## 2.1.3 Comparación entre circuito magnético y circuito eléctrico

Suele ser muy cómodo y práctico, en ciertos casos, tales como en el estudio de aparatos eléctricos, y, sobre todo, en máquinas eléctricas (transformadores y máquinas rotativas eléctricas) para el estudio cuantitativo de las características magnéticas de los circuitos magnéticos, trabajar con la llamada ***reluctancia***, que es la resistencia magnética que presenta el circuito magnético a dejarse atravesar por el flujo magnético; es decir, es equivalente, la reluctancia, al efecto que la resistencia eléctrica de un conductor presenta al paso de una corriente eléctrica.

Haciendo un simil eléctrico, y aplicando la ley de Ohm (que ahora se denomina ley de Ohm magnética), se puede escribir:

$$\Re = \frac{\Im}{\phi} = \frac{nI}{\phi} \qquad (1)$$

En la ley de Ohm eléctrica, teníamos: $R = \frac{E}{I}$

y hemos sustituido $E$ (fuerza electromotriz) por $\Im$ (fuerza magnetomotriz), $I$ (corriente) por $\phi$ (flujo) y $R$ (resistencia) por $\Re$ (reluctancia).

Y, teniendo en cuenta que: $\sum n_j I_j = \sum H_i l_i$

podrá ponerse también:

$$\sum \Re_i = \frac{\sum H_i l_i}{\phi} \qquad (2)$$

Ahora bien, como: $H_i = \frac{B_i}{\mu_i}$ y $B_i = \frac{\phi}{S_i}$

podemos sustituir

$$\sum H_i l_i = \sum \frac{\phi l_i}{S_i \mu_i} = \phi \sum \frac{l_i}{S_i \mu_i}$$

que, teniendo en cuenta (2):

$$\sum \Re_i = \sum \frac{l_i}{S_i \mu_i}$$

fórmula similar a la que se aplica para conocer la resistencia de un conductor, conociendo su longitud, sección y conductibilidad del material (inversa de la resistividad $\rho$):

$$R = \frac{l}{S\gamma}$$

Pero conviene recordar que, en un circuito magnético, la permeabilidad, $\mu$, es sumamente variable, principalmente en circuitos con núcleo ferromagnético, por lo que la reluctancia, $\Re$, solamente es constante en porciones del circuito que no son magnéticas o cuando el flujo (o la inducción) no varía. Surge, pues, la dificultad de que, para cada estado magnético, la reluctancia es diferente, por lo que, para el cálculo de $\Re$, hay que conocer las curvas de imantación de los materiales que forman los núcleos magnéticos.

La expresión: $\boxed{\Re = \frac{l}{S\mu}}$

para un circuito magnético, es conocida por *ley de Hopkinson*, que es la base del cálculo en circuitos magnéticos.

Si las unidades tomadas para la aplicación de (1) son amperios-vueltas para la f.m.m. ($\Im = nI$) y Weber para el flujo ($\phi$), tendremos para la reluctancia ($\Re$):

$$\frac{A}{Wb}$$

para el sistema internacional.

Si utilizamos el cegesimal electromagnético (CGSem), las unidades son: para la f.m.m. Gilbert y para el flujo magnético, Maxwell, con lo que obtendremos para la reluctancia:

$$\frac{Gb}{Mx}$$

y teniendo en cuenta que:

1 Amperio-vuelta = 1.25 Gb
1 Wb = $10^8$ Mx

tendremos:

$$1\frac{A}{Wb} = \frac{1.25\,Gb}{10^8\ Mx} = 1.25 \cdot 10^{-8}\ {}^{Gb}\!/\!_{Mx}$$

o más exactamente

$$1\frac{A}{Wb} = 4\pi \cdot 10^{-9}\ {}^{Gb}\!/\!_{Mx}$$

Por similitud con un circuito eléctrico, y a la vista de lo que se ha dicho anteriormente, las leyes de Kirchhoff pueden aplicarse también en los circuitos magnéticos.

Así pues:

***1ª ley.-*** La suma de los flujos magnéticos que concurren en un nudo es nula: $\sum \phi = 0$

O, lo que es lo mismo, la suma de los flujos que llegan a un nudo es igual a la suma de los flujos que salen del mismo.

***2ª ley.-*** En todo circuito cerrado, perteneciente a un circuito magnético complejo, la suma algebraica de las f.m.m.s. ($\sum n_i I_i$) es igual a la suma de las caídas de potencial magnético producidas en los distintos tramos del circuito magnético cerrado considerado (equivalente al lazo o malla que expresábamos en los circuitos eléctricos).

$$\Im_i = \sum n_i I_i = \sum H_j l_j = \sum \Re_j \phi_j$$

Para estas dos leyes se supone, naturalmente, que no existen flujos de dispersión, es decir, fugas de flujo magnético hacia el exterior del circuito magnético, igual que se considera en el caso de un circuito eléctrico que no hay fugas de corrientes eléctricas. En sentido estricto, si existiesen fugas de flujo, se establecerían los circuitos magnéticos correspondientes a las fugas, entrando a formar parte del circuito complejo total.

La aplicación de estas leyes se hace de la misma forma que se realiza en los circuitos eléctricos: estableciendo las correspondientes ecuaciones y teniendo en cuenta, meticulosamente, los convenios de signos (+) y (-) tanto para las f.m.m.s. como para los flujos. Las reluctancias (tal como ocurre en electricidad para las resistencias) no tienen sentido, es decir, carecen de signo.

A la conductancia magnética se la denomina por el nombre de permeancia. De forma similar a lo establecido con la conductancia eléctrica, en los circuitos eléctricos, la permeancia, $\lambda$, es la inversa de la reluctancia, $\Re$:

$$\lambda = \frac{1}{\Re} = \frac{\phi}{nI}$$

de donde: $\phi = \lambda \cdot n \cdot I$

El cálculo de la permeancia, se hace a partir de las dimensiones físicas y propiedades magnéticas del trozo de circuito magnético que se considere, por la expresión:

$$\lambda = \frac{\mu S}{l}$$

teniendo en cuenta que si, en la fórmula anterior, se toman unidades del sistema internacional, como:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

y sus unidades: $\frac{Wb/m^2}{A/m} = \frac{Wb}{A \cdot m}$

y, por otra parte, el coeficiente de autoinducción, cuya unidad es el henrio (*H*), lo podemos expresar en:

$$H = \frac{Wb}{A}$$

y despejando: $Wb = H \cdot A$

que sustituyendo en las unidades de la permeabilidad, $\mu$: $\frac{Wb}{mA} = \frac{HA}{mA} = \frac{H}{m}$

y utilizando estas unidades de la permeabilidad para las de la permeancia: $\lambda = \frac{\mu S}{l}$ $\qquad \frac{H/m \, m^2}{m} = H$

obtenemos como unidad el henrio (*H*), igual que para el coeficiente de autoinducción, *L*, o de inducción mutua, *M*.

También podríamos obtener, de aquí, como unidad, para la reluctancia, la inversa de la de la permeancia, es decir:

$$H^{-1} = \frac{A^2}{Nm}$$

determinando, esta última, a partir de la expresión de la 2ª ley de Laplace: $F = B \cdot i \cdot l$

con lo que $B = \frac{F}{i \cdot l}$

y sus unidades $\frac{N}{Am} = \frac{Wb}{m^2}$ $\qquad Wb = \frac{Nm}{A}$

y para la reluctancia $\Re = \frac{Ni}{\phi}$ $\qquad \frac{A}{Wb} = \frac{A}{\frac{Nm}{A}} = \frac{A^2}{Nm}$

e, inversamente, para la permeancia:

$$H = \frac{Nm}{{}^{2}}$$

La permeancia es de principal aplicación en circuitos magnéticos con ramas en paralelo, ya que, al igual que ocurre en los circuitos eléctricos, cuando se desea conocer, por ejemplo, la resistencia equivalente de otras varias conectadas en paralelo con valores de sus conductancias $G_1$, $G_2$, $G_3$, ...., $G_n$, el cálculo es más sencillo:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots\ldots + G_n$$

y en los circuitos magnéticos:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \ldots\ldots + \lambda_n$$

En el cálculo de máquinas eléctricas, es muy corriente utilizar permeancias solamente, en vez de reluctancias, pues se facilita grandemente el cálculo.

*(Hacer los ejercicios del 11.3, 11.4, 11.5, 11.19 y 11.20)*