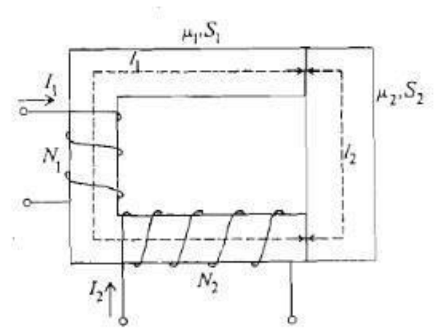
Electromagnetismo 543201
Guía de Problemas #9
Circuitos Magnéticos

1) Determine el flujo magnético en el circuito magnético que se muestra en la figura, si las intensidades de corriente en las dos bobinas son **I_1 [A]** e **I_2 [A]** respectivamente. Debe notarse que **I_1 [A]** e **I_2 [A]** producen el flujo magnético en la misma dirección.

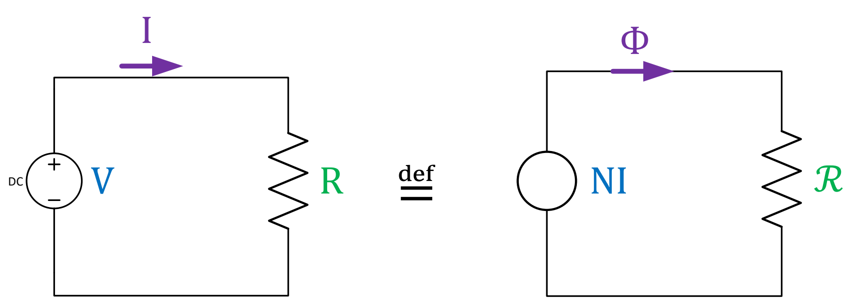


Lo primero que hay que entender, en este tipo de ejercicios, es que los circuitos magnéticos tienen un comportamiento muy similar a los circuitos eléctricos: se pueden aplicar los mismos principios, tales como las leyes de Kirchoff de mallas y nodos (tensión y corriente), así como también la ley de Ohm (adaptada).

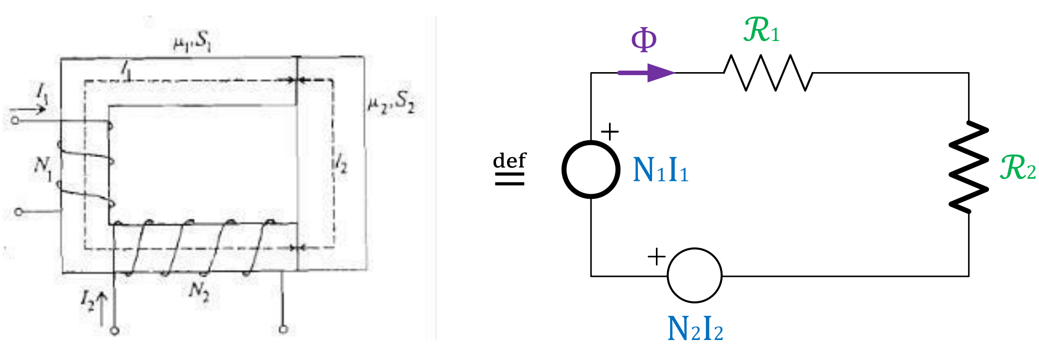
Las equivalencias son las siguientes:

Voltaje [V]	→	Fuerza magnetomotriz [Av]
Corriente [A]	→	Flujo magnético [Wb]
Resistencia [Ω]	→	Reluctancia [Av/Wb]

Ello puede verse, a modo de ejemplo, en el siguiente circuito simple de equivalencia:



Con esto como base, es posible representar el circuito magnético del enunciado de la siguiente manera:



Luego, pueden plantearse las ecuaciones en la única malla del circuito. Como las corrientes circulan en el mismo sentido de giro, entonces las dos fuentes de fuerza magnetomotriz (fuentes de tensión equivalentes) se suman, con lo que:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 - \Phi\mathcal{R}_1 - \Phi\mathcal{R}_2 = 0$$

Como pueden ver, es lo mismo que se aplica en los circuitos eléctricos, con la diferencia que no se trabaja con fuentes de tensión, sino que con fuentes de fuerza magnetomotriz; no se trabaja con corriente, sino que con flujo magnético; y no se trabaja con resistencia, sino que con reluctancia magnética. La reluctancia de una sección de un circuito magnético está dada por la siguiente expresión general:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

donde l corresponde al largo medio de la sección, A corresponde al área del corte transversal de la sección (debe ser la misma área para todo el largo de la sección), y μ es la permeabilidad magnética de la sección del circuito magnético en análisis.

Por tanto, en este ejercicio las reluctancias de las dos secciones son:

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2}$$

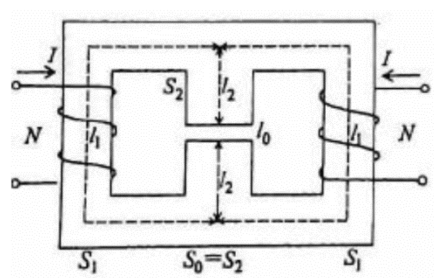
Luego, la ecuación de malla queda como:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 - \Phi \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1} - \Phi \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2} = 0$$

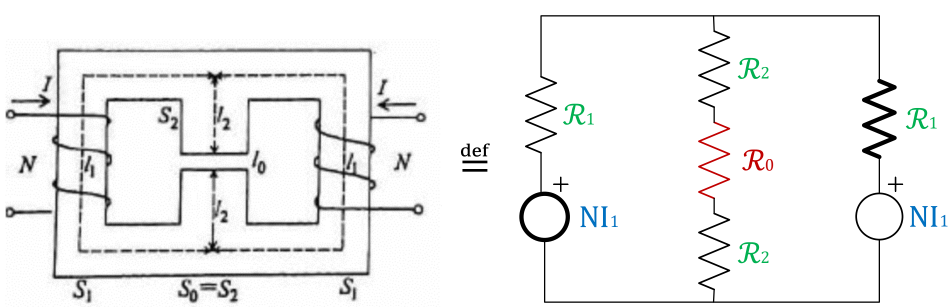
Por lo que, despejando apropiadamente, el flujo magnético a través del circuito es:

$$\Phi = \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{\frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2}}.$$

2) Determine la densidad de flujo magnético en el entrehierro del circuito magnético de la figura. Determine también la densidad de flujo en el entrehierro si se desprecia la reluctancia del fierro.



Lo primero que puede hacerse en este ejercicio es hacer la representación equivalente del circuito magnético, tal como se muestra a continuación:



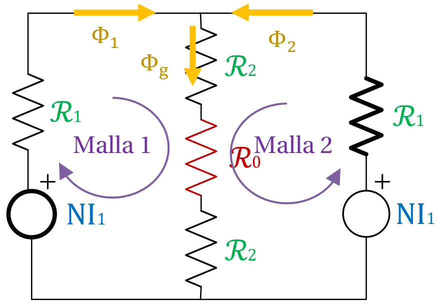
En este caso, la reluctancia de cada sección del circuito magnético está dada por:

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2}$$

$$\mathcal{R}_0 = \frac{l_0}{\mu_0 \cdot S_2}$$

Para determinar el flujo magnético en cada sección del núcleo es necesario usar la ley de Kirchhoff de tensión, aplicable a caídas de fuerza magnetomotriz:



$$\Phi_g = \Phi_1 + \Phi_2$$

En la malla 1, se tiene que:

$$NI_1 = \mathcal{R}_1\Phi_1 + \mathcal{R}_2\Phi_g + \mathcal{R}_0\Phi_g + \mathcal{R}_2\Phi_g$$

Como $\Phi_g = \Phi_1 + \Phi_2$, entonces:

$$NI_1 = \mathcal{R}_1\Phi_1 + \mathcal{R}_2(\Phi_1 + \Phi_2) + \mathcal{R}_0(\Phi_1 + \Phi_2) + \mathcal{R}_2(\Phi_1 + \Phi_2)$$

Agrupando en función de las variables (flujo magnético), se tiene que:

$$NI_1 = \Phi_1(\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0) + \Phi_2(2\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0) \qquad (2-1)$$

Haciendo lo mismo con la malla 2, se llega a que:

$$NI_1 = \Phi_2(\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0) + \Phi_1(2\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0) \qquad (2-2)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones conformado por (2-1) y (2-2), se obtiene que:

$$\Phi_1 = \Phi_2 \qquad (2-3)$$

$$\Phi_1 = \frac{NI_1}{\mathcal{R}_1 + 4\mathcal{R}_2 + 2\mathcal{R}_0} \qquad (2-4)$$

$$\Phi_g = 2\frac{NI_1}{\mathcal{R}_1 + 4\mathcal{R}_2 + 2\mathcal{R}_0} \qquad (2-5)$$

Reemplazando los valores de reluctancia del circuito magnético en (2-4), se llega a que:

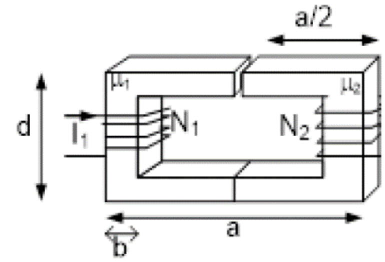
$$\Phi_g = \frac{2NI_1}{\frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1} + 4\frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2} + 2\frac{l_0}{\mu_0 \cdot S_2}} \qquad (2-6)$$

En caso de despreciarse la reluctancia del fierro (vale decir, que la permeabilidad magnética del núcleo tiende a infinito), entonces en las ecuaciones (2-4) y (2-5) se tendría que R_1 y R_2 son cero, con lo cual se tiene que:

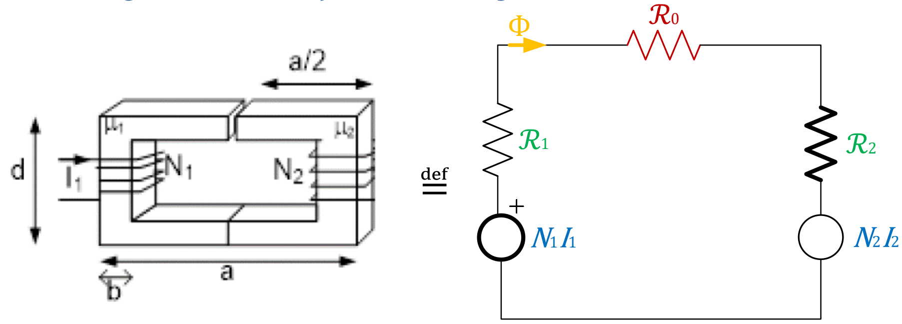
$$\Phi_{g,\mu\to\infty} = \frac{NI_1 l_0}{\mu_0 \cdot S_2} \qquad (2-7)$$

Al despreciarse la reluctancia del núcleo, el flujo magnético resultante en la zona de entrehierro es consecuentemente mayor que el del caso con reluctancia finita.

3) Se tiene el circuito magnético de la figura. Las dos mitades de este están hechas de distintos materiales con distintas permeabilidades. El largo medio del entrehierro es **lg** [m] y la sección transversal es la misma en los dos materiales y el entrehierro. Calcular la intensidad de campo magnético en el entrehierro asumiendo que **a >> lg** y **d >> lg.**



En el enunciado se menciona que el largo del entrehierro es mucho más pequeño que las dimensiones del núcleo ferromagnético, por lo que no puede asumirse que toda la fuerza magnetomotriz cae en el entrehierro (y, por tanto, no se puede despreciar la caída de fuerza magnetomotriz en el núcleo). En virtud de ello, la representación equivalente del circuito magnético de este ejercicio es el siguiente:



En la figura mostrada en el enunciado no se muestra la circulación de la corriente, por lo que no puede determinarse la polaridad de la fuente de fuerza magnetomotriz dada por N_2I_2. Luego de aplicar la ley de Kirchoff de tensión en la malla del circuito equivalente, se tiene que:

$$N_1I_1 \pm N_2I_2 = \mathcal{R}_1\Phi + \mathcal{R}_0\Phi + \mathcal{R}_2\Phi$$

donde:

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S} = \frac{d + a - 2b - l_g}{\mu_1 \cdot S}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S} = \frac{d + a - 2b - l_g}{\mu_2 \cdot S}$$

$$\mathcal{R}_0 = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot S}$$

Despejando, se tiene que el flujo magnético que se establece en cualquier sección transversal de

$$\Phi = \frac{N_1 I_1 \pm N_2 I_2}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0}$$

Por último, asumiendo que la densidad de flujo magnético incide de manera perpendicular en cualquier sección transversal del núcleo, se tiene que:

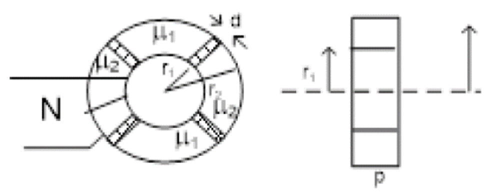
$$\Phi = \Phi_g = B_g S = \mu_0 H_g S = \frac{N_1 I_1 \pm N_2 I_2}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0}$$

Despejando:

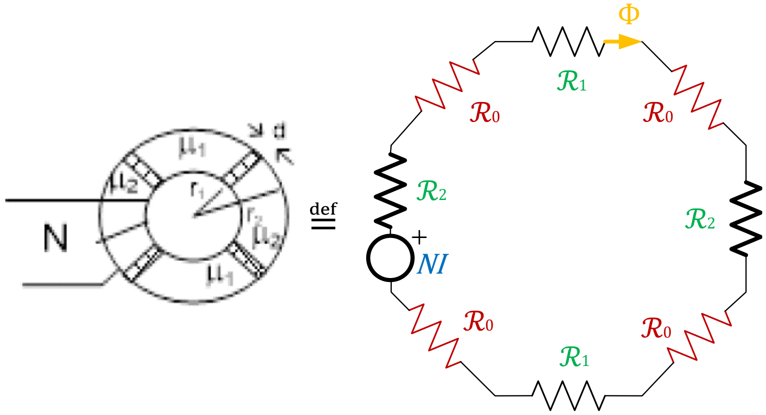
$$H_g = \frac{N_1 I_1 \pm N_2 I_2}{\mu_0 S(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_0)}$$

Esta es una manera de plantear y resolver este ejercicio. Si se plantea un loop amperiano en el circuito magnético, se puede resolver este ejercicio llegando al mismo resultado.

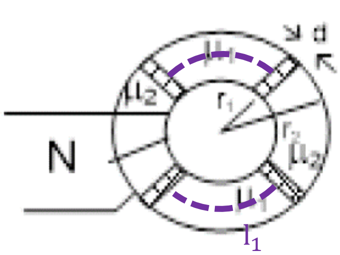
4) Un toroide está hecho de dos materiales distintos con cuatro entrehierros pequeños como se muestra en la figura. Si una bobina de **N** vueltas lleva una corriente **I** [A] es colocada sobre el toroide, calcular la densidad de flujo magnético en los entrehierros.



Al igual que en los casos anteriores, lo primero que puede hacerse en este ejercicio es hacer la representación equivalente del circuito magnético, tal como se muestra a continuación (asumiendo la dirección de la fuente de fuerza magnetomotriz:



La reluctancia ($\mathcal{R}$) de cada sección está dada por su permeabilidad, largo medio y sección transversal, lo cual se puede obtener a partir de lo mostrado en la figura del enunciado. Si se asume que las cuatro secciones de fierro son iguales entre sí, entonces:



$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S}$$

$$\mathcal{R}_0 = \frac{d}{\mu_0 \cdot S}$$

donde

$$l_1 = l_2 = \frac{1}{4} \cdot 2\pi \left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) - d,$$

y

$$S = p \cdot (r_2 - r_1).$$

Aplicando la ley de Kirchhoff de tensión al circuito equivalente se tiene que:

$$NI = \Phi(2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + 4\mathcal{R}_0)$$

Luego, el flujo magnético en cada sección del circuito magnético se puede obtener a través de despeje:

$$\Phi = \frac{NI}{2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + 4\mathcal{R}_0}$$

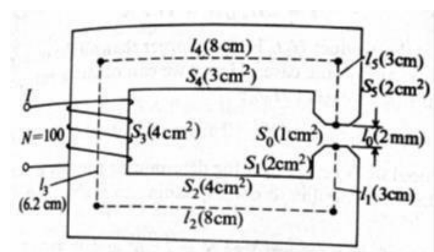
Por último, si se asume que el campo magnético es uniforme tanto al interior del núcleo ferromagnético como en el entrehierro y perpendicular a su sección transversal, entonces:

$$\Phi = \mathrm{B_{gap}} \cdot S = \frac{NI}{2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + 4\mathcal{R}_0}$$

Despejando:

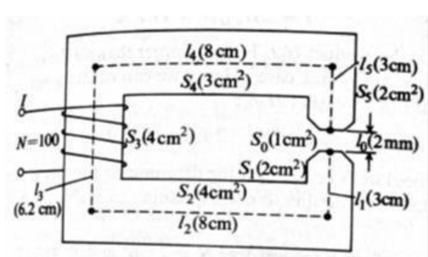
$$\mathrm{B_{gap}} = \frac{NI}{S(2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + 4\mathcal{R}_0)}$$

5) Si una corriente de intensidad **I = 5 [A]** fluye a través de la bobina enrollada en el núcleo ferromagnético de la figura, determine la densidad de flujo magnético **B_0** en el entrehierro. (ignore el flujo de dispersión).

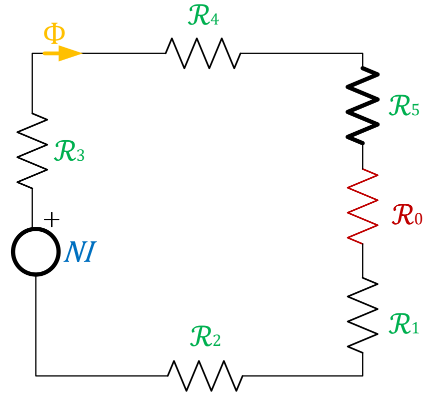


Este ejercicio no presenta el valor de la permeabilidad magnética del núcleo, por lo que pueden plantearse las ecuaciones de manera algebraica, asumiendo una permeabilidad del núcleo igual a u_{fe}, o bien puede usarse un valor típico de pemeabilidad relativa de núcleos magnéticos en la zona lineal de su curva B-H ($\mu_r = 2000$ si se considera acero dulce, o $\mu_r = 5000$ si se considera hierro con impurezas). En esta resolución, se plantea el ejercicio de manera algebraica.

La representación equivalente del circuito magnético de este ejercicio se muestra a continuación:



$\stackrel{\mathrm{def}}{=}$



La reluctancia de cada sección del circuito magnético está dada por:

$$\mathcal{R}_0 = \frac{l_0}{\mu_0 \cdot S_0} \approx 1.5915 \cdot 10^7 \ [\mathrm{H}^{-1}]$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_{\mathrm{fe}} \cdot S_1} = \frac{150}{\mu_{\mathrm{fe}}}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_{\mathrm{fe}} \cdot S_2} = \frac{200}{\mu_{\mathrm{fe}}}$$

$$\mathcal{R}_3 = \frac{l_3}{\mu_{\mathrm{fe}} \cdot S_3} = \frac{155}{\mu_{\mathrm{fe}}}$$

$$\mathcal{R}_4 = \frac{l_4}{\mu_{\mathrm{fe}} \cdot S_4} \approx \frac{266.67}{\mu_{\mathrm{fe}}}$$

$$\mathcal{R}_5 = \frac{l_5}{\mu_{\mathrm{fe}} \cdot S_5} = \frac{150}{\mu_{\mathrm{fe}}}$$

Luego, planteando la ley de Kirchhoff de tensión en el circuito equivalente, se tiene que:

$$NI = \Phi(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5 + \mathcal{R}_0)$$

$$500[\text{A-vuelta}] \approx \Phi\left(\frac{921.67}{\mu_{\mathrm{fe}}}[\mathrm{m}^{-1}] + 1.5915 \cdot 10^7 \ [\mathrm{H}^{-1}]\right)$$

Despejando el flujo magnético:

$$\Phi \approx \frac{500[\text{A-vuelta}]}{\frac{921.67}{\mu_{\mathrm{fe}}}[\mathrm{m}^{-1}] + 1.5915 \cdot 10^7 \ [\mathrm{H}^{-1}]}$$

Asumiendo que el campo magnético es uniforme en el entrehierro y perpendicular a su sección transversal, entonces:

$$\Phi = \mathrm{B}_{\mathrm{gap}} \cdot S_{gap} = \frac{500[\text{A-vuelta}]}{\frac{921.67}{\mu_{\mathrm{fe}}}[\mathrm{m}^{-1}] + 1.5915 \cdot 10^7 \ [\mathrm{H}^{-1}]}$$

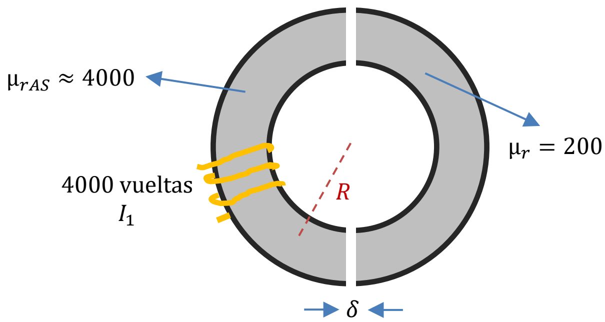
Despejando:

$$\mathrm{B}_{\mathrm{gap}} = \frac{500[\text{A-vuelta}]}{10^{-4}[\mathrm{m}^{-2}]\left(\frac{921.67}{\mu_{\mathrm{fe}}}[\mathrm{m}^{-1}] + 1.5915 \cdot 10^7 \ [\mathrm{H}^{-1}]\right)}$$

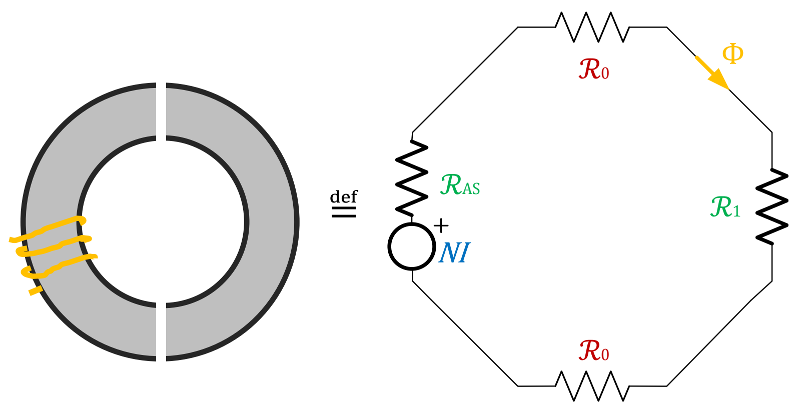
Conociendo el valor de μ_{fe} se puede determinar el valor preciso de $\mathrm{B}_{\mathrm{gap}}$. A modo de ejemplo, si se evalúa la permeabilidad magnética en la zona lineal del acero dulce, la densidad de flujo magnético en el entrehierro sería de $0.31[\mathrm{T}]$ aproximadamente.

6) Un núcleo toroidal tiene una sección transversal de 4cm2 de área. El radio medio del toroide es de 6 cm. Su núcleo está compuesto por dos segmentos semicirculares uno de acero silicoso y el otro de un material con permitividad relativa μ_r =200. Considerando que en las dos uniones entre los segmentos hay un entrehierro de 0.4 mm, y que sobre este núcleo se enrolla una bobina de 4000 vueltas que lleva una corriente I_1. a) Encontrar la magnitud de dicha corriente si se quiere lograr una densidad de flujo magnético de 1.2 T. b) Encontrar la densidad de flujo magnético en el núcleo si I_1 = -3 A.

En la figura, se muestra el esquema de la situación magnética presentada en el enunciado. Una mitad del núcleo es de acero silicoso (cuya permeabilidad magnética relativa se estima en 4000 para efectos prácticos) y la otra mitad es de un material con permeabilidad relativa igual a 200.



Al igual que en los casos anteriores, esta situación magnétostática puede representarse mediante un circuito equivalente, tal como se muestra a continuación:



En este caso, la reluctancia de cada sección del circuito magnético está dada por:

$$\mathcal{R}_0 = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S} \approx 7.9577 \cdot 10^5\ [\mathrm{H}^{-1}]$$

$$\mathcal{R}_{AS} = \frac{l_{AS}}{\mu_{r\mathrm{AS}}\mu_0 \cdot S} = \frac{\pi R - \delta}{4000\mu_0 \cdot S} \approx 9.3551 \cdot 10^4\ [\mathrm{H}^{-1}]$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_r \mu_0 \cdot S} = \frac{\pi R - \delta}{200\mu_0 \cdot S} \approx 1.8710 \cdot 10^6\ [\mathrm{H}^{-1}]$$

Luego, planteando la ley de Kirchhoff de tensión en el circuito equivalente, se tiene que:

$$NI_1 = \Phi(2\mathcal{R}_0 + \mathcal{R}_{AS} + \mathcal{R}_1)$$

Reemplazando los valores ya calculados y obviando las unidades para facilitar la lectura:

$$4000 I_1 \approx \Phi(3.5561 \cdot 10^6)$$

Asumiendo que el campo magnético es uniforme en el entrehierro y perpendicular a su sección transversal, entonces el flujo en la zona de entrehierro puede considerarse como $\Phi = \mathrm{B_{gap}} \cdot S_{gap}$, y:

$$4000 I_1 \approx \mathrm{B_{gap}} \cdot S_{gap}(3.5561 \cdot 10^6)$$

Luego, reemplazando $S_{gap} = 4[cm^2]$:

$$4000 I_1 \approx \mathrm{B_{gap}}(1422.44)$$

a) En caso de que se requiera una densidad de flujo en la zona de entrehierro de $1.2[\mathrm{T}]$, entonces la corriente que se debe inyectar en la bobina debe ser:

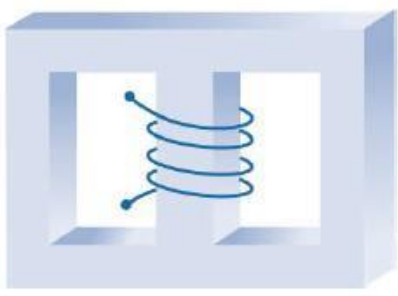
$$I_1 \approx 427\ [\mathrm{mA}]$$

b) En caso de que la corriente que circula por la bobina sea de $3[\mathrm{A}]$, entonces la densidad de flujo que se establecería en la zona de entrehierro corresponde a:

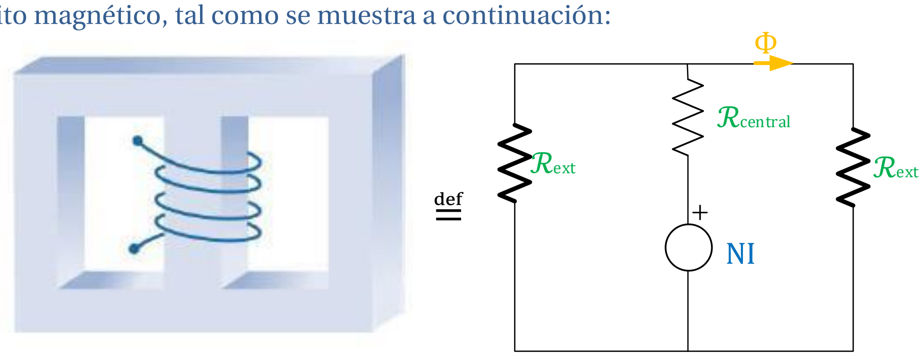
$$B_{\mathrm{gap}} \approx 8.4362[\mathrm{T}]$$

Este valor de densidad de flujo es extremadamente alto, por lo que en la realidad se obtendría un núcleo ferromagnético saturado, y un valor de B_{gap} menor o similar a $2[\mathrm{T}]$.

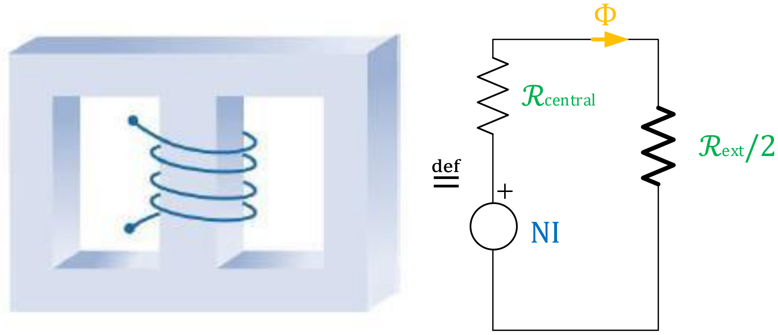
7) Para valores de B por debajo del codo de saturación en la curva de histéresis del fierro silicoso se puede aproximar que su permeabilidad es m= 5 mH/m. Considerando que se tiene el núcleo ferromagnético de la figura, el que tiene en sus piernas exteriores una sección transversal de 1.6 cm2, y 10 cm de largo medio; y una sección transversal de 2.5 cm2 y 3 cm de largo medio en la pierna central. Si se instala una bobina de 1200 vueltas de alambre que lleva una corriente de 12 mA; encontrar la densidad de flujo magnético en a) la pierna central, b) en la pierna central si un entrehierro de 0.3 mm se le agrega a esta.



Al igual que en los casos anteriores, lo primero que puede hacerse en este ejercicio es hacer la representación equivalente del circuito magnético, tal como se muestra a continuación:



Simplificando el circuito equivalente, se obtiene lo siguiente:



En este caso, la reluctancia de cada sección del circuito magnético está dada por:

$$\mathcal{R}_{central} = \frac{l_{central}}{\mu_{fe} \cdot S_{central}} = 2.4 \cdot 10^4 \ [\mathrm{H}^{-1}]$$

$$\mathcal{R}_{ext} = \frac{l_{ext}}{\mu_{fe} \cdot S_{ext}} = 1.25 \cdot 10^5 \ [\mathrm{H}^{-1}]$$

Luego, planteando la ley de Kirchhoff de tensión en el circuito equivalente, se tiene que:

$$NI = \Phi \left(\mathcal{R}_{central} + \frac{\mathcal{R}_{ext}}{2} \right)$$

Asumiendo que el campo magnético en la pierna central es uniforme y perpendicular a su sección transversal, entonces el flujo en la pierna central puede considerarse como $\Phi = \mathrm{B}_{central} \cdot S_{central}$, y:

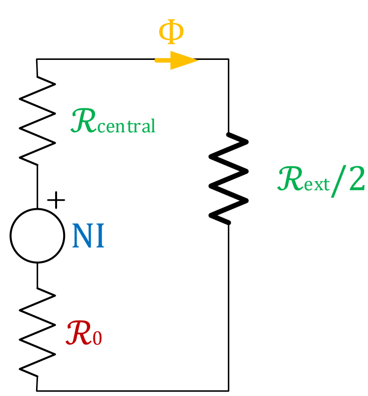
$$NI = \mathrm{B}_{central} \cdot S_{central} \left(\mathcal{R}_{central} + \frac{\mathcal{R}_{ext}}{2} \right)$$

Despejando:

$$a) \ \mathrm{B}_{central} = \frac{NI}{S_{central} \left(\mathcal{R}_{central} + \frac{\mathcal{R}_{ext}}{2} \right)} \approx 0.666 [\mathrm{T}]$$

Solo por si acaso, anulo cualquier maldición electromagnética

En el caso de agregar un entrehierro en la zona central, el circuito equivalente adoptaría la siguiente forma:



Repitiendo la metodología usada en el caso a), se llega a que:

$$b)\ \mathrm{B}_{\text{central,gap}} = \frac{NI}{S_{\text{central}}\left(\mathcal{R}_{\text{central}} + \frac{\mathcal{R}_{\text{ext}}}{2} + \mathcal{R}_0\right)},$$

donde

$$\mathcal{R}_0 = \frac{l_0}{\mu_0 \cdot S_{\text{central}}} \approx 9.5493 \cdot 10^5\ [\mathrm{H}^{-1}]$$

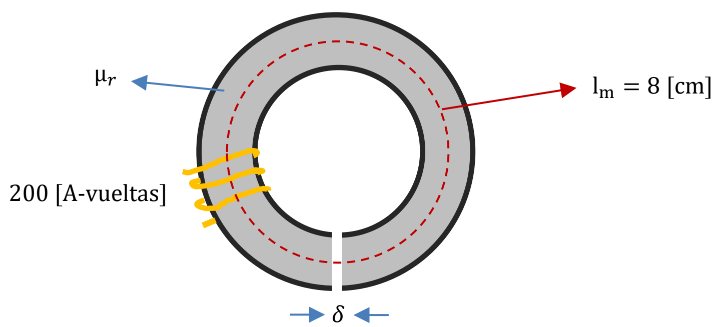
Luego:

$$\mathrm{B}_{\text{central,gap}} \approx 55.3\ [\mathrm{mT}]$$

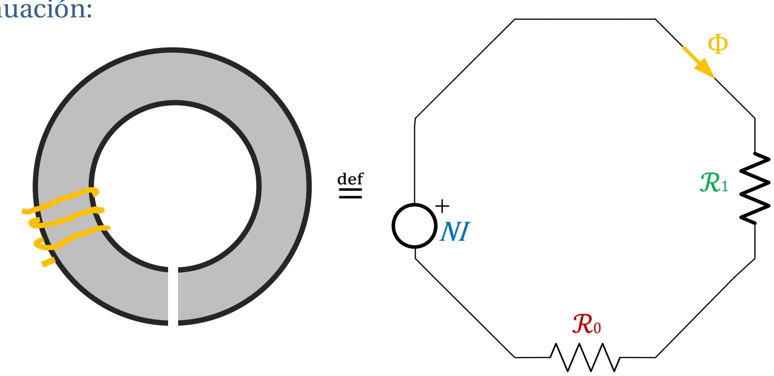
La adición del entrehierro en la pierna central disminuye drásticamente la densidad de flujo magnético en ella, producto de la alta reluctancia extra en el circuito magnético.

8) Un toroide es construido con un material magnético que tiene una sección transversal de 2.5 cm^2 y largo medio de 8 cm, y en este hay un pequeño entrehierro de 0.25 mm de largo y 2.8 cm^2 de sección transversal. Si una fuerza magnetomotriz de 200 A-vuelta es aplicada al núcleo; calcular el flujo total en el toroide si a) el material del núcleo tiene permeabilidad infinita, b) el material tiene una permeabilidad relativa μ_r = 100

En la figura, se muestra el esquema de la situación magnética presentada en el enunciado. Una mitad del núcleo es de acero silicoso (cuya permeabilidad magnética relativa se estima en 4000 para efectos prácticos) y la otra mitad es de un material con permeabilidad relativa igual a 200.



Esta situación magnétostática puede representarse mediante un circuito equivalente (*simple, por lo demás*), tal como se muestra a continuación:



En este caso, la reluctancia de cada sección del circuito magnético está dada por:

$$\mathcal{R}_0 = \frac{l_0}{\mu_0 \cdot S_0} \approx 7.1051 \cdot 10^5 \text{ [H}^{-1}\text{]}$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_\mathrm{m}}{\mu_\mathrm{fe} \cdot S_\mathrm{fe}} = \frac{320}{\mu_\mathrm{fe}} \text{[m}^{-1}\text{]}$$

Luego, planteando la ley de Kirchhoff de tensión en el circuito equivalente, se tiene que:

$$NI = \Phi(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)$$

$$200\text{[Av]} \approx \Phi\left(\frac{320}{\mu_\mathrm{fe}}\text{[m}^{-1}\text{]} + 7.1051 \cdot 10^5 \text{ [H}^{-1}\text{]}\right)$$

Despejando:

$$\Phi \approx \frac{200\text{[Av]}}{\left(\frac{320}{\mu_\mathrm{fe}}\text{[m}^{-1}\text{]} + 7.1051 \cdot 10^5 \text{ [H}^{-1}\text{]}\right)}$$

a) Si se considera que el núcleo tiene permeabilidad infinita, entonces:

$$\Phi_a \approx \frac{200\text{[Av]}}{(7.1051 \cdot 10^5 \text{ [H}^{-1}\text{]})} \approx 2.81 \cdot 10^{-4} \text{ [Wb]}$$

b) Si se considera que el núcleo tiene permeabilidad magnética relativa igual a 100, entonces:

$$\Phi_b \approx \frac{200\text{[Av]}}{\left(\frac{320}{100\mu_0}\text{[m}^{-1}\text{]} + 7.1051 \cdot 10^5 \text{ [H}^{-1}\text{]}\right)} \approx 6.14 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

Cualquier consulta o corrección la pueden hacer llegar a carlosmadariaga@udec.cl. Responderé en la medida de lo posible.