

# Protección SEP



# Objetivos del Curso

- Entender y Aplicar los conceptos de relevadores de protección a los diferentes equipos que forman parte de un SEP.
- Desarrollar habilidades en el diseño y en el análisis de contingencias del SEP.
- Proporcionar al estudiante experiencias prácticas en el ajuste de relevadores y en el manejo de software de aplicación.

# Temario

- Introducción
- Fundamentos de Relevadores
- Cálculos Por Unidad (P.U)
- Fasores y Polaridad
- Componentes Simetricas, Cálculos de Fallas
- Transformadores de Instrumentos PT/CT
- Principios de Aterrizaje del Sistema
- Protección de Transformadores
- Protección de Barra
- Protección de Líneas de Transmisión
- Protección de Generadores
- Fundamentos de Relés Microprocesados
- Software de Simulación

# Bibliografía

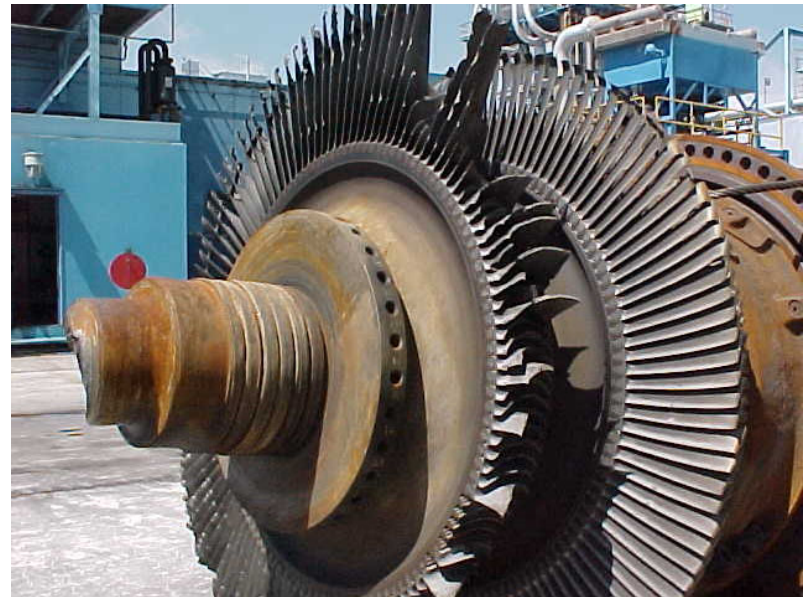
- Juan M. Gers and Edward J. Holmes “Protection of Electricity Distribution Networks” 2nd Edition, IEE, London-2004.
- John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. “Análisis de Sistemas de Potencia” Mc Graw Hill, 1998.
- C. Russell Maison, “The Art & Science of Protective Relaying” General Electric.

## **OTRAS LECTURAS:**

- Paul M. Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, IEEE PRESS, 1995.
- J. Lewis Blackburn, “Symmetrical Components for Power Systems Engineering”. Marcell Dekker, Inc. 1993
- J. Lewis Blackburn, “Protective Relaying: Principles and Applications”, Second Edition, Marcell Dekker, Inc. 1997.

# Introducción

- Los sistemas de potencia deben ser diseñados para que los relevadores de protección operen rápidamente al detectar una falla y puedan aislar el equipo de modo que se reduzcan la duración y extensión de las interrupciones del servicio.
- Los relés de protección son importante en los sistemas industriales, porque pueden prevenir grandes perdidas en la producción o daño innecesario en los equipos como consecuencia de un corto circuito o una sobrecarga



# Definiciones

- ¿ Que es un relé?  
Según la IEEE “ Es un dispositivo eléctrico que esta diseñado para producir una modificación dada en un circuito eléctrico, cuando se alcanzan condiciones de entradas específicas y pre ajustadas”
- ¿Qué es un relé de protección?  
“Es un dispositivo cuya función es detectar condiciones anormales o de naturaleza peligrosa para líneas, transformadores o cualquier otro dispositivo eléctrico que forme parte de la red.”

# Características Básicas de Diseño

- **Confiabilidad:** Asegura que la protección realice correctamente la función para la cual fue diseñada.
- **Selectividad:** Continuidad máxima del servicio, con la mínima desconexión del sistema.
- **Velocidad:** Duración mínima de la falla y un daño mínimo del equipo.
- **Simplicidad:** Equipo de protección mínimo, para alcanzar objetivos del esquema.
- **Economía:** Máxima protección a menor costo.

# Confiabilidad

Confiabilidad



Seguridad

Dependabilidad

- Dependabilidad:

Esta asociada con el grado de certeza que el relevador o sistema de protección operará correctamente (si cuando si).

- Seguridad:

Esta asociada con el grado de certeza de que el relevador o sistema de protección no operará incorrectamente (no cuando no).



# Selectividad



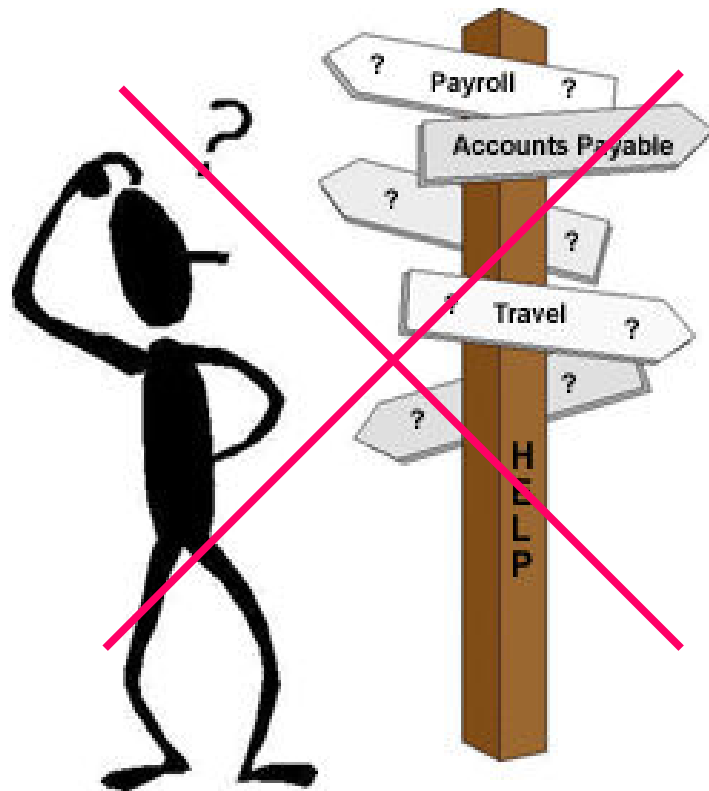
- Se le conoce también como “coordinación”, y es el proceso de ajustar y aplicar los relés de protección para que operen tan rápido como posible en su zona primaria de actuación, teniendo también un retardo de tiempo en su zona de respaldo.
- Mantiene la continuidad del suministro, desconectando la mínima sección de la red para aislar la falla.

# Velocidad



- Los esquemas de protección deben ser lo suficientemente rápidos, instantáneos, para despejar fallas en su zona primaria sin caer en operaciones no deseadas.
- Una protección de alta velocidad, según la IEEE, debe operar en menos de 3 ciclos.
- Instantáneo, significa que no hay retardo intencional en la operación del dispositivo.

# Simplicidad



- Los esquemas de protección deben mantenerse lo mas sencillo posible, mientras más sofisticados, incrementamos el riesgo de errores en su programación y consecuente mal funcionamiento.

# Economía

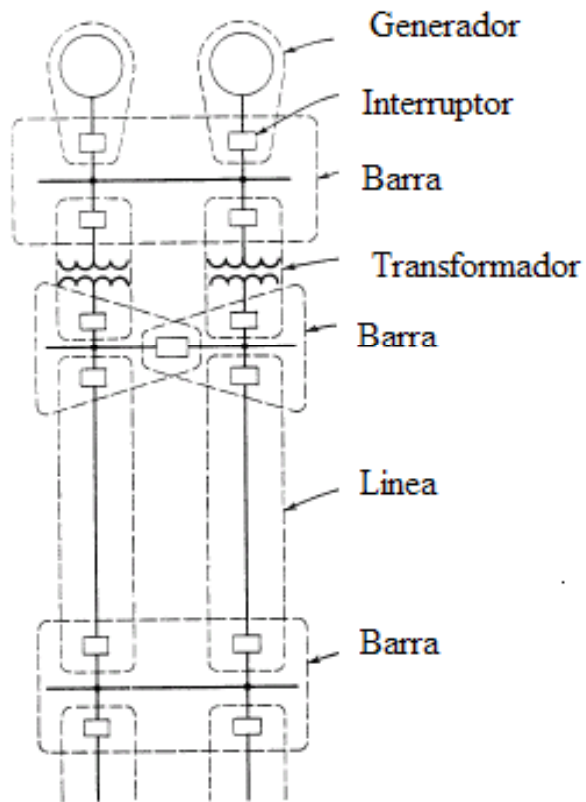


- El costo de los equipos de protección juegan un papel importante al momento de seleccionar un dispositivo.
- Al momento de evaluar debemos también tomar en consideración si los dispositivos cumplen con las especificaciones técnicas

# Clasificación de Relevadores

- Los Relevadores pueden Clasificarse por:
  - Función ( más común)
  - Señal de Entrada
  - Construcción
- Hay 5 tipos de funciones:
  - Protección
  - Regulación
  - Recierre y sincronización
  - Monitoreo
  - Auxiliar

# Principios de Aplicación



- La filosofía general de la aplicación de relevadores, es dividir el sistema de potencia en zonas de protección:

- 1-Generadores – Transformadores
- 2- Transformadores
- 3- Barras
- 4- Líneas
- 5- Equipos Auxiliares
- 6- Capacitor - Reactor

# Protección Primaria y Respaldo

- Protección Primaria: Debe operar cada vez que un elemento detecta una falla en el sistema. El elemento puede cubrir uno o mas componentes del sistema.
- Protección de respaldo: Es instalado para operar cuando por alguna razon, la protección primaria no opera. Para alcanzar esta condición el elemento de protección puede o no, ser similar a la protección primaria. Debe permitir al elemento primario operar primero.

# Protección Respaldo

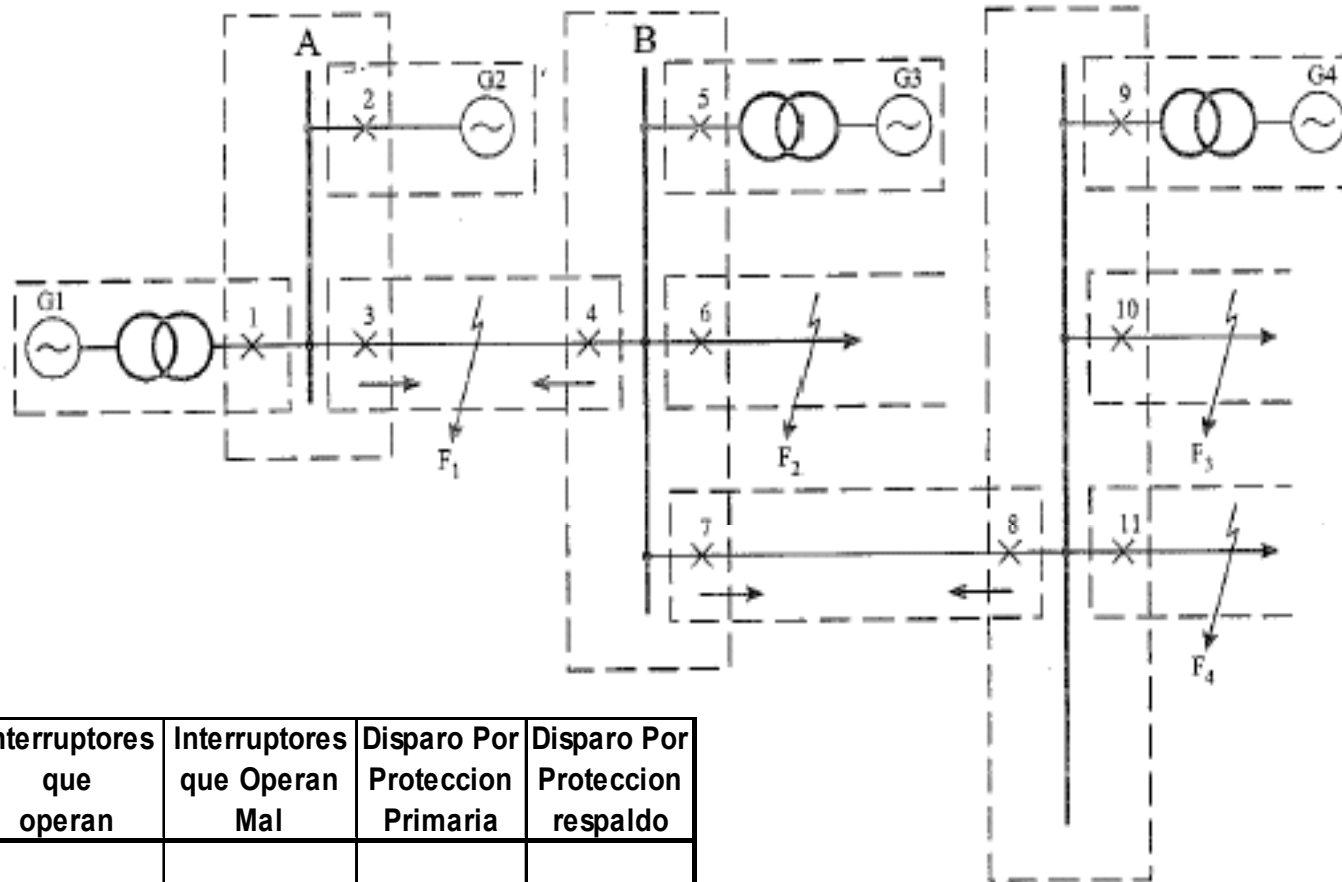
- Respaldo Local: Es localizada en la zona donde ocurre la falla y puede disparar el interruptor primario o los interruptores de zona adyacentes: ejemplo de protección de respaldo local es el esquema de proteccion de fallo de interruptor.
- Respaldo Remoto: Es localizada en zona adyacentes y generalmente solo dispara interruptores en su zona de operación: un ejemplo son las protecciones de distancia de lineas en los extremos de subestaciones adyacentes



# Protección Direccional

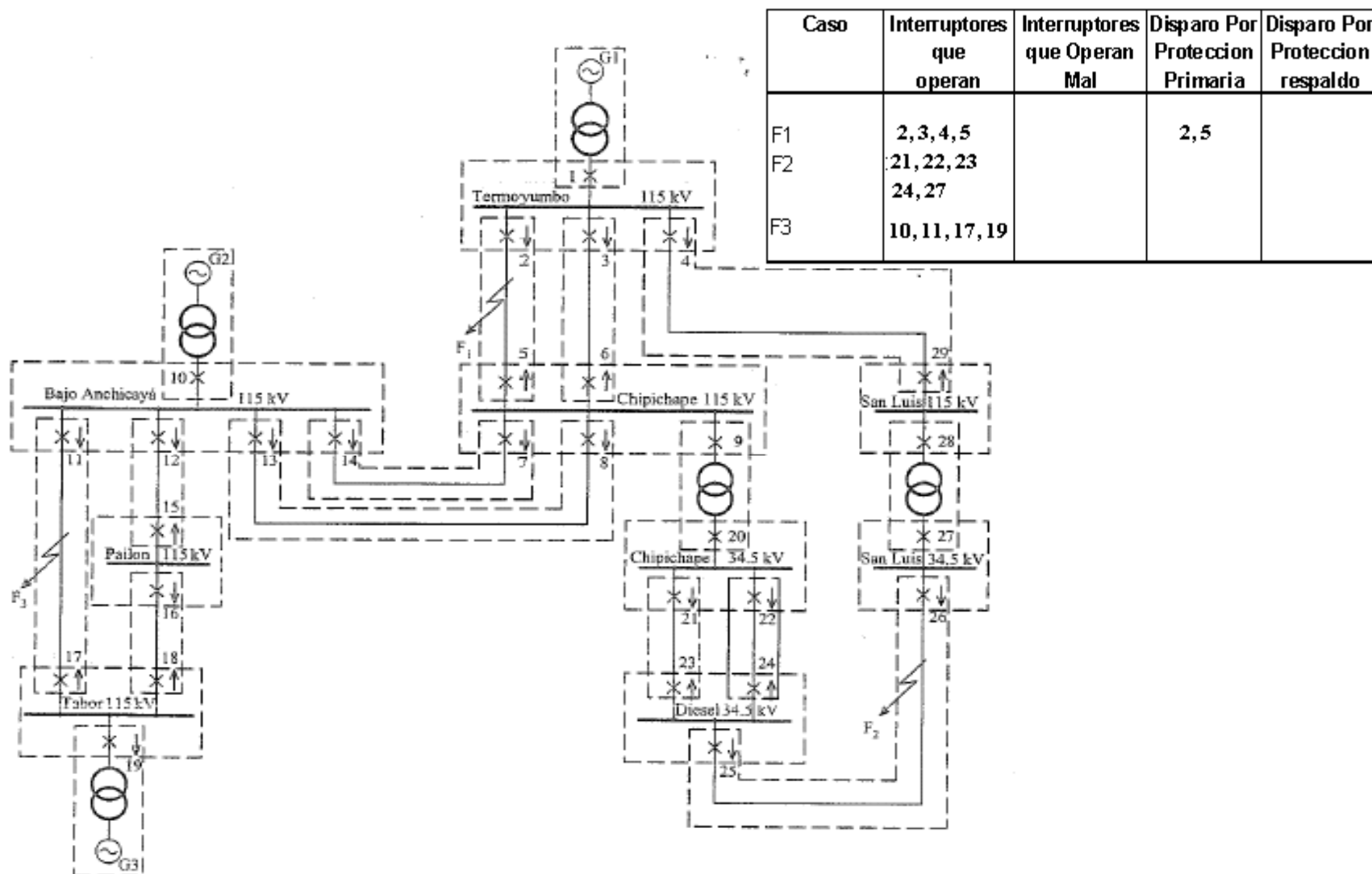
- Una característica importante de algunos relevadores, es la capacidad de determinar la dirección del flujo de Potencia, de forma tal que se bloquea para flujos en la dirección opuesta del ajuste del relevador.
- Estos relevadores son importantes, para la protección de redes malladas, o donde hay varias fuentes de generación.
- Usualmente la dirección del flujo es indicada por una flecha 

# Ejemplo 1: Operación de la Protecciones



| Caso | Interruptores que operan | Interruptores que Operan Mal | Disparo Por Proteccion Primaria | Disparo Por Proteccion respaldo |
|------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| F1   | 1, 2, 4                  |                              |                                 |                                 |
| F2   | 3, 5, 8                  |                              |                                 |                                 |
| F3   | 10                       |                              |                                 |                                 |
| F4   | 8, 11                    |                              |                                 |                                 |

## Ejemplo 2: Operación de la Protecciones

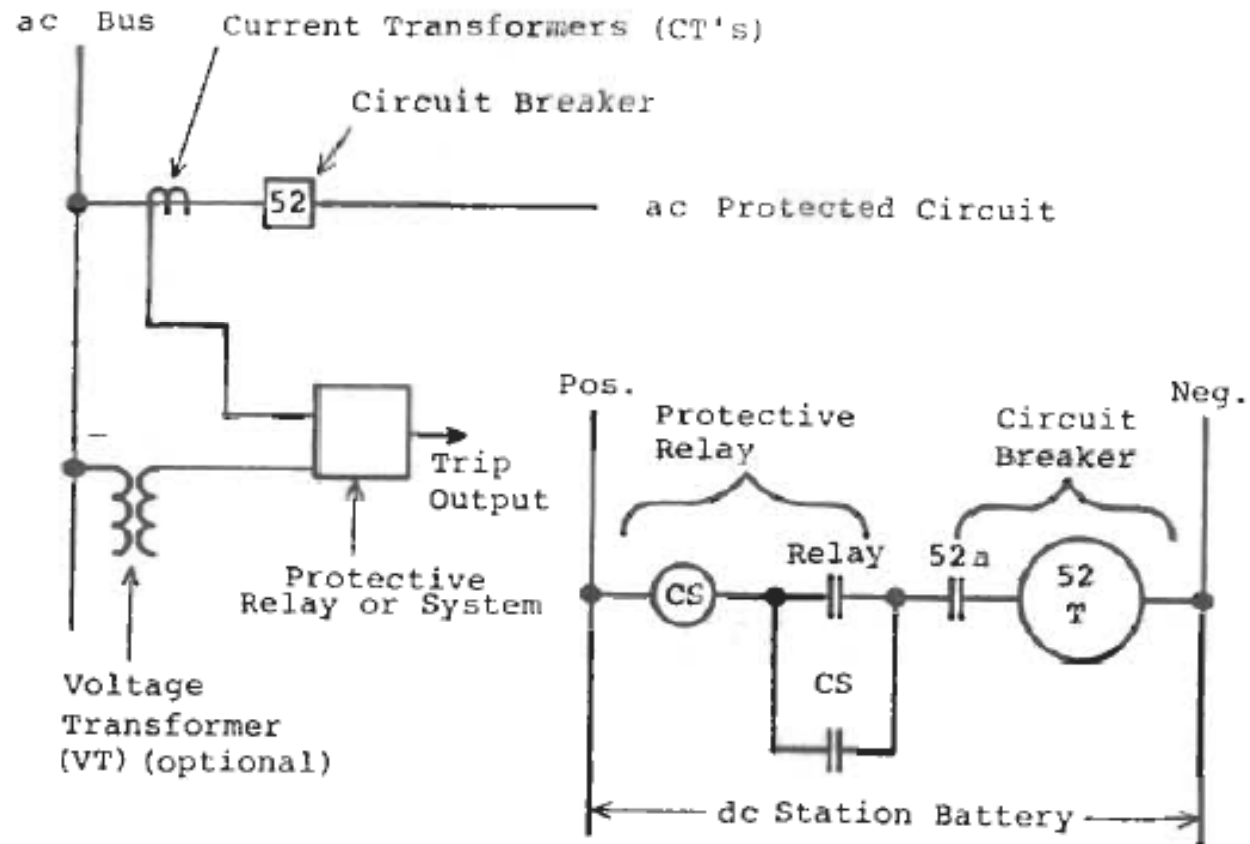


# Código ANSI

| ANSI | Descripcion                     |
|------|---------------------------------|
| 21   | Rele de Distancia               |
| 24   | Rele Volts/Hz                   |
| 25   | Rele verificador de Sincronismo |
| 27   | Bajo Voltaje                    |
| 32   | Direccional de Potencia         |
| 40   | Perdida de Campo                |
| 43   | Perilla Selectora               |
| 46   | Secuencia Negativa              |
| 49   | Termico                         |
| 50   | Sobre Corriente Instantaneo     |
| 51   | Sobre Corriente Temporizado     |
| 52   | Contactos Auxiliares C.B.       |
| 59   | Sobre Voltaje                   |
| 60   | Balance de Voltaje              |
| 67   | Direccional de Corriente        |
| 78   | Fuera de Paso                   |
| 79   | Rele de Recierre                |
| 81   | Rele de Frecuencia              |
| 86   | Rele de bloqueo                 |
| 87   | Rele Diferencial                |
| 94   | Rele de Disparo                 |

- El listado completo puede ser encontrado en la norma IEEE C37.2

# Esquematico



# VALORES EN PU

# Valor por Unidad (PU)

- El valor por unidad de alguna cantidad es la relación de la cantidad actual por su valor base.

$$\text{Cantidad PU} = \frac{\text{Cantidad Actual}}{\text{Valor Base de la Cantidad}}$$

# Valor en Porcentaje (%)

- La cantidad en porcentaje es igual a la cantidad en PU veces 100.

$$\text{Cantidad \%} = (\text{Cantidad PU}) \times 100$$



# Ventajas de PU & %

- Es mejor para representar resultados de datos de circuitos, que pueden ser comparados directamente.
- La impedancia equivalente, en pu, de un transformador es la misma cuando la referimos a cualquiera de sus lados primario o secundario.
- La impedancia equivalente de un transformador en un sistema trifasico es la misma independiente del tipo de conexión de sus devanados ( $Y - \Delta$ ,  $\Delta - Y$ ,  $Y - Y$ ,  $\Delta - \Delta$ )
- El método por unidad es independiente de los cambios de voltaje y ángulos de fase a través del transformador, si los voltajes en los devanados son proporcionales al número de vueltas en el devanado.
- Usualmente el fabricante especifica la impedancia del equipo en pu o % en la base de su capacidad nominal de placa.

# Continuación

- Valores típicos para varios tipos de equipos estan disponibles en algunos libros o fuentes de referencia.
- Hay menor probabilidad de confundirse entre los valores de potencia monofasica y trifasica o entre voltajes de línea a línea y línea a tierra.
- El método en pu es útil para simular el comportamiento del sistema, en estado estable o transitorio, por computador.
- El voltaje fuente es asumido, usualmente, como 1.0 pu para cálculos de falla.
- El producto de dos cantidades en pu es expresada en pu. En cambio, el producto de dos cantidades en %, tiene que ser dividido entre 100 para ser expresado en %.

# Cantidades Bases

- Las cantidades bases son escalares, de manera que la notación de fasores no se requieren para las ecuaciones bases.
- El mismo valor base en MVA, es utilizado en todo el sistema. Normalmente se utiliza un valor base de 100 MVA.
- Se seleccionada un valor de voltaje base arbitrario, y todos los otros voltajes deben estar relacionados al voltaje base a través de la relación de vueltas de la conexión de los transformadores.

# Relaciones Generales

- Para cualquiera de los dos tipos de conexiones (Delta, Estrella) tenemos:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_{LL} I_L$$

$$I_L = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{LL}}$$

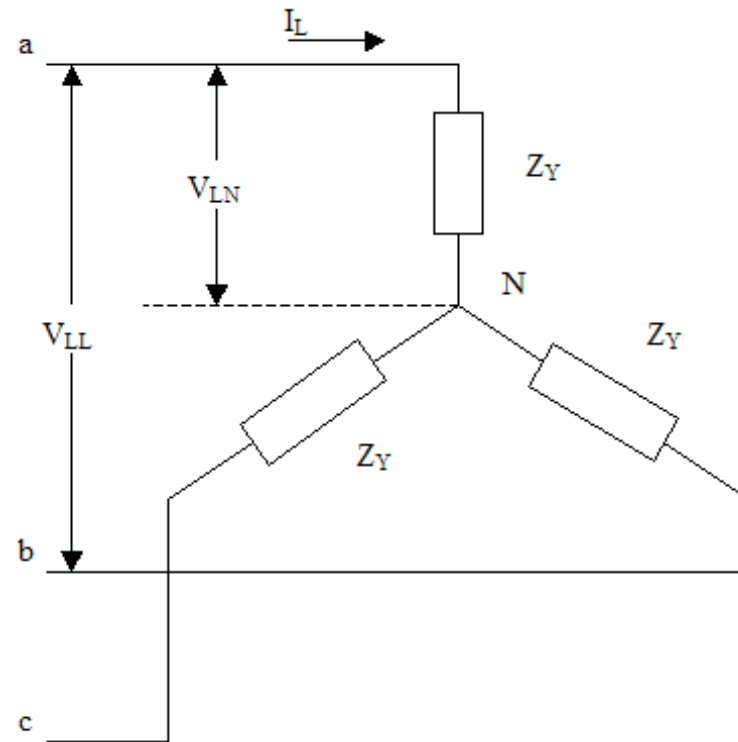
$$V_{LL} = \sqrt{3} V_{LN} \angle + 30^\circ$$

$$I_D = \frac{I_L \angle 30^\circ}{\sqrt{3}}$$

# Conexión Estrella

- Impedancia Conectada en Estrella:

$$Z_Y = \frac{V_{LN}}{I_L} = \frac{V_{LL} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3} V_{LL}}{S_{3\phi}}$$
$$= \frac{V_{LL}^2 \angle -30^\circ}{S_{3\phi}}$$



# Conexión Delta

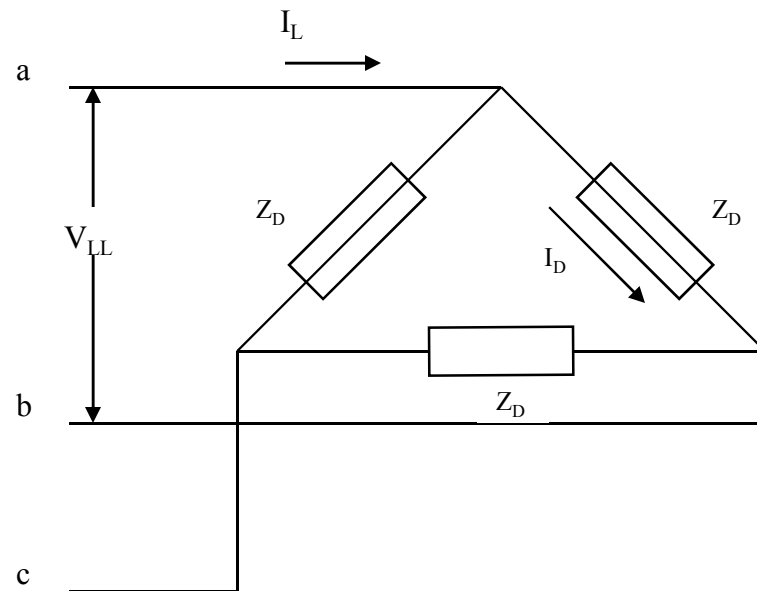
- Impedancia Conectada en Delta:

$$Z_D = \frac{V_{LL}}{I_D} = \frac{\sqrt{3} V_{LL} \angle -30^\circ}{I_L}$$

$$= \sqrt{3} V_{LL} \angle -30^\circ \times \frac{\sqrt{3} V_{LL}}{S_{3\phi}}$$

$$= \frac{3V_{LL}^2 \angle -30^\circ}{S_{3\phi}}$$

$$I_D = \frac{V_{LL}}{Z_D} = \frac{S_{3\phi} \angle -30^\circ}{3V_{LL}}$$



# Cantidades Bases

- **Utilizaremos notacion KVA o MVA en lugar de S, y KV en lugar de V:**

- Potencia Base es dada por:  $kVA_B = \sqrt{3} kV_B I_B$

- Corriente Base es dada por:  $I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} kV_B} \text{ Amperios}$

- Impedancia Base es dada por:  $Z_B = \frac{kV_B^2 \times 1000}{kVA_B}$

- Desde que  $kVA = 1000 \times MVA$ ,

$$Z_B = \frac{kV_B^2}{MVA_B} \text{ ohms}$$

# Impedancia en PU

- La impedancia en pu es dada por:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_B} = \frac{MVA_B Z_{\Omega}}{kV_B^2}$$

- La impedancia en Porcentaje es dada por:

$$\% Z = 100 \times Z_{pu} = \frac{100 MVA_B Z_{\Omega}}{kV_B^2}$$



# Cambio de Base

- Normalmente la impedancia en pu de los equipos se especifica en la base del equipo, siendo generalmente diferente de la base del sistema. Esto hace necesario convertir todos los valores a una base común seleccionada.
- Esta conversión se deriva de expresar la misma impedancia en ohms sobre dos bases en pu diferentes.

$$Z_{1pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{1B}} = \frac{MVA_1 Z_{\Omega}}{kV_1^2}$$

$$Z_{2pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{2B}} = \frac{MVA_2 Z_{\Omega}}{kV_2^2}$$

$$\frac{Z_{2pu}}{Z_{1pu}} = \frac{MVA_2}{kV_2^2} \times \frac{kV_1^2}{MVA_1}$$

$$Z_{2pu} = Z_{1pu} \left( \frac{MVA_2}{MVA_1} \right) \times \left( \frac{kV_1}{kV_2} \right)^2$$

# Tabla Valores Base

| Parametro       | Base Monofásica                                                   | Uso comun<br>Base Trifásica                           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Frecuencia      | Frecuencia de operacion E.E.                                      | Frecuencia Nominal del Sistema                        |
| Voltaje         | Voltaje de Linea-a-Neutro en una seleccion de barra de referencia | Voltaje Nominal Linea-a-Linea                         |
| MVA             | Alguna referencia definida arbitrariamente por fase               | 10 o 100 MVA, 3 $\phi$                                |
| Corriente Base  | VA base dividido por voltaje base                                 | Base 3 $\phi$ kVA/(Line-a line kV $\times \sqrt{3}$ ) |
| Impedancia Base | Voltaje base de linea-a- Neutro dividido por la corriente         | (Line -a- line kV) <sup>2</sup> /Base 3 $\phi$ MVA    |

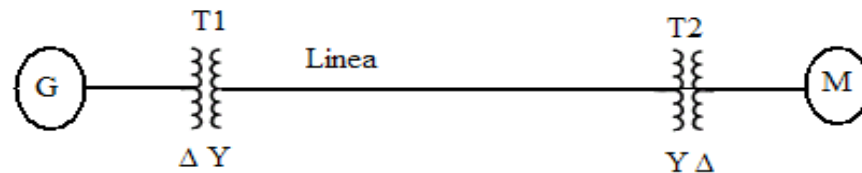
# V. B. Por Nivel Voltajes

Table 1.2. Base Current, Base Impedance, and Base Admittance for Common Transmission Voltage Levels and for Selected MVA Levels

|                                 | Base<br>Kilovolts | Base Megavolt-Amperes |          |          |          |          |          |           |           |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
|                                 |                   | 5.0                   | 10.0     | 20.0     | 25.0     | 50.0     | 100.0    | 200.0     | 250.0     |
| Base current<br>in amperes      | 34.5              | 83.67                 | 167.35   | 334.70   | 418.37   | 836.74   | 1673.48  | 3346.96   | 4183.70   |
|                                 | 69.0              | 41.84                 | 83.67    | 167.35   | 209.19   | 418.37   | 836.74   | 1673.48   | 2091.85   |
|                                 | 115.0             | 25.10                 | 50.20    | 100.41   | 125.51   | 251.02   | 502.04   | 1004.09   | 1255.11   |
|                                 | 138.0             | 20.92                 | 41.84    | 83.67    | 104.59   | 209.18   | 418.37   | 836.74    | 1045.92   |
|                                 | 161.0             | 17.93                 | 35.86    | 71.72    | 89.65    | 179.30   | 358.60   | 717.21    | 896.51    |
|                                 | 230.0             | 12.55                 | 25.10    | 50.20    | 62.76    | 125.51   | 251.02   | 502.04    | 627.55    |
|                                 | 345.0             | 8.37                  | 16.74    | 33.47    | 41.84    | 83.67    | 167.35   | 334.70    | 418.37    |
|                                 | 500.0             | 5.77                  | 11.55    | 23.09    | 28.87    | 57.74    | 115.47   | 230.94    | 288.68    |
| Base impedance<br>in ohms       | 34.5              | 238.05                | 119.03   | 59.51    | 47.61    | 23.81    | 11.90    | 5.95      | 4.76      |
|                                 | 69.0              | 952.20                | 476.10   | 238.05   | 190.44   | 95.22    | 47.61    | 23.81     | 19.04     |
|                                 | 115.0             | 2645.00               | 1322.50  | 661.25   | 529.00   | 264.50   | 132.25   | 66.13     | 52.90     |
|                                 | 138.0             | 3808.80               | 1904.40  | 952.20   | 761.76   | 380.88   | 190.44   | 95.22     | 76.18     |
|                                 | 161.0             | 5184.20               | 2592.10  | 1296.05  | 1036.84  | 518.42   | 259.21   | 129.61    | 103.68    |
|                                 | 230.0             | 10580.00              | 5290.00  | 2645.00  | 2116.00  | 1058.00  | 529.00   | 264.50    | 211.60    |
|                                 | 345.0             | 23805.00              | 11902.50 | 5951.25  | 4761.00  | 2380.50  | 1190.25  | 595.13    | 476.10    |
|                                 | 500.0             | 50000.00              | 25000.00 | 12500.00 | 10000.00 | 5000.00  | 2500.00  | 1250.00   | 1000.00   |
| Base admittance<br>in micromhos | 34.5              | 4200.80               | 8401.60  | 16803.19 | 21003.99 | 42007.98 | 84015.96 | 168031.93 | 210039.91 |
|                                 | 69.0              | 1050.20               | 2100.40  | 4200.80  | 5251.00  | 10502.00 | 21003.99 | 42007.98  | 52509.98  |
|                                 | 115.0             | 378.07                | 756.14   | 1512.29  | 1890.36  | 3780.72  | 7561.44  | 15122.87  | 18903.59  |
|                                 | 138.0             | 262.55                | 525.10   | 1050.20  | 1312.75  | 2625.50  | 5251.00  | 10502.00  | 13127.49  |
|                                 | 161.0             | 192.89                | 385.79   | 771.58   | 964.47   | 1928.94  | 3857.88  | 7715.75   | 9644.69   |
|                                 | 230.0             | 94.52                 | 189.04   | 378.07   | 472.59   | 945.18   | 1890.36  | 3780.72   | 4725.90   |
|                                 | 345.0             | 42.01                 | 84.02    | 168.03   | 210.04   | 420.08   | 840.16   | 1680.32   | 2100.40   |
|                                 | 500.0             | 20.00                 | 40.00    | 80.00    | 100.00   | 200.00   | 400.00   | 800.00    | 1000.00   |

## Ejemplo de Aplicacion

Ejemplo 1: Convertir todos los valores a pu sobre una base de potencia de 10MVA y una base de voltaje de línea de 100 KV



Generador: 15MVA, 13.8KV, X=0.15 pu

Motor: 10MVA, 12KV, X=0.07 pu

T1: 20MVA, 14-132KV, X=0.10 pu

T2: 15MVA, 13-115KV, X=0.10 pu

Línea:  $200 + j 500$  ohmios

### Cambio de Base:

$$\text{Generador: } X_{pu} = 0.15 \left( \frac{10MVA}{15MVA} \right) \left( \frac{13.8kV}{10.6kV} \right)^2 = 0.1695 pu$$

$$\text{Motor: } X_{pu} = 0.07 \left( \frac{12kV}{11.3kV} \right)^2 = 0.079 pu$$

$$\text{T1: } X_{pu} = 0.10 \left( \frac{10MVA}{20MVA} \right) \left( \frac{132kV}{100kV} \right)^2 = 0.0871 pu$$

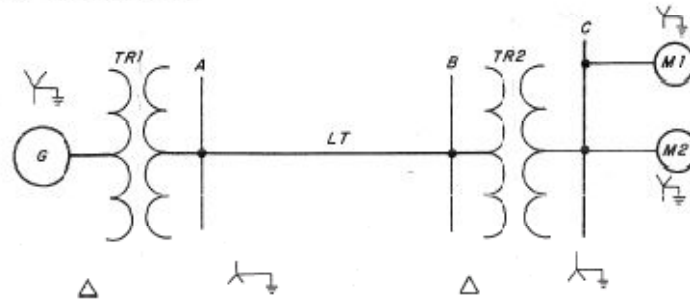
$$\text{T2: } X_{pu} = 0.10 \left( \frac{10MVA}{15MVA} \right) \left( \frac{115kV}{100kV} \right)^2 = 0.0882 pu$$

$$\text{Línea: } Z_B = \frac{kV_B^2}{MVA_B} = 1000 \quad Z_{pu} = \frac{200 + j500}{1000} = 0.2 + j0.5$$

## Ejemplo de Aplicación

04. EXERCÍCIOS DE VALORES EM P.U.

01) Dado o sistema:



Gerador

40 MVA; 13,8 kV;  $X''_g = 0,714 \, \Omega$

Motor 1

20 MVA; 13,2 kV;  $X''_{M1} = 1,194 \, \Omega$

Motor 2

Idem Motor 1

TR 1

50 MVA; 13,8/138 kV;  $X_{cr1} = 0,381 \, \Omega$  (BT)

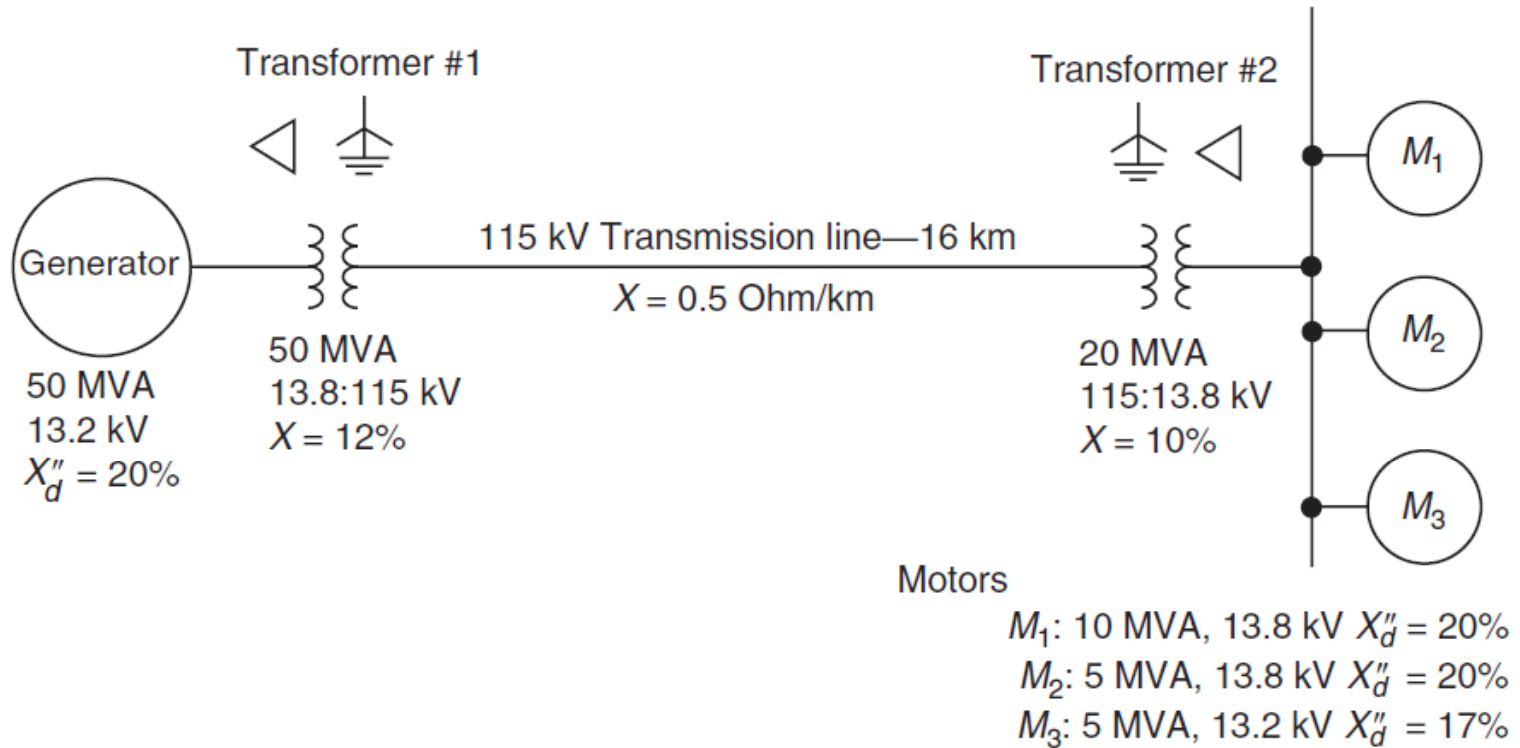
TR 2

50 MVA; 138/13,2 kV;  $X_{cr2} = 0,244 \, \Omega$  (BT)

LT: j 2

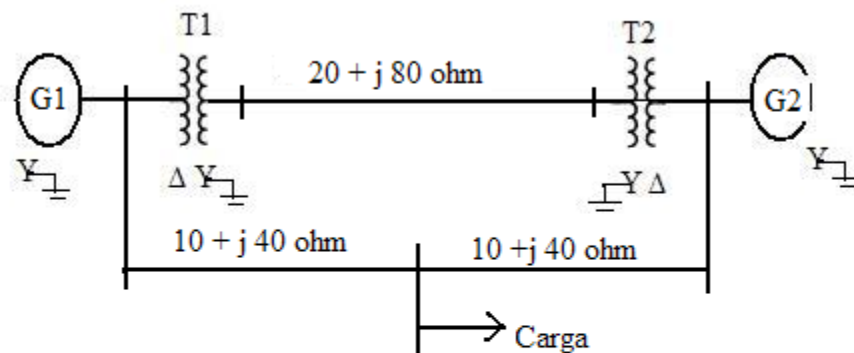
Escolhendo 100 MVA para potência das bases para o sistema, e 13,8 kV para tensão de base para o trecho do gerador, pede-se:

## Ejemplo de Aplicación



## Ejemplo de Aplicación

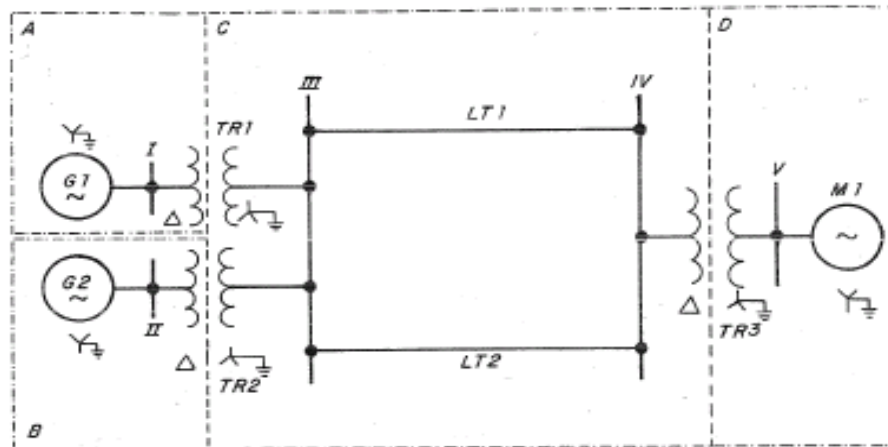
Ejemplo 2: Prepare un esquemático unifilar del sistema, mostrando todas las impedancias en pu en una base de 100MVA, 154KV en la línea de transmisión.



G1: 50MVA, 13.8KV, X= 15%  
 G2: 20MVA, 14.4KV, X=15%  
 T1: 60MVA, 13.2-161KV, X=10%  
 T2: 25MVA, 13.2-161KV, X=10%  
 Carga: 15MVA, 80% pf atrasado

## Ejemplo de Aplicación

06) No sistema abaixo:

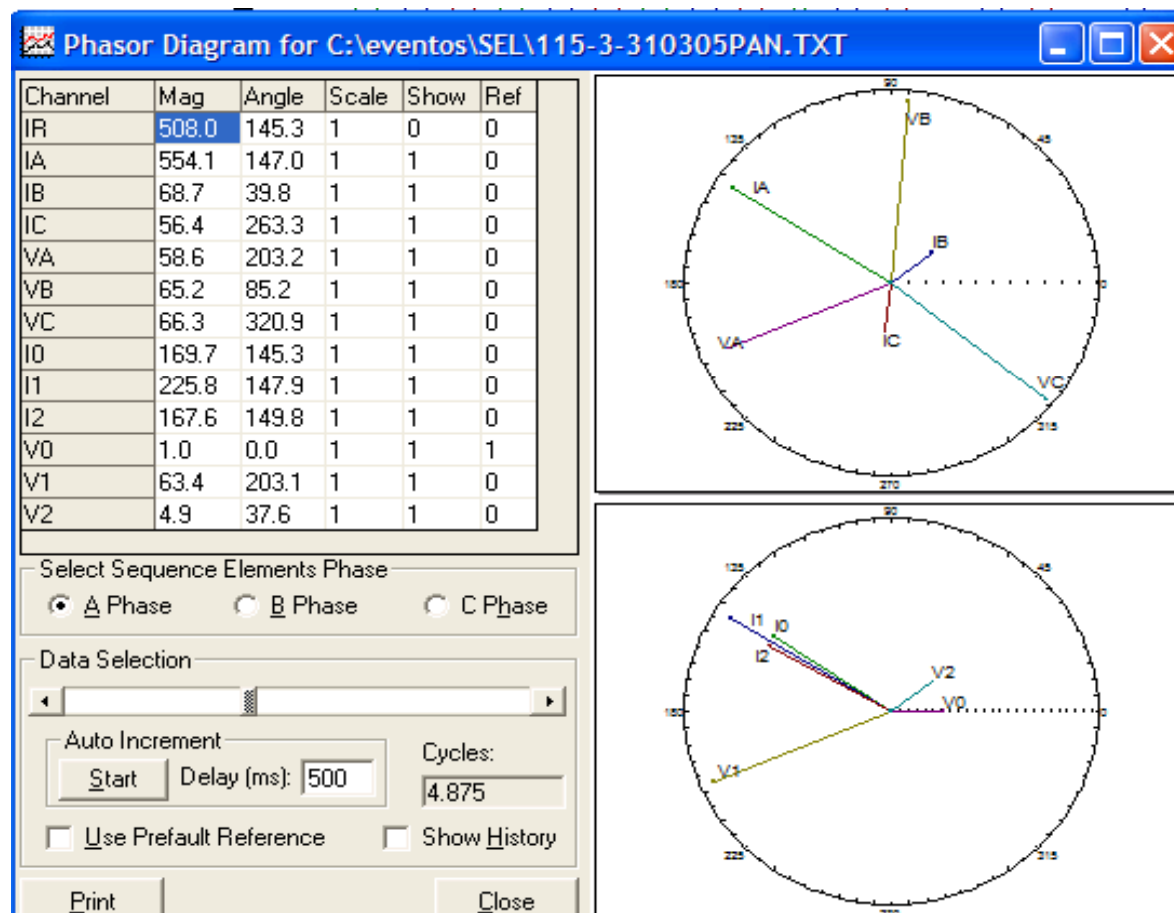


Dados:

|                |                                                                                                                        |      |                                                                                       |                                                                                                                                |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G <sub>1</sub> | $\begin{cases} X''_{g1} = 10\% \\ P_{g1} = 10 \text{ MVA} \\ V_{g1} = 14,4 \text{ kV} \end{cases}$                     | TR 2 | $\begin{cases} X = 8\% \\ P = 6 \text{ MVA} \\ V = 6,6/88 \text{ kV} \end{cases}$     | $\begin{aligned} \text{LT 1} - X_{\text{LT 1}} &= j8 \, \Omega \\ \text{LT 2} - X_{\text{LT 2}} &= j6 \, \Omega \end{aligned}$ |
|                |                                                                                                                        |      |                                                                                       |                                                                                                                                |
| G <sub>2</sub> | $\begin{cases} X''_{g2} = 20\% \\ P_{g2} = 5 \text{ MVA} \\ V_{g2} = 6,6 \text{ kV} \end{cases}$                       | TR 3 | $\begin{cases} X = 7,5\% \\ P = 18 \text{ MVA} \\ V = 88/11,2 \text{ kV} \end{cases}$ |                                                                                                                                |
| TR 1           | $\begin{cases} X = 7\% \\ P_{\text{tr1}} = 12 \text{ MVA} \\ V = 13,8 \text{ kV ( ) / } 88 \text{ kV ( )} \end{cases}$ | M 1  | $\begin{cases} X''_m = 10\% \\ P = 15 \text{ MVA} \\ V = 11,2 \text{ kV} \end{cases}$ |                                                                                                                                |



# FASORES Y POLARIDAD



# Fasores Y Polaridad

- Los fasores y la polaridad de transformadores son importantes en el análisis, documentación y entendimiento de la operación del sistema de potencia y de las corrientes y voltajes asociadas con fallas y desbalances.

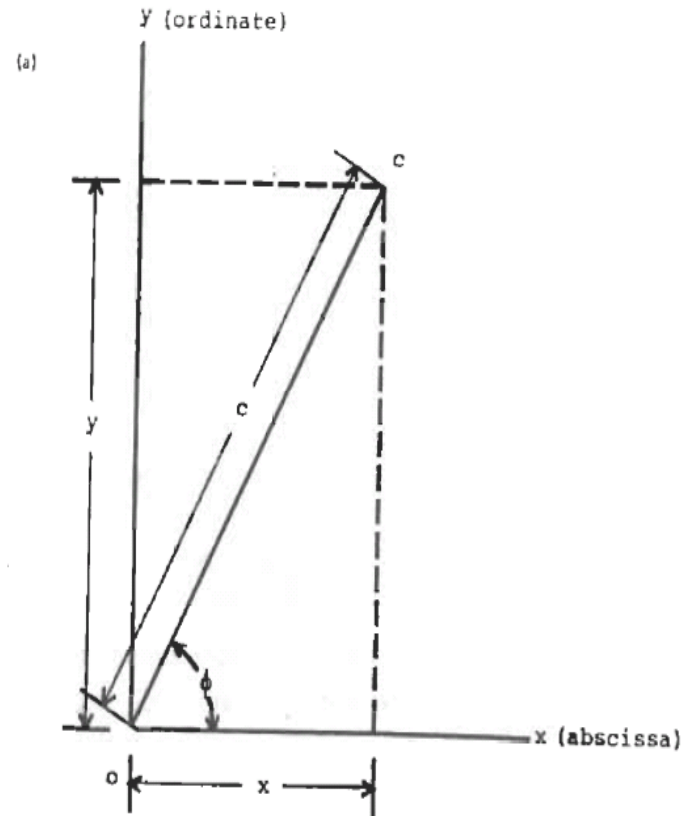
# Definición de Fasores

- Según la IEEE, es un numero complejo, que es usado en sistema lineal alterno de estado estable.
- Su modulo corresponde a cualquier pico de amplitud o el valor rms de la cantidad.
- Su fase corresponde al ángulo de fase en el tiempo cero.
- Puede ser aplicado a impedancia, y relacionan cantidades complejas independiente del tiempo.

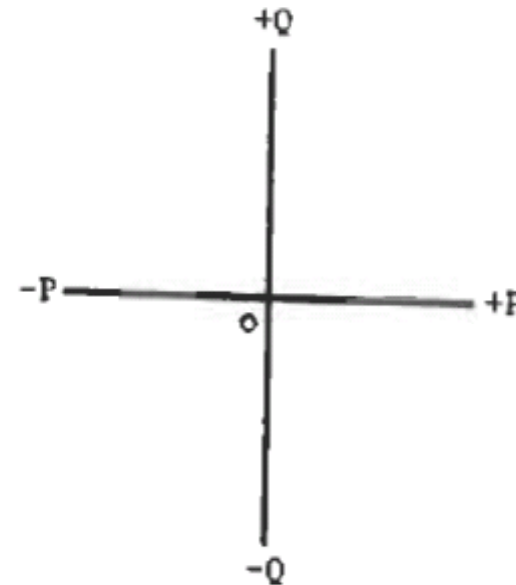
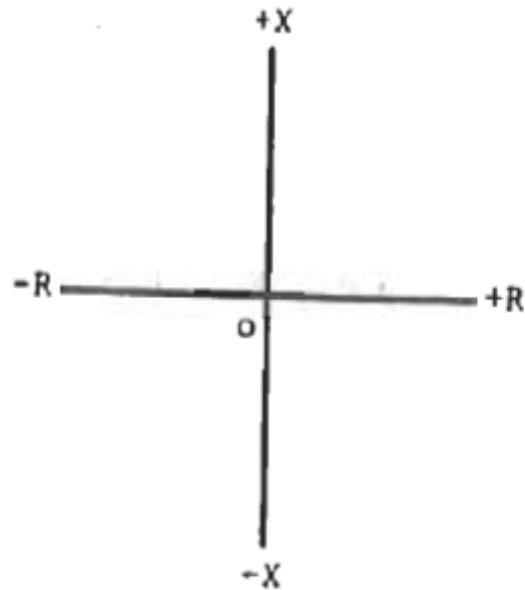
# Representación de Fasores

Las coordenadas cartesianas es la forma mas común de representar fasores eléctricos y magnéticos.

Donde la  $x$  (absisa) es el eje de las cantidades reales, la  $y$  (ordenada) es el eje de las cantidades imaginarias.



# Otras Representaciones de Fasores



Representacion de fasores de impedancia y fasores de potencia.

# Formas Matemáticas de Fasores

| Forma Fasor | Forma Rectangular | Forma Compleja                   | Forma Exponencial | Forma Polar         |
|-------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------|
| $c$         | $= x + jy$        | $=  c (\cos \phi + j \sin \phi)$ | $=  c e^{j\phi}$  | $=  c \angle +\phi$ |

La forma de Conjugado es algunas veces util

$$c^* = x - jy = |c|(\cos \phi - j \sin \phi) = |c|e^{-j\phi} = |c|\angle -\phi$$

Donde:

$c$  = Fasor

$c^*$  = Conjugado

$x$  = Valor Real (alternativo:  $\text{Re } c$ , o  $c'$ )

$y$  = Valor Imaginario (alternativo:  $\text{Im } c$  o  $c''$ )

$|c|$  = Modulo (magnitud o valor absoluto)

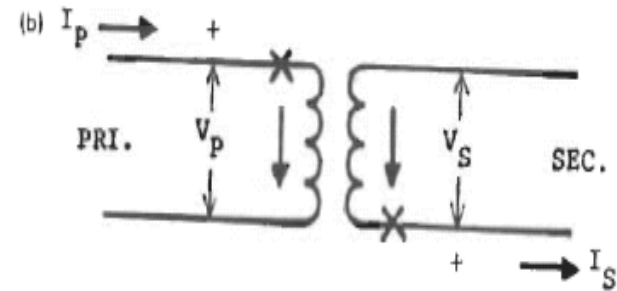
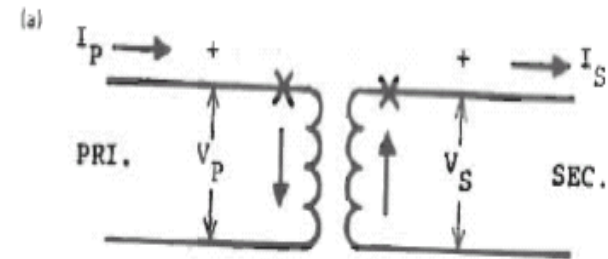
$\phi$  = Angulo de fase (argumento o amplitud)(alternativo:  $\arg c$ )

El modulo del fasor es dado por:

$$|c| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

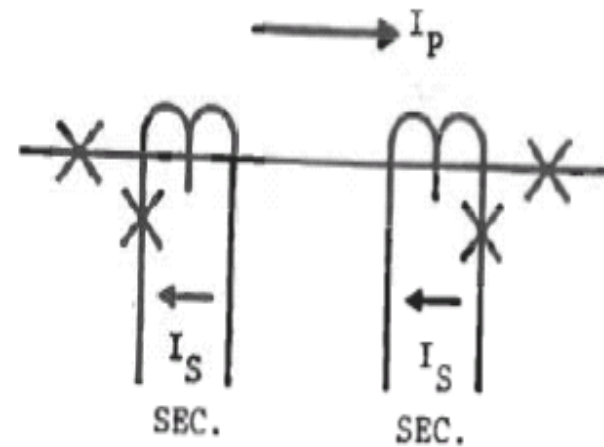
# Polaridad de Transformadores

- Son establecidas por estándares, para todos los tipos de transformadores.
- Hay dos variedad de polaridad que siguen las mismas reglas:
  - Substractiva: Transformadores de potencia e instrumentos
  - Aditiva: (Trafo de Distribución)



# Reglas de Polaridad de Transformadores

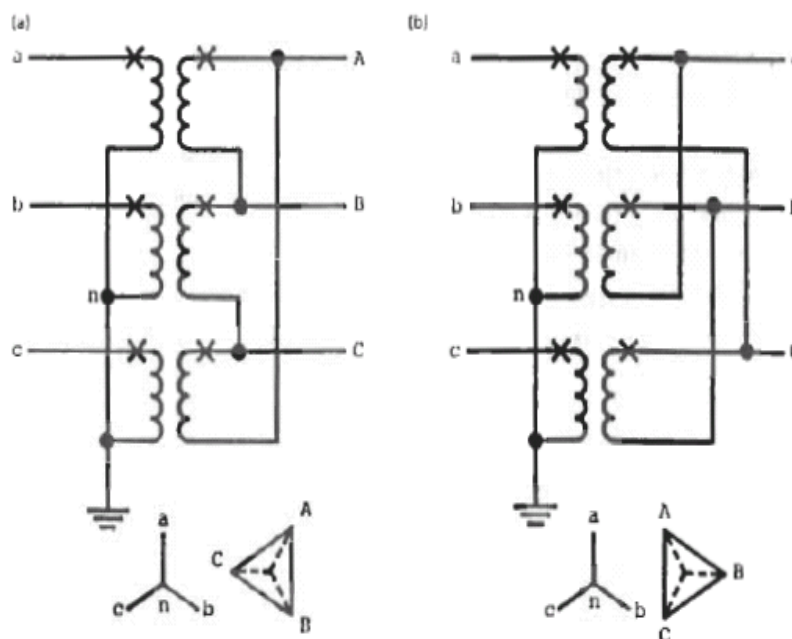
- El flujo de corriente entrando en la marca de polaridad de un devanado, fluye hacia fuera de la marca de polaridad del otro devanado.



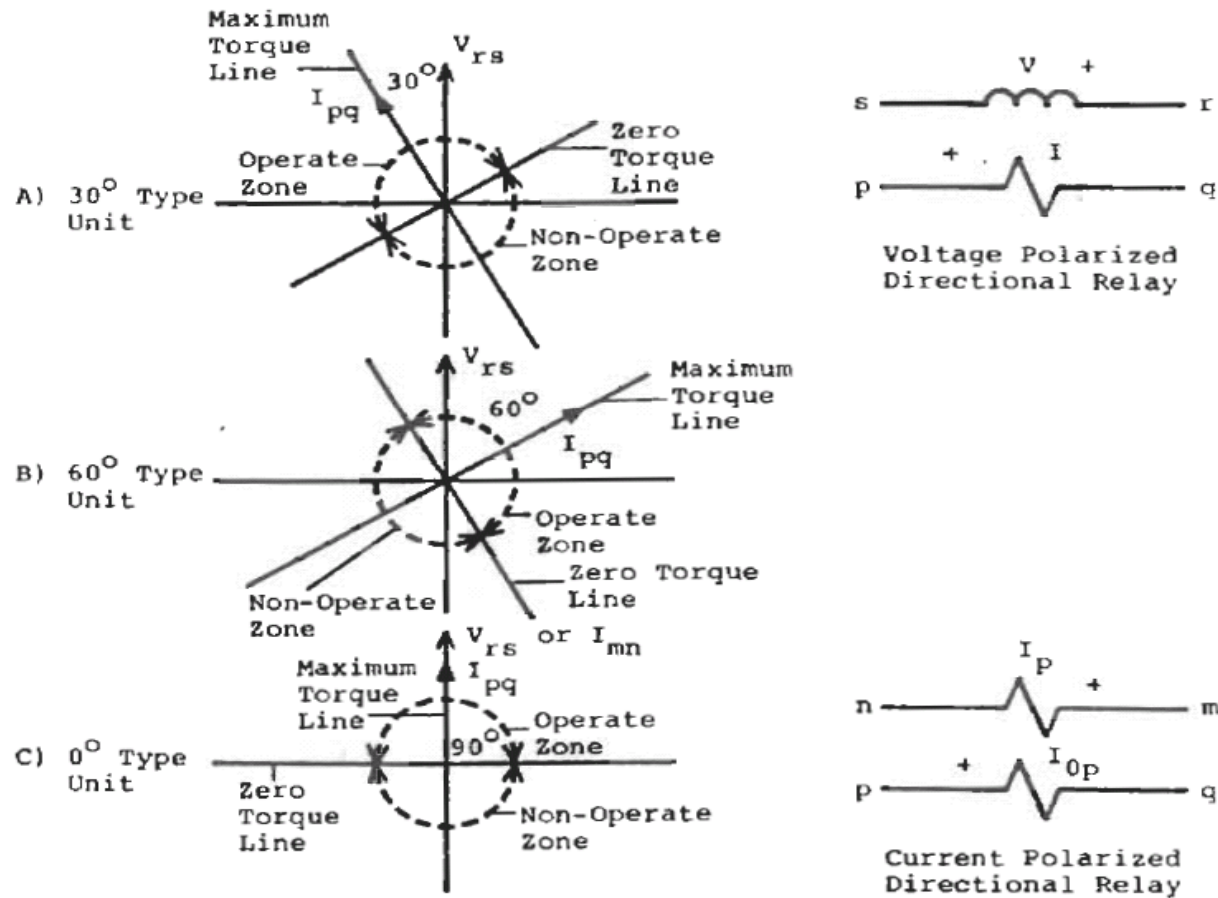


# Reglas de Polaridad de Transformadores

La caída de voltaje de polaridad a no polaridad a través de un devanado, está esencialmente en fase con la caída de voltaje de polaridad a no polaridad a través del otro devanado.

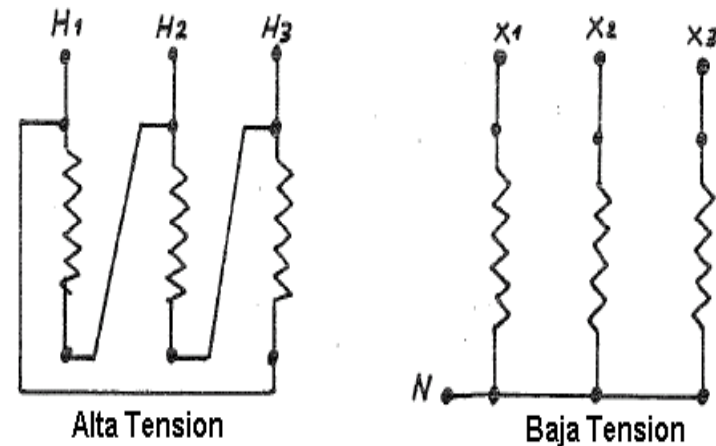


# Polaridad de Reles 67



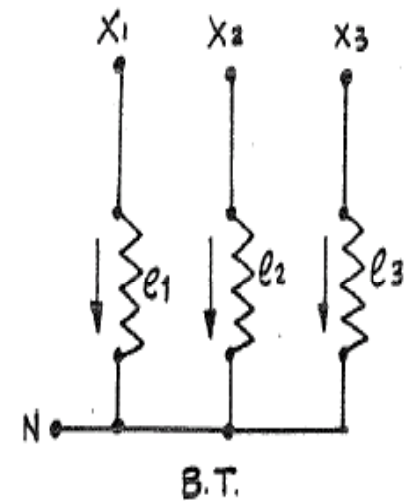
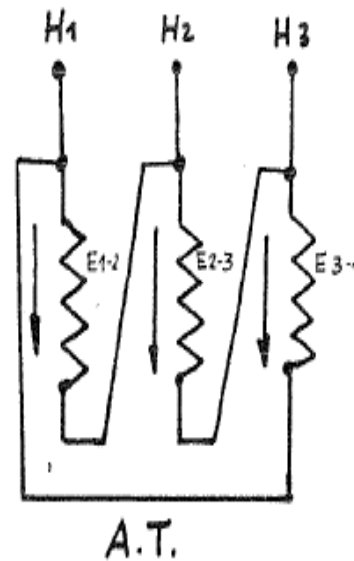
# Desfase Angular de un Trafo

- El desfase angular de un transformador trifásico es un ángulo que indica el desfase de las fuerzas electromotrices inducidas por el flujo común existente entre los terminales de alta y baja tensión del transformador.
- La norma americanada estipula que la conexión de alta siempre adelanta la conexión de baja por 30 grados.



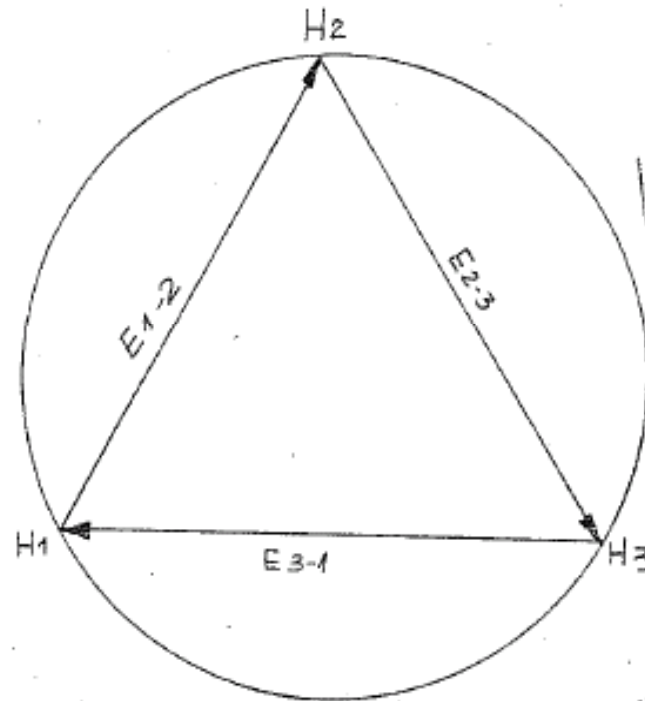
# 1<sup>er</sup> Paso: Para Determinar Desfase Angular

- Indicar, arbitrariamente, por medio de flechas el sentido de las fuerzas electromotrices inducidas de alta y baja tension del transformador.



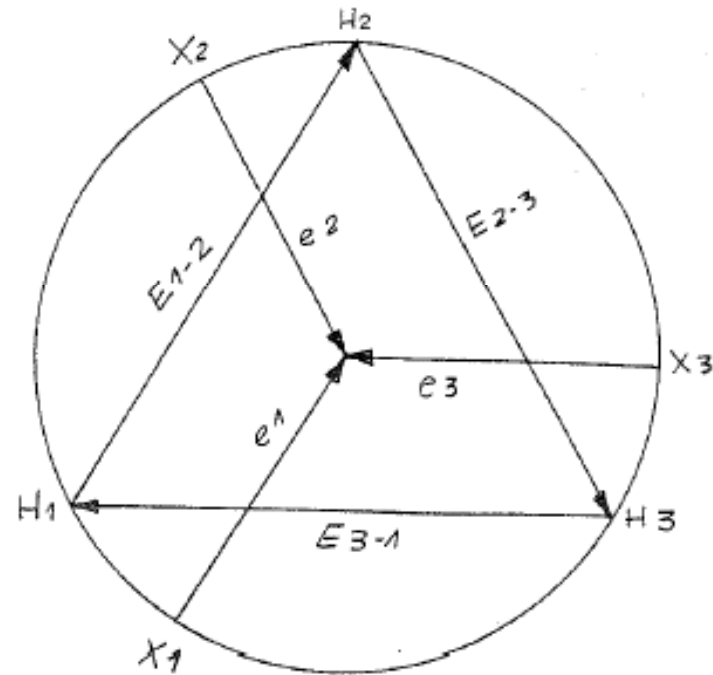
## 2<sup>do</sup> Paso: Para Determinar Desfase Angular

- Sobre una circunferencia dibujamos un diagrama fasorial de las f.e.m del devanado de alta, de manera que el terminal  $H_2$  quede en la parte superior.
- Como la conexión esta en triancgulo, las fem de AT son dispuestas en triangulo.



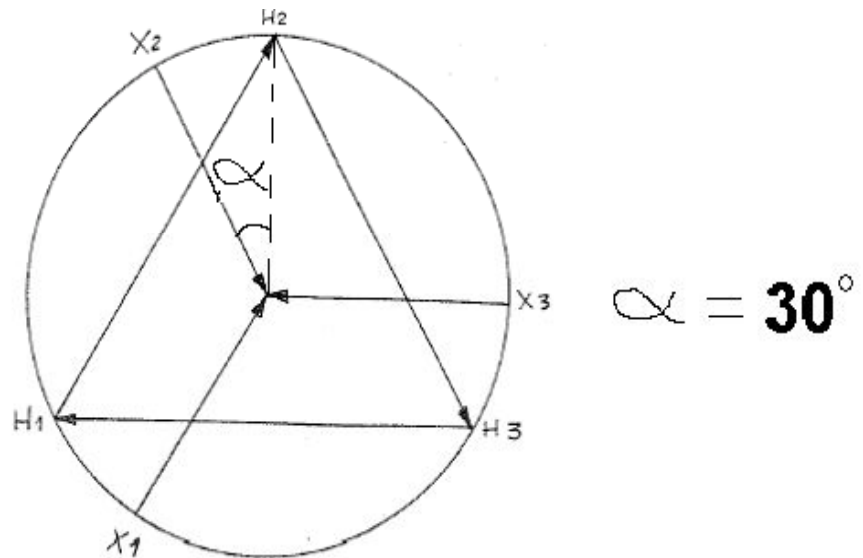
## 3<sup>er</sup> Paso: Para Determinar Desfase Angular

- En la misma circunferencia colocamos las fem de baja, observando que  $e_1$  esta en fase con  $E_{1-2}$ . Las f.e.m del devanado de baja, tienen el sentido de los terminales hacia el neutro.
- Como la conexión esta en estrella, las fem son dispuestas en estrella.



## 4<sup>to</sup> Paso: Para Determinar Desfase Angular

- El desfase angular es medido por los dos radios de la circunferencia que se dirigen a los puntos  $H_2$  y  $X_2$ .
- $X_2$  esta adelantado 30 grados en relación con  $H_2$ , considerando el terminal de baja como referencia y que las bobinas están enrolladas en el mismo sentido.



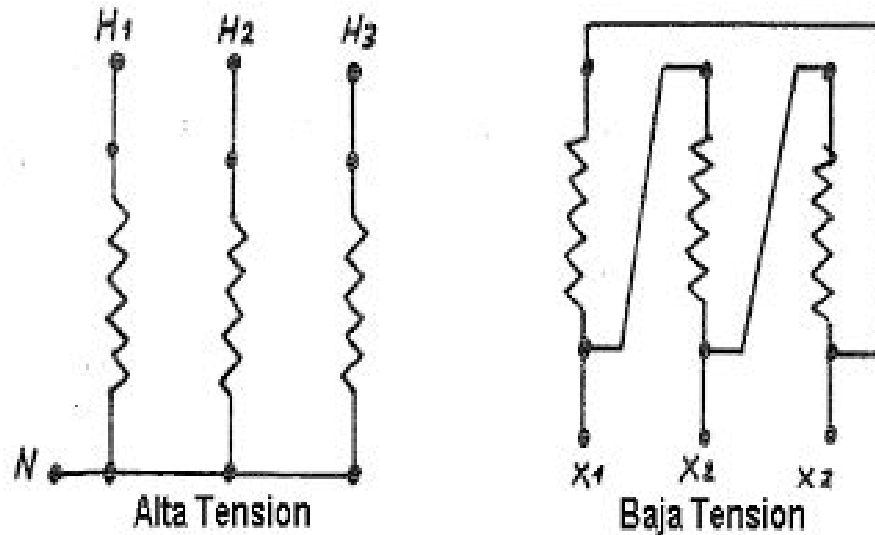
# Tabla de Conexiones

| DESIGNAÇÃO ANTIGA<br>(VDE) |          | DESIGNAÇÃO<br>DAS<br>CONEXÕES<br>(VDE) | ESQUEMA DE LIGAÇÃO |              | DIAGRAMA VETORIAL |              |
|----------------------------|----------|----------------------------------------|--------------------|--------------|-------------------|--------------|
| GRUPOS                     | CONEXÕES |                                        | ALTA TENSÃO        | BAIXA TENSÃO | ALTA TENSÃO       | BAIXA TENSÃO |
| A                          | A1       | Ddo                                    |                    |              |                   |              |
|                            | A2       | Yyo                                    |                    |              |                   |              |
|                            | A3       | Dzo                                    |                    |              |                   |              |
| B                          | B1       | Dd6                                    |                    |              |                   |              |
|                            | B2       | Yy6                                    |                    |              |                   |              |
|                            | B3       | Dz6                                    |                    |              |                   |              |
| C                          | C1       | Dy5                                    |                    |              |                   |              |
|                            | C2       | Yd5                                    |                    |              |                   |              |
|                            | C3       | Yz5                                    |                    |              |                   |              |
| D                          | D1       | Dy11                                   |                    |              |                   |              |
|                            | D2       | Yd11                                   |                    |              |                   |              |
|                            | D3       | Yz11                                   |                    |              |                   |              |



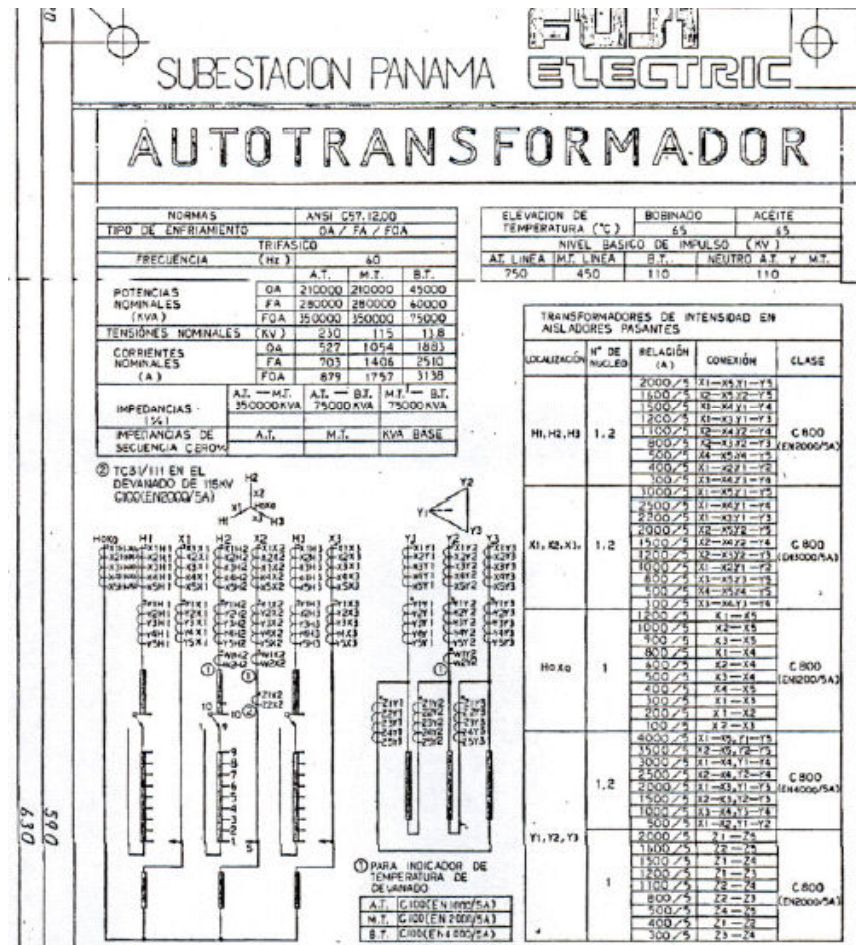
# Ejemplo De Aplicación

- Determine el desfase angular del transformador con el devano de alta en estrella y el devanado de baja en delta, conforme la figura.

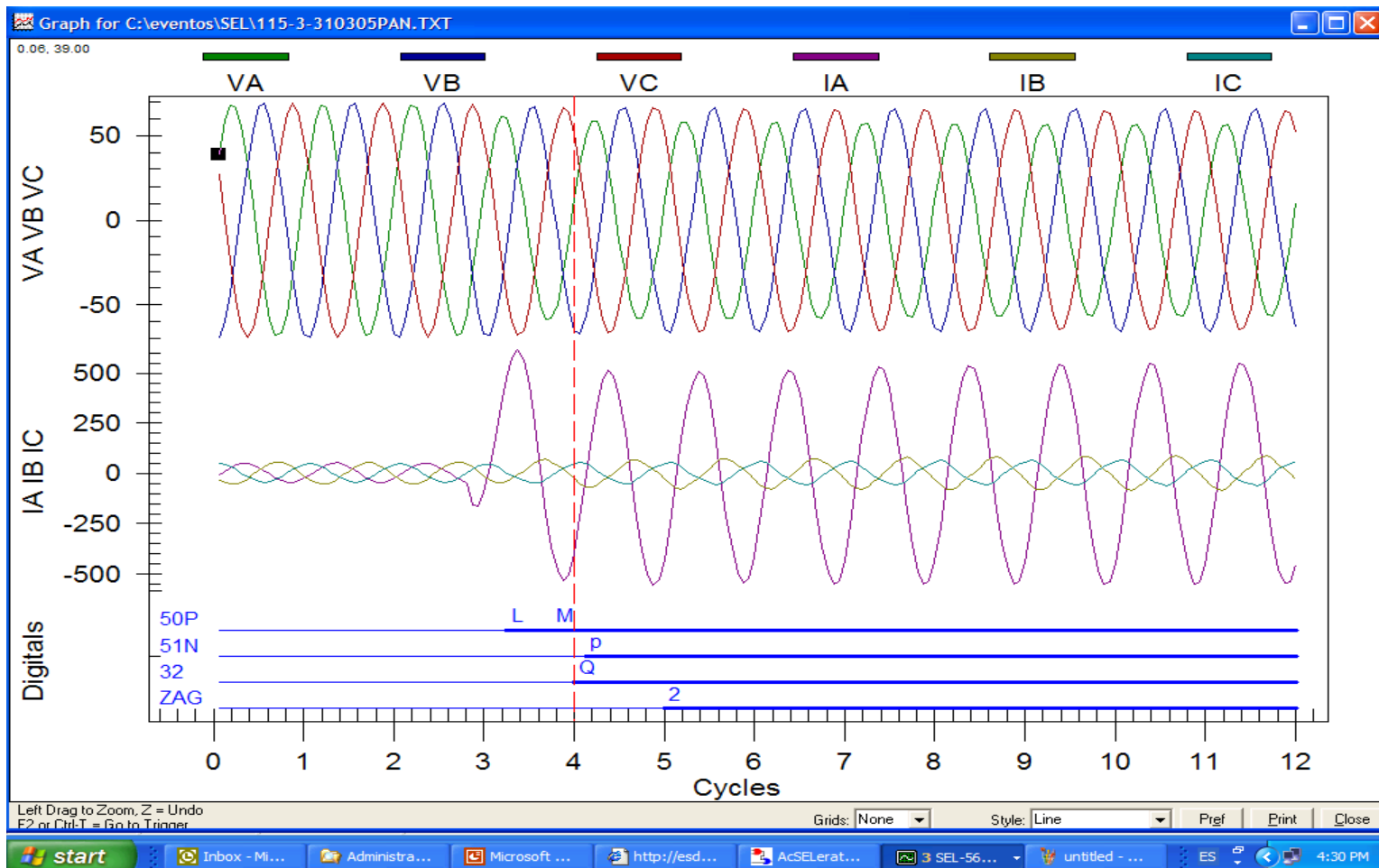


# Ejemplo De Aplicación

- Determine el desfase angular del auto-transformador T3 de la subestación Panamá, con el devano de alta en estrella y el devanado de baja en delta, conforme la figura.



# COMPONENTES SIMETRICAS

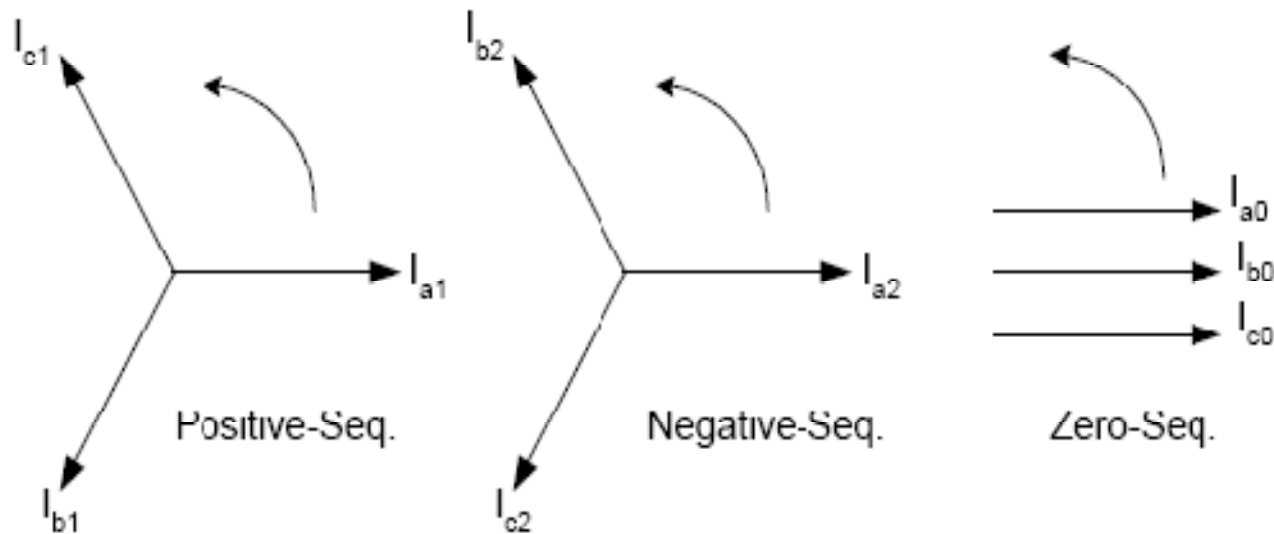


# Historia

- El 18 de Junio de 1918, Charles L. Fortescue, presentó en la 34th. Convención anual de la AIEE, su paper titulado “Method of Symmetrical Coordinates Applied To The Solution of Poliphase Networks”.
- En este trabajo, Fortescue presenta un método en que un sistema desequilibrado de  $n$  fasores relacionados, puede descomponerse en  $n$  sistemas de fasores equilibrados, denominados componentes simétricas.

# Sistema Trifásico Desbalanceado

- 3 Sistema balanceado



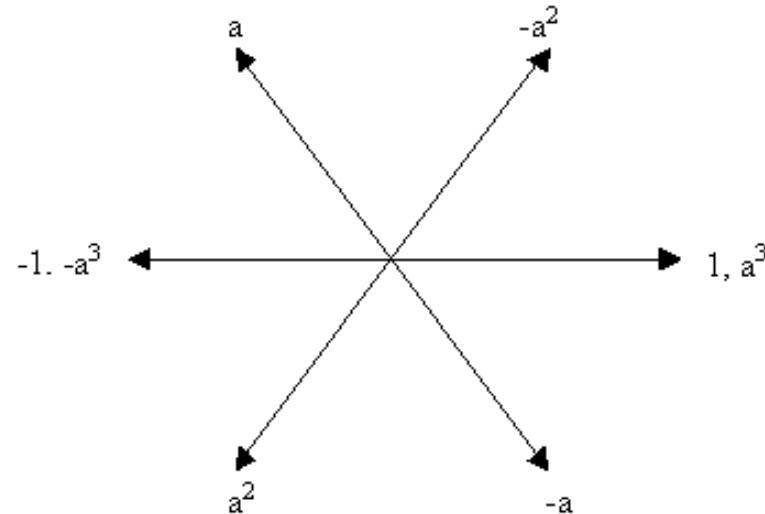
# Operador “a”

- La letra **a**, es comúnmente usada para designar un operador que causa una rotación de 120 grados en el sentido anti horario.

$$a = 1\angle 120 = 1e^{j2\pi/3} = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 1\angle 240 = -0.5 - j0.866$$

$$a^3 = 1\angle 360 = 1\angle 0 = 1$$



# Fasores de Voltajes

- Cada uno de los fasores desbalanceados originales es la suma de sus componentes equilibrados:

$$\begin{aligned}V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}\end{aligned}\quad (1)$$

# Utilizando el Operador $a$

- El numero de cantidades desconocidas se puede reducir utilizando el operador “ $a$ ”

$$\begin{aligned} V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \\ V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \end{aligned} \quad (2)$$



# Fasores de Voltajes

- Sustituyendo el conjunto de ecuaciones (2) en (1):

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$$

# Forma Matricial

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

# Forma Matricial

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

# Fasores Simétricos de Voltajes

- Descomposición de tres fasores asimétricos en sus componentes simétricas:

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

# Fasores Simétricos de Corrientes

- Si consideramos corrientes en lugar de voltajes :

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2 I_c)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + aI_c)$$

## Ejemplo De Aplicación

- Determine las componentes simétricas de las fases A, B y C. dado:

$$I_A = 10 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_B = 10 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 0 \text{ A}$$

# Forma Matricial

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10 \angle 0^\circ \\ 10 \angle 180^\circ \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Solución

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 0) = 0$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ * 10 \angle 180^\circ + 0) =$$

$$= \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 1 \angle 300^\circ * 10 + 0)$$

$$= \frac{1}{3} (10 + (0.5 - j0.866) * 10 + 0)$$

$$= \frac{1}{3} (10 + 5 - j8.66) = 5 - j2.88 \quad A = 5.77 \angle -30^\circ$$



# Solución

$$\begin{aligned} I_{a2} &= \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ * 10 \angle 180^\circ + 0) = \\ &= \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 60^\circ + 0) \\ &= \frac{1}{3} (10 + (0.5 + j0.866) * 10) \\ &= \frac{1}{3} (10 + 5 + j8.66) = 5 + j2.88 \quad A = 5.77 \angle +30^\circ \end{aligned}$$

# Solución

$$I_{b1} = 5.775 \angle 210^\circ$$

$$I_{c1} = 5.775 \angle 90^\circ$$

$$I_{b2} = 5.775 \angle 150^\circ$$

$$I_{c2} = 5.775 \angle -90^\circ$$

$$I_{b0} = 0$$

$$I_{c0} = 0$$

# Reglas de Uso de las C. S.

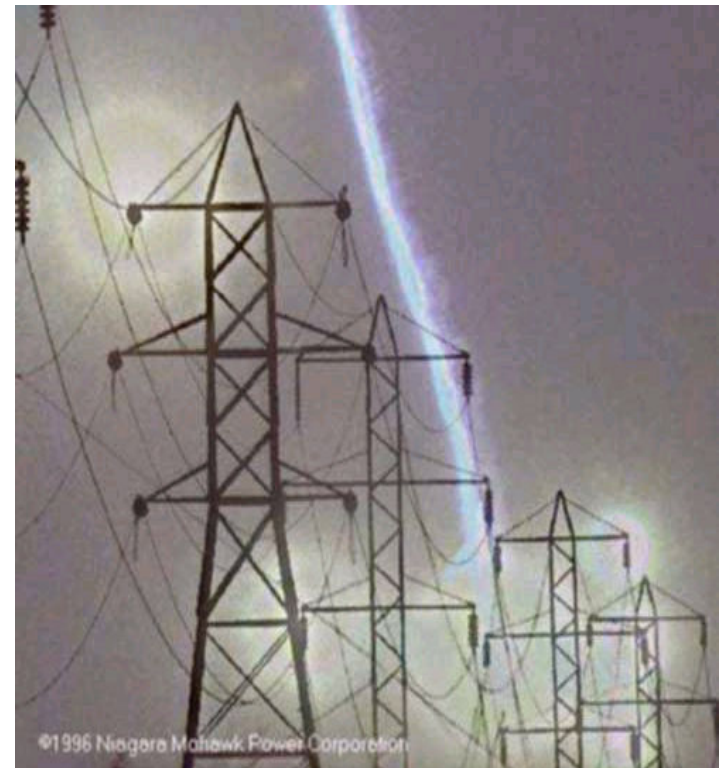
- Voltaje de secuencia positiva, negativa y cero inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente.
- Corrientes de determinada secuencia solo podrán inducir voltajes de esa misma secuencia.
- Los puntos 1 y 2, se resumen diciendo que: no existe interacción entre secuencias distintas.
- Los elementos activos de la red, solo generaran voltaje de secuencia positiva.

# Reglas de Uso de las C. S.

- Los voltaje de secuencia negativa y cero, se consideran generados en el punto de falla; disminuyendo en magnitud tan pronto nos alejamos de ese punto.
- El voltaje de secuencia positiva es cero en el punto de falla y máximo en los puntos de generación.
- Como las corrientes de secuencia cero, están en fase y son del mismo tamaño, necesitan el neutro, conexión a tierra para poder circular.

# Cálculo de Fallas

- Análisis del Comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones de falla.
- Herramienta útil para:
  - Selección de la configuración del sistema.
  - Capacidad nominal para los equipos de HV.
  - Aplicación y diseño de protección.
  - Investigación del desempeño, no satisfactorio de los equipos.



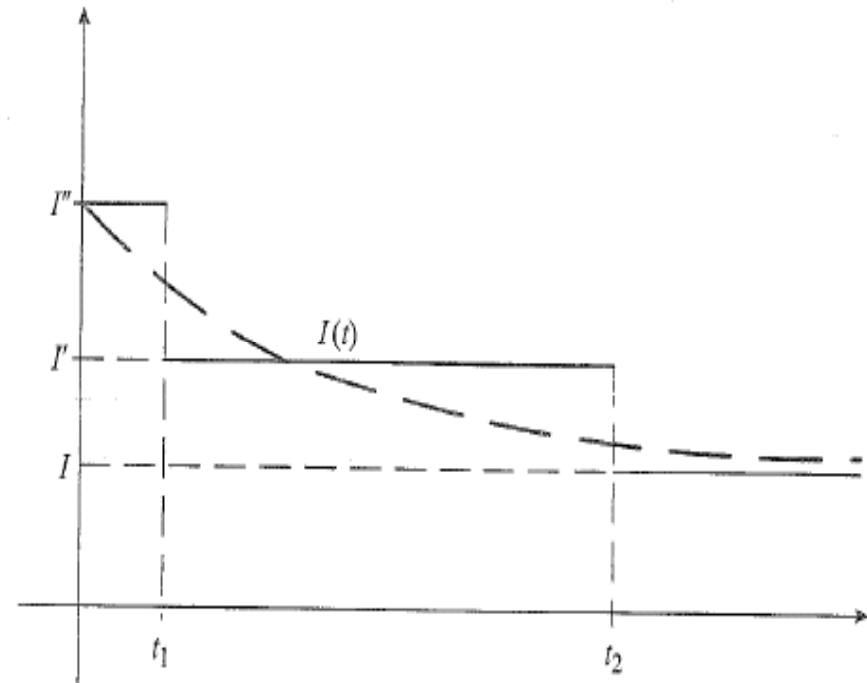
# Corrientes de Corto Circuito

- Las corrientes de corto circuito pueden crear destrucción masivas a los equipos del sistema.
- Normalmente tienen magnitudes mayores que la corriente de máxima carga.
- Las corrientes C.C. pueden ser catastróficas para la operación del sistema



# Tipos de Fallas Régimen (DUTY)

- Los niveles de corto circuito varían considerablemente durante una falla, tomando en cuenta la caída rápida de la corriente debido a la reacción de armadura de las maquinas sincronas y aunado que la extinción de un arco eléctrico nunca es alcanzado instantáneamente. La corriente tiene que ser calculada cuidadosamente, de forma a obtener el valor correcto para las respectivas aplicaciones.



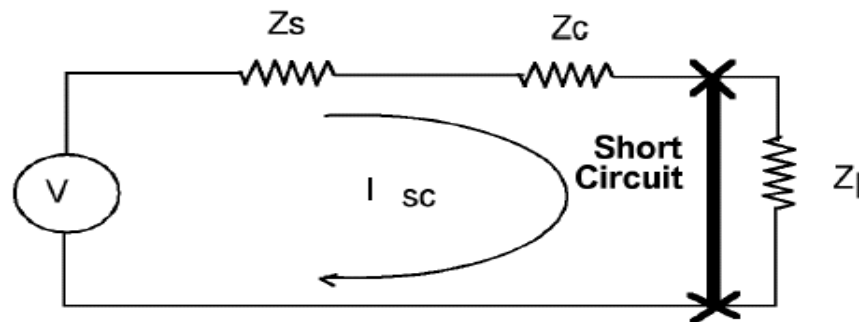
# Corrientes de CC ANSI/IEEE C37

- **Se refiere a cuatro tipos de corrientes de fallas de régimen (duty):**
  - **Primer ciclo o Momentánea:** Son las corrientes presentes en el medio ciclo después de iniciada la falla, indicado por  $I_k''$ , se calculan con la componente DC.
  - **Pico:** Corresponde a la corriente máxima durante el primer ciclo después de comenzada la falla, es
  - **Interrupción :** Son los valores a ser despejados por los interruptores, son calculados en el rango de 3 a 5 ciclos.
  - **Estado Estable o Retardo de Tiempo:** Corresponden a los valores obtenidos en el rango de 6 a 30 ciclos. No contiene componente DC



# Principio Fundamental

- De todas las solicitudes hechas a un ingeniero de protección, la mas analítica es: determinar las magnitudes de las corrientes y voltajes que pueden darse en el sistema bajo varias condiciones de corto circuito.
- El principio fundamental más involucrado en el cálculo de corrientes de corto circuito es la ley de Ohm. La corriente que fluye por la red, está relacionado con la relación entre el voltaje y la impedancia.



# Aplicación del Principio

- Desarrollar una representación básica del sistema, llamado diagrama unifilar.
- Calcule la impedancia total de la fuente de corriente corto circuito, para el punto en que una corriente de corto hipotética debe ser calculada ( $Z$  equivalente).
- Conociendo el voltaje de pre-falla de circuito abierto, use la ley de Ohm para calcular la corriente de corto circuito.

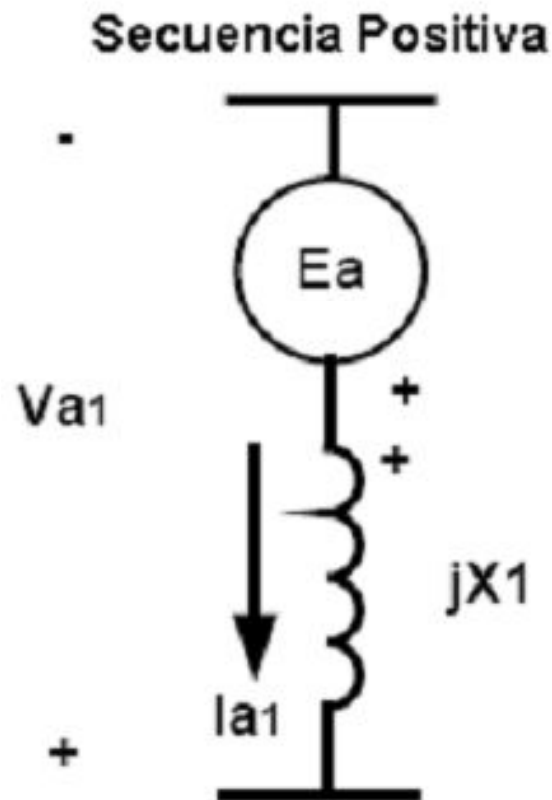
# Factores que Afectan los Cálculos

- Tipos de Fallas.
  - Corto Circuito
  - Circuito Abierto
  - Simultaneas
- Posición de la Falla.
- Configuración de la red.
- Aterrizaje del neutro

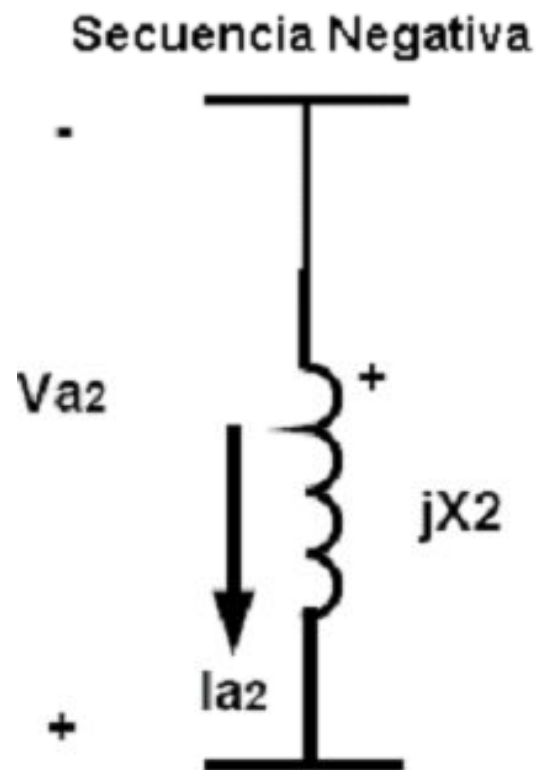
# Análisis de Fallas

- Representa el SEP, en redes de secuencia por fase.
- Cada red contiene voltaje y elementos de impedancia para la secuencia.
- Reduce la red a un equivalente de Thevenin en cada secuencia de fase.
- Todas las fuentes están en la red de secuencia positiva.

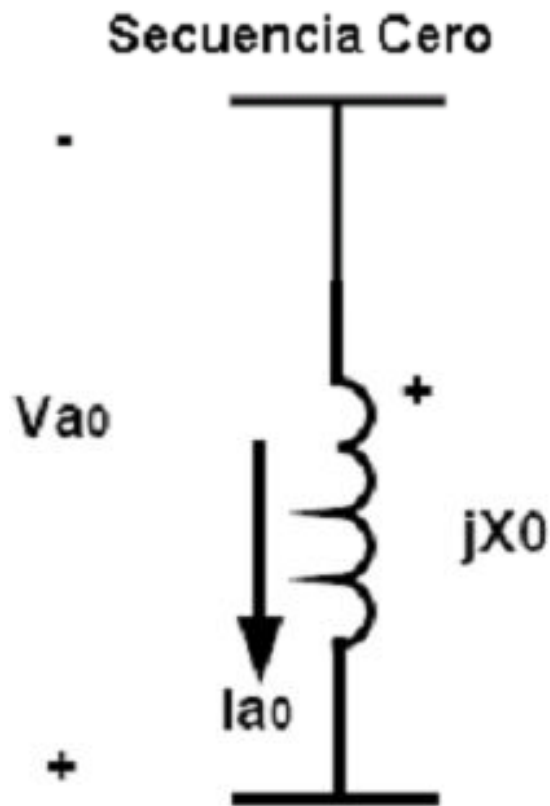
# Red de Secuencia Positiva (+)



# Red de Secuencia Negativa (-)



# Red de Secuencia Cero (0)



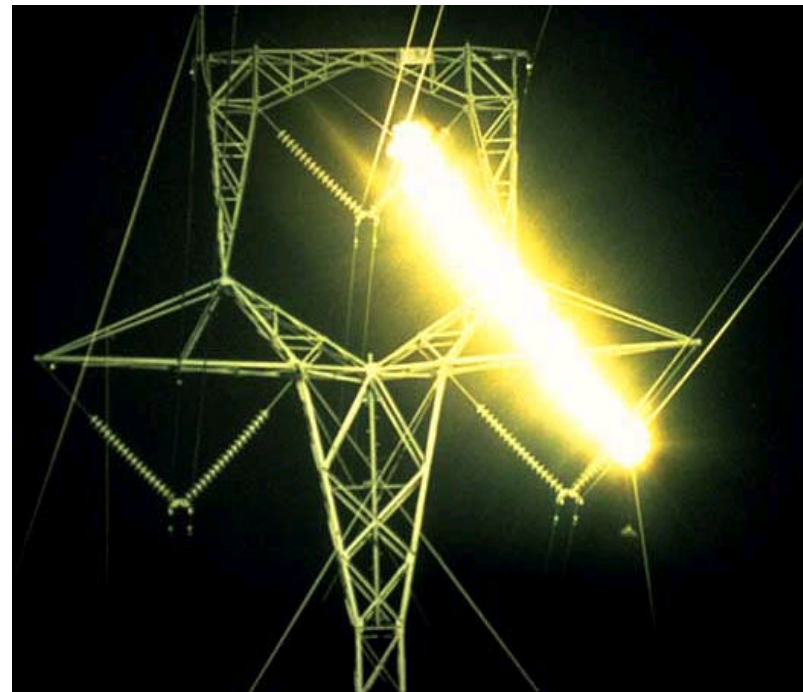
# Redes de Secuencia Básicas

- Cada red se conecta de la Barra de referencia a la Barra de falla.
- La impedancia de secuencias son diferentes.
- La impedancia de secuencia cero incluye la impedancia de tierra.
- La conexión depende del tipo de falla.



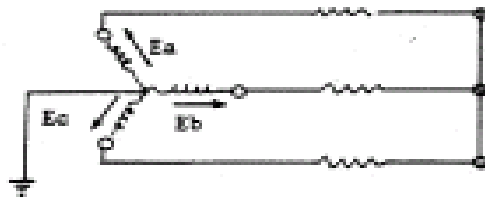
# Tipos de Fallas

- Por Corto Circuito:
  - Una fase a Tierra.
  - Fase a Fase
  - Dos Fases a Tierra
  - Trifásica (solo secuencia positiva)
- Por Circuito Abierto:
  - Una fase abierta.
  - Dos fase abiertas
  - Tres fases Abiertas.

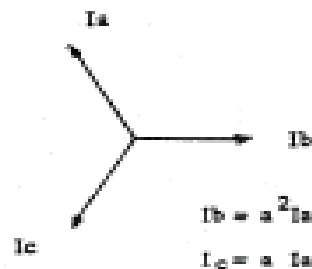


# Interconexión de Fallas Trifásica

Trifásico



$$3I_{a1} = 3I_a \quad \delta \quad I_{a1} = I_a$$



Tomando  $I_a$  como referencia

para secuencia positiva:

$$3I_{a1} = I_a + aI_b + a^2I_c$$

$$\text{como: } I_b = a^2I_a \\ I_c = aI_a$$

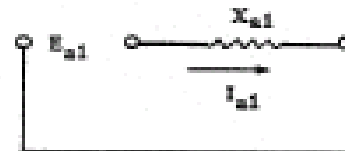
para secuencia negativa:

$$\begin{aligned} 3I_{a2} &= I_a + a^2I_b + aI_c \\ &= I_a + aI_a + a^2I_a \\ &= I_a (1 + a + a^2) = 0 \end{aligned}$$

para secuencia cero:

$$\begin{aligned} 3I_{a0} &= I_a + I_b + I_c = I_a + a^2I_a + aI_a \\ &= I_a (a^2 + a + 1) \\ &= 0 \end{aligned}$$

El resultado es consistente: en condiciones trifásicas balanceadas sólo existe secuencia positiva, y la red de secuencia (+) será:



$$I_{a1} = I_{cc} = \frac{E_a}{X_{a1}}$$

# Interconexión de Fallas Monofásica

como  $I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} = 0$

e:  $I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} = 0$

$$(I_b - I_c) = (a^2 - a) I_{a1} + (a - a^2) I_{a2} = 0$$

o bien

$$I_{a1} = I_{a2}$$

como  $I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a1} + (I_{a1} - I_{a1}) + I_{a0} = 0$

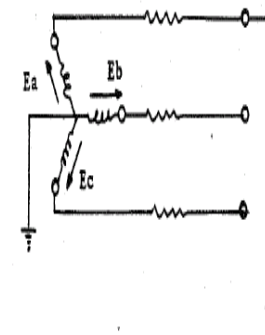
$$(a^2 + a + 1) I_{a1} - I_{a1} + I_{a0} = 0$$

de donde

$$I_{a1} = I_{a0}$$

o sea:  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$

De Fase a tierra:

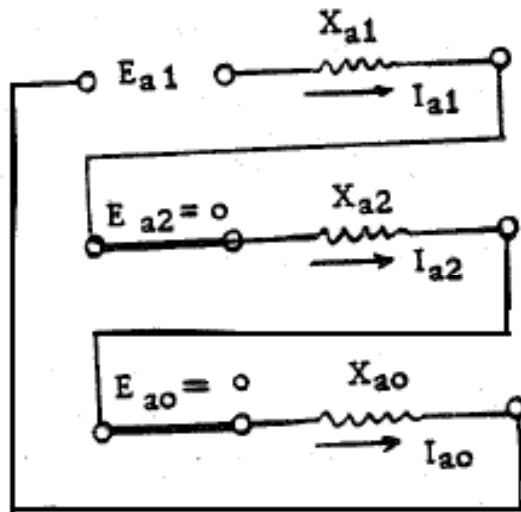


Evidentemente

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned}$$

# Interconexión Redes Secuencia, Falla 1-Fase

Las redes dibujadas en seguida deberán conectarse en serie para cumplir con esta condición:



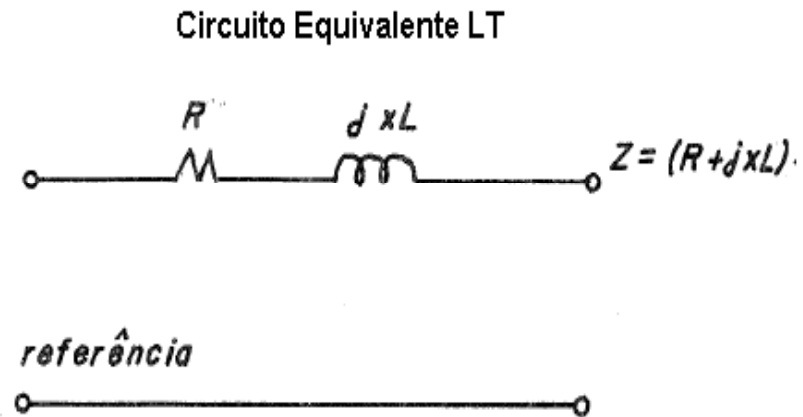
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \\ = \frac{E_a}{X_{a1} + X_{a2} + X_{a0}}$$

# Equivalentes del Circuito

- Respecto a los equivalentes para líneas, generadores y transformadores; lo interesante al análisis para ser intercalado a la red de secuencia cero es este último.
- Vistas las conexiones Delta o Estrella de cada devanado, su comportamiento es radicalmente distinto, cambiando el aspecto de la red de secuencia cero.

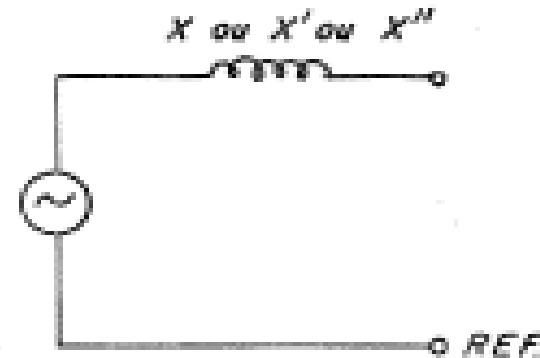
# Equivalentes de Líneas

- La impedancia serie total de la línea es dada en p.u. o en %.
- No se considera la capacitancia en derivación.
- La reactancia (+) y (-) son las mismas y la reactancia de (0) varia entre 2 y 6 veces el valor de la (+).



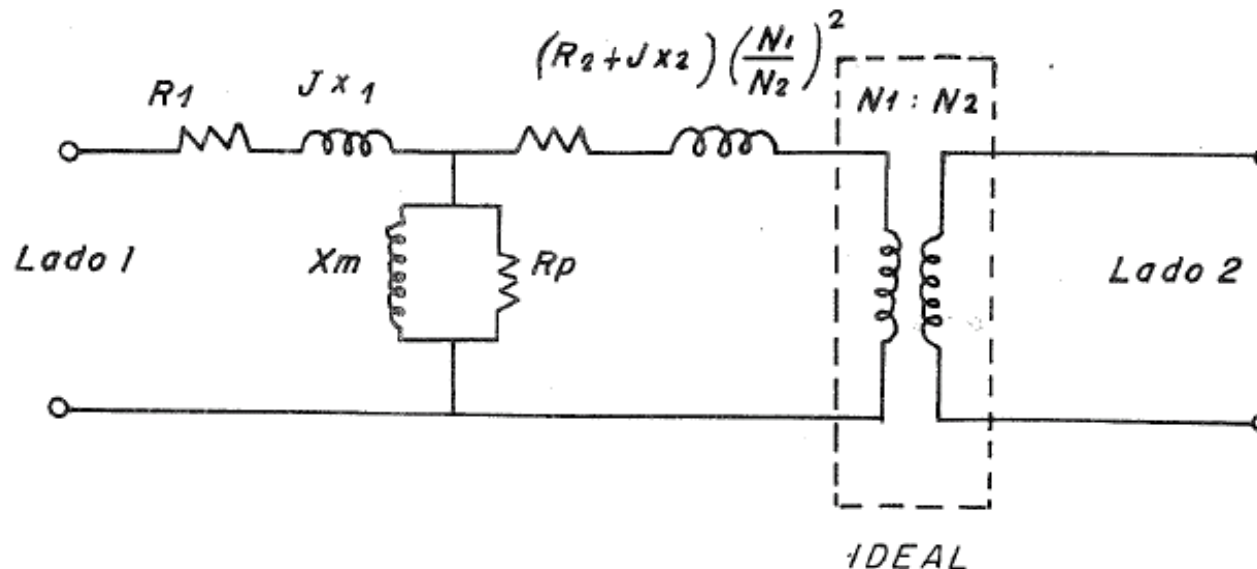
# Equivalentes de Generadores

- Hay 3 valores de reactancia diferentes:
  - Subtransitoria ( $X_d''$ )
  - Transitoria ( $X_d'$ )
  - Sincrona ( $X_d$ )
- La reactancia subtransitoria es utilizada para calculo de corto circuito y designada igual a la reactancia de secuencia (+) y (-).



# Equivalentes de Transformadores

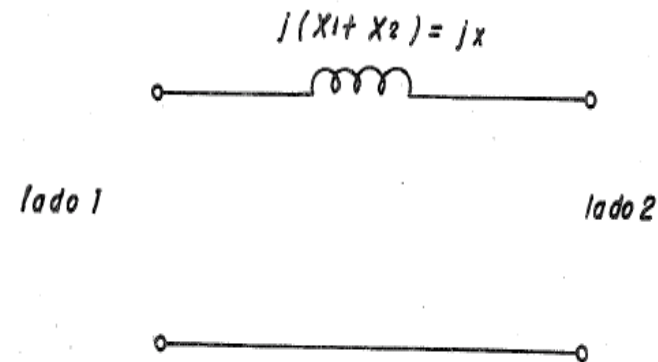
- Esta representación es muy complicada y no es recomendada para calculo de corto circuito.





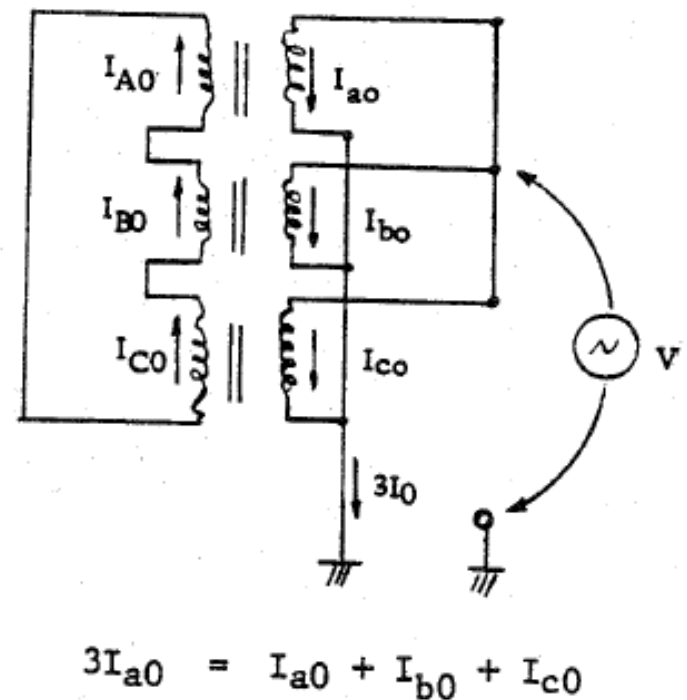
# Equivalente de Trafo Simplificado

- Desestimando las perdidas .
- Desestimando la reactancia de magnetización.
- Representamos los valores de impedancia en p.u.
- Las reactancias de secuencia (+) y (-) son iguales.



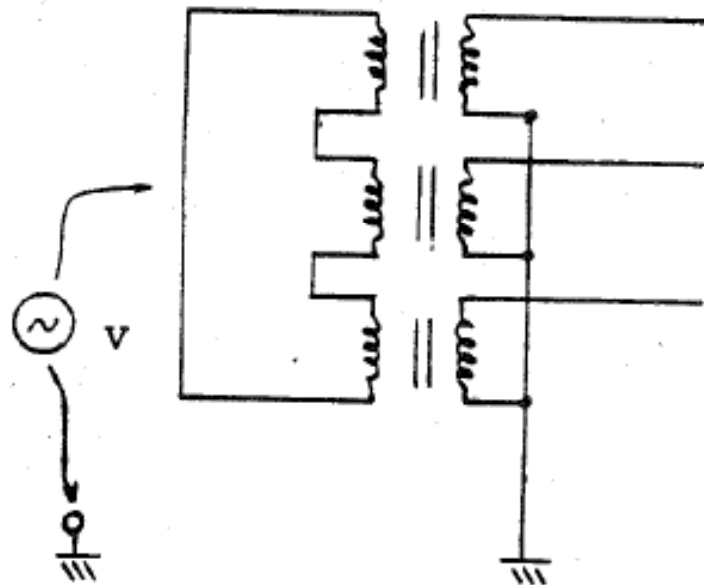
# Equivalente del Transformador D-Y

- Ponemos en corto el devanado en estrella y aplicamos un voltaje monofasico entre el corto y la tierra, de manera que fluyan corrientes de secuencia cero iguales en magnitud y angulo y que se suman en el neutro (4to. Conductor).
- Cada corriente induce una corriente en la delta que por ser iguales y estar en fase circularan en la Delta.



# Equivalente del Transformador D-Y

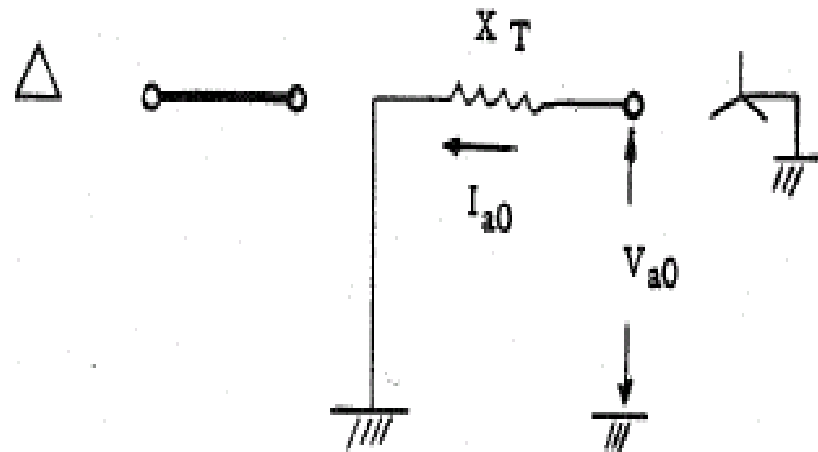
- Si repetimos el procedimiento para la delta:
  - La corriente vale cero, lo que significa que la impedancia ( $Z$ ) es infinita, de manera que el circuito para secuencia cero esta abierto.



# Equivalente Monofasico D-Y

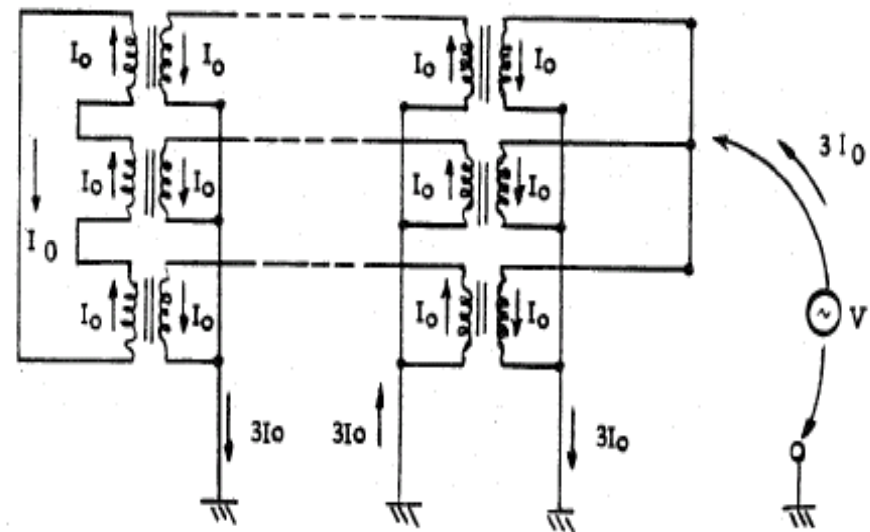
- Observamos en la figura que:
  - El lado de la delta representa un punto abierto para el circuito.
  - El neutro del lado de la estrella representa un camino para la corriente de secuencia cero

El equivalente monofásico será

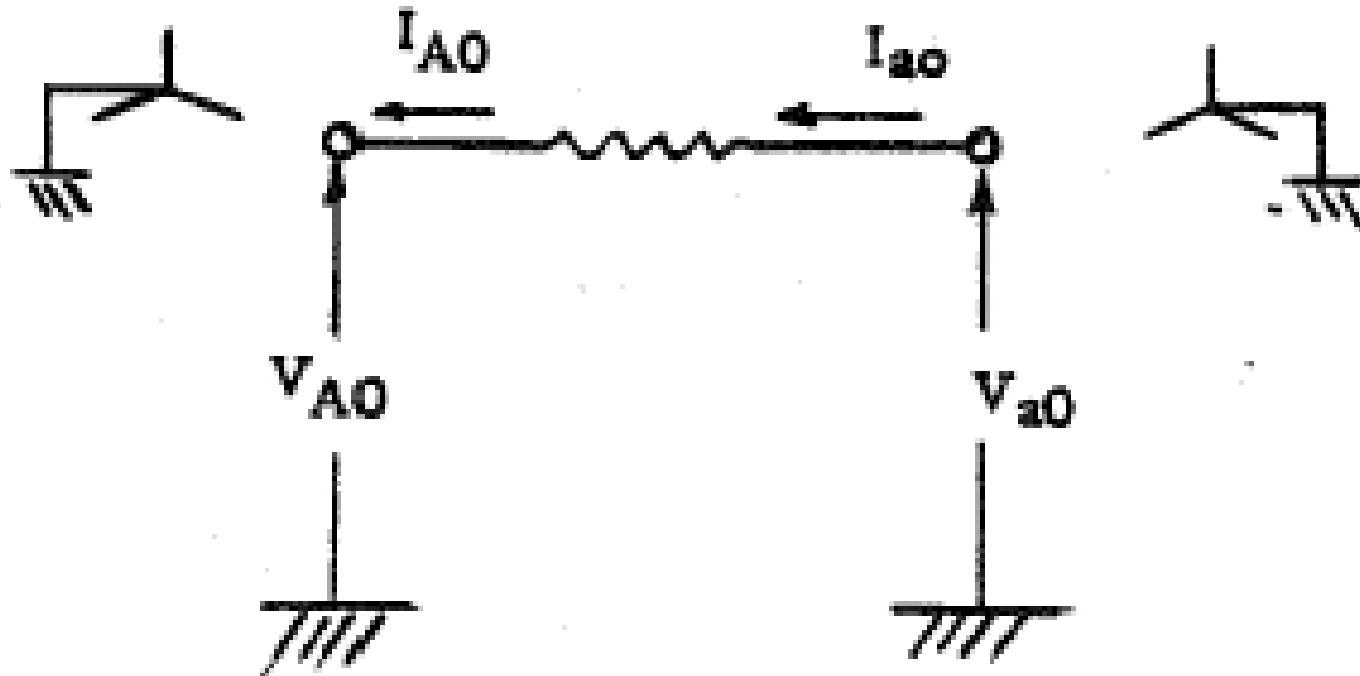


# Equivalente del Transformador Y-Y

- Para el transformador Y-Y, con neutro aterrizado:
  - La inyección de corriente  $3I_0$  que se intenta en cualquiera de los dos devanados, tendrá éxito sólo si el otro devanado termina en conexiones externas en otro transformador.
  - Bastaría con abrir cualquier neutro, para que el circuito se comportara como si  $Z$  fuera igual a infinito.



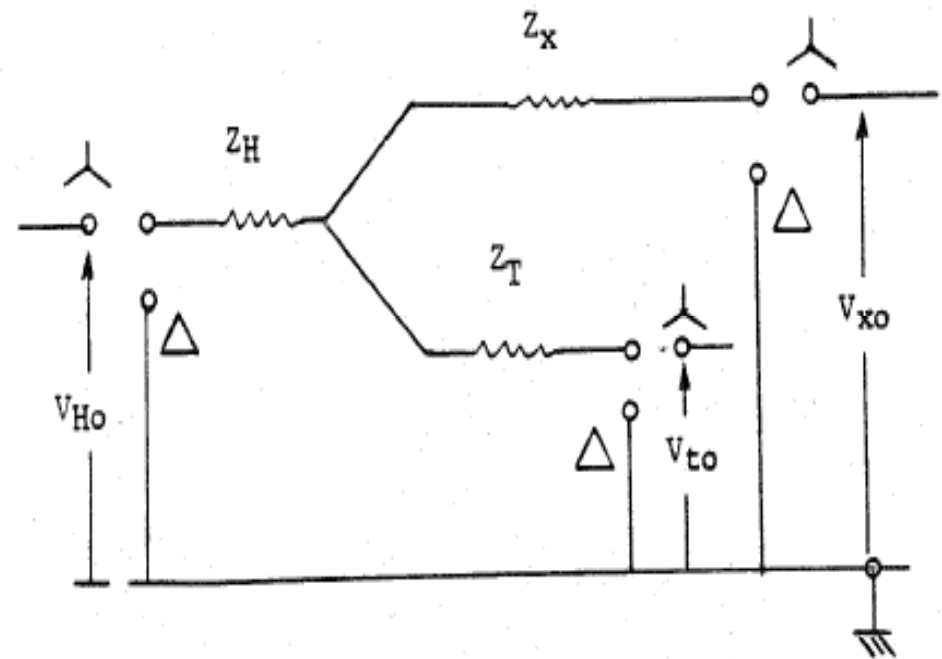
# Equivalente Monofasico Y-Y



- Este equivalente se dice que deja pasar la corriente de secuencia cero

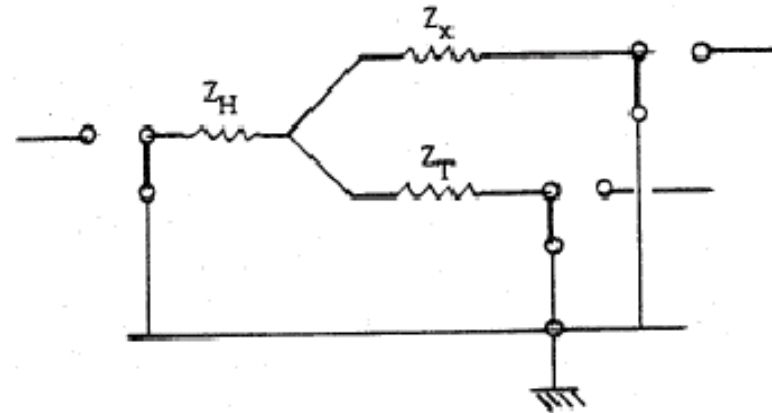
# Equivalente Transformador 3 Devanados

- Este equivalente, resulta ser una combinación de los transformadores con conexión D-Y, y Y-Y.
- Los textos dibujan el equivalente en forma general, de manera que pueda obtenerse para cualquier combinación de conexiones.



# Devanados Conectados en Delta

- Si todos los devanados estuvieran conectados en delta, el equivalente tendría visto desde la red,  $Z_0$  igual a infinito.



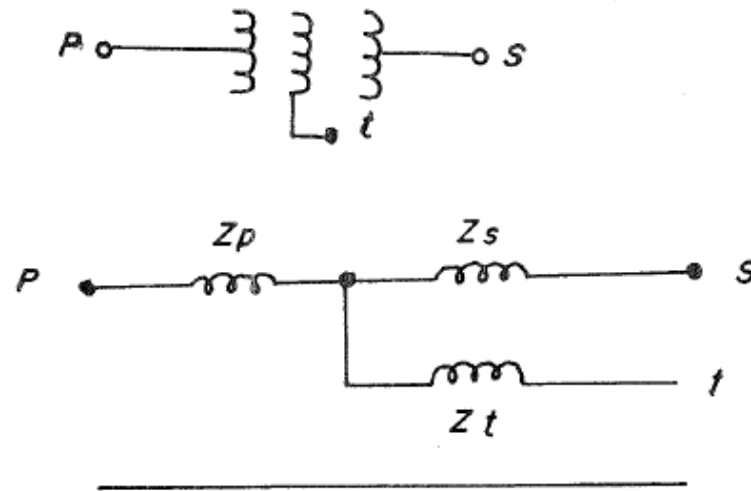


# Transformador de 3 Devanados

$$Z_p = \frac{1}{2} (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st})$$

$$Z_s = \frac{1}{2} (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt})$$

$$Z_t = \frac{1}{2} (Z_{st} + Z_{pt} - Z_{ps})$$



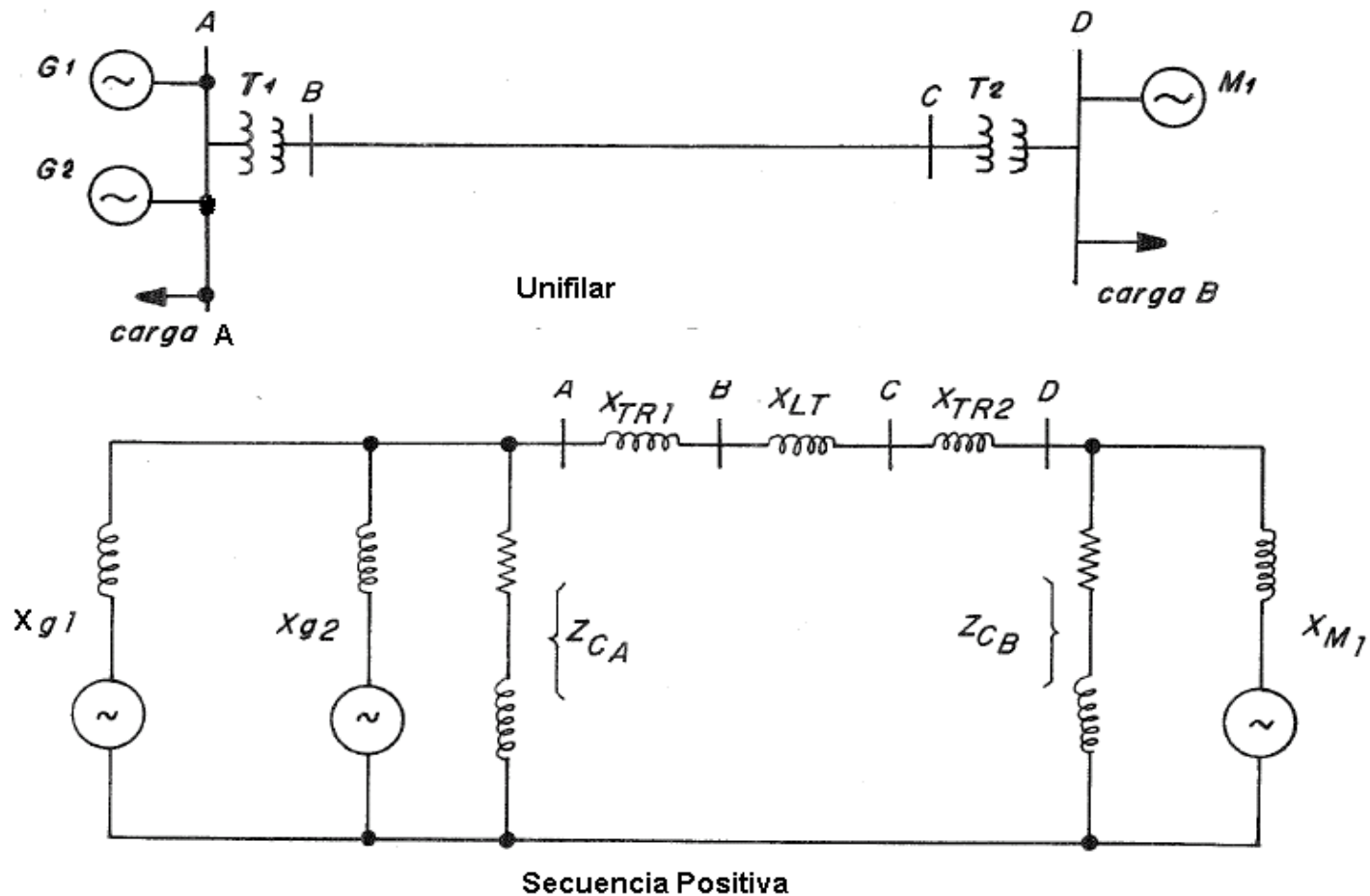
# Ejemplo: Z Transformador de 3D

| IMPEDANCIA Z / Zo (Valores de Prueba - ONAN) |                  |                  |                  |
|----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Pos                                          | AT - MT (36 MVA) | AT - BT (36 MVA) | MT - BT (36 MVA) |
| 1-16R                                        | 5.16 / 3.39 %    | 19.21 / 17.95 %  | 12.53 / 12.11 %  |
| 3-N                                          | 4.83 / 3.11 %    | 18.38 / 16.61 %  | 12.05 / 11.47 %  |
| 5-16L                                        | 4.57 / 3.14 %    | 18.06 / 17.30 %  | 11.90 / 11.82 %  |

# Circuitos Equivalentes, Z

|                    | GERADOR       |  | CARGA |                                 | LINHA | TRANSFORMADOR |  |  |  |  |
|--------------------|---------------|--|-------|---------------------------------|-------|---------------|--|--|--|--|
|                    |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
| Sequência Positiva |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
| Sequência Negativa |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
| Sequência Zero     |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
|                    | TRANSFORMADOR |  |       | TRANSFORMADOR DE 3 ENROLAMENTOS |       |               |  |  |  |  |
|                    |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
| Sequência Positiva |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
| Sequência Negativa |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |
| Sequência Zero     |               |  |       |                                 |       |               |  |  |  |  |

# Ejemplo: Diagrama Unifilar Sec +



# Falla de Fase a Tierra

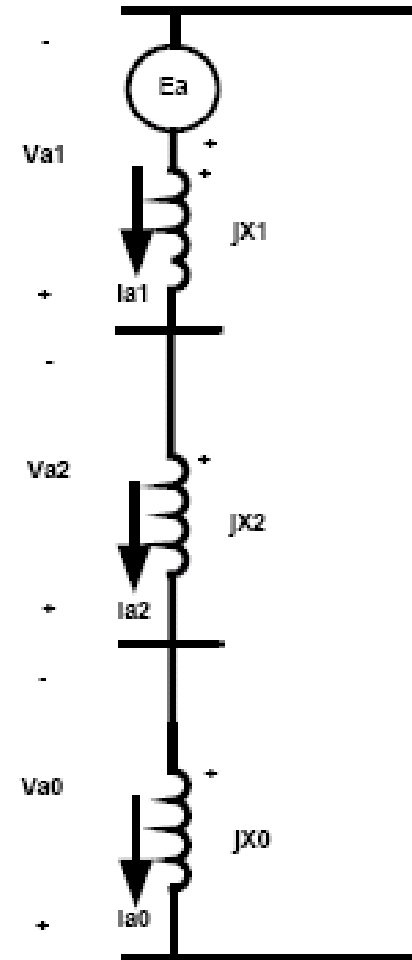
- Restricciones en la localización de la falla (fase A).
  - $V_A = 0$
  - $I_B = I_C = 0$

Por lo tanto:

- $V_A = (V_{A0} + V_{A1} + V_{A2})/3 = 0$
- $I_{A0} = (I_A + 0 + 0)/3$
- $I_{A1} = I_{A2} = (I_A + 0 + 0)/3$
- $I_{A0} = I_{A1} = I_{A2} = (I_A)/3$

# Conexiones AG

- De forma de satisfacer las restricciones, conectamos las redes de secuencia en serie.
- Se conecta el punto de falla de una red al punto de referencia de la red siguiente.



# Solución de Fallas AG

- Resolviendo  $I_0$ , podemos calcular  $I_A$ .
- Luego resolvemos  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_0$  y calculamos el voltaje de fase.
- En general  $jX_0$ , será reemplazado con:  
$$Z_0 = jX_0 + 3Z_{gr} + 3Z_f$$
- El factor de 3 resulta de que la secuencia cero es la misma para todas las tres fases.

# Fallas de Fase a Fase

- Dos fases (usualmente se utiliza B y C, para análisis) conectadas juntas.
  - No conectadas a tierra.
  - $V_B = V_C = 0$
  - $I_B = -I_C$

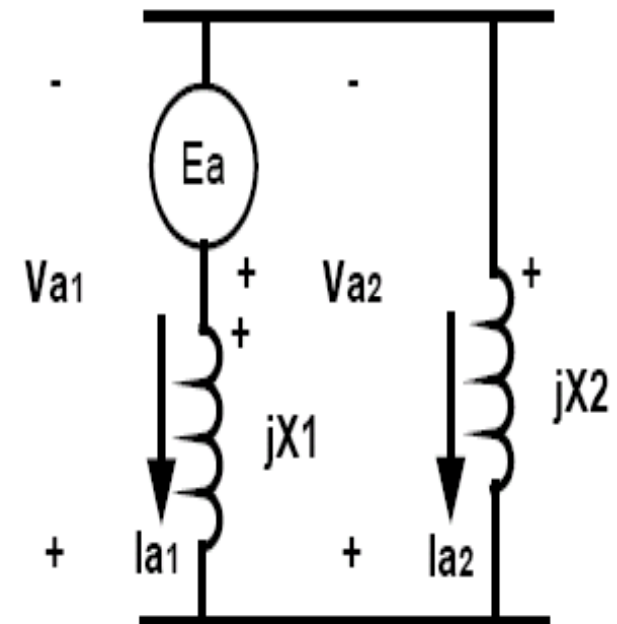
De las ecuaciones de componentes simétricas:

- $I_0 = 0$
- $I_1 = -I_2$
- $V_1 = V_2$



# Conexiones BC

- Si hay alguna impedancia de falla, esta aparecerá entre las redes de secuencia.
- No hay red de secuencia cero.
- $V_B = I_B * Z_f + V_C$



# TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS CT/PT

# Tareas Principales

- Los relevadores requieren reproducción razonablemente precisa de las condiciones normales, tolerables e intolerables del sistema.
- Transforman voltajes o corrientes, de un valor alto a un valor fácil de manejar por los relés e instrumentos.
- Aislamiento de los circuitos de medición del alto voltaje primario.
- Proporcionan posibilidades de estandarización, en corrientes y voltajes nominales.

# Leyes Comunes para Transformadores

- Transformador de Corriente:
- $I_1/I_2 = N_2/N_1$
- Transformadores de voltaje:
- $E_1/E_2 = N_1/N_2$

# Transformadores De Potencial PT



# Transformador de Voltaje

- Es esencial que el voltaje del devanado secundario sea lo mas cercano posible, proporcionalmente, al voltaje primario.
- De forma a alcanzar lo anterior, se diseñan para que la caída de voltaje en el devanado sea pequeña y la densidad de flujo en el núcleo sea bien abajo del valor de saturación, así la corriente de magnetización es pequeña.

# Transformador de Voltaje

- Los transformadores de voltaje, formalmente llamado transformadores de potencial, y los transformadores de voltaje con acoplamiento capacitivo son seleccionados de acuerdo a dos criterios:
  - Nivel de voltaje del sistema
  - Nivel de Aislamiento (BIL), requerido para el sistema en el cual serán conectados.

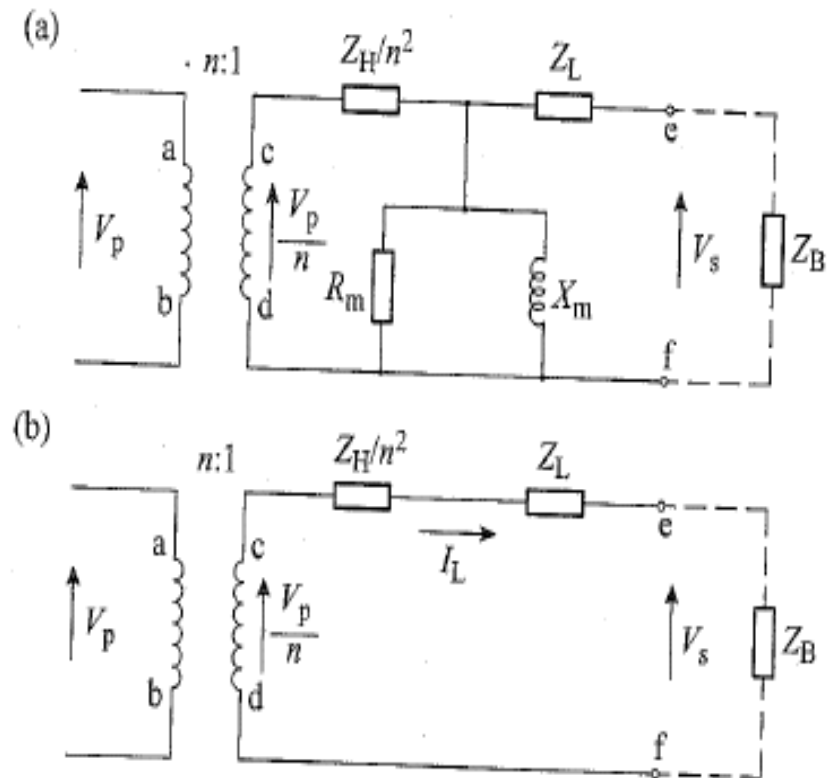
# Voltaje Secundario Nominal

- Bajo la norma ANSI, dos voltajes secundarios son permitidos: 115 y 120 Voltios.
- Los voltajes correspondientes de línea a neutro son:  $115/1.73$  y  $120/1.73$ .
- El voltaje secundario nominal, para los transformadores capacitivos son: 115 y 66.4 voltios.



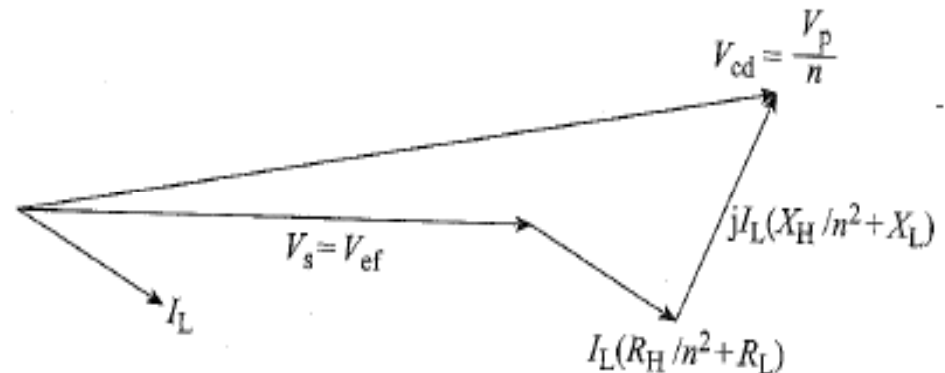
# Circuito Equivalente PT

- Pueden ser considerados transformadores pequeños, su circuito equivalente es el mismo que el de un transformador de potencia.
- El circuito de magnetización puede ser considerado despreciable.



# Diagrama Vectorial PT

- El voltaje secundario  $V_s$  atrasa al voltaje  $V_p/n$  y es menor en magnitud.
- El error máximo nominal es relativamente pequeño.
- Tiene un excelente comportamiento transitorio y reproduce fielmente cambios abruptos en el voltaje primario.



# Errores en los PT

- Los errores son debido a diferencia en magnitud y fase entre  $V_p/n$  y  $V_s$ . Esto consiste de errores bajo:
  - condición de circuito abierto, cuando la impedancia de carga,  $Z_b$ , es infinita y causada por la caída de voltaje de la circulación de la corriente de magnetización a través del devanado primario.
  - Caída de voltaje como resultado del flujo de corriente de carga  $I_L$ , a través de ambos devanados.
- $\text{Error} = \{(nV_s - V_p)/V_p\} \times 100$

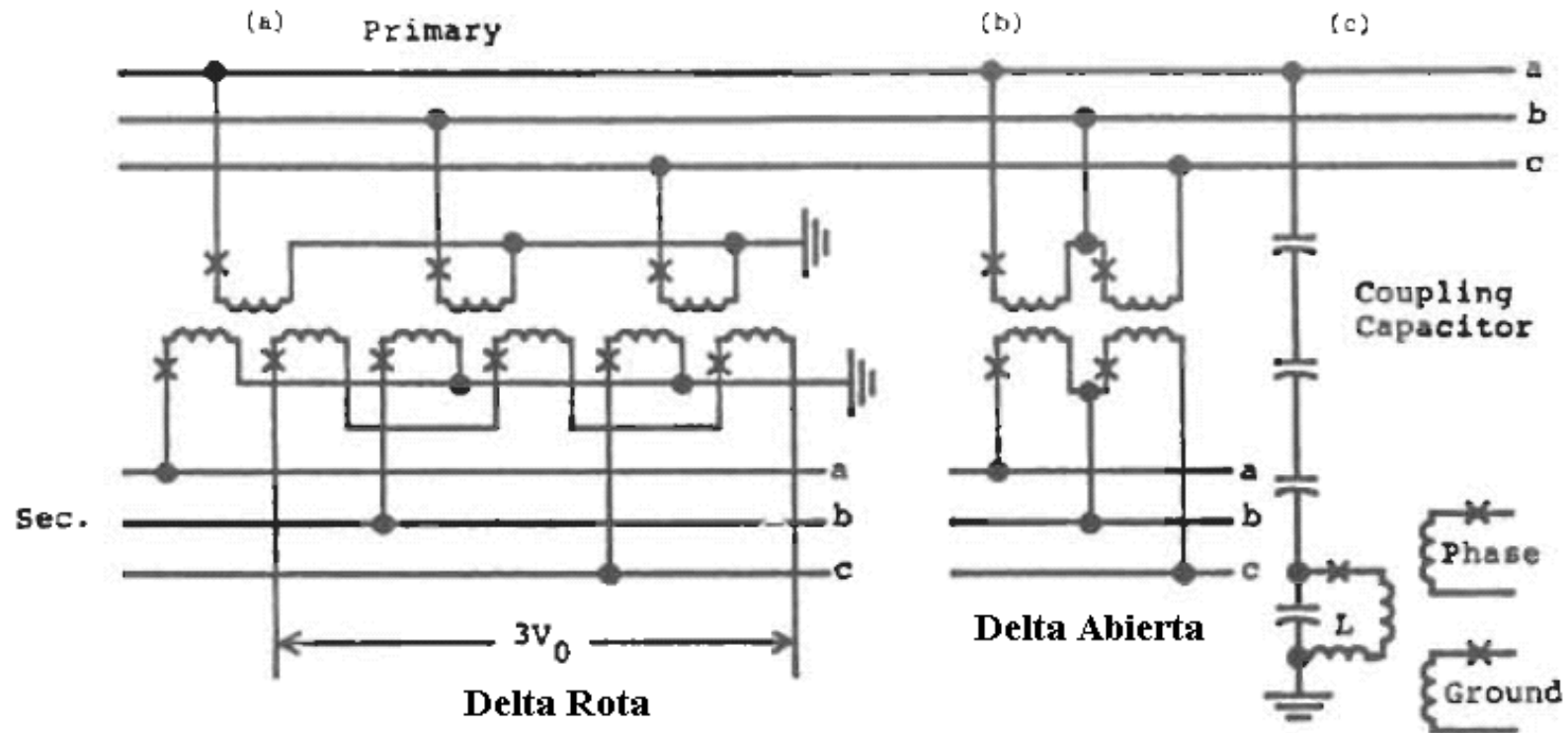
# Carga en los PT- ANSI C57.13

## Cargas estandar para PT

| Standard burden |              |              | Characteristics for 120 V and 60 Hz |                |                        | Characteristics for 69.3 V and 60 Hz |                |                        |
|-----------------|--------------|--------------|-------------------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------------|----------------|------------------------|
| design          | volt-amperes | power factor | resistance ( $\Omega$ )             | inductance (H) | impedance ( $\Omega$ ) | resistance ( $\Omega$ )              | inductance (H) | impedance ( $\Omega$ ) |
| W               | 12.50        | 0.10         | 115.2                               | 3.04           | 1152                   | 38.4                                 | 1.01           | 384                    |
| X               | 25.00        | 0.70         | 403.2                               | 1.09           | 575                    | 134.4                                | 0.364          | 192                    |
| Y               | 75.00        | 0.85         | 163.2                               | 0.268          | 192                    | 54.4                                 | 0.089          | 64                     |
| Z               | 200.00       | 0.85         | 61.2                                | 0.101          | 72                     | 20.4                                 | 0.034          | 24                     |
| ZZ              | 400.00       | 0.85         | 31.2                                | 0.0403         | 36                     | 10.2                                 | 0.0168         | 12                     |
| M               | 35.00        | 0.20         | 82.3                                | 1.070          | 411                    | 27.4                                 | 0.356          | 137                    |

- La carga nominal para transformadores de voltaje es usualmente expresada en VA en un factor de potencia especifico.

# Fuentes de Voltajes Típicas

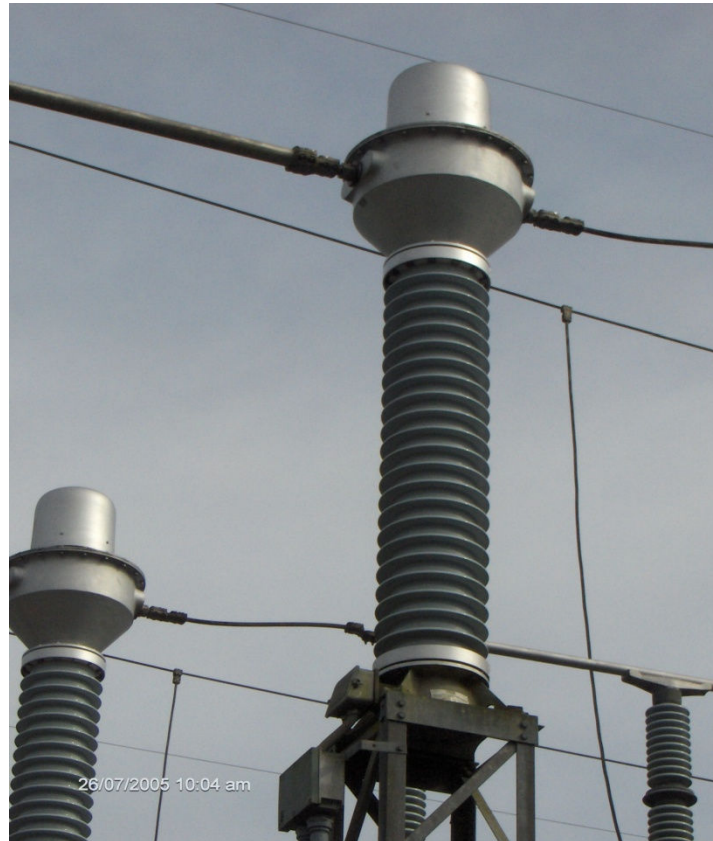


- La delta rota, se utiliza como fuente de polarización de relés direccionales de tierra.

# Desempeño de Transformadores de Voltajes

- Proporcionan excelente reproducción del voltaje primario, ya sea en estado transitorio o estable, para los relés de protección.
- No tiene problema de saturación, ya que los sistemas de potencia, no deben de ser operados en voltajes superiores al nominal y en fallas hay reducción del voltaje.
- Tienen amplia capacidad y son dispositivos altamente confiable.

# Transformadores De Corriente CT



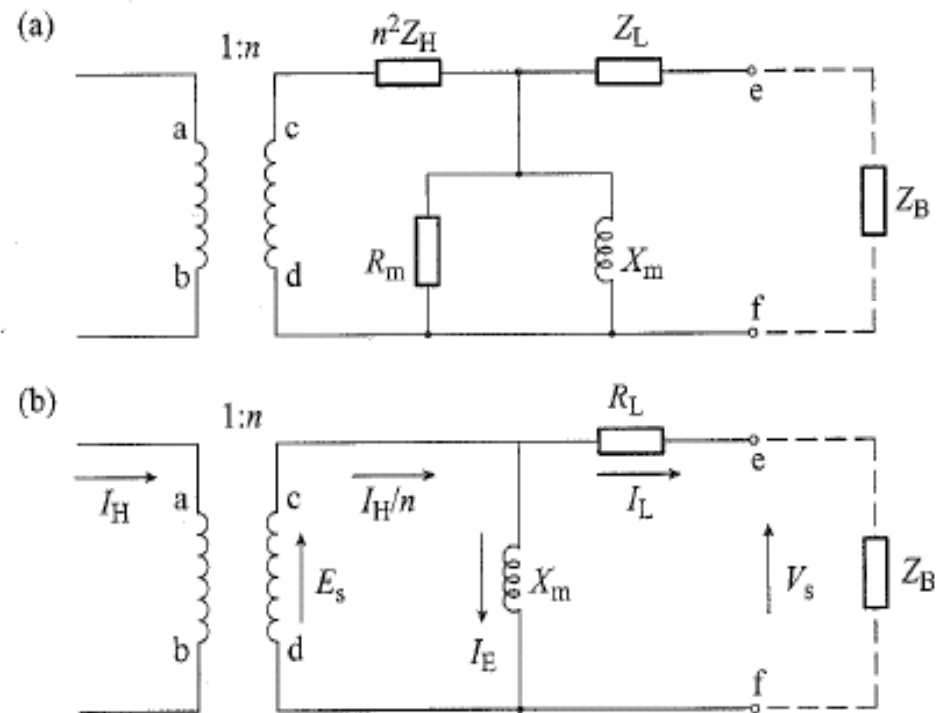
# Desempeño de CT

- **El desempeño varia con:**
  - Tipo de protección
  - Calidad del CT
- **Evitar Saturación de CT:**
  - Para las fallas mas criticas el CT debe operar en su porción lineal de la curva de magnetización..
  - Debe ser capaz de suministrar corriente suficiente, de manera que el relé opere satisfactoriamente.



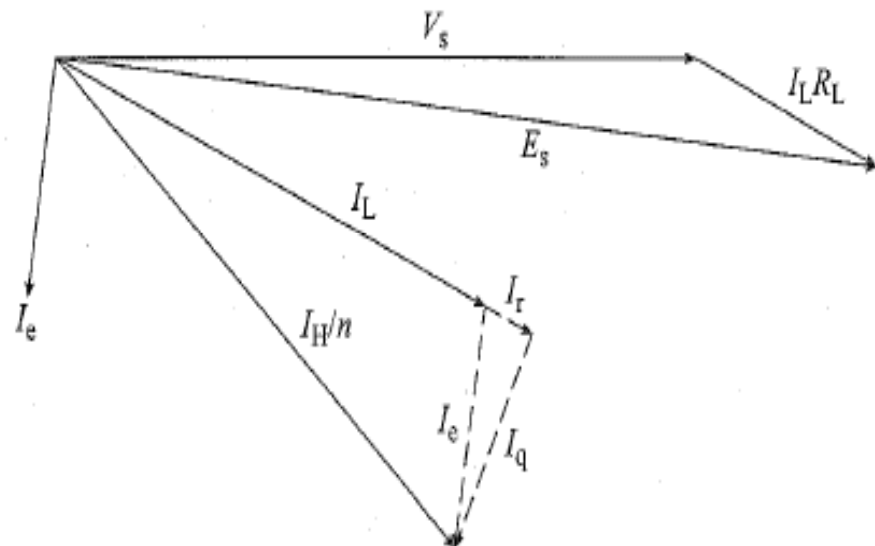
# Circuito Equivalente de CT

- $n^2 Z_H$ , es la impedancia primaria referida al lado secundario.
- $Z_L$ , es la impedancia del lado secundario.
- $R_m$  y  $X_m$ , representan las perdidas y la excitación del núcleo.



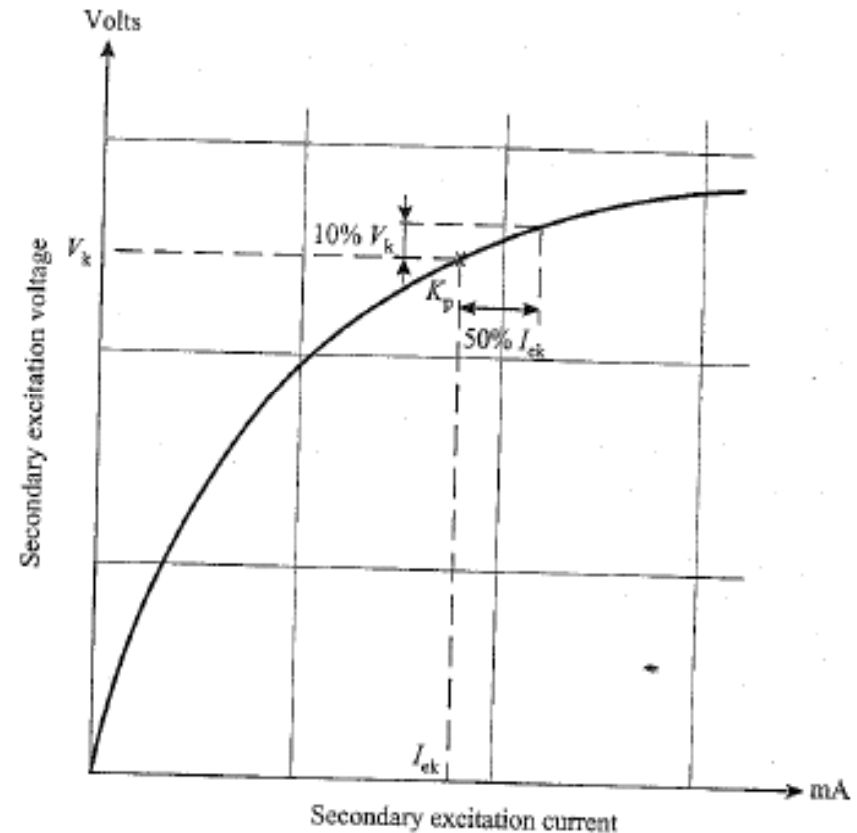
# Diagrama Vectorial de CT

- En general  $Z_L$ , es resistivo y  $I_e$  atrasa por  $90^\circ$  el voltaje  $V_s$ .
- $I_e$ , es la principal fuente de error.
- El efecto de  $I_e$ , es hacer con que la  $I_L$  atrase y sea menor que la corriente  $I_H/n$ , la cual es la corriente primaria referida al secundario.
- $I_r$ , es el error en magnitud de  $I_H/n$  y  $I_L$ .



# Saturación AC del CT

- Los errores de CT resultan de corrientes de excitación, de forma a verificar si el CT está funcionando correctamente, debemos medir o calcular su curva de excitación.
- La corriente de magnetización depende de la de la sección transversal y longitud del circuito magnético, numero de vueltas en el devanado y característica magnética del material.
- Un aumento de 10% en el voltaje de excitación, provoca un aumento de 50% en la corriente.



# Salidas de CT

- **Medición o Instrumentación:**
  - Alta precisión para corrientes arriba de las nominales (5-120%)
  - Clases de precisión de 0.1 (laboratorio), 0.2, 0.5 y 1.0
- **Protección Y Registro de Disturbio:**
  - Precisión baja.
  - Alta capacidad para transformar altas corrientes de fallas de forma que permitan a los relés medir y desconectar la falla.
  - Clase de precisión de 5P y 10P de acuerdo a la norma IEC 185.

# Núcleos de Medición

- **Protección de Instrumentos y Medidores:** deben saturarse entre 10-40 veces la corriente nominal.
- Normalmente los medidores de energía tienen baja capacidad de resistencia entre 12-20 veces la corriente nominal.

# Núcleos de Protección

- **Características:**

- Baja Precisión
- Voltaje de saturación alto
- Con pequeña o sin corrección de vueltas.

- **Factores que definen el Núcleo:**

- Clase de error de 5% (5P) o 10%(10P)
- Factor limite de precisión

# Carga de un CT

## Carga Nominal CT de Protección de 5 Amperios Secundario

| Designation | Resistance<br>( $\Omega$ ) | Inductance<br>(mH) | Impedance<br>( $\Omega$ ) | Volt-amps<br>(at 5 A) | Power<br>factor |
|-------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|
| B-1         | 0.5                        | 2.3                | 1.0                       | 25                    | 0.5             |
| B-2         | 1.0                        | 4.6                | 2.0                       | 50                    | 0.5             |
| B-4         | 2.0                        | 9.2                | 4.0                       | 100                   | 0.5             |
| B-8         | 4.0                        | 18.4               | 8.0                       | 200                   | 0.5             |

- La carga de un CT, es el valor en ohms de la impedancia del lado secundario, debido a los relevadores y las conexiones entre el CT y los relés.
- La norma IEC 185 (1987), especifica los CT'S por la clase de precisión seguida de una letra M o P, el cual denota si el transformador es disponible para medición o protección.

# Selección de CT

- Cuando seleccionamos un CT, es importante asegurar que la corriente de falla y las condiciones de carga normal, no resulten en saturación del núcleo y que los errores no excedan los límites aceptables. Estos factores pueden ser evaluados por:
  - Fórmula
  - Curvas de magnetización
  - Clase de precisión del CT.
- Los dos primeros métodos proporcionan forma precisa para la selección del CT, y el tercer método solo nos da una estimación cualitativa.



# Estimación del Voltaje Secundario

- El voltaje secundario  $E_s$  debe ser determinado para los tres métodos anteriores, si la impedancia  $X_m$  del circuito magnético es alta:
  - $V_S = I_L ( Z_L + Z_C + Z_B )$
  - $V_S$  es el voltaje r.m.s. inducido en el devanado secundario
  - $I_L$  es la corriente máxima secundaria en amperios.
  - $Z_B$  es la impedancia externa máxima conectada.
  - $Z_L$  es la impedancia del devanado secundario.
  - $Z_C$  es la impedancia del alambrado de conexión.

# Uso de la Formula

- El método utiliza la ecuación fundamental del transformador:
  - $V_S = 4.44 f A N B_{\max} 10^{-8}$  voltios
  - $f$  es la frecuencia en  $H_Z$  .
  - $A$  es el área de la sección transversal del núcleo ( $in^2$ ).
  - $B_{\max}$  es la densidad de flujo, 100,000 líneas/ $in^2$ , es un valor típico para transformadores modernos.

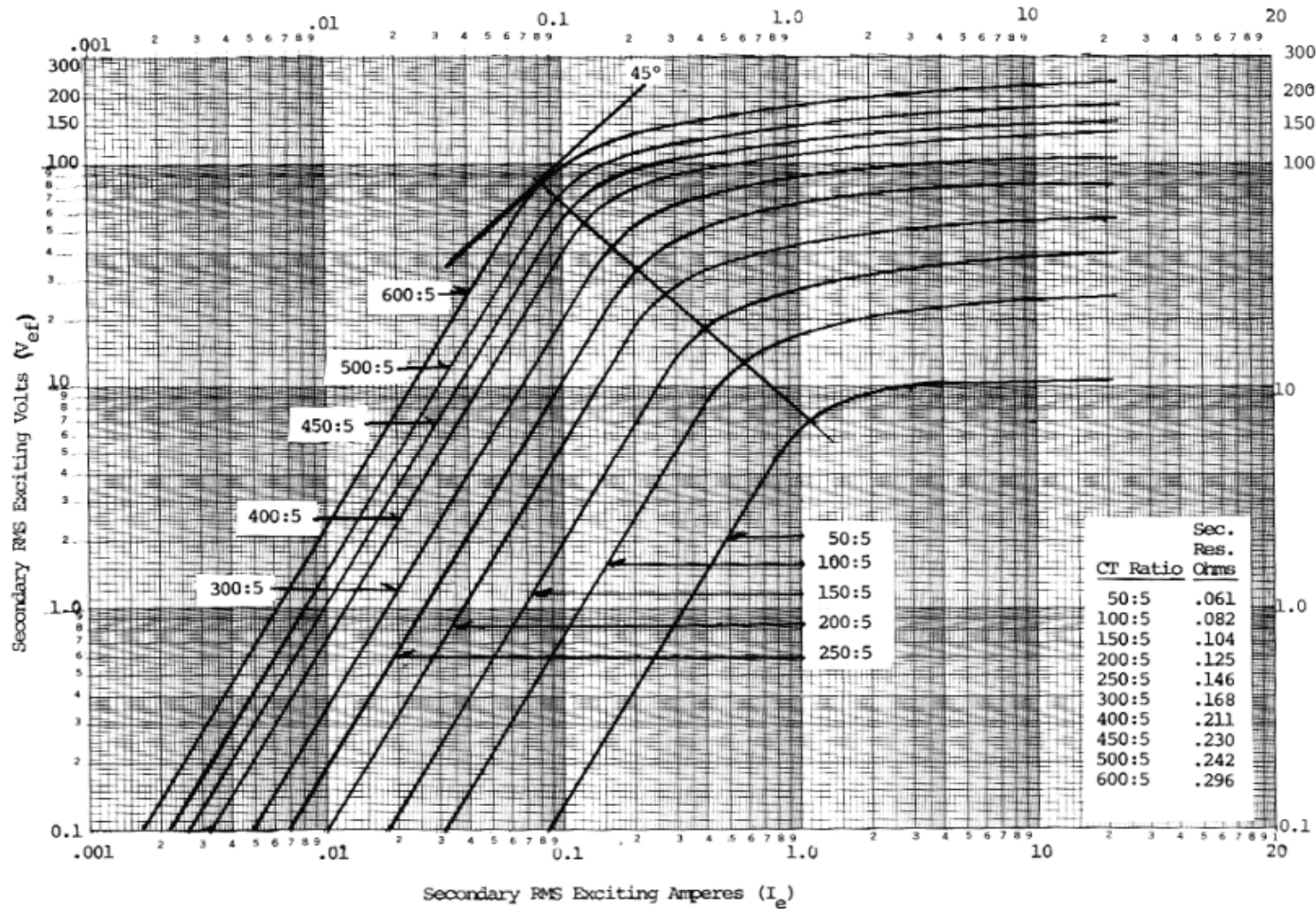
# Ejemplo de Aplicación

- Asuma que un CT con una relación de 2000/5, teniendo un núcleo de acero de alta permeabilidad y un área transversal de 3.25 in<sup>2</sup>, un devanado secundario con una resistencia de 0.31 ohm. La impedancia de los relés incluyendo conexiones es de 2 ohm. Determine si el CT, será saturado por una falla de 35,000 Amperios a 60 Hz:
  - $I_L = 35,000 * 5/2000 = 87.5$  Amperios
  - $N = 2000/5 = 400$ .
  - $V_S = 87.5 (2 + 0.31) = 202.1$  voltios
  - $B_{max} = 202.1 * 10^8 / 4.44 * 60 * 3.25 * 400 = 58,356.4$

# Usando la Curva de Magnetización

- Las curvas dan la magnitud de la corriente de excitación requerida, de manera de obtener un voltaje secundario específico.
- El método consiste en:
- Asumir un valor para  $I_L$
- Calcular  $V_S$  de acuerdo a la ecuación dada.
- Localice el valor de  $V_S$  en la curva para el tap seleccionado y encuentre el valor asociado de la corriente de magnetización,  $I_e$ .
- Calcule  $I_H/n(=I_L + I_e)$  y multiplique este valor por  $n$  para referirlo al lado primario del CT.
- Este proporciona un punto en la curva de  $I_L$  vs.  $I_H$ . El proceso es repetido para obtener todos los valores de  $I_L$  y los valores resultante de  $I_H$ .

# Curva de Saturación



Typical excitation curves for a 600:5 multiratio class C100 current transformer.

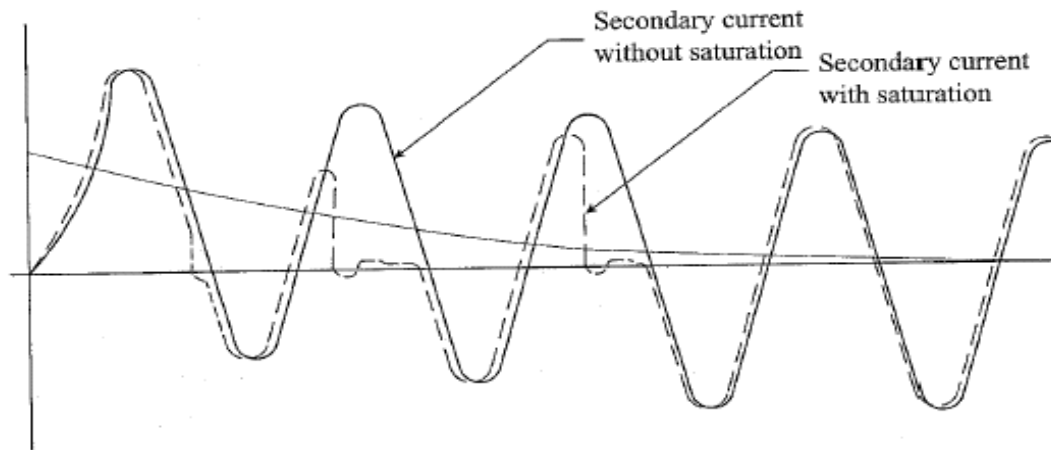
# Clase de Precisión Según ANSI

- La clase de precisión de un CT (Norma C57.13), es descrita por dos símbolos: una letra y un voltaje nominal, definiendo la capacidad del CT. La **C** indica que la relación de transformación puede ser calculada; mientras que la **T** indica que la relación de transformación puede ser determinada por pruebas.

# Ejemplo de Aplicación

La corriente de falla máxima en un circuito dado es de 12,000 A. La relación nominal del CT es de 1200/5 y la relación a ser usada es de 800/5. La clase del CT es C-200, la resistencia del secundario es 0.2 ohm. La carga secundaria total es 2.4 ohm y el factor de potencia es 0.6. Determine si en la ocurrencia de una falla el error excederá 10%

# Saturación DC



- La componente transitoria DC, puede producir saturación severa en la corriente secundaria del CT.
- Si ocurre saturación en CT'S asociados a esquemas particulares de relés, resultaría en circulación de corrientes desbalanceadas que podrían causar una mala operación del esquema.

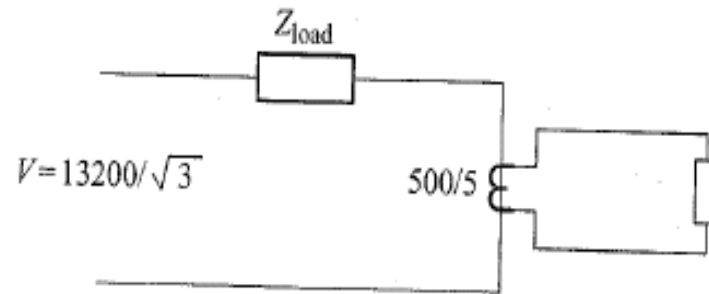


# Precaución al Trabajar con CT

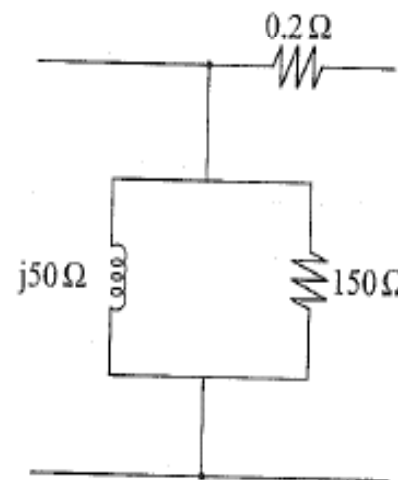
- Trabajar con CT, en circuitos energizados puede ser extremadamente riesgoso. Particularmente, si dejamos el secundario abierto pueden presentarse sobre tensiones peligrosas que pueden implicar en daño al personal o al equipo, ya que los CT están diseñados para ser usado en circuitos de potencia con impedancia mayor que la propia del CT.
- Los circuitos asociados con CT, deben ser siempre mantenidos en una condición cerrada o en corto circuito, de manera a prevenir la ocurrencia de condiciones adversas.

# Ejemplo de Ilustración

- Considere un alimentador con una carga de 10MVA y  $f_p$  de 1.0, asociado con este circuito tenemos un CT de relación 500/5, el cual alimenta un sistema de medición cuya carga total es 10VA. Calcule el voltaje que aparecerá en el circuito secundario del CT, el sistema de medición fuera accidentalmente abierto.



**Diagrama Unifilar**



**Circuito equivalente  
del CT, Referido al  
Lado secundario**

# Continuación Ejemplo de Ilustración

**Referenciando los valores al lado secundario**

$$V = \frac{13200}{\sqrt{3}} \times \frac{500}{5} = 762102.36 \text{ V}$$

$$Z_{\text{load}} = \frac{13.2^2}{10} \times \left(\frac{500}{5}\right)^2 = 174240 \Omega$$

$$Z_{\text{meter}} = \frac{10}{5^2} = 0.4 \Omega$$

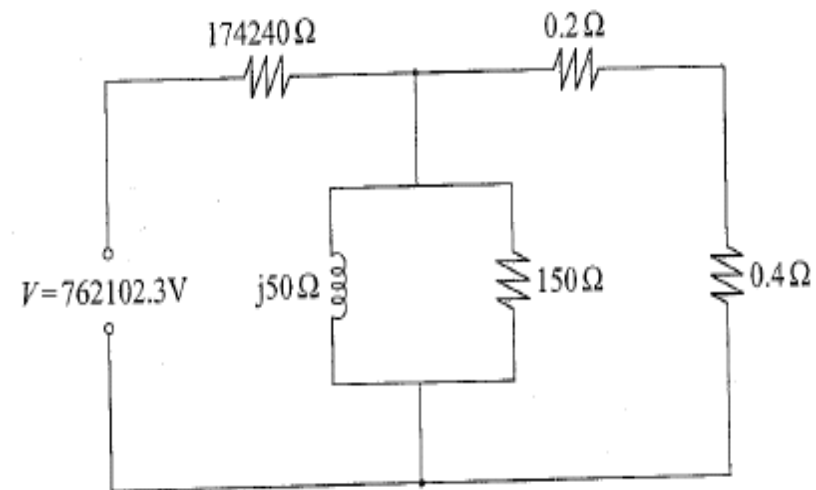
**Circuito secundario cerrado, ignoramos el circuito de magnetización.**

$$V_{\text{meter}} = \frac{762102.36}{174240 + 0.2 + 0.4} \text{ A} \times 0.4 \Omega = 4.37 \text{ A} \times 0.4 \Omega = 1.75 \text{ V}$$

**Circuito secundario abierto, corriente circulando por el circuito de magnetización**

$$V_{\text{CT}} = \frac{762102.36}{174240 + (150 \parallel j50)} \times (150 \parallel j50) = 207.47 \angle 71.55^\circ \text{ V}$$

**El voltaje incrementa 120 veces**



# ATERRIZAJE DEL SISTEMA

# Introducción

- Durante condiciones normales de operación, el método de aterrizaje a tierra no tiene influencia. Cuando ocurre una falla a tierra, el método de aterrizaje cobra importancia.
- La mayoría de las fallas en SEP, son de fase a tierra (70 – 90% del número total de fallas).
- Los SEP, son aterrizados para prevenir daños a las personas y a los equipos.

# Métodos de Aterrizaje

**Segun ANSI/IEEE 141 1986, tenemos que:**

- Directo o solido a Tierra
- Alta Impedancia
  - Bobina de Petersen
  - Alta Resistencia
- Baja Impedancia
  - Reactor
  - Baja Resistencia

Tierra Aislada

# Directo o Sólido a Tierra

- Neutral del sistema aterrizado en un punto, sin inserción deliberada de alguna resistencia.
- Es definido por la norma ANSI/IEEE cuando tenemos las constantes del sistema:

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3.0 \text{ and } \frac{R_0}{X_1} \leq 1.0$$

- El neutro de los devanados en estrella de los transformadores, se conectan a la tierra de la subestación.
- Las corrientes de falla pueden variar de valores pequeños a mayores que la corriente de falla trifásica.

# Alta Impedancia

- **Alta Resistencia:** Casos en donde el factor  $3R_0$  es menor o igual a  $X_{co}$ ,  $X_{co}$  es la capacitancia total de la red por fase contra tierra. Obtenida usando la mayor  $R_0$  a tierra posible. Utilizada en generadores y plantas industriales.
- **Bobina de Petersen o tierra resonante:** Inductancia calibrada a la capacitancia de la red en la frecuencia nominal. Debe satisfacer todas las alternativas de conexión. El ajuste debe ser cambiado con el cambio de topología de la red. Es de uso limitado en U.S.A., y no se usa en Panamá.



# Baja Impedancia

- **Reactor:** Ocurre básicamente en la literatura americana y esta relacionada donde  $X_0$  es menor o igual a  $10X_1$ . El factor 10 es requerido para reducir drásticamente los sobrevoltaje debida a fallas a tierra transitorias.
- **Baja Resistencia:** Es una resistencia donde  $R_0$  es menor igual a  $2X_0$ , pero  $R_0$  se mantiene pequeña de manera que una alta corriente de falla a tierra es obtenida, entre 200 a 2000 A. Este método es recomendado por la norma Inglesa, cuyo valor propuesto es de 300 Amperios.

# Tierra Aislada

- Sistemas no aterrizados, son SEP sin aterrizaje intencional.
- Están aterrizados por la capacitancia natural del sistema.
- Niveles de corrientes son muy bajos, con danos mínimos a equipos.
- El sistema esta sujeto a sobrevoltaje transitorios altos.

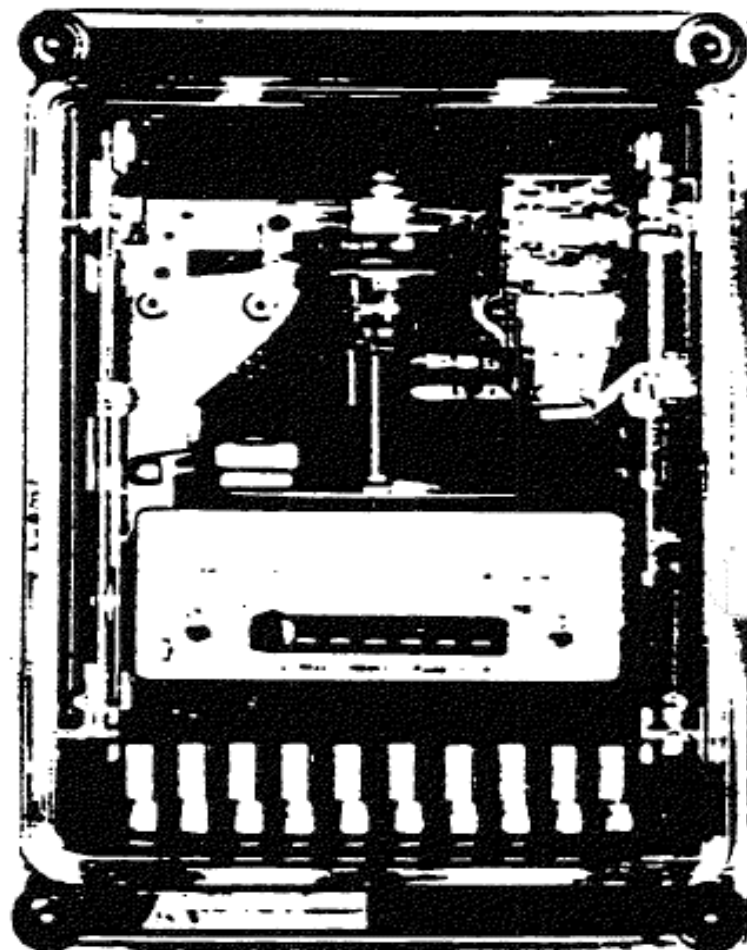
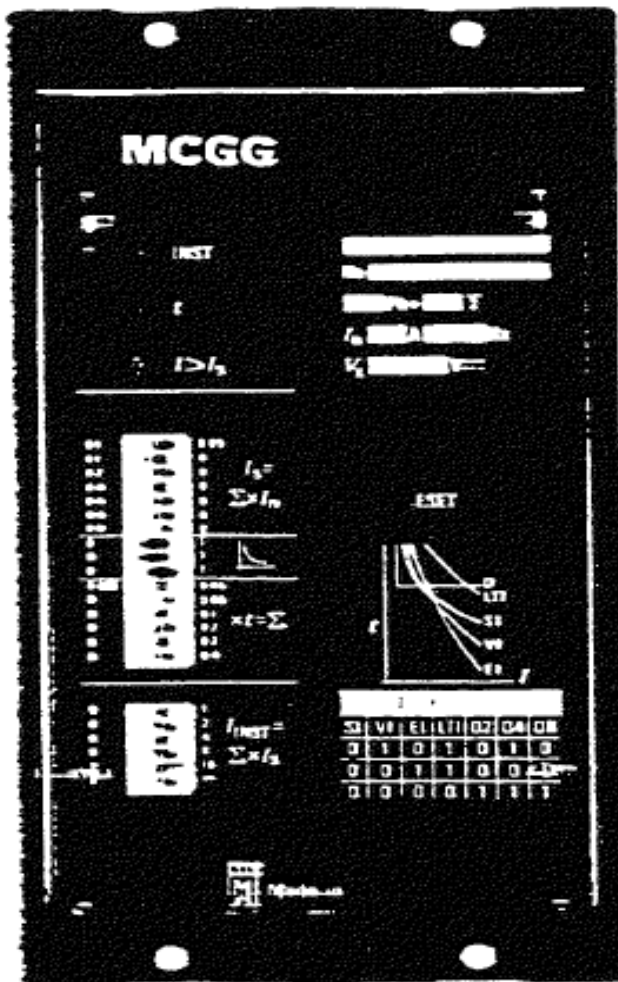
# Ventajas y Desventajas

| Metodo      | Ventajas                                                                     | Desventajas                                                     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Directo     | La proteccion de falla a tierra simple, debido a corriente de falla elevadas | Corrientes de fallas elevadas pueden causar danos a los equipos |
|             | Se elimina la influencia del arco secundario                                 |                                                                 |
|             | Sobrevoltajes reducidos, menor que 0.8 veces el voltaje de fase-fase         |                                                                 |
| Reactancia  | Reduccion de corriente de falla                                              | Incremento en sobre voltaje transitorio                         |
|             | Sobrevoltajes entre 0.8 veces y el voltaje de fase-fase completo             |                                                                 |
|             |                                                                              |                                                                 |
| Resistencia | Reduccion de corriente de falla y voltaje transitorio                        | Sobrevoltajes pueden ser mayores que el voltaje de fase-fase    |
|             | Sobrevoltajes entre 0.8 veces y el voltaje de fase-fase completo             |                                                                 |
|             |                                                                              |                                                                 |

# Selección del Método

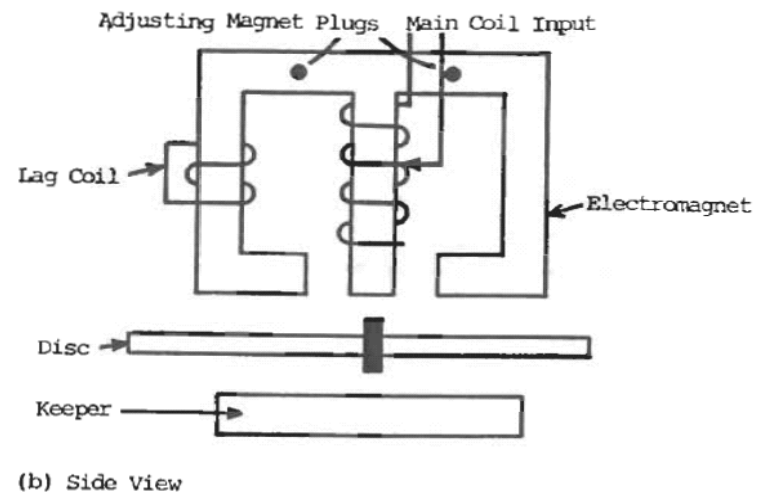
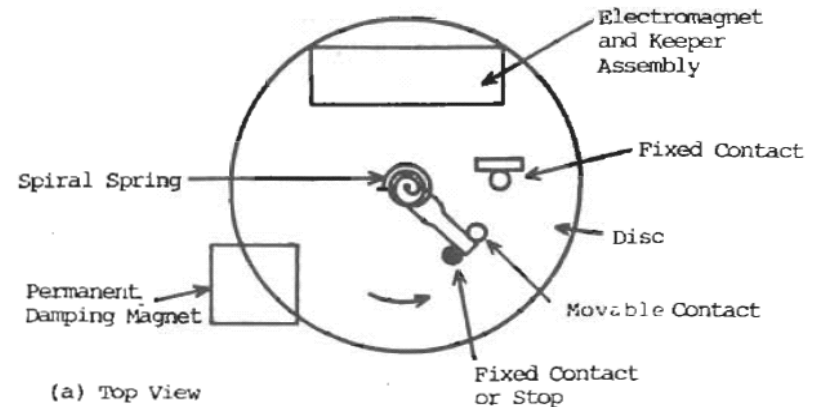
|                              | Metodo de Aterrizaje         |                            |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
|                              | Solido/Baja Z                | Alta Z                     |
|                              |                              |                            |
| Corriente de Falla           | Alta                         | Baja                       |
| Sobre voltaje en fases sanas | Baja                         | Alta                       |
| Daño                         | Alto                         | Bajo                       |
| Costo de Aislamiento         | Bajo                         | Alto                       |
| Sistema de Bajo Voltaje      | Por seguridad                |                            |
| Sistema de Medio Voltaje     |                              | Limitar corriente de falla |
| Alto Voltaje & EHV           | Limitar Costo de Aislamiento |                            |

# PROTECCION DE SOBRECORRIENTE



# Breve Historia

- Los relés electromecánicos de sobre corriente-tiempo, fueron uno de los primeros relés de protección, desarrollado hace 60-70 años atrás. Hoy día, todavía es utilizado en algunas aplicaciones. El diseño actual, utiliza el principio de disco de inducción.



# Proceso de Coordinación

- La aplicación correcta de los relés de sobre corriente, requiere un conocimiento de la corriente de falla que fluye en cada parte de la red. Los datos requeridos para un estudio de coordinación son:
  - Diagrama Unifilar del sistema.
  - Impedancias en ohm, pu o % de los equipos y cables.
  - Valores máximo y mínimo de las corrientes de corto circuito.
  - Requerimientos de corriente de arranque de motores y tiempos de arranque y stalling de motores de inducción.
  - Corriente de carga máxima.
  - Curva de decaimiento de las corrientes de falla suministrada por los generadores.
  - Curva de desempeño de los transformadores de corriente.

# Ajustes de los Relevadores

- Los ajustes de los relevadores son determinados para satisfacer:
  - Tiempos mínimos de operación en corrientes de fallas máxima.
  - Operación satisfactoria para corrientes de fallas mínimas esperadas.
  - Se aconseja plotar las curvas de los relés y otros dispositivos de protección, fusibles, en una escala común.
  - La escala correspondiente mas conveniente es la corriente esperada en el menor voltaje base.

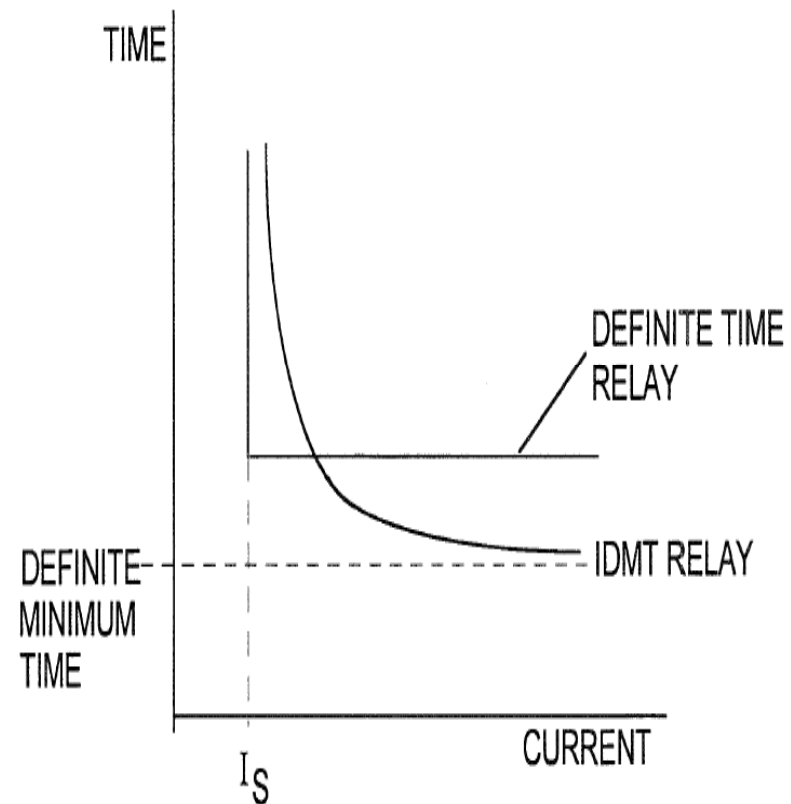


# Reglas Básicas de Coordinación

- Hay dos reglas básicas para una correcta coordinación de relevadores:
  - Cuando posible, utilice relevadores con la misma característica de operación.
  - Asegúrese que el relevador mas alejado de la fuente, tiene los ajustes de corriente igual o menor que los relevadores detrás de él. Esto es, la corriente requerida para operar los relevadores del frente es siempre igual o menor que la corriente primaria para operar el relevador localizado en la parte de atrás.

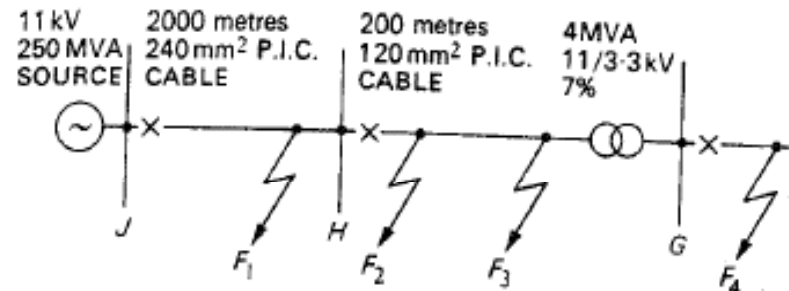
# Tipos de Relés de Sobre corriente

- Basados en su característica de operación pueden ser clasificados en:
  - Instantáneo
  - Tiempo definido
  - Tiempo Inverso



# Relés de Sobre corriente Instantáneo

- Opera instantáneamente cuando la corriente de operación alcanza el valor ajustado.
- El ajuste es seleccionado de manera que en la subestación mas alejada de la fuente, la corriente de operación del rele es menor, y a medida que nos acercamos a la fuente aumenta la corriente de operación.
- Tiene baja selectividad en valores alto de corriente.
- Tiene dificultad en distinguir entre la corriente de falla entre dos puntos cuando la impedancia entre estos dos puntos es pequeña.



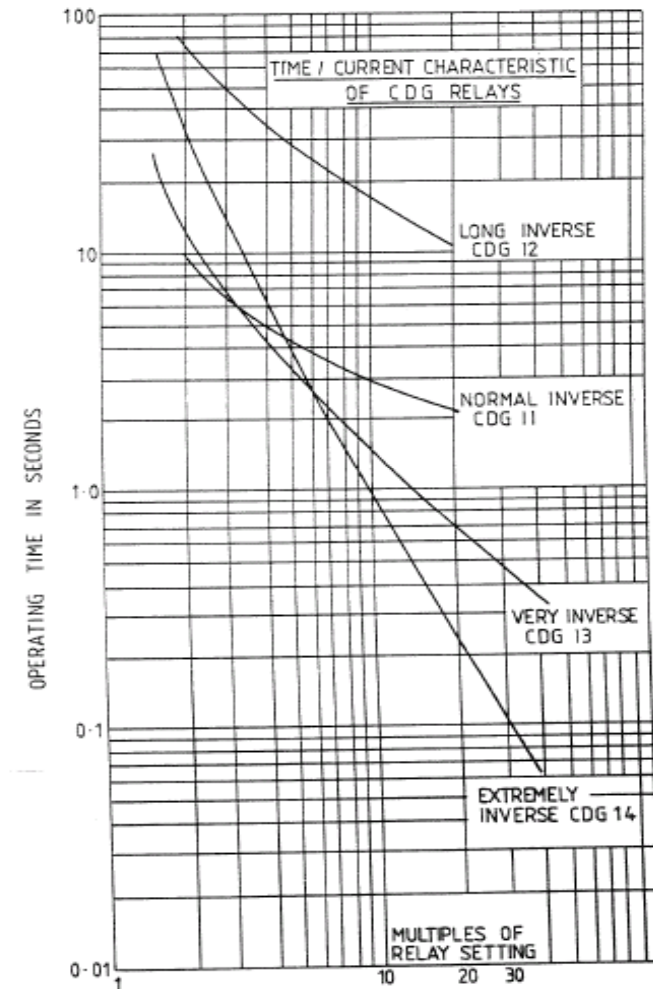
**Sistema Radial con Discriminacion Por Corriente**

# Relés de Tiempo definido

- En este método, damos un intervalo de tiempo de coordinación apropiado para cada relé controlando un interruptor, de forma a asegurar que el interruptor mas cercano a la falla abra primero.
- La operación del elemento de sobre corriente, únicamente inicializa el elemento de retardo de tiempo.

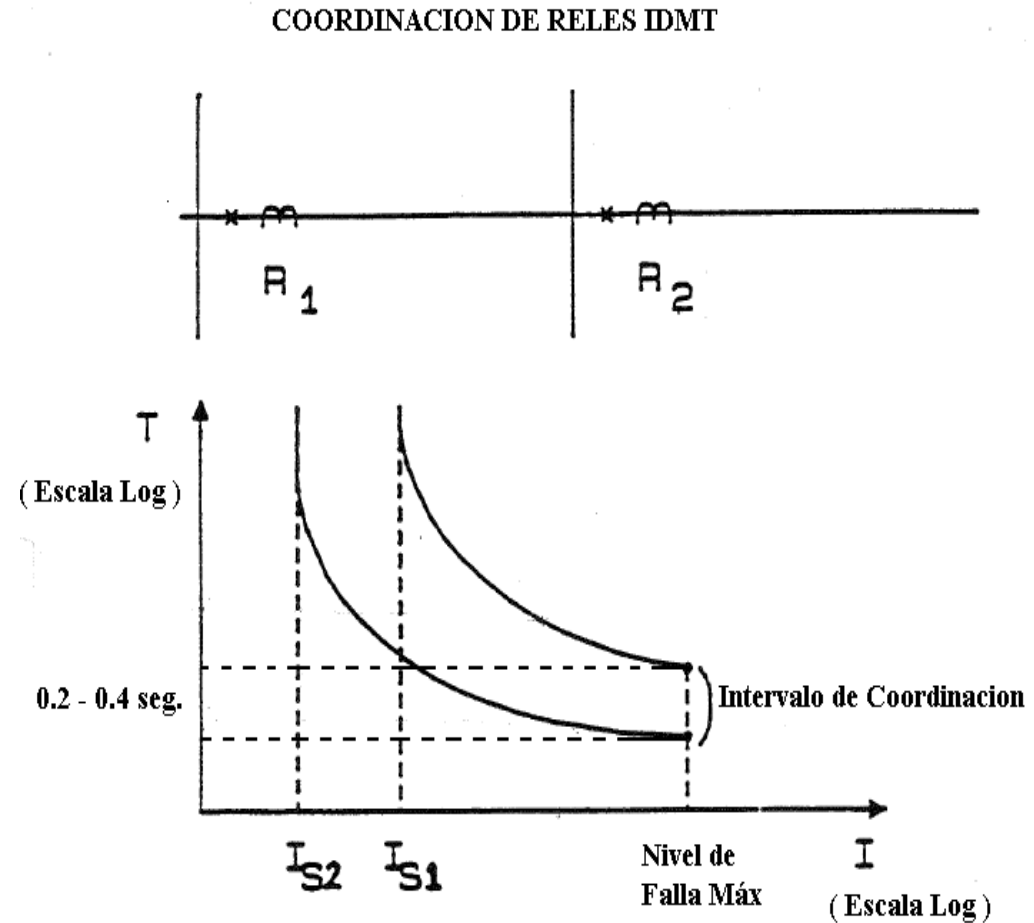
# Relés de Tiempo Inverso

- Con esta característica el tiempo de operación es inversamente proporcional a la corriente de falla y la característica actual es una función de ambos ajustes: tiempo y corriente.



# Margen de Coordinación

- El intervalo de tiempo entre la operación de dos relevadores adyacentes depende de un número de factores:
  - Tiempo de interrupción de la corriente de falla por el interruptor.
  - Tiempo de sobre carrera del relevador.
  - Errores.
  - Margen de seguridad.



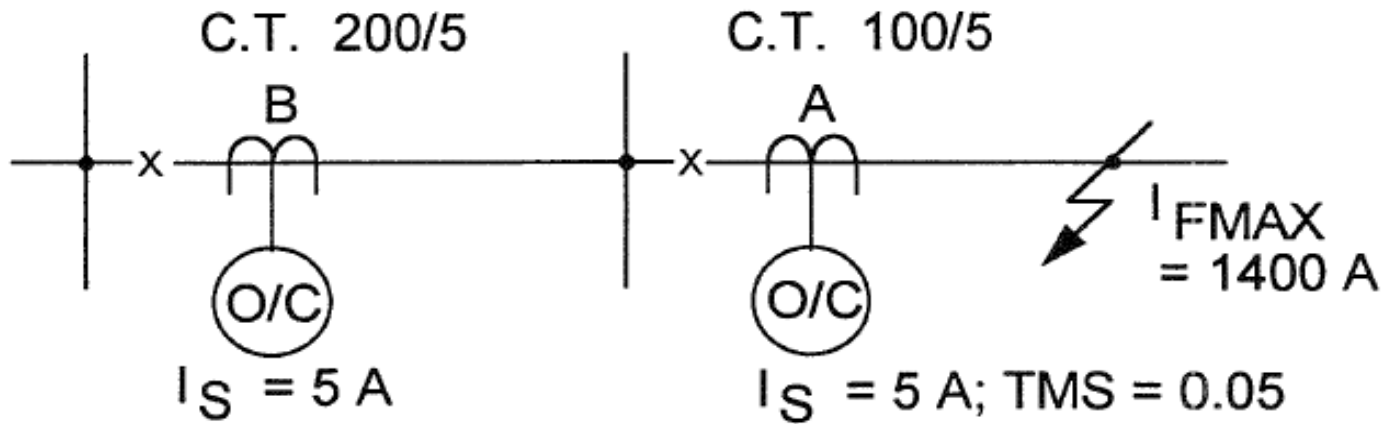
# Ajuste del Multiplicador de Tiempo

**INTERVALO DE  
COORDINACION :**

$$\begin{array}{l} \text{TIEMPO} \\ \text{OPERACION} \\ \text{REQUERIDO} \end{array} = \text{TMS} \times \begin{array}{l} \text{TIEMPO DE} \\ \text{OPERACION} \\ \text{EN TMS} = 1 \end{array}$$

$$\text{TMS} = \frac{\text{Tiempo de Operacion Requerido}}{\text{Tiempo de Operacion en TMS} = 1}$$

# Ejemplo de Coordinación

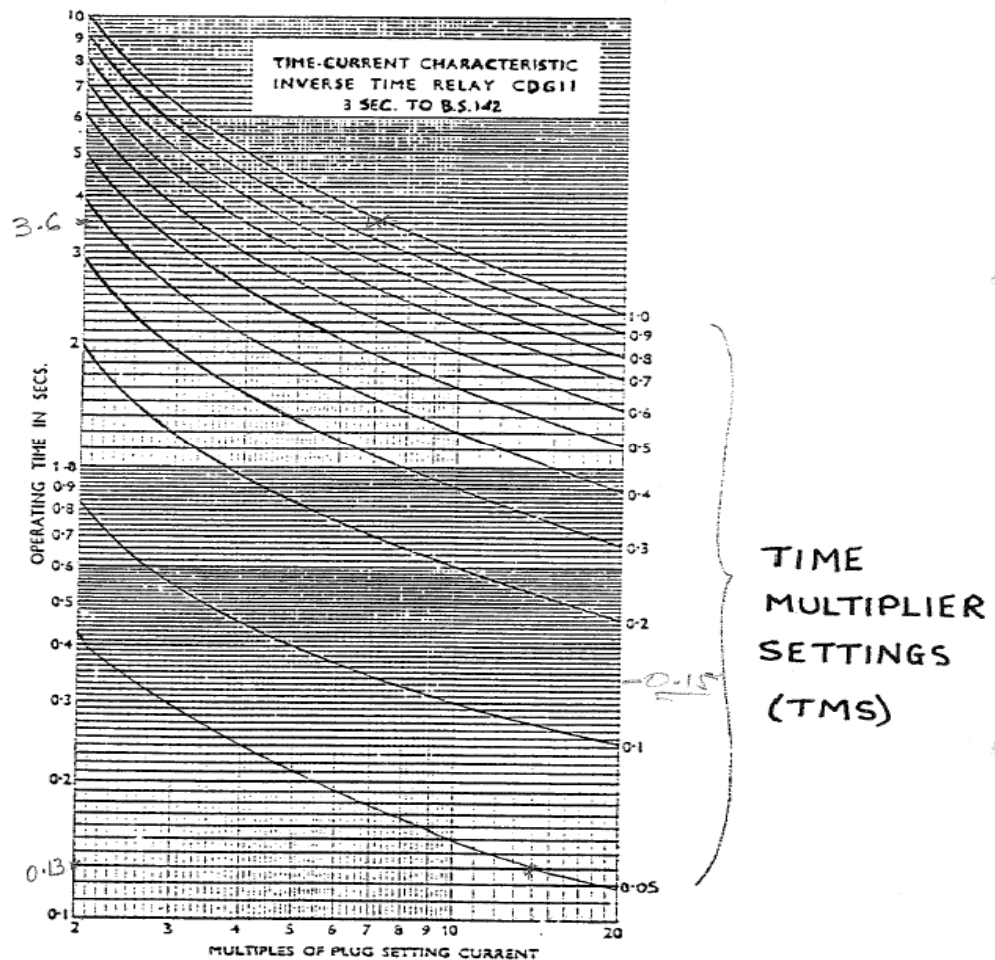


- Coordine B con A utilizando la corriente de falla máxima  $I_{F\text{MAX}}$ :
- Ambos relevadores tienen curva IDMT Normal (3/10).
- Relevador A:
  - Ajuste de corriente es 5 Amperios secundario o 100 Amperios primarios.
  - $I_{F\text{MAX}} = 1400 = 14$  veces el TAP.
  - Tiempo de operación en 14 veces el Tap, con TMS igual a 0.05 es 0.13 segundos.

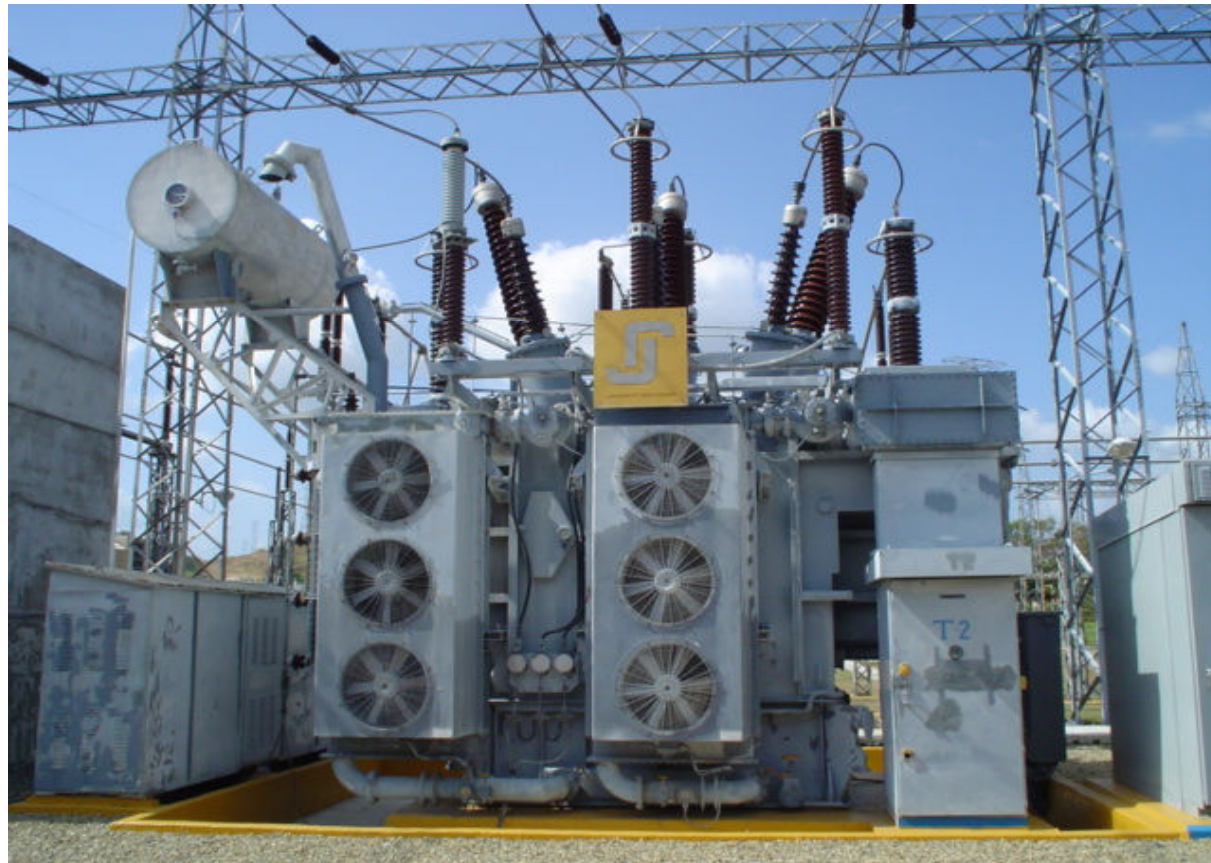


# Ejemplo de Coordinación

- Relevador B:
  - Ajuste de corriente es 5 Amperios secundario o 200 Amperios primarios.
  - $IFMAX = 1400 = 7$  veces el TAP.
  - Tiempo de operación en 7 veces el Tap, con TMS igual a 1.0 es 3.6 segundos.
  - Tiempo de operación requerido =  $0.13 + 0.4 = 0.53$
  - TMS requerido es  $0.53 / 3.6 = 0.147$



# PROTECCION DE TRANSFORMADOR



# Propósitos del Transformador En SEP

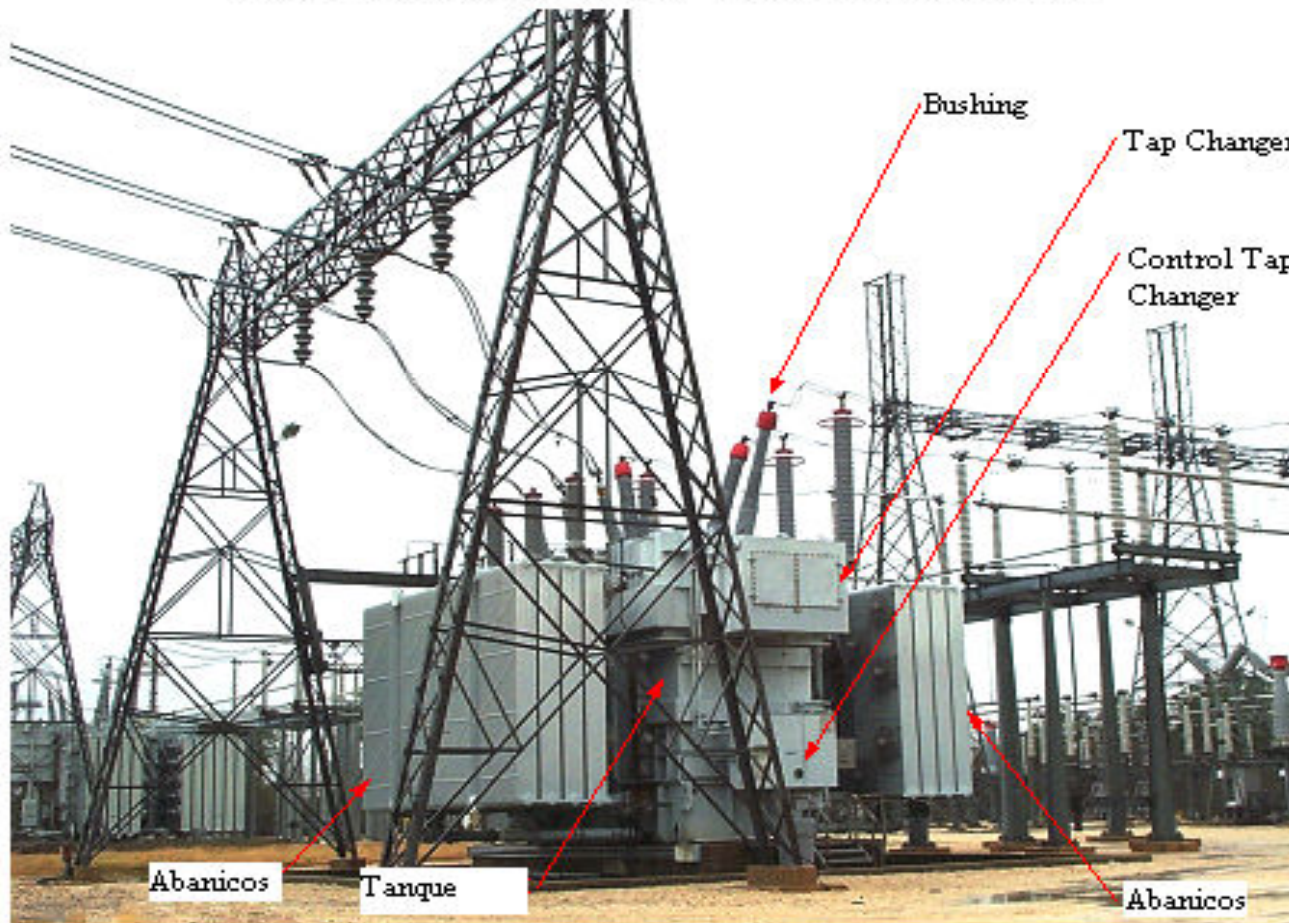
- Transferir energía de un circuito a otro por medio de acoplamiento magnético.
- Transformar Niveles de Voltajes:
  - Reducir perdidas de transmisión.
- Usado como filtro de armónicos:
  - Delta absorbe (Tercera, novena, décimo quinta, etc.)

# Clasificación Por Capacidad

- Pequeño            500 a 10,000 kVA
  - Medio            10,000 kVA a 100 MVA
  - Grande            100 MVA y Mayor
- 
- Menor que 500 kVA no es considerado un transformador de Potencia.

# Componentes del Transformador

## Transformador de Potencia





# Porque Fallan Los Transformadores

- Los devanados eléctricos y el núcleo magnético están sujetos a un número de fuerzas durante la operación:
  - Expansión y contracción debido al ciclo térmico.
  - Vibración.
  - Excesivo calentamiento debido a sobrecarga y falla en el sistema de enfriamiento.
  - Impacto de fuerzas por corrientes a través del transformador.

# Tipos de Fallas en los Componentes

| FALLAS EN EL DEVANADO                             | FALLAS EN EL BLOQUE TERMINAL       |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|
| Falla de Aislamiento entre Espiras                | Perdida de Conexion                |
| Sobre voltaje debido a Descargas, Maniobras, etc. | Conductor abierto                  |
| Humedad                                           | Puentes de conexion                |
| Fallas Externas (producen falla de Aislamiento)   | Humedad                            |
| Sobre Temperatura                                 | Aislamiento insuficiente           |
| Devanado Abierto                                  | Guia de Carbon                     |
| Deterioro por envejecimiento                      | Corto Circuito                     |
| Improper blocking of turns                        |                                    |
| Tierra                                            | FALLAS EN EL NUCLEO                |
| Fallas de fase a Fase                             | Falla en el aislamiento del nucleo |
| Fallas Mecanicas                                  | Grapa de Tierra                    |
|                                                   | Corto Circuito en Laminas          |
|                                                   | Loose clamps, bolts, wedges        |

# Tipos de Fallas en los Componentes

| FALLAS EN EL CAMBIADOR DE DERIVACIONES | FALLAS MISCELANEAS               |
|----------------------------------------|----------------------------------|
| Mecanica                               | Falla en los CT de bushing       |
| Electrica                              | Particulas de Metal en el aceite |
| Falla de Contactos                     | Daño por transporte              |
| Conductor abierto                      | Fallas Externas                  |
| Guia de Carbon                         | Bushing flange grounding         |
| Sobre temperatura                      | Soldadura del Tanque debil       |
| Corto Circuito                         | Fallas en el sistema Auxiliar    |
| Fuga de Aceite                         | Sobre Voltaje                    |
| Falla Externa                          | Sobre Carga                      |
|                                        | Problemas no Identificados       |
| FALLA EN LOS BUSHING                   |                                  |
| Contaminacion                          |                                  |
| Arco Ocasionado por Animales           |                                  |
| Arco Ocasionado por Sobre tensiones    |                                  |
| Humedad                                |                                  |
| Bajo nivel de Aceite                   |                                  |



# Estadística de Fallas

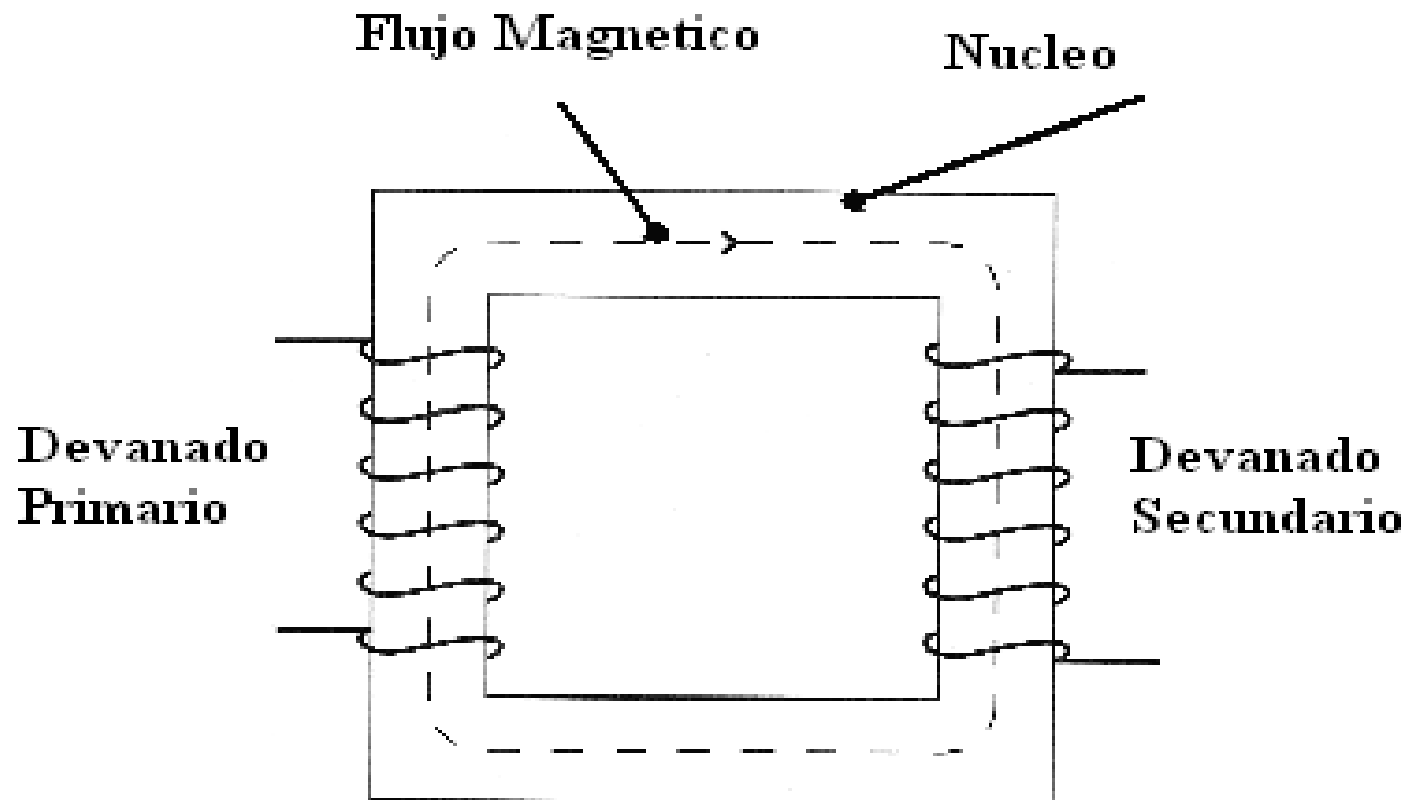
|                            | 1955 - 1965 |             | 1975 - 1982 |             |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                            | Número      | % del Total | Número      | % del Total |
| 1. Devanados               | 134         | 51          | 615         | 51          |
| 2. Cambiador de Derivacion | 49          | 19          | 231         | 19          |
| 3. Pasa Muros              | 41          | 15          | 114         | 9           |
| 4. Bornera Terminal        | 19          | 7           | 71          | 6           |
| 5. Nucleos                 | 7           | 3           | 24          | 2           |
| 6. Misceláneas             | 12          | 5           | 72          | 13          |
|                            | 262         | 100         | 1217        | 100         |

**Fuente:ANSI/IEEE C37.91-1985**

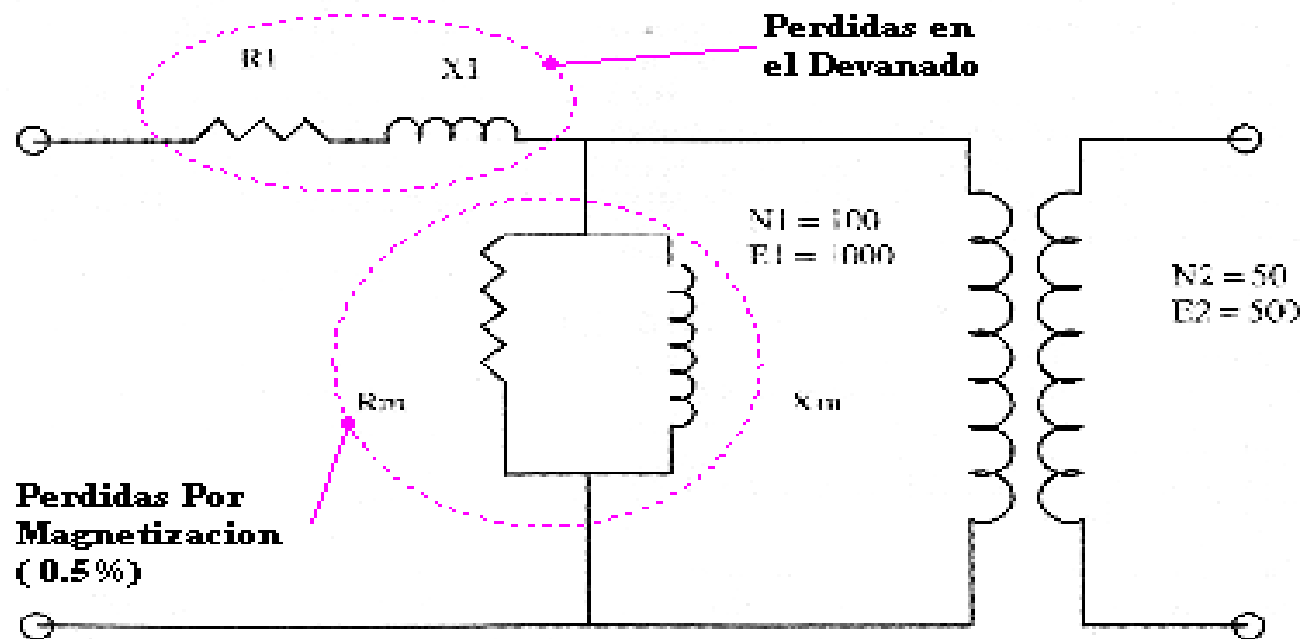
# Filosofía y Aspectos Económicos

- La protección de Transformadores debe ser de alta velocidad y alta sensibilidad para:
  - Reducir los daños al equipo y los costos de reparación.
  - Detectar corrientes bajas en las fallas internas de los transformadores

# Diseño Básico

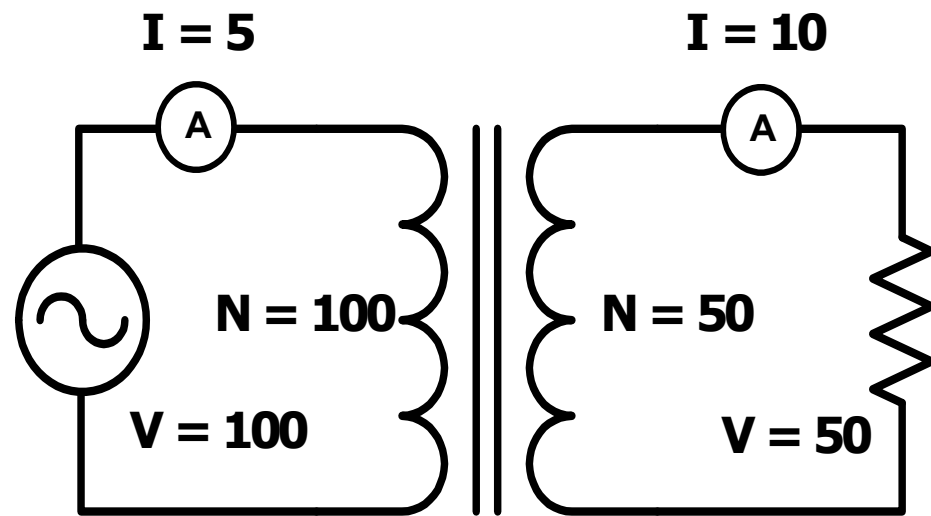


# Circuito Equivalente



# Formulas para el Transformador

- $V_1 I_1 = V_2 I_2$
- $N_1 V_2 = N_2 V_1$
- $N_2 I_1 = N_1 I_2$



# Tipo de Enfriamiento

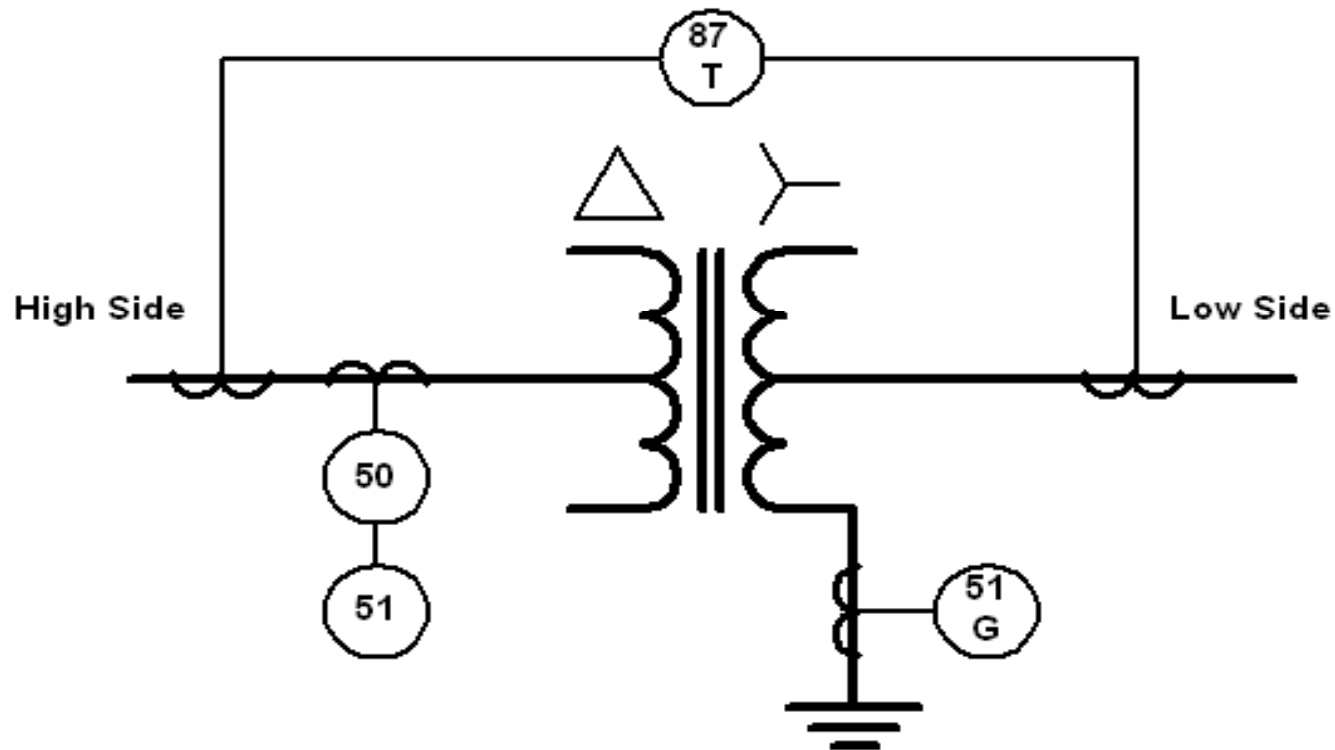
|          |                                      | Code Letter | Description                                                                  |
|----------|--------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Internal | First letter<br>(Cooling medium)     | O           | Liquid with flash point less than or equal to 300°C                          |
|          |                                      | K           | Liquid with flash point greater than 300°C                                   |
|          |                                      | L           | Liquid with no measurable flash point                                        |
|          | Second letter<br>(Cooling mechanism) | N           | Natural convection through cooling equipment and windings                    |
|          |                                      | F           | Forced circulation through cooling equipment, natural convection in windings |
|          |                                      | D           | Forced circulation through cooling equipment, directed flow in main windings |
| External | Third letter<br>(Cooling medium)     | A           | Air                                                                          |
|          |                                      | W           | Water                                                                        |
|          | Fourth letter<br>(Cooling medium)    | N           | Natural convection                                                           |
|          |                                      | F           | Forced circulation                                                           |

- OAF: Inmerso en liquido con punto de inflamación menor o igual a 300°C, enfriamiento por Aire, circulación forzada.

# Arreglos de los Devanados

- **Y-Y:**
  - Conduce la secuencia cero entre circuitos
  - Proporciona fuente de tierra al circuito secundario
- **D-D:**
  - Bloquea la secuencia cero entre circuitos
  - No proporciona fuente de tierra
- **D-Y:**
  - Bloquea la secuencia cero entre circuito
  - Proporciona fuente de tierra al circuito secundario
- **Y-D:**
  - Bloquea la secuencia cero entre circuitos
  - No proporciona fuente a tierra al circuito secundario

# Protección de Transformadores





# Elementos de Protección de Transformadores

- **24:** Overexcitation (V/Hz)
- **46:** Negative Sequence Overcurrent
- **49:** Thermal Overload
- **50:** Instantaneous Phase Overcurrent
- **50G:** Instantaneous Ground Overcurrent
- **50N:** Instantaneous Residual Overcurrent
- **50BF:** Breaker Failure
- **51G:** Ground Inverse Time Overcurrent
- **51N:** Residual Inverse Time Overcurrent
- **63:** Sudden Pressure Relay (Buccholtz Relay)
- **81U:** Underfrequency
- **87H:** Unrestrained Phase Differential
- **87T:** Transformer Phase Differential with Restraints
- **87GD:** Ground Differential (also known as "restricted earth fault")

# Protección Eléctrica

- Corto Circuito Interno:
  - Fallas de Fases: 87T, 87H
  - Fallas de Tierra: 87T, 87H, 87DG
- Corto Circuitos en el Sistema
  - Fallas de Fases: 50/51, 50N/51N, 46
  - Falles de Tierra: 50/51, 50N/51N, 46

# Protección Eléctrica

- Condiciones Anormales:
  - Circuito Abierto: 46
  - Sobre excitación: 24
  - Frecuencia Anormal: 81
  - Voltaje Anormal: 27, 59
  - Falla de Interruptor: 50BF, 50NBF
  - Sobrecarga: 51

# Protección Mecánica

- Acumulación de Gases: relé Buchholz 63
  - Producto de arcos internos:
- Relevadores de Presión:
  - Arcos generados por ondas de presión en el aceite o gas
- Térmicos: Temperatura devanado, aceite.
  - Sobrecarga
  - Sobre excitación

# Protección Diferencial 87

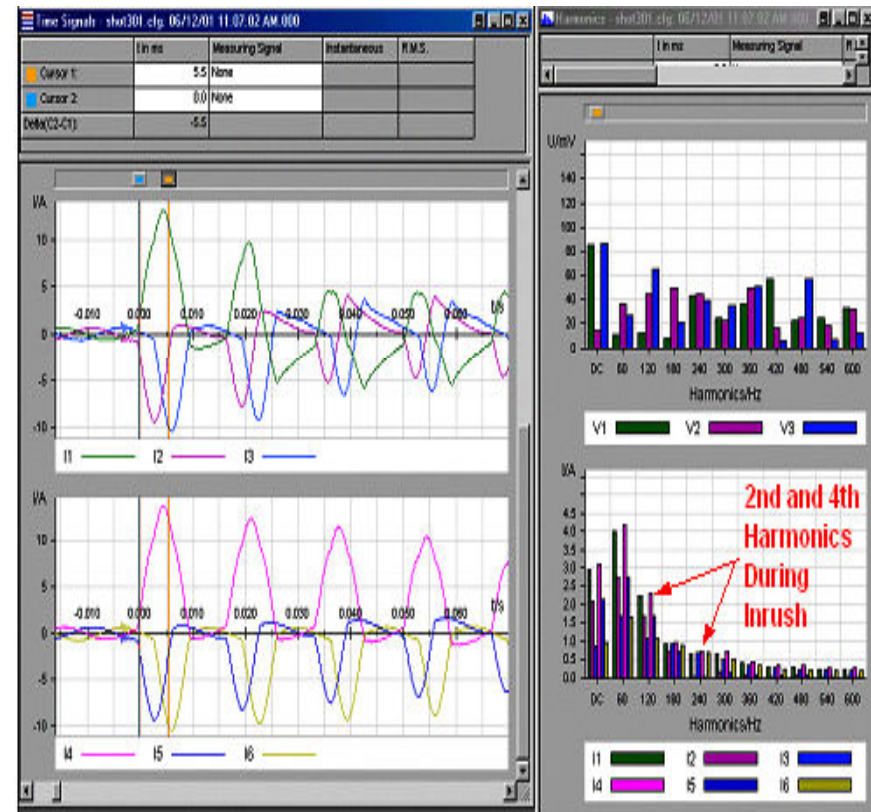
- Es aplicable a transformadores mayores a 10 MVA
- Proporciona la mejor protección para fallas entre fases y fase a tierra.
- Compara las corrientes fluyendo dentro y fuera de la zona de protección.
- Debe operar rápidamente cuando la corriente diferencial excede al ajuste del relevador.

# Factores que Afectan la Protección 87

- Cuando aplicamos la protección diferencial debemos tomar en cuenta los siguientes factores:
  - Corriente de Magnetización.
  - Relaciones y características diferentes de los CT.
  - Cambio de fase en la conexión del Banco.
  - Taps del transformador para control de voltajes.
  - Cambio de fase y/o taps de voltajes en la regulación de transformadores.

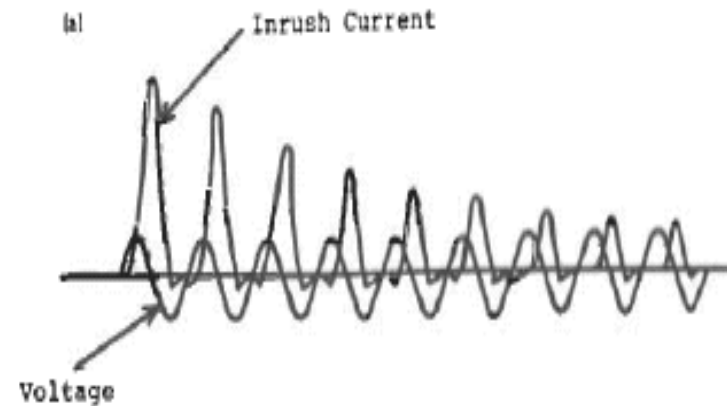
# Corriente de Magnetización

- El fenómeno de magnetización, Inrush, es una condición transitoria que ocurre cuando energizamos un transformador.
- No es una falla, por lo tanto la protección no debe operar.



# Factores Involucrados en el Inrush

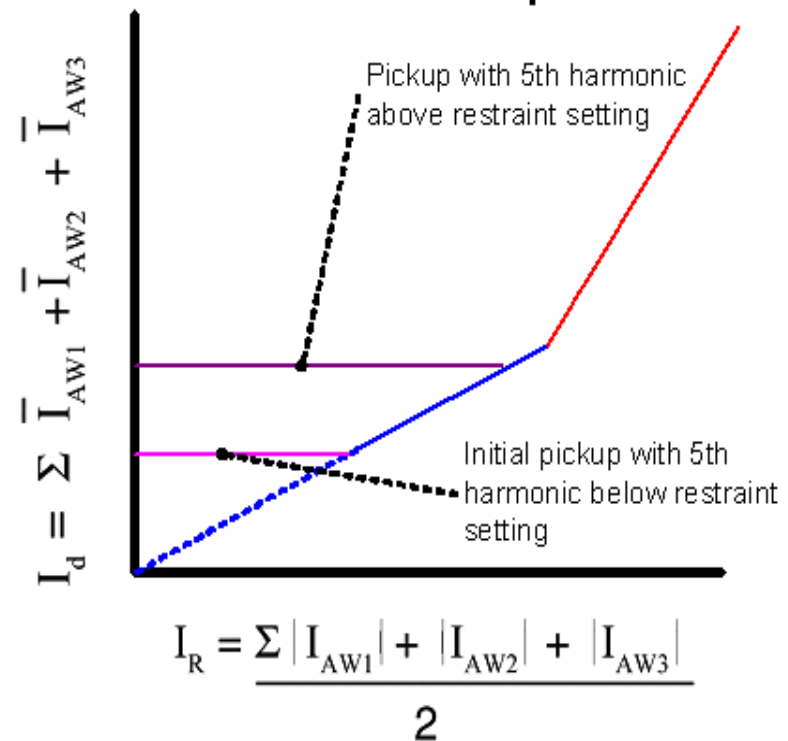
- Momento de la energización
- Tamaño del transformador
- Tamaño del sistema
- Tipo de acero del núcleo
- Relación L/R del transformador y del sistema.





# Características de Relé Diferencial

- Restricción de Harmónicos.
- Restricción Porcentual diferencial
- Restricción contra sobre flujo



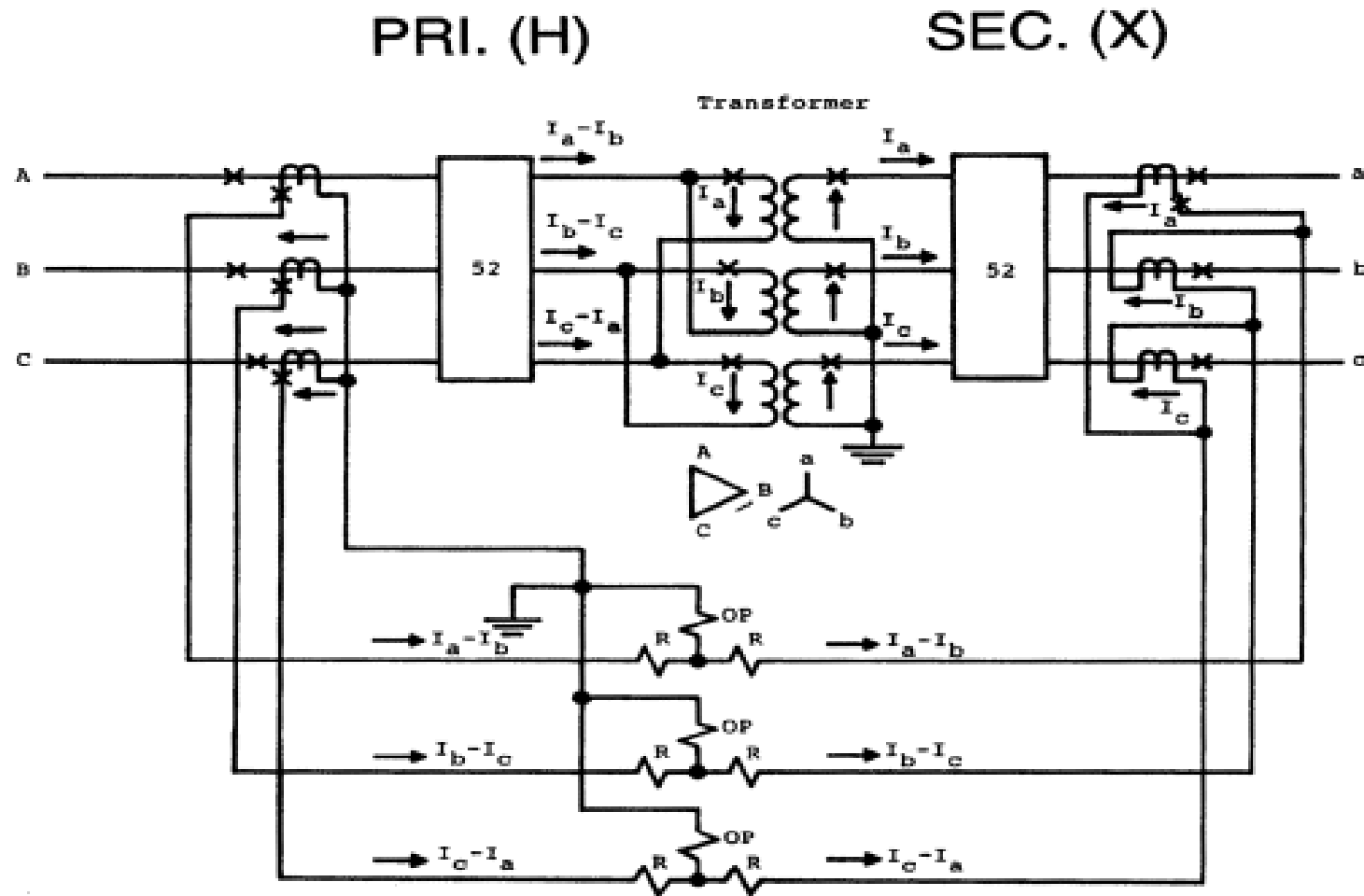
# Aplicación de Relé 87

- Se recomienda que el tap del CT en carga máxima de aproximadamente 5 amperios.
- Los CT deben ser conectados de manera a compensar el desfase angular del Banco y filtrar la secuencia cero del circuito diferencial.
- El relé debe ser conectado de manera que las corrientes entrando y saliendo del mismo estén en fase para una carga balanceada.
- Solo debe haber un punto de aterrizaje en el esquema diferencial.

# Aplicación de Relé 87

- Una vez seleccionado las relaciones de los CT y los Tap del relé, verificar los valores de corriente nominales de los devanados del relé.
- Verificar el porcentaje de error de corriente, de manera que los tap seleccionados tengan un margen de seguridad adecuado.

# Conexión de Relé 87



# Pasos para el ajuste de un Relé 87

- Examinar el desempeño de los CT
- Calcular los Tap de los devanados
- Determinar la corriente de pickup del 87T
  - Determinar el punto de quiebra de la pendiente
- Determinar el pickup del 87H
- Determinar el pickup del 87GD

# Desempeño del CT

- Determine la máxima corriente primaria de falla de fase y tierra.
- Calcule la corriente secundaria basado en el tipo de conexión y relación de los CT.
- Determine la carga presentada al circuito secundario del CT.
- Determine el voltaje secundario máximo producido de la carga y de la corriente secundaria.
- Verifique el voltaje máximo secundario con la capacidad del CT.

# Continuación

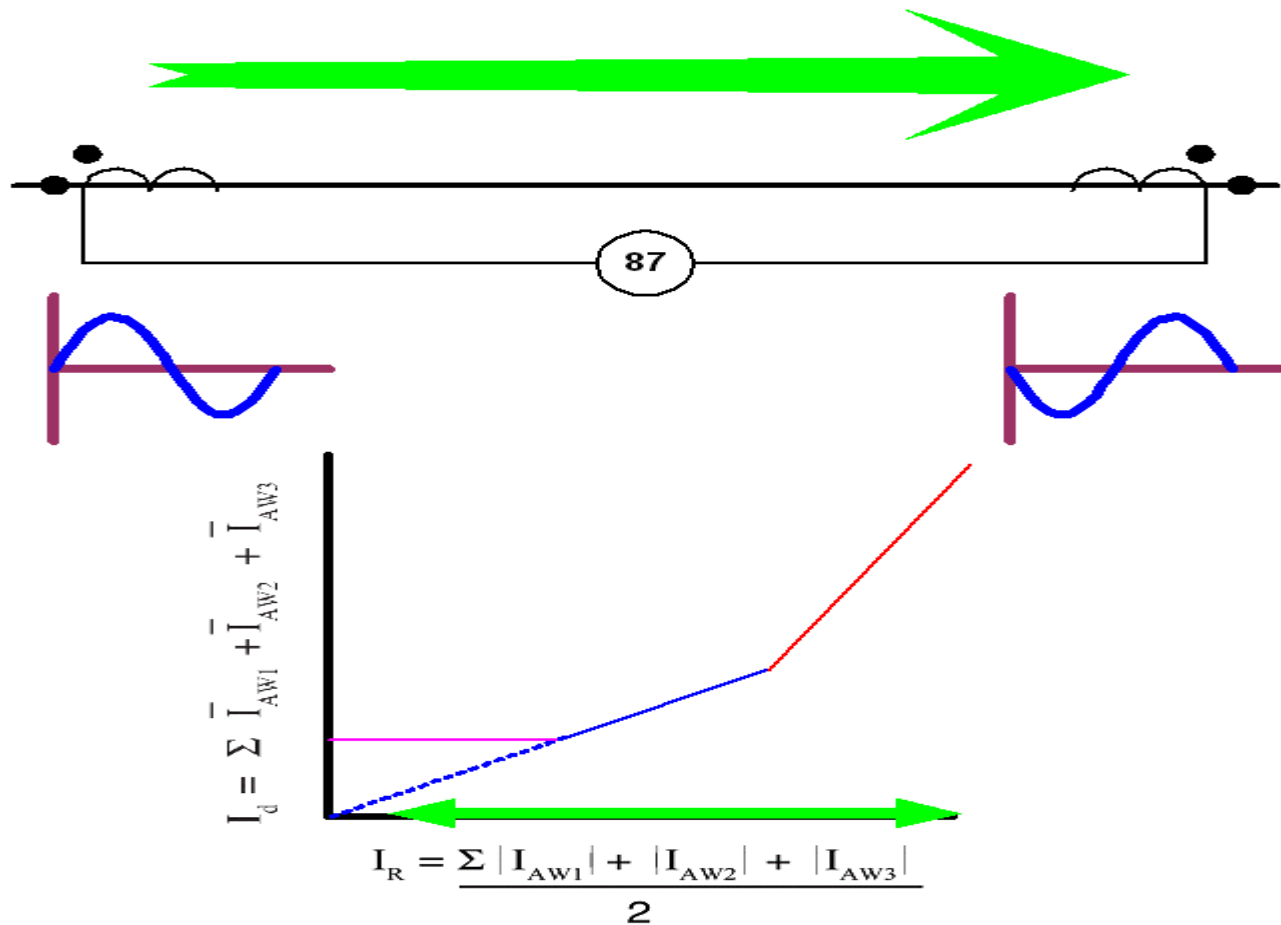
- CTS conectados en Y:
- CTS conectados en D:
- Determine todas las cargas en el circuito secundario.
  - Relés, medidores, instrumentación.
- Determine la carga de los conductores, el loop completo. Use tabla de valores AWG @ ohms/ft.

# Continuación

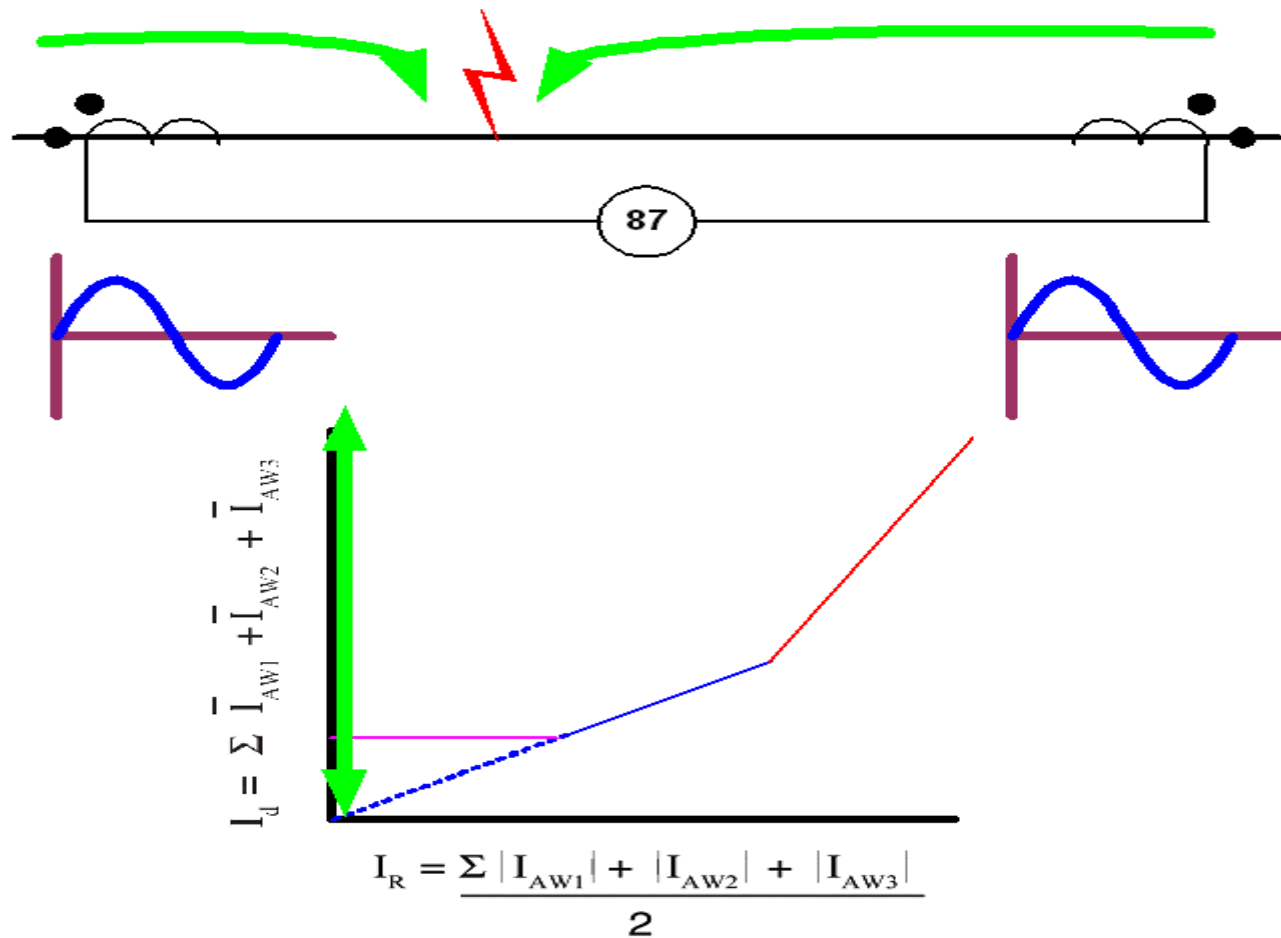
- Determine la impedancia del CT



# Fallas A Través Del Transformador



# Fallas Internas



# PROTECCION DE BARRA



## Protección Diferencial De Barra

- La protección de barra es importante debido a que una falla en una barra resulta en la pérdida de muchos circuitos.
- Requiere que todos los circuitos conectados a la barra estén involucrados.
- De forma que compare toda la corriente que entra a la zona con toda la corriente que sale de ella.

## Protección Diferencial De Barra

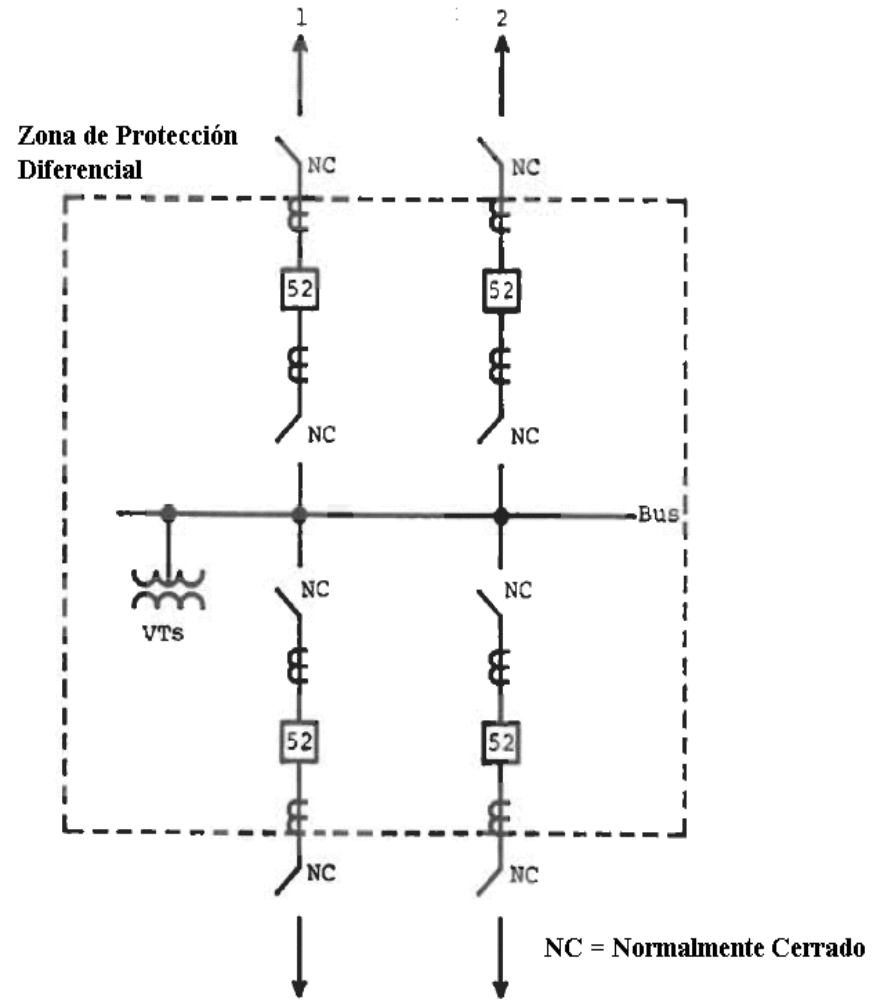
- Cuando tenemos entre 6-8 circuitos, la barra es dividida y unida a través de un interruptor de amarre.
- Un arreglo de barra es utilizado para minimizar el numero de circuito que debe ser abierto para una falla en la barra.
- Usualmente los interruptores asociados a la barra tienen cuchillas manuales en ambos lados. Las mismas son operadas sin carga.

## Arreglos de Barra Típicos

- Barra Sencilla - Interruptor Sencillo
- Barra sencilla conectada con Interruptor de amarre.
- Barra Principal y Barra de transferencia - Interruptor Sencillo.
- Doble Barra - Interruptor sencillo.
- Doble Barra - Doble Interruptor.
- Barra en Anillo.
- Interruptor y Medio.

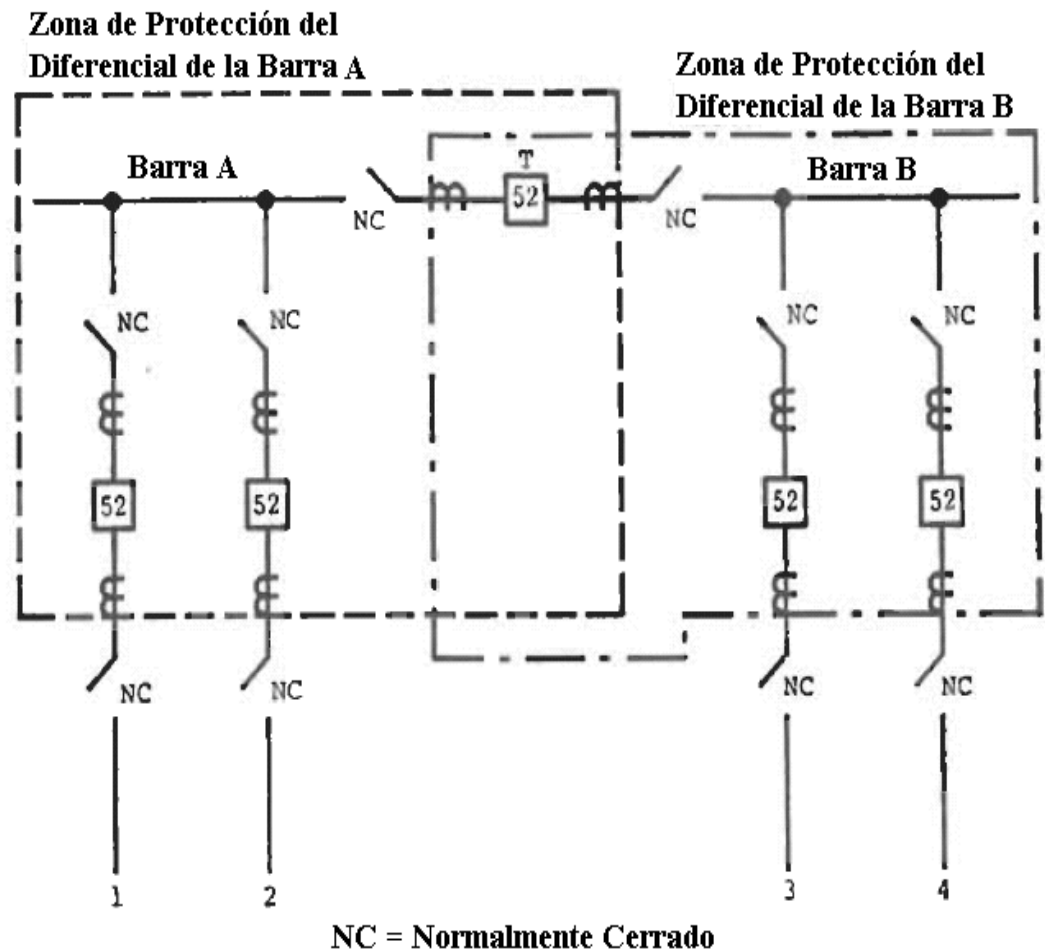
# Barra Sencilla- Interruptor Sencillo

- Es el diseño de barra más básico, simple, y económico.
- Es usado en sistemas de distribución y niveles de voltajes de transmisión bajo.
- No proporciona flexibilidad en la operación



# Barra Sencilla- Interruptor Amarre

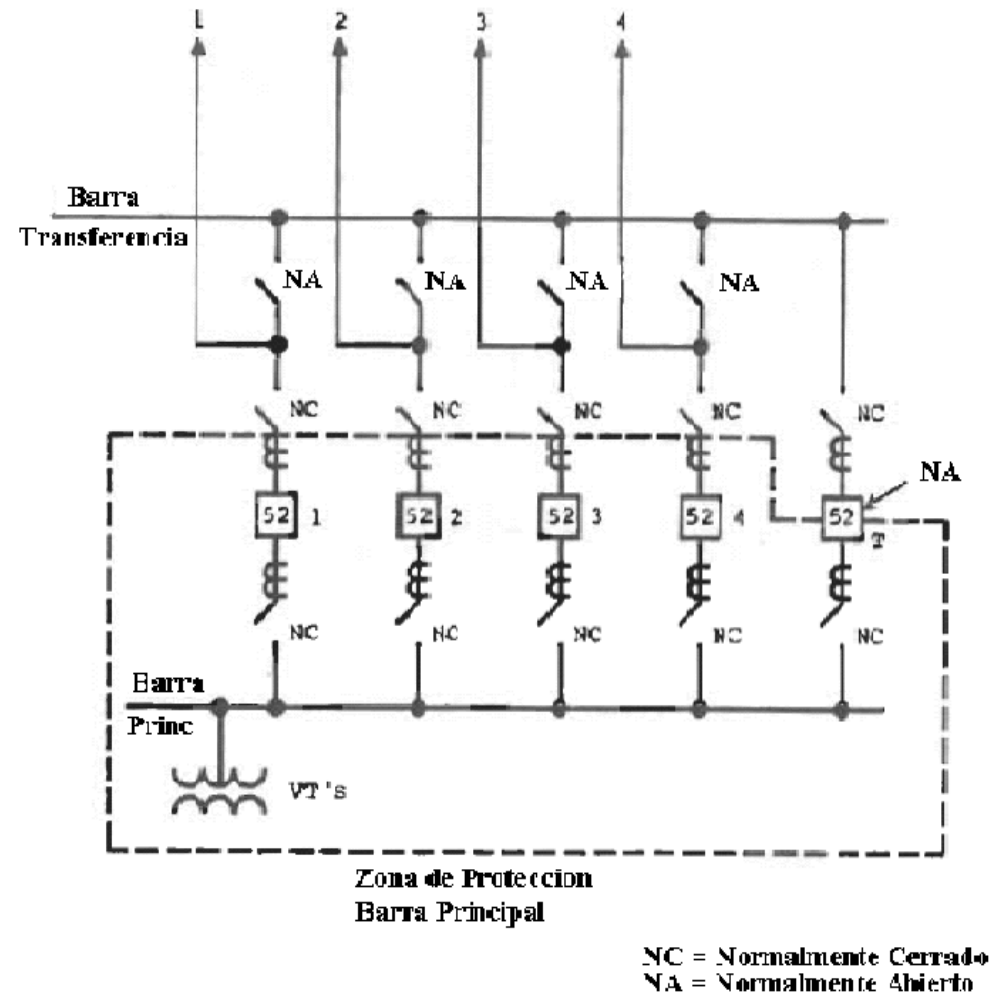
- Es una extensión de barra sencilla.
- Es usado en sistemas de distribución y subestaciones industriales
- Proporciona flexibilidad cuando la subestación es alimentada por dos fuentes.





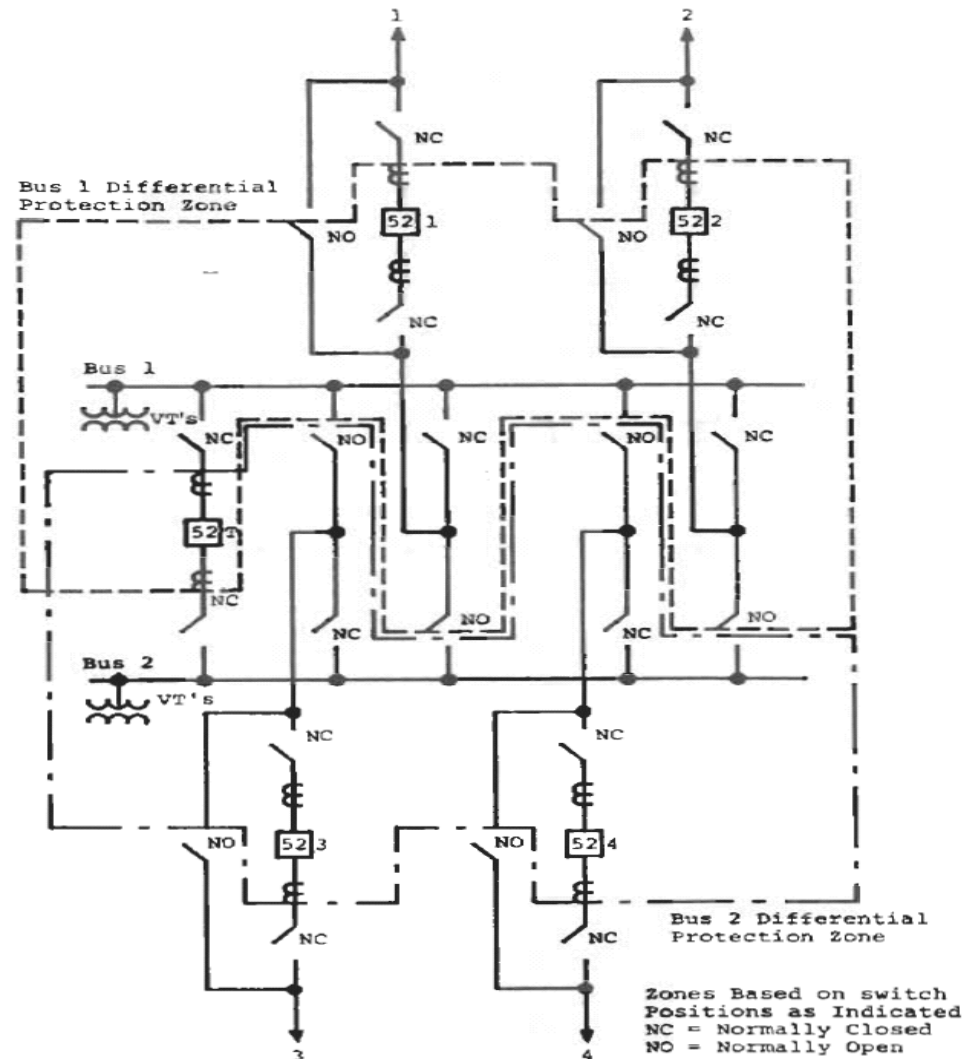
# Barra Principal – Barra de Transferencia

- Incrementa flexibilidad de operación.
- Todos los circuitos se alimentan de la barra principal.
- Normalmente la barra de transferencia no es energizada.
- Solo se puede conectar un circuito a la vez a la barra de transferencia.
- Las protecciones asociada al interruptor de amarre entre barra, debe ser adaptable.



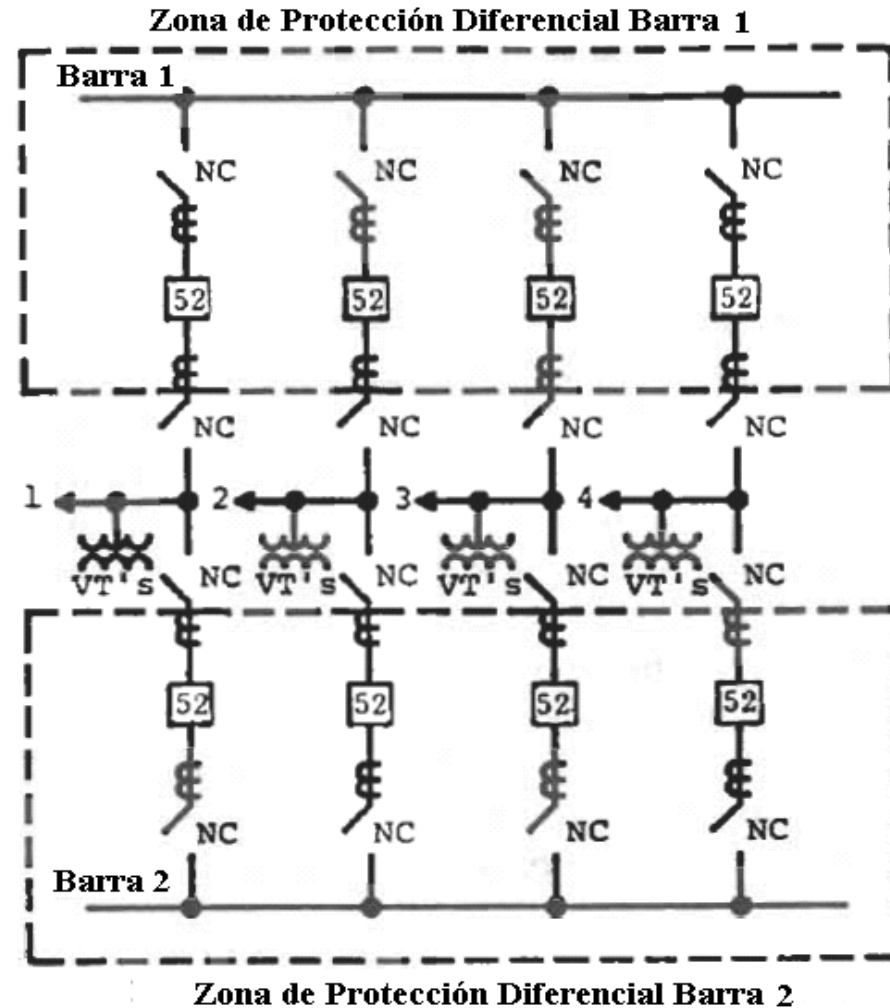
# Doble Barra – Interruptor Sencillo

- Alta flexibilidad para operación del sistema.
- Cualquier línea puede ser operada de cualquier barra.
- Las Barras pueden ser operadas juntas o independientemente.
- Requiere maniobra complicada de las protecciones.
- Las protecciones asociada al interruptor de amarre entre barra, debe ser adaptable.
- No es de gran uso, por complicaciones en protec.



# Doble Barra - Doble Interruptor

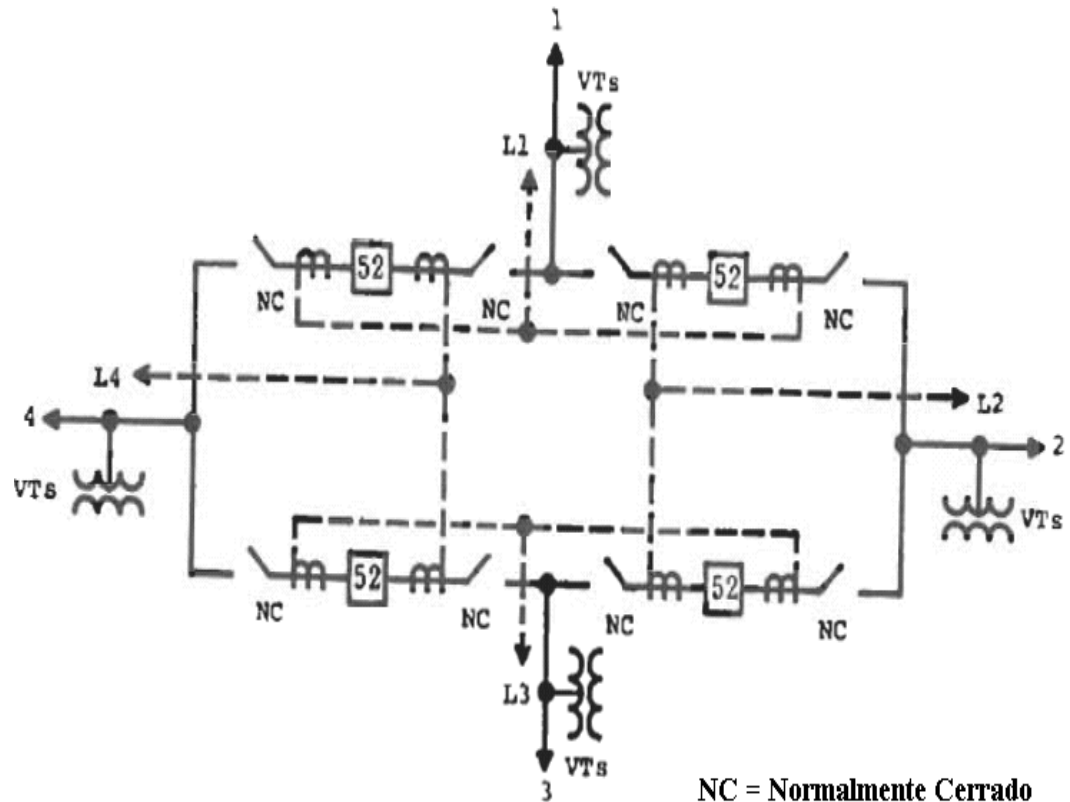
- Arreglo muy flexible, requiere dos interruptores por circuito.
- Cada barra es protegida por un diferencial separado.
- La protección de línea opera de TC'S paralelos, dispara ambos interruptores.
- Con todos los interruptores cerrados, una falla en cualquier barra no interrumpe el servicio en las líneas.



NC = Normalmente Cerrado

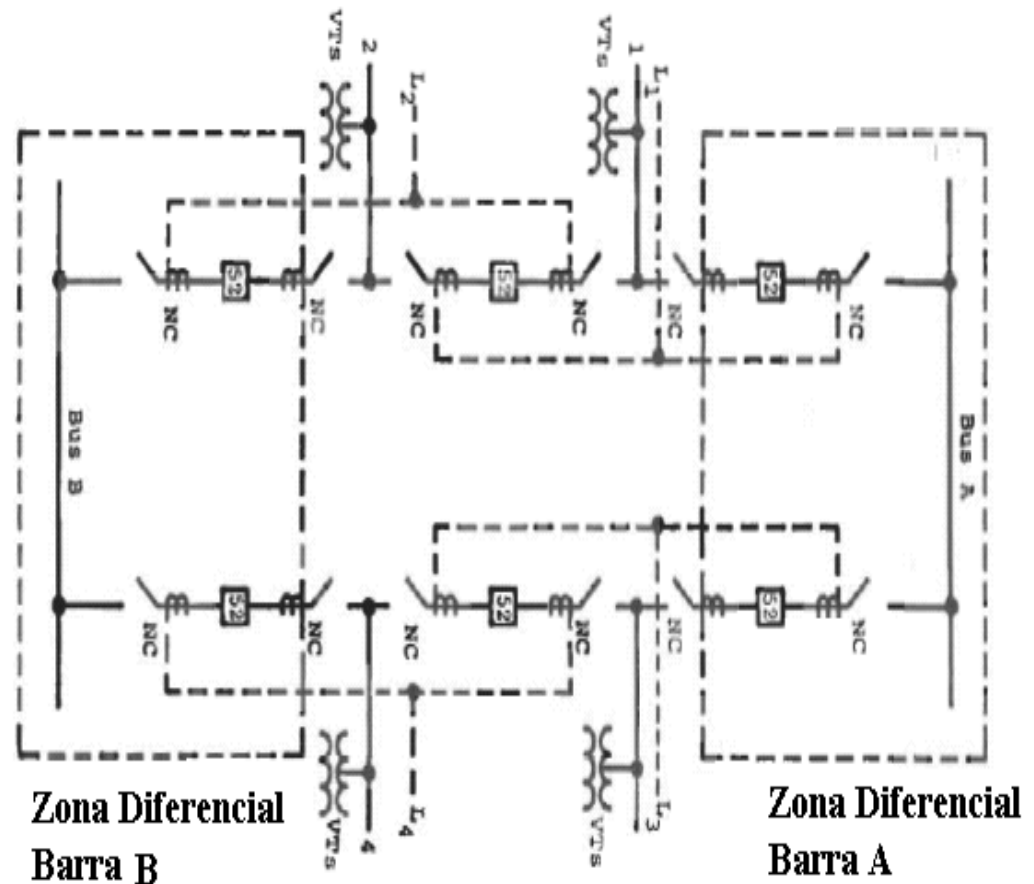
# Barra En Anillo

- Este arreglo ha resultado bastante común, particularmente en alto voltaje.
- Cada interruptor sirve a dos líneas.
- La sección de barra entre los interruptores resulta parte de la línea.
- No se aplica, o no se requiere protección de barra.



# Interruptor Y Medio

- Este arreglo proporciona mas flexibilidad que la barra en anillo, pero requiere más interruptores.
- También es muy común, en sistemas de alto voltaje con múltiples circuitos.
- Las barra de operación tiene diferenciales separados.
- El interruptor del medio sirve a ambas líneas.
- No se aplica, o no se requiere protección de barra.



# Información Para Aplicación de 87B

- Configuración de la Barra
- Corriente de fallas Máximas y Mínimas (Monofásica y trifásica).
- Requerimiento de velocidad de operación.
- Información de los transformadores de Corrientes.
  - Localización
  - Relación
  - Clase de precisión
  - Curva de saturación

# Practicas Comunes en la Protección 87B

- Usar TC'S dedicados.
- La longitud del cable de conexión debe ser la mínima posible.
- Usar la mayor relación de los TC'S.
- Para el arreglo de barra principal – barra de transferencia, no se usa 87 para la barra de transferencia.
- No se requiere 87, para un arreglo de barra en anillo.
- Arreglo especiales deben ser considerados si hay otros equipos involucrados.
- No hay arreglo sencillo para el 87, en doble barra-doble interruptor.

# Técnicas de Protección 87B

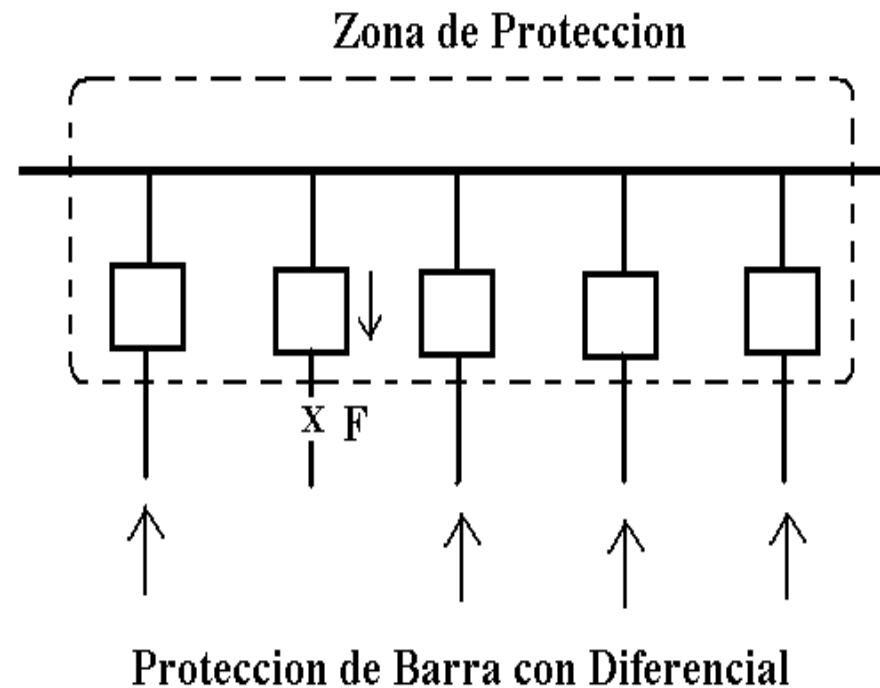
**Dos técnicas más usadas para evitar problemas por saturación de CT:**

- Diferencial de Corriente de restricción Múltiple
- Diferencial de Barra por Alta Impedancia



# Protección Diferencial

- Una preocupación es la saturación del CT.
- Para la falla externa **F** la corriente en el CT del alimentador fallado es la suma de todas las corrientes y el TC está en peligro de resultar saturado.
- Un TC saturado no produce corriente secundaria.
- El devanado secundario presenta un camino de baja impedancia a un circuito externo conectado en sus terminales.



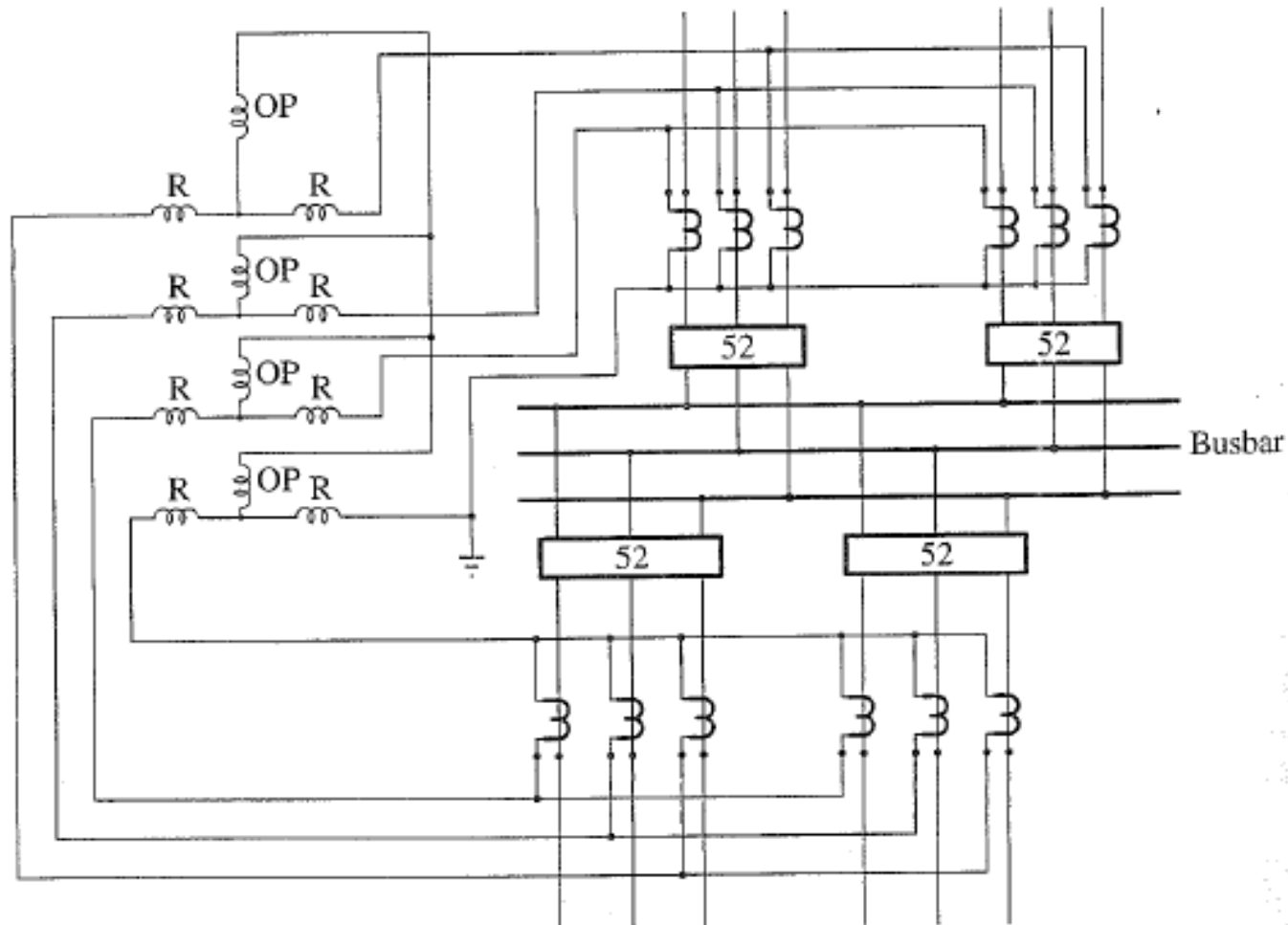
# Diferencial de Restricción Múltiple

- Es el método mas versátil, para aplicación general usando TC'S convencionales. Pero es mas difícil de aplicar. Debido a que los TC'S pueden saturarse y la corriente secundaria, puede no representar la corriente primaria.
- Son usados con un devanado de restricción conectado a cada circuito que es una fuente mayor de corriente de falla.
- Todos los TC'S son conectados en Y, excepto cuando tenemos un transformador.

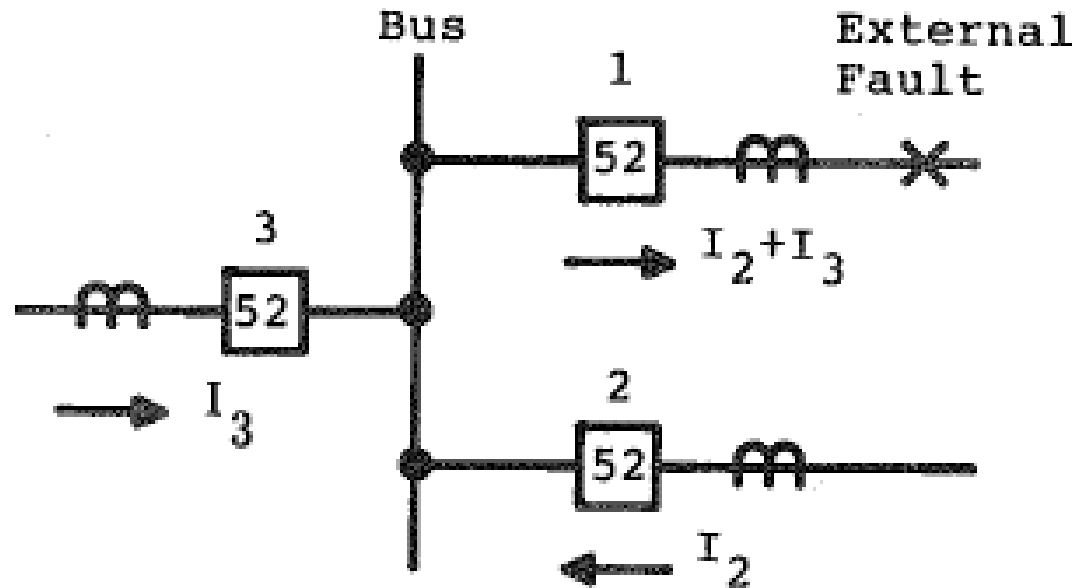
# Diferencial de Restricción Múltiple

- Es el método mas versátil, para aplicación general usando CT convencionales. Pero es mas difícil de aplicar.
- Son usados con un devanado de restricción conectado a cada circuito que es una fuente mayor de corriente de falla.
- Los alimentadores y circuitos con contribuciones de corriente de falla baja, pueden conectarse en paralelo
- Todos los TC'S son conectados en Y, excepto cuando tenemos un transformador.

# Conexión Diferencial de Restricción Múltiple

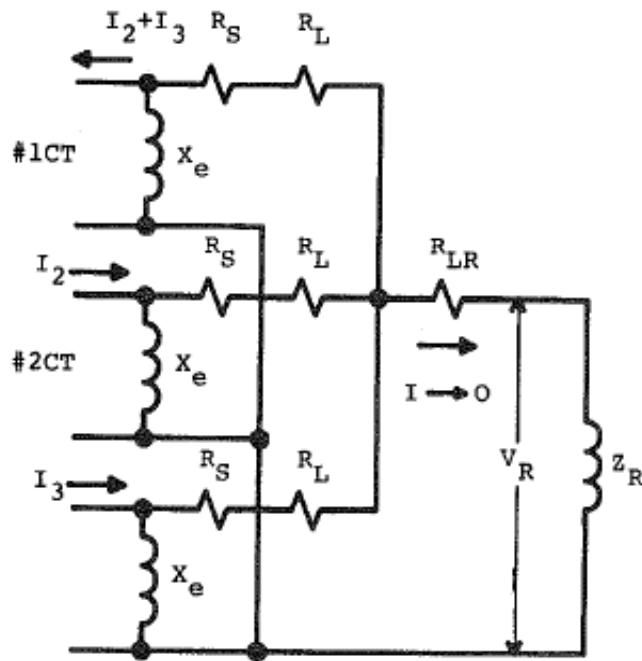


# Protección De Barra Alta Impedancia



***FALLAS EXTERNAS***

# Protección De Barra Alta Impedancia

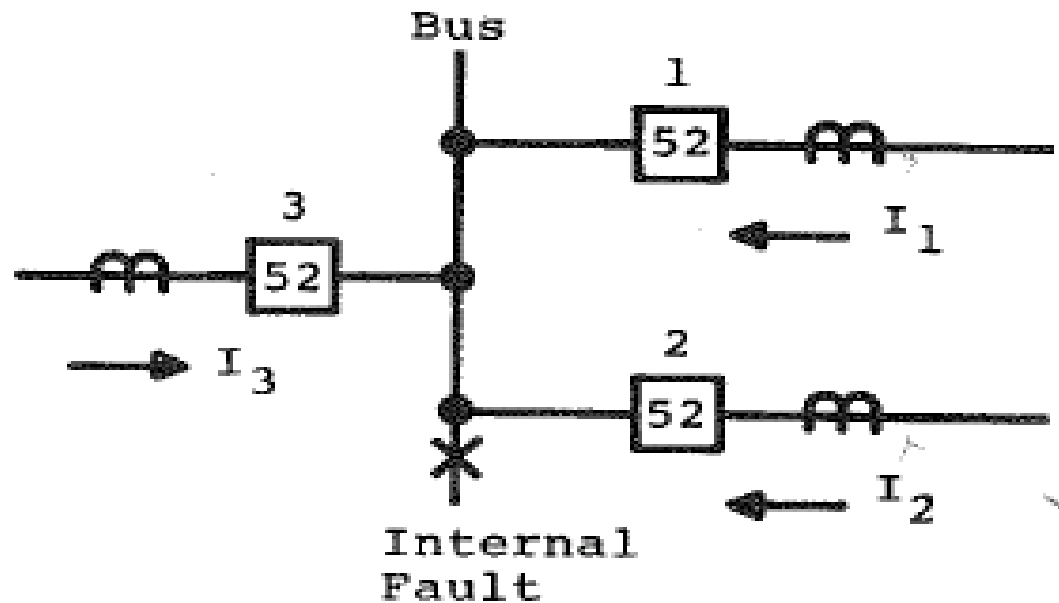


## ***FALLAS EXTERNAS***

Para fallas externas:

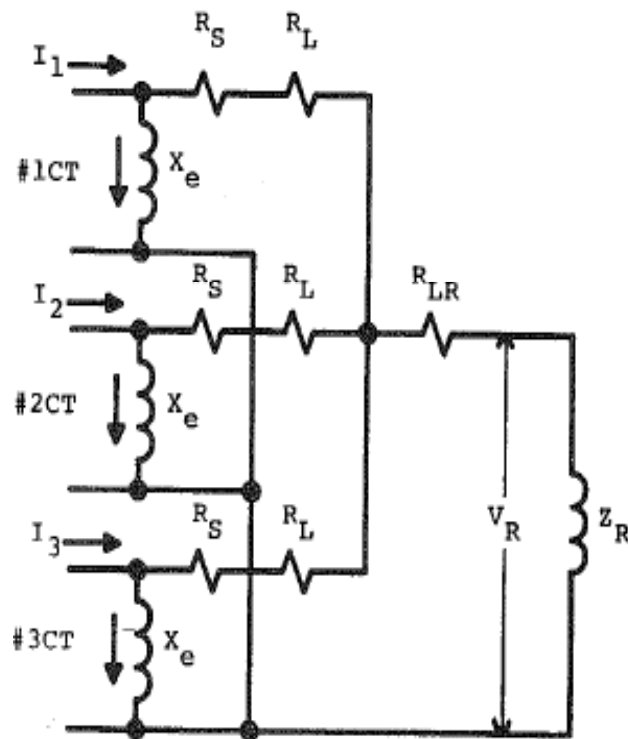
- La corriente a través del relé es casi cero.
- $V_R$  es bajo.
- Por lo tanto, debe estar por debajo del pickup para evitar disparos no deseados.

# Protección De Barra Alta Impedancia



## *FALLAS INTERNAS*

# Protección De Barra Alta Impedancia



Para fallas internas:

- Fluye una corriente a través del relé.
- $V_R$  es bien alto.

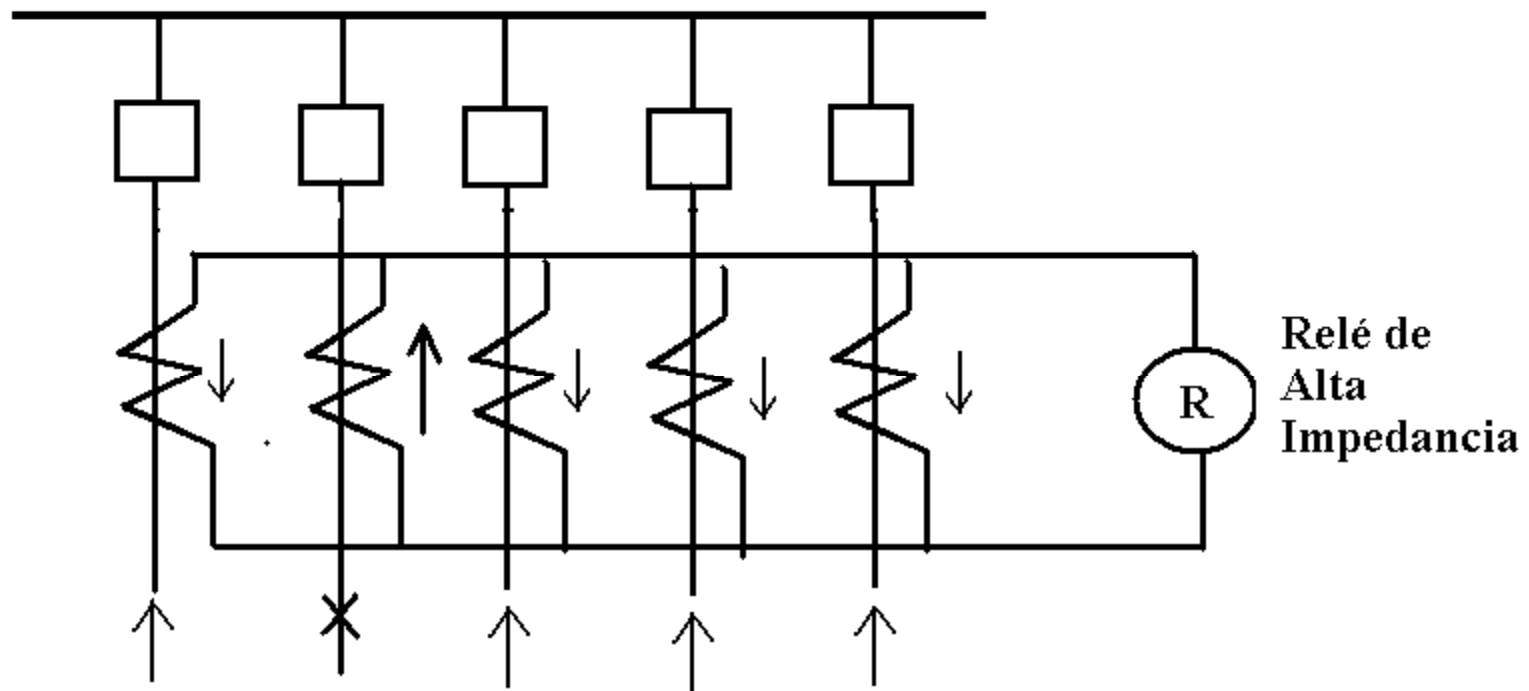
***FALLAS INTERNAS***



# Protección De Barra Alta Impedancia

- $Z_r$  es de muy alta impedancia.
- Para fallas externas, el voltaje  $V_R$  es mínimo.
- Para fallas internas, el voltaje  $V_R$  es alto debido a la alta impedancia.
- El ajuste del relé está en voltaje por lo que el pickup debe estar por debajo del  $V_R$  medido durante fallas externas.

# Conexión Diferencial de Alta Impedancia



**Proteccion de Barra con Diferencial**

# Hardware Diferencial SEL-587Z

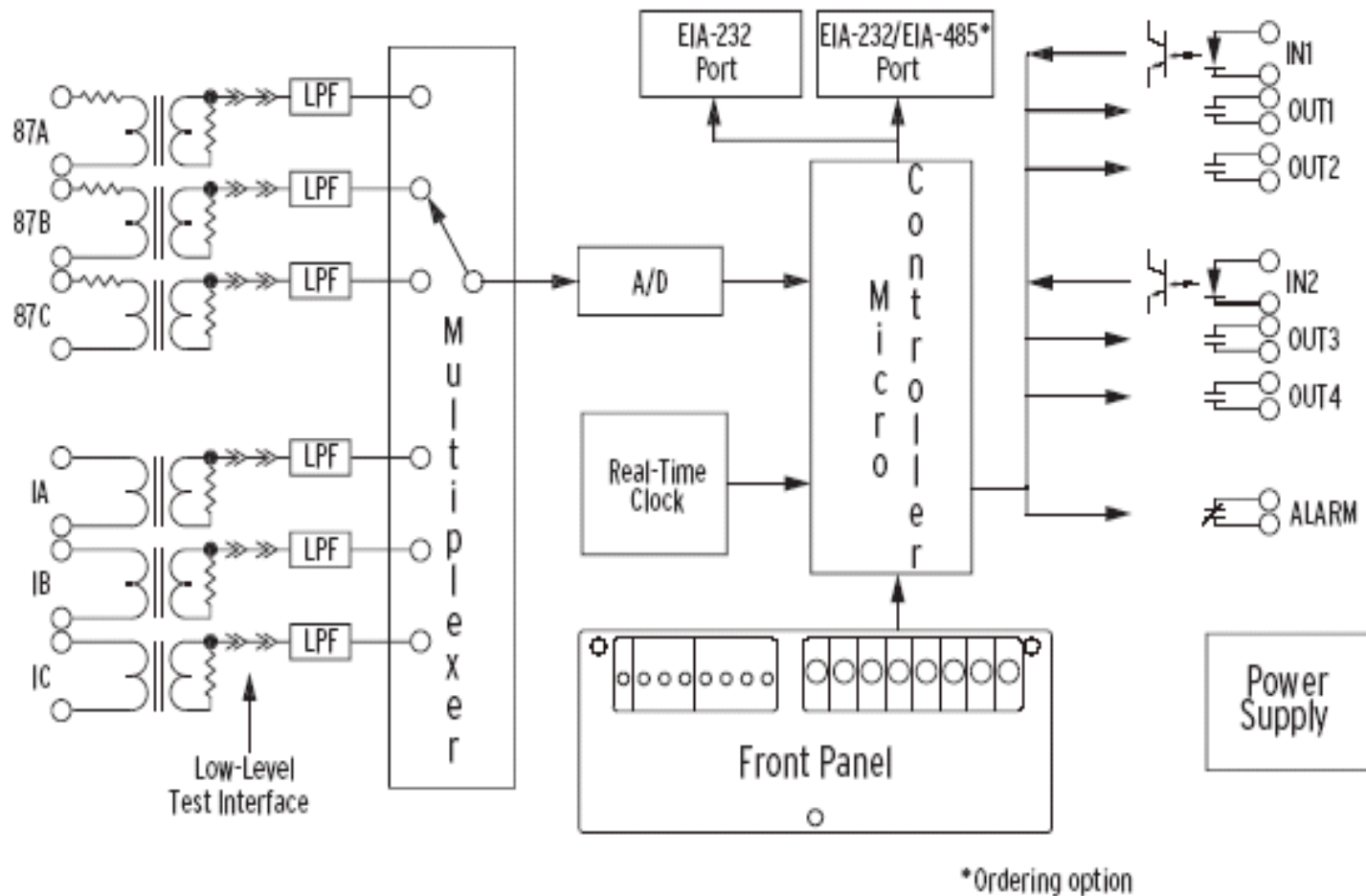


Figure 1.2 SEL-587Z Hardware Block Diagram

# Conexión Diferencial

## SEL-587Z Relay AC/DC Connection Diagrams

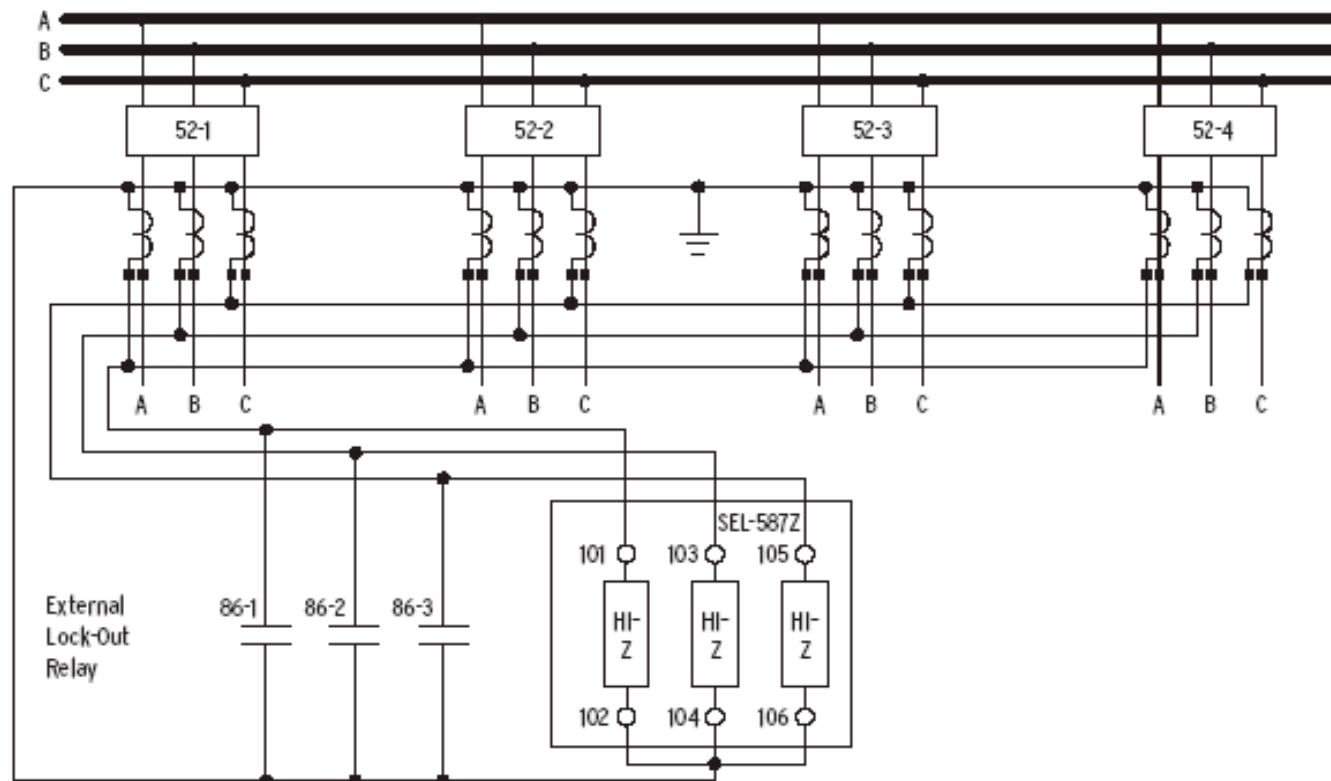
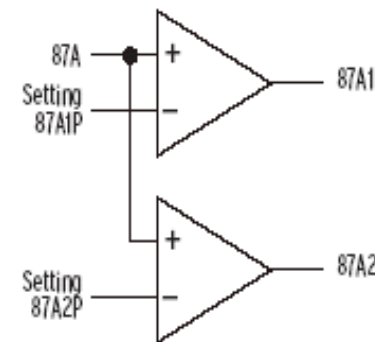
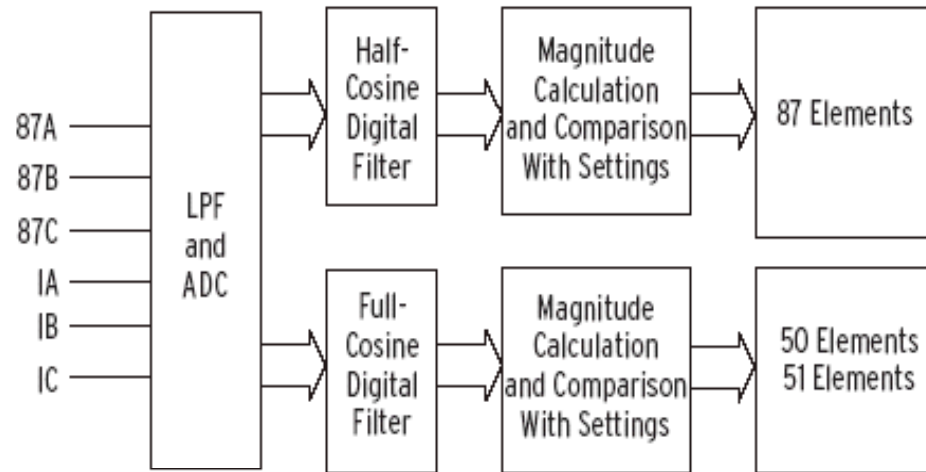


Figure 2.3 Example AC Connection for High-Impedance Bus Protection

# Método Comparación 587Z

- El elemento diferencial compara el voltaje medido con el ajuste del elemento diferencial.
- Como para el calculo se comparan dos valores, el elemento actúa como un comparador.
- Cuando el voltaje medido excede el ajuste, el relé activa un bit de palabra apropiado. Si este bit fue entrado en la ecuación de disparo y le fue asignada una salida, el contacto cierra disparando el Interruptor.



# Calculo de Ajuste

- Para el calculo de ajuste, equilibre dos consideraciones:
  - Valor bajo de ajuste para máxima sensibilidad, para fallas dentro de la zona.
  - Valor alto de ajuste, para asegurar estabilidad contra saturación de CT en fallas a través.

## Parámetros del circuito

CT = ratio: 2000/5, type: C800, knee-point voltage: 432 V

$I_F$  = 50 kA (falla simétrica trifásica)

$R_{CT}$  =  $0.82 \Omega$

$R_{LEAD}$  =  $0.6 \Omega$

$n$  = número total de circuitos = 5

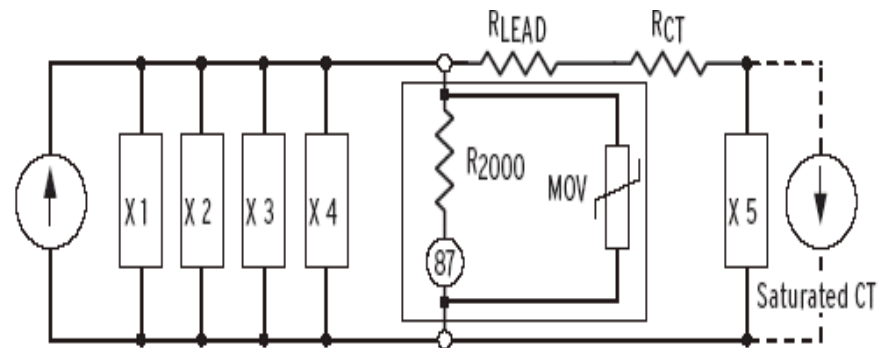


Figure 3.5 Circuito equivalente para falla a través

# Calculo de Ajuste

- El voltaje es directamente proporcional a la resistencia del conductor y del TC.
- Mantener el voltaje tan bajo como posible, haciendo el paralelo lo más cercano posible de los TC'S.
- Utiliza la mayor relación de TC, par corrientes de fallas altas.

$$V_r = (R_{CT} + P \cdot R_{LEAD}) \cdot \frac{I_F}{N} \quad \text{ecuación 3.1}$$

Donde

$V_r$  = voltaje a través del elemento de alta impedancia

$I_F$  = Corriente máxima de falla externa

$N$  = Relación de TC

$R_{CT}$  = Resistencia del conductor y devano secundario del TC hasta los terminales del TC

$R_{LEAD}$  = Resistencia del conductor en una via, desde el punto de unión al TC más alejado

$P$  = 1 para fallas trifásicas y 2 para fallas monofásicas

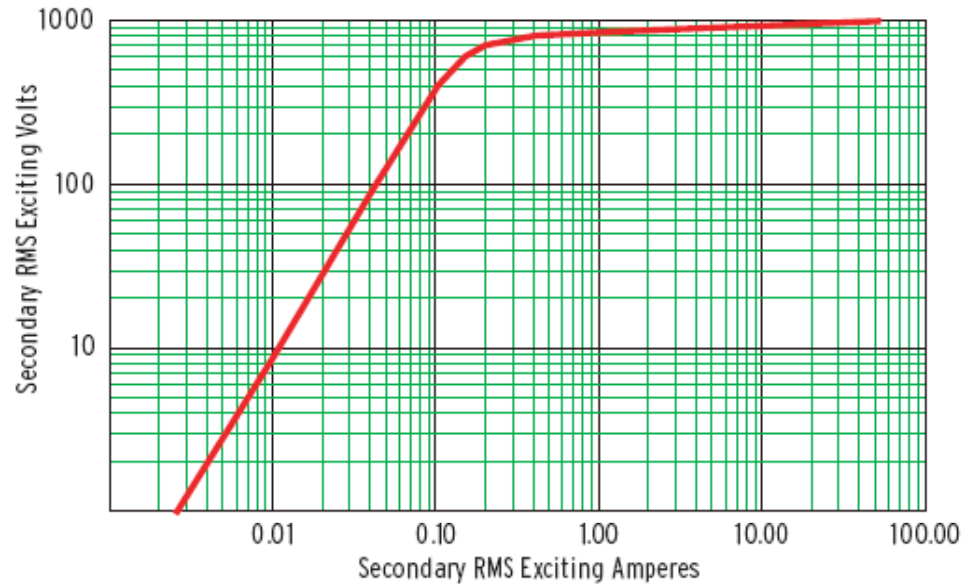
Calculo del voltaje secundario en el elemento de alta impedancia

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{I_F}{N} \cdot (R_{CT} + (R_{LEAD} \cdot P)) \\ &= \frac{50000}{400} \cdot (0.82 + (0.6 \cdot 1)) \\ &= 178 \text{ V (nearest volt)} \end{aligned}$$

ecuación 3.2

# Calculo de Ajuste

- Comparando el valor calculado con el voltaje de rodilla del CT, vemos que 178 V, esta muy por debajo del voltaje de rodilla de 432 V.
- Ajustamos los elementos de voltaje del relé de alta impedancia al mayor valor posible, desarrollado para una falla extrema.



$$V_s = K \cdot V_r \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$V_s$  = Ajuste de voltaje

$K$  = Factor de seguridad necesario para el desempeño del TC

$$\begin{aligned} V_s &= 1.5 \cdot V_r \\ &= 1.5 \cdot 178 \\ &= 267 \text{ V} \end{aligned}$$

Ecuación 3.4



# Mínima Corriente de Operación

$$I_{\min} = (n \cdot I_e + I_r + I_m) \cdot N$$

Ecuación 3.5

- La corriente primaria mínima de operación para falla interna es dada por la ecuación 3.5

Donde

$I_{\min}$  = Corriente mínima

$n$  = Número de TC'S en paralelo con el relé, para una fase.

$I_e$  = Corriente de excitación del TC, en el ajuste de voltaje del relé =  $V_s$

$I_r$  = Corriente a través del relé en el ajuste de voltaje del relé =  $V_s$

$I_m$  = Corriente a través del MOV en el ajuste de voltaje del relé =  $V_s$

- La corriente de excitación  $I_e$  es obtenida de la curva de Saturación del TC.

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{V_s}{R_{2000}} \\ &= \frac{267}{2000} \\ &= 134 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\min} &= (n \cdot I_e + I_r + 0) \cdot N \\ &= (5 \cdot 0.08 + 0.134) \cdot 400 \\ &= 213.6 \end{aligned}$$

# Corriente en MOV

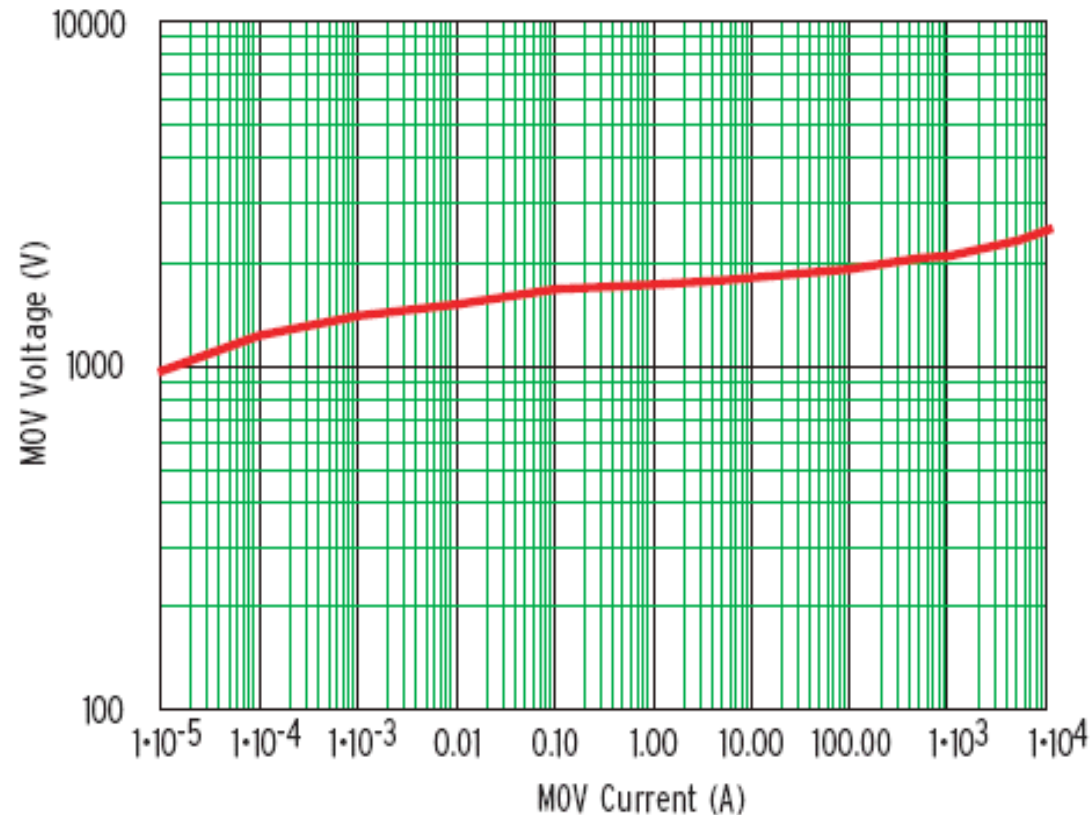


Figure 3.7 MOV Characteristic

- La corriente a través del elemento MOV es cero, para  $V_s = 267$  V.

# Corriente en MOV

- Considere las áreas bajo la curva, para selección del número de MOV.
- Sí el punto de intersección cae arriba de la curva superior seleccione una relación y/o clase de TC diferente

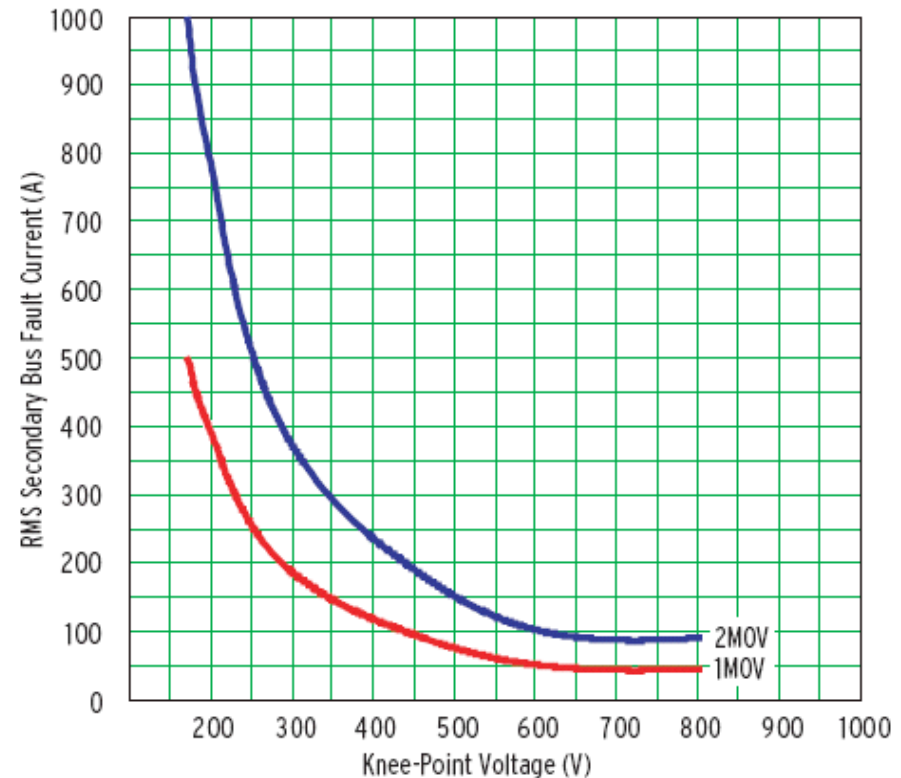


Figure 3.8 Energy Dissipation Limits of the MOVs (maximum four-cycle duration)

# PROTECCIONES DE LINEAS



# Introducción

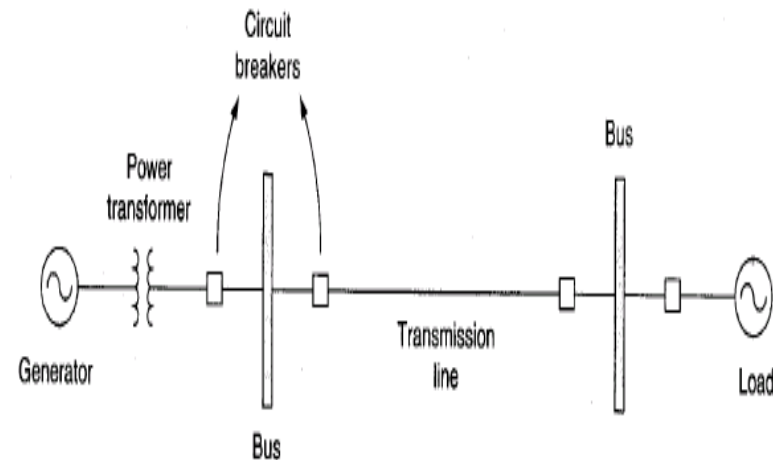
- Las líneas de transmisión son la parte más extensa del sistema y la menos protegida contra la influencia del ambiente.
- Es la parte del sistema con mayor probabilidad de causar daño a las personas, equipos y estructuras que no son parte del sistema.
- En el rango de alto voltaje (arriba de 170 Kv), las líneas son directamente aterrizadas.

# Estadística

- La probabilidad de fallas en las líneas de transmisión, como consecuencia de descargas atmosféricas, están entre 0.2 - 3 fallas por 100Km-año.
- Alrededor de 80% de las fallas en las líneas son monofásicas a tierra, 10% son bifásicas a tierra, 5% trifásicas, el resto de las fallas suman el otro 5%.

# Limites de la L/T

- Es definida por la localizacion de los interruptores, que sirven para aislar la linea de otros equipos del sistema.



# Tipos de Protecciones de Líneas

- Relevador de Distancia (21): Su principio de medición está basado en el cálculo de la impedancia vista por el relevador, definida como impedancia aparente y calculada usando voltaje y corriente medidos en el relevador.

$$Z = \frac{V}{I}$$



# Tipos de Protecciones de Líneas

- Diferencial de Corriente (87L): Su principio de medición está basado en la comparación de las mediciones realizadas en los dos extremos de la línea. Cada relevador le envia la información al relevador del extremo remoto de la línea, se realiza el disparo caso haya una diferencia considerable en las mediciones.

# Tipos de Protecciones de Líneas

- Sobrecorriente Direccional Tierra (67N): Su principio de operación esta basado en la magnitud de corriente medida por el relevador. Sólo obedecen a corrientes que estan por arriba del valor de la corriente de ajuste. Utiliza una magnitud de polarización para darle la direccionalidad requerida.

# Proteccion de Distancia (21/21N)

- Son las mas comunes:
  - Principio de medición simple.
  - Respaldo Interno.
  - Independencia de canal de comunicación
- Es un relevador de baja impedancia direccional, con 4 zonas disponibles.

# Características Básicas Rele 21

- CONFIABILIDAD
- SELECTIVIDAD
- RESPALDO LOCAL Y REMOTO
- ZONAS DE PROTECCION
- COORDINACION
- VELOCIDAD

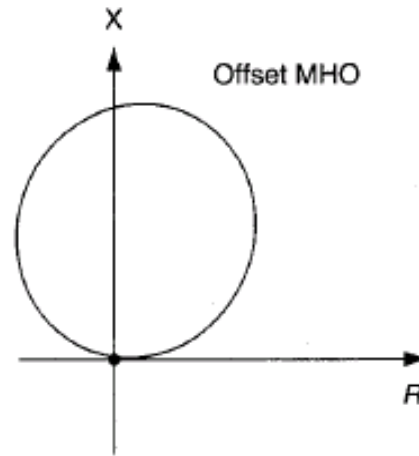
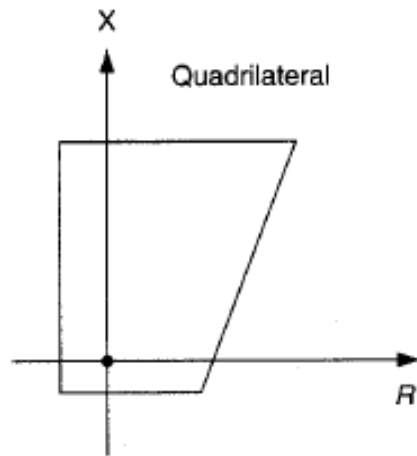
# Funciones de un Relé 21, Multifunción

- Distancia De Fase y Tierra (21/21N)
- Direccional de Tierra (67N)
- Barra Corta (51)
- Recerrador (79)
- Localizador de Falla
- Comunicación Remota
- Monitoreo de Interruptor
- Monitoreo Banco Bateria.



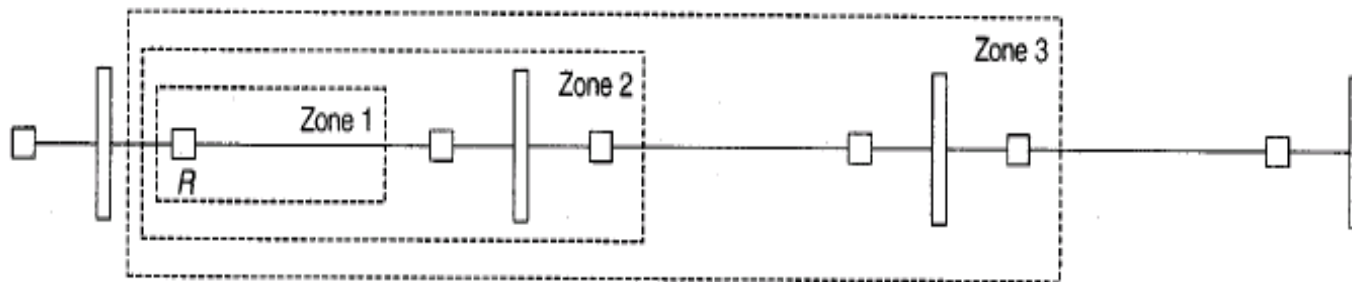
# Características de Operación mas Usadas

- Cuadrilateral
- Mho



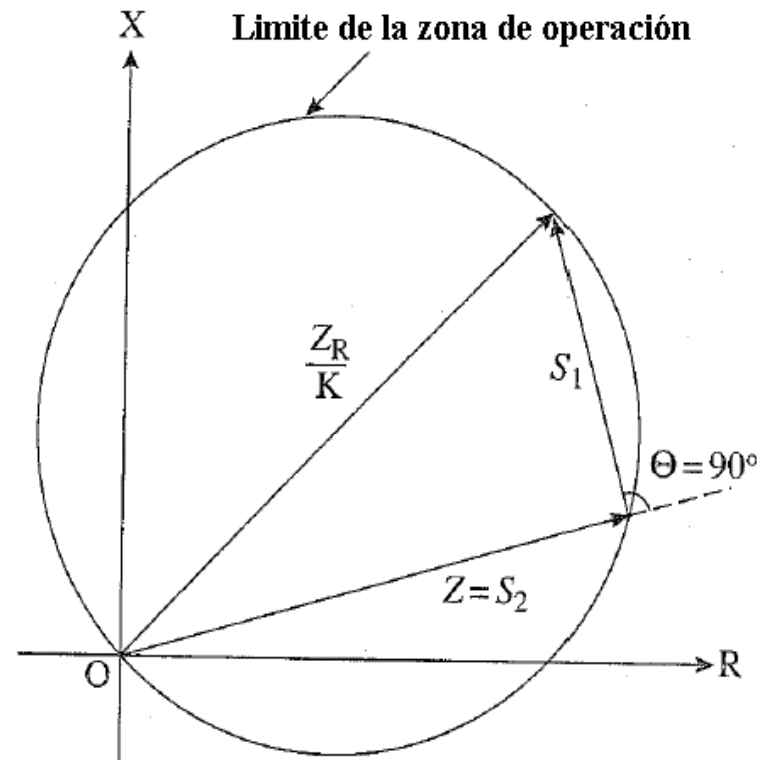
# Zonas de Protección

- Z1 protege 80% de la linea
- Z2 protege 100% L/T + 50% L/T adyacente mas Corta.
- Z3 protege 100% L/T + 100% L/T adyacente mas Larga



# Característica del Relé Mho

- Combina las propiedades de los relés de impedancia y direccional
- Su característica es inherentemente direccional y opera para fallas en frente del relé
- El alcance varia con el anglo de falla.

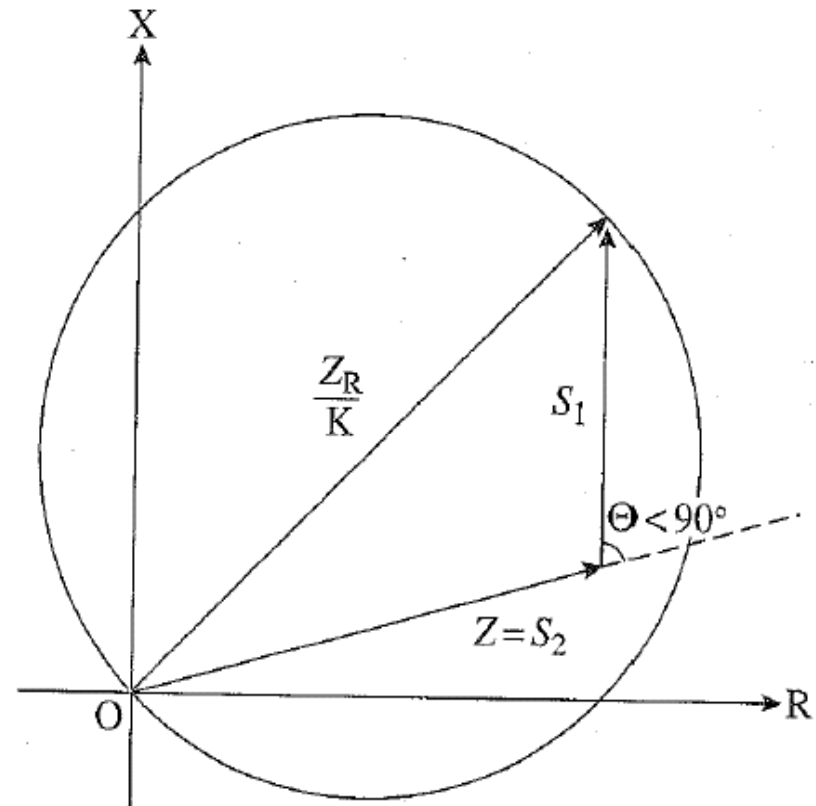


Característica de operacion del relé mho



# Z dentro de la zona de Operación

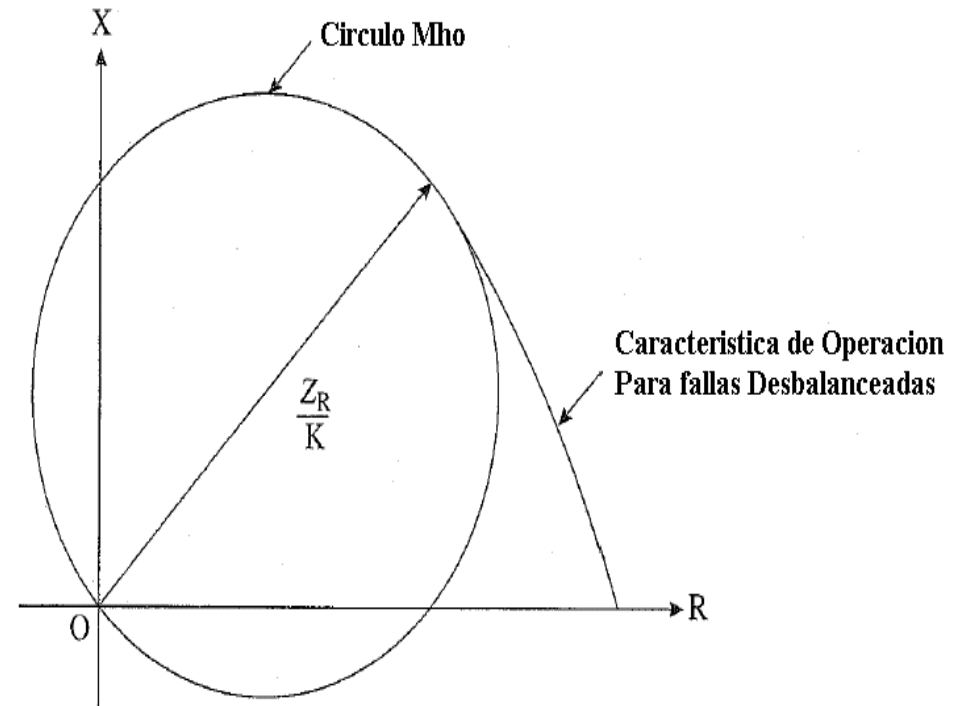
- Para valores de  $Z$  localizados dentro de la circunferencia, el ángulo será menor que cero y el relé operará.
- Una desventaja es el problema para detectar fallas de alta resistencia de falla o de arco.



Impedancia dentro de la zona de operación del relé

# Relé Mho Completamente Polarizado

- Una solución práctica al problema, es usar un relé Mho con polarización completa, en la cual la característica circular se extiende por todo el eje de las  $X$ , para todas las fallas desbalanceadas.
- Esta característica se obtiene por medio de un comparador de fase donde
- $S_1 = V_{pol}$
- $S_2 = V - Z^* I_R$

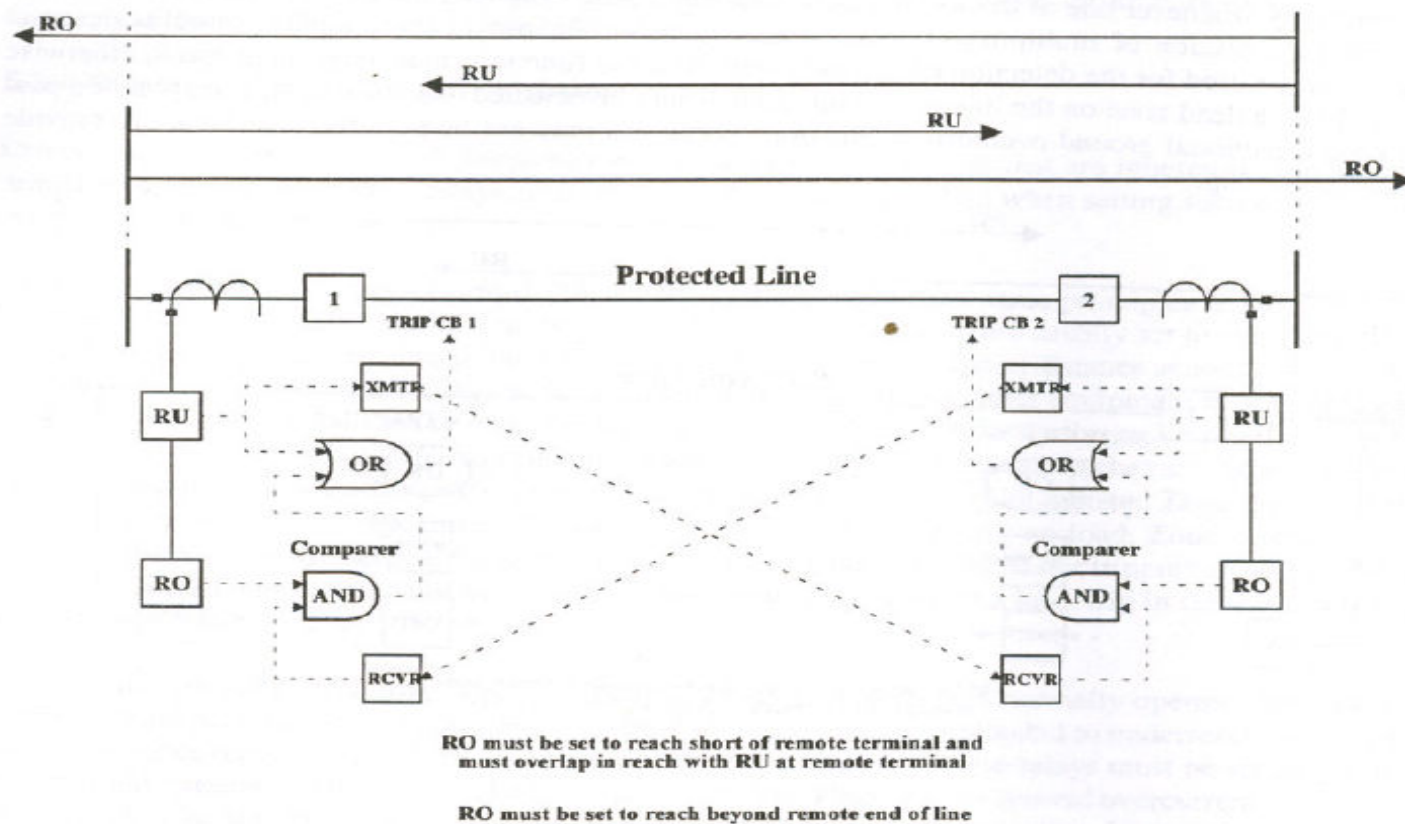


Característica de Operación Relé Mho Completamente Polarizado

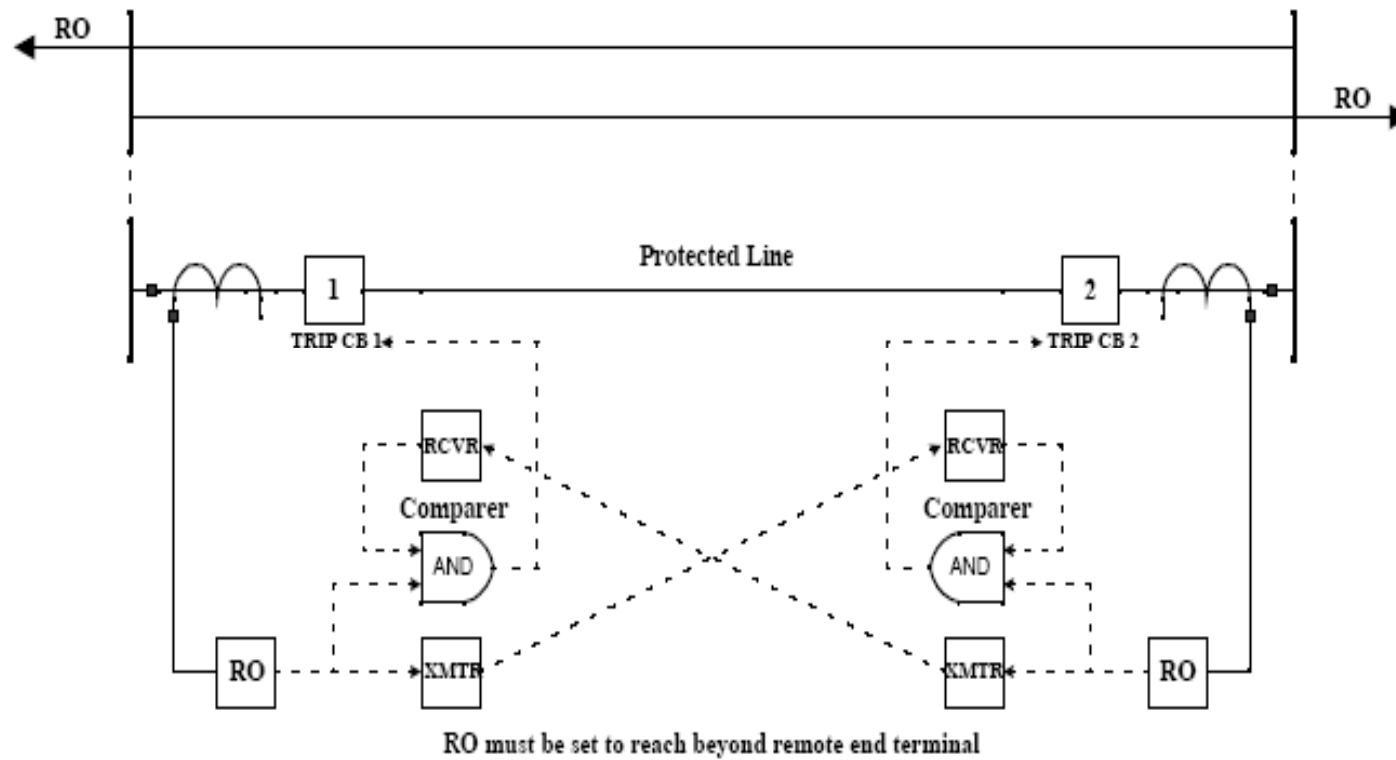
# Esquemas De Comparacion Direccional

- Usan funciones de distancia asistido por Canales de comunicación para enviar y recibir información a los extremos remotos de la línea protegida.
- **Tipos de Esquemas:**
  - disparo transferido directo bajo alcance
  - Disparo transferido permisivo bajo alcance (PUTT)
  - Disparo transferido permisivo sobre alcance (POTT)
  - Disparo con aceleración de zona
  - Esquema de bloqueo comparación direccional

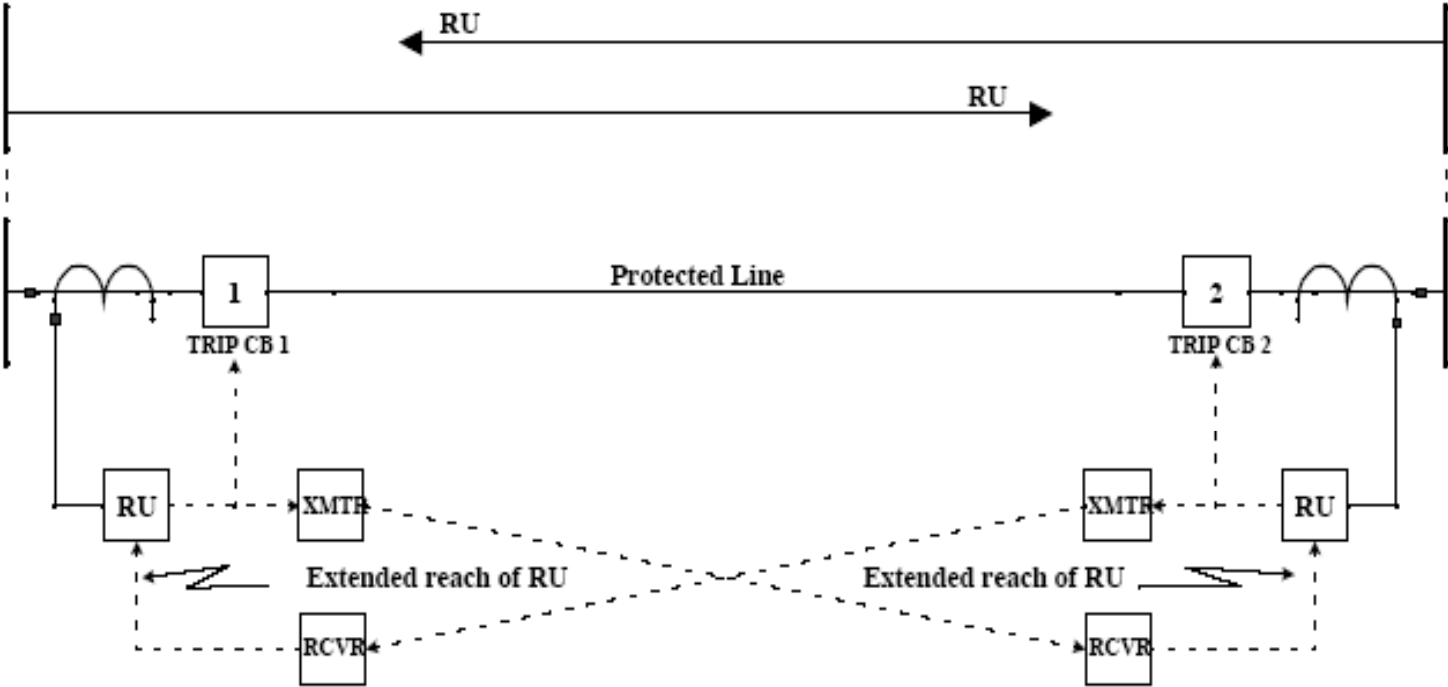
# Esquema PUTT



# Esquema POTT

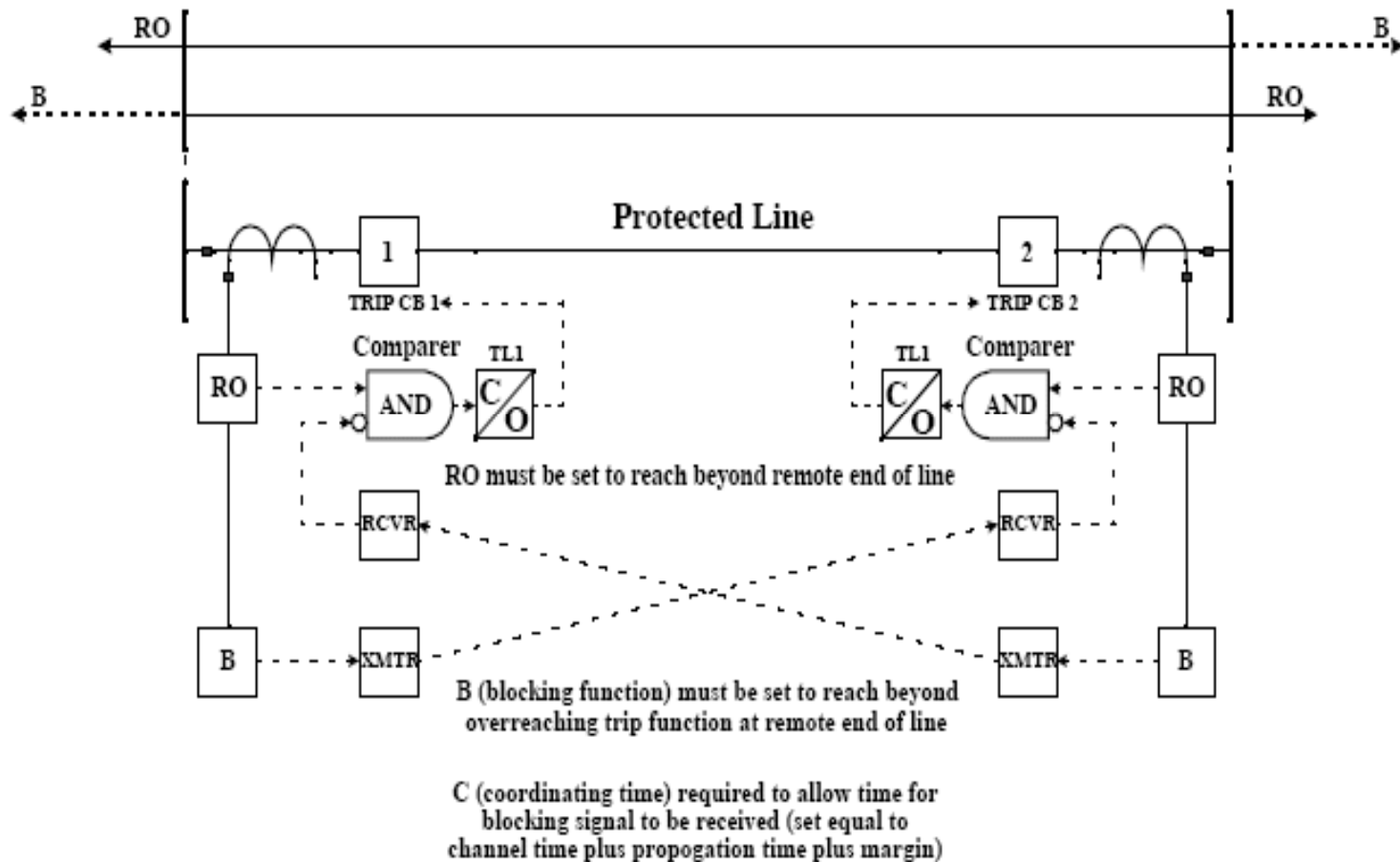


# Aceleracion de Zona



RU must be set to reach short of remote terminal and must overlap in reach with RU at remote terminal. It must be capable of being switched in reach.

# Bloqueo por comparación Direccional

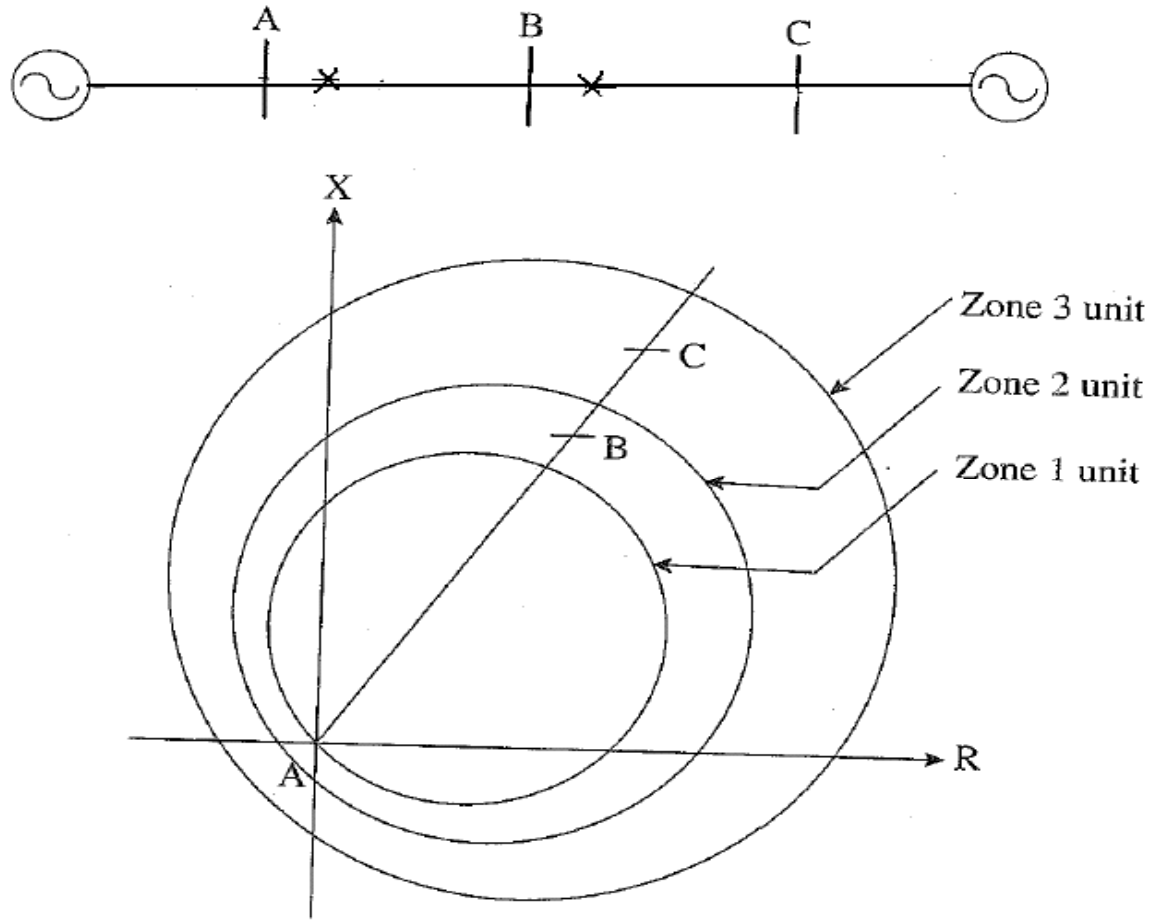


# Ajuste del Relé

- Los relés de distancia son calibrados en ohms secundarios y son ajustados para medir impedancia de secuencia positiva de la sección de línea a ser protegida.
- Los rangos típicos de ajustes de los relés son:
  - 0.2 – 240 ohms ( 1 Amperio)
  - 0.04 – 48 ohms (5 Amperios)
- Para establecer el ajuste del relevador, es necesario calcular la impedancia en valores primarios de la línea. Los valores secundarios se calculan usando la relación.
  - $Z_s = Z_p * RTC/RTP$

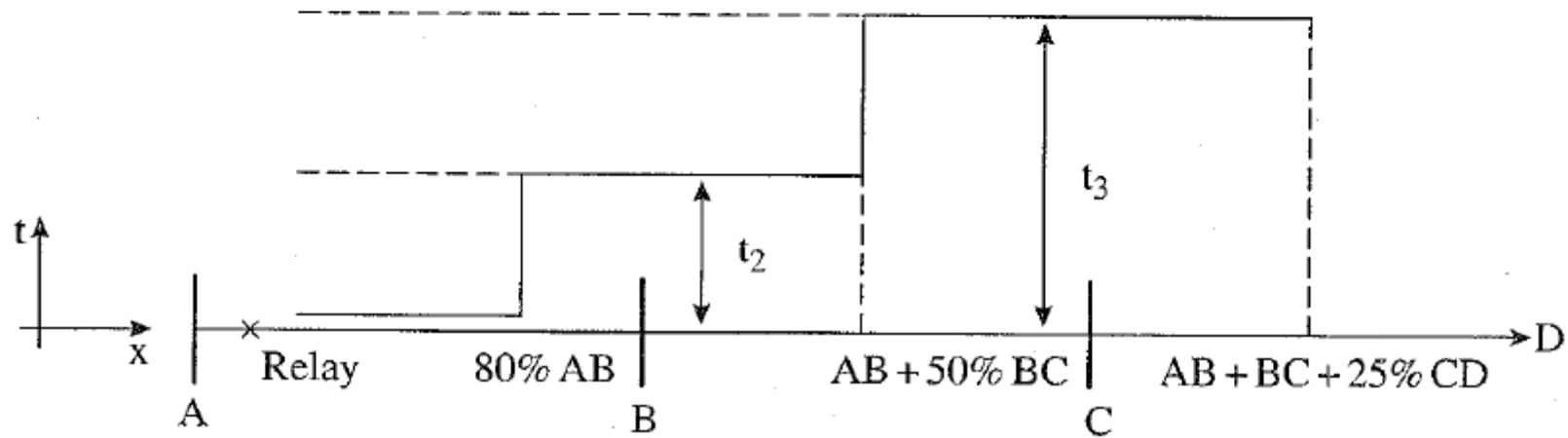


# Característica Relé de Distancia



**Característica de Operación del Relé de distancia localizado en A**

# Zonas de Protección

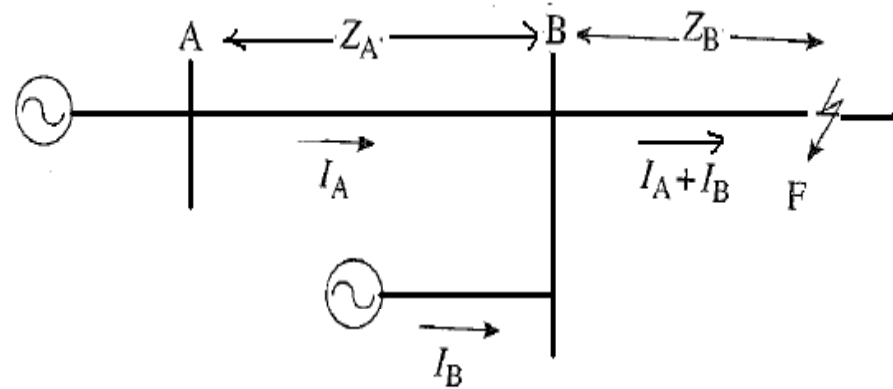


# Diferentes Criterios de Ajustes

- Primer Criterio de Ajuste:
  - $Z1$  = entre 80 al 90% de la longitud de la línea protegida.
  - $Z2$  = 100% de la línea + 50% de la línea adyacente mas corta.
  - $Z3$  = 100% de la línea + 100% de la segunda línea mas larga + 25% de la próxima línea mas corta.
- Segundo Criterio de Ajuste:
  - $Z1$  = entre 80 al 90% de la longitud de la línea protegida.
  - $Z2$  = 120% de la impedancia de la línea a ser protegida
  - $Z3$  = 120% (Impedancia de la línea + Impedancia de la línea adyacente mas larga).

# El Efecto Infeed

- Debe tomarse en cuenta cuando hay uno o mas generadores dentro de la zona de protección.
- La impedancia vista por el relé en A, para una falla mas allá de la barra B es mayor, que la impedancia actual.
- El relé ve una impedancia  $kZ_B$ , donde la constante infeed  $k$  es igual a  $I_B/I_A$

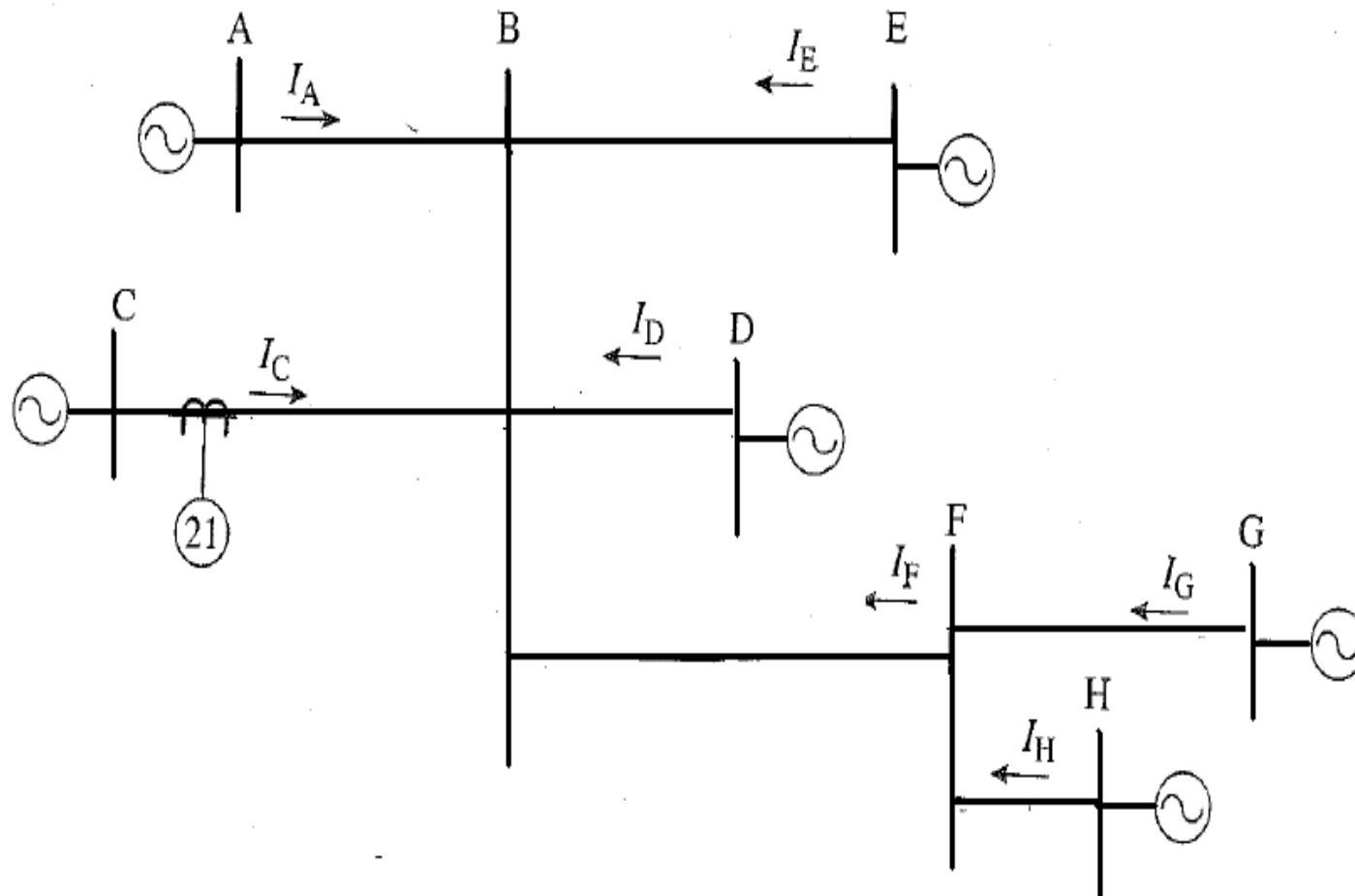


$$V_A = I_A Z_A + (I_A + I_B) Z_B$$

Del cual tenemos

$$\frac{V_A}{I_A} = Z_A + \left[ 1 + \frac{I_B}{I_A} \right] Z_B$$

# Ejemplo del Efecto Infeed



# Ejemplo del Efecto Infeed

$$Z_1 = 0.8 \text{ to } 0.85 \text{ times } Z_{AB}$$

$$Z_2 = Z_{CB} + 0.5(1 + K_1)Z_{BD}$$

$$Z_3 = Z_{CB} + (1 + K_2)Z_{BF} + 0.25(1 + K_3)Z_{FH}$$

where

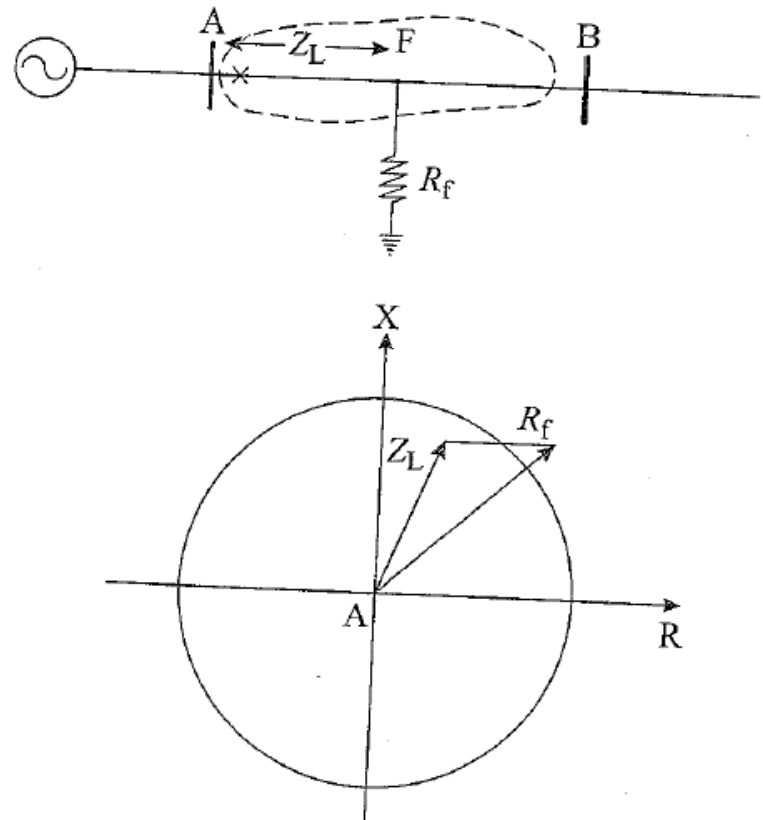
$$K_1 = \frac{I_A + I_E + I_F}{I_C}$$

$$K_2 = \frac{I_A + I_D + I_E}{I_C}$$

$$K_3 = \frac{I_A + I_D + I_E + I_G}{I_C}$$

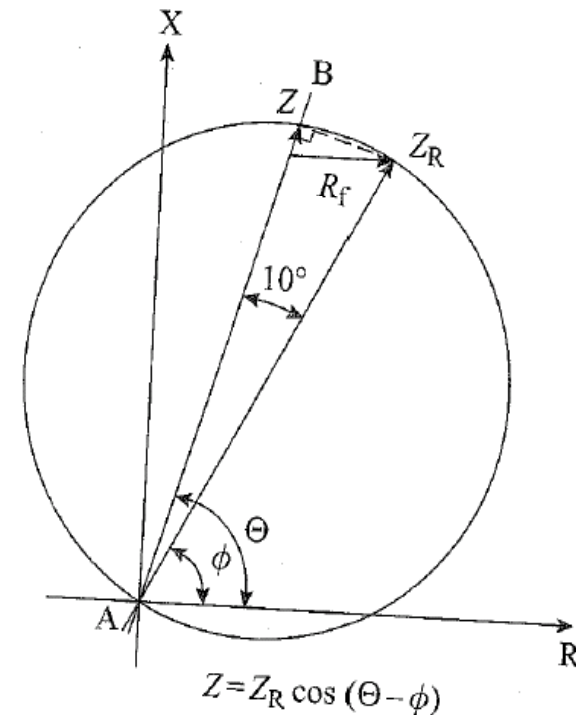
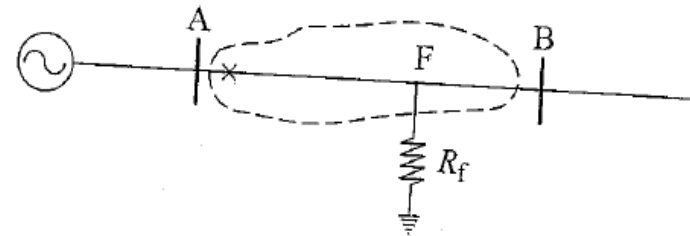
# Efecto Resistencia de Arco

- Para una falla sólida la impedancia medida por el relé es igual a la impedancia hasta el punto de falla.
- La falla puede no ser sólida, lo que involucra un arco eléctrico o una impedancia.
- La impedancia con arco de falla puramente resistiva.



# Practica Común

- Si el ángulo de la característica del relé es ajustado igual al de la línea, con resistencia de arco presente el relé siempre subalcanzara.
- Una practica utilizada es ajustar el ángulo de la característica del relé un ángulo de 10 grados atrás del ángulo de la línea, de manera que pueda ser capaz de tolerar una cantidad chica de resistencia de arco





# Compensación Residual

- Las unidades de falla a tierra son alimentadas por voltajes de falla a tierra y una combinación de corrientes de fases y residual, que dependen de la relación entre las impedancias de secuencia cero y positiva de la línea.
- Para una falla a tierra A-G,

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} = I_{A1} (Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L0})$$

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} = I_{A1} (2Z_{L1} + Z_{L0})$$

$$I_A = 3 I_{A1}$$

$$V_A / I_A = (2Z_{L1} + Z_{L0}) / 3$$

$$I_A + 3K I_{A0} = I_A (1 + K)$$

$$\frac{V_A}{I_A (1 + K)} = Z_{L1}$$

$$\frac{2Z_{L1} + Z_{L0}}{3} = Z_{L1} (1 + K)$$

$$K = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$$

# Funciones Especiales Relé 21

- Algunas funciones que son de interes con reles de distancia:
  - Cierre Bajo Falla (SOFT)
  - Bloqueo Por Oscilacion de Potencia (PSB)
  - Proteccion de Barra Corta (STUB BUS)
  - Supervicion Por Perdida de PT (VTS)

# Longitud de Líneas, según el SIR

- SIR: Es la relación de la impedancia fuente detrás del terminal de un relé a la impedancia de la línea.
- Las líneas de transmisión pueden ser clasificadas como:
  - Cortas ( $SIR > 4$ )
  - Medias ( $0.5 < SIR < 4$ )
  - Largas ( $SIR < 0.5$ )

# Ejemplo de Longitud (SIR)

- Consideremos una línea de 500Kv  $X_{sp} = 0.332$  ohms /Km., correspondiendo a una  $X_{sp}$  (pu) = 0.00013 pu por Km., en una base de 100MVA y 500Kv. Si la impedancia de fuente detrás del terminal del relé es 0.01 pu (para un nivel de falla de 10,000 MVA)
  - Longitudes de líneas menores que 19 Km., resultara en un  $SIR > 4$
  - Longitudes de líneas mayores que 150 Km., resultara en un  $SIR < 0.5$

## Ejemplo de Longitud (SIR)

- Consideremos una línea de 69Kv  $X_{sp} = 0.53$  ohms /Km., correspondiendo a una  $X_{sp} \text{ (pu)} = 0.015$  pu por Km., en una base de 100MVA y 69Kv. Si la impedancia de fuente detrás del terminal del relé es 0.1 pu (para un nivel de falla de 1,000 MVA)
  - Longitudes de líneas menores que 1.7 Km., resultara en un **SIR>4**, puede ser considerada una “**Línea Corta**”.
  - Longitudes de líneas mayores que 14 Km., resultara en un **SIR<0.5**, puede ser considerada una “**Línea Larga**”.

# Sistemas de Comunicación (SIR)

- Aunque la longitud física de la línea es un factor en el SIR, no es adecuada definir la línea como: corta, media o larga basada solo en esta característica.
- Sin embargo la distancia física entre los terminales de una línea, puede ser un factor determinante en la selección del medio de comunicación entre los relevadores.
- Sistemas de Comunicación Actualmente Usados:
  - Fibra Óptica (FO)
  - Micro Onda (MO)
  - Onda Portadora (OP)
  - Cables Metálicos (CM)

# Canal de Comunicación Por FO

- Este canal consiste en un cable de FO de pequeño diametro, no conductor de electricidad por lo que la informacion se transmite con tecnicas de modulacion de luz. Es de gran capacidad y esta libre de problemas de voltajes inducidos y ailsamiento electricos.
- Presenta altos niveles de atenuacion de las señales.
- Una variante practica para proteccion contra daños mecanicos es colocarlo dentro del condcutor que se utiliza como hilo de guarda de las lineas de Transmision (OPGW)



# Canal de Comunicación Por MO

- Consiste de un enlace de radio en la banda de microonda, usualmente en el intervalo de frecuencias de 2-12Ghz, con antenas en que debe existir enlace visual directo. Cuando no se dispone de repetidoras intermedias la longitud máxima es de 60 Km.
- Transmisión de la información:
  - a) Modulación de banda base: es una señal de frecuencia que oscila entre señal de audio y varios cientos de Khz.
  - b) Directamente a un canal de voz: se aplican tonos de audio entre 400-3000 Hz.



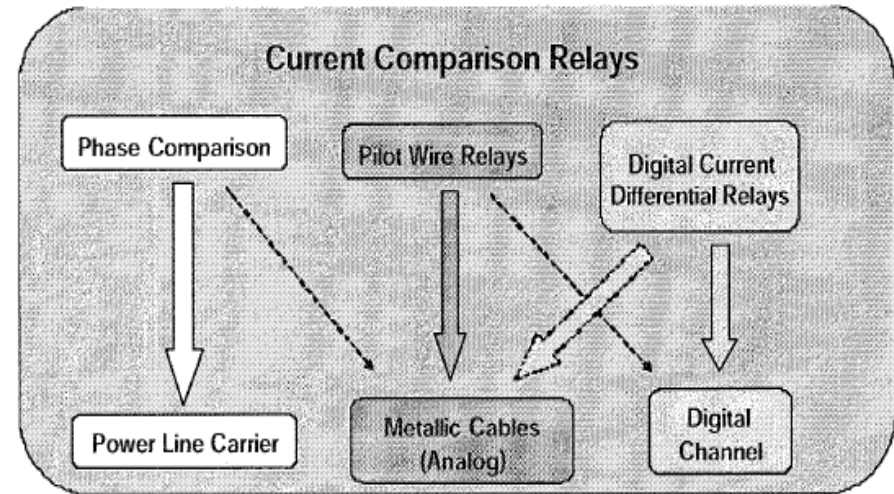


# Canal de Comunicación Por OP

- Utiliza los propios conductores de la linea, para transmitir señales en la bande de frecuencia de 30-300 KHz.
- La variante mas difundida en la practica es aquella que utiliza una sola fase y la señal se aplica entre fase y tierra.
- Tipo de señal:
  - a) Una sola frecuencia (Bloqueo)
  - b) Dos frecuencia (Bloqueo y Transferencia de disparo)
  - c) Modulacion por simple banda lateral.

# Protección Diferencial de Línea (87L)

- El termino comparación de corriente es utilizado en la guía para aplicaciones de protección de LT.
- El termino diferencial de corriente es aplicado:
  - Relés de Hilo Piloto
  - Diferencial de corriente Digital

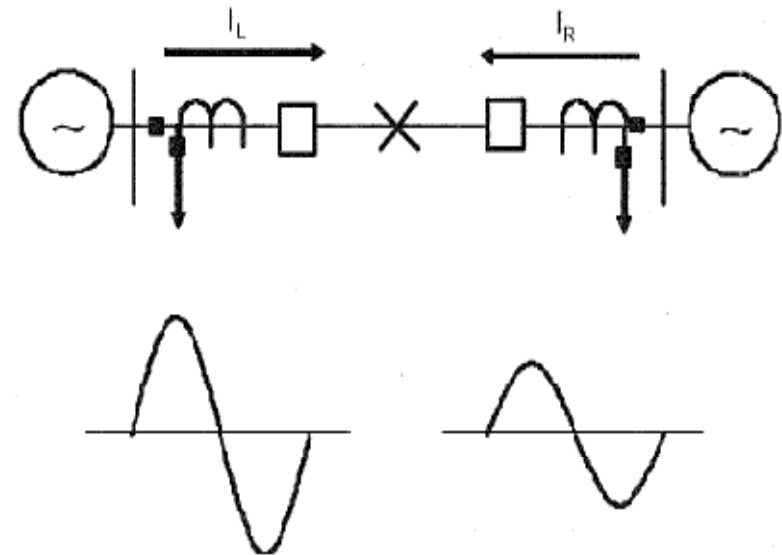


# Protección Diferencial de Línea (87L)

- Extiende los beneficios de protección diferencial como aplicado a transformadores, barras y generadores a las líneas de transmisión.
- Compara la corriente entrando a la línea con la que sale de la línea, permitiendo un esquema sencillo de protección con alta sensibilidad y velocidad en ambos extremos.
- La corriente diferencial puede medirse por:
  - Comparación de magnitud
  - Comparación de fase.
  - Comparación de Fasores (magnitud y ángulo)
  - Comparación de corriente de carga
  - Combinaciones de las cuatro primeras.

# Falla Interna en La Línea

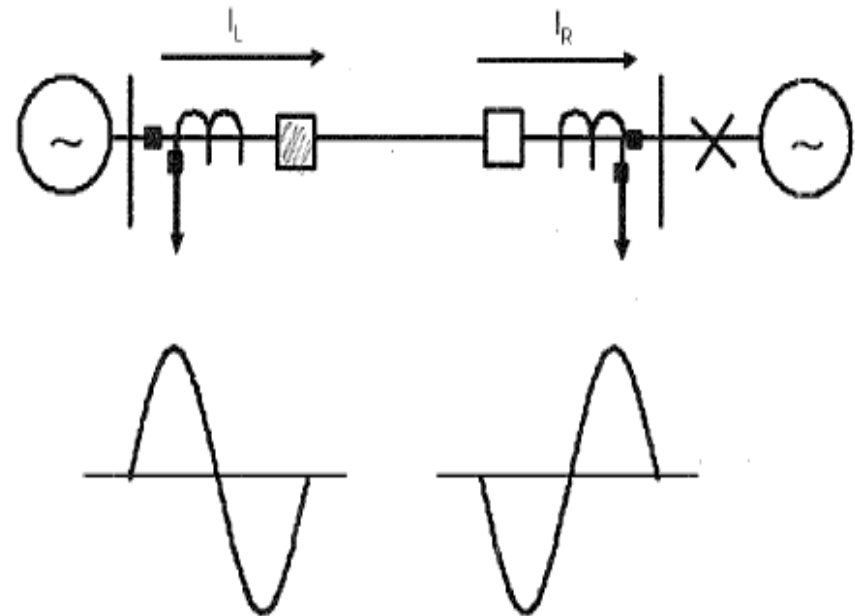
- Para una falla interna la corriente fluye hacia la línea en ambos terminales.
- La corriente local, estará en fase con la corriente remota.



$$|\vec{I}_L + \vec{I}_R| \neq 0$$

# Falla Externa a La Línea

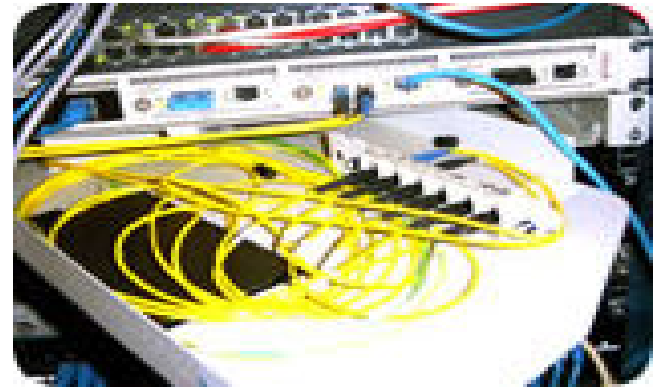
- Para una falla externa la corriente fluye hacia la línea en un terminal y hacia fuera de la línea en el otro terminal.
- La corriente local, estará  $180^\circ$  fuera de fase con la corriente remota.



$$|\bar{I}_L + \bar{I}_R| = 0$$

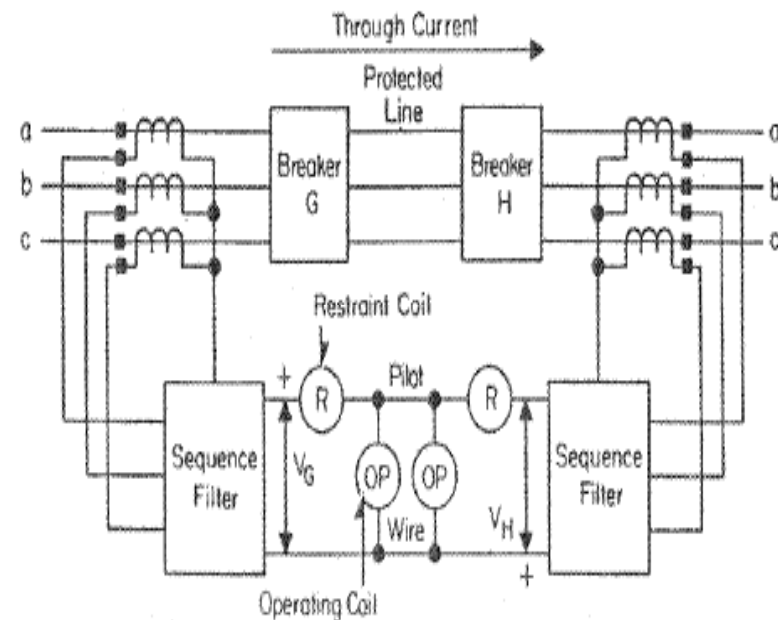
# Canal de Comunicación

- Común a todos los relés diferenciales de línea.
- Una cantidad remota conteniendo la información de corriente necesita ser enviada al extremo local para comparación con la corriente local.
- Las cantidades a ser comparadas necesitan ser coincidentes en tiempo y la información del fasor debe ser preservada.



# Relé de Hilo Piloto

- El primer relé diferencial de corriente usaba hilo piloto.
- El hilo piloto era un circuito de dos conductores, capaz de transmitir cantidades de DC y 60 Hz.
- Para limitar los requerimientos en comunicación, la corriente trifásica era reducida a una cantidad simple.
- Una falla externa o corriente de carga, producía voltajes de polaridades opuesta sobre el hilo piloto en los dos extremos.
- Su aplicación era recomendada a distancia inferiores a 25 Km.



# Consideraciones Canal de Comunicación

- Se necesita tomar en cuenta:
  - Diseño de la interfase de comunicación.
  - Principio de Medición.
- La interfase de comunicación tiene que bloquear mensajes de data corrupta que le llegan al relé y asegurar que los dos relés permanezcan sincronizados. Se requiere precisión en la medición del tiempo de retardo del canal, de manera de realizar un adecuado alineamiento de las cantidades medidas.
- El principio de medición del relé debe manejar adecuadamente los errores introducidos por la asimetría del canal (diferentes caminos de transmisión y recepción) en redes de comunicación conmutadas; errores de TC y corriente capacitivas.



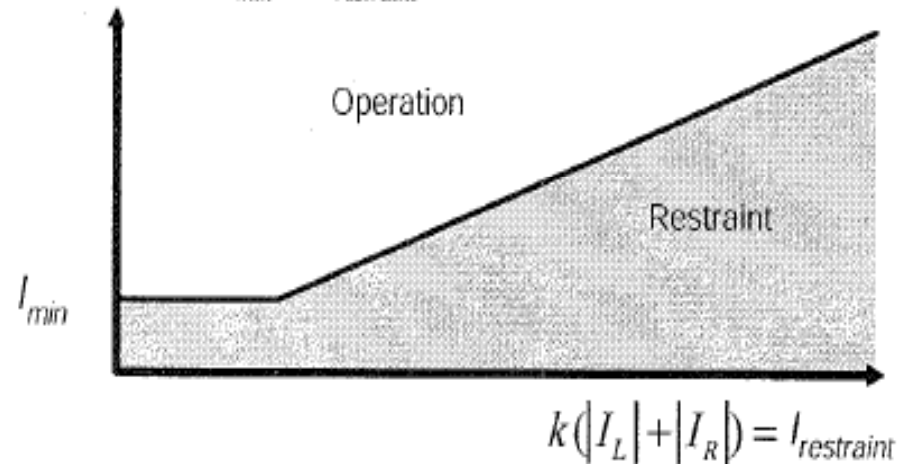
# Criterios de Operación

- Bajo condiciones de medición ideal, la corriente diferencial tiene suficiente información para distinguir entre una falla interna o externa.
- Errores de Medición debido a:
  - Diferentes CT en los extremos
  - Retardo del canal de medición
  - Frecuencia de Muestreo finita en relés digitales
- Causara que los relés midan corrientes diferenciales falsas, para condiciones en que no tenemos fallas.
- Debe ser proporcionada con un umbral de operación, muchos relés utilizan característica diferencial porcentual.

# Característica de Restricción Porcentual

- La corriente de operación es típicamente la suma de la corriente local y remota.
- La cantidad de restricción es una función de la corriente total.
- La mayoría de relés tienen una corriente de operación mínima..

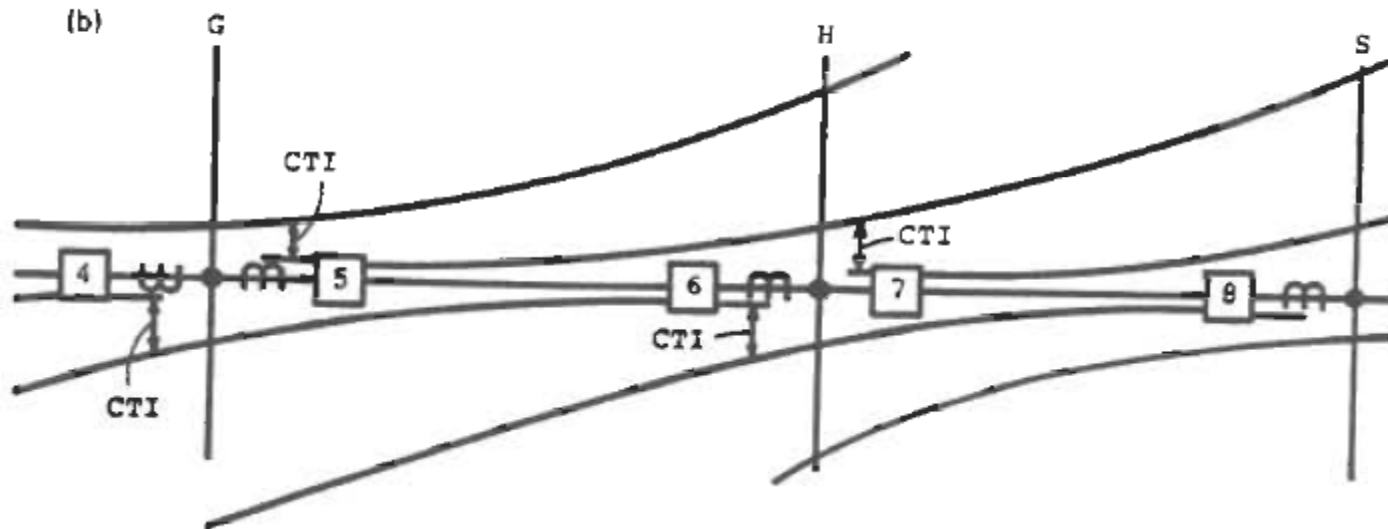
$$|\bar{I}_L + \bar{I}_R| = I_{\text{differential}} > I_{\text{min}} + I_{\text{restraint}}$$



# Consideraciones de Ajuste

- Es mas sencillo de ajustar que un relé de distancia.
- Solo necesitamos los niveles de corriente en la línea.
- El ajuste debe ser bajo, para permitir mayor sensibilidad para todos los tipos de fallas en la línea.
- Debe ser alto para que el relé no opere para fallas externas, en la presencia de errores de TC o otros errores de medición.

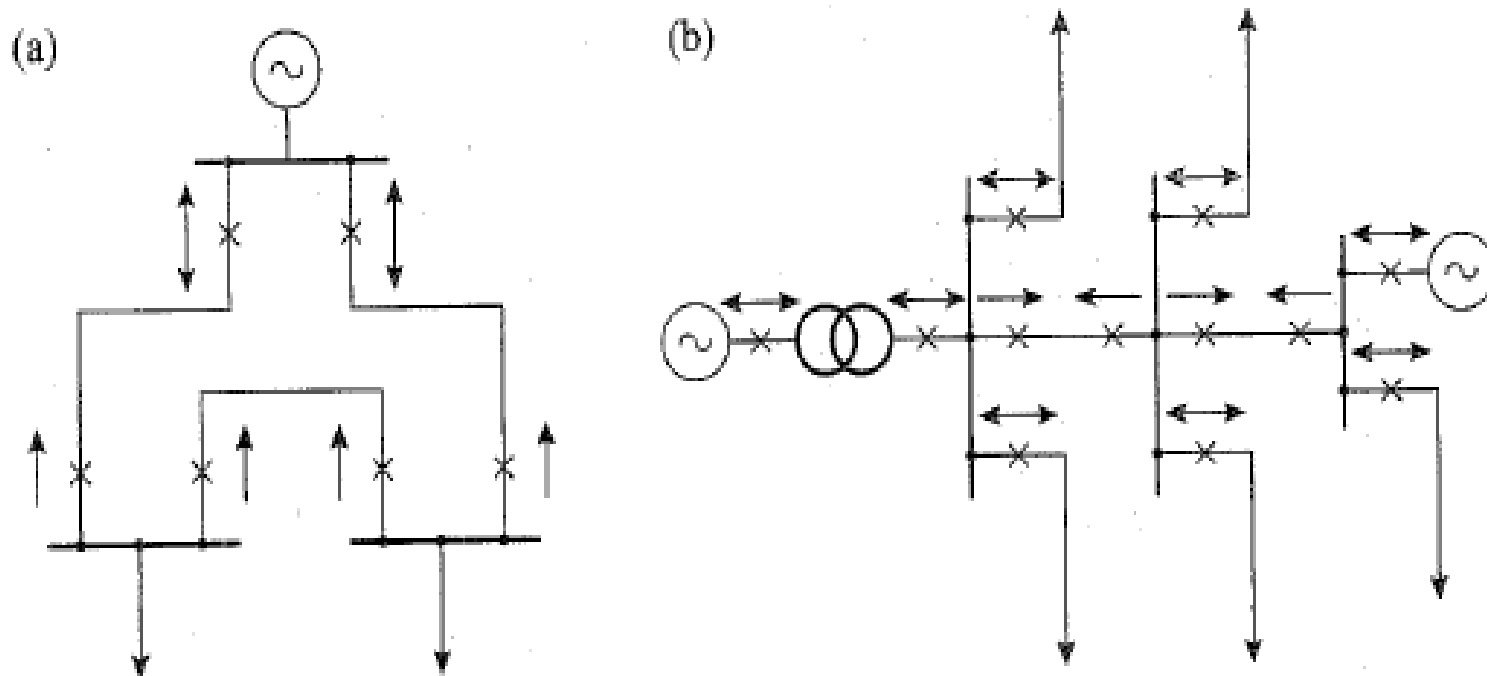
# Protección Direccional (67/67N)



# Protección Direccional (67/67N)

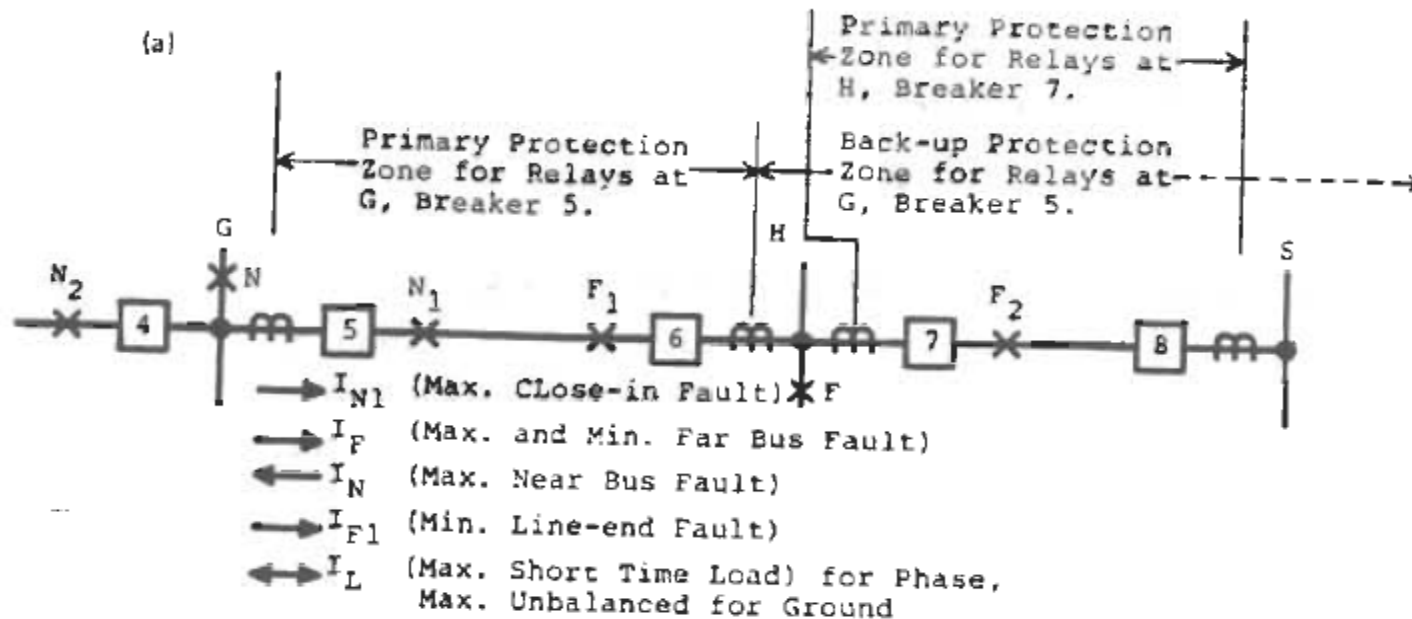
- Son aplicados cuando tenemos fuente de ambos lados de los terminales de la línea.
- Los relés están sujetos a flujo de potencia de falla y reactivos en ambas direcciones.
- Desde que los relés direccionales solo operan para flujos de corriente en la dirección de disparo especificada, evitan complejidad en la coordinación.

# Protección Direccional (67/67N)



Aplicación de relevadores direccionales: a) sistema en anillo; b) sistema multifuente

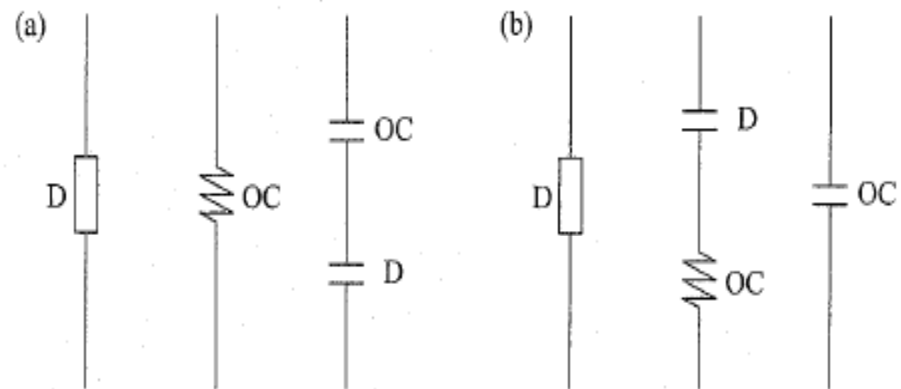
# Requerimiento de Rele Direccional



- **Protección de la Línea:** El (67) debe ser aplicado en G:, si la corriente máxima de falla reversa ( $I_N$ ) en la barra "G" o la corriente máxima de carga reversa ( $I_{RLoad}$ ) a través del relé excede 0.25 veces la corriente mínima de falla ( $I_F$ ) que ve el relé, para una falla en la barra remota H.
- **Respaldo Línea HS:**  $I_N$  y  $I_{RLoad}$  deben ser 0.25 veces la corriente  $I_{SMin}$

# Protección Direccional (67/67N)

- Hay dos métodos para obtener la dirección del flujo de potencia:
  - Supervisión
  - Control

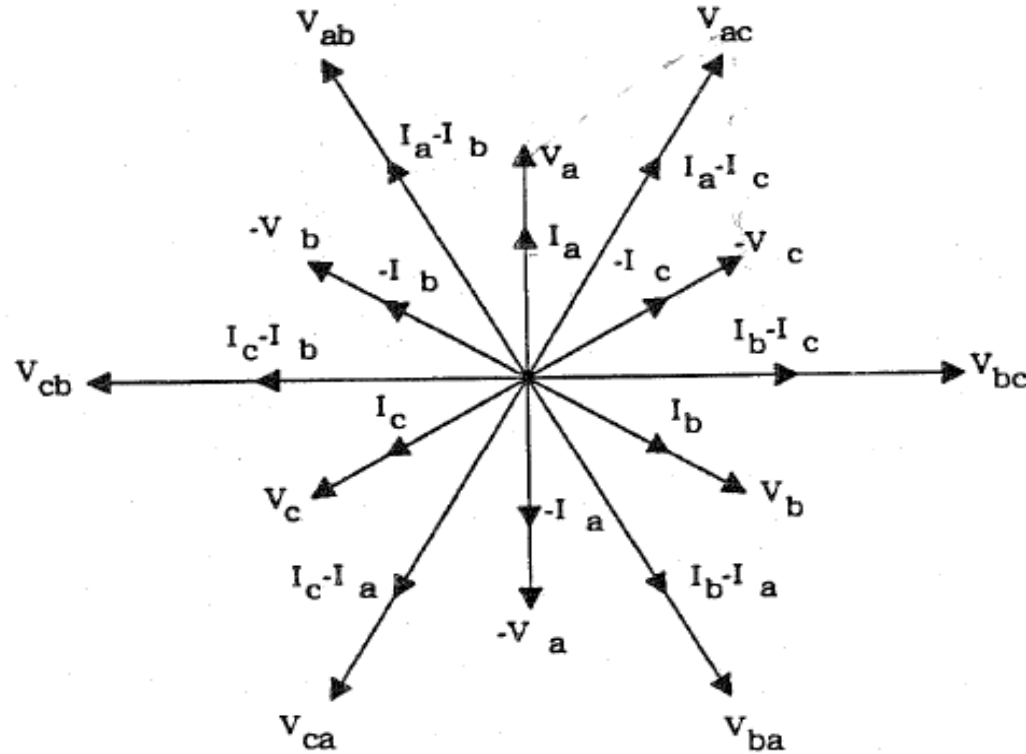


Obteniendo dirección de flujo: a) Por Supervisión; b) Por Control



# Cantidades Disponibles

a) Cantidades Disponibles



- Cantidades disponibles de:
  - Corrientes
  - Voltajes

# Conexiones Disponibles

## b) Conexiones Disponibles

| Connection<br>+                                                                         | Unit<br>Type | Phase A     |           | Phase B     |           | Phase C     |           | Màximo Torque<br>Cuando * |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|---------------------------|
|                                                                                         |              | I           | V         | I           | V         | I           | V         |                           |
| 1 30°                                                                                   | Watt         | $I_a$       | $V_{ac}$  | $I_b$       | $V_{ba}$  | $I_c$       | $V_{cb}$  | $I$ lags 30°              |
| 2 60°  | Watt         | $I_a - I_b$ | $V_{ac}$  | $I_b - I_c$ | $V_{ba}$  | $I_c - I_a$ | $V_{cb}$  | $I$ lags 60°              |
| 3 60°  | Watt         | $I_a$       | $-V_{cg}$ | $I_b$       | $-V_{ag}$ | $I_c$       | $-V_{bg}$ | $I$ lags 60°              |
| 4 90°                                                                                   | Cylinder     | $I_a$       | $V_{bc}$  | $I_b$       | $V_{ca}$  | $I_c$       | $V_{ab}$  | $I$ lags 60°              |

\* Màximo Torque cuando " $I$ " atrasa su posición de fp 1.0 para el àngulo indicado

+ Conexiòn es definida como el àngulo por el cual " $I$ " de fp 1.0 adelanta el voltaje aplicado al relè.

# Conexión de 30° (MTA 0°)

- Máximo Torque: La corriente de fase atrasa el voltaje de fase-tierra por 30°.
- Angulo de operación: la corriente adelanta 60° y atrasa 120° al voltaje de fase-tierra.
- Usado en alimentadores, con tres elementos uno por fase.
- $I_a - V_{ac}$

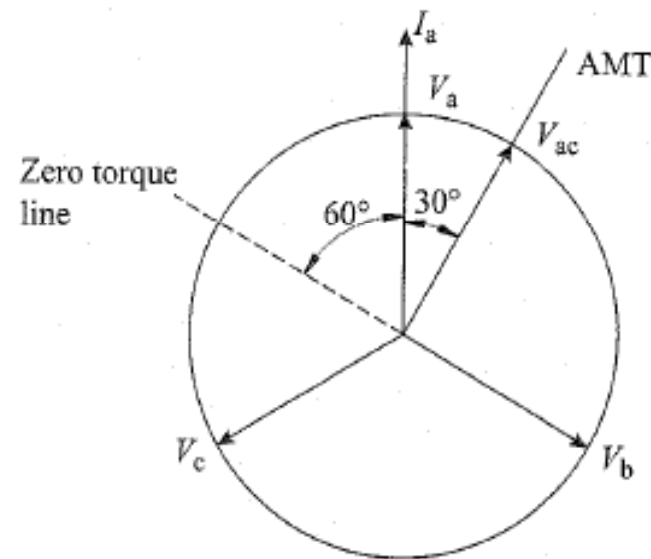


Diagrama de Vectores para conexión de 30° (0° AMT)

# Conexión de $60^\circ$ (MTA $0^\circ$ )

- Máximo torque: la corriente atrasa el voltaje de fase-tierra por  $60^\circ$ .  $I_{ab}$  atrasa  $V_{ab}$  por  $60^\circ$ .  $I_a$  atrasa  $V_a$  por  $60^\circ$  en fp 1.0
- Angulo de operación: corriente  $I_{ab}$  adelanta  $30^\circ$  y atrasa  $150^\circ$  o  $I_a$  adelanta  $30^\circ$  y atrasa  $150^\circ$  a  $V_a$ .
- Es de poco uso, ya que los TC tienen que ser conectados en Delta.
- $I_{ab} - V_{ac}$

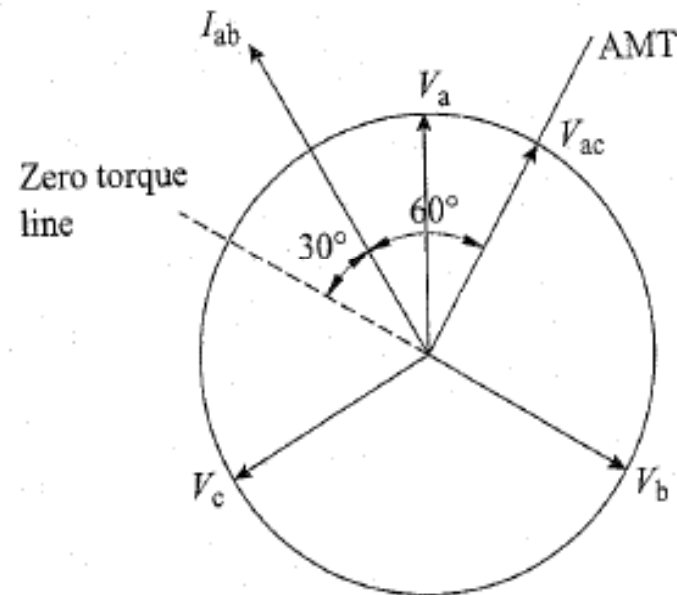


Diagrama de Vectores para conexión de  $60^\circ$  ( $0^\circ$  AMT)

# Conexión de 90° (AMT 30°)

- Máximo torque: la corriente atrasa el voltaje de fase-tierra por 60°.
- Angulo de operación: el ángulo de la corriente  $I_a$  adelanta 30° y atrasa 150°.
- Usado, en alimentadores donde la fuente de (0) esta detrás del punto de conexión del relé.
- $I_a - V_{bc}$

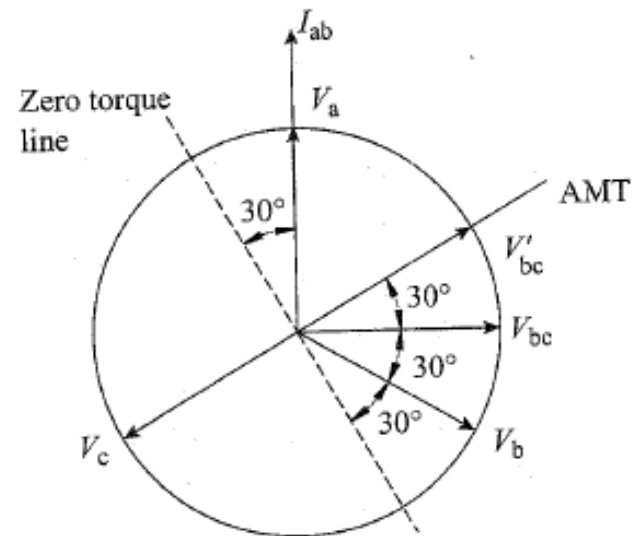


Diagrama de Vectores para conexión de 90° (0° AMT)

# Conexión de 90° (AMT 45°)

- Máximo torque: la corriente atrasa el voltaje de fase-tierra por 45°.
- Angulo de operación: el ángulo de la corriente  $I_a$  adelanta 45° y atrasa 135°.
- Usado, en alimentadores donde la fuente de (0) esta adelante del punto de conexión del relé.
- $I_a - V_{bc}$

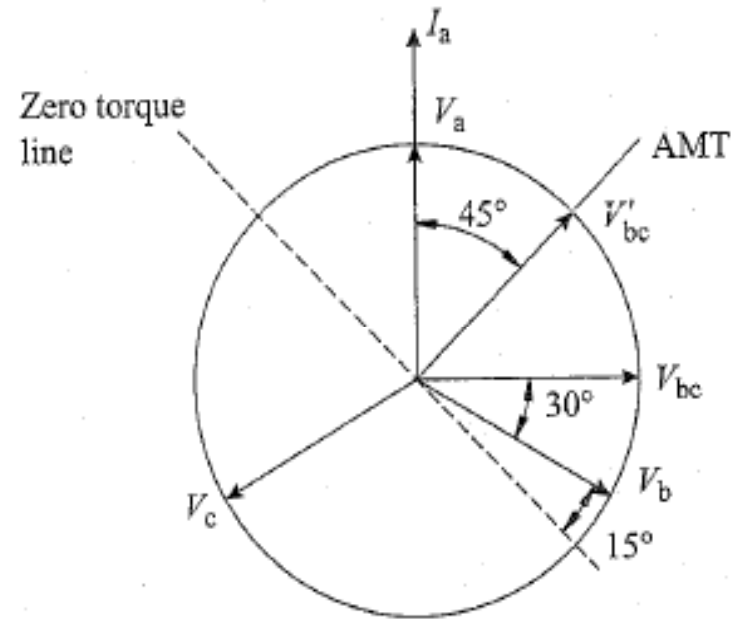


Diagrama de vectores para conexión (AMT 45°)

# Conexión de 90° (AMT 45°)

- Máximo torque: la corriente atrasa el voltaje de fase-tierra por 45°.
- Angulo de operación: el ángulo de la corriente  $I_a$  adelanta 45° y atrasa 135°.
- Usado, en alimentadores donde la fuente de (0) esta adelante del punto de conexión del relé.
- $I_a - V_{bc}$

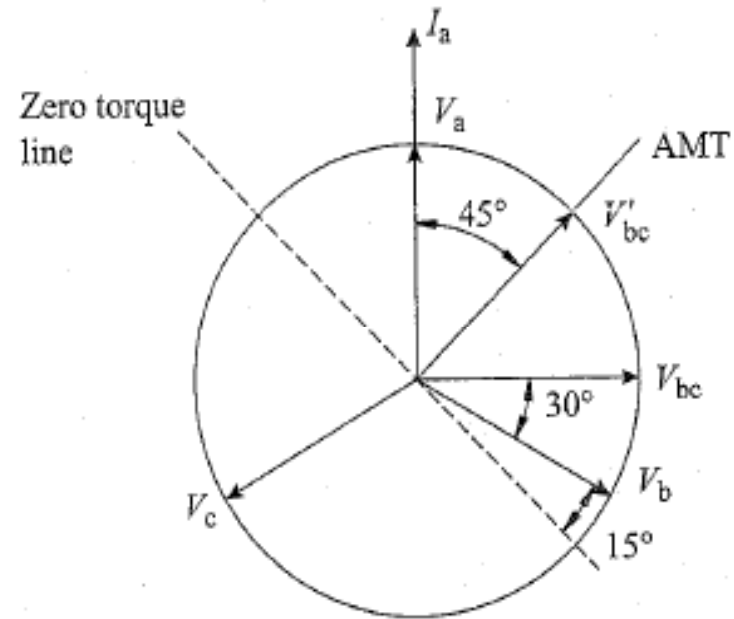


Diagrama de vectores para conexión (AMT 45°)

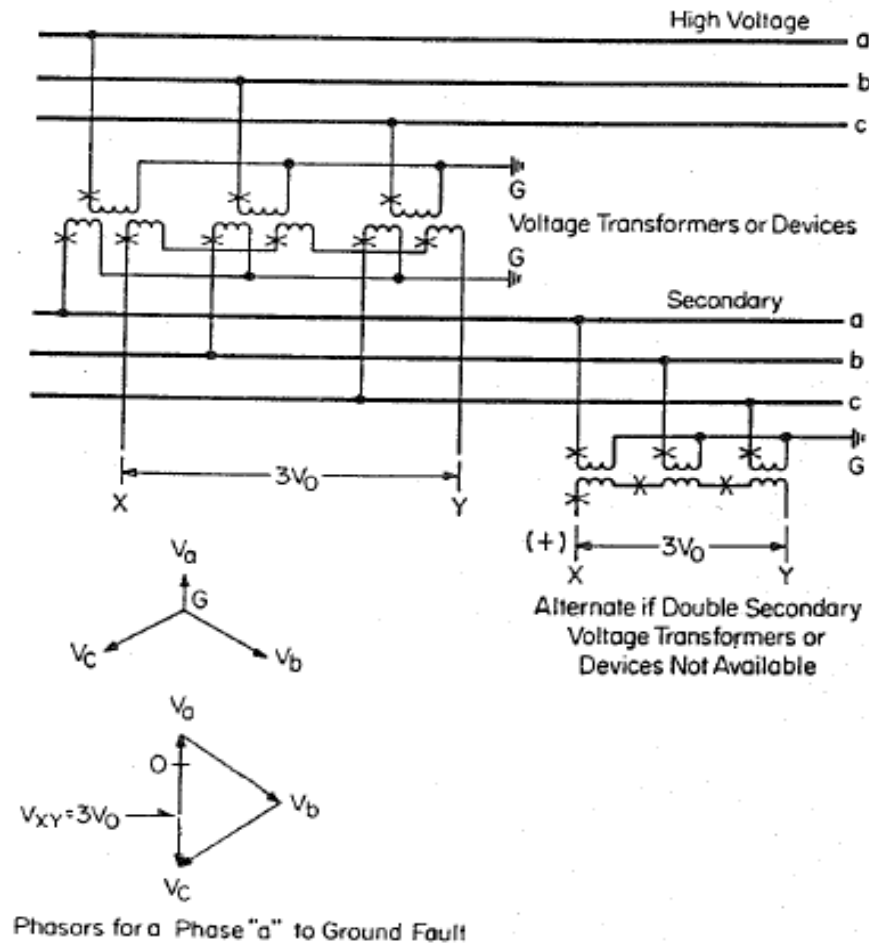
## Direccional de Tierra 67N

- Son contruidos sobre la base que el voltaje residual es igual a 3 veces la caída de voltaje de secuencia (0) en la impedancia fuente y desplazada con respecto a la corriente residual por el ángulo característica de la impedancia fuente.
- Cuando no tenemos PT'S disponibles para el voltaje de polarización, usamos corriente de polarización de la corriente de tierra de un transformador local conectado a tierra. Esta basado en el principio que la corriente neutral siempre fluye hacia el sistema desde tierra, mientras que dependiendo de la falla, la corriente residual puede fluir en cualquier dirección.



# Polarización Por Voltaje 67N

- El voltaje de secuencia cero en la barra o cercano a ella en un sistema inductivo puede ser usado para polarización.
- Este voltaje es obtenido de la delta rota, de los secundarios de los PT'S.
- El voltaje a través de la delta rota siempre es  $V_{xy}$ , igual a  $3V_0$ .

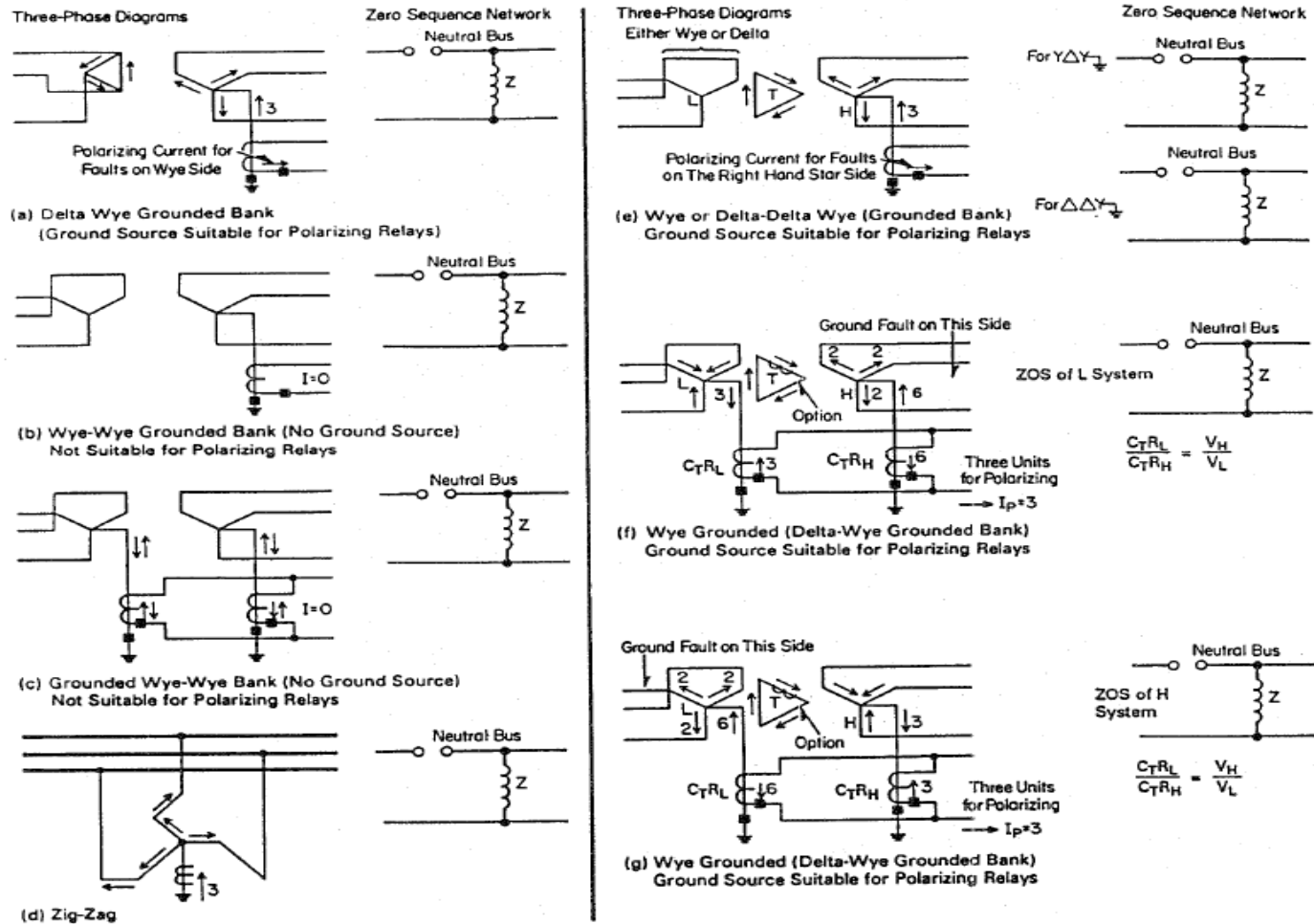


Fuente de voltaje de polarización de secuencia cero

# Polarización Por Corriente del 67N

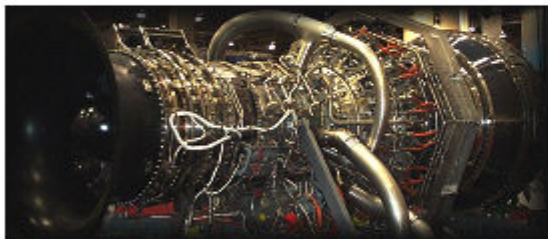
- La polarización depende de la disponibilidad y conexión del transformador de potencia en la localización del relé.
- La corriente en el neutral de un banco YnD, puede ser utilizada para polarización.
- Para fallas a tierra en el lado de la Y, la corriente sube hacia el neutral cuando la corriente fluye hacia la falla.
- Un TC en el neutral medirá  $3I_0$  para corriente de polarización  $I_p$ .
- Los bancos Y-Y, no pueden ser usados para polarización.

# Polarización Por Corriente del 67N



Polarización de secuencia cero de bancos de transformadores

# PROTECCION DE GENERADORES



# Introducción

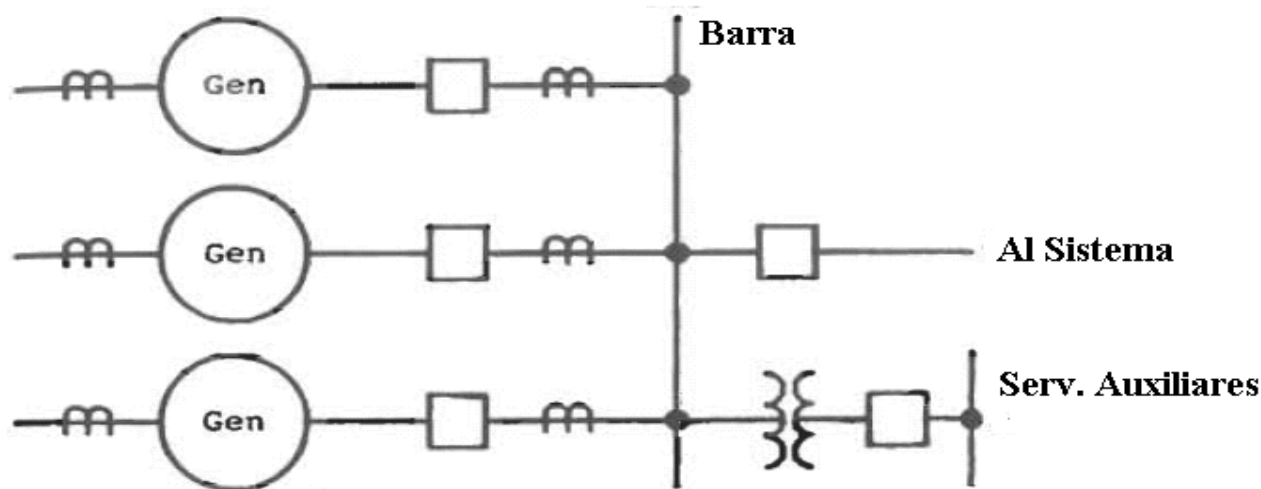
- Los generadores están sujetos a un número considerable de posibles peligros, para el cual la protección debe ser considerada.
  - Fallas Internas dentro de la zona de protección.
  - Operación anormal y/o condiciones anormales del sistema.
- La protección discutida es para el generador, el cual, es esencialmente diferente de la turbina. No importa el tipo de turbina, la protección del generador básicamente es la misma.

# Tipos de Fallas

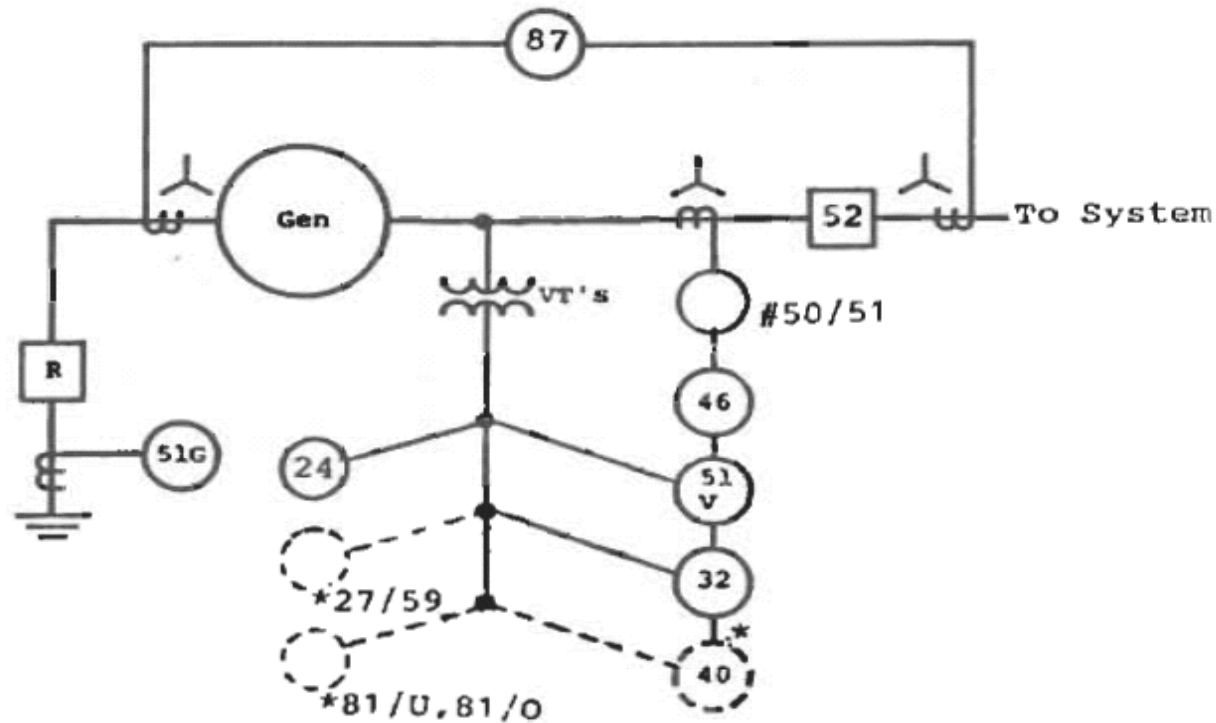
- Internas:
  - Fallas de fase y tierra en el estator y zona asociada de protección.
  - Falla a tierra en el rotor.
- Operación anormal y/o condiciones anormales del sistema:
  - Pérdida de excitación (40)
  - Sobrecarga (51, 51V)
  - Sobre voltaje (59)
  - Baja y sobre frecuencia (U81/O81)
  - Desbalance de corriente (46)
  - Motorización (32/ 51)
  - Energización inadvertida
  - Pérdida de sincronismo (78)
  - Oscilaciones Subsíncronas

# Conexión Directa

- **Conexión directa:** Los generadores son conectados directamente al bus de carga sin transformación de voltaje de por medio. Este tipo de conexión es un método recientemente usado en la industria para la conexión de generadores de tamaño pequeño.



# Elementos de Protección

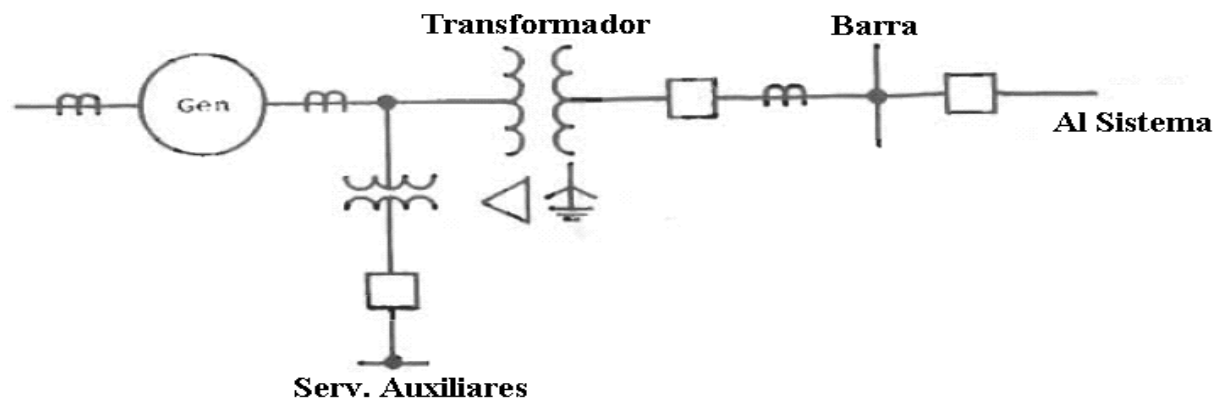


- Protección Típica para un generador conectado directamente. Las protecciones 27/59 y U81/O81 son mandatorias para los generadores que no son de la empresa y están conectados al sistema.

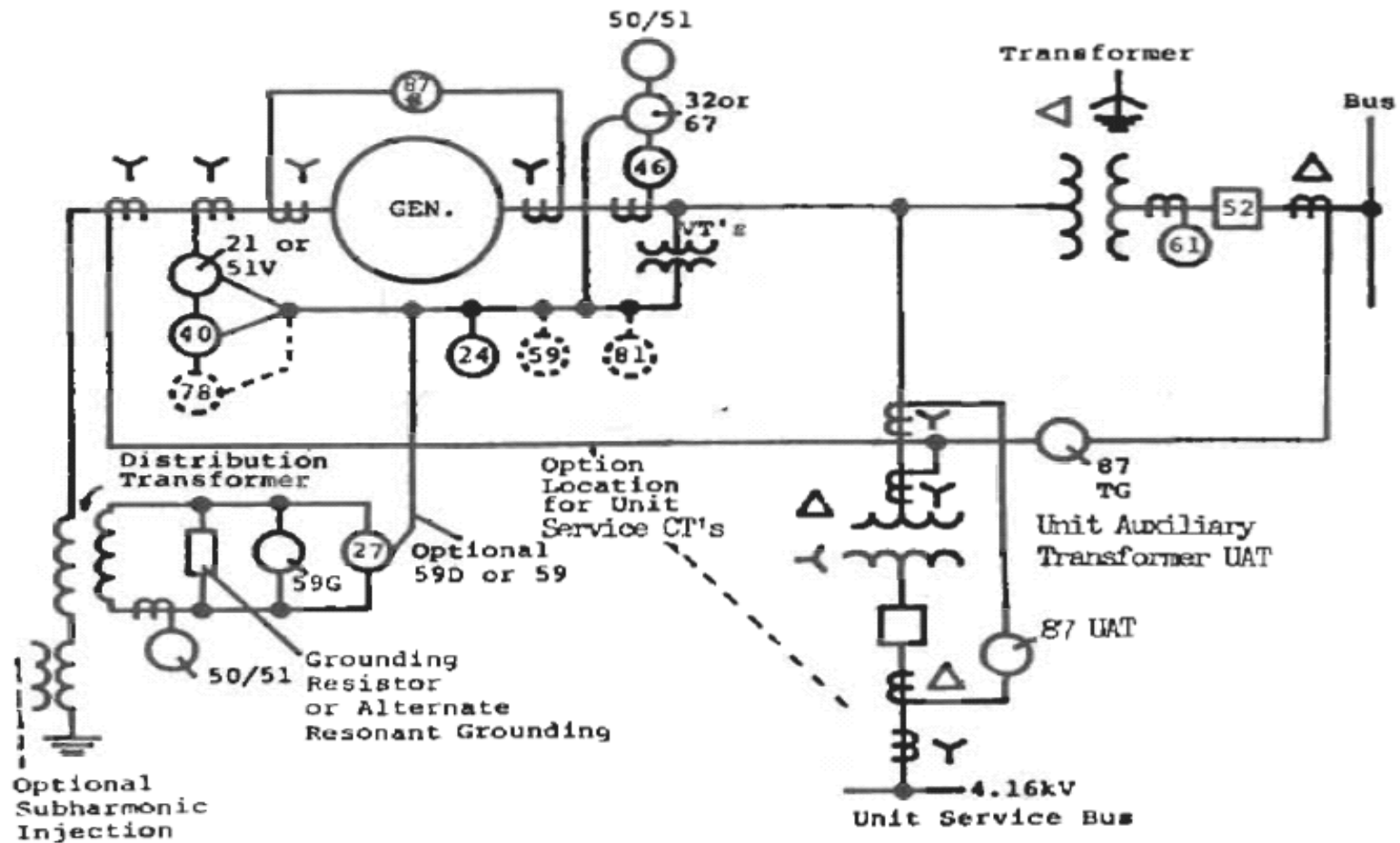


# Conexión Unitaria

- **Conexión unitaria:** El Gen. es conectado al SEP a través de un trafo dedicado. El Serv. auxiliar del generador es alimentado desde un trafo Auxiliar conectado a las terminales del generador. La mayoría de los generadores grandes son conectados al SEP de esta manera. Al tener la generación conectada a un sistema delta, las corrientes de falla a tierra pueden ser dramáticamente reducidas usando aterrizaje de alta impedancia.



# Elementos de Protección

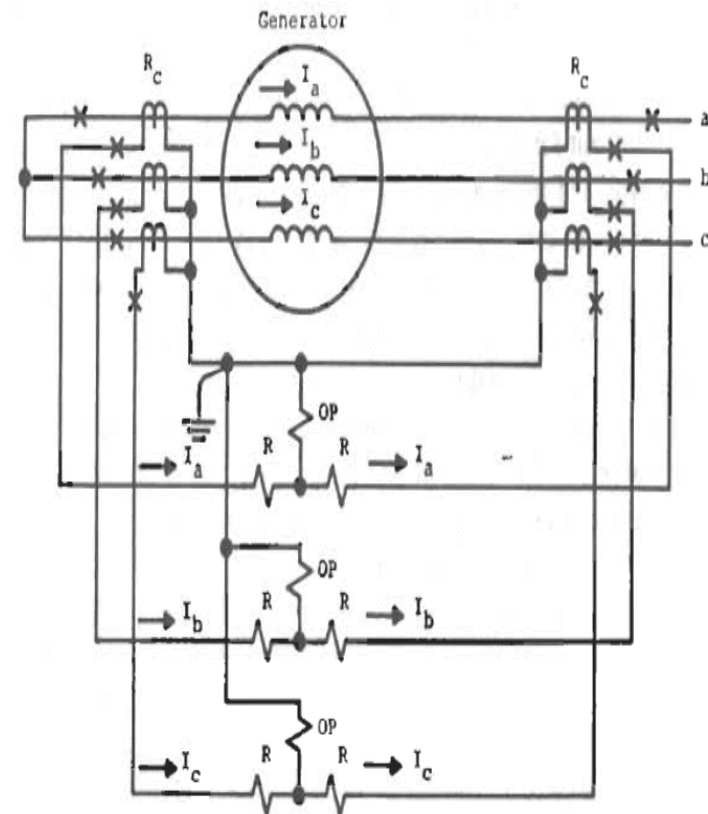


- Utilizados para la conexión unitaria y para grandes generadores

# Fallas Internas

# Protección Contra Fallas de Fase en el Estator

- Las fallas entre fase poco ocurren, pero cuando suceden, pueden ocasionar el flujo de grandes corrientes de fallas.
- Para este tipo de falla, se recomienda la protección diferencial para todos los generadores, excepto generadores pequeños ( 1MVA).
- La protección diferencial, dependiendo del tipo de aterrizaje usado, puede o no proteger contra fallas de fase a tierra.



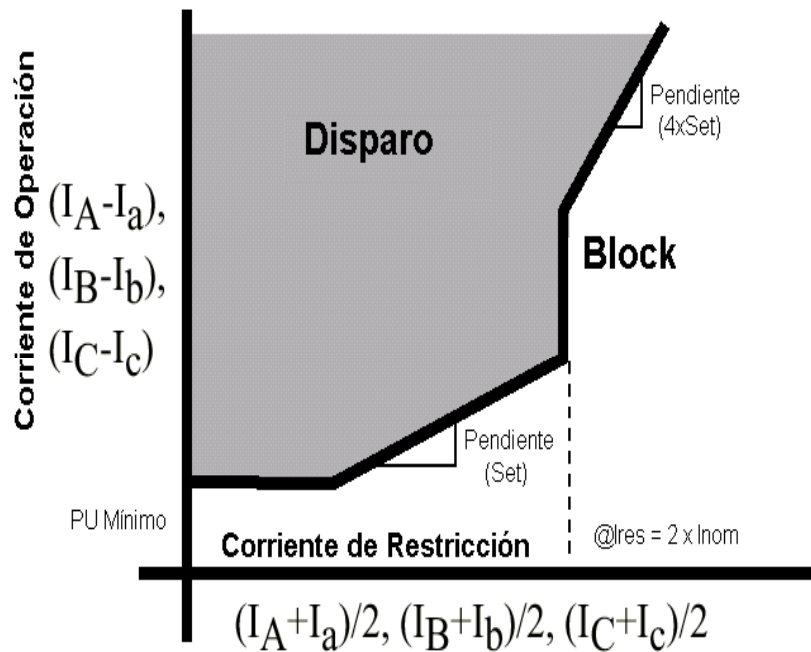
# Consideraciones en el Uso del 87G

- **Para incrementar el margen de desempeño de los CT'S y permitir el uso de relevadores 87G:**
  - Los CT'S diferenciales deben ser del mismo tipo y del mismo fabricante (Mismatch).
  - Preferiblemente no conectar ningún otro equipo en el circuito diferencial.
  - Mantener el burden de los conductores tan bajo como posible.
  - Un relevador diferencial no detectará una falla entre espiras en la misma fase debido a que la corriente que entra y sale del devanado no cambiará.
  - Normalmente la protección de fallas de fase del estator del generador no necesita ser relacionada con Inrush como en un esquema de protección de transformador, puesto que el voltaje del generador es creado lentamente cuando el campo es aplicado.

# Tipos de Protección Diferencial

- **Diferencial de porcentaje:** es más usada para máquinas grandes. La pendiente puede variar desde 5% a 50% ó más. Un relevador de porcentaje fijo es normalmente ajustado de 10 a 25%.

# Protección Diferencial % Variable M-3425



Tiempo de Respuesta Rápido, 0.5 ciclos.

Pendiente Ajustable.

(87) - PHASE DIFFERENTIAL CURRENT

Pickup: 0.20 0.20 Amp  3.00 Amp  87

Time Delay: 10 1 Cycle  8160 Cycles

Percent Slope: 5 1%  100%

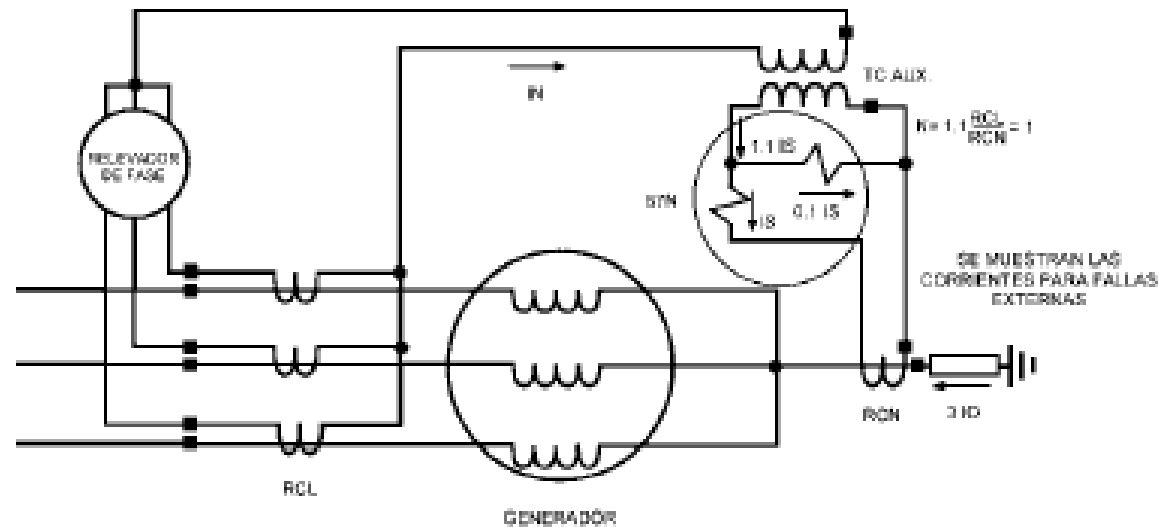
OUTPUT ☐ 8 ☐ 7 ☐ 6 ☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☒ 1

Blocking Input FL ☐ 6 ☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

@ : WARNING, You have not selected an output!

Save Cancel

# Protección De Falla A Tierra en el Estator



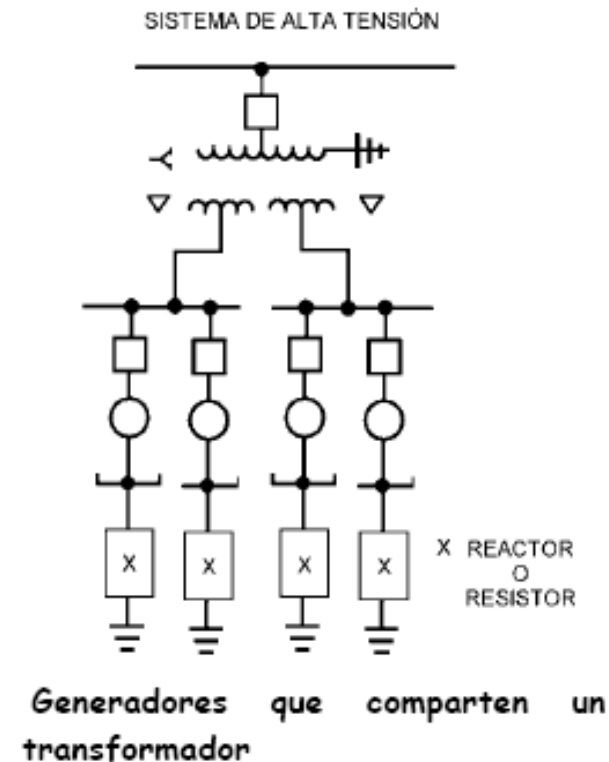
Diferencial de tierra del generador usando un relé tipo producto

- El método utilizado de puesta a tierra en una instalación determina el comportamiento de un generador durante condiciones de falla a tierra.
- Dos tipos de puesta a tierra ampliamente utilizados en la industria son:
  - **Baja Impedancia**
  - **Alta Impedancia**



# Puesta A Tierra De Baja Impedancia

- El resistor o reactor es seleccionado para limitar la corriente de falla a un rango entre 150 a 200% de la corriente de carga.
- Permite que los diferenciales de fase puedan proporcionar alguna protección contra fallas a tierra, sin embargo no puede proporcionar protección para todo el devanado.

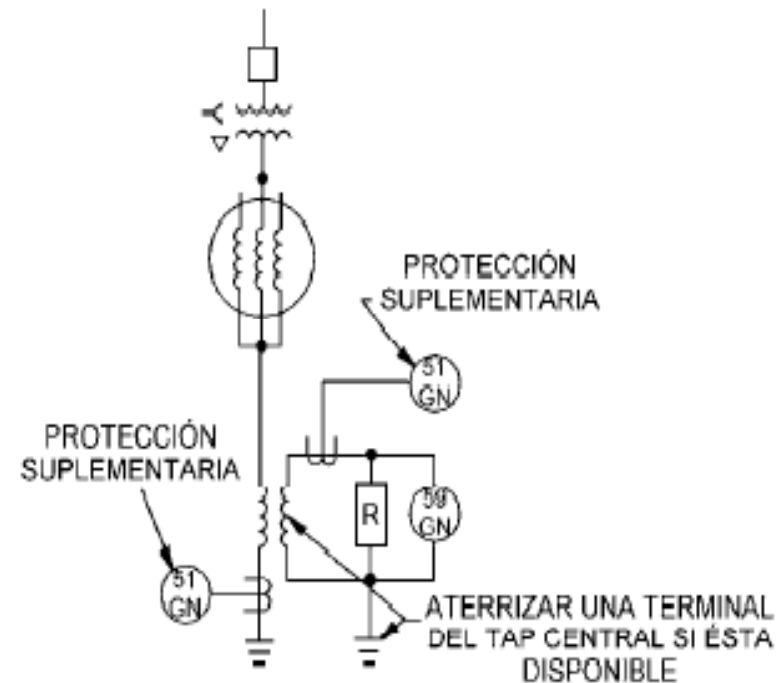


# Diferencial de secuencia Cero

- Se conecta diferencialmente un relevador direccional con dos bobinas de corriente entre el neutro físico del generador y el neutro de la conexión residual de los transformadores de corriente del generador.
- El sentido de disparo es seleccionado para responder a corto circuitos internos a tierra

# Puesta A Tierra De Alta Impedancia

- Es utilizado en sistema de conexión unitaria
- La puesta a tierra con alta resistencia utiliza un transformador de distribución.
- la resistencia secundaria es seleccionada para que la potencia disipada sea igual a los VAr.
- La corriente es limitada entre 3-25 amperios.



Generador puesto a tierra con alta impedancia

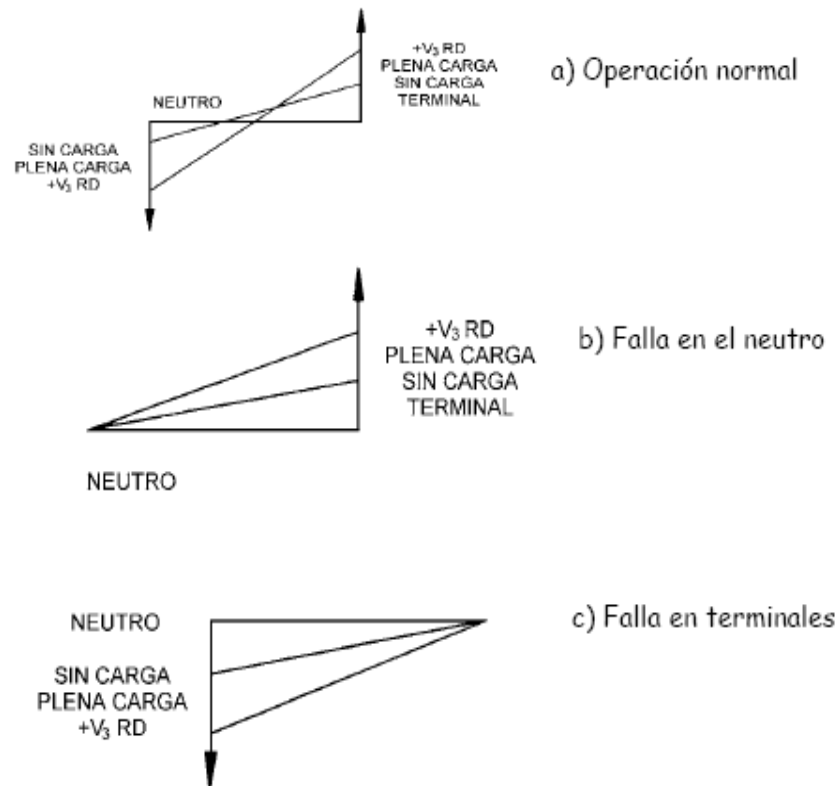
# Esquemas de Protección

- **Sobre tensión/corriente de neutro:**

- es el mas ampliamente utilizado, consiste de un relé de sobre tensión con retardo de tiempo (59GN) conectado a través del resistor de puesta a tierra para detectar tensión de secuencia cero.
- Este relé está diseñado para detectar solo voltaje de componente de frecuencia fundamental, es insensible a componente de frecuencia de tercer armónico, presentes en el neutro del generador.
- la tensión en el relé será máxima para fallas en los terminales y disminuirá a medida que la falla se mueva hacia el neutro del generador.
- Tiene un ajuste típico de 5 volts.
- Es capaz de detectar fallas hasta el orden del 2 al 5% al neutro del estator.
- El ajuste de tiempo es seleccionado para proporcionar coordinación con otros dispositivos de protección.

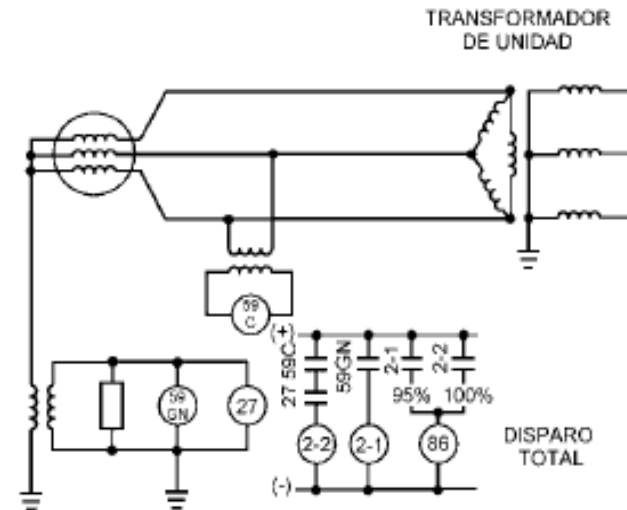
# Protección 100% Contra Fallas A Tierra

- La protección convencional contra fallas a tierra del estator solo protegen alrededor de 95% del devanado.
- Las técnicas para detección de fallas en el 5% restante del devanado:
  - Basadas en Tensión de tercera armónica.
  - Inyección de tensión residual o de neutro.



# Tensión de Tercera Armónica

- Las componentes de tensión de tercera armónica están presentes en los terminales de las maquinas en diferentes grados, dependiendo del diseño y fabricación.
- Las técnicas basadas en el uso de la tensión de tercera armónica se dividen en:
  - Baja Tensión de tercera armónica en el neutro.
  - Tensión Terminal residual de tercera armónica.
  - Comparador de tercera armónica.

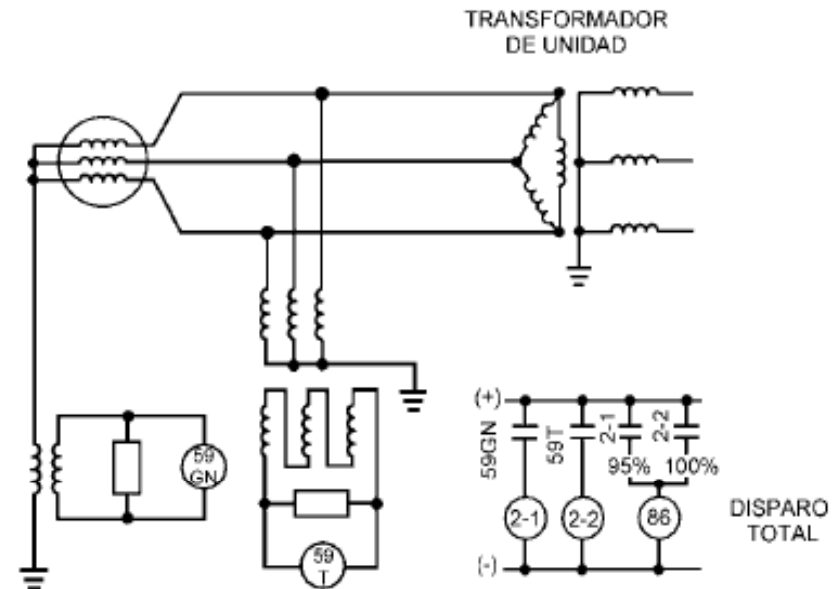


|          |                                                                                |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 59C      | Relé supervisor de sobretensión instantáneo.                                   |
| 59GN     | Relé de sobretensión sintonizado a la frecuencia fundamental (60 Hz).          |
| 27       | Relé de baja tensión sintonizado a la frecuencia de tercera armónica (180 Hz). |
| 2-1, 2-2 | Temporizadores.                                                                |

Un esquema de protección de falla a tierra de baja tensión de tercera armónica

# Tensión Terminal Residual de Tercera Armónica

- Para una falla cercana al neutro, el nivel de tensión en los terminales del generador se incrementa.
- Un relé de sobre tensión que emplea tensión de tercera armónica en los terminales de un generador puede ser utilizado.
- Ambos esquemas proporcionan protección de 100% a los devanados del estator.



59GN Relé de sobretensión sintonizado a la frecuencia fundamental (60 Hz).

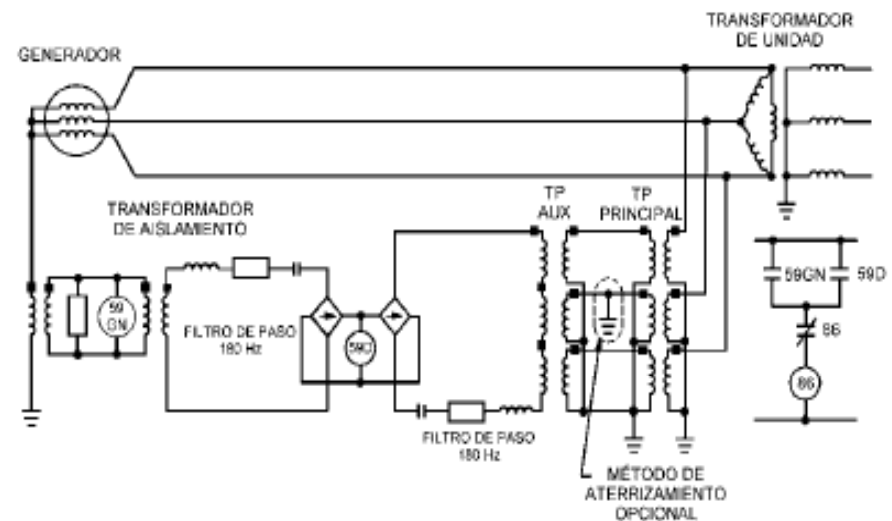
59T Relé de sobretensión sintonizado a la frecuencia de tercera armónica (180 Hz).

2-1. 2-2 Temporizadores

Esquema de protección de falla a tierra basado en la tensión residual en terminales de tercera armónica

# Comparador de Tercera Armónica

- Compara la magnitud de la tensión de tercera armónica en el neutro del generador con el de los terminales del generador.
- En condiciones normales la relación de tensión de tercera armónica entre los terminales y el neutro del generador es constante, variando cuando ocurre falla a tierra.
- Ambos esquemas proporcionan protección de 100% a los devanados del estator.



|      |                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 596N | Relé de sobretensión convencional<br>sintonizado a la frecuencia fundamental. |
| 59D  | Relé diferencial de tensión de tercera<br>armónica.                           |

Esquema de protección de falla a tierra basado en un comparador de tercera armónica



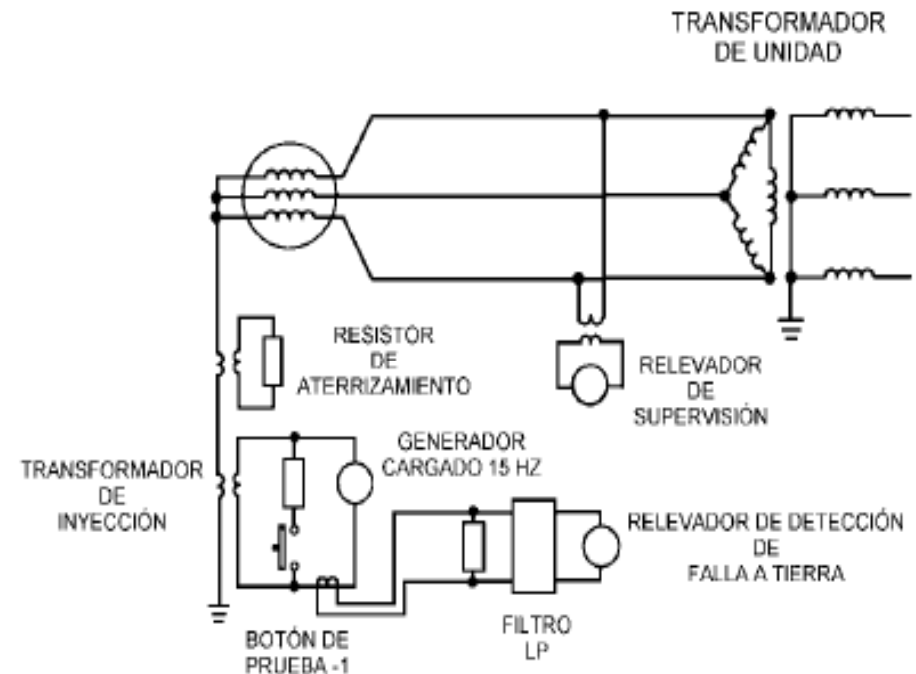
# Tercera Armónica Para un Generador Típico

| Carga de la Unidad |      | Tensión RMS de 180Hz |            | Relación de tensión en     |
|--------------------|------|----------------------|------------|----------------------------|
| MW                 | MVAR | Neutro               | Terminales | Terminal/Tensión en neutro |
| 0                  | 0    | 2.8                  | 2.7        | 1.08                       |
| 7                  | 0    | 2.5                  | 3.7        | 1.48                       |
| 35                 | 5    | 2.7                  | 3.8        | 1.41                       |
| 105                | 25   | 4.2                  | 5.0        | 1.19                       |
| 175                | 25   | 5.5                  | 6.2        | 1.13                       |
| 340                | 25   | 8.0                  | 8.0        | 1.00                       |

Magnitudes de tensiones de tercera armónica para un Generador típico.

# Inyección de Tensión

- Debido a variaciones del diseño, ciertas unidades podrían no producir suficientes tensiones de tercera armónica.
- Detecta fallas a tierra inyectando una tensión en el neutro o residualmente en un secundario de un PT en delta rota.
- La protección completa está disponible cuando el generador está en torna flecha y durante el arranque.



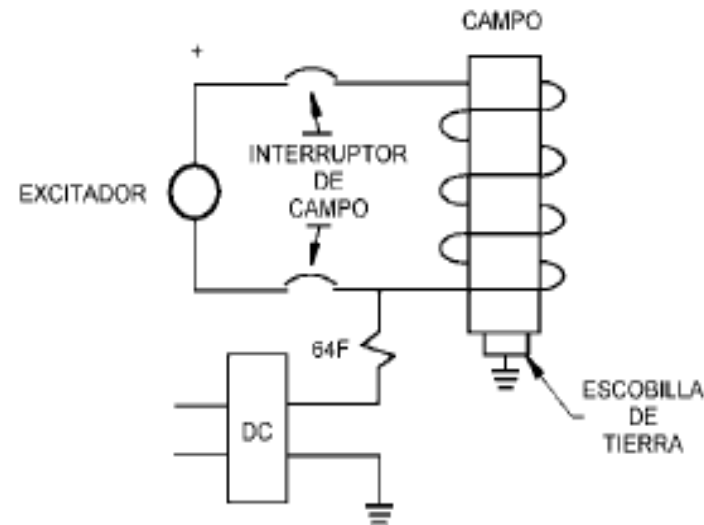
Esquema de inyección de tensión sub-armónico para protección de falla a tierra

# Falla a Tierra en el Circuito de Excitación

- El circuito de excitación en los generadores está aislado con tierra.
- Cuando ocurre un primer contacto con tierra, prácticamente no circula corriente y no hay problemas para el generador. La existencia de ese contacto con tierra incrementa el esfuerzo dieléctrico de otros puntos del devanado de campo cuando en este se inducen voltajes por efectos de procesos transitorios en el estator de la máquina.
- Cuando ocurre un segundo contacto con tierra, parte del devanado de campo puede quedar sin corriente de excitación, pues esta tiende a circular por el hierro del rotor entre los dos puntos de falla. Dando lugar a un desbalance magnético que puede provocar una vibración muy severa.
- Otro problema es el calentamiento local que sufre el rotor en los puntos de falla, llegando a distorsionarlo y puede ser causa de vibraciones.

# Falla a Tierra en El Campo

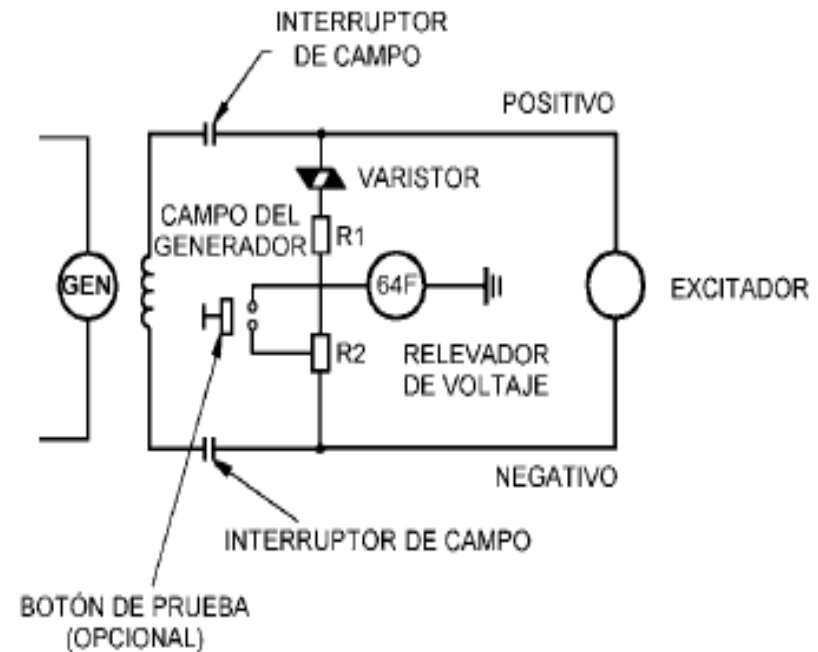
- Algunos generadores tienen sistemas de detección de contacto a tierra en el circuito de excitación, y protecciones de tipo mecánico contra vibraciones.
- Es practica generalizada dotar a todos los generadores de una protección externa contra contacto con tierra en el circuito de excitación.
- Por lo general se emite una alarma con el primer contacto a tierra, hasta que se pueda sacar la unidad de servicio.



DETECCIÓN DE TIERRA EN EL CAMPO  
USANDO UNA FUENTE DE C.D.

# Divisor Resistivo Contra Falla a Tierra

- Relé de voltaje directa de alta sensibilidad.
- Cuando ocurre un primer contacto con tierra, aparece un voltaje en el relé que depende de la ubicación de la falla y de la excitación.
- Hay un zona muerta en el esquema, para eliminar esta zona, se usa un resistor no lineal



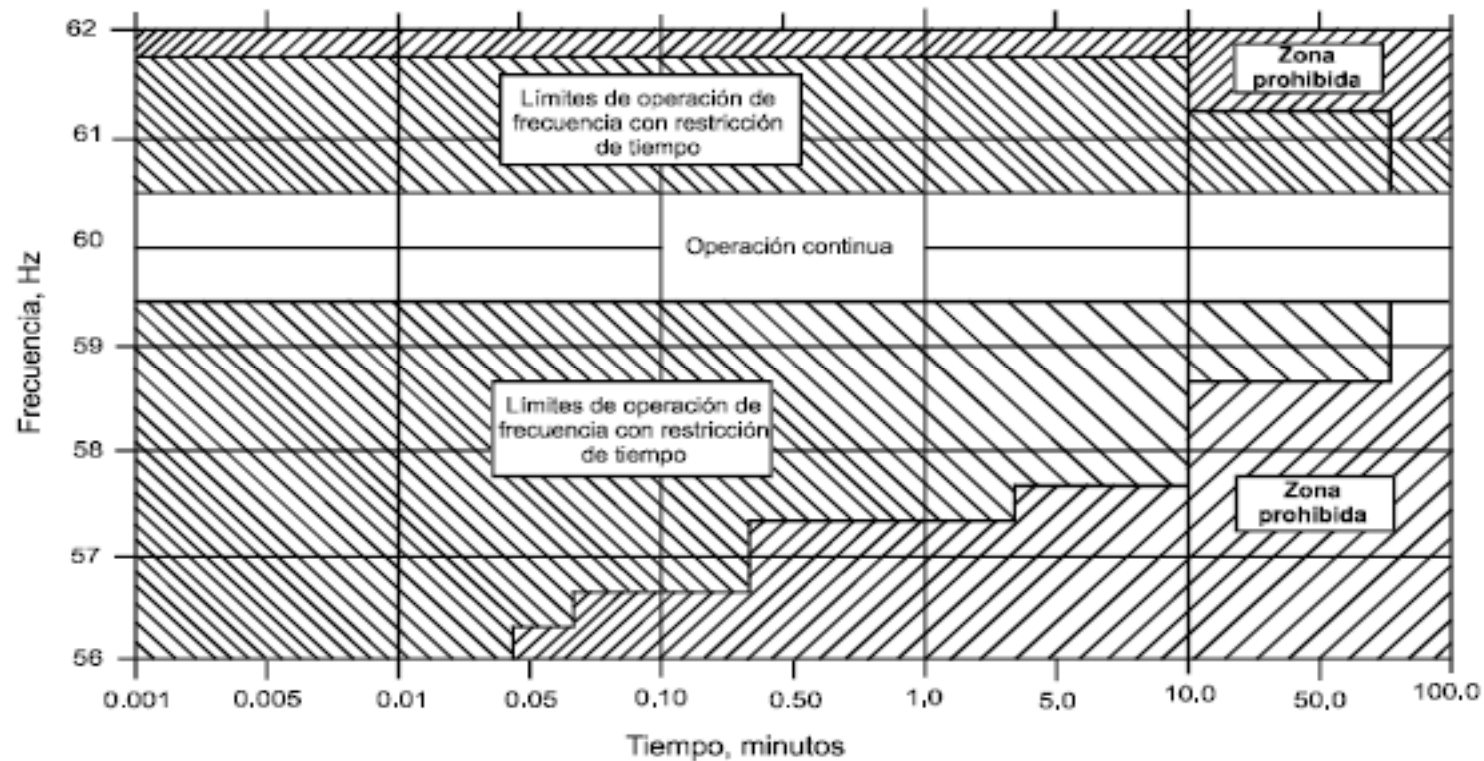
DETECCIÓN DE TIERRA EN EL CAMPO  
USANDO UN DIVISOR DE TENSIÓN

# Fallas Externas o Condiciones Anormales de Operación

# Protección Contra Frecuencia Anormal

- Tanto el generador como la turbina están limitados en el grado de operación a frecuencia anormal.
- La protección primaria de baja frecuencia para generadores de turbinas de gas y vapor, se proporciona por la implementación de un programa de corte de carga automático.
- La protección de respaldo para condiciones de baja frecuencia es proporcionada por el uso de uno o mas relés de frecuencia y temporizadores en cada generador.
- En generadores hidráulicos la protección de sobre frecuencia es utilizada como respaldo de dispositivo de sobre velocidad mecánicos.

# Limites de Operación Turbinas de Vapor



Límites de operación típicos de turbinas de vapor a carga parcial o plena durante frecuencia anormal.

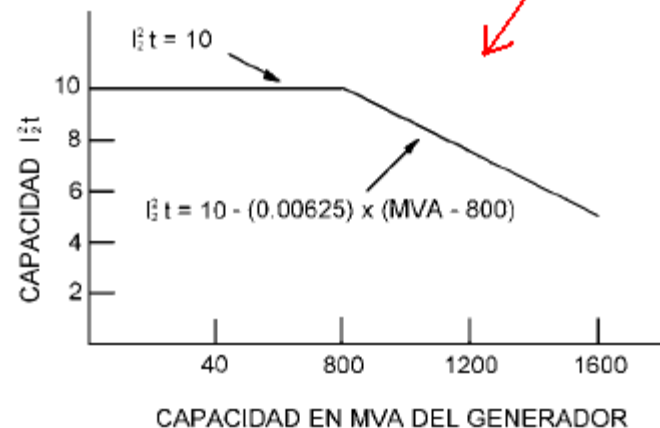


# Corrientes Desbalanceadas

- Las corrientes desbalanceadas en el estator de un generador induce corrientes de doble frecuencia en el hierro del rotor. Las mismas circulan por la superficie del rotor y sus partes no magnéticas produciendo calentamiento excesivo. Las corrientes de (-), pueden llegar a producir fuertes vibraciones provocando daños adicionales a la maquina.
- La Norma ANSI establece limites expresado como  $I_2^2 * t = k$
- Algunos fabricantes consideran admisibles la operación prolongada con corrientes de fase diferentes entre si por 10% para turbogeneradores y 20% para hidrogeneradores. Siempre que ninguna de las corrientes sea mayor a la nominal.

# Valores de K para Generadores

| TIPO DE GENERADOR                        | K<br>$I_2^2 t$ permisible |
|------------------------------------------|---------------------------|
| Generador de Polo Saliente               | 40                        |
| Condensador Sincrónico                   | 30                        |
| Tiempo del generador de rotor cilíndrico |                           |
| • Enfriado indirectamente                | 20                        |
| • Enfriado directamente (0-800 MVA)      | 10                        |
| • Enfriado directamente (801-1600 MVA)   | Ver figura                |

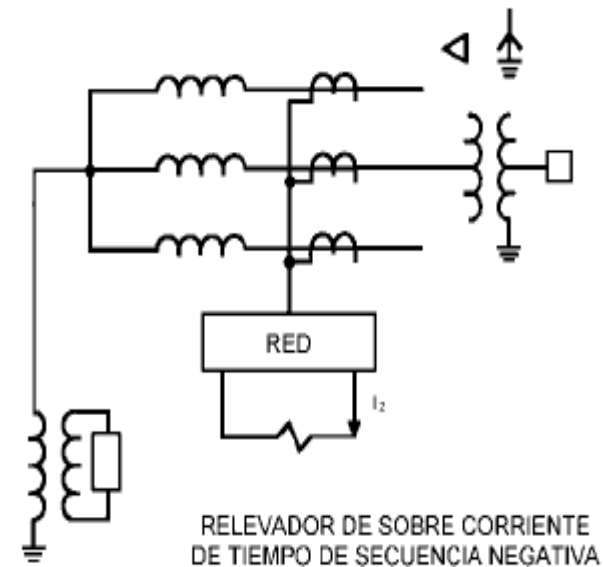


# Valores Permitidos de I<sub>2</sub>

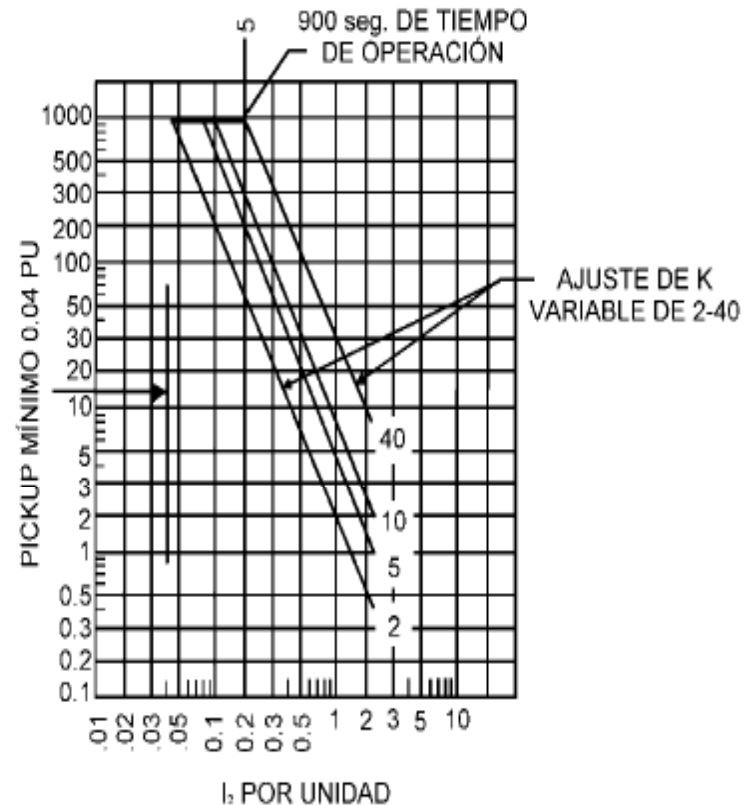
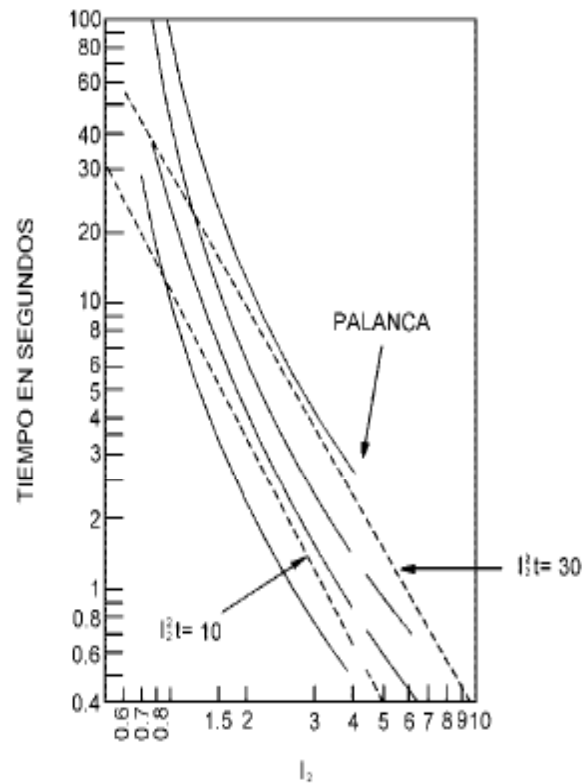
| TIPO DEL GENERADOR                                | I <sub>2</sub><br>PERMISIBLE<br>(Porcentaje de la<br>capacidad del<br>estator) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Polos Salientes</b>                            |                                                                                |
| • Con devanados de amortiguamiento<br>Conectado   | 10                                                                             |
| • Con devanado de amortiguamiento No<br>Conectado | 5                                                                              |
| <b>Rotor Cilíndrico</b>                           |                                                                                |
| • Enfriado indirectamente                         | 10                                                                             |
| • Enfriado directamente a 960 MVA                 | 8                                                                              |
| • a 1200 MVA                                      | 6                                                                              |
| • 1201 a 1500 MVA                                 | 5                                                                              |

# Relé de Secuencia Negativa

- Consiste de un circuito de segregación de secuencia negativa alimentado por las componentes de fase y/o residual, las cuales controlan una función de relé de sobre corriente de tiempo.
- Tipos de relés:
  - Electromecánico (curva de tiempo Inverso) pickup: 0.6 - 0.7
  - Digital o estático (curvas de capacidad) pickup: 0.3 - 0.2



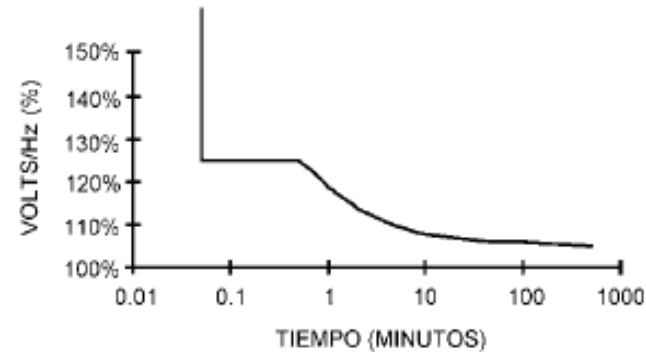
# Curvas Tiempo Corriente



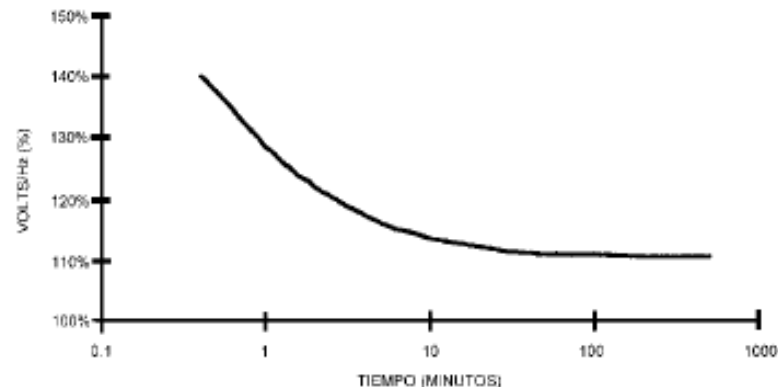
- Generador de 800 MVA, enfriamiento directo con factor  $K$  de 10, el generador puede manejar 0.6 pu de corriente de secuencia negativa por aproximadamente 28 segundos.

# Protección de Sobreexcitación

- La sobreexcitación de un generador o transformador conectado a los terminales del generador, ocurre cuando la relación Volts por Herz (V/Hz) aplicada a los terminales del equipo excede los límites de diseño.
- **Límites según ANSI:**
  - Generadores: 1.05 pu (en base del generador)
  - Transformadores: 1.05 pu (en base secundario del transformador) a carga nominal y f.p. de 0.8



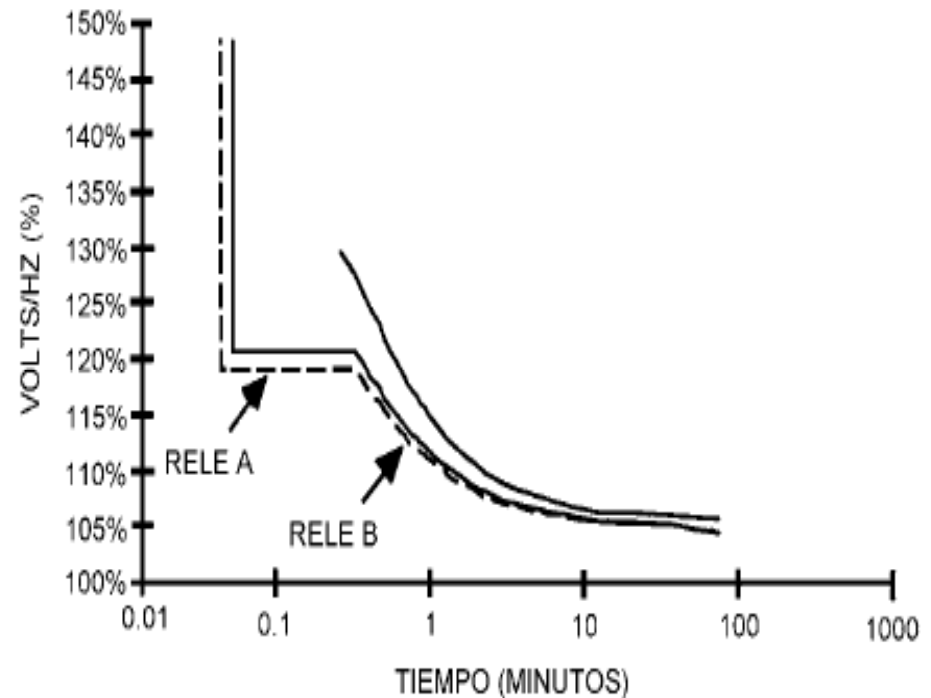
Curva típica de límite para la operación de V/Hz para un generador.



Curva típica de límite para la operación de V/Hz para un transformador de potencia.

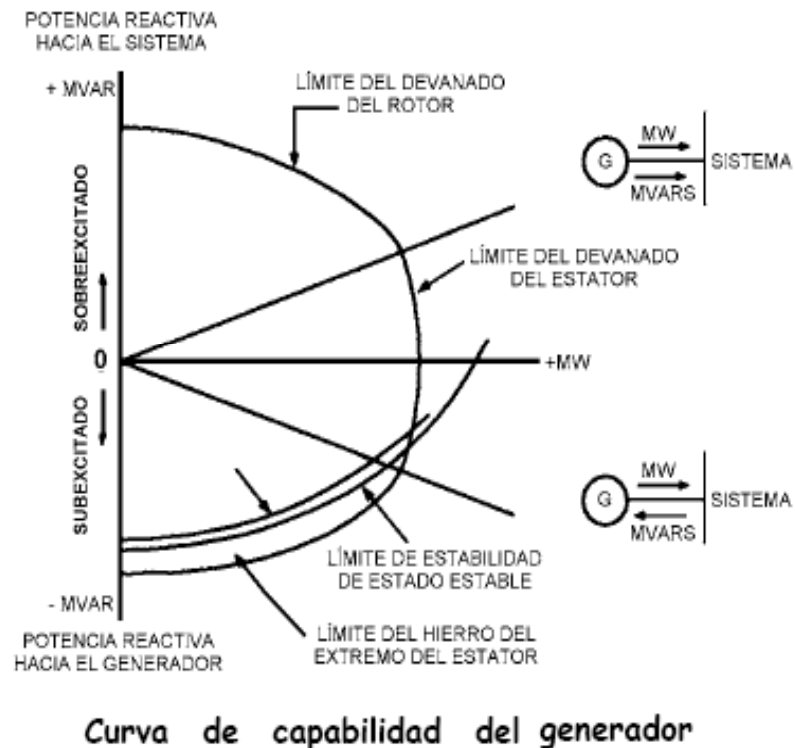
# Esquemas de Protección de Sobreexcitación

- **Esquemas Utilizados:**
  - **Nivel Simple:** Tiempo definido.
  - **Nivel Dual:** Tiempo Definido:
  - **Tiempo Inverso**
- Los relés de tiempo inverso proporcionan la protección y flexibilidad de operación optima.



# Perdida de Campo

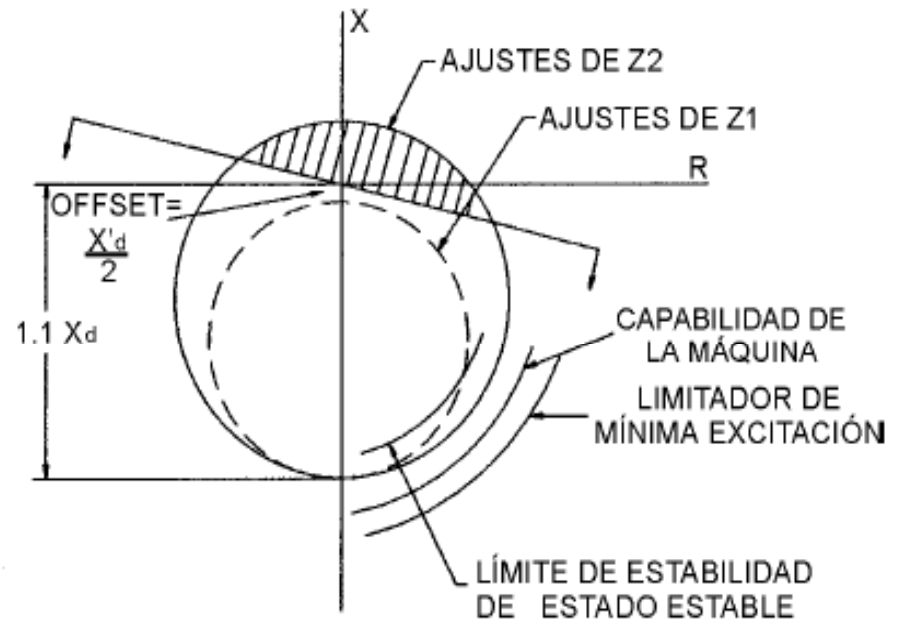
- Los generadores sincronos se operan normalmente sobreexcitado, de modo que entregan MVAR al sistema, además de MW.
- Cuando perdemos la excitación, la maquina se convierte en un generador de inducción
  - **Suministra MW al sistema**
  - **Consume MVAR del sistema** (200 a 400% de MVA nominal).
- En maquinas de rotor cilíndrico, turbogeneradores, puede haber calentamiento en el rotor capaz de dañarlo en orden de varios minutos.





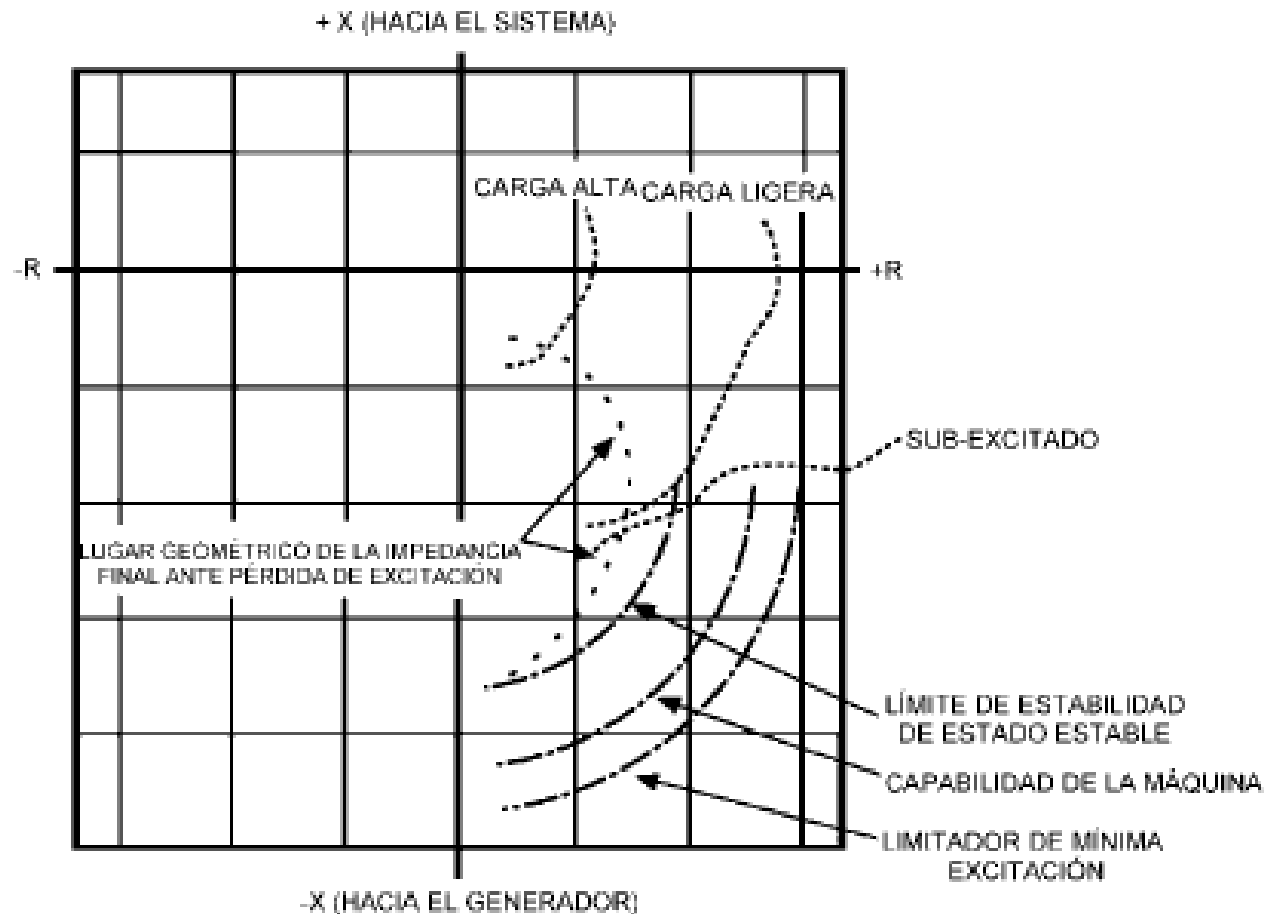
# Protección Contra Pérdida de Campo

- El método más empleado para detectar pérdida de campo de un generador es el uso de un relevador de distancia (21), para detectar la variación de impedancia vista desde los terminales del generador
- **Ajuste:**
  - **Característica circular:  $X_d$**  (reactancia sincrónica)
  - **Offset:  $0.5 \cdot X'_d$**  (mitad de la reactancia transitoria).
- **El tiempo de operación:** ajustado de 0.5 a 0.6 segundos para evitar operaciones incorrecta.



Protección de pérdida de campo usando una unidad de impedancia y un elemento direccional

# Variación de la Z, Según Nivel de Carga



Características de pérdida de campo del generador

# Motorización De Un Generador

- Cuando la potencia mecánica de entrada a un generador se reduce hasta tal punto que no llega a cubrir las perdidas, la maquina suple el déficit absorbiendo potencia activa del sistema, convirtiéndose en un motor sincrónico.
- Como la excitación no cambia, el flujo de VAr se mantiene inalterable y si la maquina estaba sobreexcitada consume potencia activa y entrega potencia reactiva. Si la maquina estaba subexcitada, consume potencia activa y reactiva.
- La motorización no es una condición dañina para el generador, pero puede serlo para la turbina y para el sistema.

# Efectos de la Motorización

| Tipo de Generadores | Efecto en el Generador                                                                                     | Efecto en la Turbina                                                                          | Efecto en el Sistema                                                                                  |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turbogenerador      | No hay problema con el generador.                                                                          | Sobrecalentamiento por flujo insuficiente de vapor                                            | No hay problema, el turbogenerador motorizado representa una carga pequeña 4% de la potencia nominal. |
| Hidrogeneradores    | No hay problema, en caso donde no hay peligro de cavitation, pueden operar como condensadores sincronicos. | Por lo general no hay problema, solo hay que considerar la cavitation por bajo flujo de agua. | No hay problema, el Hidrogenerador motorizado representa una carga pequeña 2% de la potencia nominal. |
| Combustion Interna  | No hay problema con el generador.                                                                          | Es intolerable, puede producir explosion del motor, por efecto del combustible no quemado.    | Es perjudicial para el sistema, la carga impuesta puede estar entre 15 y 25% de la potencia nominal.  |
| Turbinas de Gas     | No es peligrosa para el generador                                                                          | No es peligrosa para la turbina.                                                              | Es perjudicial para el sistema, la carga impuesta puede estar entre 10 y 50% de la potencia nominal.  |

# Protección Contra Motorización

- En los generadores por lo general existe una protección contra esta condición, pero es recomendable la instalación de una protección eléctrica adicional.
- Se logra con un relevador de potencia inversa (32), que es un relè direccional que responde a la inversión del flujo de potencia activa del generador, con ajuste de retardo de tiempo de 2 segundos.

# Protección Contra Sobre Voltaje

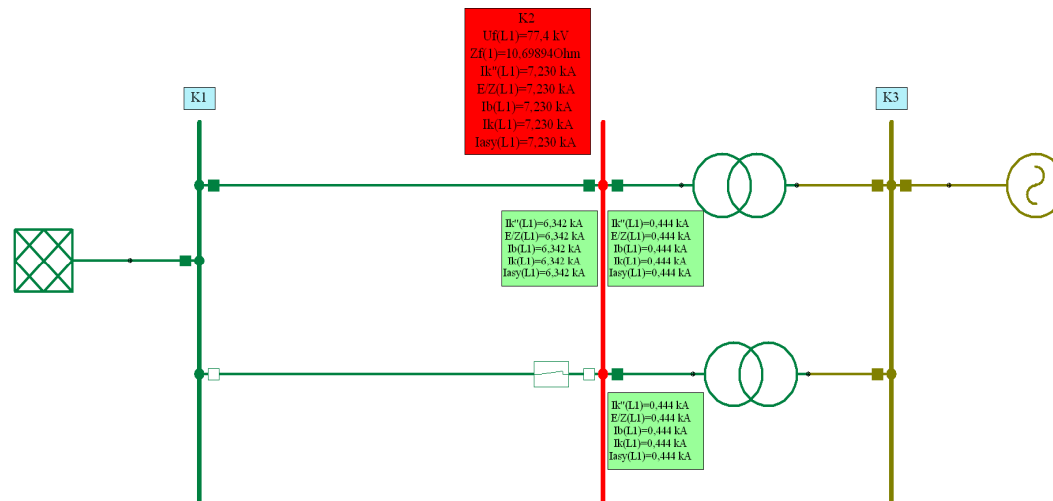
- Los generadores no deben ser sometidos a sobre voltajes prolongados, ya que por lo general funcionan en un punto cercano a la rodilla de saturación de la curva de magnetización. Los sobre voltajes provocan valores altos de flujo y considerable distorsión y como resultado calentamiento.
- En condiciones normales el regulador de voltaje controla la corriente de excitación y mantiene el voltaje dentro de los limites establecidos.

# Disparos de Las Protecciones Del Generador

1. El dispositivo 59 puede ser conectado para disparo en unidades Hidrogeneradoras.
2. Si el generador está fuera de línea, dispara únicamente al interruptor de campo.
3. Refiérase a la sección sobre "Puesta a tierra del Estator" para protección de tierra al 100%.
4. Puede ser conectado para disparar por el fabricante del generador.

| Dis-<br>posi-<br>tivo | Disparo del<br>Interruptor<br>del Generador | Disparo del<br>Interruptor<br>de Campo | Transferencia<br>De<br>auxiliares | Disparo<br>de la<br>Turbina | Unica-<br>mente<br>alarma |
|-----------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 21 ó<br>51V           | X                                           |                                        |                                   |                             |                           |
| 24                    | X                                           | Nota 2                                 | X                                 | X                           |                           |
| 32                    | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 40                    | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 46                    | X                                           |                                        |                                   |                             |                           |
| 49                    |                                             |                                        |                                   |                             | X                         |
| 51GN                  | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 51TN                  | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 59                    | Nota 1                                      |                                        |                                   |                             | X                         |
| 59G<br>N              | X                                           | X                                      | X                                 | X                           | Nota 3                    |
| 61                    |                                             |                                        |                                   |                             | X                         |
| 63                    | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 64F                   | Nota 4                                      | Nota 4                                 |                                   |                             | X                         |
| 71                    |                                             |                                        |                                   |                             | X                         |
| 78                    | X                                           |                                        |                                   |                             |                           |
| 81                    | X                                           |                                        |                                   |                             |                           |
| 87G                   | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 87T                   | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |
| 87U                   | X                                           | X                                      | X                                 | X                           |                           |

# SOFTWARE DE SIMULACION





# SELECCIÓN DEL SOFTWARE

- Hay una gran variedad de paquetes computacionales para cálculos de corto circuito, los cuales varían en:
  - Variedad de tareas analítica que desarrollan.
  - Grado de sofisticación en la interfase de usuario.
  - Plataforma computacional por la cual son diseñados
  - Precio
- La compra de un paquete computacional, debe estar de acuerdo:
  - A los requerimientos del sistema a ser evaluado.
  - La precisión del estudio.
  - Que tan amigable es la interfase de usuario del software

# SELECCIÓN DEL SOFTWARE

- Es esencial adquirir software que:
  - Sean bien documentados.
  - Tengan un buen soporte técnico.
  - Que sean regularmente actualizado por sus vendedores.

# CARACTERISTICAS DEL SOFTWARE

| Características de Análisis               | Muy Deseable | Deseable | Opcional |
|-------------------------------------------|--------------|----------|----------|
| Sistema con mas de 1 nivel de voltaje     | SI           |          |          |
| Topología Radial y en Anillo              | SI           |          |          |
| Fallas a Tierra (LG, LLG)                 | SI           |          |          |
| Fallas Series                             |              | SI       |          |
| Fallas de Arco                            |              |          | SI       |
| Fallas Simultaneas                        |              |          | SI       |
| Aritmética Compleja                       | SI           |          |          |
| Secuencia Negativa explicita              |              |          | SI       |
| Interfase con Flujo de Carga              |              | SI       |          |
| Corriente en todas las 3 Fases            | SI           |          |          |
| Corriente en todas las 3 Secuencias       | SI           |          |          |
| Contribuciones de Falla fuera de la Barra | SI           |          |          |
| Monitores de Línea                        |              | SI       |          |
| Reportes de Datos de Entrada              | SI           |          |          |
| Interfase de Coordinación de Protección   |              | SI       |          |
| Voltajes en Barras no Falladas            |              | SI       |          |
| Sumario de Reporte                        |              | SI       |          |
| Corrientes en todos los Ramales           |              | SI       |          |
| Datos en PU de lo equipos                 |              | SI       |          |
| Ajuste de impedancia de Maquinas          |              | SI       |          |

## CONTINUACION DE CARACTERISTICAS

| <b>Características de Análisis</b>                         | <b>Muy Deseable</b> | <b>Deseable</b> | <b>Opcional</b> |
|------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Contribuciones de Falla Local Y Remota</b>              | <b>Mandatorio</b>   |                 |                 |
| <b>Corrientes de Fallas de Primer Ciclo</b>                | <b>Mandatorio</b>   |                 |                 |
| <b>Corriente de Fallas de Interrupcion</b>                 | <b>Mandatorio</b>   |                 |                 |
| <b>Corriente de Fallas con Retardo de tiempo</b>           |                     | <b>SI</b>       |                 |
| <b>Factores de Multiplicacion de Corrientes Simetricas</b> | <b>SI</b>           |                 |                 |
| <b>Factores de Multiplicacion de Corriente Total</b>       | <b>SI</b>           |                 |                 |
| <b>Factores de Multiplicacion</b>                          | <b>SI</b>           |                 |                 |
| <b>X/R - Multiplicadores dependiente de 1/2 ciclo</b>      |                     |                 | <b>SI</b>       |
| <b>X/R - Multiplicadores dependiente de Pico</b>           |                     | <b>SI</b>       |                 |
| <b>Transformadores de Cambio de Fase</b>                   | <b>SI</b>           |                 |                 |
| <b>Acoplamiento Mutuo de Secuencia Cero</b>                |                     |                 | <b>SI</b>       |
| <b>Metodologia de Acuerdo a IEC60909 (1988)</b>            |                     | <b>SI</b>       |                 |
|                                                            |                     |                 |                 |

# PAQUETES DE SOFTWARES COMERCIALES

- ASPEN ONELINER
- CAPE
- NEPLAN
- POWERWORLD SIMULATOR
- DIGSILENT
- PSSE-PTI

# RELES MICROPROCESADOS