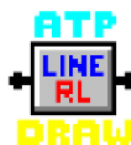


Modelado de transformadores de corriente



TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN
SISTEMAS DE POTENCIA



Objetivo

- ▶ Analizar el comportamiento y modelado de los transformadores de corriente convencionales.
- ▶ No se abordará el modelado de los transformadores de corriente no convencionales.

Función de los TI's

- ▶ Su principal función es brindar aislación entre el circuito primario de alta tensión y el circuito secundario de medida o protección.
- ▶ Acondicionar las magnitudes a medir para que puedan ser manejadas por dispositivos de medida, control o protección.

Clasificación de TI's

- ▶ **TI de Medida:**
 - ▶ Diseñados para medir con precisión corrientes de operación normal, rango de operación 5 - 120% de su corriente nominal.
 - ▶ Estos equipos deben saturar típicamente entre 5 y 20 veces la corriente nominal, de esta forma se protegen los instrumentos.
 - ▶ No especifican requerimientos respecto a su precisión durante cortocircuitos.

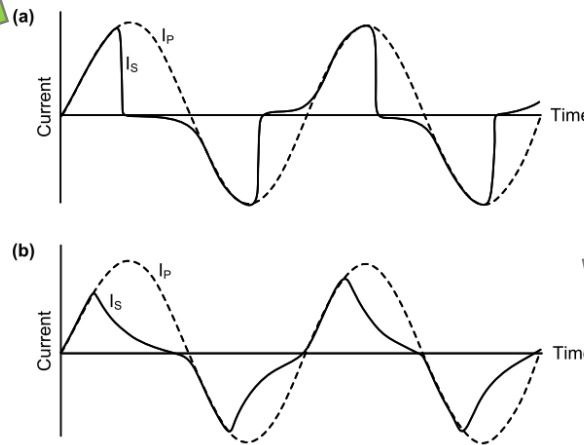
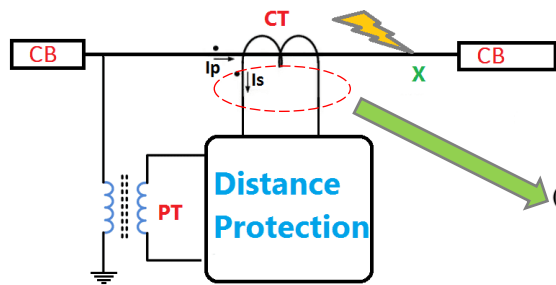
Clasificación de TI's

▶ TI de Protección:

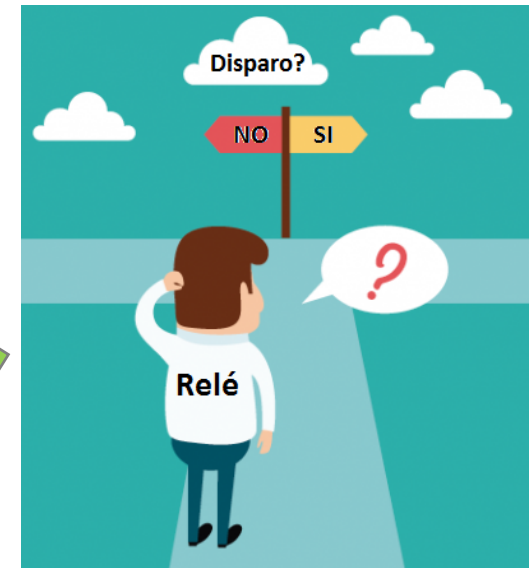
- ▶ Tienen “poca precisión”(comparado con los núcleos de medida), típicamente 5 o 10 %.
- ▶ Diseñados para reproducir corrientes de defecto, las cuales tienen valores de decenas de veces la nominal, al menos durante los primeros ciclos del defecto.
- ▶ Tienen niveles de saturación mayores(en comparación a los núcleos de medida).

Porque es importante su análisis transitorio?

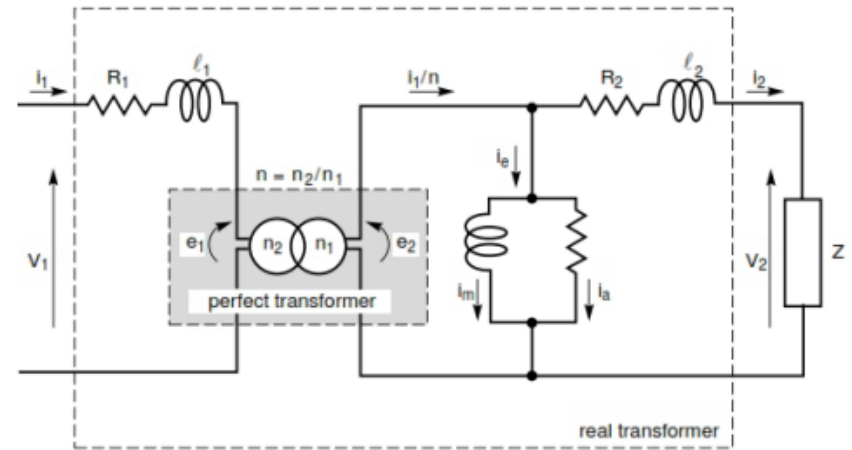
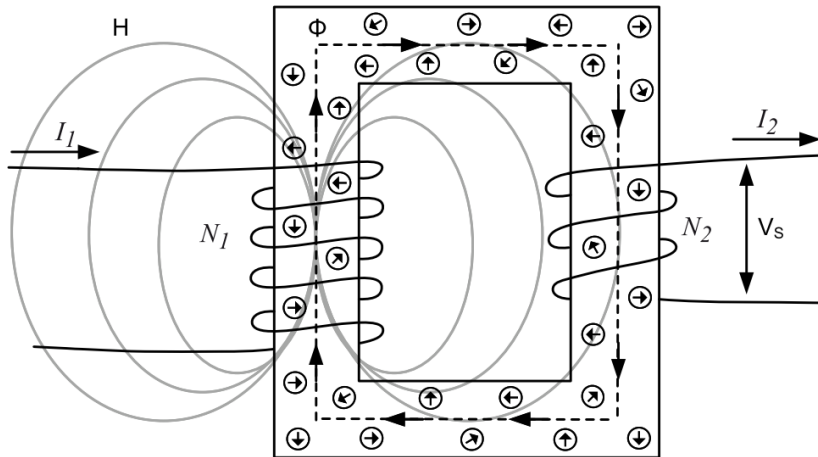
- ▶ El rol de los CT (Current Transformer) conjuntamente con los PT (Potencial Transformer) y CVT (Capacitive Voltage Transformer) es de vital importancia para la actuación de los sistemas de protección.



Saturated waveshapes for resistive (a) and resistive-inductive (b)

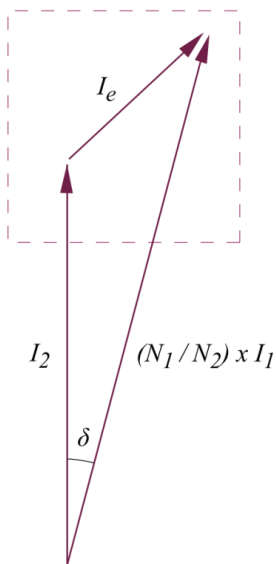
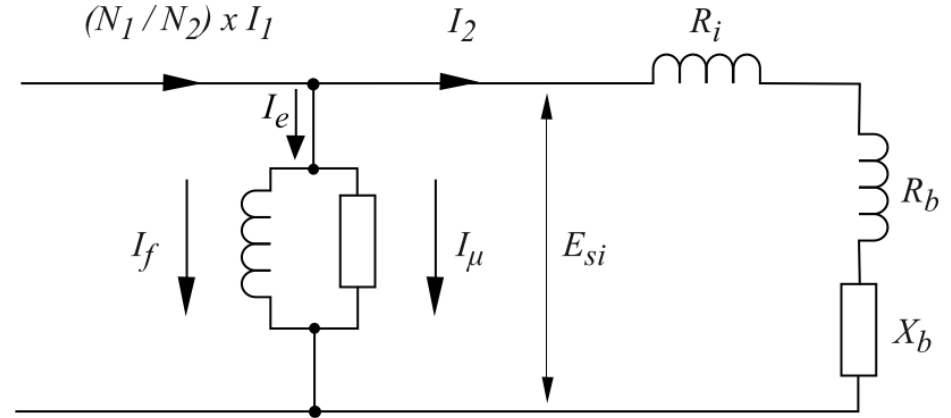
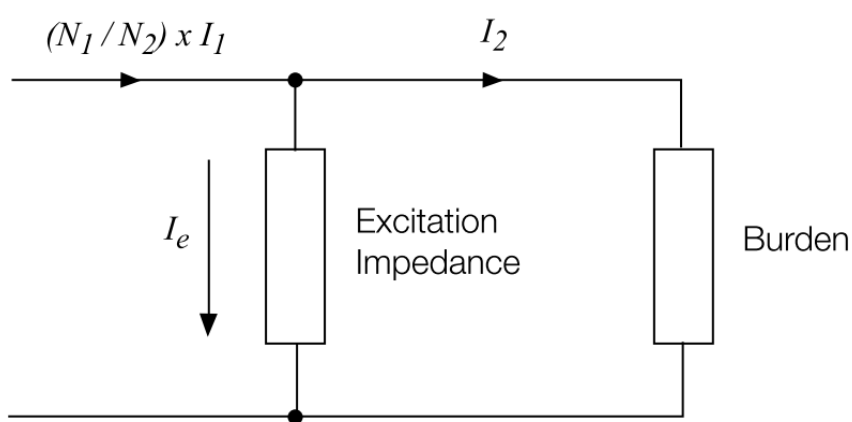


Fundamento teórico de su funcionamiento



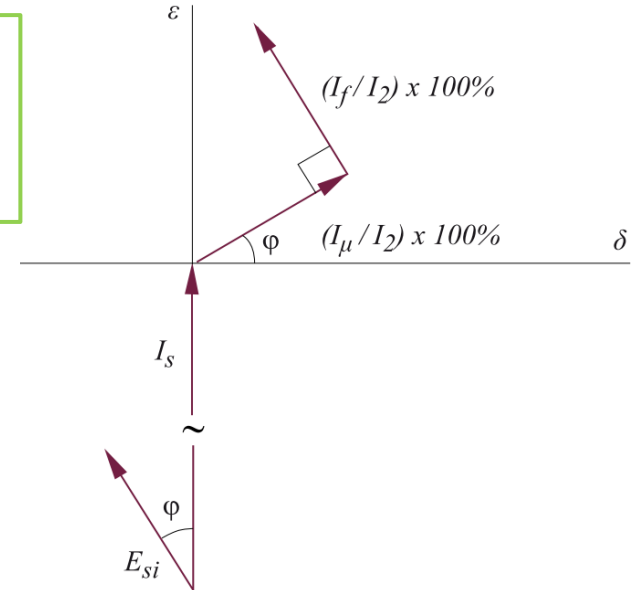
$$\left. \begin{aligned} n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 &= \oint \bar{H} \cdot \bar{n} \cdot dl \\ \oint \bar{H} \cdot \bar{n} \cdot dl &= n_2 \cdot i_e \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left[\begin{aligned} n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 &= n_2 \cdot i_e \\ i_e &= i_m + i_a \end{aligned} \right.$$

Fundamento teórico de su funcionamiento



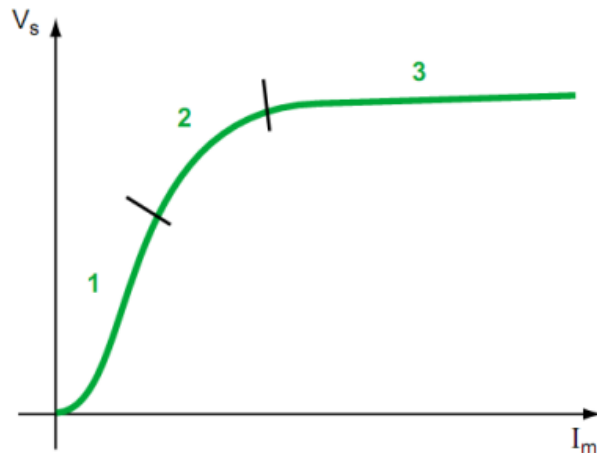
Ie →

- ❖ Genera un error en la medida.
- ❖ El error depende de la carga conectada.

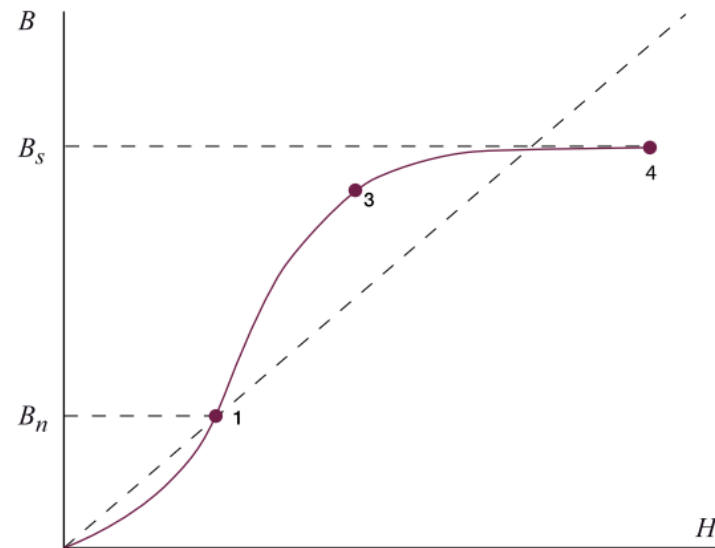


Saturación

- ▶ Debido a la no linealidad de la densidad de flujo magnético en función de la intensidad del campo magnético, la rama magnetizante tiene un comportamiento no lineal.

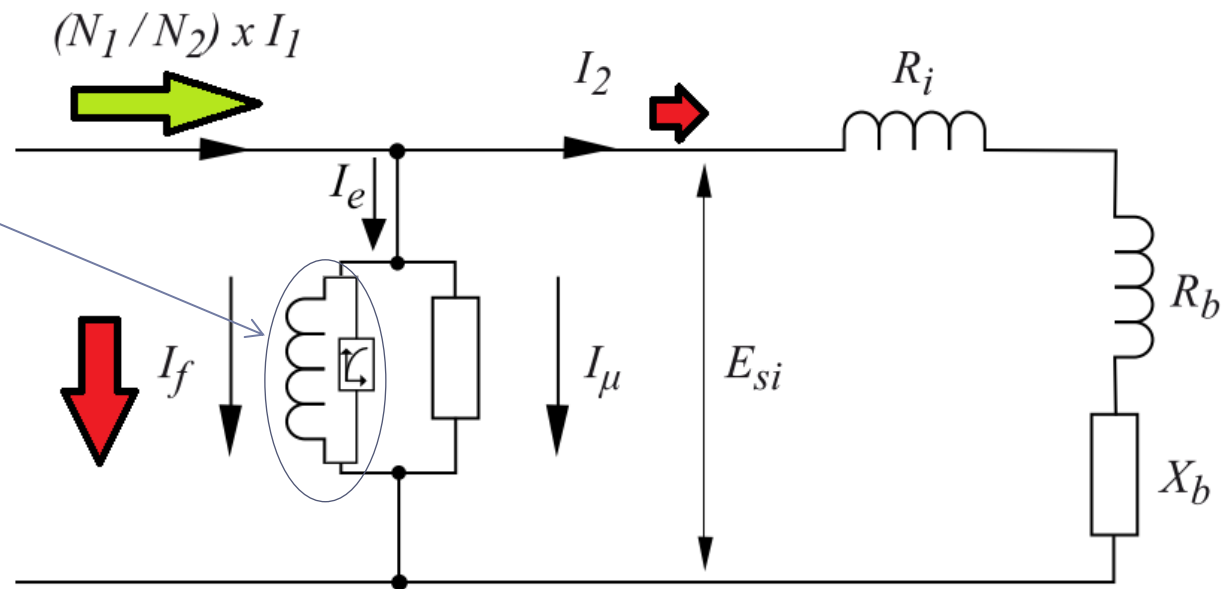
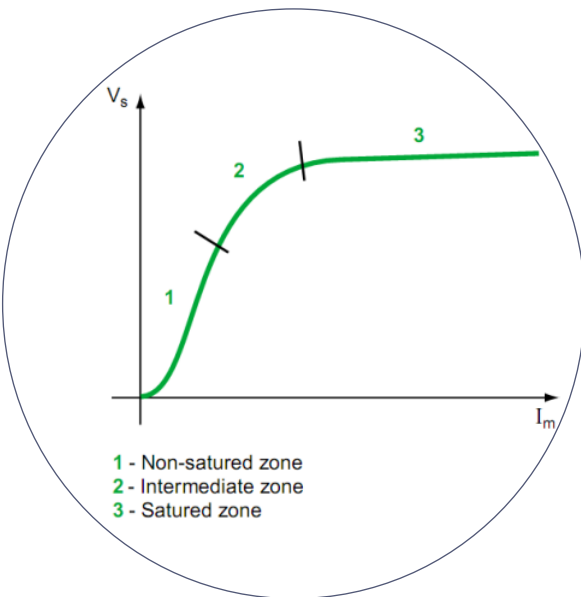


- 1 - Non-saturated zone
- 2 - Intermediate zone
- 3 - Saturated zone



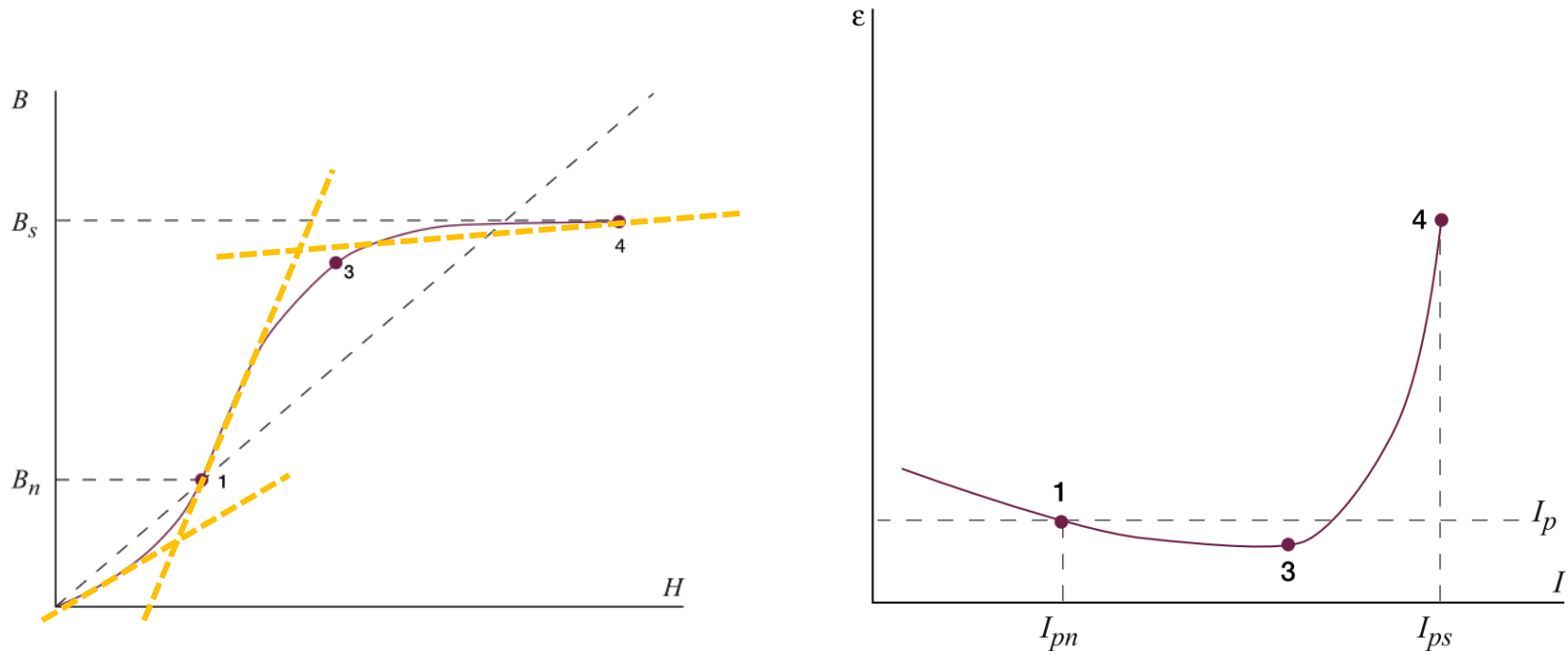
Saturación

- ▶ Esto provoca que, para una carga fija, el error en la medida no sea constante al variar la corriente.



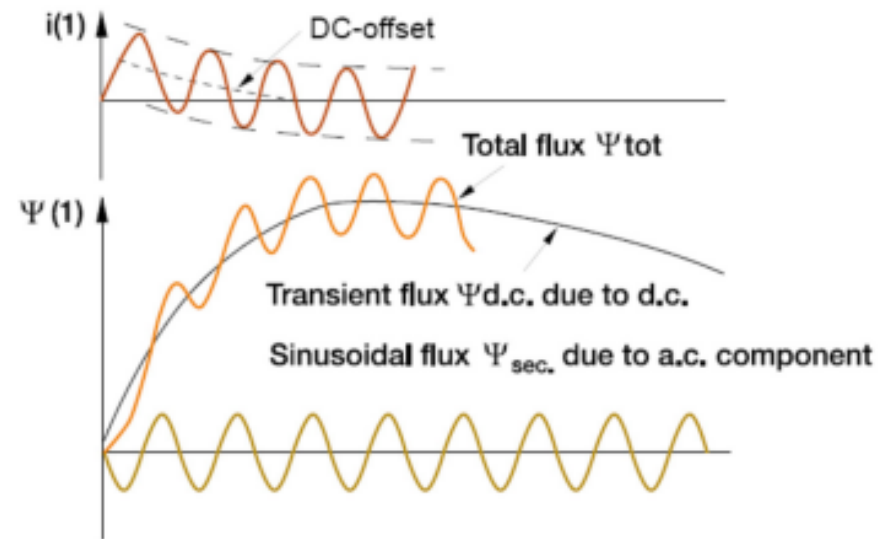
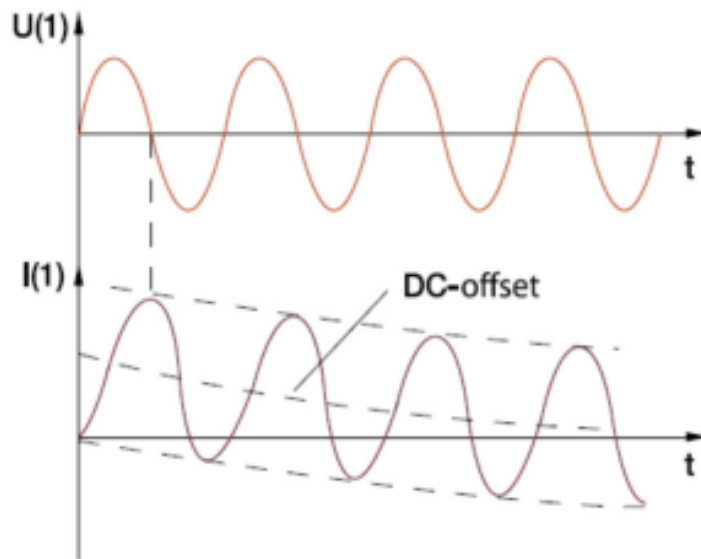
Saturación

- ▶ Esto provoca que el error en la medida no sea constante al variar la corriente para una carga fija.



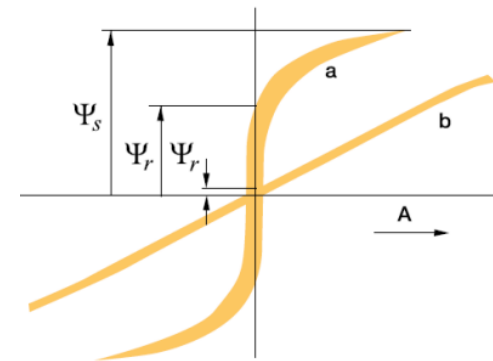
Núcleos para comportamiento transitorio

- Para poder medir con precisión corrientes transitorias durante un defecto, la norma IEC 60044-6 define tres clases de núcleos diferentes, TPX, TPY y TPZ.



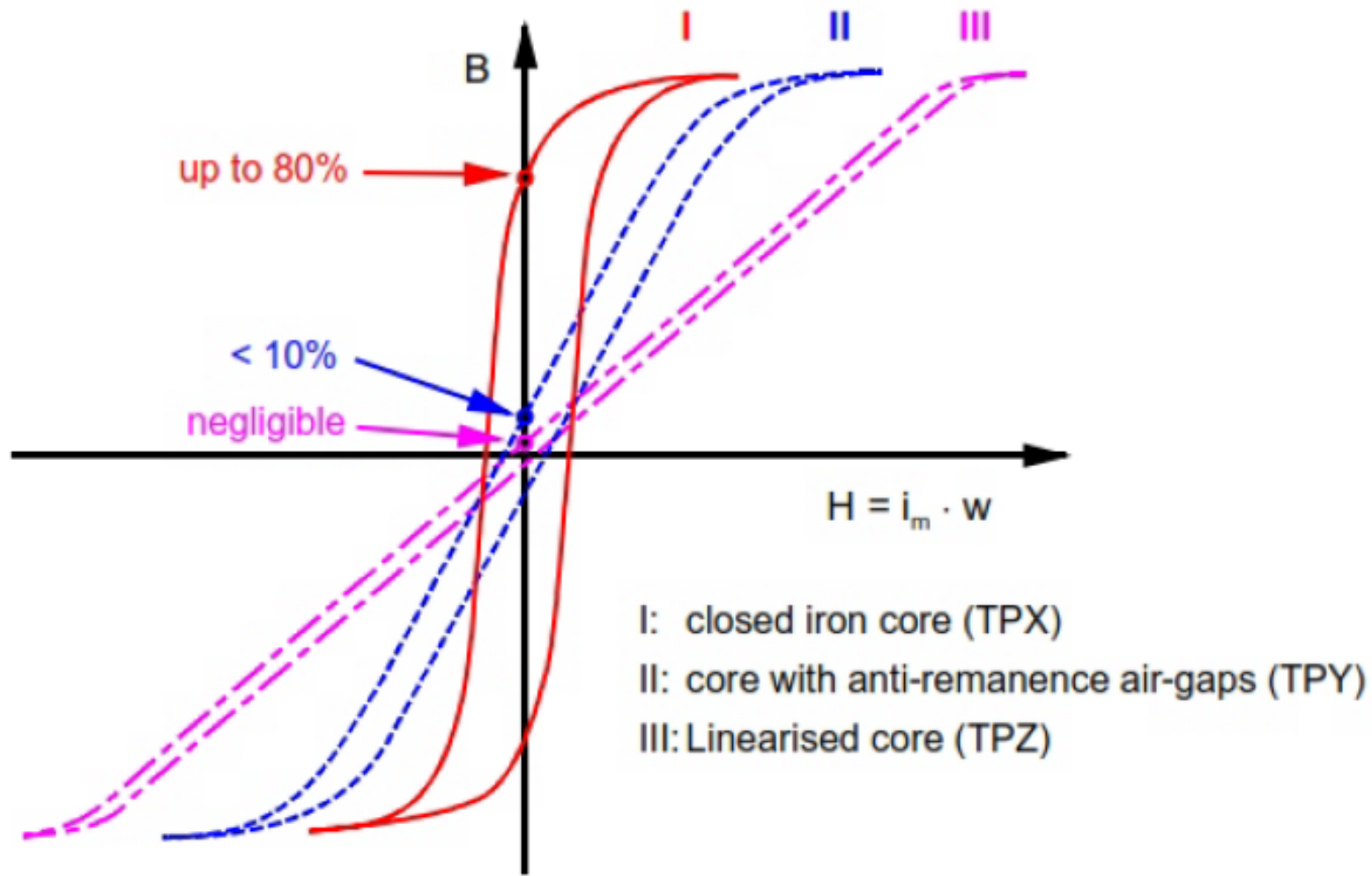
Núcleos para comportamiento transitorio

- TPX:
 - Son transformadores de núcleo cerrado.
 - Alta precisión a corriente nominal (0.5%).
 - Sin requerimiento respecto al flujo remanente , puede alcanzar el 80%.
- TPY:
 - Transformadores de núcleo con pequeño entrehierro.(algunos mm)
 - Precisión a corriente nominal igual a los TI clase “5P”(5%)
 - Tiene requerimientos asociados al flujo remanente, el mismo no supera el 10%.
- TPZ:
 - Transformadores de núcleo con entrehierro.(algunos cm)
 - Precisión a corriente nominal igual a los TI clase “5P”(5%)
 - Tiene requerimientos asociados al flujo remanente, el mismo puede considerarse despreciable.



Hysteresis curves of a current transformer
a) without air-gap | b) with air-gap

Núcleos para comportamiento transitorio



Características de la aplicación de TI en sistemas de protección.

- ▶ Los sistemas de protección se espera actúen en tiempos muy cortos, del orden de centenas de ms.
- ▶ Esto implica realizar medidas durante el transitorio inicial del cortocircuito, en donde la componente de DC puede ser elevada.
- ▶ En estas condiciones los núcleos de los transformadores de corriente pueden saturar rápidamente, debido a las altas corrientes AC, a la componente de continua DC y al flujo remanente.
- ▶ Luego que el TI satura la medida de corriente se ve distorsionada, afectando la adecuada operación del sistema de protección.

Modelado de TI

- ▶ **Al menos podemos diferenciar tres niveles de modelado:**
 - ▶ Modelo lineal, sin saturación.
 - ▶ Fines didácticos, no apto para análisis reales o diseño.
 - ▶ Modelo no lineal, sin histéresis.
 - ▶ Apto para análisis reales simplificados, no apto para situaciones con niveles de saturación elevado.
 - ▶ Modelo no lineal, con histéresis.
 - ▶ Apto para estudios completos de transitorios.

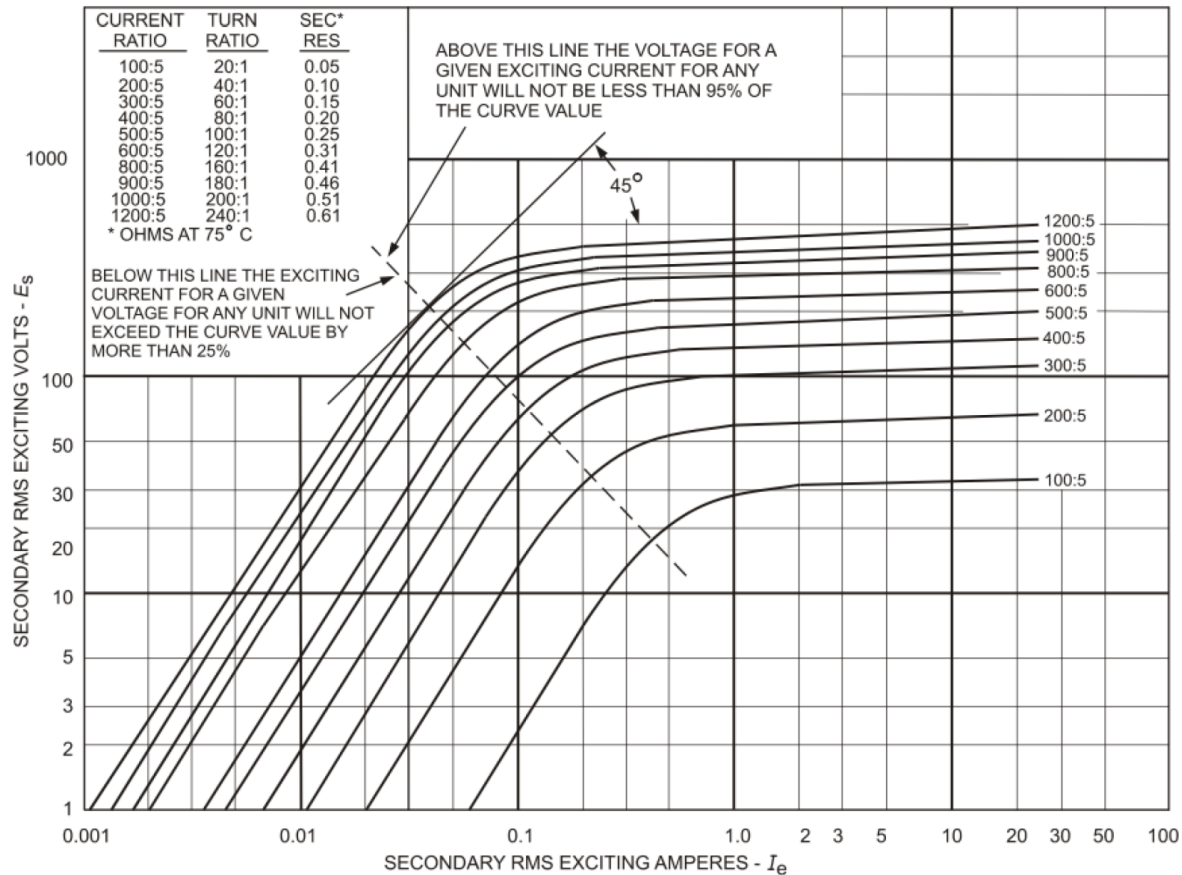
Modelado de TI

▶ **Datos disponibles?**

- ▶ Resistencia secundaria.
- ▶ Resistencia primaria. (Típicamente despreciable)
- ▶ Característica V-I del secundario.
- ▶ Tipo de núcleo P, TPY, TPZ o TPX.
- ▶ Características de comportamiento transitorio, K_{ssd} , K_{TD} y T_s .

Modelado de TI

► Datos disponibles?



Modelado de TI

▶ **Rama magnetizante**

- ▶ El correcto modelado de esta parte del modelo es crucial en el comportamiento del mismo.
- ▶ Típicamente es el elemento más complejo de modelar.
- ▶ Existen diferentes opciones para el modelado de este elemento en función de los requisitos del modelo.

Modelado de TI

▶ **Rama magnetizante**

- ▶ El programa ATP soporta dos clases de elementos no lineales:
 - ▶ Un elemento denominado "no lineal verdadero" (Type 93)
 - ▶ Dos elementos pseudo-no-lineales (Type 96 y 98).

Modelado de TI

▶ **Rama magnetizante**

- ▶ Elemento no lineal "verdadero"(Type 93)
 - ▶ La no linealidad del elemento está definida de forma explícita por una función no lineal, representa el flujo magnético en el núcleo en función de la corriente.
 - ▶ El programa resolverá un sistema de ecuaciones no lineales aplicando Newton-Raphson.

Modelado de TI

▶ Rama magnetizante

- ▶ Elementos pseudo-no-lineales (Type 96 y 98)
 - ▶ La no linealidad es definida como una curva (flujo-corriente) definida por segmentos de recta, estos segmentos de recta son representados "eléctricamente" por los programas de simulación como una resistencia en paralelo con una fuente de corriente.
 - ▶ El programa monitoreará el flujo magnético en cada paso de iteración y decidirá en que tramo de la curva se ubicará para el cálculo del siguiente paso de iteración.
 - ▶ Esto genera que el programa cambiará de segmento de la curva solo cuando ya haya realizado el cálculo de un paso de iteración fuera del segmento de recta que le hubiese correspondido, de aquí el nombre de pseudo-no-lineal.

Modelado de TI

▶ **Rama magnetizante**

▶ Elementos 93 y 98

- ▶ No modelan la histéresis del núcleo
- ▶ El usuario deberá modelar las pérdidas en el núcleo de forma independiente al elemento

▶ Elemento 96

- ▶ Permite modelar la histéresis del núcleo.
- ▶ Incluye la representación de las pérdidas del núcleo.

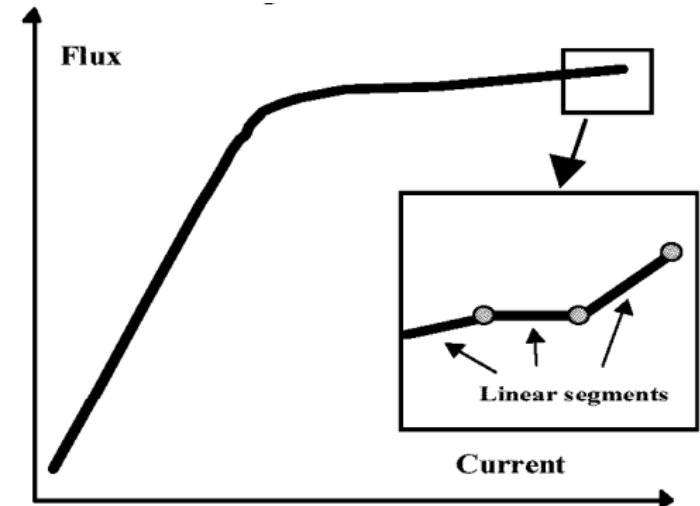
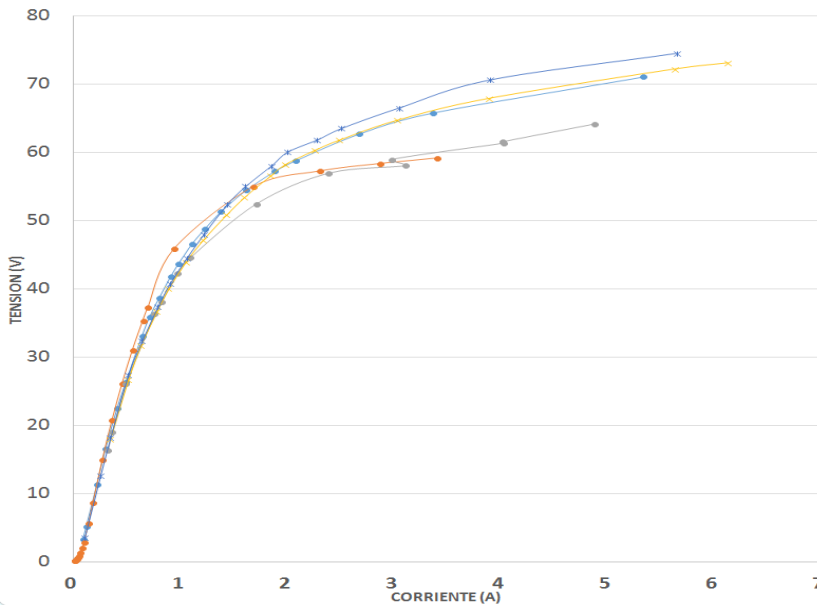
Modelado de TI

▶ Rama magnetizante

▶ El programa ATP cuenta con dos rutinas auxiliares :

▶ SATURATION →

▶ Convierte la curva de saturación tensión-corriente RMS en una curva flujo-corriente en valores de pico.



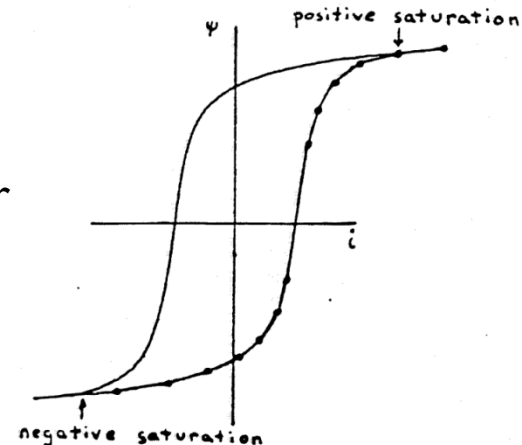
Modelado de TI

▶ Rama magnetizante

▶ El programa ATP cuenta con dos rutinas auxiliares :

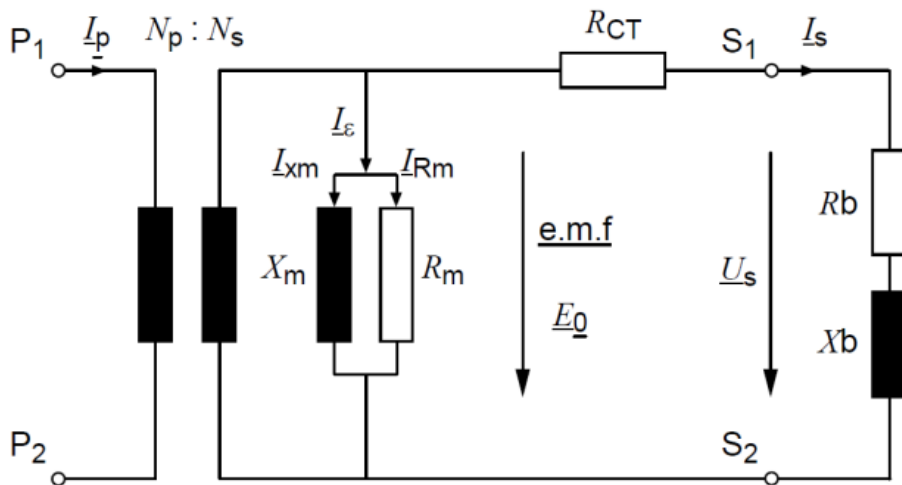
▶ HYSTERESIS→

- ▶ Define el lazo de histéresis mayor en función de trayectorias predefinidas en el plano flujo -corriente, las cuales son escaladas en función del punto de saturación indicado al software.
- ▶ Las mencionadas trayectorias predefinidas están asociadas a un material específico para el núcleo, denominado ARMCO Mn.
- ▶ El cálculo del loop de histéresis es muy sensible al punto de saturación requerido como parámetro de entrada por la función, esto complejiza el ajuste de la característica.



Modelado de TI

► Modelo lineal, sin saturación

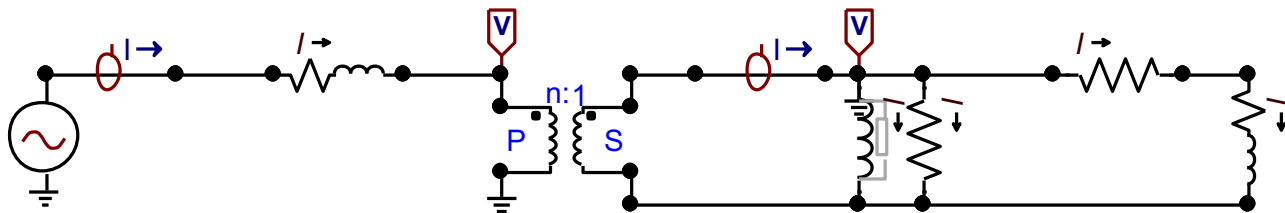
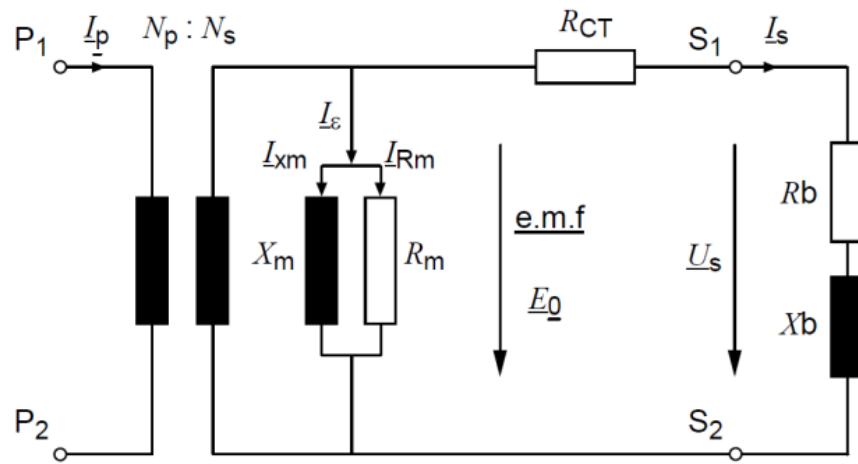


No se representa:

- Inductancia de fugas primaria ni la resistencia del arrollamiento primario, se consideran despreciables frente a la impedancia del sistema.
- Inductancia de fugas secundaria, se considera despreciable frente a la resistencia del arrollamiento secundario y la carga del circuito.
- La variación de X_m en función de la tensión.
- R_m puede ser despreciada ya que su valor es muy elevado frente a X_m .

Modelado de TI

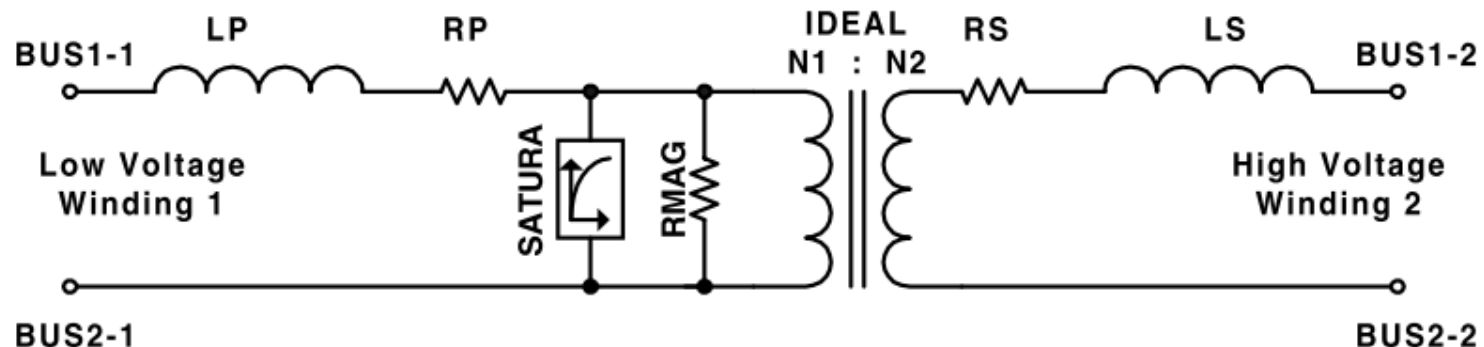
- ▶ Modelo lineal, sin saturación



Modelado de TI

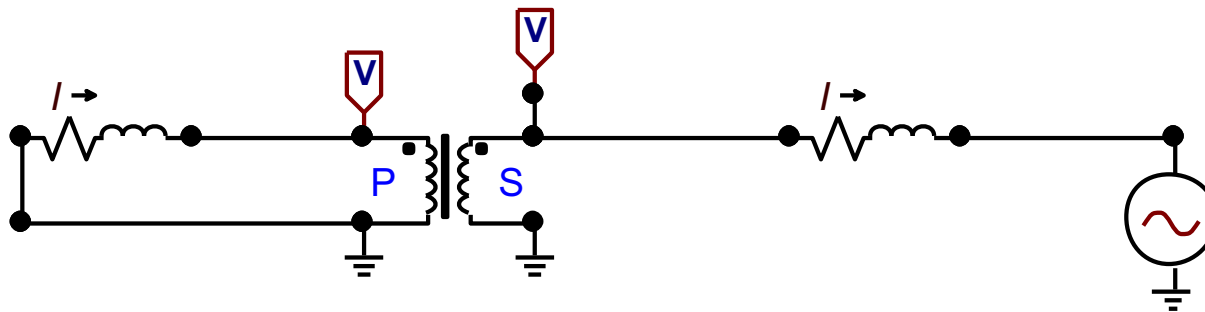
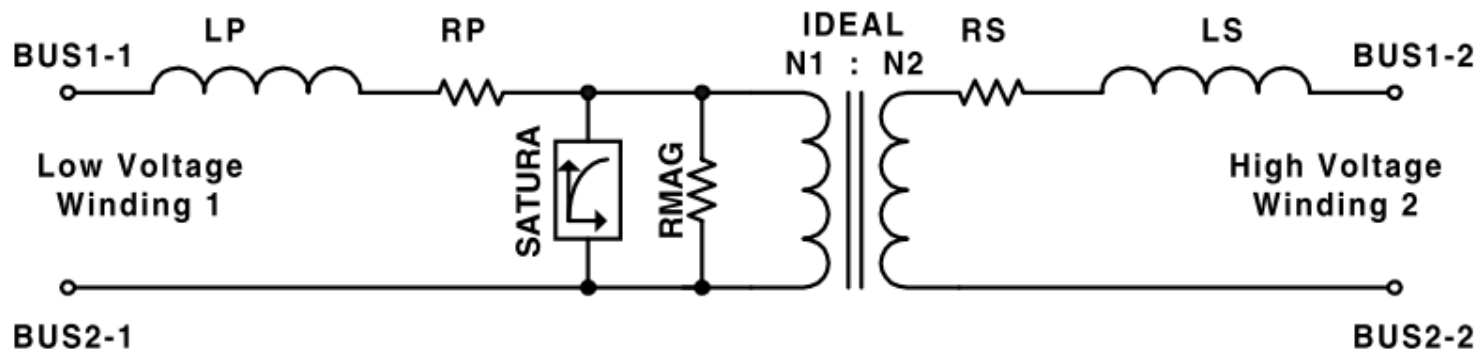
- **Modelo no lineal sin histéresis.**

- El modelo puede construirse mediante el transformador saturable incluido en el ATP.
- Puede modelar la no linealidad del núcleo, pero no contempla la histéresis ni el flujo remanente.
- Tener en cuenta que coloca la rama magnetizante del lado primario, con lo cual para contemplarla en el lado secundario hay que conectar “al revés el transformador”.



Modelado de TI

- **Modelo no lineal sin histéresis.**



Modelado de TI

- **Modelo no lineal con histéresis.**

- El modelo puede construirse mediante el transformador saturable incluido en el ATP (pero anulando la rama magnetizante del mismo), o con un transformador ideal.
- En función de lo anterior puede modelarse los distintos elementos del modelo de forma independiente.
- La no linealidad del núcleo se modela mediante un elemento no lineal con histéresis (Elemento tipo 96 en el ATP).
- Esto permite contemplar tanto la histéresis como el flujo remanente.

Modelado de TI

- Modelo no lineal con histéresis.

