



**MODELOS DE ELEMENTOS DE RED PARA
CALCULO DE TRANSITORIOS**

**ELECTROMAGNETICOS EN SISTEMAS DE
POTENCIA**

PARTE 2



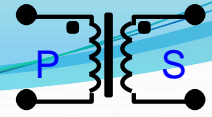
- **TRANSFORMADORES**

- **OTROS MODELOS:**

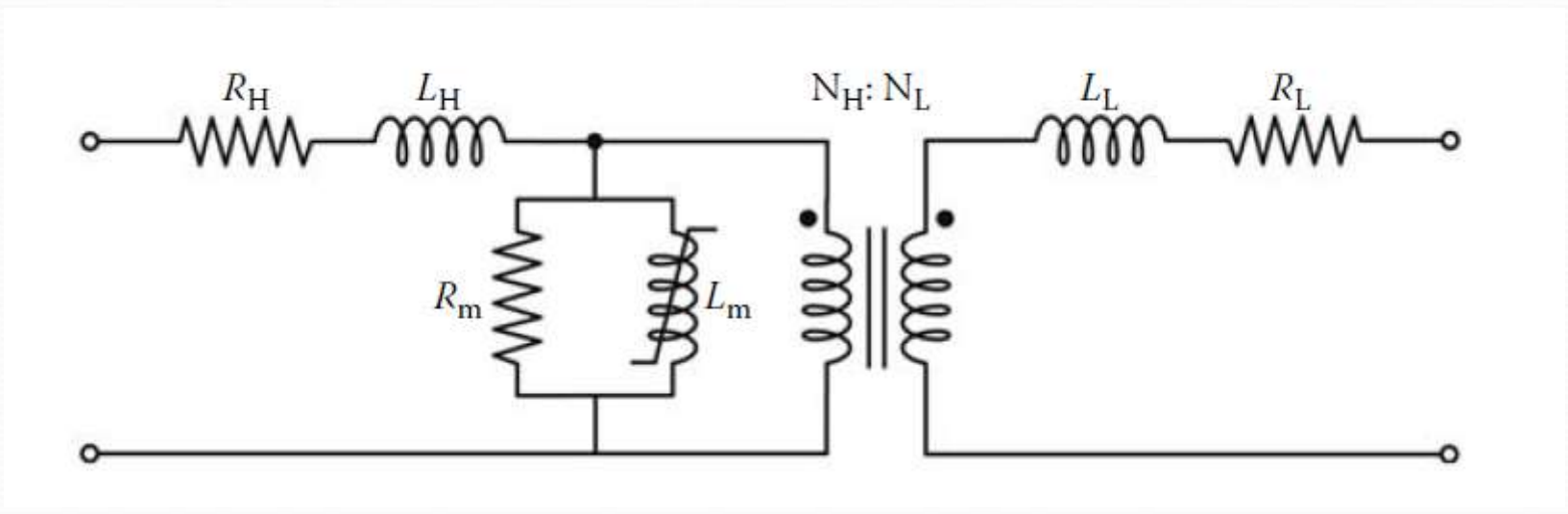
DISYUNTORES, DESCARGADORES, ETC.



TRANSFORMADORES



MODELO CLÁSICO DE RÉGIMEN





En forma matricial ,modelo de régimen:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0.0025 & 0 \\ 0 & 0.0025 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100 & 99.95 \\ 99.95 & 100 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

(Se suponen las corrientes entrantes a los nodos)

Modelo para estudio de transitorios (impedancia de magnetización lineal):

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + [L] \begin{bmatrix} di_1 / dt \\ di_2 / dt \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0 \\ 0 & 0.0025 \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} 100 & 99.95 \\ 99.95 & 100 \end{bmatrix} \quad [L] = [X] / \omega \quad (\omega \text{ en p.u})$$



DIFICULTADES DEL MODELO CLÁSICO

- Las ecuaciones que maneja el EMTP son en base nodal ($[i]=Y[v]$), por lo que para incorporar este modelo de transformador al conjunto de ecuaciones de la red es necesario invertir la matriz [L].
- El ejemplo muestra que esto puede provocar dificultades numéricas, dado que la matriz [X] (o [L]) está “muy cerca” de ser no invertible.
- Observar también que el término 99,95 se obtuvo restando los valores de la reactancia de magnetización=100 p.u de la reactancia de cortocircuito=0.05 p.u.
Estas 2 impedancias son de valores tan dispares que en caso de no hacer los cálculos con mucha precisión se corre el riesgo de “perder” la reactancia de cortocircuito en el proceso, parámetro que es de importancia en las simulaciones.



Por lo tanto: en vez de plantear un modelo de la forma

$$[v] = [R][i] + [L][di/dt]$$

se plantea un modelo de la forma

$$[L]^{-1}[v] = [L]^{-1}[R][i] + [di/dt] \text{ (modelo "[L]^{-1}- [R]" o "[A]-[R]")}$$

Los elementos de la matriz $[L]^{-1}$ se calculan directamente a partir de los datos de ensayo del transformador.

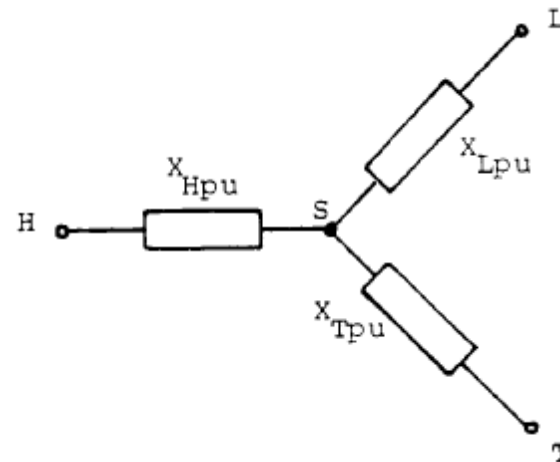
MODELOS A-R (BCTRAN Y TRANSFORMER)



TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Ejemplo: Transformador de 3 devanados. Se desprecian por ahora las resistencias y las impedancias de magnetización.

Modelo estrella:



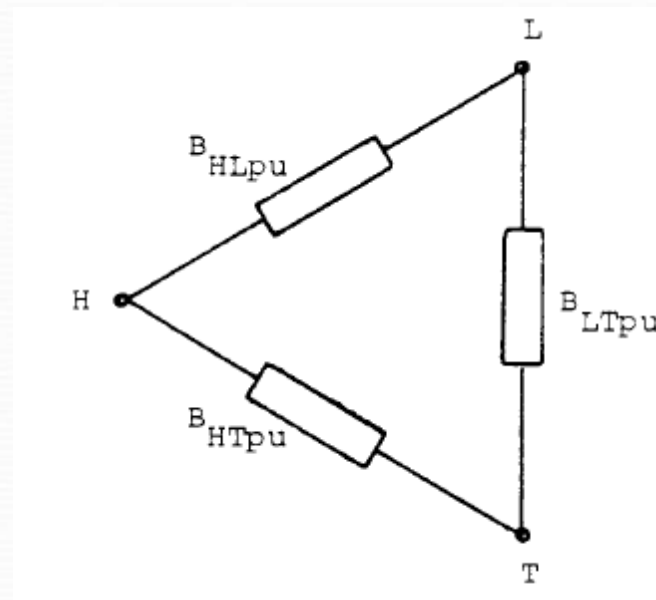
$$X_{Hpu} = A/2 - X_{LTpu} \quad X_{Lpu} = A/2 - X_{HTpu} \quad X_{Tpu} = A/2 - X_{HLpu}$$

X_{HLpu} , X_{LTpu} , X_{HTpu} : Reactancias de cortocircuito p.u
potencia base común, tensión base de cada devanado)

$$A = (X_{HLpu} + X_{LTpu} + X_{HTpu})$$



Se pasa a un modelo de admitancias en delta (modelo nodal) a través de la transformación estrella- delta:



$$B_{HLpu} = X_{Tpu} / X^2 \quad B_{HTpu} = X_{Lpu} / X^2 \quad B_{LTpu} = X_{Hpu} / X^2$$

$$X^2 = X_{Hpu}X_{Lpu} + X_{Hpu}X_{Tpu} + X_{Lpu}X_{Tpu}$$

Ecuación matricial del modelo en delta, en régimen:



$$[\omega L_{pu}]^{-1}[v] = [i] \text{ (modelo en base nodal)}$$

$$[\omega L_{pu}]^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{HLpu} + \mathbf{B}_{HTpu} & -\mathbf{B}_{HLpu} & -\mathbf{B}_{HTpu} \\ -\mathbf{B}_{HLpu} & \mathbf{B}_{HLpu} + \mathbf{B}_{LTpu} & -\mathbf{B}_{LTpu} \\ -\mathbf{B}_{HTpu} & -\mathbf{B}_{LTpu} & \mathbf{B}_{HTpu} + \mathbf{B}_{LTpu} \end{bmatrix}$$

El modelo transitorio es similar:

$$[L_{pu}]^{-1}[v] = [di/dt]$$



Incorporación de resistencias al modelo:

$$[L_{pu}]^{-1}[v] = [L_{pu}]^{-1}[R][i] + [di/dt]$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{Hpu} & 0 & 0 \\ 0 & R_{Lpu} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Tpu} \end{bmatrix}$$

Los elementos de la matriz se obtienen a partir de medidas directas o (aproximadamente) a partir de los ensayos de pérdidas en carga.



Extensión al caso de “N” devanados:

El método descrito se generaliza a transformadores de cualquier número de devanados, obteniéndose nuevamente una ecuación de régimen en base nodal de la forma $[i] = [\omega L]^{-1} [v]$ (sin considerar las resistencias ni las corrientes de excitación).

La matriz $[\omega L]^{-1}$ se obtiene a partir de las reactancias de cortocircuito medidas tomando los devanados de 2 en 2, mediante un procedimiento que generaliza la transformación estrella-delta.

Nuevamente se consideran las resistencias de cada devanado para formar una matriz diagonal $[R]$ de resistencias que se incorpora al modelo de régimen o al modelo transitorio $[L]^{-1}[v] = [L]^{-1}[R][i] + [di/dt]$

(Ver detalles en los apuntes)

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



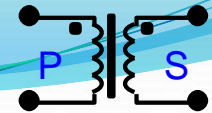
Para extender los desarrollos vistos al caso trifásico, es necesario tener en cuenta los acoplamientos mutuos entre fases.

Cada reactancia utilizada en el modelo monofásico pasa a ser, por lo tanto una matriz de dimensión 3, de la forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_s & \mathbf{X}_m & \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_m & \mathbf{X}_s & \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_m & \mathbf{X}_m & \mathbf{X}_S \end{bmatrix}$$

Se asume una simetría perfecta entre fases, lo cuál es sólo una aproximación para ciertos tipos de transformadores (tipo núcleo de 3 columnas, p.ej).

Es sabido que para matrices de esta forma (matrices “balanceadas”) es posible aplicar la teoría de componentes simétricas.



De acuerdo a esta teoría, si se diagonaliza la matriz de reactancias se obtiene:

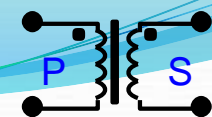
$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{X}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{X}_0 \end{bmatrix}$$

siendo

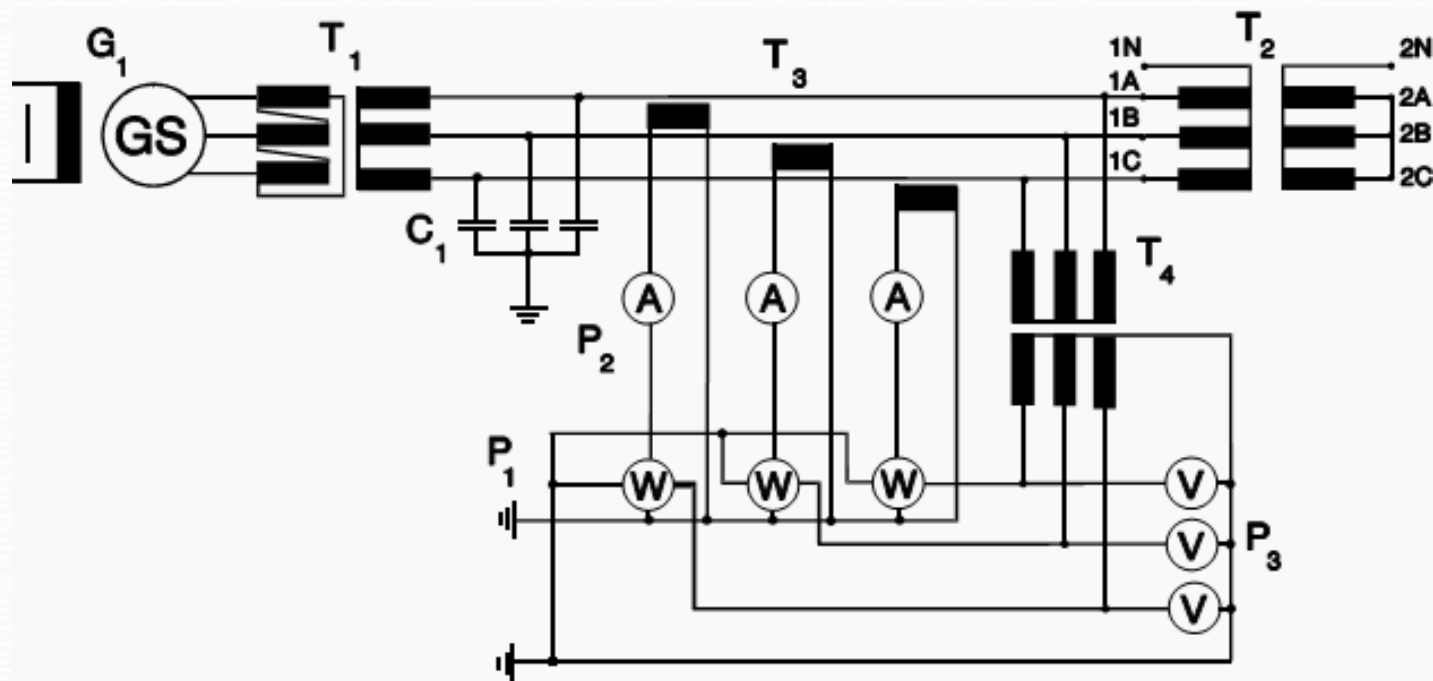
$$\mathbf{X}_s = 1/3 (\mathbf{X}_0 + 2\mathbf{X}_1)$$

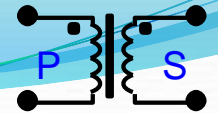
$$\mathbf{X}_m = 1/3 (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_1)$$

Se recuerda que las reactancias de cortocircuito de los transformadores trifásicos se obtienen habitualmente por ensayos, tanto para la secuencia positiva como para la secuencia cero.

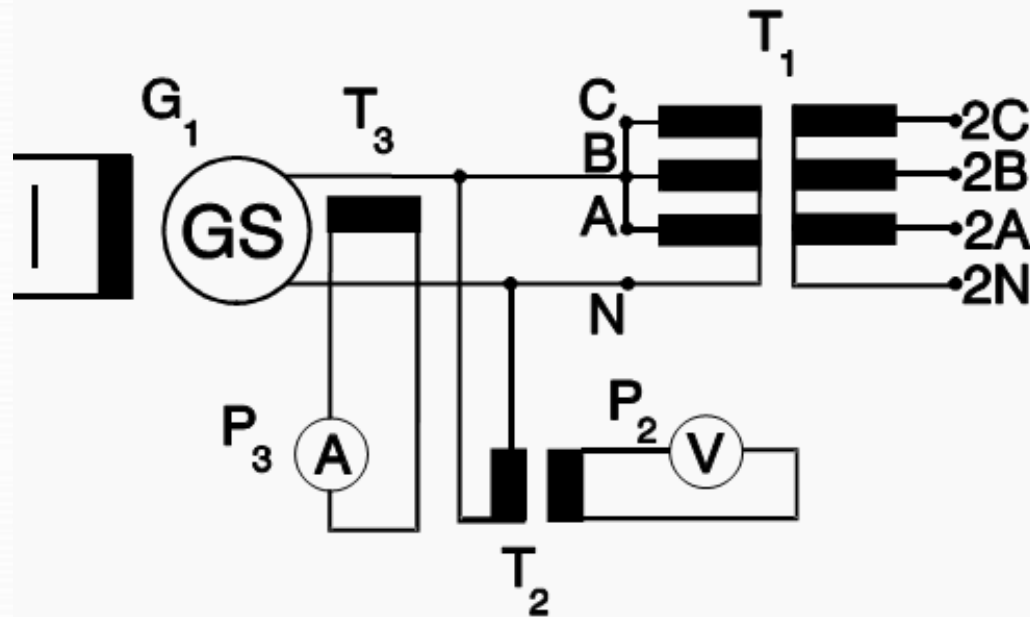


Medida de impedancia de secuencia positiva





Medida de impedancia de secuencia cero



RESUMEN: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A-R



El modelo A-R del transformador trifásico se construye, por lo tanto, mediante el siguiente procedimiento:

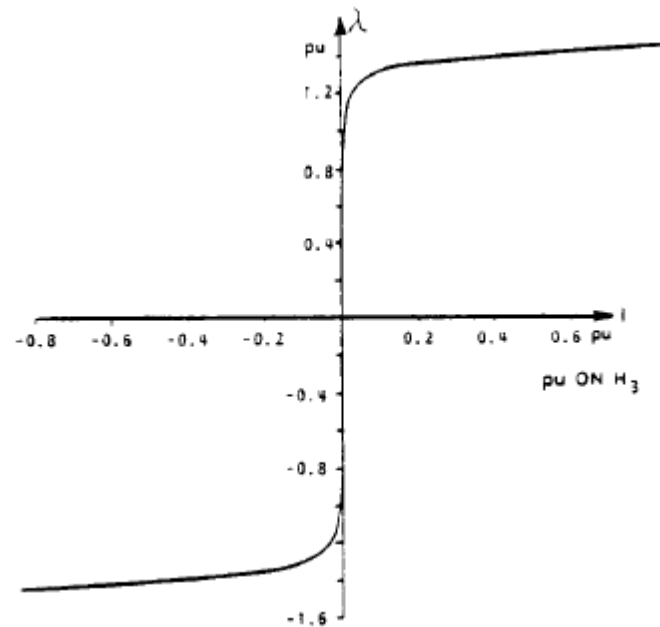
1) A partir de las medidas de reactancias de cortocircuito de secuencia positiva y cero se calculan las reactancias necesarias propias y mutuas (modelo “estrella” en el ejemplo monofásico visto)

2) A partir de estas reactancias se calculan las admitancias necesarias para obtener un modelo en base nodal (modelo “delta” en el ejemplo monofásico visto)

3) Las resistencias se incorporan mediante matrices diagonales cuyos elementos se obtienen a partir de medidas directas en fábrica.

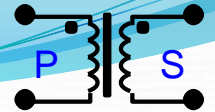
(Ver detalles en los apuntes)

MODELADO DE LA EXCITACIÓN



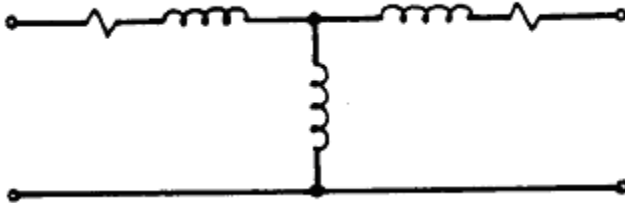
Si bien en régimen la corriente de excitación es muy pequeña, en los transitorios muchas veces se entra claramente en la zona de saturación del núcleo.

Modelado de la parte lineal



-La parte lineal se incorpora directamente al resto del modelo $[L]^{-1}[R]$, agregando la susceptancia de excitación (o matriz de susceptancias de excitación del caso trifásico) obtenida de los ensayos

-Observar que en el modelo desarrollado no existe un “punto estrella” interno para conectar la inductancia de excitación como en el caso de los modelos clásicos



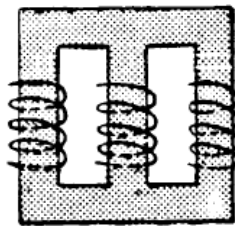
-La inductancia de excitación se conecta, por lo tanto, a alguno de los nodos externos (extremos de devanados). En la práctica, dado que la corriente de excitación en la zona lineal es muy pequeña, no importa mucho cuál nodo externo elegir.



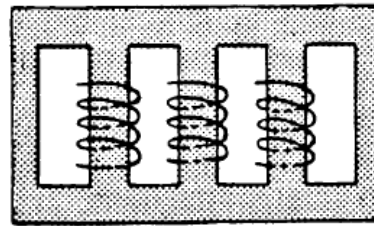
-Muchas veces no se dispone del dato de la inductancia de excitación de secuencia cero para el caso trifásico.

Se pueden asumir en tales casos valores típicos, de acuerdo al tipo de transformador (tipo núcleo de 3 o 5 columnas, con o sin devanado en delta, etc.).

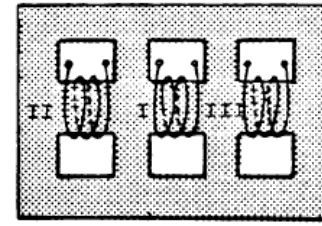
-Si se desea modelar las pérdidas de excitación, se conecta una resistencia (matriz de resistencias acopladas en el caso trifásico) al mismo nodo terminal al que se conectó la inductancia.



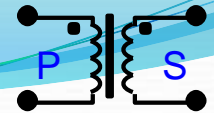
(a) Three-legged core design



(b) Five-legged core design



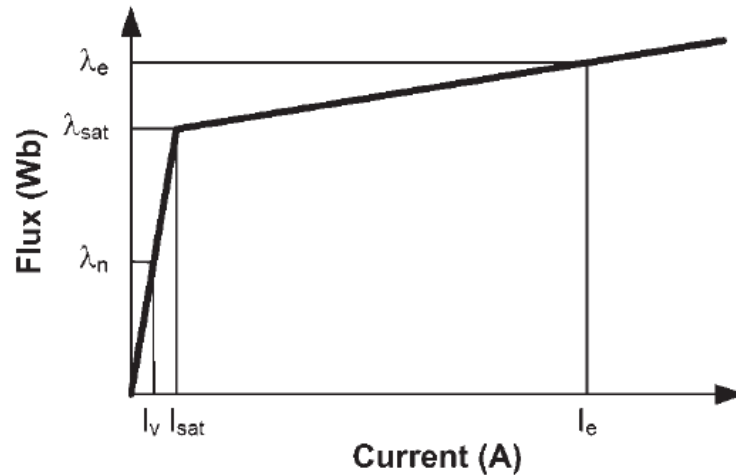
(c) Shell-type design



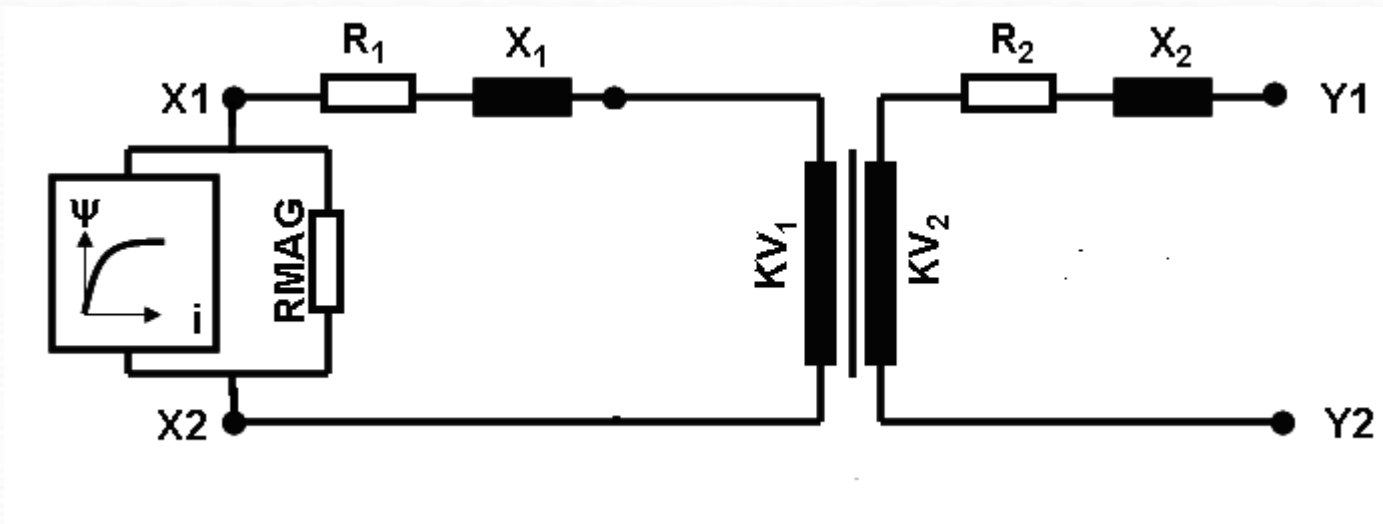
Modelado de la saturación

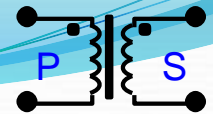
▪ La saturación se modela agregando una inductancia no lineal conectada a uno de los nodos del transformador.

Lo habitual es modelar la inductancia no lineal con 2 rectas:

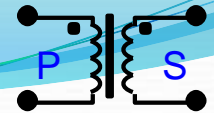


▪ La parte lineal se puede incorporar al modelo o no, según que se trate por separado en la forma vista anteriormente (en este caso, el EMTP modela la parte lineal del inductor saturable con una recta vertical)

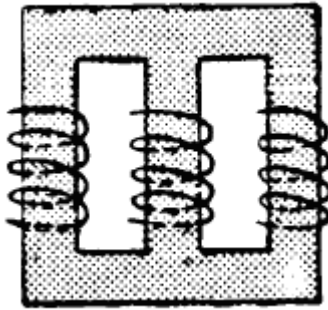




- Si no se dispone de datos de ensayo en la parte saturada, lo habitual es suponer en transformadores de 2 devanados $L_a = 2L_{cc}$, siendo L_a la inductancia de la parte saturada (inductancia de núcleo de aire) y L_{cc} la inductancia de cortocircuito.
- El nodo terminal al cuál se conecta la inductancia saturable debería cumplir: $v = - \int \lambda dt = - \int L_m(i) i dt$, siendo v la tensión en el nodo, λ el flujo por el núcleo y $L_m(i)$ la inductancia variable. Por lo tanto: el devanado correspondiente debería tener un flujo de dispersión muy pequeño. Esta situación se da habitualmente en el devanado más cercano al núcleo, por lo que la inductancia saturable se suele conectar al devanado de tensión más baja. Esta aproximación es muy buena en transformadores tipo núcleo de 3 columnas.
- En transformadores trifásicos, simplemente se conectan 3 de estas inductancias saturables en los terminales del devanado elegido, por lo que no se tienen en cuenta acoplamientos entre fases.



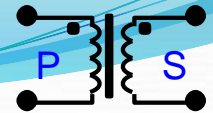
- Este modelo no es lo suficientemente preciso para transformadores tipo núcleo de 3 columnas sin devanados en delta.



Si un transformador de este tipo se excita con corrientes de secuencia cero, la suma de los 3 flujos de secuencia cero iguales sólo puede “escaparse” por el aire, que es un medio no saturable.

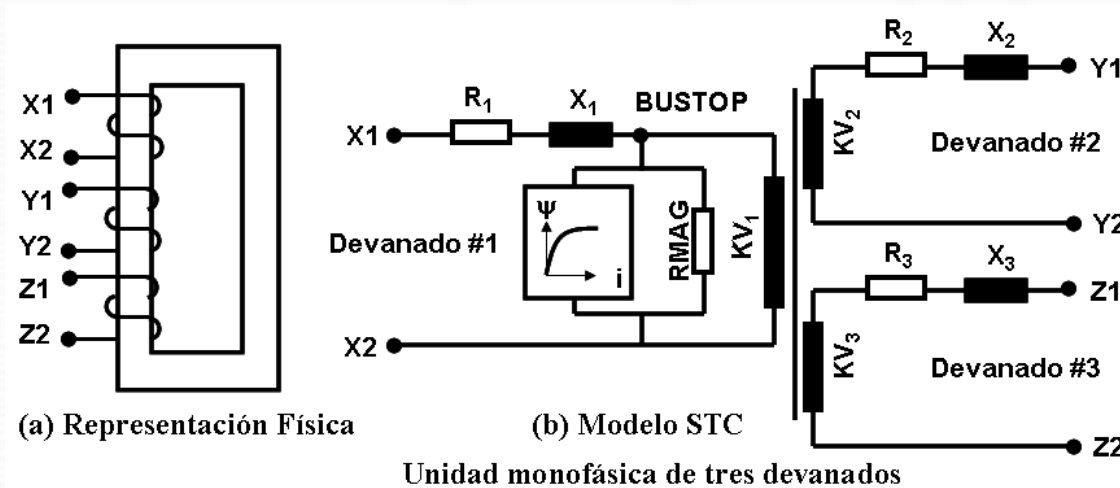
La consecuencia práctica es que la corriente de excitación es mucho más alta en la secuencia homopolar que en la directa, por lo que el modelo debe contemplar los acoplamientos entre fases.

- En estos casos, para conseguir mejor precisión en el modelo se lo corrige agregando una matriz de inductancias lineales acopladas conectada a los mismos terminales que las inductancias saturables.



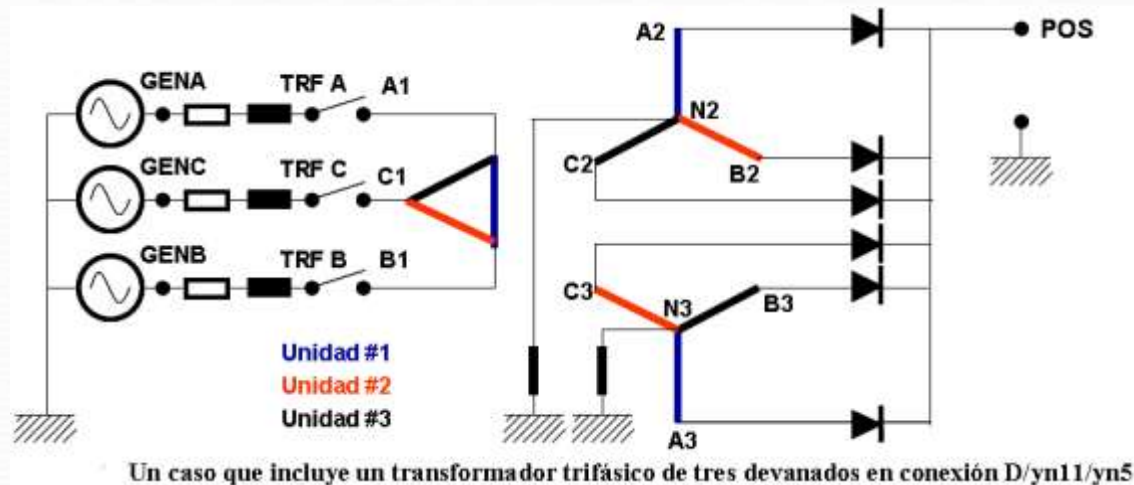
MODELO EMTP DE TRANSFORMADOR SATURABLE (TRANSFORMER)

- El modelo descrito hasta ahora es muy general, y aplicable a transformadores con un número arbitrario de devanados. En el EMTP se implementa a través de la rutina BCTRAN, que permite formar las matrices necesarias a partir de los datos de ensayo del transformador.
- El EMTP dispone también de un modelo más simplificado (TRANSFORMER), que sólo es válido para transformadores de hasta 3 devanados.

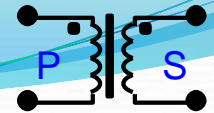




- Este modelo ya tiene incorporada la impedancia de magnetización saturable, a cuyos efectos ya tiene “reservado” un nodo interno (punto “estrella” BUSTOP) para conectarla. De acuerdo a lo ya observado, este punto puede no ser el más adecuado para conectar la inductancia de magnetización.
- Los transformadores trifásicos se modelan simplemente conectando 3 transformadores monofásicos. La forma de conectar los nodos define el grupo de conexión.

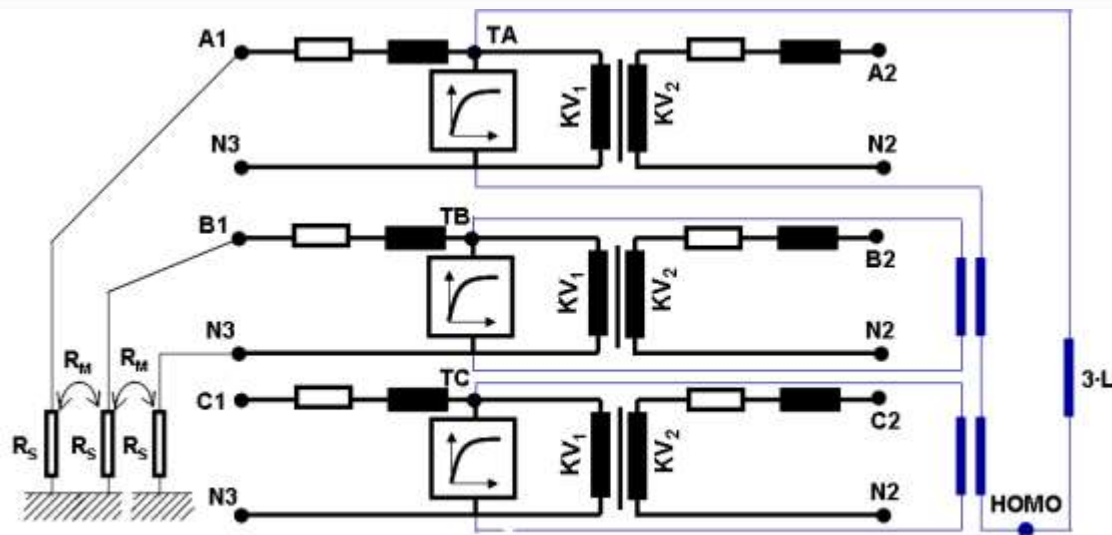


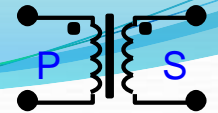
Un caso que incluye un transformador trifásico de tres devanados en conexión D/yn11/yn5



- Este modelo, por lo tanto, no puede tener en cuenta acoplamientos entre fases. Como ya se ha observado, esta aproximación introduce errores importantes en el caso de transformadores tipo núcleo de 3 columnas sin devanados en delta.

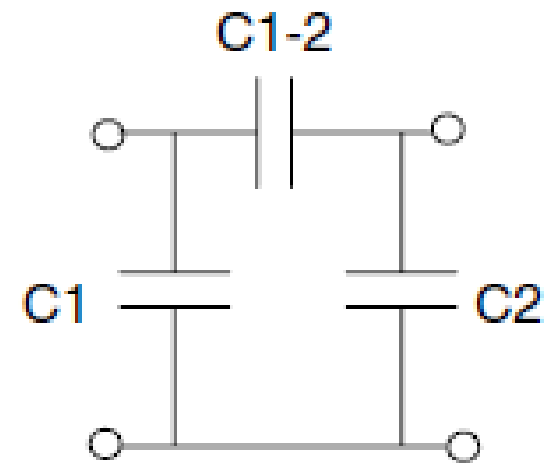
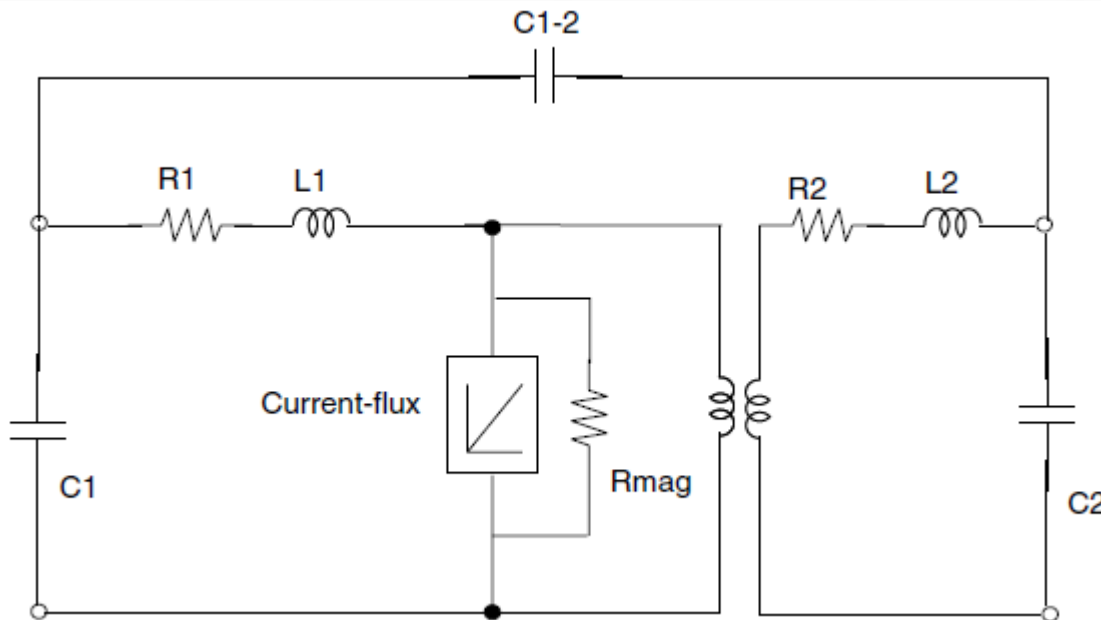
Existe en EMTP un modelo especial (poco usado) de transformador saturable (TRANSFORMER THREE PHASE) para contemplar este caso:





Modelado para frecuencias altas (10 kHz o más)

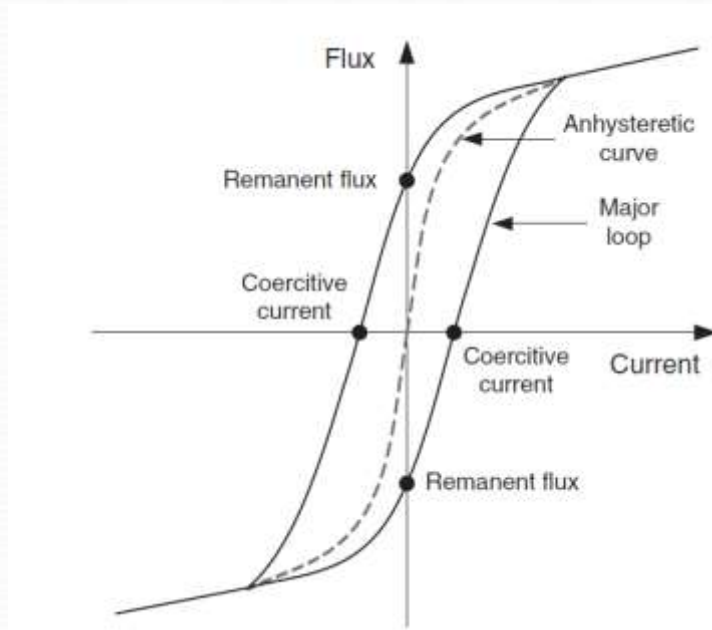
Se deben incluir las capacidades de cada devanado a tierra y entre devanados. Alcanza con modelar sólo estos capacitores para frecuencias de 100 kHz o más (sobretensiones de rayo).



OTROS ASPECTOS DEL MODELADO



Flujo remanente

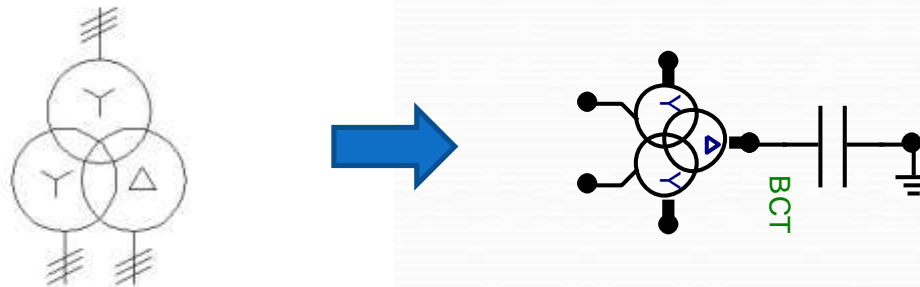


- Aspecto importante para estudiar la energización de transformadores.
- Se puede modelar el ciclo de histéresis completo o ingresar el flujo inicial “a mano” con un valor típico único (1 p.u p.ej.) o realizando un estudio estadístico para diversos valores típicos.



Referencia de tensión para devanados en delta

Se deben conectar resistencias o capacidades ficticias a tierra en los vértices del triángulo si el devanado está aislado del resto de la red. Valor típico: $0,003 \mu\text{F}$ (es del orden de las capacidades a tierra reales).





OTROS MODELOS



Generadores síncronos

-Sobretensiones de maniobra y de rayo :fuentes de tensión atrás de la reactancia subtransitoria.

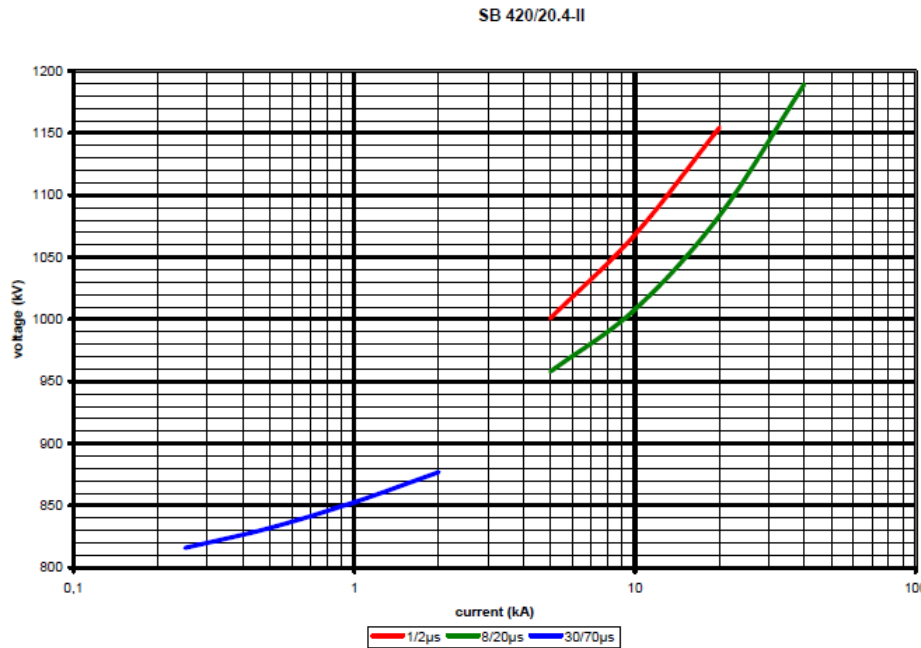
-Sobretensiones temporarias:

Fuente de tensión para la mayoría de los estudios vinculados a la coordinación de aislación (efecto Ferranti,faltas fase-tierra).

Modelos de máquinas completos con reguladores para rechazo de carga.

▪

Resistencias no-lineales, a través de las curvas v-i que suministran los fabricantes



Comentario: Las curvas $v-i$ (tensión residual-corriente) suelen diferir ligeramente según que el descargador se ensaye con ondas de maniobra o de rayo. Al modelar en EMTP podría cambiarse el modelo de descargador, por lo tanto, según el tipo de estudio que se está realizando. En la mayoría de los casos no se justifica esta precisión, y se suele trabajar con cualquiera de las curvas $v-i$ disponibles.

A partir de esta curva el EMTP (rutina “ZnO Fitter”) modela los descargadores mediante una función de la forma:

$$I = p.(v / vref)^q$$

$vref \approx$ dos veces la tensión nominal del descargador.

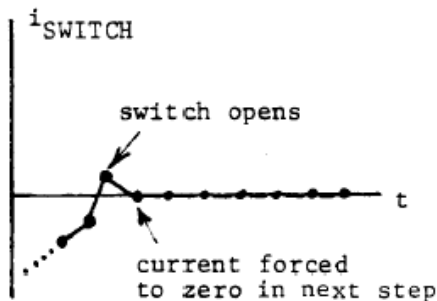
Para tensiones inferiores a la tensión de operación continua el EMTP simplifica la curva $v-i$ por medio de una recta, a efectos de mejorar la precisión del modelado en la zona de corrientes más altas.

(Ver elemento 92 del ATP).

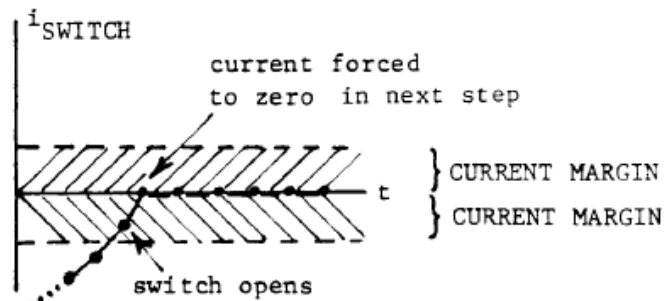
Disyuntores

Modelo de llaves ideales: pasan de impedancia nula entre bornes a impedancia infinita en el momento de la apertura.

La apertura se produce en el momento en que la corriente pasa por cero (en rigor: en el paso de cálculo siguiente a aquél en que la corriente pasa por cero luego del instante de apertura) o (en otro modelo de disyuntor) cuando la corriente es inferior (en módulo) a un límite dado.



(a) current going through zero

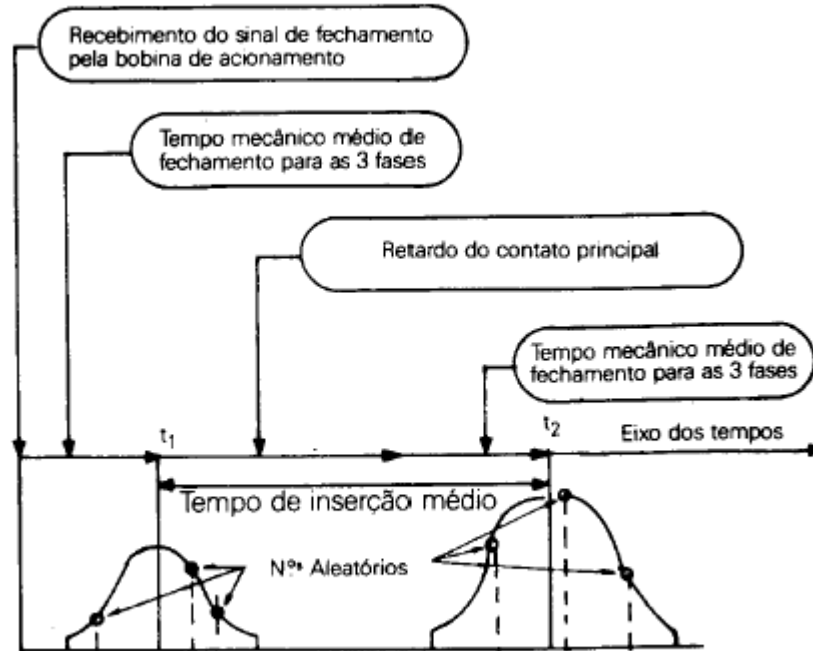


(b) current less than margin



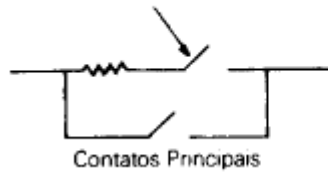
**Para estudios estadísticos (energización de líneas p.ej):
modelo de “llave estadística”**

- El tiempo de cierre se puede ir variando en pasos uniformes, de forma de simular todos los posibles instantes de cierre dentro de un ciclo de frecuencia industrial de la onda de tensión.
- Se puede considerar la dispersión estadística que siempre existe en torno al instante de cierre programado: el instante de cierre programado es el valor medio de una distribución gaussiana de tiempos de cierre
La correspondiente desviación “standard” σ se obtiene a partir del llamado “pole span” (máxima diferencia de tiempo entre el primer y último polo que cierra en un conjunto trifásico), que es un dato que se obtiene de los fabricantes.
Se asume: $\sigma = \text{Pole span} / 6$
- En base a esta información el programa “sortea” en cada energización el instante exacto de cierre.



Contatos Secundários

Contatos Principais

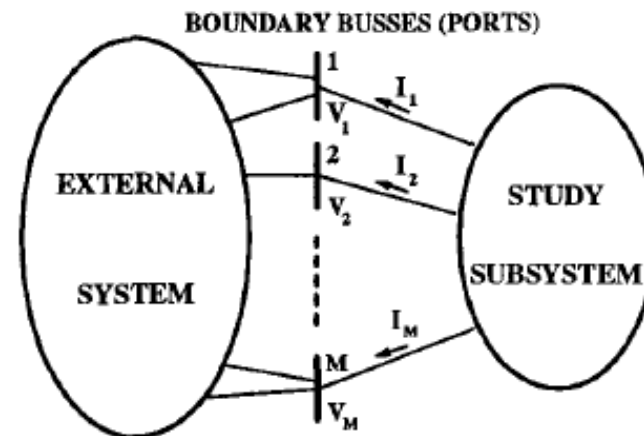
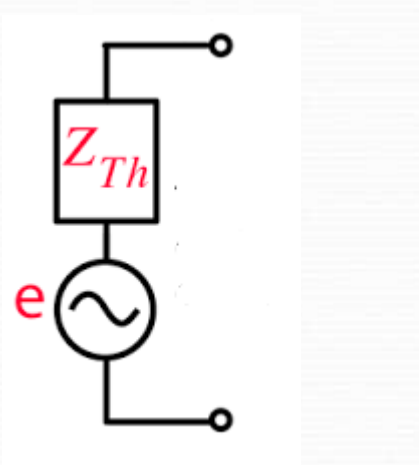




Equivalentes de red (sobretensiones de maniobra)

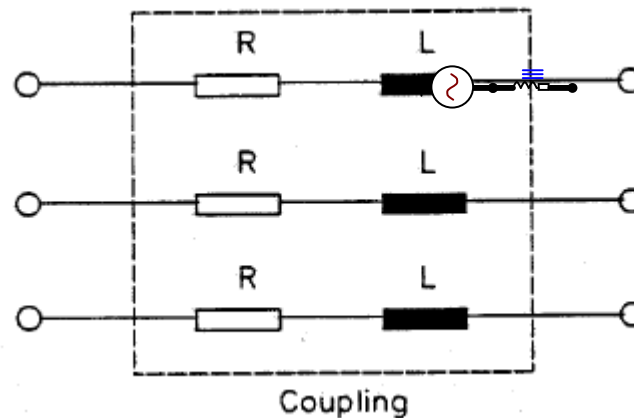
Regla “práctica”: modelar en detalle la red hasta una o (preferentemente) dos barras hacia atrás de la zona del sistema en estudio.

La parte del sistema no modelada se puede considerar con equivalentes de Thévenin, modelados por medio de las impedancias de cortocircuito de secuencia positiva y cero obtenidas de un programa de cortocircuito.





El EMTP dispone de modelos de elementos concentrados trifásicos R-L (matrices R-L, con acoplamiento entre fases), en que se pueden ingresar directamente como datos las impedancias de secuencia





Para algunos estudios de sobretensiones de maniobra, puede ser necesario representar la red externa con más precisión.

En tales casos, es necesario calcular la función $Z(w)$ de la impedancia vista hacia la red (en secuencia positiva y secuencia cero) en función de la frecuencia .

Se forma luego un circuito equivalente de parámetros concentrados con ramas R-L-C en paralelo (equivalente Foster), cuya respuesta en frecuencia reproduce aproximadamente la de $Z(w)$.

Este circuito de parámetros concentrados se incorpora a la red en estudio por medio de los modelos de parámetros concentrados convencionales del EMTP.

