

# SIMULACIÓN DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS EN LTSPICE

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

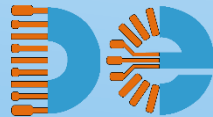
Departamento de Electrónica - 2019



5<sup>a</sup> JORNADA  
DE ELECTRÓNICA  
FI – UNPSJB



**UNPSJB**  
RAMA ESTUDIANTIL IEEE




DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA - UNPSJB




## RESPONSABLES DE LA CÁTEDRA:

- Jefe de Cátedra: Eduardo Pires
- Jefe de Trabajos Prácticos : Nicolás Costa
- Auxiliar de 2da: Dante Consiglio

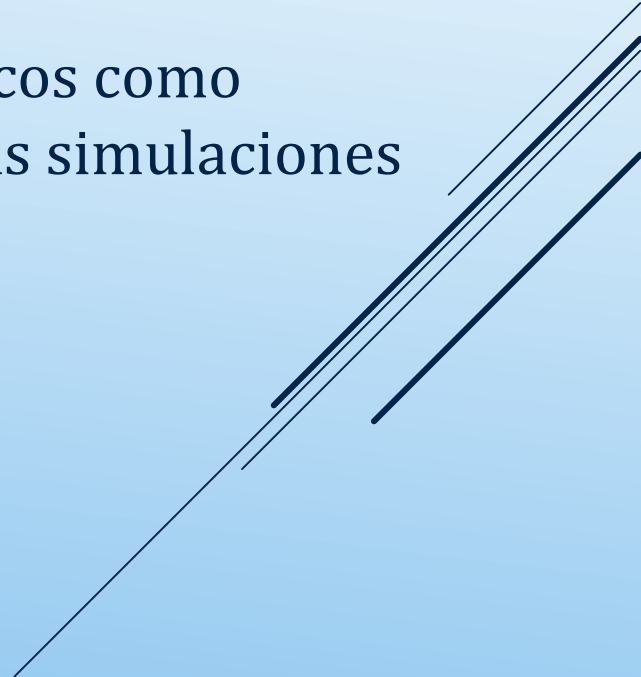
## INTEGRANTES DEL GRUPO:

- Federico García
  - Fernando D. Salgado
  - Ignacio Vivar Cruz
  - Israel Consiglio
  - Santiago Núñez
- 


# CONTENIDO:

- Objetivos
  - Introducción teórica
  - Resolución analítica
  - Utilización de FEMM
  - Utilización de LTspice
- 

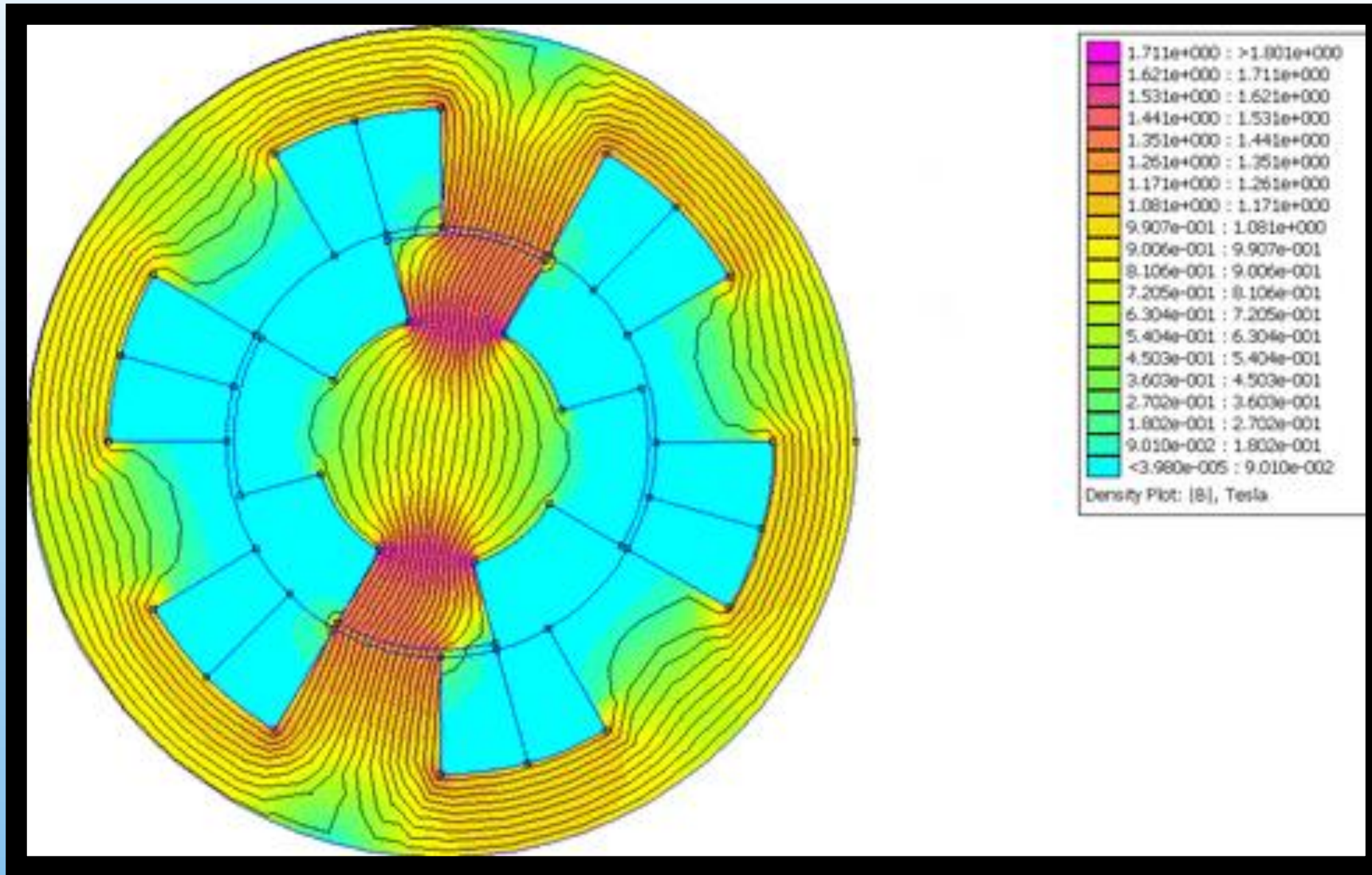
# OBJETIVOS DEL TRABAJO FINAL:

- Estudiar el comportamiento de los circuitos magnéticos como tales.
  - Demostrar que es posible realizar una analogía con circuitos eléctricos estudiados en la carrera.
  - Demostrar que la simulación de circuitos magnéticos como eléctricos es posible y analizar la exactitud de estas simulaciones con respecto a los casos reales.
- 

# PORQUÉ REALIZAR UNA ANALOGÍA CON CIRCUITOS ELÉCTRICOS?

- La resolución de un circuito magnético con todas sus propiedades físicas es compleja y depende mucho de parámetros como las dimensiones, la homogeneidad, etc.
  - La resolución de un circuito eléctrico es mucho más simple y los parámetros nombrados no influyen en gran manera en el resultado.
- 

# HAY SIMULADORES DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS?



FEMM: Finite  
Element  
Method  
Magnetics

## DESVENTAJAS

- Es difícil realizar los gráficos de los circuitos a simular y toma mucho tiempo.
- Como es un programa que llega a los resultados por aproximaciones sucesivas, a medida que uno incrementa la exactitud, aumenta también el tiempo de la simulación

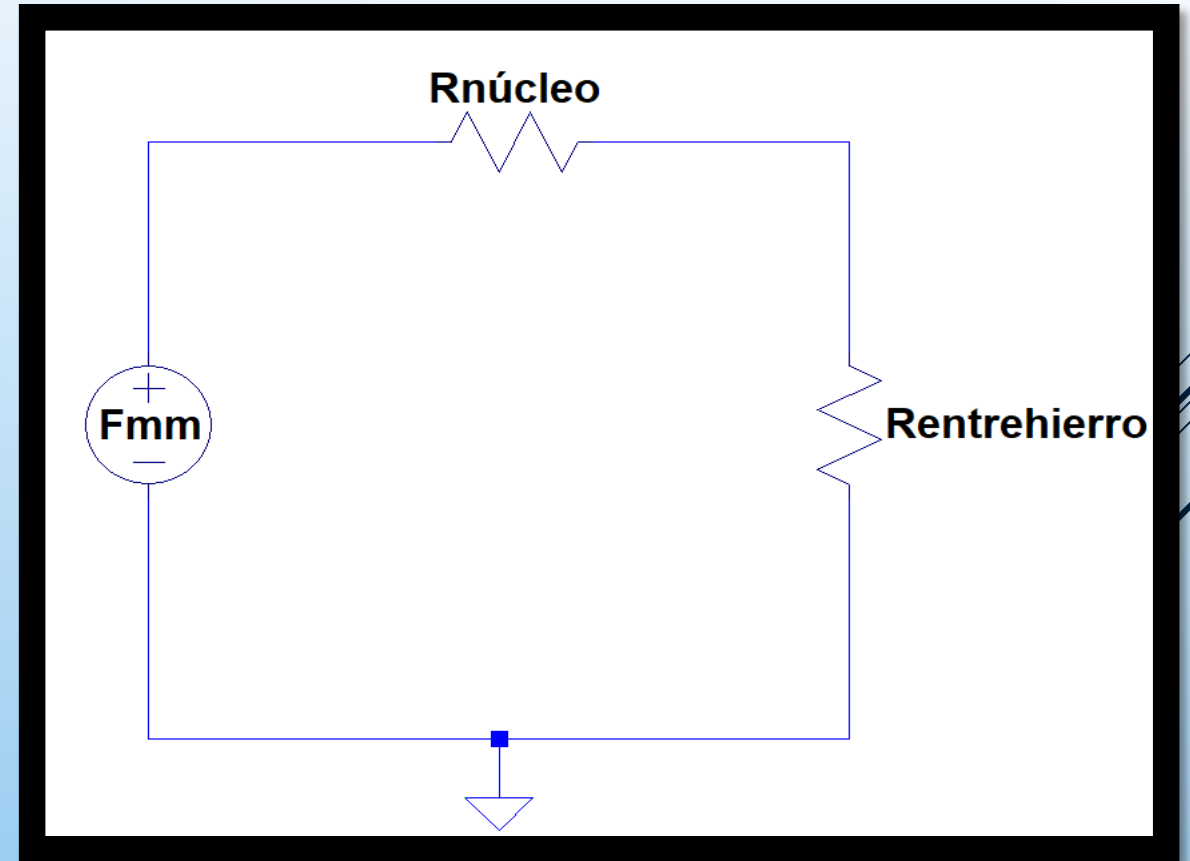
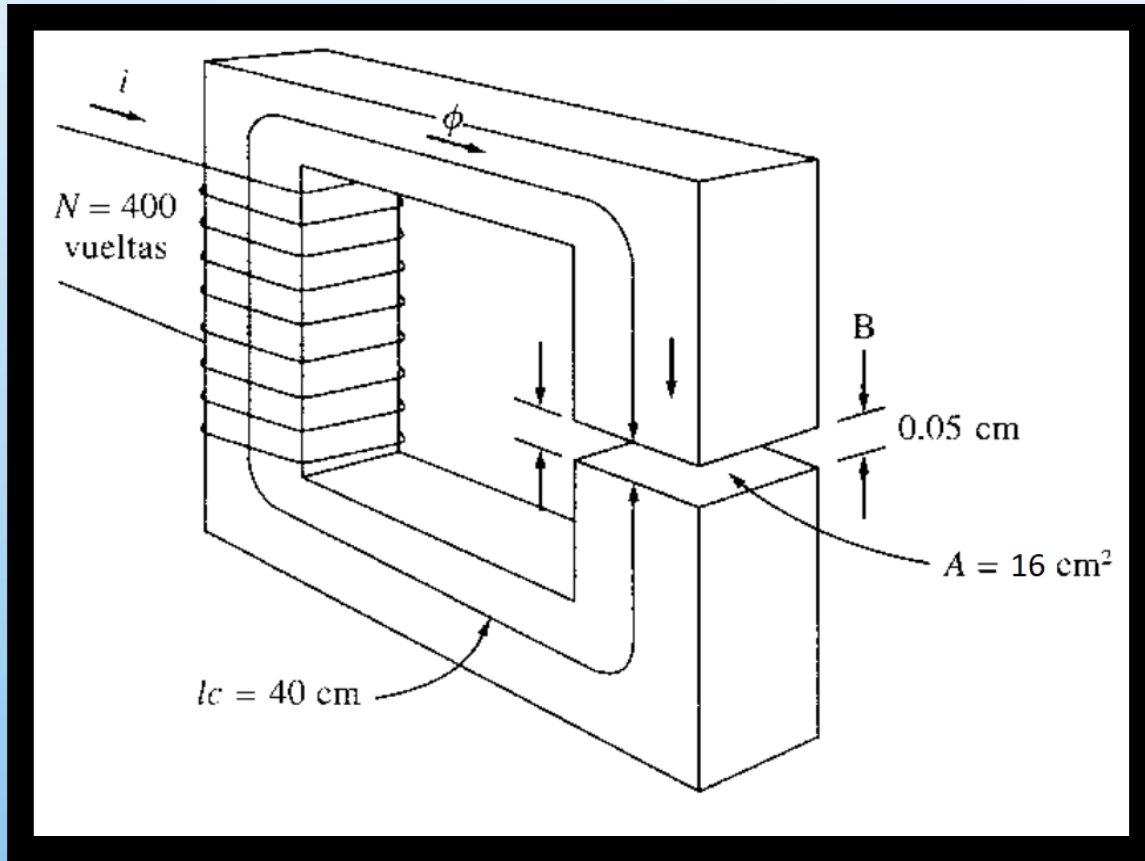
## VENTAJAS

- Los resultados obtenidos son muy precisos y se puede realizar un análisis mas profundo que lo que se obtiene en un resultado analítico





# PORQUÉ SIMULAR CIRCUITOS MAGNÉTICOS EN LTSPICE?





# INTRODUCCIÓN TEÓRICA:

Circuito Eléctrico	Circuito Magnético
Corriente: $I$ [A]	Flujo magnético: $\phi$ [Wb]
Fuerza electromotriz: $F_{em}$ [V]	Fuerza magnetomotriz: $F_{mm}$ [A · v]
Resistencia: $R$ [ $\Omega$ ]	Reluctancia: $R$ [ $H^{-1}$ ]
Ley de Ohm: $V = I \cdot R$	Ley de Hopkinson: $F_{mm} = \phi \cdot R$
Ley Corrientes de Kirchhoff: $\sum I = 0$	Ley de nodos circuito magnético: $\sum \phi = 0$
$\sum V = \sum R \cdot I$	$\sum F_{mm} = \sum R \cdot \phi$
Resistencia en paralelo: $R_T = \frac{1}{\sum \frac{1}{R}}$	Reluctancia en paralelo: $R_T = \frac{1}{\sum \frac{1}{R}}$
Resistencia en serie: $R_T = \sum R$	Reluctancia en serie: $R_T = \sum R$

# RESISTENCIA Y RELUCTANCIA:

$$\text{Resistencia: } R = \frac{l}{\sigma \cdot S} \rightarrow \begin{cases} l = \text{Longitud del material} \\ \sigma = \text{Conductividad eléctrica del material} \\ S = \text{Sección transversal del material} \end{cases}$$

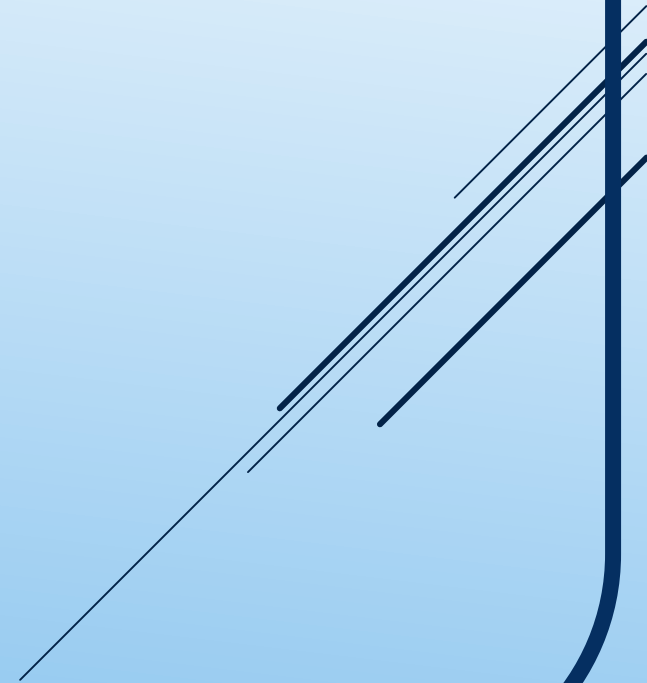
$$\text{Reluctancia: } R = \frac{l}{\mu \cdot S} \rightarrow \begin{cases} l = \text{Longitud del material} \\ \mu = \text{Permeabilidad magnética del material} \\ S = \text{Sección transversal del material} \end{cases}$$

$$\text{donde } \mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

La conductividad eléctrica de un material no cambia con respecto a la tensión que se le esta aplicando, por lo cual la relación en la resistencia es lineal.

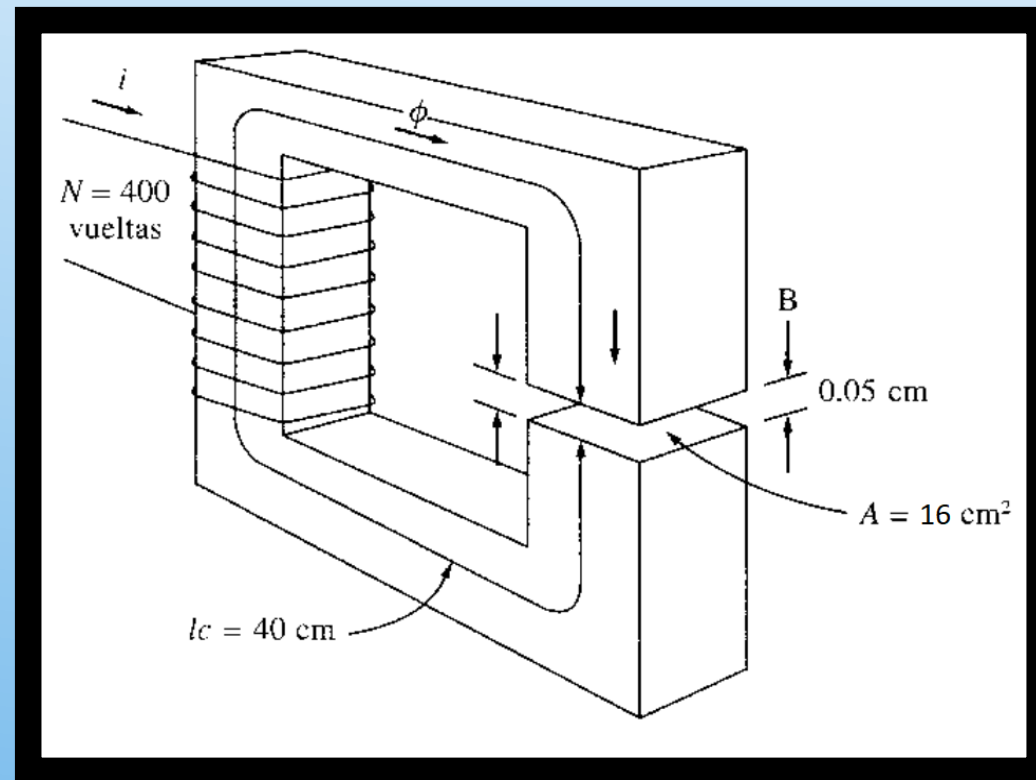
Para el caso de la reluctancia, como depende de la magnetización del material, se llega a un flujo máximo en el circuito magnético.

EJEMPLO:



## ENUNCIADO:

En la siguiente figura se presenta circuito magnético compuesto por un núcleo ferromagnético cuya longitud media es de 40 cm, y un entrehierro de longitud 0,5 mm, ambos con una sección de  $16 \text{ cm}^2$ . La permeabilidad relativa es de 4000; el número de vueltas en el bobinado es de 400; se considera un factor de dispersión en el entrehierro de 1,05.



A) La reluctancia total.

B) Caída de potencial magnético en las reluctancias del circuito.

C) Corriente requerida en el bobinado.



## DATOS:

- Permeabilidad relativa del núcleo
- Longitud del núcleo
- Sección transversal
- Factor de dispersión del entrehierro
- Longitud del entrehierro
- Número de vueltas en el bobinado
- Campo magnético en el entrehierro

$$\rightarrow \mu_r = 4000$$

$$\rightarrow l_n = 400 \text{ mm}$$

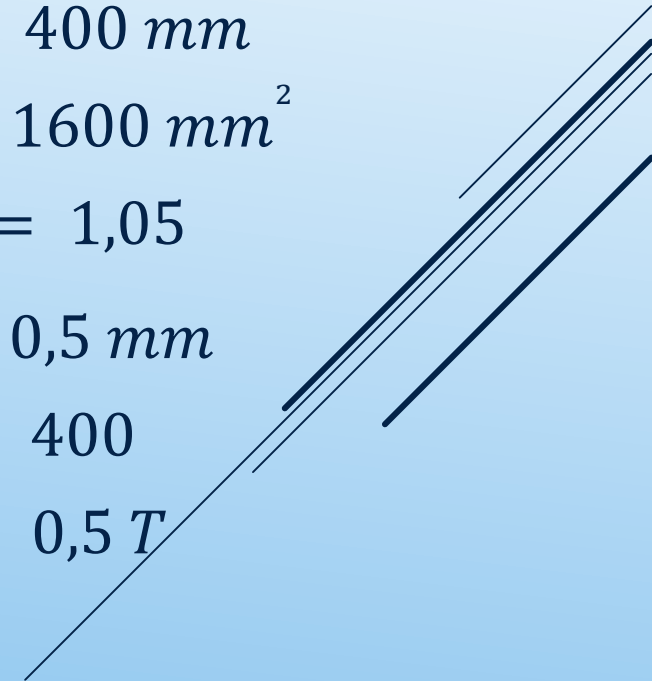
$$\rightarrow s = 1600 \text{ mm}^2$$

$$\rightarrow f_{de} = 1,05$$

$$\rightarrow l_e = 0,5 \text{ mm}$$

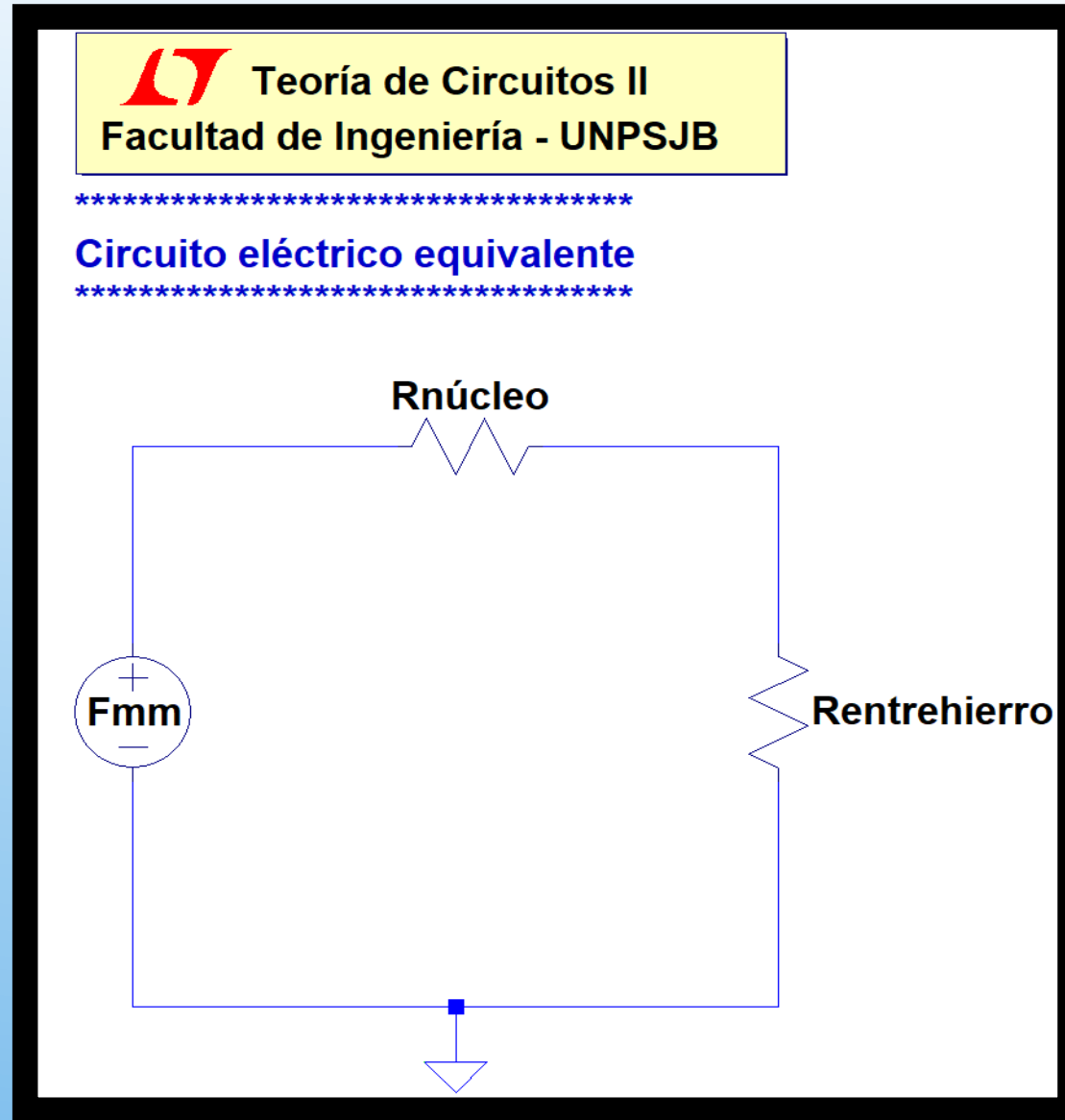
$$\rightarrow N = 400$$

$$\rightarrow B_e = 0,5 \text{ T}$$





# CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE



# RELUCTANCIA LINEAL



SOLUCIÓN ANALÍTICA:

La reluctancia total del circuito será la reluctancia del núcleo más la del entrehierro; dado que se tienen todos los datos para calcularla, se procede a obtener los resultados:

$$R_t = R_e + R_n$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_n = \frac{l_n}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = 49,735919 \text{ KH}^{-1} \\ R_e = \frac{l_e}{\mu_0 \cdot S \cdot f_{de}} = 236,837713 \text{ KH}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow R_t = \boxed{286,573632 \text{ KH}^{-1}}$$

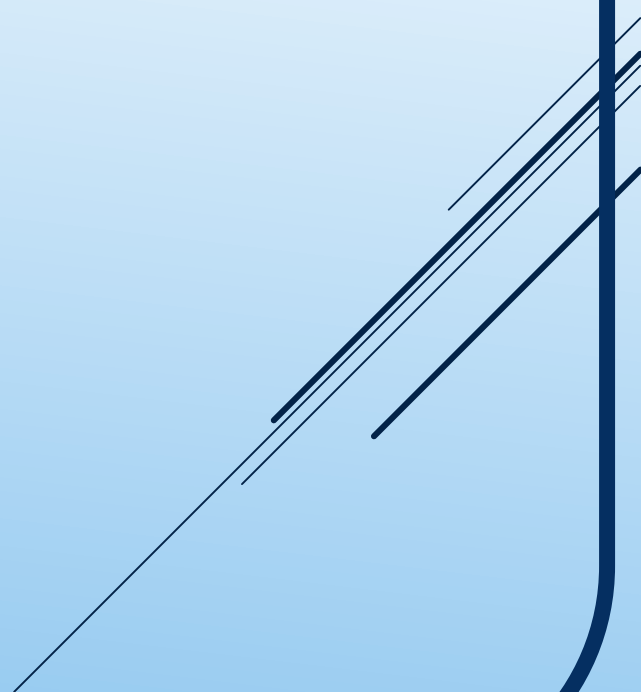
Como el campo magnético en el entrehierro debe ser de 0,5 T, podremos obtener el flujo magnético y a su vez con la fuerza magnetomotriz total del circuito:

$$\phi_t = B_e \cdot S_e = 840 \mu Wb$$

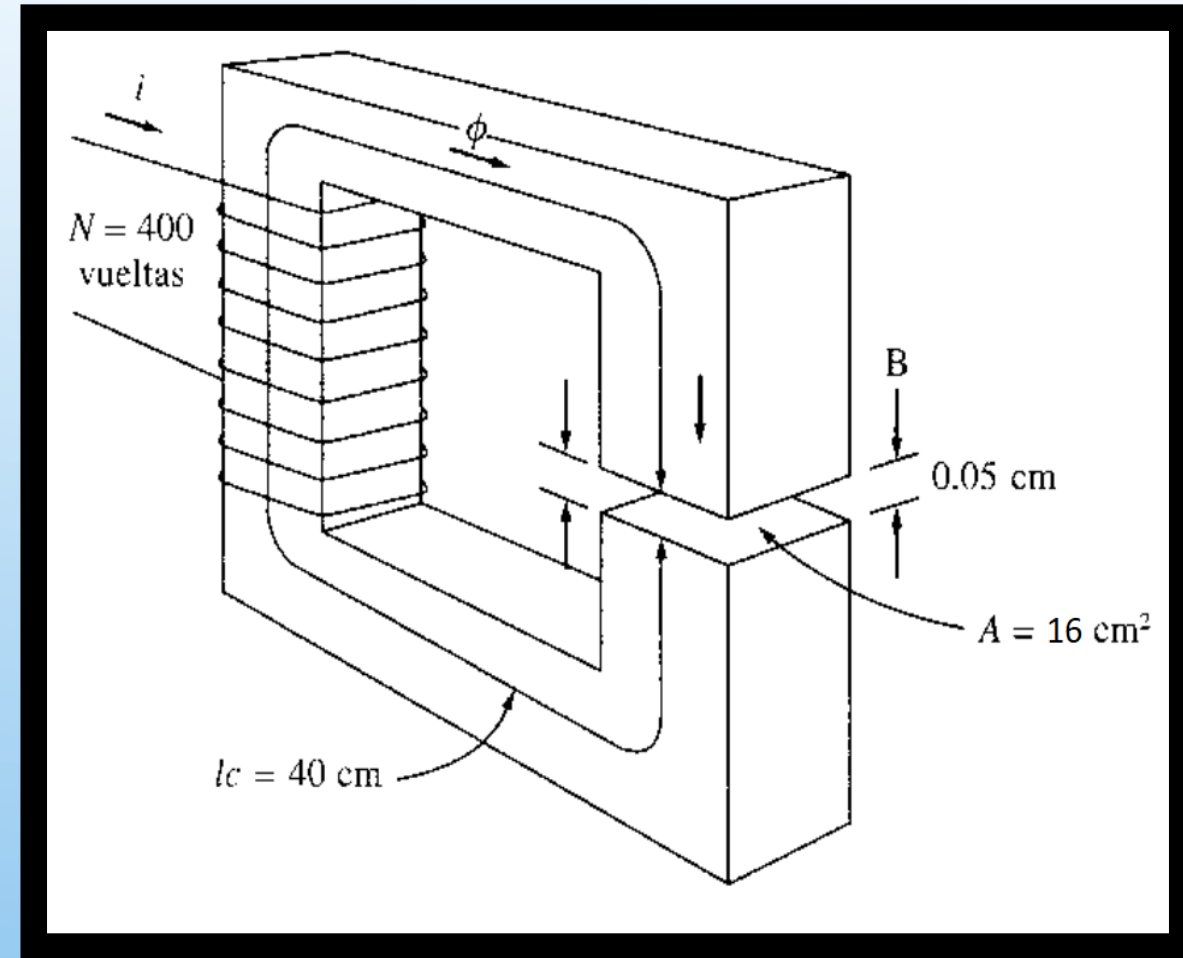
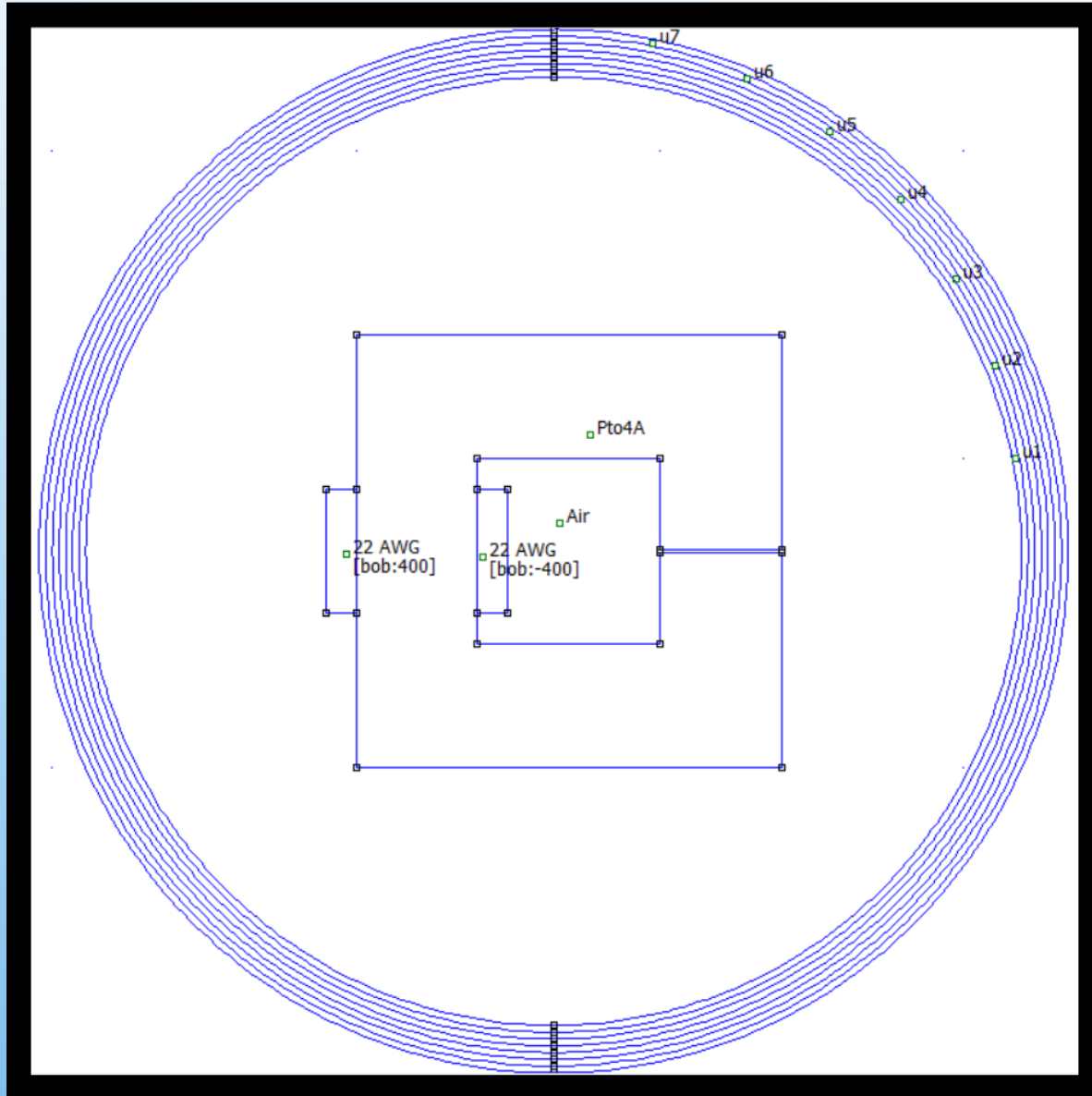
$$F_{mm} = \phi_t \cdot R_t = 240,72 Av$$

$$I = \frac{F_{mm}}{N} = 601,8046 \text{ mA}$$

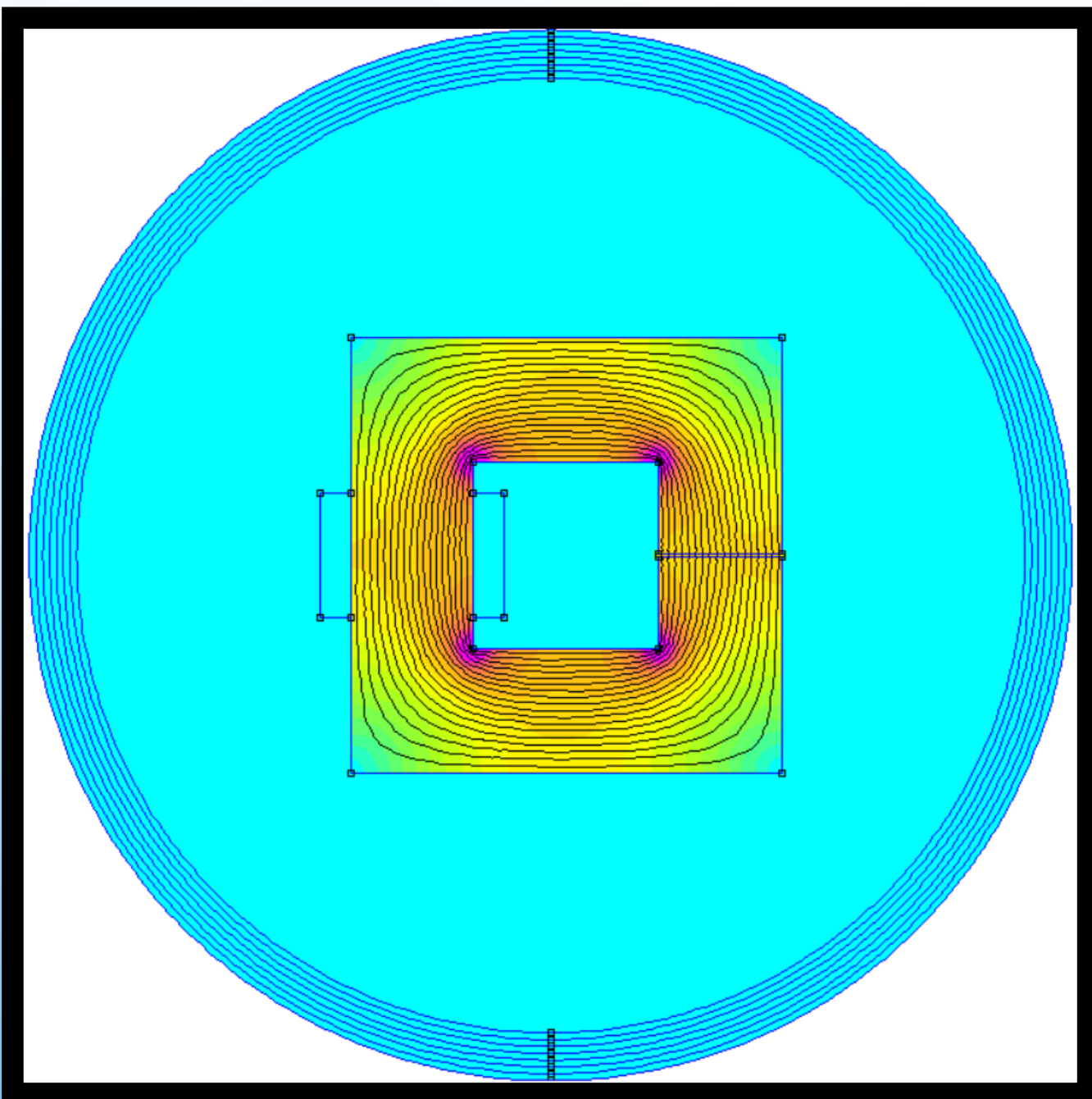
FEMM:



# PRIMER CASO: MATERIAL LINEAL







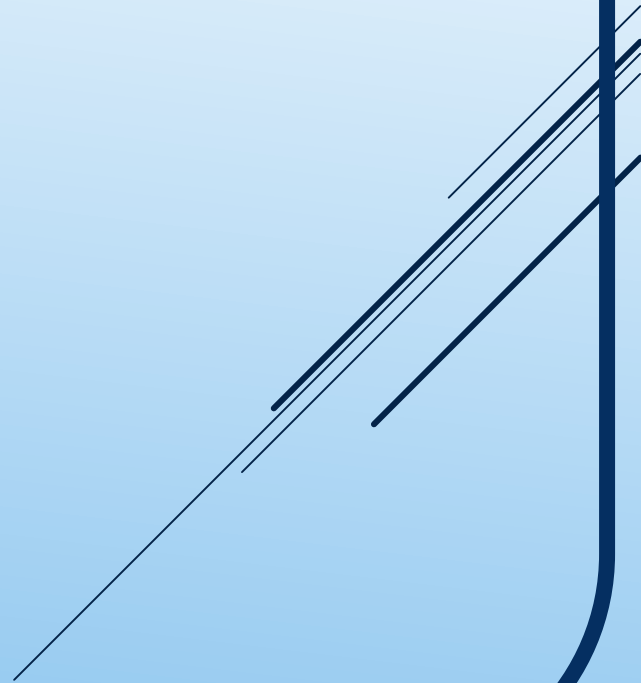
FEMM Output

Point: x=120.37, y=70.06  
 A = -0.0107836 Wb/m  
 |B| = 0.515537 T  
 Bx = 4.88548e-008 T  
 By = -0.515537 T  
 |H| = 410251 A/m  
 Hx = 0.0388774 A/m  
 Hy = -410251 A/m  
 mu\_x = 1 (rel)  
 mu\_y = 1 (rel)  
 E = 105750 J/m^3  
 J = 0 MA/m^2

8.866e-001	: >9.333e-001
8.400e-001	: 8.866e-001
7.933e-001	: 8.400e-001
7.466e-001	: 7.933e-001
7.000e-001	: 7.466e-001
6.533e-001	: 7.000e-001
6.066e-001	: 6.533e-001
5.600e-001	: 6.066e-001
5.133e-001	: 5.600e-001
4.667e-001	: 5.133e-001
4.200e-001	: 4.667e-001
3.733e-001	: 4.200e-001
3.267e-001	: 3.733e-001
2.800e-001	: 3.267e-001
2.333e-001	: 2.800e-001
1.867e-001	: 2.333e-001
1.400e-001	: 1.867e-001
9.333e-002	: 1.400e-001
4.667e-002	: 9.333e-002
<4.209e-006	: 4.667e-002

Density Plot: |B|, Tesla

LTSPICE:





# COMPARACIÓN DE ERRORES:

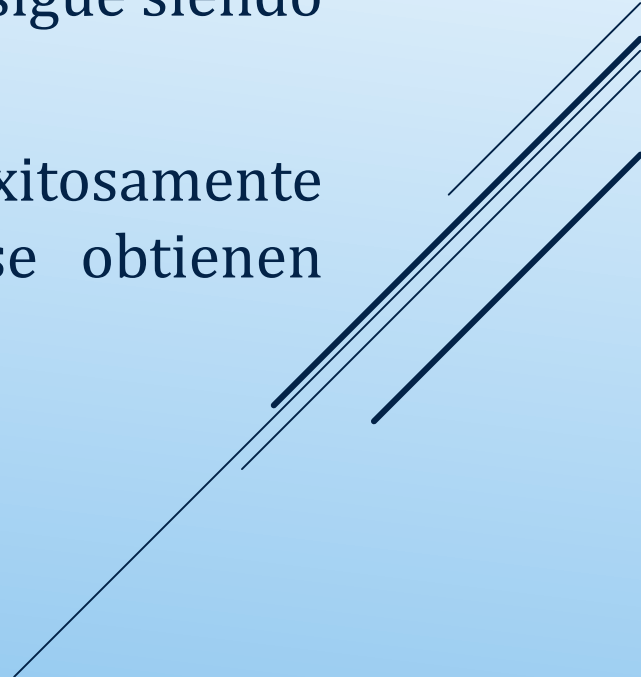
# Cálculo del error porcentual:

Valor de FEMM: 0,515 T

Valor de LTspice: 0,499 T

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Valor}_{LT} - \text{Valor}_{FEMM}}{\text{Valor}_{FEMM}} \cdot 100 = 3,1\%$$

# Conclusiones:

- En la presentación no se abordó ningún caso con reluctores alineales por falta de tiempo; sin embargo la simulación en LTspice sigue siendo totalmente válida para estos casos también.
  - Según lo demostrado en el trabajo, se pueden simular exitosamente circuitos magnéticos como eléctricos en LTspice, y se obtienen resultados muy precisos.
- 

APLAUSOS!

