

TK 25  
B4

En la tabla II se resumen los conceptos análogos entre un sistema eléctrico y magnético. ( véase la Pág. 364 ).

### 2.3 RELACIONES PARA EL CALCULO DE CIRCUITOS MAGNETICOS

#### 2.3.1 EL FLUJO MAGNETICO ( $\phi$ )

El flujo magnético, bajo condiciones de excitación constante, tiende a confinarse en las trayectorias o caminos de mayor permeabilidad. Es decir, se reducirá a ocupar aquel medio que le ofrezca la menor resistencia. El comportamiento anterior es semejante al de una corriente eléctrica, bajo las mismas condiciones, presente en un circuito resistivo; ya que ésta tratará de circular por los caminos de mayor conductibilidad. Así, se manejará al flujo magnético como si se tratase de una corriente eléctrica a través de un circuito eléctrico. Se utilizarán conceptos análogos a los que se utilizan para el análisis de redes eléctricas, que se demostrarán a partir de las leyes del magnetismo.

Pérdida de Flujo. - Este fenómeno se comprenderá mejor al analizar el caso de la Fig. 4. En el caso eléctrico, la conductibilidad del aislante ( goma ) es unas  $10^{20}$  veces menor que la del cobre. De lo anterior se deduce que la corriente de conducción por el material aislante es despreciable en comparación a la que circula por los conductores.

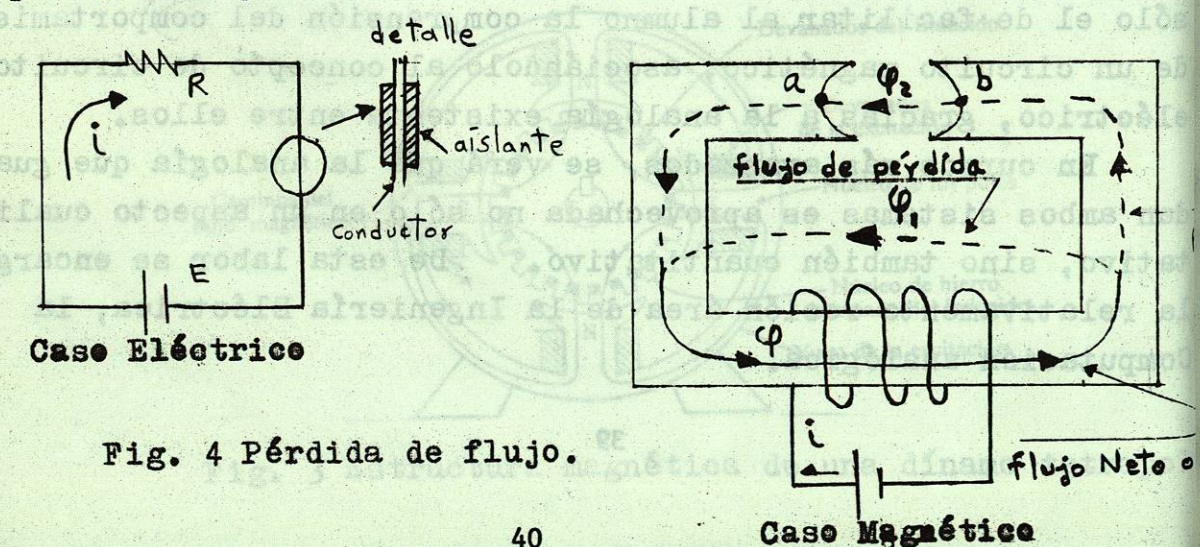


Fig. 4 Pérdida de flujo.

En el caso magnético, lo idóneo sería que la totalidad del flujo quedase confinada al material ferromagnético, como ocurre con la corriente en el caso anterior. Sin embargo, esto no es posible lograrlo, ya que el aire, que es el aislante magnético utilizado en la práctica, posee una permeabilidad de unas  $10^4$  a 100 veces menor que la de los materiales ferromagnéticos, por lo que el contraste entre la permeabilidad del aire y la del material ferromagnético no es muy grande. Así, pues, una parte del flujo neto tenderá a establecerse a través del aire provocando que sólo una parte circule por el tramo a-b, tal como se muestra en la Fig. 4. A lo anterior se le conoce como PERDIDA DE FLUJO.

En los análisis siguientes, se despreciará el fenómeno anterior, pero debe aclararse que es un problema que siempre se trata de aminorar en el proyecto de dispositivos magnéticos.

#### 2.3.2 DENSIDAD DE FLUJO ( $\beta$ )

En el cálculo de circuitos magnéticos no es de interés conocer el vector B para cada uno de los puntos del material, sino que es más conveniente determinar la densidad de flujo media en la sección transversal de interés.

La densidad de flujo media se determinará como la razón del flujo magnético  $\phi$ , a través de esa sección, al área A de la misma. En forma analítica:

$$\beta = \frac{\phi}{A} \quad 2.1$$

La relación análoga a la anterior, en un circuito eléctrico sería:

$$J = \frac{i}{A}$$

Siendo J la densidad de corriente en un conductor.



TK 25  
B4

### 2.3.3 FUERZA MAGNETOMOTRIZ ( Fmm )

El concepto análogo de fuerza electromotriz ( Fem ) es el de fuerza magnetomotriz, utilizado en los circuitos magnéticos. Así como se requiere de una Fem para hacer circular una corriente en un sistema eléctrico, en forma análoga, se precisa de una fuerza tomotriz para establecer un flujo magnético en una región.

En un sistema eléctrico, la fuente de energía que excita a un sistema puede ser: una batería, un generador, o cualquier otro dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial. En un sistema electromagnético, la fuente excitatriz, por lo común, es un devanado ( bobina ) por lo que se hace circular una corriente eléctrica. Este es el caso de dispositivos como los transformadores, motores eléctricos, relevadores, etc.

La fmm que un devanado proporcionará, estará dada por el producto de la intensidad de corriente  $i$  que circula por él, y el número de espiras ( vueltas )  $N$  que éste devanado posea. En forma analítica:

$$F_{mm} = i N \quad 2.2$$

De la Ec. anterior se puede apreciar que las unidades de fmm serán AMPERE-VUELTA. Debe aclararse que la Ec. 2.2 define a la fmm en forma algebraica únicamente para el sistema MKS racionalizado o el Británico Mixto. Para otros sistemas, la Ec. 2.2 sufre las modificaciones indicadas en la tabla I ( Pág. 363 ).

### 2.3.4 CAIDA DE FUERZA MAGNETOMOTRIZ ( U )

Al hacer circular una corriente a través de un elemento de circuito, se producirá en éste una caída de voltaje. En forma análoga, al establecer un flujo magnético a través de un tramo del circuito magnético se tendrá una caída de fuerza magnetomotriz en él.

La caída de fuerza magnetomotriz o diferencia de potencial magnético entre dos puntos  $a$  y  $b$  queda definida en forma

operacional por la siguiente ecuación:

$$U_{a-b} = \int_a^b H \cdot dl \quad 2.3$$

La anterior definición tiene su análogo en un sistema eléctrico, el cual es la diferencia de potencial eléctrico o caída de voltaje; definida por:

$$V_{a-b} = \int_a^b E \cdot dl$$

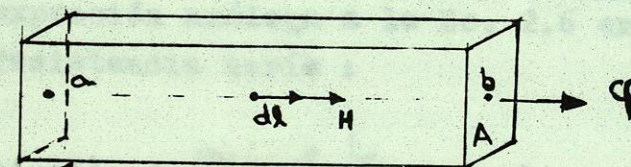
Al tomar como trayectoria de integración para la Ec. 2.3 una línea de inducción, a lo largo de un tramo de material homogéneo y de sección constante, la Ec. 2.3 se reducirá a:

$$U_{a-b} = H \cdot l_{a-b} \quad 2.4$$

y su análogo será:

$$V_{a-b} = E \cdot l_{a-b}$$

La Ec. 2.4 toma esa forma, ya que tanto el vector  $H$  como  $dl$  son tangentes en un punto dado a la línea de inducción, y  $H$  se puede considerar constante a lo largo del tramo de material mencionado, ya que  $\beta$  es constante en él. Fig. 5.



Material homogéneo y área transversal constante

Fig. 5



TK25  
B4

### 2.3.5 INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO ( H )

El campo magnético representa la caída de fuerza magnetomotriz por unidad de longitud del tramo considerado. Lo anterior se deduce al despejar  $H$  de la Ec. 2.4.

$$H = \frac{U}{\ell} \quad 2.5$$

En un circuito magnético formado por tramos de material y sección no uniformes,  $U$  se podrá evaluar por medio de la Ec. 2.5 sólo para tramos homogéneos de sección uniforme en la longitud  $\ell$ . Así, para el sistema ilustrado en la Fig. 6, se calculará  $U$  en forma independiente para cada uno de los tramos A, B, C, tomando en cuenta el tipo de material y espesor del tramo.

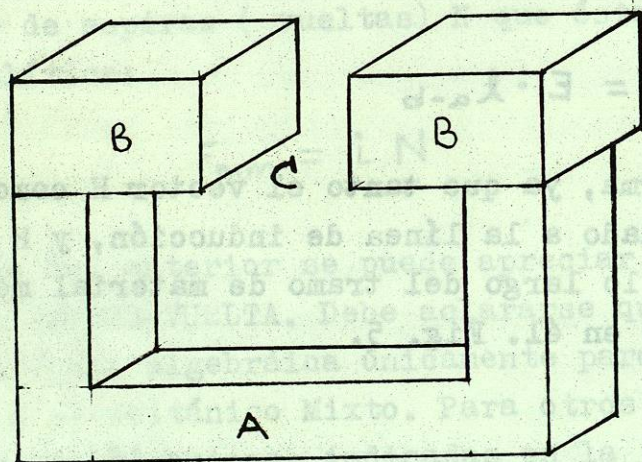


Fig. 6

Una de las relaciones más importantes en el cálculo de circuitos magnéticos es la Ec. 1.11. Para los materiales ferromagnéticos  $\mu$  es una función de la densidad de flujo magnético, es decir, que varía con el valor de  $\beta$  en ese material; mientras que para el aire  $\mu$  toma un valor constante dependiendo del sistema de unidades utilizado. Para utilizar la Ec. 1.11 en presencia de materiales ferromagnéticos, se utilizarán gráficas

$\beta - H$  ( curvas de imanación; Figs. 27 y 28 del Cap. I ).

### 2.3.6 RELUCTANCIA ( $\mathcal{R}$ )

A la oposición que un medio material ofrece a que se establezca en él un flujo magnético se le denomina RELUCTANCIA. En forma analítica se representa como:

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu} \frac{L}{A} \quad 2.6$$

La Ec. 2.6 muestra que la oposición al establecimiento del flujo que presenta un medio es directamente proporcional a su longitud  $L$  y depende inversamente del área transversal  $A$  y la permeabilidad, resultados que concuerdan con el razonamiento físico siguiente: a mayor área transversal, mayor cantidad de flujo y por lo tanto menor oposición (reluctancia); a mayor longitud, mayor caída de fuerza magnetomotriz y por lo tanto mayor oposición.

Aunque la reluctancia no posee unidades específicas aceptadas todavía, se puede decir, observando la Ec. 2.24, que la reluctancia de un circuito magnético es el número necesario de unidades de fuerza magnetomotriz (excitación) por unidad de flujo (respuesta del sistema a esa excitación), utilizando cualquier conjunto de unidades compatibles.

La expresión análoga a la Ec. 2.6 en el sistema eléctrico, para la resistencia sería:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

En donde  $\rho$  representa la resistividad del material del conductor y,  $L$  y  $A$  la longitud y área transversal del conductor respectivamente.