

Anexo técnico

Respuesta examen de fondo descrito en Oficio N° 9438 de 3 de septiembre de 2019

En referencia al oficio en mención el presente anexo argumenta una de las características técnicas esenciales con las del estado de la técnica. Dichas características fueron comparadas dentro del examen de patentabilidad y omitidas por el despacho en la novedad.

1. Sobre la simulación

Se realizó simulación magnetostática bidimensional por medio del método de elementos finitos prediciendo la intensidad del campo magnético representado mediante gradiente de color. Las simulaciones presentadas en las memorias de la patente datan de 2013-2014, robusteciendo a versiones 2019 se realizaron importantes actualizaciones paramétricas:

1. Ajuste de simetría: Versiones preliminares presentan asimetría dado la baja resolución computacional y divergencia de resultados.

2. Escalamiento 1:1: Se presenta escalamiento en versión definitiva, debido a que versiones primigenias desarrolladas en la etapa de modelación sirvieron como modelos predictivos para el desarrollo del dispositivo final.

3. Anexo de materiales paramagnéticos: Adición de material descrito en *breve descripción de invento*, correspondiente a “dos carretes (4) de un material no magnético y conductividad térmica superior a 209.3 W/m·K”.

4. Visualización de líneas de contorno de flujo magnético: Resultados se presentan como superposición de líneas de flujo magnético y contornos del flujo magnético resultante.

El efecto técnico de dichas aristas redondeadas es disminuir la reluctancia y por lo tanto incrementar la densidad de flujo magnético. Tal como se indica en la descripción:

"La implementación de aristas redondeadas en el circuito magnético se sustenta en el teorema de la divergencia de Gauss, el cual establece que las líneas de densidad de flujo magnético en cualquier geometría, además de ser cerradas, siguen una trayectoria curvilínea y suave a través del camino de menor reluctancia. Lo anterior implica que las líneas de densidad de flujo magnético se apartarán de las aristas rectas por la mayor densidad de momento magnético que se acumula en el área confinada de una arista recta, buscando formar circuitos curvos con menor densidad de flujo magnético dispersivo."

2. Resultados

La optimización paramétrica pretende la predicción y reducción del flujo magnético de fuga, aprovechando las características permeables del material, sugiriendo geometrías que contribuyan al flujo útil deseado. La figura 1. ejemplifica este escenario donde las aristas interiores del circuito magnético pueden ser optimizadas generando un impacto sustancial en el flujo magnético útil en el gap.

El flujo magnético total producido por las bobinas de potencia en el circuito magnético es la sumatoria del flujo magnético de fuga φ_l y el flujo magnético útil φ_u como se muestra en la ecuación (1):

$$\varphi = \varphi_l + \varphi_u \quad (1)$$

El flujo magnético de fuga φ_l en un circuito magnético no sigue la trayectoria prevista (trayectoria de menor reluctancia) y no contribuye al flujo magnético total. Dicho flujo magnético de fuga puede mostrarse alrededor de la bobina de potencia y en bordes afilados e.g. *aristas rectas*.

La mayor parte del flujo magnético producido por las bobinas de potencia y pasan a través del gap de aire y que se utiliza en el circuito magnético se conoce como flujo útil φ_u

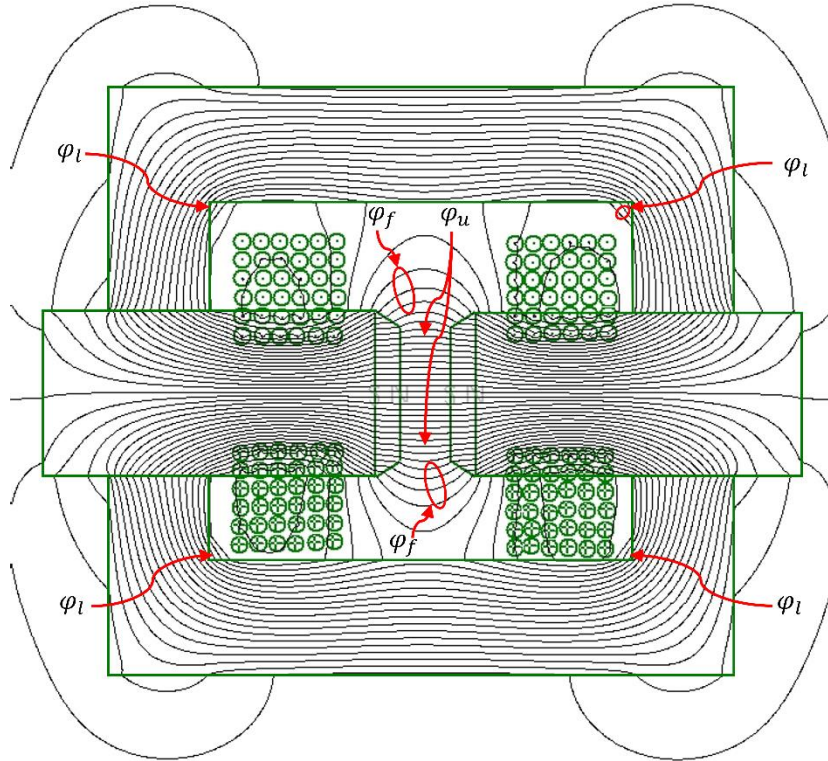


Figura 1. Circuito magnético con Aristas interiores rectas.

El coeficiente de fuga o factor de fuga es la relación del flujo magnético total producido y el flujo útil en el gap de aire del circuito magnético, está denotado por con la siguiente relación (2):

$$\lambda = \frac{\varphi}{\varphi_u} \quad (2)$$

El flujo magnético útil en el gap de aire tiende a abultarse hacia afuera efecto conocido como flujo de borde φ_f , debido a éste el área efectiva del gap aumenta y la densidad de flujo magnético útil disminuye, efecto también afectado por la longitud del gap de aire.

Un diseño eficiente en el circuito magnético permite minimizar los efectos del flujo magnético de fuga y flujo magnético de borde. Los efectos esperados del circuito magnético se describen a continuación y son apreciados en la figura 2.

1. Las líneas de flujo magnético siguen la trayectoria de menor reluctancia (menor resistencia al paso del flujo magnético). Por lo tanto, las líneas de flujo magnético generalmente fluirán más fácilmente a través de materiales ferromagnéticos que en el aire. Puesto que estos materiales tienen una mayor permeabilidad [1]

2. Las líneas de flujo magnético fluyen en la misma dirección, sin superponerse. Por lo tanto, las líneas de flujo magnético tienden a divergir cuando se alejan de los polos en lugar de converger o permanecer en paralelo [1]

3. En el diseño del circuito magnético, deben evitarse los bordes afilados e.g aristas rectas y las esquinas, especialmente en lugares donde exista una diferencia de potencial magnético considerable y flujo magnético de fuga apreciable. Análogo con el campo electrostático, las líneas de flujo magnético que pasan de un material ferromagnético a no-magnético tienen a amontonarse en lugares donde la curvatura de la superficie es excelente. Los bordes afilados o aristas rectas tienden a aumentar el campo magnético de fuga. Sólo en casos particulares esto es deseable, pero no es regla general [2] [3]

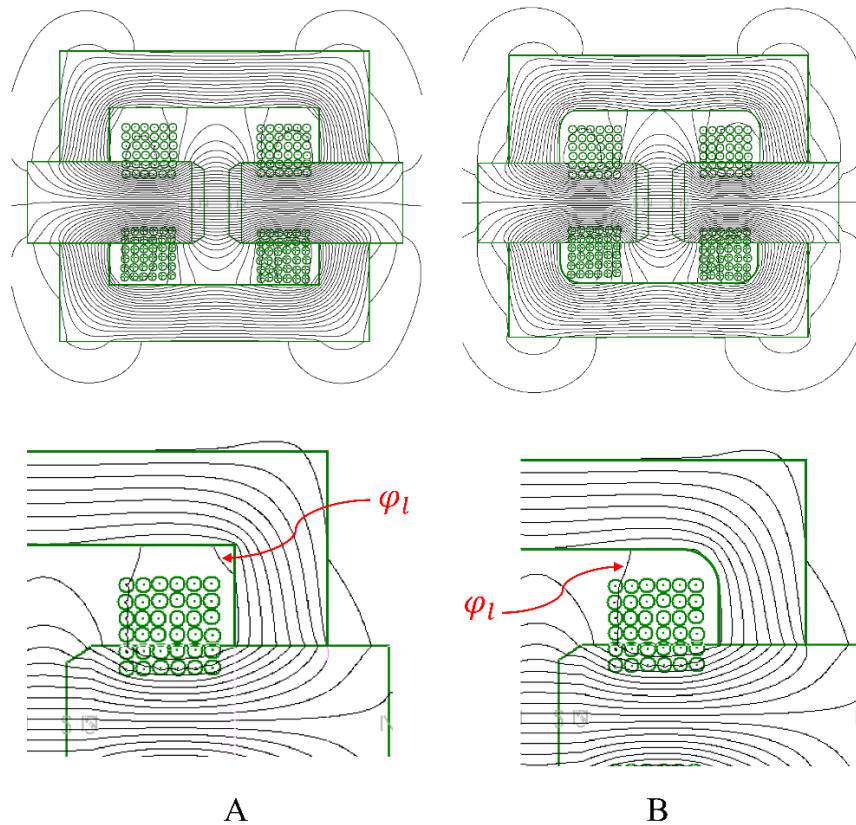


Figura 2. Simulación magnetostática comparativa, visualización de líneas de flujo magnético en el circuito magnético. 1A Circuito magnético con aristas interiores rectas. Se presenta en detalle el flujo magnético de fuga, que no contribuye al flujo útil disminuyendo la eficiencia del circuito. **1B Circuito magnético con aristas interiores redondeadas.** Se evidencia la adaptación geométrica de las aristas interiores, generando un redondeo que permite la contribución al flujo magnético útil y reducción de la reluctancia del circuito magnético.

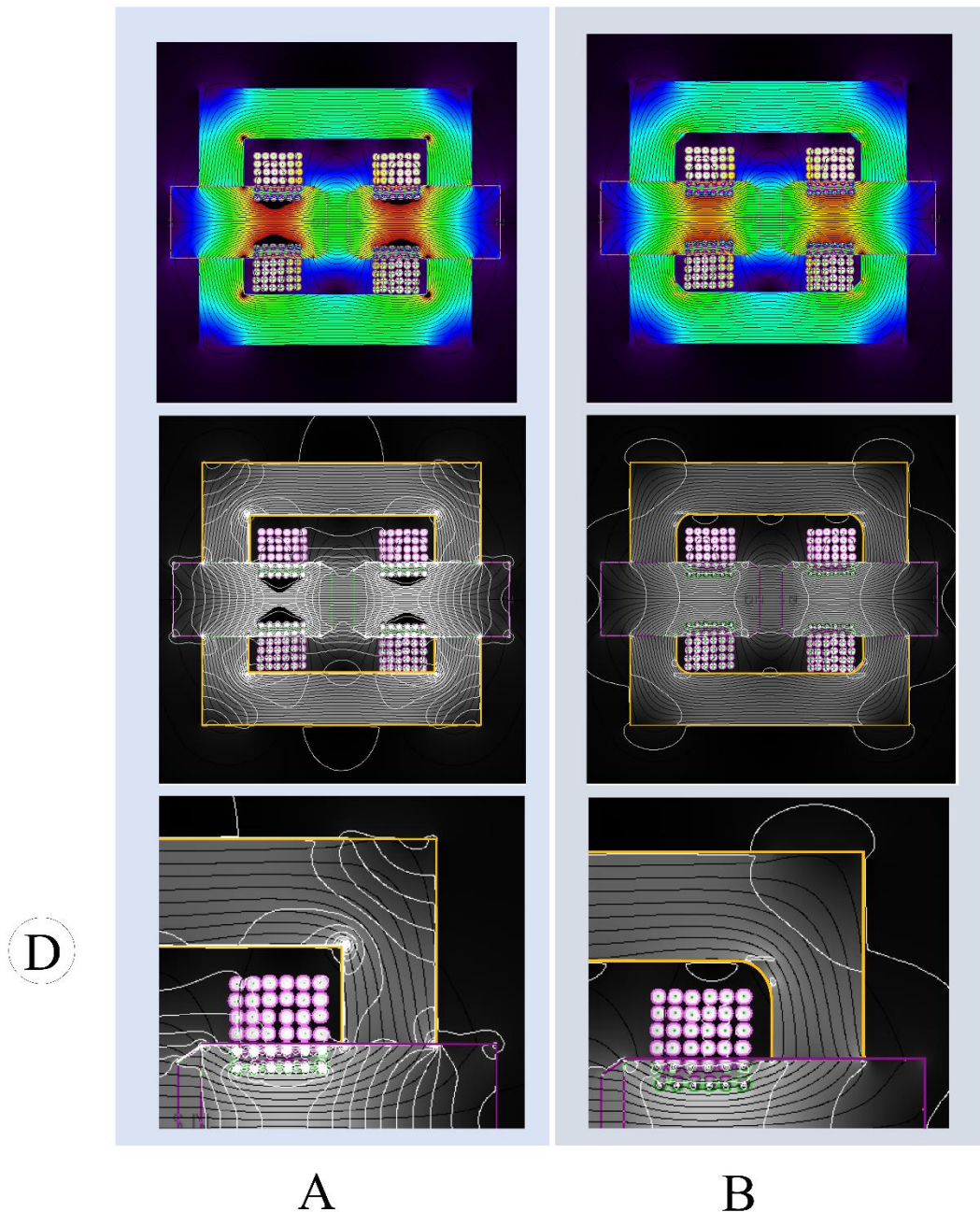


Figura 2. Resultados simulación magnetostática bidimensional comparativa entre Circuito magnético con aristas interiores rectas y redondeadas. 2A Simulación para circuito magnético con aristas interiores rectas. Evidencia el efecto acumulativo de en las aristas interiores rectas. 2B Simulación para circuito magnético con artistas interiores redondeadas.

La figura 3. presenta la dicha optimización paramétrica mediante la simulación magnetostática bidimensional que permite la visualización de la densidad de flujo magnético en un gradiente potencial magnético en color donde la variable de salida es el flujo magnético en el gap. Adicionalmente se presentan resultados en escala monocromática (blanco y negro) por el método de contornos. Aquí se grafican las líneas de flujo magnético en el circuito magnético (líneas cerradas en color negro), las áreas oscuras en

negro representan mayor densidad de flujo magnético y líneas de contorno blancas que representan gráficamente la densidad del momento magnético. En la figura 3. D (Detalle) Se evidencia el efecto acumulativo de la densidad de momento magnético confinado en las aristas rectas (zonas oscuras). Al implementarse en el circuito magnético las aristas interiores redondeadas se observa el efecto deseado. Además, es evidente el amontonamiento de las líneas de flujo magnético en los polos, lo que se traduce en un aumento del flujo útil en el gap de aire.

Datos estipulados en la tabla 1. presentan la convergencia del método numérico empleado, mediante un refinado del número de elementos para ambas simulaciones, previendo la convergencia numérica cuando el número de elementos aumenta. Se observa además en la Figura 4. La convergencia numérica del campo magnético en el gap con sus respectivas correlaciones.

Mallado - Elementos	B Aristas redondeadas [T]	B Aristas rectas [T]
10.000	2.36	1.95
40.000	2.29	1.93
90.000	2.23	1.92
160.000	2.11	1.90
360.000	1.98	1.88
640.000	1.92	1.88

Tabla 1. Convergencia numérica del campo magnético en el gap.

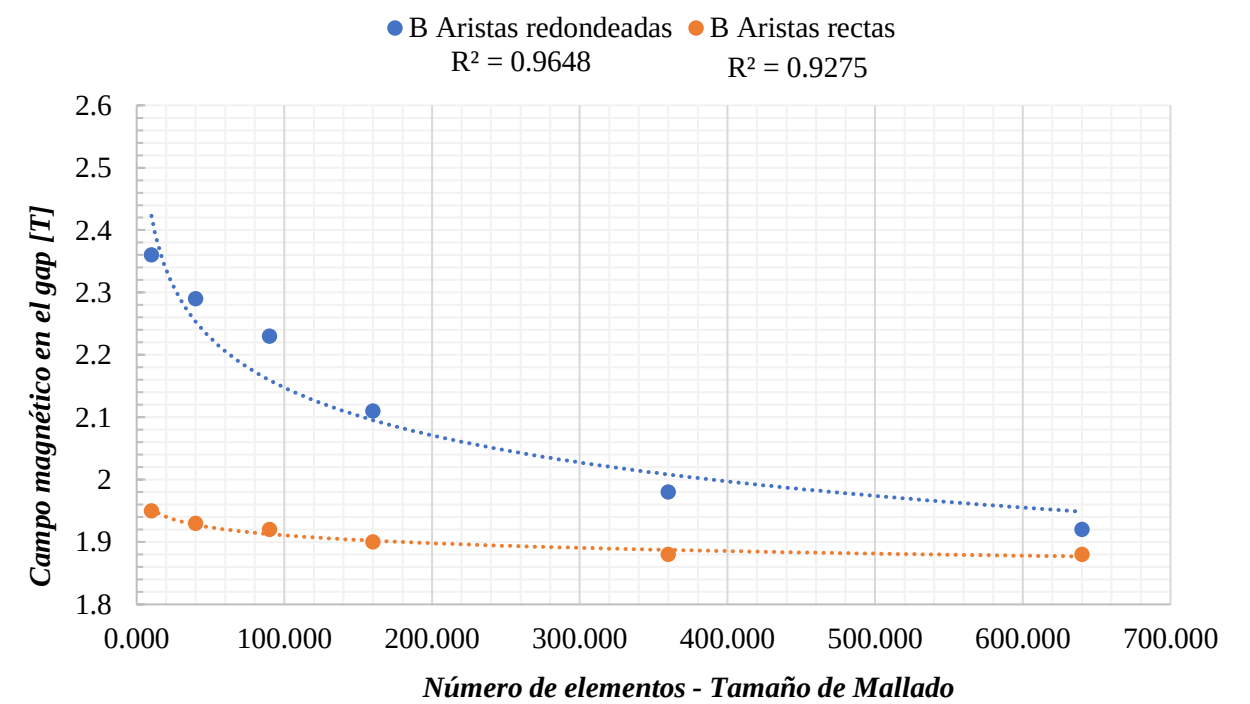


Figura 4. Convergencia numérica del campo magnético en el gap. Es evidente la alta dependencia del número de elementos en la precisión del método lo que se traduce en gasto computacional.

3. Conclusiones

-El efecto de las aristas internas redondeadas con respecto a las aristas internas rectas es significativo al aumentar 23% la intensidad de campo magnético en el gap.

-La diferencia entre los resultados numéricos y los experimentales para el circuito magnético de aristas redondeadas es de 5.78%

Bibliografía

[1] Stelter R. E (1995) U.S Patent No.5,635,889. Fremont, CA. U.S. Patent and Trademark Office. DIPOLE PERMANENT MAGNET STRUCTURE.

[2] Robert Mullineux Walmsley. (1913). Electricity in the Service of Man: A Popular and Practical Treatise on the Applications of Electricity in Modern Life. Cassell and Company, LTDA. London, New York, Toronto, Melbourne. Vol. II. Pag. 24.

[3] M.S. Bhatia & S. Dass. & U.k Chaterjee Laser Division. (1987) Study of two medium size “C” core electromagnets generating low magnetic fields. Bhabha Atomic Research Center, Bombay, India Pag. 50.