La expresión 2.24 es el análogo de la ley de Ohm, para los circuitos magnéticos:

$$\phi = \frac{F_{mm}}{\mathcal{R}} \quad \sim \quad I = \frac{F_{em}}{R}$$

La expresión 2.24 no resulta de gran utilidad cuando μ depende de β (es decir, la relación entre β y H no es lineal), como en el caso de los materiales ferromagnéticos. Sin embargo, es de importancia conceptual y debe comprenderse cabalmente.

2.6 CALCULO DE CIRCUITOS MAGNETICOS

En este artículo se estudiará la aplicación de las leyes expuestas al cálculo de circuitos magnéticos. La metodología a seguir será la de resolver ejemplos de determinados casos tipo, de suficiente generalidad, haciendo uso de la analogía entre los circuitos eléctricos y magnéticos. En la solución de los ejemplos se utilizará de preferencia el sistema MKS racionalizado,(RMKS), a fin de mantener la atención sobre los métodos de cálculo. Sin embargo, la solución de un problema de circuitos magnéticos en cualquier sistema de unidades no es complicada utilizando la tabla I.

2.6.1 CIRCUITO MAGNETICO SERIE CON SECCION RECTA CONSTANTE (CASO # 1).

La fuerza magnetomotriz de la bobina establece un flujo en el circuito magnético. Aplicando la ley de Ampere:

$$F_{mm} = \Sigma U$$

Siendo la sección del material constante y circulando el mismo flujo por cada sección del circuito, puede considerarse constante la densidad de flujo media en cualquier sección. Si β es constante, y todo el circuito está compuesto del mismo mate-

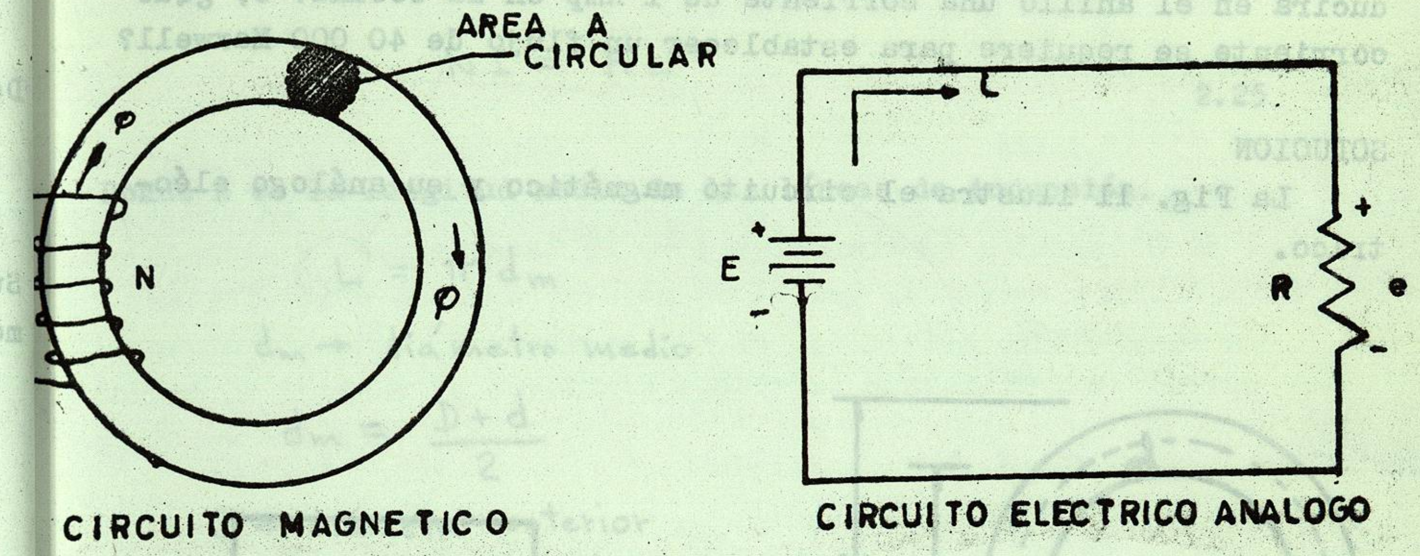


Fig. 10 Circuito magnético serie con sección recta constante.

rial (misma μ en todo punto), entonces H es constante; de ahí

$$F_{mm} = \Sigma U$$
$$\Rightarrow \quad NI = HL$$

Siendo L la longitud media del circuito magnético (Fig. 10).

EJEMPLO 1

Se tiene un anillo de sección recta circular uniforme, con un diámetro interno de 15 cm y un diámetro externo de 20 cm. El anillo está hecho de acero laminado en frío, siendo su curva de imanación la curva # 4 de las Figs. 27 y 28, Cap. 1. Se devana sobre el anillo una bobina de 1 200 espiras. a) ¿Qué flujo producirá en el anillo una corriente de 1 Amp en la bobina? b) ¿Qué corriente se requiere para establecer un flujo de 40 000 Maxwell?

SOLUCION

La Fig. 11 ilustra el circuito magnético y su análogo eléctrico.

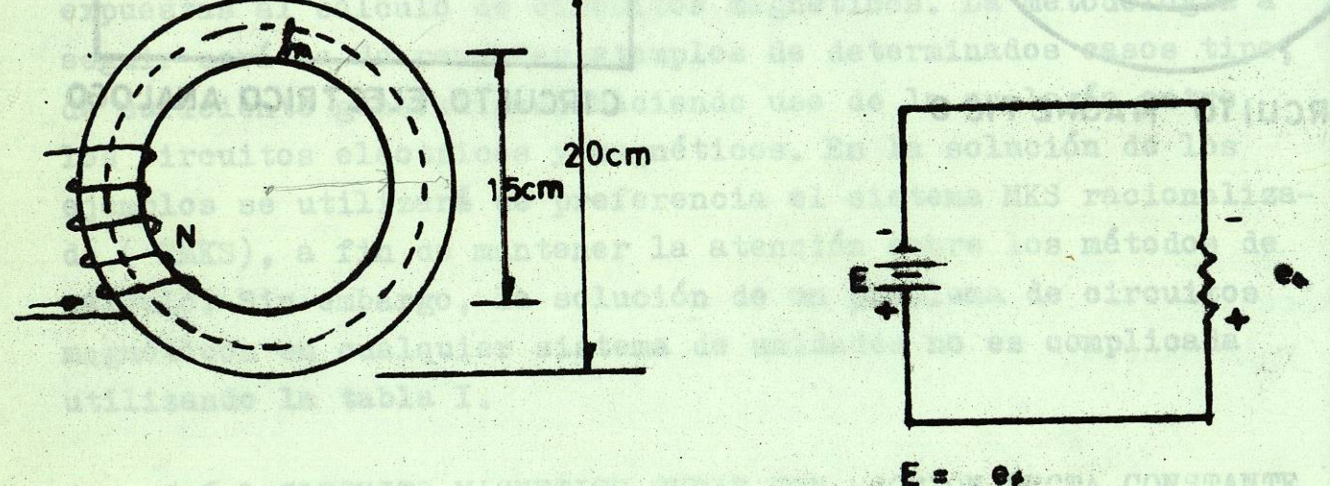


Fig. 11

a)

$$F_{mm} = NI$$

$$= 1200\ (1) = 1200\ \text{A-v}$$

Para obtener ϕ debe conocerse β. A su vez, β se obtiene de la curva de imanación del material, en la cual, a cada

valor de H corresponde un solo valor de β.

H se obtiene aplicando la ley circuital de Ampere y la definición de caída de Fmm. Siendo constante la sección del circuito magnético y del mismo material:

$$F_{mm} = \Sigma\, U$$

$$\boxed{NI = HL} \qquad 2.25$$

Donde L es la longitud media de las líneas de inducción.

$$L = \pi\, d_m$$

$d_m \rightarrow$ diámetro medio

$$d_m = \frac{D+d}{2}$$

$D \rightarrow$ diámetro exterior

$d \rightarrow$ " interior

$$L = \pi \left(\frac{20+15}{2}\right)$$

$$= 54.98\ \text{cm} = \boxed{0.5498\ \text{m}}$$

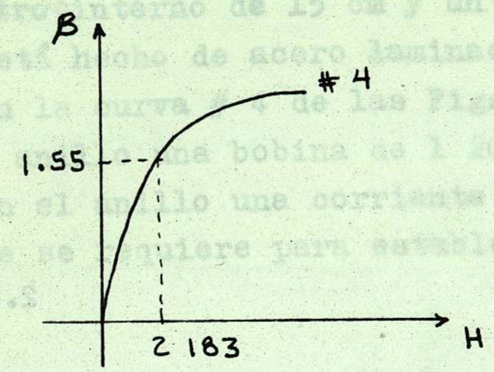
Substituyendo valores en 2.25:

$$1200 = (0.5498)\ H$$

$$H = 2\,183\ \frac{\text{A-v}}{\text{m}}$$

$$= 2\,183\ \text{Lenz}$$

De la curva de imanación del acero laminado (curva # 4, Fig. 27,Cap. I).

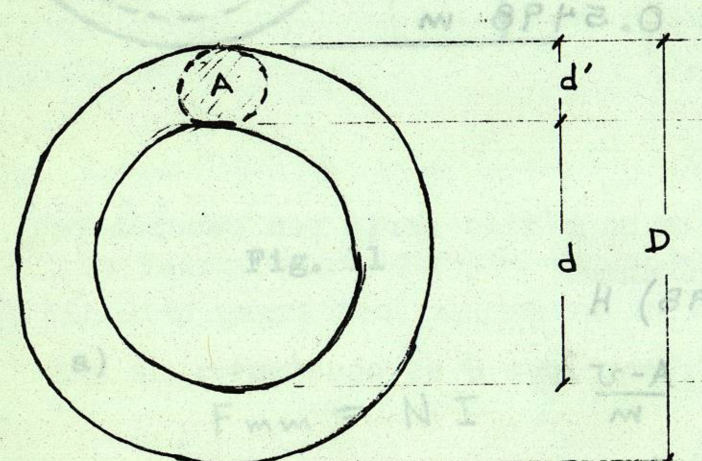


$$\beta \approx 1.55 \text{ Tesla} = 1.55 \ Wb/m^2$$

$$\beta = \frac{\phi}{A}$$

$$\phi = \beta A \qquad 2.26$$

Siendo A el área de la sección del circuito magnético, definido en este caso como la sección del anillo toroidal:



$$d' = \frac{D-d}{2}$$

d' → diámetro de la secció

$$A = \frac{\pi d'^2}{4} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{D-d}{2}\right)^2$$

$$= \frac{\pi}{16}(D-d)^2$$

$$= \frac{\pi}{16}(20-15)^2$$

$$= 4.91 \ cm^2$$

Subst. en 2.26, utilizando unidades del RMKS:

$$\phi = 1.55\ (4.91 \times 10^{-4})$$

$$= 7.61 \times 10^{-4} \ Wb$$

$$1 \ Wb = 10^8 \ Maxwell$$

$$\Rightarrow \ \phi = 76\ 100 \ \ Maxwell \qquad *$$

b) I=?, si ϕ = 40 000 Max.

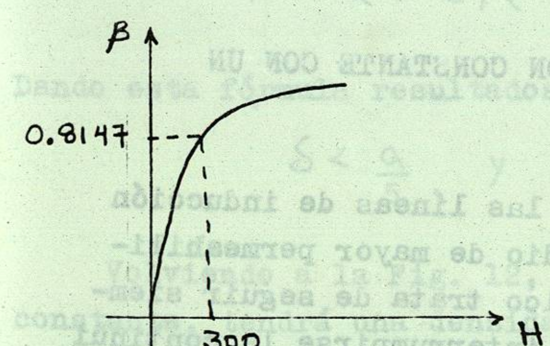
Con el valor de ϕ se obtiene β. De la Fig. 27, Cap I, se obtiene H, con el valor de β. Aplicando la definición de U y substituyendo en la expresión de la ley de Ampere (Ec. 2.25) se obtiene la Fmm. Finalmente, de la definición de Fmm para una bobina se obtiene la corriente eléctrica necesaria para lograr el flujo exigido.

$$\beta = \frac{\phi}{A} = \frac{40\ 000 \ Max}{4.91 \ cm^2} = 8\ 147 \ gauss$$

$$1 \ Tesla = 10^4 \ gauss$$

$$\Rightarrow \ \beta = 0.8147 \ Tesla$$

De la curva # 4:



$$H \approx 300 \ Lenz$$

$$U = H L$$

$$= 300\ (0.5498) = 165 \ \text{A-v}$$

$$F_{mm} = \Sigma U$$

$$NI = U$$

$$I = \frac{U}{N}$$

$$= \frac{165}{1200} = 0.137 \ \text{Amp.} \ *$$

que es la corriente necesaria para producir un flujo de 40 000 Max. en el anillo toroidal.

xxx

Nótese en el ejemplo anterior que, el reducir el flujo a poco más de la mitad, incidió en una reducción de la corriente a 1/7 de su valor inicial. Quedando en relieve el efecto de saturación que experimentan los materiales ferromagnéticos. Así, cuando el material trabaja cerca de saturación, es necesario "invertir" una cantidad mayor de fuerza magnetomotriz para aumentar en forma considerable el flujo.

2.6.2 CIRCUITO MAGNETICO DE SECCION CONSTANTE CON UN ENTREHIERRO INTERCALADO (CASO # 2).

Como ya se comentó anteriormente, las líneas de inducción se establecen preferentemente en el medio de mayor permeabilidad; puede decirse que el flujo magnético trata de seguir siempre el camino de menor reluctancia. Al interrumpirse la continuidad de material ferromagnético por la presencia de un entrehierro

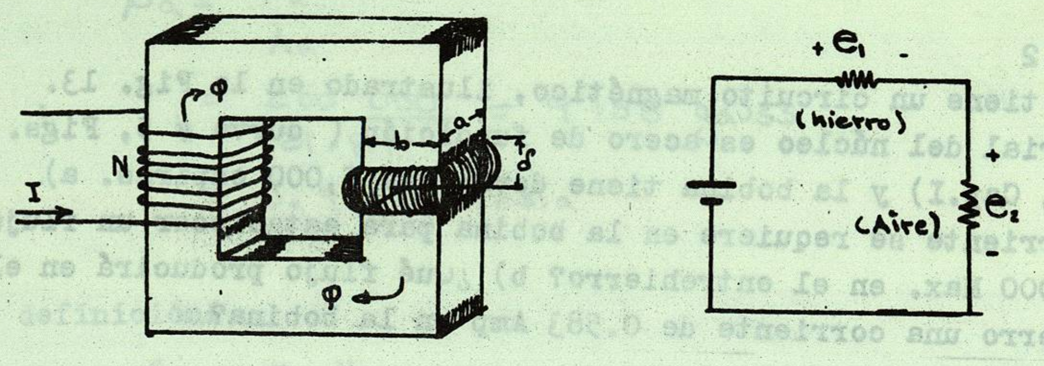


Fig. 12 Circuito magnético con entrehierro.

(en el cual hay aire o cualquier otro medio de baja permeabilidad) las líneas de inducción se dispersan, tratando de cubrir una mayor área transversal y disminuir así la reluctancia de la trayectoria (a mayor área transversal, menor reluctancia: $\mathbb{R} = \frac{1}{\mu}\, \ell/A$). Al flujo que sobresale de las esquinas del material ferromagnético se le denomina FLUJO DISPERSO.

La distribución del flujo de dispersión en el entrehierro es difícil de determinar, utilizándose métodos experimentales y gráficos. Para entrehierros cortos, si el núcleo tiene iguales dimensiones transversales en ambas caras del entrehierro (Fig. 12), se supone un entrehierro equivalente que tiene una longitud δ igual a la del entrehierro verdadero, pero que tiene un área de la sección recta:

$$A = (a+\delta)\,(b+\delta) \qquad 2.27$$

Dando esta fórmula resultados aceptables si:

$$\delta < \frac{a}{5} \quad \text{y} \quad \delta < \frac{b}{5}$$

Volviendo a la Fig. 12, dado que el hierro es de sección constante, tendrá una densidad de flujo constante en su interior y en consecuencia un campo magnético constante en toda su longitud. El circuito equivalente estará formado por dos resistencias,