

Se supondrá una corriente en la bobina  $N_1$  entrando por la terminal de arriba:

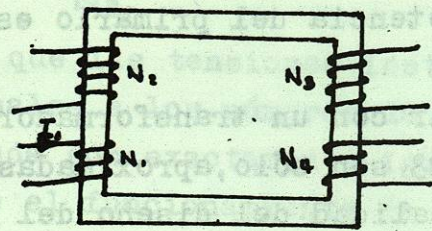


Fig. 9

La corriente  $I_1$  supuesta trataría de producir un flujo en su interior, dirigido hacia abajo; ése será entonces el sentido positivo del flujo, es decir, recorriendo el núcleo en el sentido de las manecillas del reloj. Una vez definido el sentido del flujo, los sentidos de las corrientes de las otras tres bobinas quedan definidos; en todas ellas la corriente debe entrar de tal forma que la Fmm producida tienda a reforzar al flujo, Figs. 10 y 11.

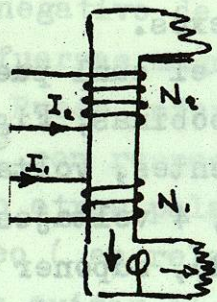


Fig. 10

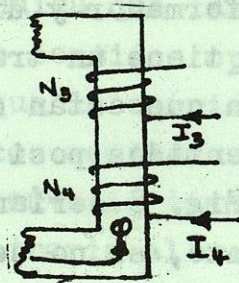


Fig. 11

Para determinar los sentidos de voltajes, puede suponerse que una fuente de voltaje alimenta a los devanados, según las corrientes supuestas; Fig. 12.

En la práctica, lo que se hace es marcar con un punto una terminal de cada bobina. Si se alimenta corriente a todas las bobinas, entrando ésta por las terminales marcadas con punto, todas las bobinas generarán flujos magnéticos en el mismo sentido.

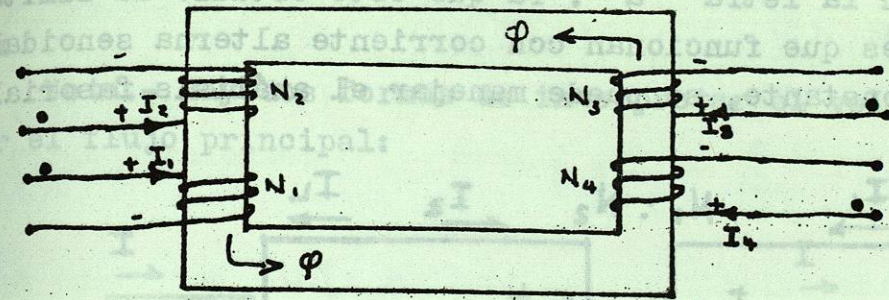


Fig. 12

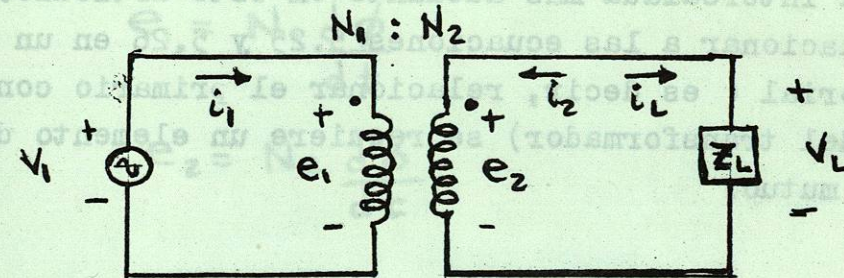
Posteriormente se discutirá un método para identificar la polaridad de las terminales cuando no se tiene acceso a los devanados, o la inspección visual es difícil. En aquel método, sin embargo, la aplicación de corriente a un devanado será real y no virtual.

#### 5.4 EL TRANSFORMADOR REAL

En esta sección se retirarán una a una las hipótesis introducidas en el estudio precedente del transformador ideal con núcleo de hierro. Se llegará paulatinamente al desarrollo del circuito equivalente del transformador real.

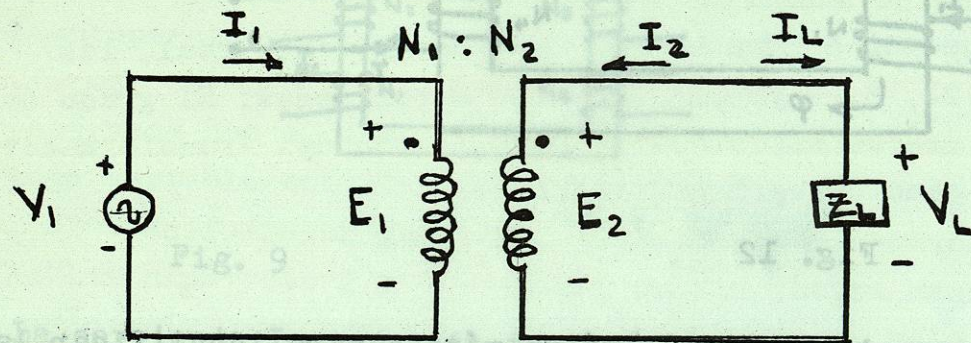
##### 5.4.1 EL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR IDEAL

Se iniciará el proceso a partir del circuito equivalente del transformador ideal:



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA  
U. A. N. L.

Al cociente  $N_1:N_2$  se le denomina razón de transformación y se le indica con la letra "a". Ya que este estudio se limita a transformadores que funcionan con corriente alterna senoidal de frecuencia constante, se puede manejar el análisis fasorial:



Se dibuja a la corriente  $I_L$  saliendo del transformador, ya que en la Ec. 5.22 se demostró que la corriente de la carga sale de la terminal con punto del secundario cuando la corriente del primario  $I_1$  entra a la terminal con punto.

Si el transformador ideal trabaja en vacío pueden escribirse las siguientes ecuaciones de malla:

$$V_1 - E_1 = 0 \quad 5.25$$

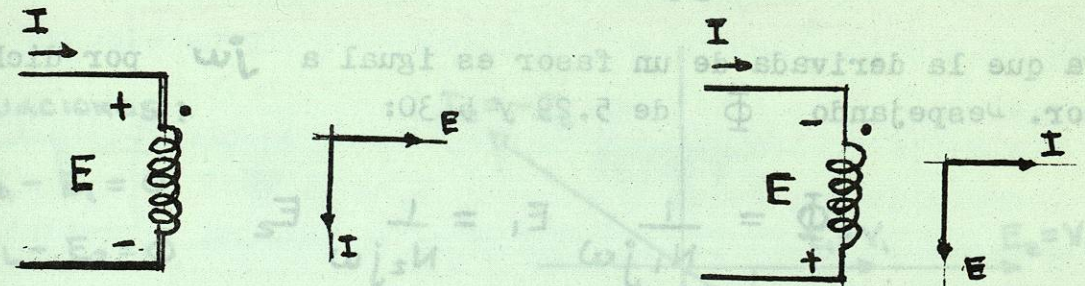
$$V_L - E_2 = 0 \quad 5.26$$

Cabe aclarar aquí que se utiliza la letra E para indicar una elevación de voltaje ( un voltaje tomado como elevación) y la letra V para indicar una caída ( o un voltaje considerado como caída). En algunos textos se sigue una notación opuesta, aunque debe entenderse que todo es convencional; si una convención se respeta siempre, no hay lugar para ambigüedades. Véase la nota intercalada más adelante en este artículo.

Para relacionar a las ecuaciones 5.25 y 5.26 en un mismo diagrama fasorial ( es decir, relacionar el primario con el secundario del transformador) se requiere un elemento de enlace: el flujo mutuo.

xxx

Nota.- Hay dos formas de interpretar el voltaje inducido por el flujo principal:



$$E = N \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{dI}{dt} \quad (a)$$

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (b)$$

La forma (a) se utiliza comúnmente en análisis de circuitos eléctricos de corriente alterna y es la que se maneja en este escrito. La forma (b) se utiliza en algunos textos de máquinas de C.A. Ambas formas dan los mismos resultados al resolver circuitos, siempre y cuando se tenga cuidado en el manejo de los signos instantáneos asignados a las Fems inducidas. La forma (a) es práctica en el análisis de elementos pasivos, la forma (b) lo es cuando se trata de elementos activos.

xxx

Sinusoidalmente:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad 5.27$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad 5.28$$

Expresando 5.27 y 5.28 en forma fasorial:

$$E_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 j\omega \Phi \quad 5.29$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 j\omega \Phi \quad 5.30$$

ya que la derivada de un fasor es igual a  $j\omega$  por dicho fasor. Despejando  $\Phi$  de 5.29 y 5.30:

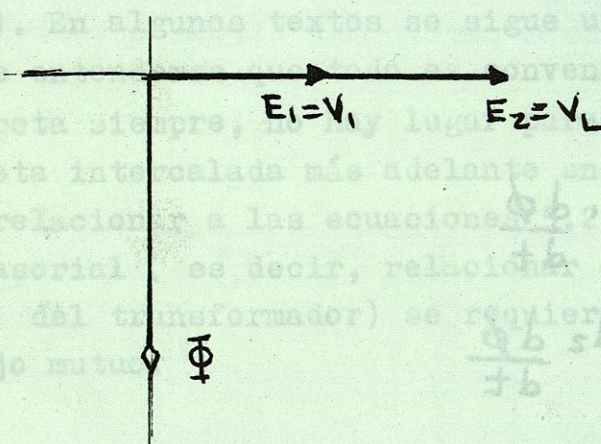
$$\Phi = \frac{1}{N_1 j\omega} E_1 = \frac{1}{N_2 j\omega} E_2$$

$$\frac{1}{j} = -j$$

$$\Rightarrow \Phi = -j \left( \frac{1}{N_1 \omega} \right) E_1 = -j \left( \frac{1}{N_2 \omega} \right) E_2 \quad 5.31$$

El multiplicar un fasor por  $-j$  equivale a girarlo  $90^\circ$  hacia atrás, por lo tanto el fasor de flujo se atrasa  $90^\circ$  con respecto a las Fems autoinducidas en los devanados, de acuerdo a 5.31. Nótese también que, para los sentidos supuestos ( polaridades), las Fems autoinducidas en los devanados por el flujo principal están en fase.

Se obtiene entonces el siguiente diagrama fasorial:



Los diagramas fasoriales se trazan usualmente con el voltaje de la carga como referencia.

Para el mismo transformador ideal, trabajando con una carga de factor de potencia en atraso ( inductiva) el diagrama tomará la forma siguiente:

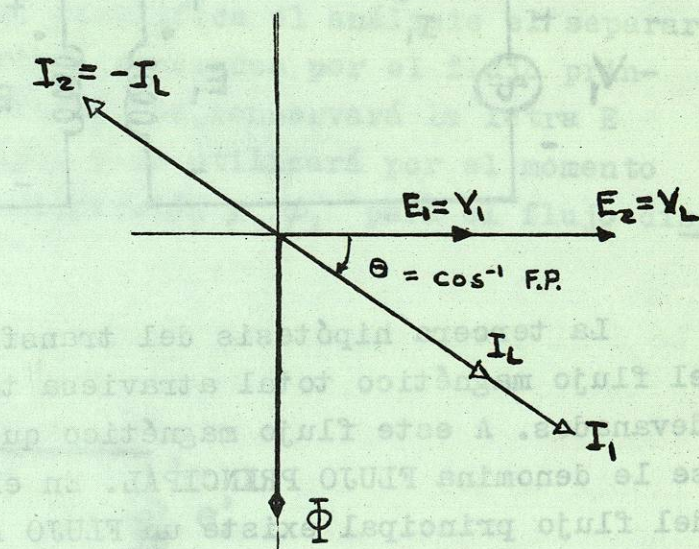
Ecuaciones:

$$V_1 - E_1 = 0$$

$$V_L - E_2 = 0$$

$$V_L = I_L Z_L$$

$$I_L = \frac{I_1}{a}$$



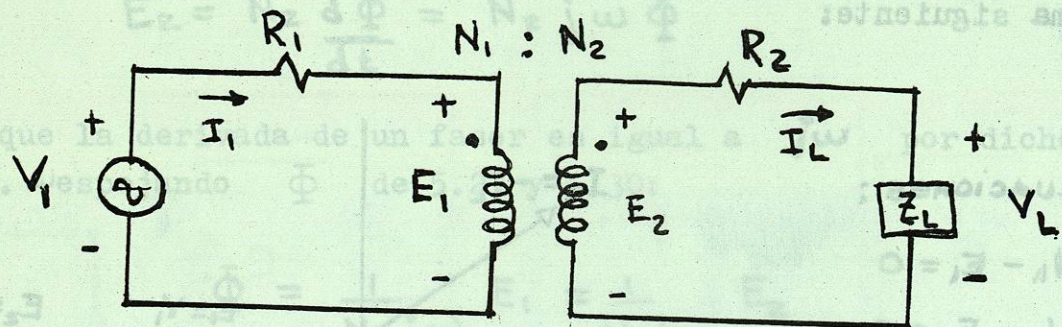
#### 5.4.2 EL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR REAL

La primera hipótesis del transformador ideal supone que los devanados tienen una resistencia despreciable. En realidad, los devanados tienen una resistencia finita, que a altas corrientes introduce pérdidas más o menos sensibles.

Cuando un conductor transporta corriente alterna, su resistencia efectiva puede ser apreciablemente mayor que cuando transporta corriente continua estacionaria; es decir, la pérdida calorífica por ampere puede ser apreciablemente mayor en C.A. El aumento de la pérdida se debe a la densidad de corriente no uniforme ocasionada por el campo magnético variable producido en el interior del conductor por su propia corriente y por los conductores próximos. A estos fenómenos suele llamárseles EFECTO CORTICAL y EFECTO DE PROXIMIDAD. La pérdida debida a ellos crece con la frecuencia de la corriente y con el tamaño

del conductor, y se reduce cuando se trenzan conductores grandes y se transponen adecuadamente los cabos.

Debe entonces incluirse en el circuito equivalente del transformador las resistencias eficaces de los devanados:



La tercera hipótesis del transformador ideal supone que el flujo magnético total atraviesa todas las espiras de ambos devanados. A este flujo magnético que enlaza a ambos devanados se le denomina FLUJO PRINCIPAL. En el transformador real, además del flujo principal existe un FLUJO DE DISPERSION en cada devanado. Como se explicó en el Cap. 2, las líneas de inducción magnética tienden a establecerse a través del camino de menor reluctancia, el núcleo en este caso. Sin embargo, el aire también "conduce" el flujo magnético y por lo tanto se establecerá un segundo circuito magnético alrededor de cada devanado, a través del cual circula el flujo de dispersión. Esta condición queda ilustrada en la Fig. 13.

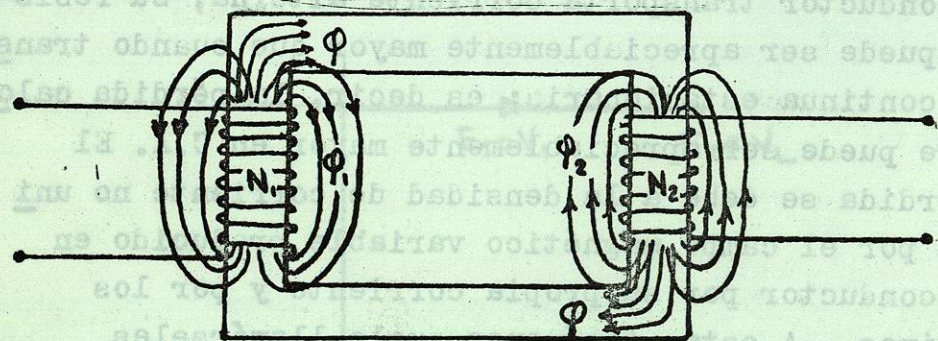


Fig. 13

Donde:

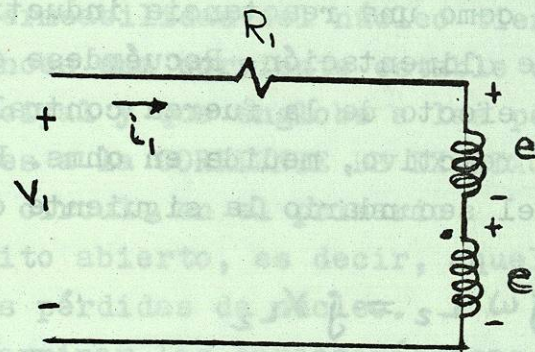
$\phi$  = flujo principal

$\phi_1$  = flujo de dispersión del primario

$\phi_2$  = flujo de dispersión del secundario

Al igual que el flujo principal, el flujo de dispersión también induce una fuerza contraelectromotriz en cada devanado, pues es variable en el tiempo. Simplifica el análisis el separar las fuerzas contraelectromotrices generadas por el flujo principal  $\phi$  por el flujo de dispersión. Se conservará la letra E para definir a la Fcem principal y se utilizará por el momento E' para definir a la Fcem de dispersión y  $\phi_1$  para el flujo disperso.

De la Fig. 13:



$$e_1' = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad 5.32$$

Donde:

$$L_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{di_1}$$

Debe observarse que el circuito magnético del flujo de dispersión se establece en su mayor parte en el aire (o en el fluido en que esté inmerso el transformador). Dado que la reluctancia del aire es considerablemente mayor que la del hierro, puede compararse dicho circuito magnético con un circuito eléctrico en el cual se tuviese una resistencia de muy alto valor en serie con una resistencia de pequeño valor. Por lo tanto, puede desprejarse la reluctancia de la fracción del núcleo que entra