

# CONCEPTOS SOBRE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Patricio Robles C.

Profesor Titular

Escuela de Ingeniería Eléctrica-  
PUCV

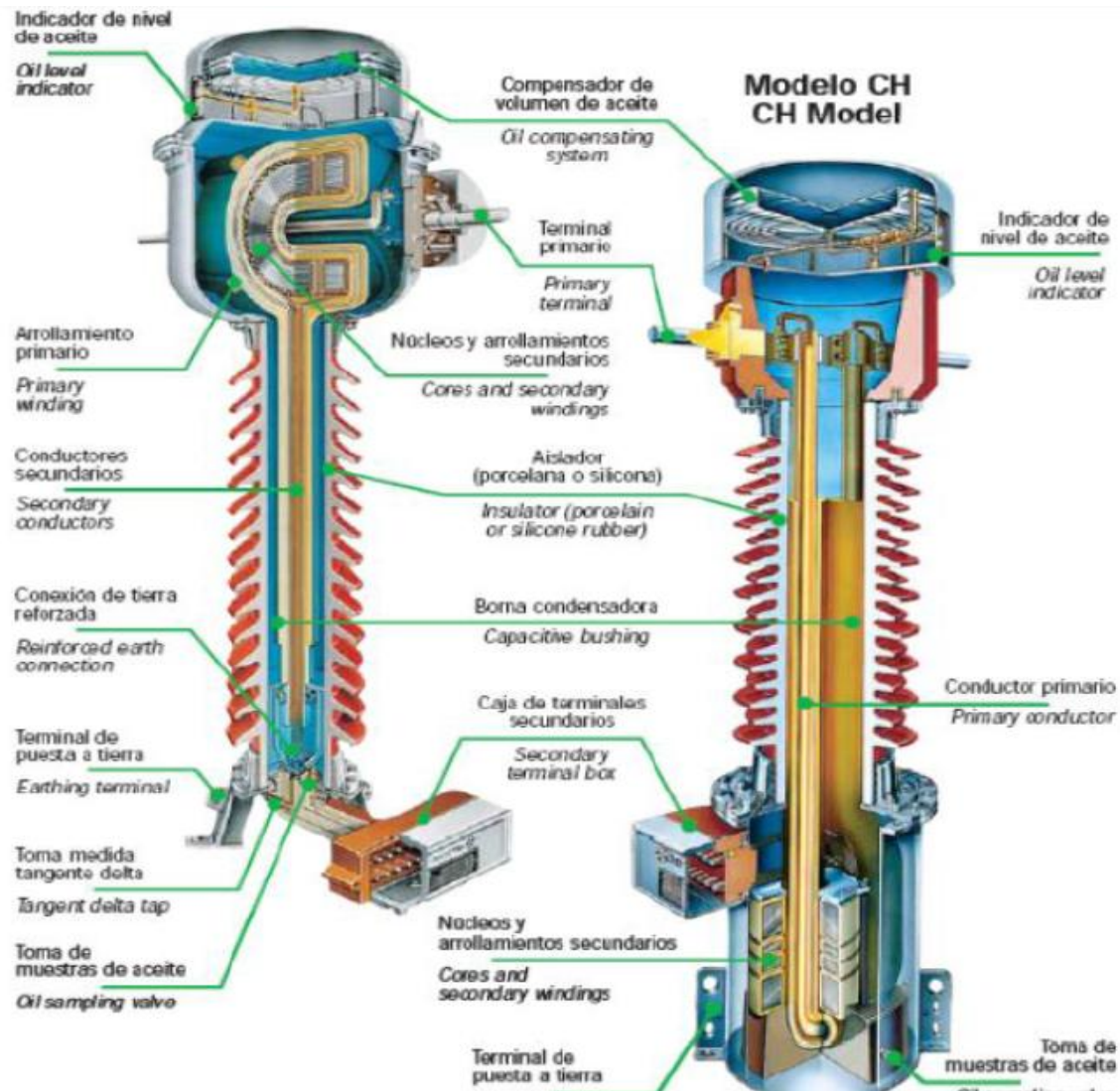
Curso Protecciones Eléctricas-  
CDEC-SING

Valparaíso, Enero 2015



# 1. ASPECTOS GENERALES

# Imagen constructiva de TTCC



# Tipos de transformadores usados en esquemas de protección

- Transformadores de corriente - TC's
- Transformadores de tensión o potencial inductivos - TTI's - TPI's
- Transformadores de tensión o potencial capacitivos - TTC's - TPC's
- Combinados de medida - CM's

# Objetivo de los TT/CC y TT/PP

- Los transformadores de instrumento son destinados a alimentar aparatos de medida y relés de protección.
- Transformar/ Reducir a valores normalizados y no peligrosos, la corriente y tensión en un sistema eléctrico con el fin de permitir el empleo de los aparatos de medición y protección normalizados.
- Hacer una separación galvánica entre la alta tensión / corriente del sistema y el circuito de medición / protección con las consiguientes ventajas en cuanto a seguridad de las personas y del equipamiento.

# Instalación de los TT/CC

- Los TT/CC deben ser instalados en serie con la componente asociada



# Transformadores de tensión inductivos

- Los transformadores de tensión inductivos deben ser instalados en paralelo con la línea, entre fase y tierra (3 equipos).





Los transformadores de  
tensión  
capacitivos deben ser  
instalados  
en paralelo con la  
línea;



Transformadores combinados: fabricados para proveer ambas medidas corriente y tensión en uno solo equipo.

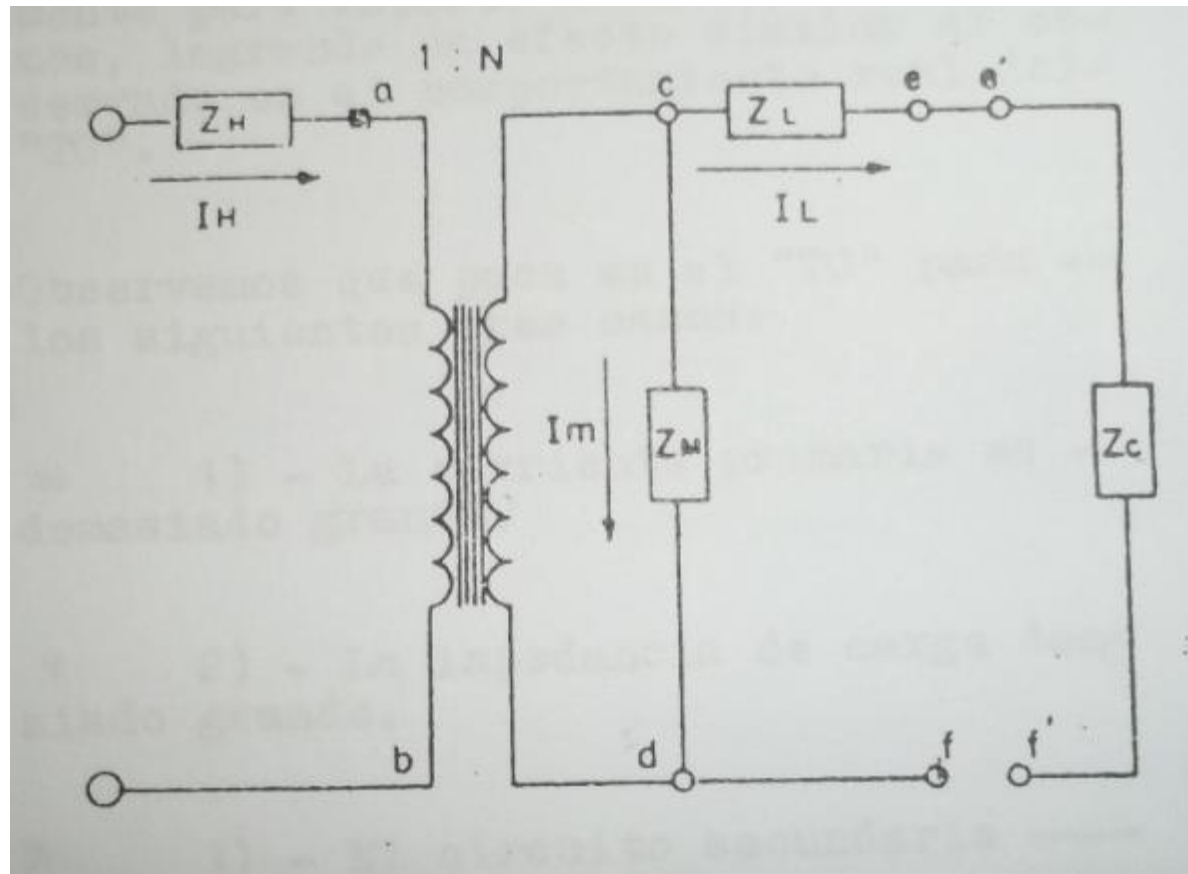


# Algunas definiciones

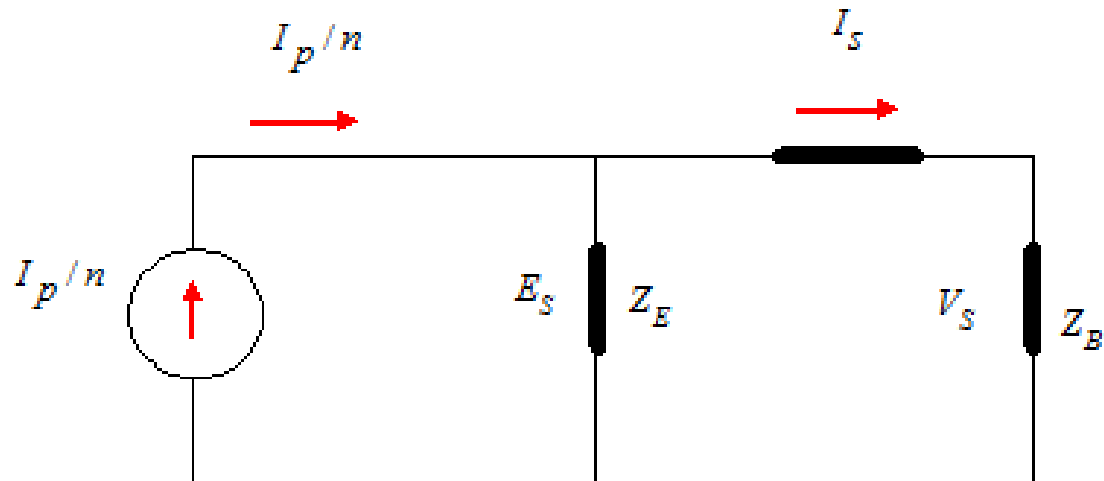
- **Burden:** es el circuito o carga conectada al secundario (en ohms o potencia)
- **Burden nominal:** es la carga conectada por un tiempo ilimitado, que asegura la característica de exactitud de un Transformador de medida
- **Razón de transformación real:** es la razón de transformación real entre los valores primarios y secundarios bajo condiciones específicas
- **Razón nominal:** razón indicada en la placa
- **Factor de corrección de razón (FCR):** es el factor por el cual debe multiplicarse la razón de placa para obtener la razón real

## 2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TC Y CAUSAS DE LOS ERRORES DE MEDIDA

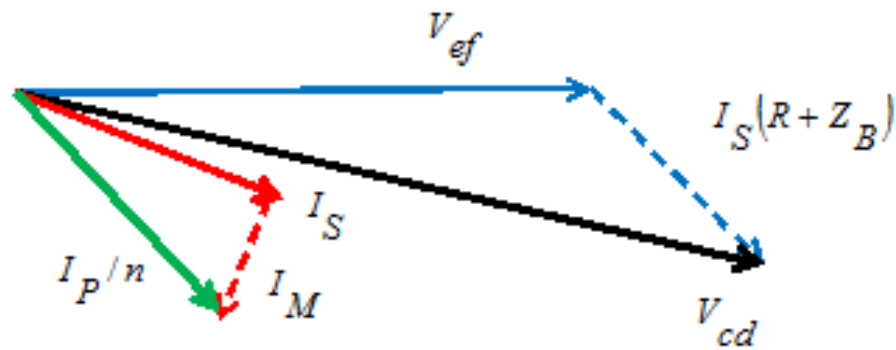
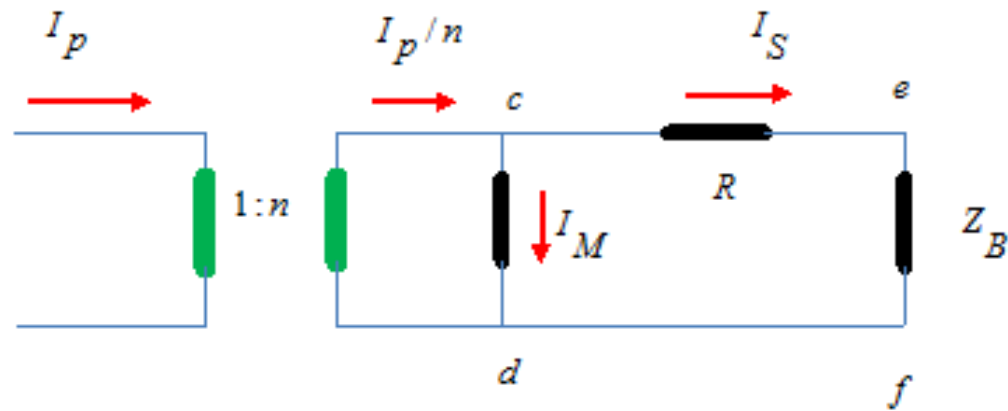
# Circuito equivalente de un TC



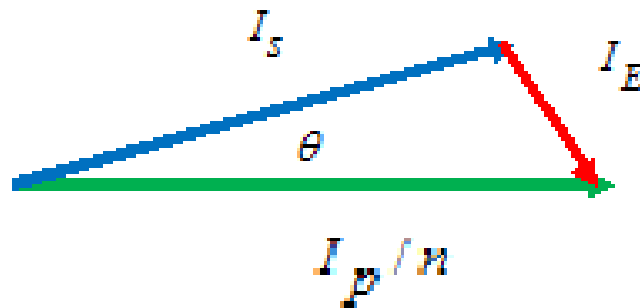
# CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO



# tensiones y corrientes en secundario de un TC



# Errores de relación de transformación y fase

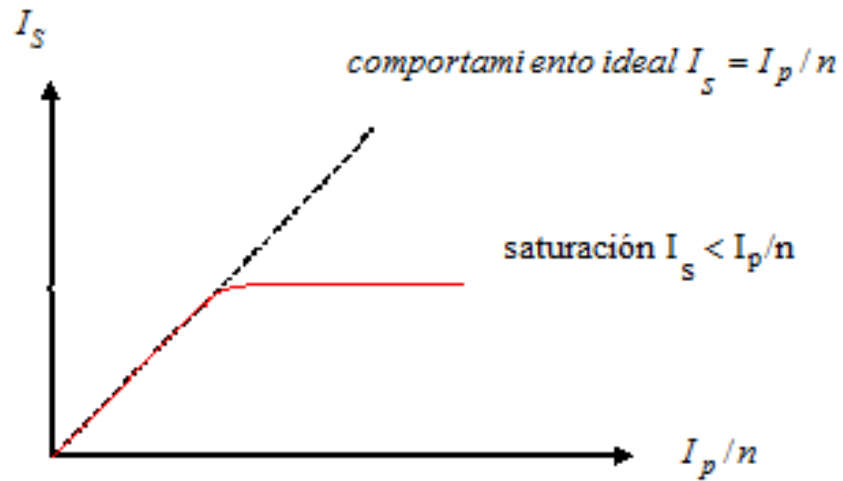




# Causas de los errores en TT/CC

- En un TC las impedancias primarias no ejercen ninguna influencia sobre la precisión del aparato; ellas únicamente introducen una impedancia en serie con la línea, la cual es despreciable.
- El error se debe únicamente a la corriente que circula por la rama magnetizante.
- La impedancia secundaria se reduce prácticamente a la parte resistiva sumándose a la impedancia de la carga ( $Z_c$ ).

# Error debido a la saturación



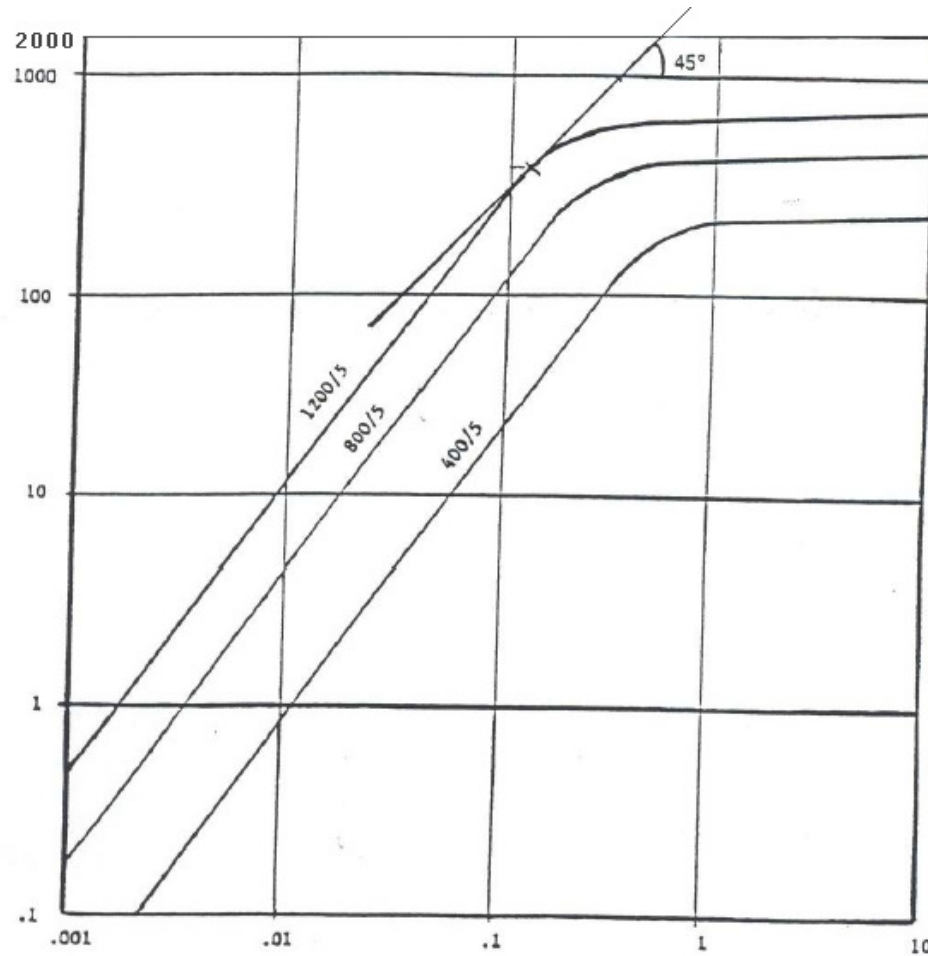
# Efecto de la saturación magnética

- La relación entre las corrientes primaria y secundaria deja de ser lineal
- Al aumentar la carga conectada al secundario de un TC se alcanza el valor de inducción magnética para el cual se produce saturación en la curva B (H)
- La saturación se produce típicamente para B del orden de 100000

líneas/pulg<sup>2</sup>

$$V_{cd} = I_L (Z_L + Z_C) = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot B_{\max} \cdot 10^{-8} [Volt]$$

# Curvas de saturación típicas $I_H$ versus $I_M$



# Consideraciones sobre el efecto de saturación

- Los TTCC para medición deben retratar fielmente la corriente a ser medida.
- Para medición, en caso de corto circuito, es mejor que el núcleo de medición del TC sature, proporcionando una auto protección a los equipamientos de medición conectados en su secundario.
- Los TTCC de medición deben mantener su precisión para corrientes nominales, mientras tanto los TTCC de protección deben ser precisos hasta el valor del factor limite de exactitud (FLE) especificado.
- Los núcleos magnéticos de los TTCC de medición son de sección menor que los de protección para que saturen durante el cortocircuito cuando la corriente primaria llega a valores altos.

# Tiempo para saturación

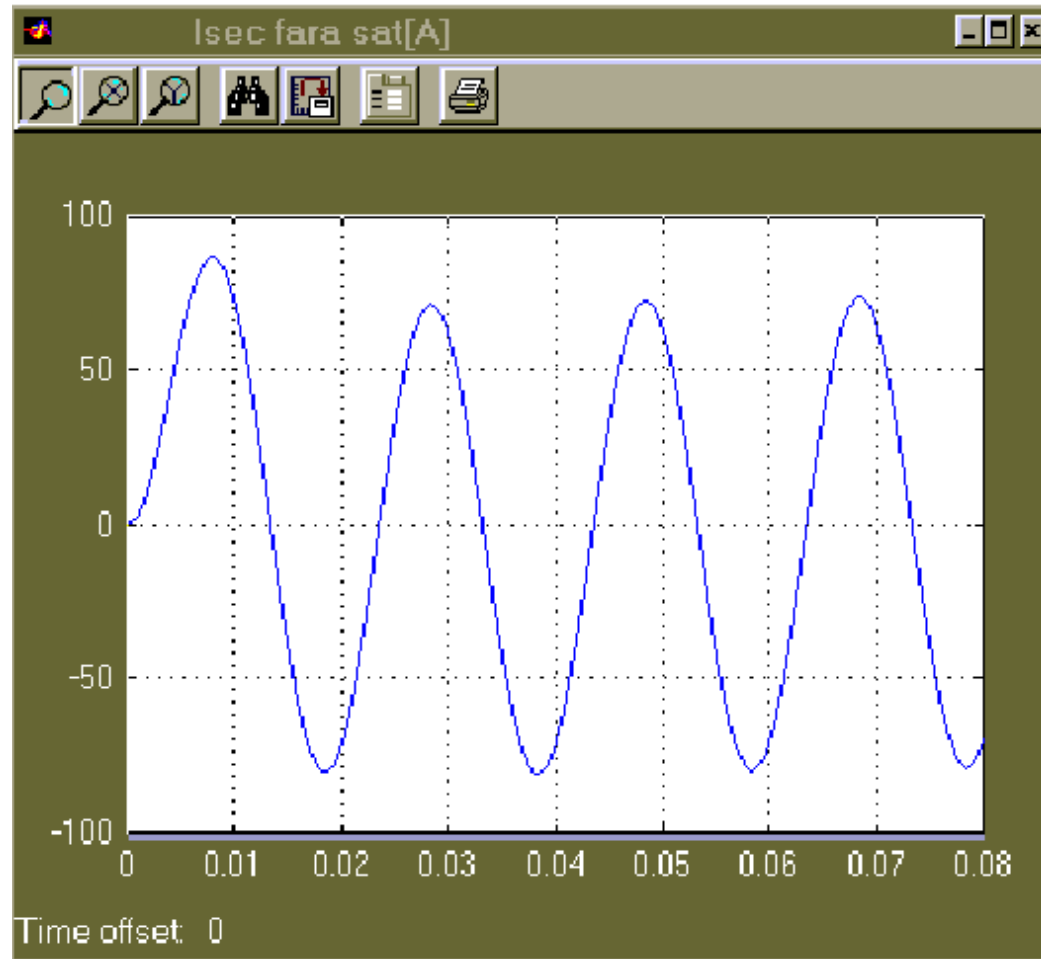
- Un TC para protección en general es capaz de replicar la corriente primaria asimétrica por un par de ciclos hasta que el núcleo entre a la zona de operación distorsionada por saturación.
- **FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA SATURACIÓN**
- Grado de asimetría por la componente transitoria de CC en la onda de corriente de cortocircuito
- Razón X/R en el punto en que se ubican los primarios de los TTCC
- Magnitud de la corriente máxima de falla ( $I_{f\ Max}$ )
- Flujo magnético remanente en el núcleo

# FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA SATURACIÓN

- Impedancia del circuito secundario ( $R_s + R_B$ )
- Tensión de saturación ( $V_{SAT}$ )
- Relación de vueltas
- Fórmula aproximada para calcular el tiempo de saturación según IEEE Standard C37. 110.1996

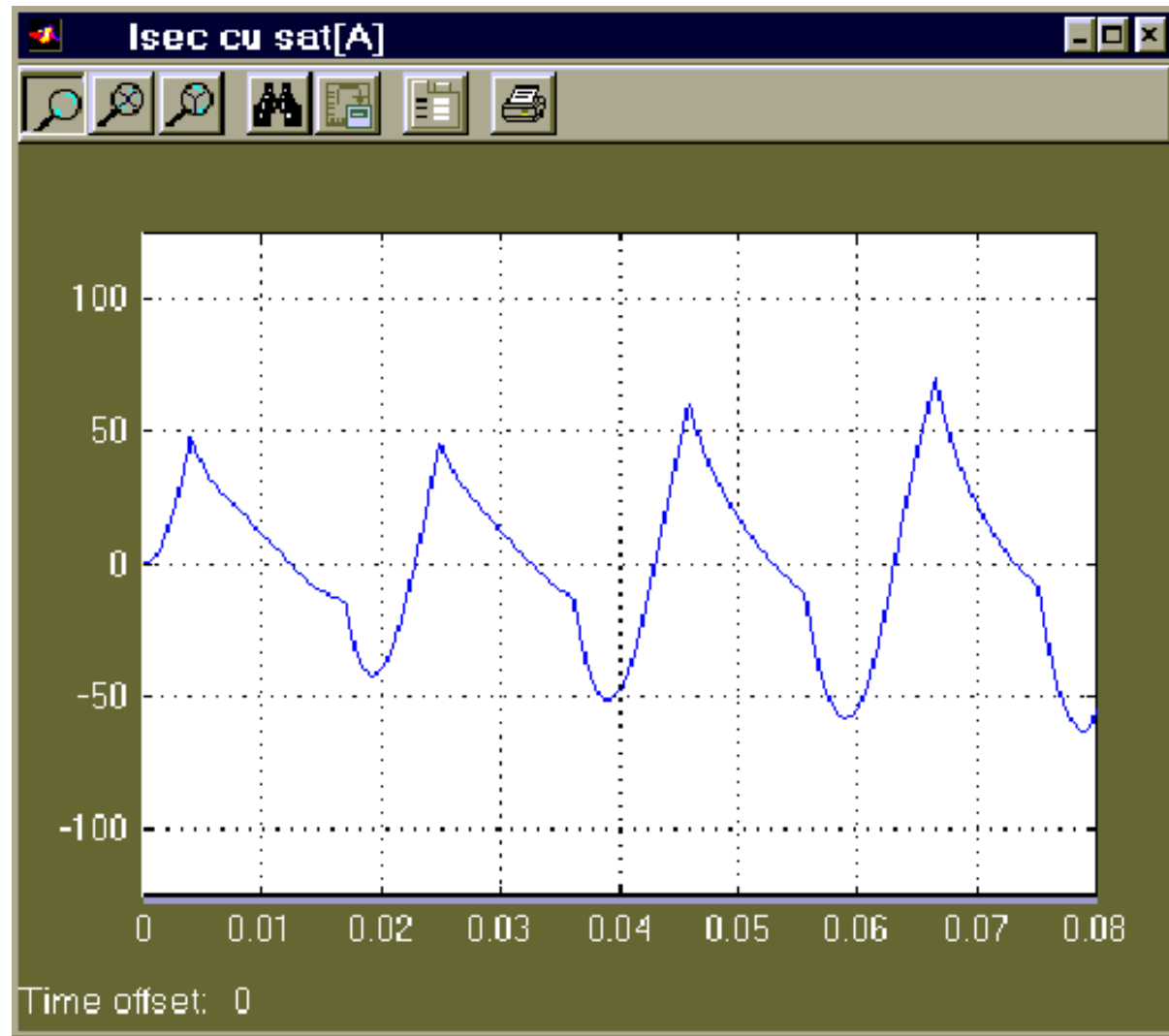
$$T_{SAT} = -\frac{X/R}{\omega} \ln \left[ 1 - \frac{\frac{V_{SAT}}{I_{f\ Max}(R_s + R_B)} - 1}{X/R} \right]$$

# Comportamiento transitorio de TT/CC: corriente secundaria sin saturación





# Comportamiento transitorio de TT/CC: corriente secundaria con saturación

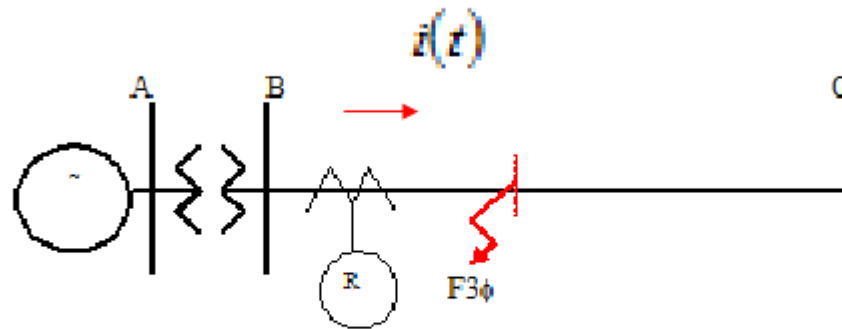


# Comportamiento transitorio de la corriente de cortocircuito

$$i(t) = \sqrt{2}I_{sc}\sin(\omega t + \phi - \alpha) - \sqrt{2}I_{sc}e^{-t/T_p}\sin(\phi - \alpha)$$

$\phi$  es el ángulo de fase de la tensión en  $t = 0$  (inicio falla)

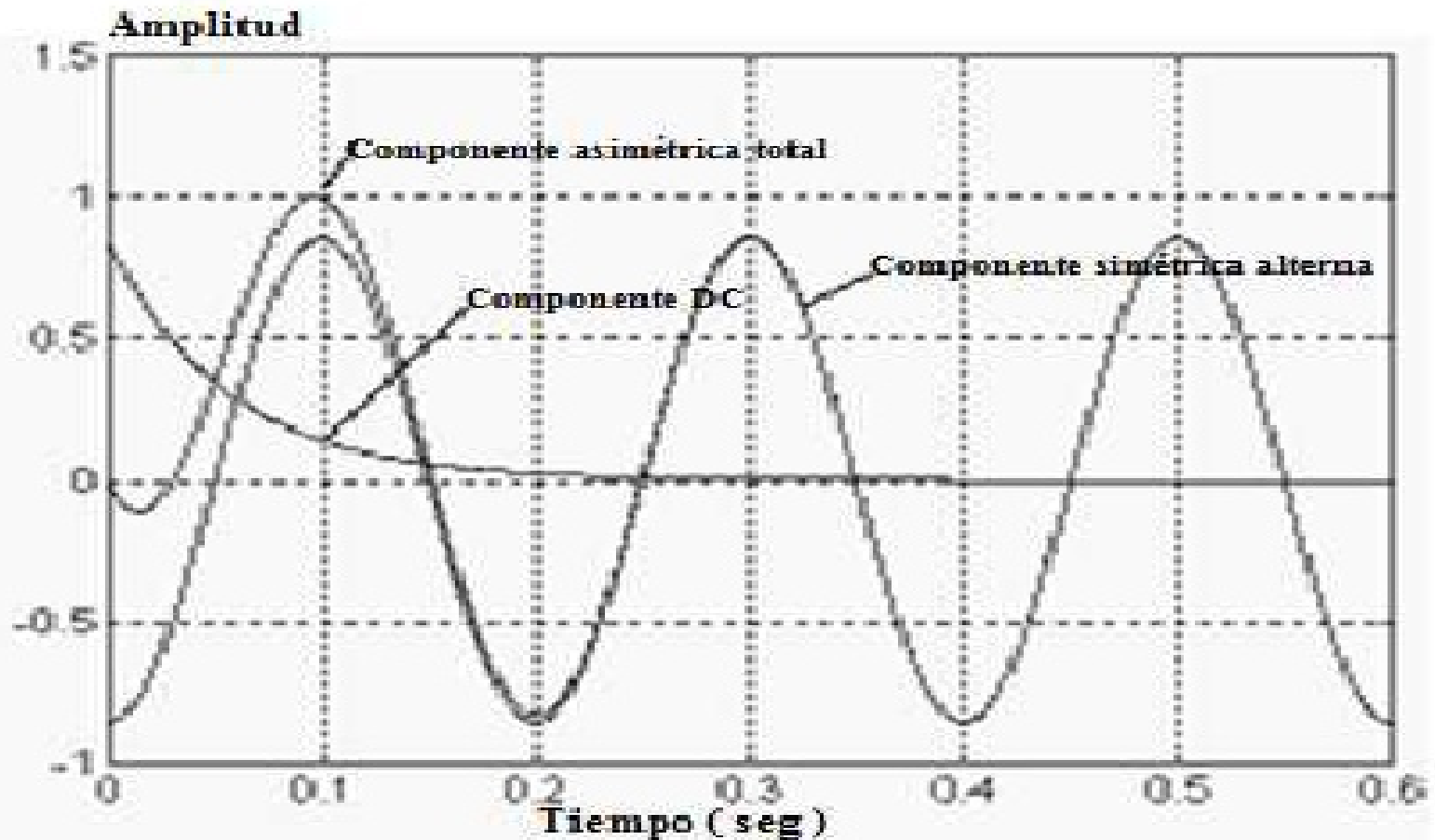
$$\alpha = \tan^{-1}[X_e / R_e] = \tan^{-1}[2\pi f T_p]$$



# Corriente de excitación en secundario de TT/CC en régimen transitorio

- Esta corriente también tiene una componente alterna a la que se superpone una componente transitoria (CC)
- La componente CC puede producir errores significativos en la medición de corriente mientras esté presente la falla

Corriente transitoria cuando la onda de tensión pasa por cero (máxima componente continua)



# **Protección diferencial de barras ante efectos transitorios de cortocircuito**

- En la aplicación de relés diferenciales numéricos, se debe asegurar un tiempo sin saturación para que el relé opere de forma correcta, el cual varía entre 2,5-10 ms para fallas internas.
- Para fallas externas, se debe tener en cuenta el tiempo de operación de la protección asociada (p. ej. función de protección de sobrecorriente).
- Durante esta ventana de tiempo, los TC no deben saturarse para asegurar la estabilidad de la protección diferencial.

# Factor de sobredimensionamiento transitorio

- Se define como la relación:  
 $K_{tf} = \text{Corriente total excitación/peak componente CA}$

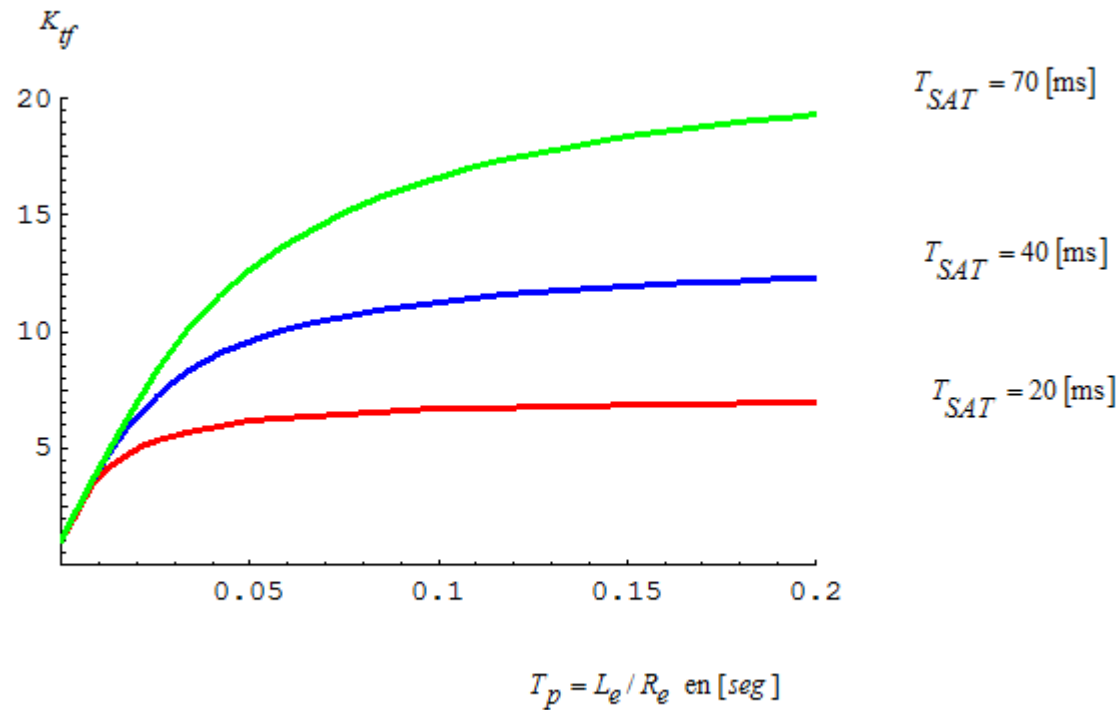
Del circuito equivalente de un TC se obtiene  
que en la peor condición

$$K_{tf}(t) = \frac{T_p + T_s}{T_p - T_s} (e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s}) + 1$$

Para  $T_s \gg T_p$  la expresión anterior tiende a  $K_{tf}(t) = 1 + (X_e / R_e)$

En curvas de dibujo que sigue se muestra  $K_{tf}$   
versus  $T_p$  para  $T_s = 3 \text{ s}$

Factor de amortiguamiento  
transitorio versus  $T_p = L_e/R_e$  para  
 $T_s = 3 \text{ seg}$



# Norma IEC 44-6 para la tensión secundaria de excitación

$$E_{al} = K_{ssc} K_{tf} (R_{ct} + R_b) I_{sn}$$

- $E_{al}$  es la tensión secundaria de excitación que corresponde a la corriente de magnetización para la cual se produce el máximo error permisible
- $K_{ssc}$  es la relación corriente de falla/corriente nominal  $I_{sn}$
- $R_{ct}$  es la resistencia secundaria del TC
- $R_b$  es la resistencia de burden



# Efecto del flujo magnético remanente

- Flujo residual que permanece en el circuito magnético después de interrumpir la corriente primaria de un TC
- El peor caso para la saturación de un TC es cuando este flujo se adiciona al producido por la corriente de falla
- Se define el factor de remanencia como la relación  $\frac{\Phi_{rem}}{\Phi_{sat}}$  entre el flujo remanente  $\Phi_{rem}$  y el flujo que produce saturación  $\Phi_{sat}$

# Criterio para verificar que no hay saturación de un TC

- Tensión máxima desarrollada en secundario para corriente máxima  $I_f$  en [A-sec] con impedancia Burden  $Z_B$ :

$$V_s = I_f Z_B (1 + X_{eq} / R_{eq})$$

- Este valor se compara con un valor 20 veces la tensión secundaria desarrollada con corriente nominal  $I_{nom}$  e impedancia burden standard  $Z_{B STD}$  correspondiente a la clase de tensión especificada ( por ejemplo C400).
- Considerando el flujo remanente  $K_o$  para que no haya saturación:

### 3. ESPECIFICACIÓN DE TTCC

# Pauta para especificar TTCC

- Normas que se aplican
  - Clase de tensión y Niveles de aislamiento
- Frecuencia nominal
- Cantidad de secundarios, clase de precisión y carga de cada secundario, Factor de Seguridad (FS) y Factor de limite de exactitud (FLE);

# Pauta para especificar TTCC

- Corrientes nominales (relación de transformación) y factor térmico;
- Tipo de conexión: en el primario o en el secundario;
- Corriente de cortocircuito térmica y dinámica;
- Tipo de instalación y condiciones especiales de operación

# Factor de Seguridad

- El FS indica el grado de protección que el TC provee a los instrumentos conectados al secundario de medición
- El FS será bajo mientras mas rápido ocurra la saturación del núcleo de medición en presencia de un cortocircuito, lo que resulta en diseñar el núcleo de medición trabajando con una inducción lo mas alta posible en régimen normal

# Factor limite de exactitud para núcleos de protección

- El Factor limite de exactitud (*FLE*) indica el valor máximo de la corriente secundaria  $I_2$  para la cual el TC debe mantener la precisión para los núcleos de protección
- $V_{sat} = FLE \cdot I_2 \cdot Z_t$
- En la norma IEC el valor es mostrado en la representación de la clase de precisión: 50VA 10P15 → Significa que el TC de protección presenta un error del 10% a una corriente 15 veces mayor a la nominal.

# Factor térmico

- Es el factor que multiplicado por la corriente nominal resulta en la corriente máxima que el TC debe soportar en régimen permanente, en condiciones estables de operación, sin exceder los límites de aumento de la temperatura correspondientes a la clase de aislamiento, impuesto por la norma por la cual fue especificado.
- Valores estandar:  
1,0 - 1,2 - 1,3 - 1,5 - 2,0



# Corriente térmica

- Valor eficaz de la mayor corriente primaria que el TC puede soportar por efecto Joule, durante 1 segundo, sin sufrir daños y pérdida de vida útil y sin exceder los límites de temperatura especificados para su clase de aislamiento. Esta corriente se expresa en kiloamperes eficaces, o en  $n$  veces la corriente nominal primaria.
- Estandar :  $I_{th} = 80 * I_{nominal}$
- Para soportar los efectos térmicos de la  $I_{th}$ , los devanados deben ser diseñados para trabajar durante 1 segundo, con densidad máxima de corriente de 160 A/mm<sup>2</sup> en la norma IEC, y 143 A/mm<sup>2</sup> en la norma ANSI.

# Corriente dinámica

- Valor máximo de primera magnitud de la corriente primaria que el TC puede soportar sin sufrir fallas eléctricas o mecánicas debido a las fuerzas electromagnéticas.

$$I_{din} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{th} = 2.5 I_{th}$$

# Normas que se aplican

## **IEC ( International Electrotechnical Comission)**

- IEC 60044-1 - Requirements for Current Transformers
- IEC 60004-6 – Transient performance for CT's.
- IEC 61869-1 - Requirements for Instrument Transformers
- IEC 61869-2 – Additional requirements for CT's.

# Normas que se aplican

- **IEEE ( Institute of Electrical and Electronics Engineers)**
- IEEE C57.13 - Standard requirements for Instrument Transformers
- VDE 0414 - Norma Alemana
- NBR-6856/92 - Norma Brasileña
- BS 3938/73 - British Standards

# Clase de tensión y nivel de aislación

- La tensión máxima del equipo debe ser como mínimo la tensión más elevada del sistema donde el TC será instalado y de acuerdo a la norma
- Los niveles de aislación son valores estandard y deben ser definidos con base en la clase de tensión de servicio del circuito en el que el TC será instalado :
- => tensión soportable nominal a la frecuencia industrial/ tensión de impulso atmosférico/ tensión de impulso de maniobra

# Carga y clase de precisión

- Los TTCC pueden tener uno o varios núcleos separados
- Cada circuito magnético alimenta los aparatos que tengan una función definida; por ejemplo: un TC que tenga 3 núcleos, puede alimentar:
  - el primero, la medición para facturación: 0,2
  - el segundo, una protección diferencial: 5P20
  - el tercero, mediciones industriales: cl 1,0

# Carga y clase de precisión

- Un TC puede presentar un solo núcleo para medición y protección, cuando sea posible conectar, aparatos teniendo funciones diferentes, pero donde las influencias mutuas de ellas no tengan consecuencia, por ejemplo: un amperímetro indicador y un relé de sobrecorriente.

# Carga y clase de precisión

- Para selección de la carga/potencia nominal del TC, se debe añadir:

- Las potencias de los dispositivos que serán conectados en el secundario del TC (medidor o relé)
- Las potencias consumidas por las conexiones y cableado



Algunos ejemplos para especificar la clase de precisión

- **Para protección según IEC:  
5P20, 15VA -  $\cos \varphi = 0,8$**

Significa que el TC tiene un error de corriente menor que 5% en  $20 \cdot I_n$  y error menor que 1% en la  $I_n$ , con la potencia nominal de 15VA conectada en sus terminales.

# Potencia y carga admisible según norma Ansi

- Según la norma ANSI debe tomarse en cuenta la siguiente tabla donde se especifica según la clase de transformador de corriente un valor normado de Potencia en VA y la carga admisible en Ohmios.

# Potencia y carga admisible según norma Ansi

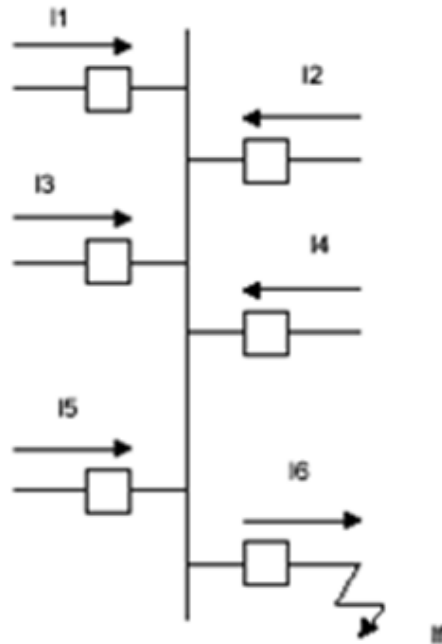
| POTENCIA Y CARGA ADMISIBLE SEGÚN NORMA ANSI |                |                        |  |
|---------------------------------------------|----------------|------------------------|--|
| CLASE                                       | POTENCIA EN VA | CARGA ADMISIBLE EN OHM |  |
|                                             |                |                        |  |
|                                             |                |                        |  |
| C-10                                        | 2,5            | 0,1                    |  |
| C-20                                        | 5              | 0,2                    |  |
| C-50                                        | 12,5           | 0,5                    |  |
| C-100                                       | 25             | 1                      |  |
| C-200                                       | 50             | 2                      |  |
| C-400                                       | 100            | 4                      |  |
| C-800                                       | 200            | 8                      |  |

# Algunos ejemplos para especificar la clase de precisión

- Para protección según IEEE: C100 -  $\cos \phi = 0,9$  ó  $0,5$
- Significa que el TC tiene un error de corriente menor que 10% con corriente  $20 \cdot I_n$  y error menor que 3% en la  $I_n$ , con la potencia nominal de 25VA conectada en sus terminales. ( $V_{sat}=100V$  e  $I_s=5A$ )
- La potencia nominal de  $25VA$  corresponde a una impedancia de burden  $Z_B = 1 [\Omega]$ :  
$$5^2 Z_B = 25$$

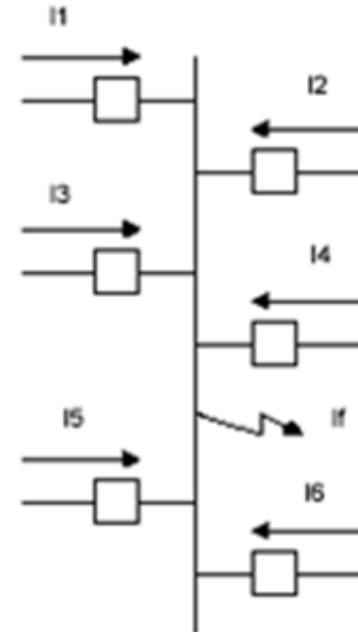
## 4. TTCC y ESQUEMAS DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRAS

# TTCC para protección diferencial de barras



$$I_f = I_6 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5$$

*a. falla externa*



$$I_f = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

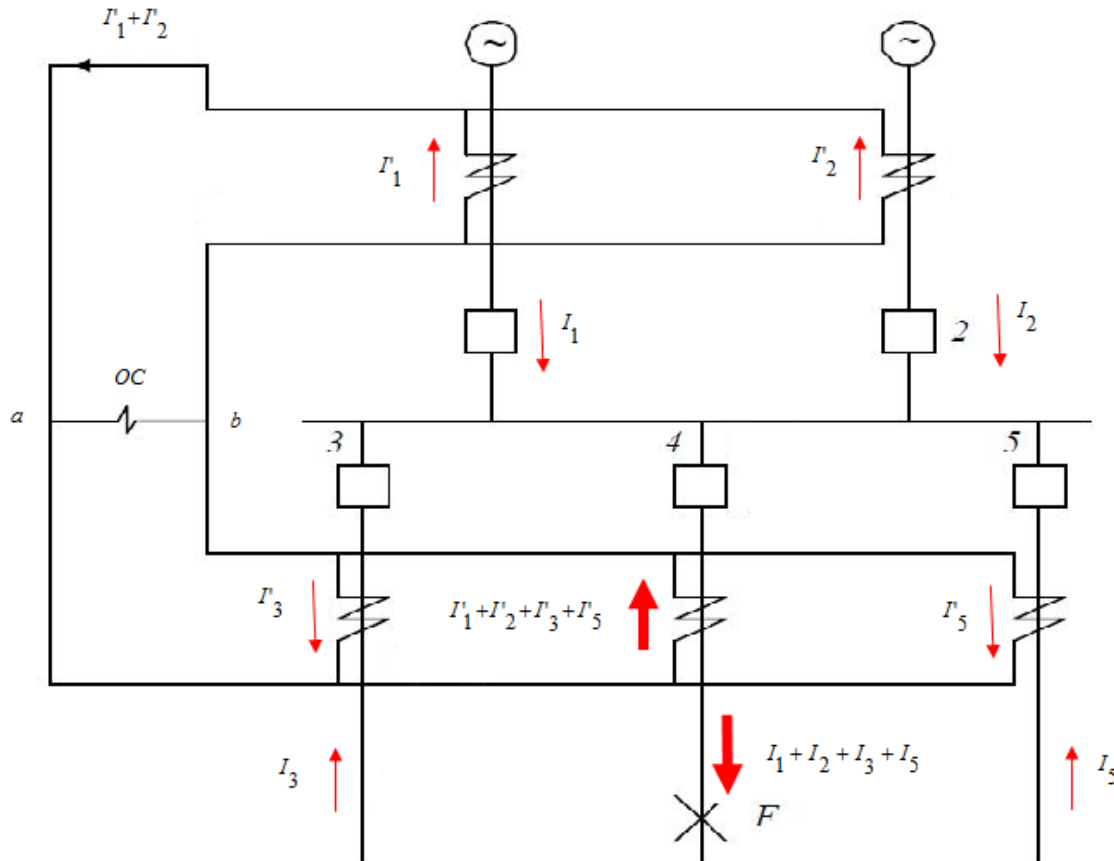
b. Internal Fault

b. falla interna

# Principio protección diferencial de barras

- Ante falla interna por bobina OC circula corriente diferencial  $I_d$
- Para condiciones normales o de falla externa  $I_d \approx 0$  si no hay errores en los TTCC
- Pero en este último caso una de las líneas conectadas a la barra recibe todos los aportes de corriente de falla
- Lo anterior unido a componente transitoria de la corriente de cortocircuito → Saturación TTCC correspondientes y errores de medida  
→ **Posible operación errónea del esquema !!**

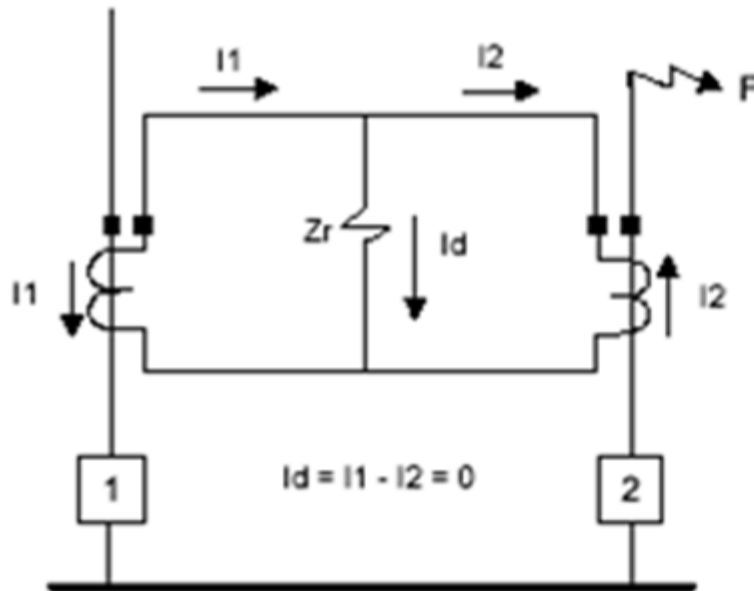
# Ilustración para una barra simple



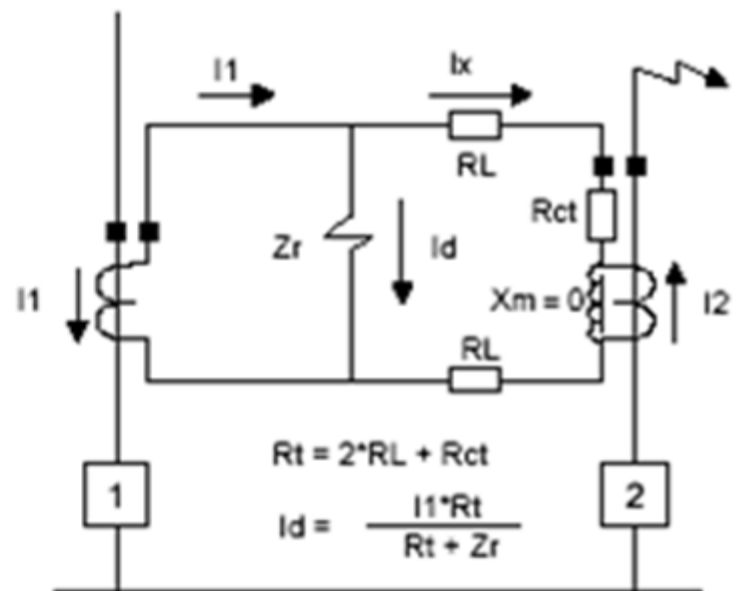


# Principio protección diferencial alta impedancia

- Para falla interna no hay saturación, pero sí para falla externa.
- Relé 87B discrimina en base a tensión



a. Sin saturación de los TTCC



b. Con saturación de los TTCC

# Principio protección diferencial alta impedancia

- El relé conectado a través de los puntos de unión de los TTCC tiene una impedancia  
∴ la tensión a través de dicho relé es
- Los cálculos se efectúan a través de cada TC de circuito para determinar el máximo que se podría desarrollar. La función 59 del relé se ajusta con un valor superior a este máximo con un margen adecuado.

# Principio protección diferencial alta impedancia

- Para fallas internas, debido a la alta impedancia se pueden desarrollar tensiones muy altas a través del relé  $\Rightarrow$  riesgo de daño en los TTCC y / o en el relé .
- Una solución es limitar esta tensión mediante un circuito que tiene un elemento Thyrite, que muestra una resistencia que varía en forma inversa con la tensión.
- Para corrientes de falla muy altas, el elemento Thyrite permite circular una cantidad significativa de corriente. Un relé de sobrecorriente en serie con dicho elemento proporciona protección adicional.

# Requerimiento de los TT/CC en esquemas de protección diferencial de alta impedancia

- Para fallas externas los requerimientos se basan en que los TTCC del circuito en fallas se saturan completamente (peor caso)
- Tensión desarrollada a través del relé diferencial de alta impedancia  $<$  que para falla interna
- Si  $V_{87} < V_{ajuste} \rightarrow$  No operación ante falla externa  $\rightarrow$  Estabilidad del esquema

$$V_{87} = \frac{I_{max}}{relación\ TC} (R_{CT} + R_L) [Volt]$$