el modelo analítico como en el numérico. El resultado que el valor numérico del factor de Carter sea superior al analítico indica que el modelo clásico subestima el efecto real de la ranura cuando esta adquiere una proporción significativa respecto al paso de ranura. La diferencia de 1,27 % aún se considera baja, pero señala una tendencia creciente a la subestimación del efecto ranurado conforme se amplía la ranura. Es importante destacar que incrementar el ancho de la ranura manteniendo el paso de ranura constante implica una reducción del ancho del diente, lo que incrementa la dispersión del campo magnético en el entrehierro. Desde el punto de vista de diseño, este resultado resalta la importancia de limitar el ancho de las ranuras o de corregir analíticamente los modelos en casos donde no se pueda evitar una configuración con dientes delgados y ranuras amplias.



a) b)

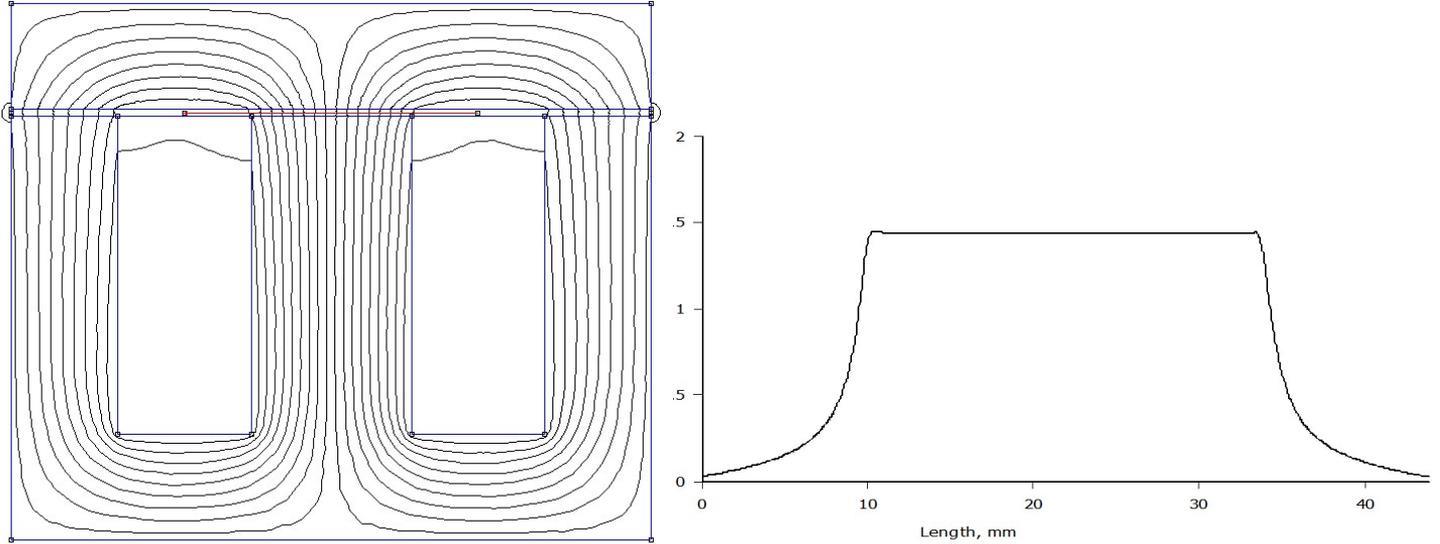


c)

Fig. 6. Resultados para el ancho de ranura de 17 mm

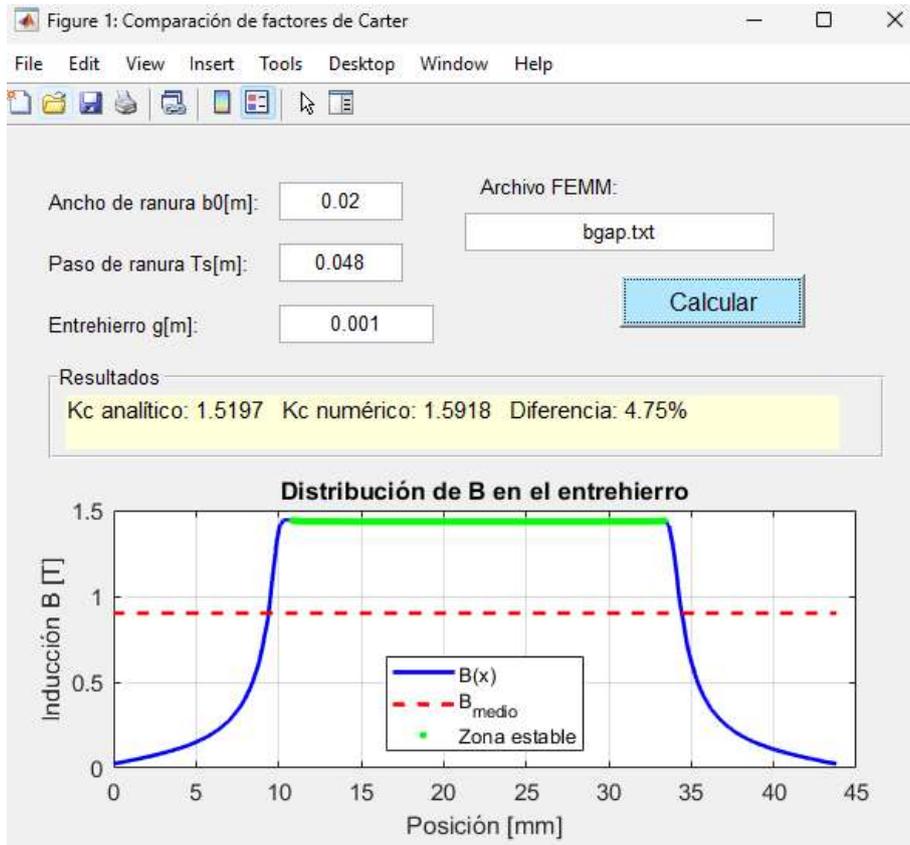
Ancho de ranura $b_0=20$ mm

En la figura 7 a), se muestra la distribución del campo magnético obtenida mediante simulación FEMM, en la figura 7 b), se muestra la gráfica de distribución del campo magnético en el entrehierro y en la figura 7 c), se muestran los resultados de la aplicación propuesta. Se puede observar que al aumentar el ancho de la ranura a 20 mm, reduciendo el diente a 28 mm, genera una dispersión significativa del flujo, especialmente en los bordes, Esto produce una mayor diferencia entre los modelos analítico y numérico del factor de Carter del 4,75 %.



a)

b)



c)

Fig. 7. Resultados para el ancho de ranura de 20 mm

En la tabla 2, se muestran de manera resumida los valores analíticos y numéricos del factor de Carter así como sus diferencias porcentuales para este escenario.

Tabla 2. Comparación del factor de Carter para distintos anchos de ranura b_0

Ancho de ranura b_0 (mm)	Ancho del diente T_s (mm)	k_C analítico	k_C numérico	Diferencia (%)
16	32	1,3590	1,3664	0,55
17	31	1,3957	1,4134	1,27
20	28	1,5197	1,5918	4,75

Este escenario permite evaluar cómo influye la proporción ranura/diente en la precisión del cálculo del factor de Carter, manteniendo constante la longitud del entrehierro. Los resultados muestran una clara tendencia: al aumentar el ancho de la ranura (y por ende disminuir el diente), el modelo analítico comienza a subestimar la realidad física del sistema magnético. En la configuración con ranura de 16 mm, la diferencia entre el valor analítico y el numérico es mínima (0,55 %), lo cual valida el uso del modelo clásico. Sin embargo, conforme se incrementa el ancho de la ranura a 17 mm y luego a 20 mm, se observa una diferencia de hasta 4,75 % en el caso más extremo, lo que lleva a inferir que el modelo analítico del factor de Carter es preciso para relaciones ranura/diente moderadas, pero pierde validez cuando las ranuras son demasiado anchas.

CONCLUSIONES

- La correcta evaluación del factor de Carter es fundamental para modelar con precisión el comportamiento magnético en máquinas eléctricas rotativas, especialmente en configuraciones con geometría diente-ranura. Este factor permite corregir el valor del entrehierro físico, ajustándolo a un entrehierro efectivo que refleja de manera más realista la distribución del flujo magnético.
- El estudio confirma que el modelo analítico del factor de Carter es preciso en configuraciones geométricas convencionales, particularmente cuando la relación entre ranura y diente es equilibrada y el entrehierro es pequeño. En estos casos, la diferencia entre el cálculo analítico y el numérico es menor al 1 %, validando su uso en etapas tempranas del diseño. Sin embargo, la precisión del modelo analítico disminuye notablemente al aumentar la longitud del entrehierro o el ancho de la ranura, alcanzando diferencias del 3,3 % y 4,75 % respectivamente.
- El uso de herramientas numéricas como FEMM y MATLAB permite superar las limitaciones del enfoque analítico, al proporcionar una representación más detallada del comportamiento del campo magnético en el entrehierro. La herramienta desarrollada en MATLAB demostró ser efectiva para procesar los datos exportados de FEMM, identificar zonas estables del campo y estimar numéricamente el factor de Carter de forma confiable.
- Los resultados en los dos escenarios evaluados evidencian que el ancho de la ranura tiene un impacto más significativo que la longitud del entrehierro en la distorsión del campo magnético. Esta observación sugiere que, en el diseño de máquinas eléctricas, es fundamental controlar la proporción ranura/diente que pequeñas variaciones en el entrehierro.
- La integración de métodos analíticos con simulación numérica constituye una estrategia robusta y accesible para el análisis magnético de máquinas eléctricas. Este enfoque permite optimizar el diseño electromagnético, mejorar la eficiencia y minimizar las pérdidas por dispersión en configuraciones geométricas complejas.

REFERENCIAS

- [1] Díaz, F., *et al.* "Surgimiento de las máquinas eléctricas y la exposición de paris 1889". *Ingeniería Energética*. 2021, vol. 42, n. 3, p. 1-10. ISSN 1815-5901. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v42n3/1815-5901-rie-42-03-78.pdf>
- [2] Zambrano, L., y Vélez, S. "Modelamiento del comportamiento de máquinas eléctricas". *Dominio de la Ciencias*. 2020. vol. 6, n. 5, p. 321-334. ISSN 2477-8818. Disponible en: <https://goo.su/Rf6dHC>
- [3] Bogado, M. "Estimación de parámetros de máquinas eléctricas multifásicas de 5 fases. un enfoque orientado al modelo de la máquina". Tesis de Maestría. Universidad de Sevilla, España. 2021, p. 117. Disponible en: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70223/fichero/Top_tesis_m.pdf
- [4] Olejnik, P., *et al.* "Magnetic Field Distribution and Energy Losses in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Under Stick-Slip Friction". *Energies*. 2025, vol. 19, n. 1, p. 1-27. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en18010191>
- [5] Alves, R., *et al.* "Calculation of the influence of slot geometry on the magnetic flux density of the air gap of electrical machines: three-dimensional study". *Transactions on Environment and Electrical Engineering*. 2017, vol. 2, n. 1, p. 1-9. ISSN 2450-5730. Disponible en: <https://teee.eu/index.php/TEEE/article/view/89>
- [6] Zhai, F., *et al.* "An Analytical Method for Determining Flux Density in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines with Unequal Magnetic Poles". *Electronics*. 2023, vol. 12, n. 15, p. 3273. ISSN 2079-9292. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/electronics12153273>
- [7] Sergakis, A., *et al.* "A Review of Condition Monitoring of Permanent Magnet Synchronous Machines: Techniques, Challenges and Future Directions". *Energies*. 2025, vol. 18, n. 5, p. 1177. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en18051177>
- [8] Viorel, I., *et al.* "On the Carter's Factor Calculation for Slotted Electric Machines". *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2007, vol. 7, n. 2, p. 55-58. ISSN 1844-7600. Disponible en: <https://doi.org/10.4316/AECE.2007.02013>
- [9] Meeker, D. "Finite Element Method Magnetics". User's Manual. Version 4.2, 2015. Disponible en: <https://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>

- [10] Cheng, W., *et al.* "Torque Comparison Between Slotless and Slotted Ultra-High-Speed AFPM Motors Using Analytical Method". IEEE Transactions on Magnetics. 2022, vol. 58, n. 2. ISSN 0018-9464. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3081175>
- [11] Trong, D. "Dual air-gap axial flux permanent magnet machines for flywheel energy storage systems". Doctoral thesis. Nanyang Technological University, Singapore. 2012. Disponible en: <https://goo.su/x2NLo>
- [12] Faradonbeh, V., *et al.* "2-D Analytical No-Load Electromagnetic Model for Slotted Interior Permanent Magnet Synchronous Machines". IEEE Transactions on Energy Conversion. 2021, vol. 36, n. 4, p. 3118 - 3126. ISSN 0885-8969. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3064034>
- [13] Cheng, W., *et al.* "Analytical Solution for Electromagnetic Torque of Ultrahigh Speed AFPM Motor with Slotless Stator Core and Toroidal Coils". IEEE Transactions on Magnetics. 2021, vol. 57, n. 2, p. 1-5. ISSN 0018-9464. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.3026575>
- [14] Ji, D., *et al.* "Motor Fault Detection with a Hybrid Physics-based and Data-Driven Method". IEEE International Electric Machines and Drives Conferenc. Houston, United States. 2025, p. 1-8. Disponible en: <https://goo.su/rxyD>
- [15] Alibeik, M., *et al.* "High-Torque Electric Machines: State of the Art and Comparison". Machines. 2022, vol. 10, n. 8, p. 1-18. ISSN 2075-1702. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/machines10080636>
- [16] Žarko, D., *et al.* "Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance". IEEE Transactions on magnetics. 2006, vol. 42, n. 7. ISSN 0018-9464. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1644900>
- [17] Pérez, M., *et al.* "Propuesta metodológica mediante la simulación con el software FEMM de los circuitos magnéticos". Pedagogía Profesional. 2025, vol. 23, n. 1, p. 1-17. ISSN 1684-5765. Disponible en: <https://goo.su/zONCl>
- [18] Wang, M., *et al.* "Analytical Calculation of Complex Relative Permeance Function and Magnetic Field in Slotted Permanent Magnet Synchronous Machines". IEEE Transactions on Magnetics. 2021, vol. 57, n. 3. ISSN 0018-9464. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.3046354>
- [19] Pyrhonen, J., *et al.* "Design of rotating electrical machines". John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6. Disponible en: <https://goo.su/thG9u>
- [20] Ostovic, V. "Computer-Aided Analysis of Electric Machines: A Mathematica Approach". Prentice Hall. New Jersey, United States, 1994. ISBN 978-0-130-68859-0. Disponible en: <https://www.amazon.com/Computer-Aided-Analysis-Electric-Machines-Mathematica/dp/0130688592>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

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

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la programación, simulación, el procesamiento de los datos, la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

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

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.