

**gasNatural**  
**fenosa**



# Protecciones en Subestaciones

**José Luis Ramos Suárez**  
Estudios de Protecciones - PyT

**5 de Septiembre de 2012**  
**IES Universidade Laboral (Haciadama – A Coruña)**





## INDICE

- Estructura del Sistema Electrico
- Sistema de MT. Explotación Radial
- Sistema trifásico. Características y propiedades
- Análisis de la falta trifásica. Ejemplos
- Proteccion para faltas trifásicas. Relés de sobreintensidad. Ajustes típicos
- Régimen de neutro y su importancia
- Faltas monofásicas. Comportamiento de las tensiones



## INDICE (cont.)

- Neutro aislado.
  - Importancia de las corrientes capacitivas y su distribución en falta monofásica.
  - Ejemplos
  - Protección para faltas a tierra. Relés direccionales. Ajustes típicos.
  - Sensibilidad. Faltas resistivas.
- Bobina Petersen.
- Política de reenganche.
- Falta serie.
- Falta inversa.



## ÍNDICE (cont.)

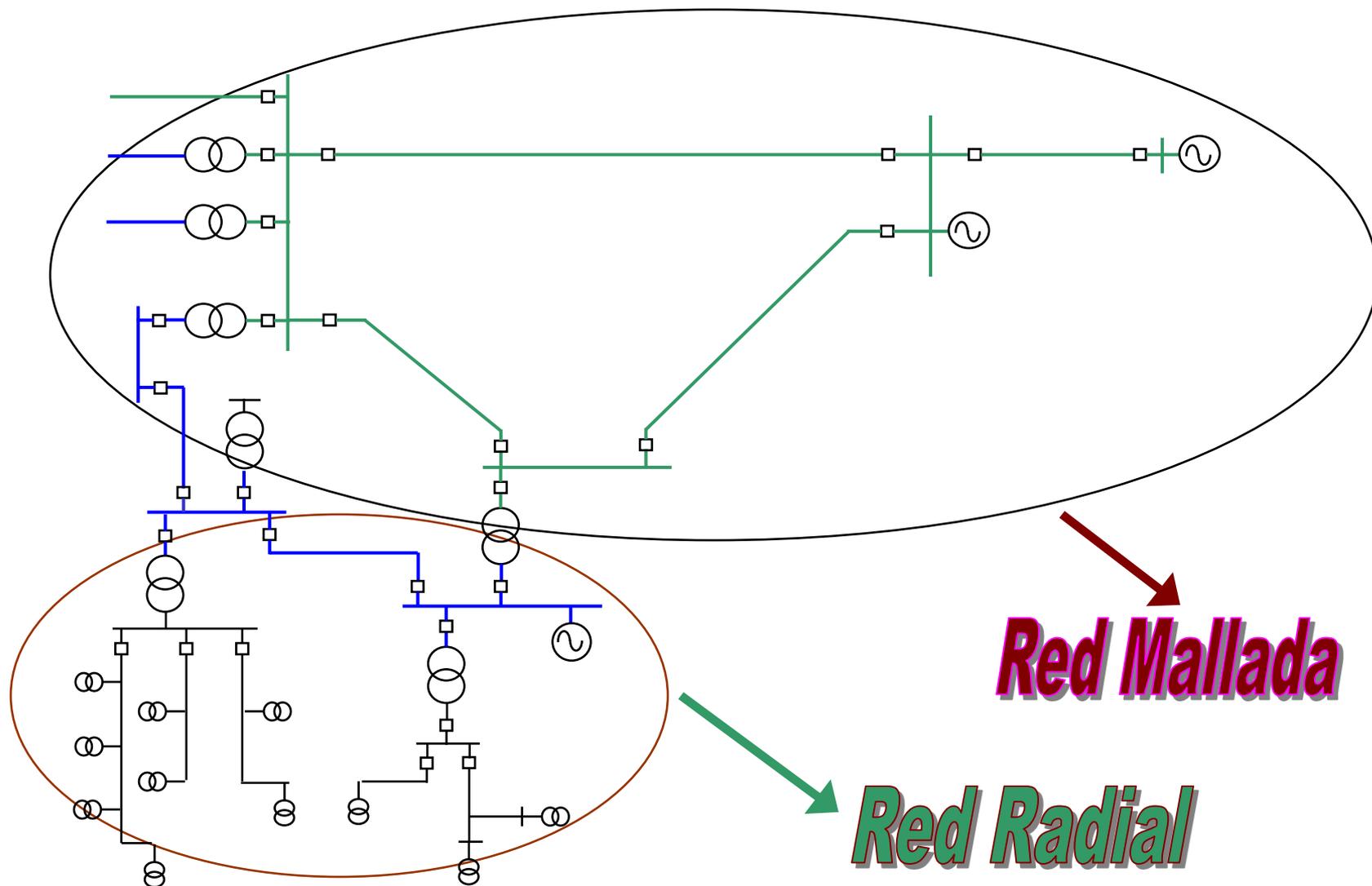
- Problemas más frecuentes en explotación
  - Disparo de varias líneas
  - Disparo de trafo AT/MT
  - No Disparo

Anexo 1: Cálculos de puesta a tierra.

Anexo 2: Fotografías de la red de tierras.

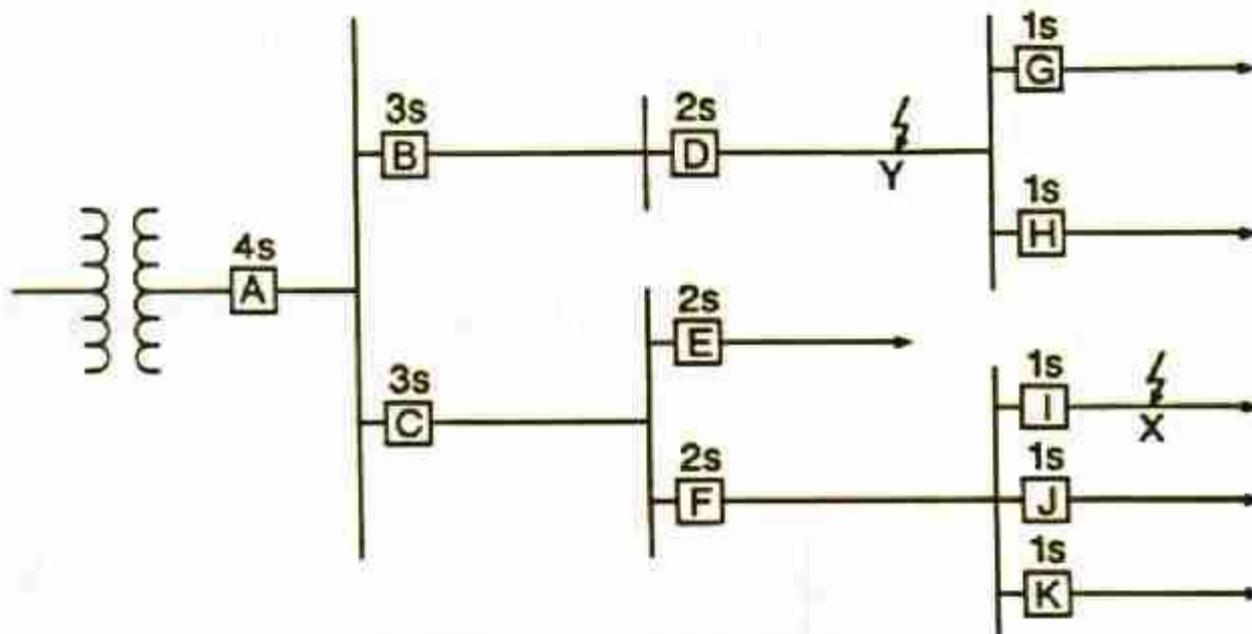


## Estructura del Sistema Eléctrico



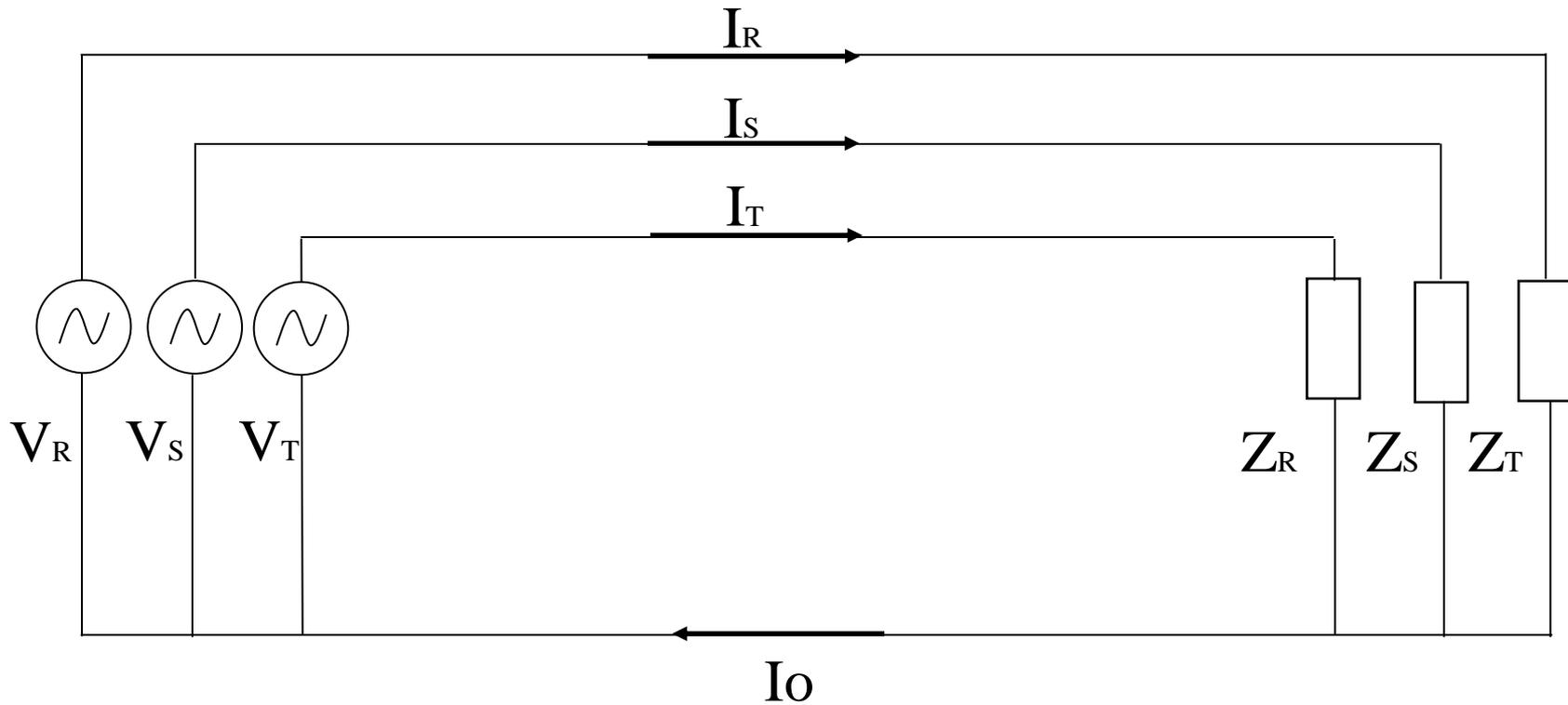


## Explotación radial





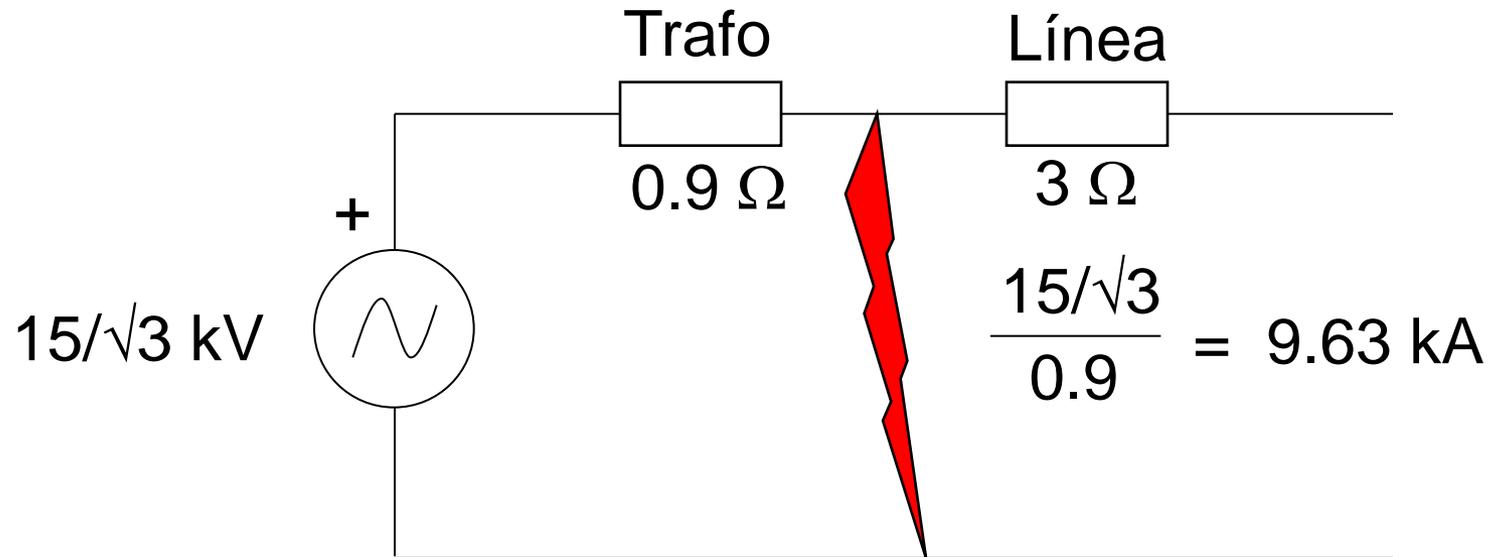
## Sistema trifásico



Si  $Z_R = Z_S = Z_T$ , entonces:  $I_R = I_S = I_T$  y  $I_o = 0$



## Faltas trifásicas ejemplo: falta en barras



Trafo 45/15 kV  
25 MVA  
Ucc = 10 %

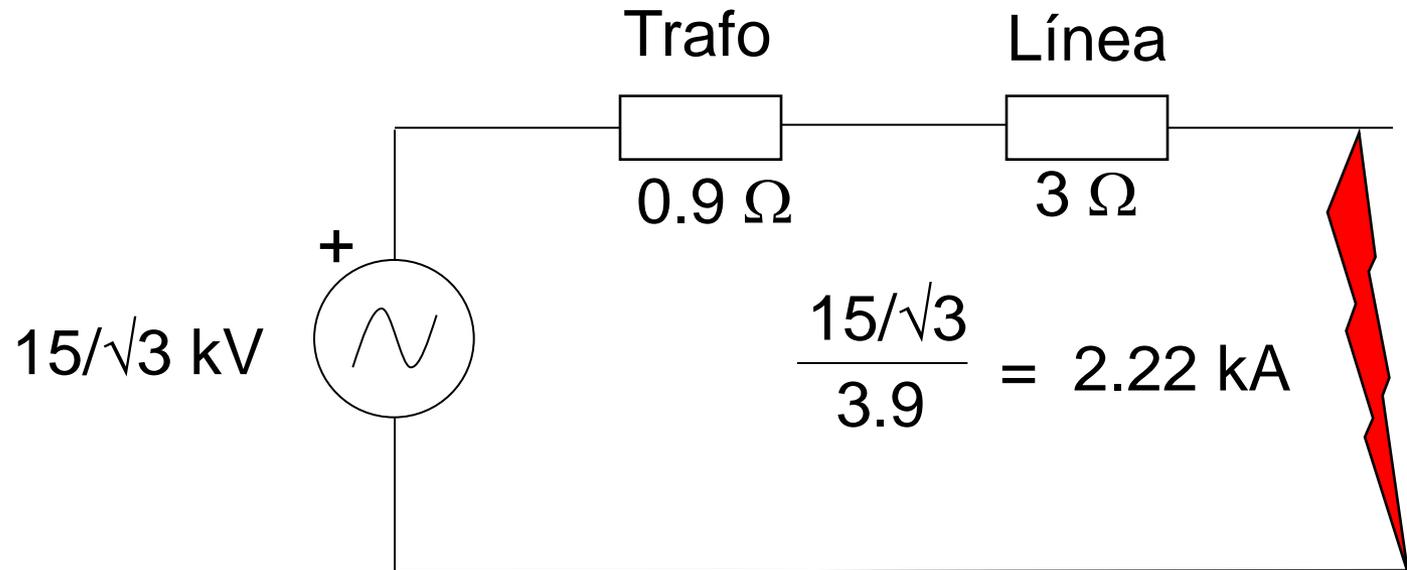
$$\frac{15^2}{25} \cdot \frac{10}{100} = 0.9 \Omega$$

Línea 10 km  
0.3 Ω/km

$$10 \cdot 0.3 = 3 \Omega$$



## Faltas trifásicas ejemplo: Falta en línea



Trafo 45/15 kV  
25 MVA  
Ucc = 10 %

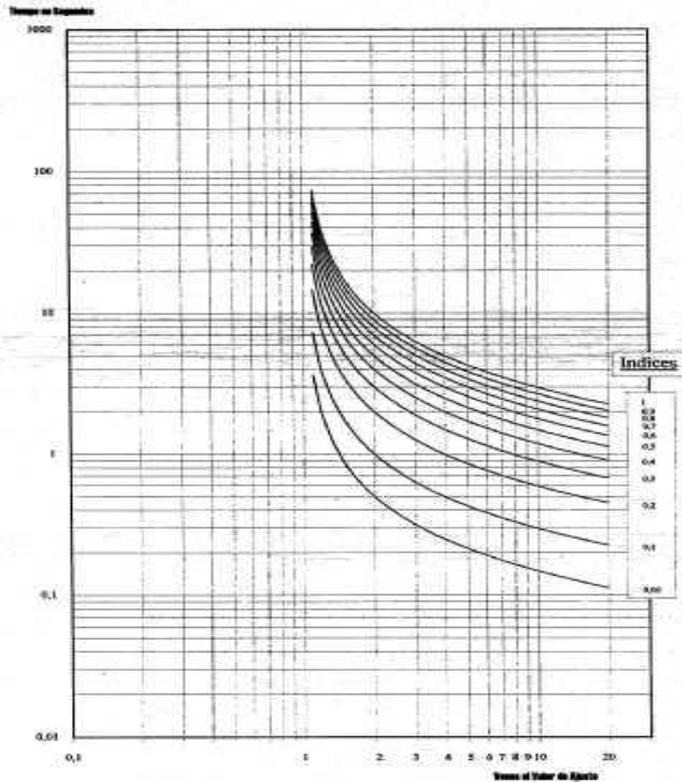
$$\frac{15^2}{25} \cdot \frac{10}{100} = 0.9 \Omega$$

Línea 10 km  
0.3 Ω/km

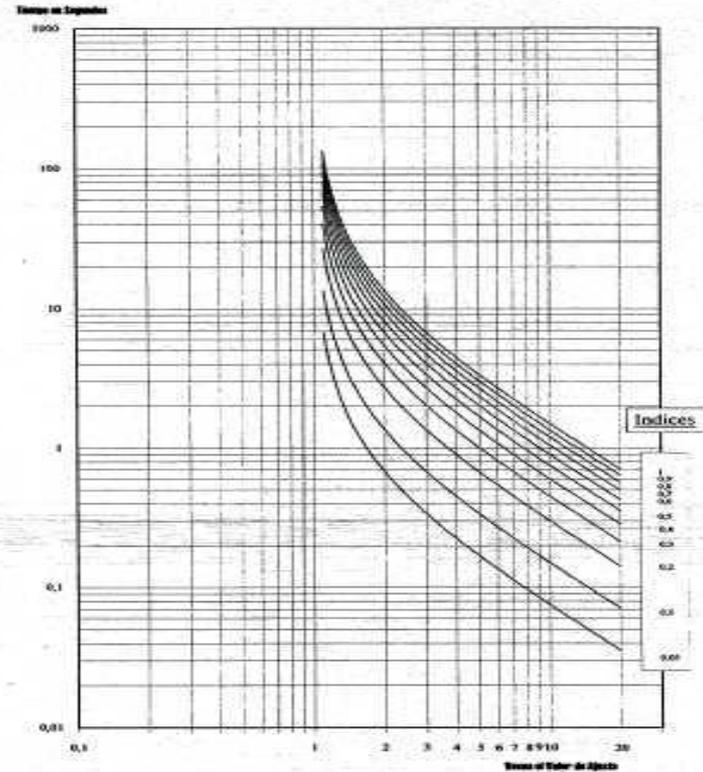
$$10 \cdot 0.3 = 3 \Omega$$



## Sobreintensidad de fases Curvas de actuación



Característica  
**INVERSA**



Característica  
**MUY INVERSA**

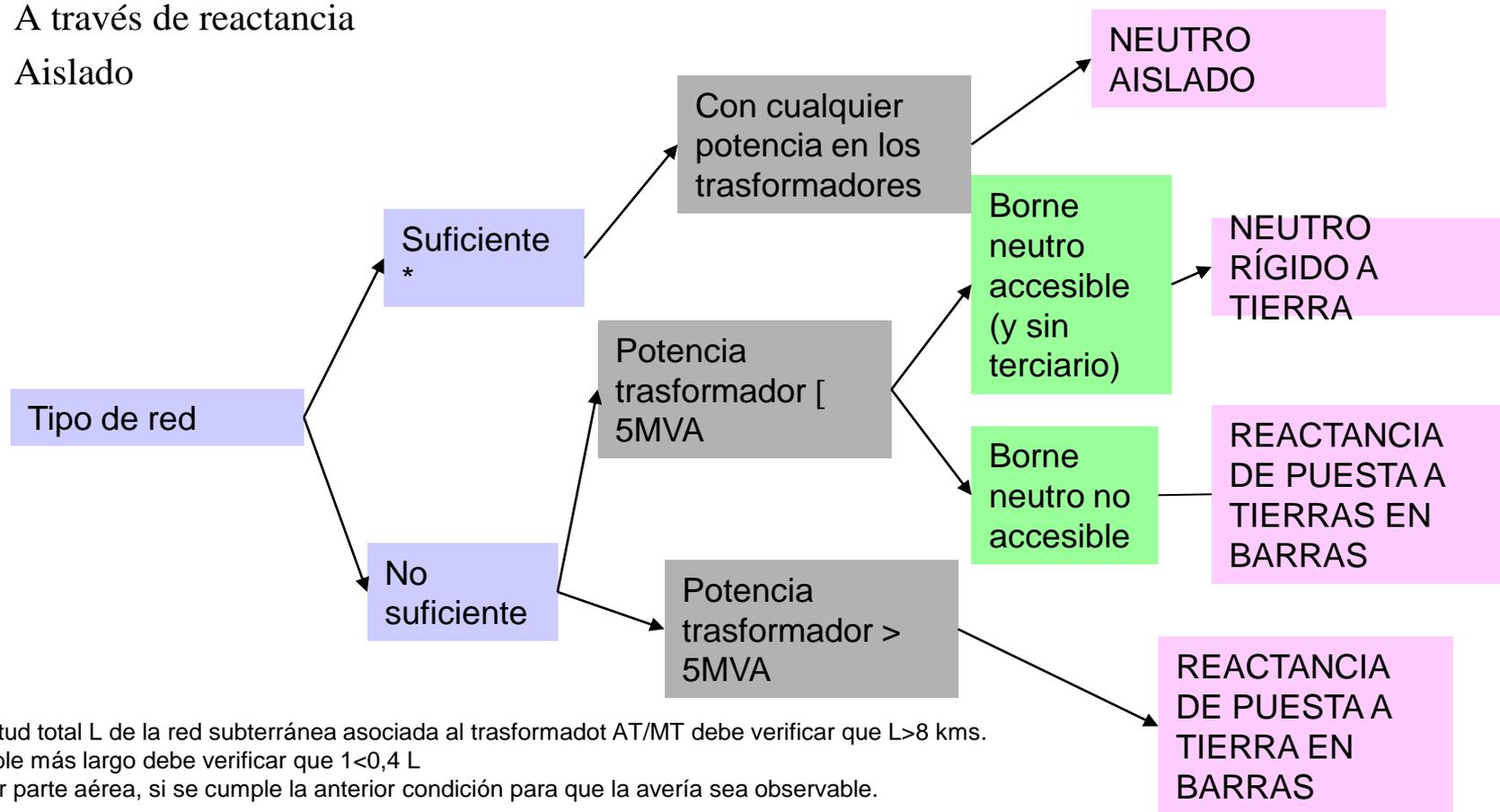


## Sobreintensidad de fases: Ajustes típicos

- Arranque en  $1,2 I_n$
- Curva Normal Inversa  $k=0.1$
- Instantáneo en  $6 I_n$
- Arranque del trafo por encima de las líneas
- Margen de tiempos  $0.5$  s mínimo



- Formas más comunes de conectar el neutro a tierra en redes de distribución de MT:
  - Rígido
  - A través de resistencia
  - A través de reactancia
  - Aislado





- **FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TRATAMIENTO DEL NEUTRO**

- **1. Niveles de intensidad de falta monofásica a tierra:**

- depende fundamentalmente del tipo de puesta a tierra de la red, distinguiéndose tres tipos de redes:
  - Redes con neutro directamente a tierra
  - Redes con limitación de la intensidad de falta mediante una resistencia y/o reactancia de puesta a tierra
  - Redes de neutro aislado
- El nivel de intensidad de la falta monofásica a tierra incide directamente en las instalaciones de MT afectando a:
  - Seguridad de las personas
  - Costes en la realización de las puestas a tierra
  - Interferencias en las líneas de telecomunicaciones
  - Continuidad de servicio
  - Costes de aparamenta y mantenimiento



- **FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TRATAMIENTO DEL NEUTRO**

- **2. Solicitudes dieléctricas:**

- Para determinar el nivel de aislamiento de los elementos de un Sistema eléctrico es necesario analizar las sobre tensiones que aparecen por:
  - Faltas monofásicas
  - Maniobras de interruptores
  - ferroresonancia

- **3. Ferroresonancia:**

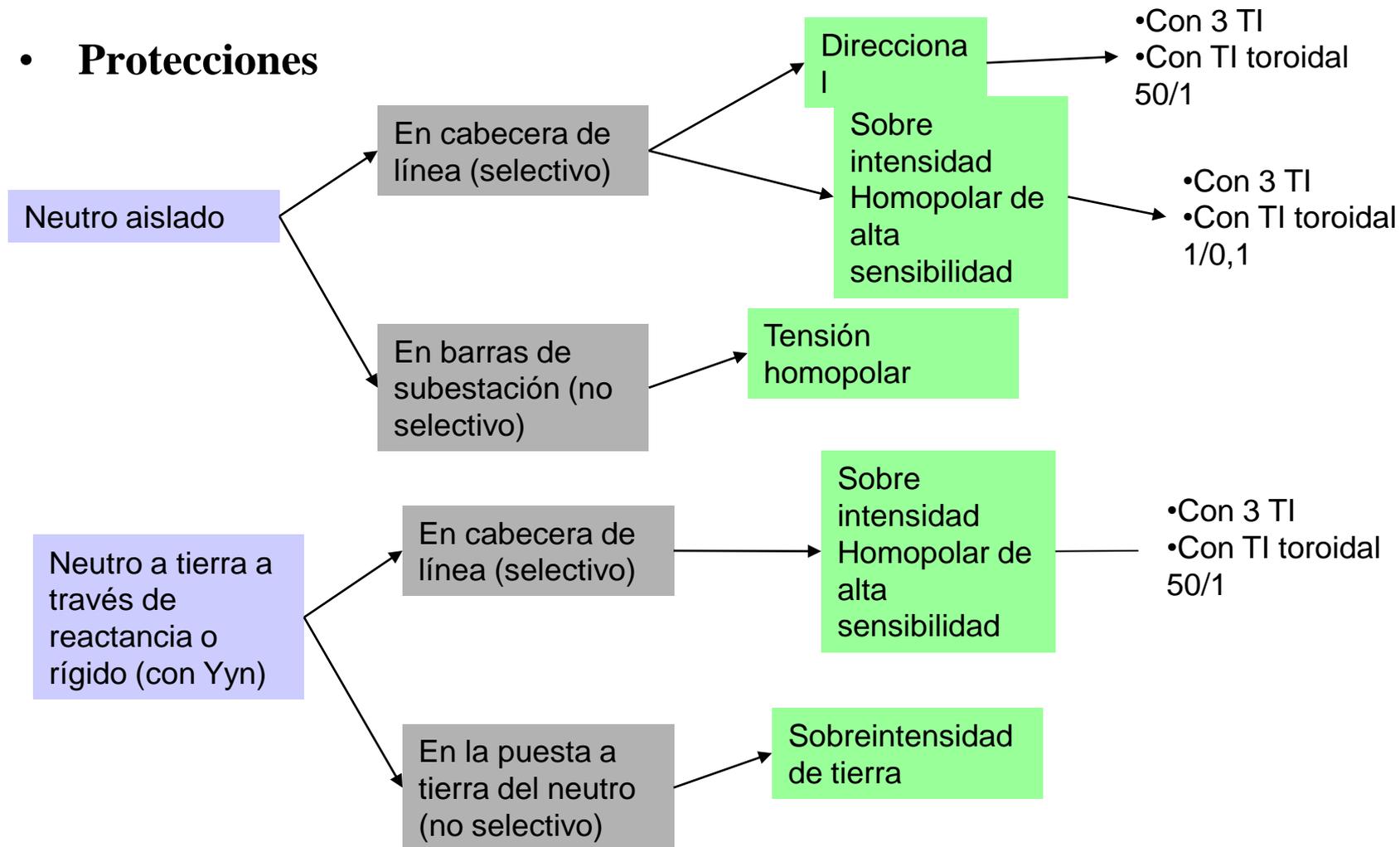
- En redes con neutro aislado, usualmente en redes pequeñas o bajo condiciones especiales (subestaciones con todas las líneas de MT abiertas)

- **4. Sistemas de protección asociados:**

- Deberán detectar faltas monofásicas resistivas con una sensibilidad límite especificada y en tiempo suficientemente breves, para no degenerar en faltas polifásicas
- Ligado a las protecciones está la calidad y seguridad y continuidad del suministro



### • Protecciones





- Los sistemas de protección se comparan según:
  - restricciones de aplicabilidad consideradas por al red
  - Sensibilidad
  - Coordinación
  - Influencia del crecimiento de la red en la actuación y tarado de la protección
  - Incidencia de una línea fuera de servicio en la actuación de la protección
  - Tiempo de actuación
  - dificultades prácticas de implantación
  - Costes del sistema para una subestación futura y existentes
  - Posibilidad de unificación de tarados
  - Reglamentación existente

### 5. Otras consideraciones:

- Necesidad de detectar el tramo donde se produce la falta
- Condicionantes reglamentarios,



- Tipos de redes y estado del neutro

1. REDES URBANAS:

- Predominan cables sobre tramos aéreos.
- Configuración mallada, gran flexibilidad de operación
- En estas subestaciones el neutro está aislado

2. REDES RURALES

- Predominan los tramos aéreos.
- Configuración y explotación radial, flexibilidad de operación limitada
- En estas subestaciones el neutro está aislado
  - REDES AISLADAS
  - REDES PUESTAS A TIERRA A TRAVÉS DE REACTANCIA
  - REDES PUESTAS A TIERRA A TRAVÉS DE RESISTENCIA
  - REDES PUESTAS A TIERRA RÍGIDAMENTE (grupo de conexión del transformador Yyn)



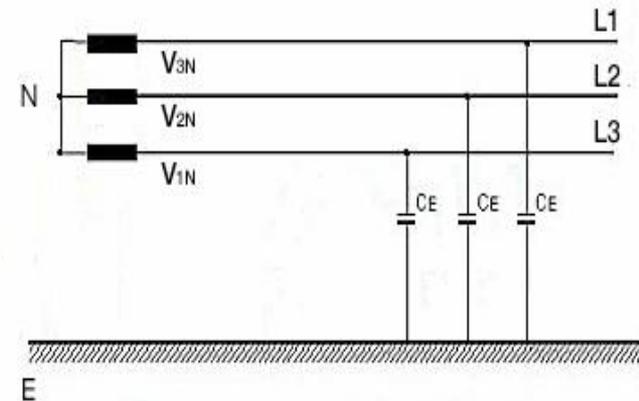
- La puesta a tierra del sistema se puede clasificar atendiendo a la naturaleza del circuito que conecta el neutro del sistema a tierra en:

Neutro aislado (ungrounded)

- Neutro rígido a tierra (solid grounding)
- Neutro impedante (impedance grounding):
  - Puesta a tierra con resistencia (reactance grounding)
  - Puesta a tierra con reactancia (resistance grounding)
  - Puesta a tierra resonante (ground fault neutralizer)



- Los sistemas con neutro aislado son aquellos que están operados sin una conexión intencional del neutro a tierra
- En realidad, los sistemas aislados están puestos a tierra a través de las capacidades a tierra de los elementos del sistema



Su uso está restringido a sistemas de distribución de media tensión. Requiere de esquemas de detección de falta a tierra.



- **Ventajas:**

- La primera falta a tierra solo causa una pequeña circulación de corriente capacitiva, por lo que se puede operar el sistema sin afectar a la continuidad del suministro
- No es necesario invertir en equipamiento para la puesta a tierra. Si para el sistema de protección

- **Desventajas:**

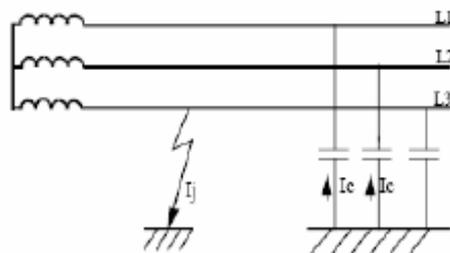
- Mayor coste de aislamiento de los equipos a tierra. Una falta provoca que las fases sanas se pongan a tensión compuesta respecto a tierra
- Mayores posibilidades de sobretensiones transitorias por faltas con arco, resonancias y ferroresonancias, etc.



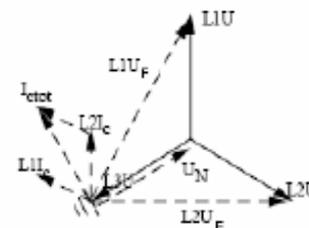
## Distribución de corrientes de falta a tierra en neutro aislado

Cuando se produce una falta a tierra en un sistema con neutro aislado las corrientes de falta se distribuyen de forma que:

- La fase en falta se pone a tensión de tierra, por lo que no circula corriente a través de la capacidad fase-tierra
- Las fases sanas se ponen a tensión compuesta, por lo que circula corriente capacitiva a través de la capacidad fase tierra. Su valor es  $\sqrt{3}$  la corriente capacitiva en régimen permanente
- La corriente de falta es capacitiva e igual a la suma de las corrientes capacitivas de las fases sanas durante la falta. Su valor es 3 veces la corriente capacitiva por fase en régimen permanente

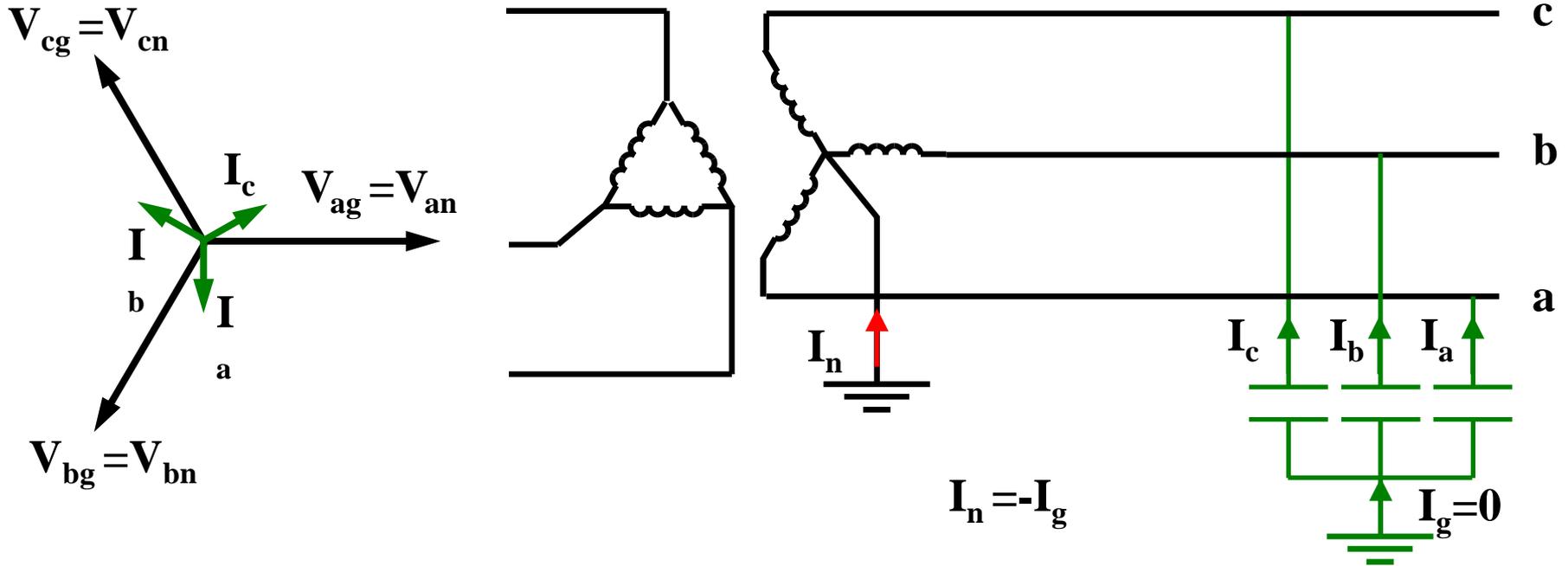


$$I_j = I_{ctot}$$



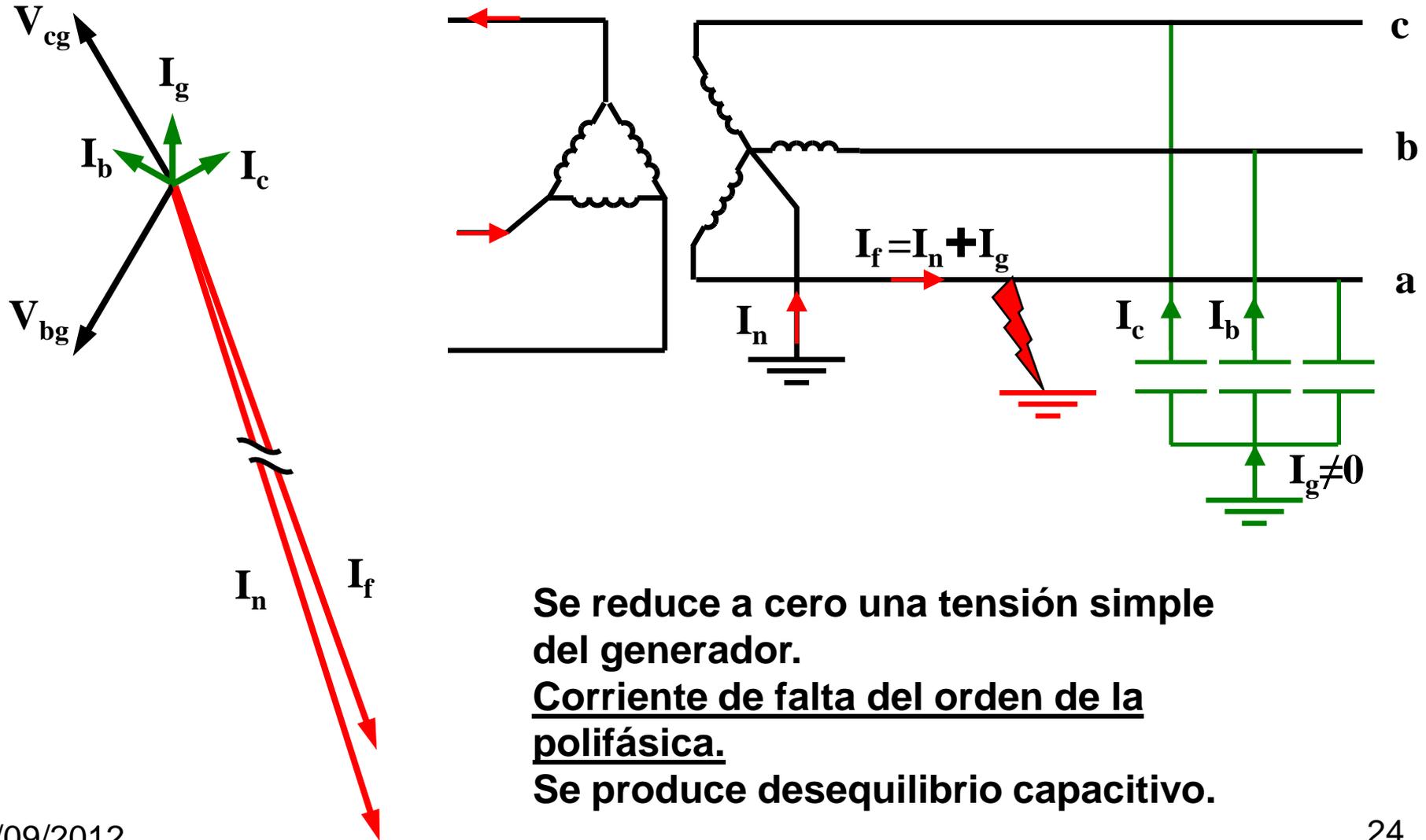


## Corrientes capacitivas en red sana



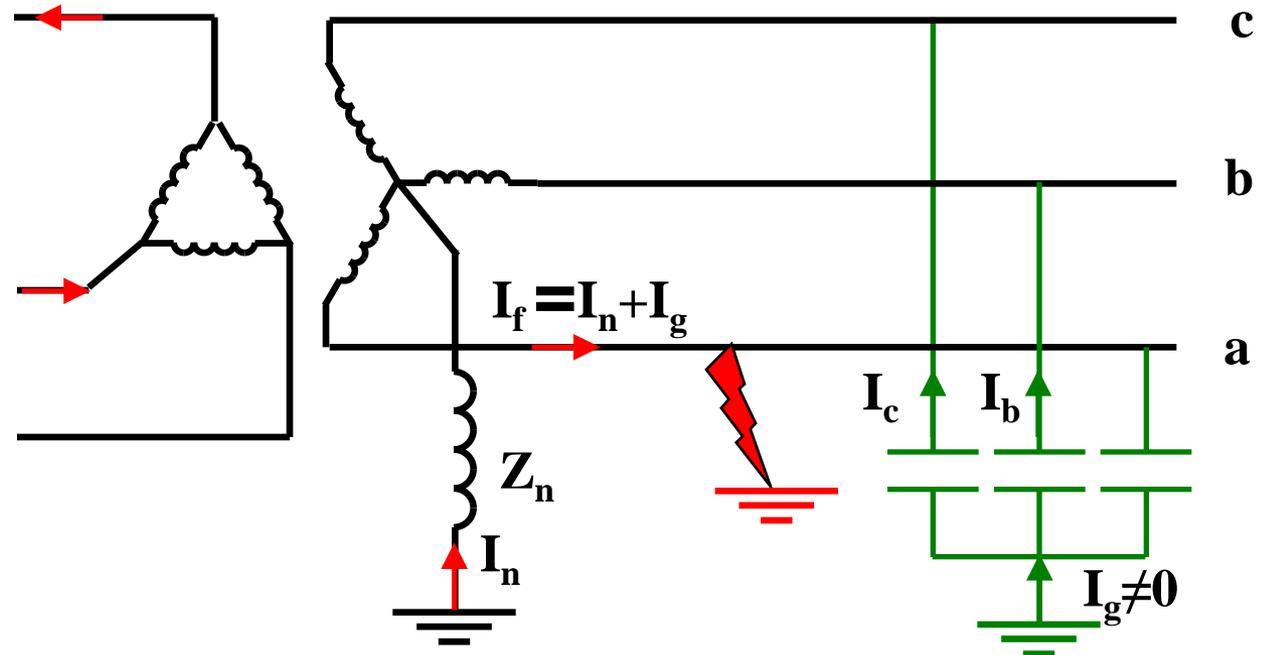
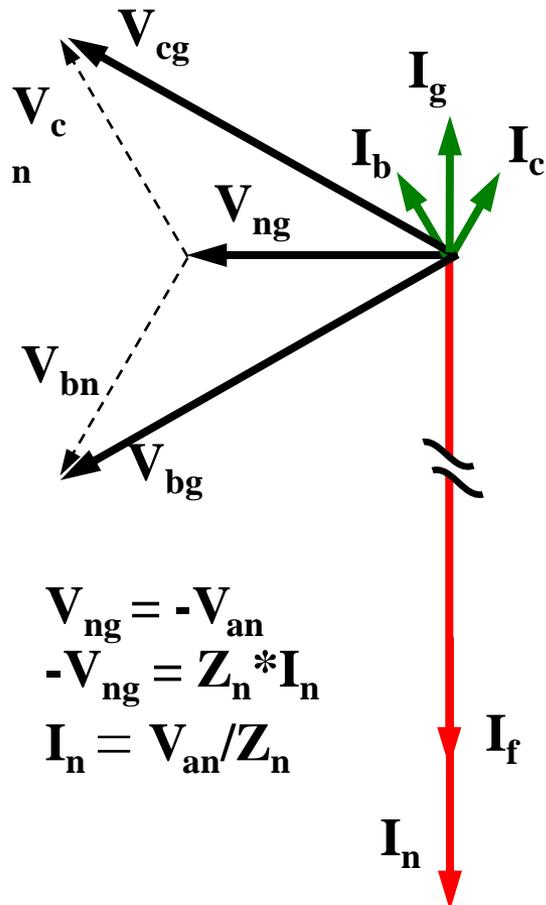


## Neutro a tierra. Falta monofásica





## Neutro inductivo. Falta monofásica



**Sobretensión en las fases sanas**  
**Corriente de falta limitada por el valor de  $Z_n$**   
**Mayor desequilibrio capacitivo**

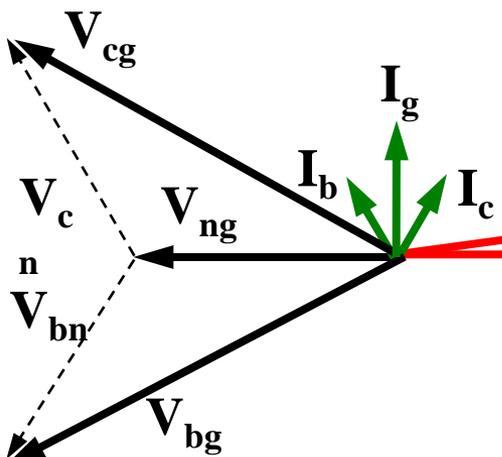
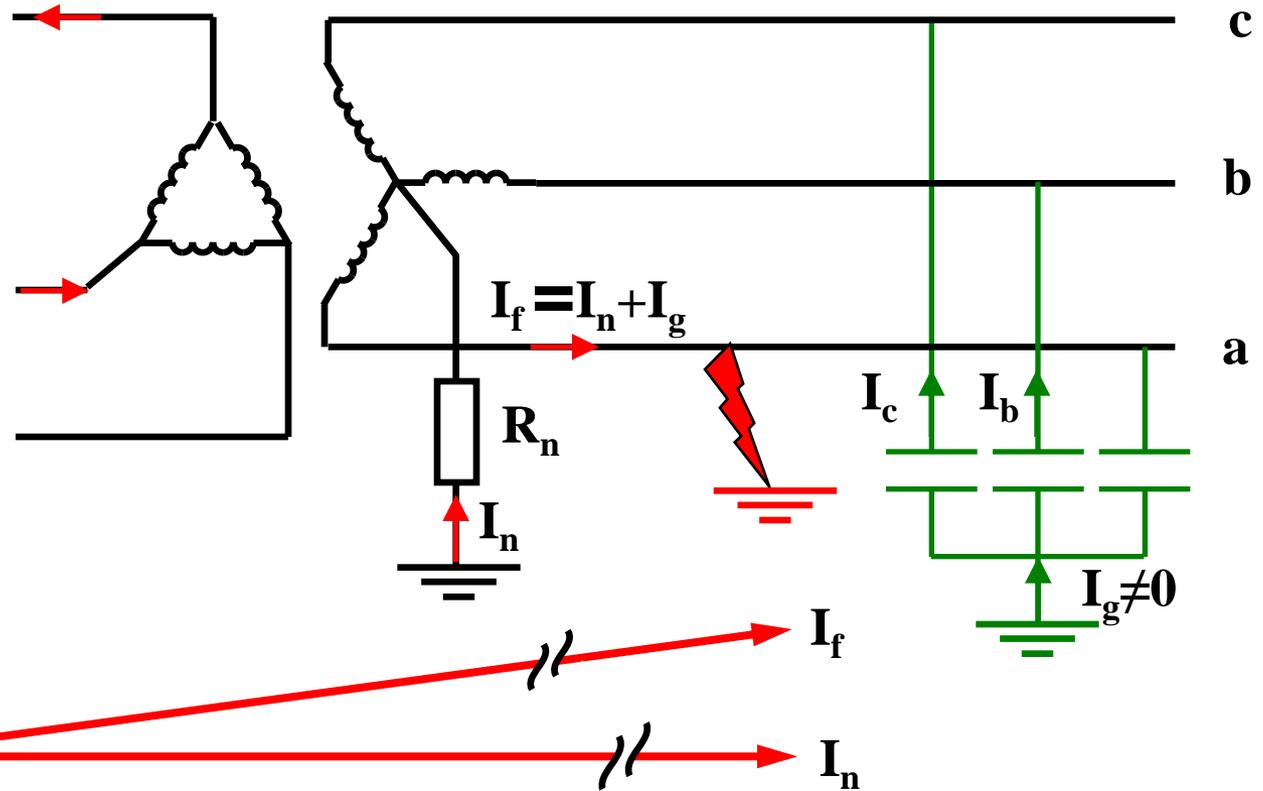


## Neutro resistivo. Falta monofásica

$$V_{ng} = -V_{an}$$

$$-V_{ng} = R_n * I_n$$

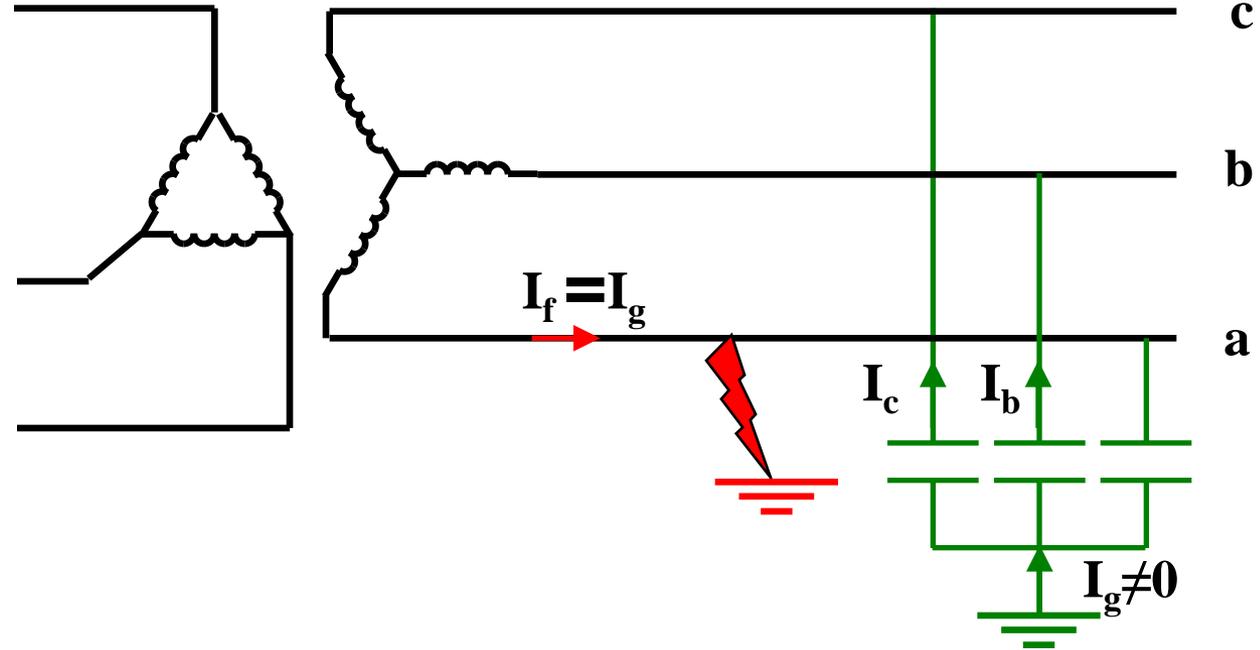
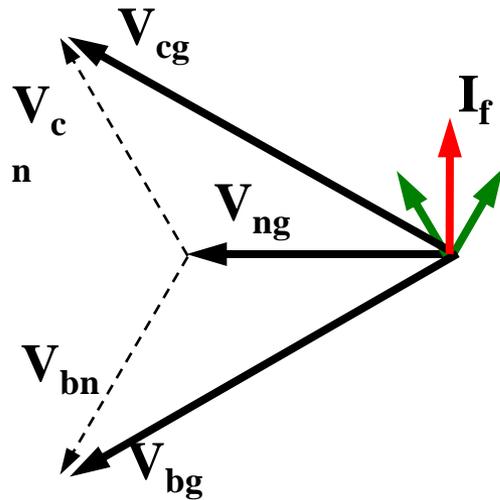
$$I_n = V_{an} / R_n$$



**Sobretensión en las fases sanas**  
**Corriente de falta limitada por el valor de  $R_n$**   
**Mayor desequilibrio capacitivo**



## Neutro aislado. Falta monofásica



$$V_{ng} = -V_{an}$$

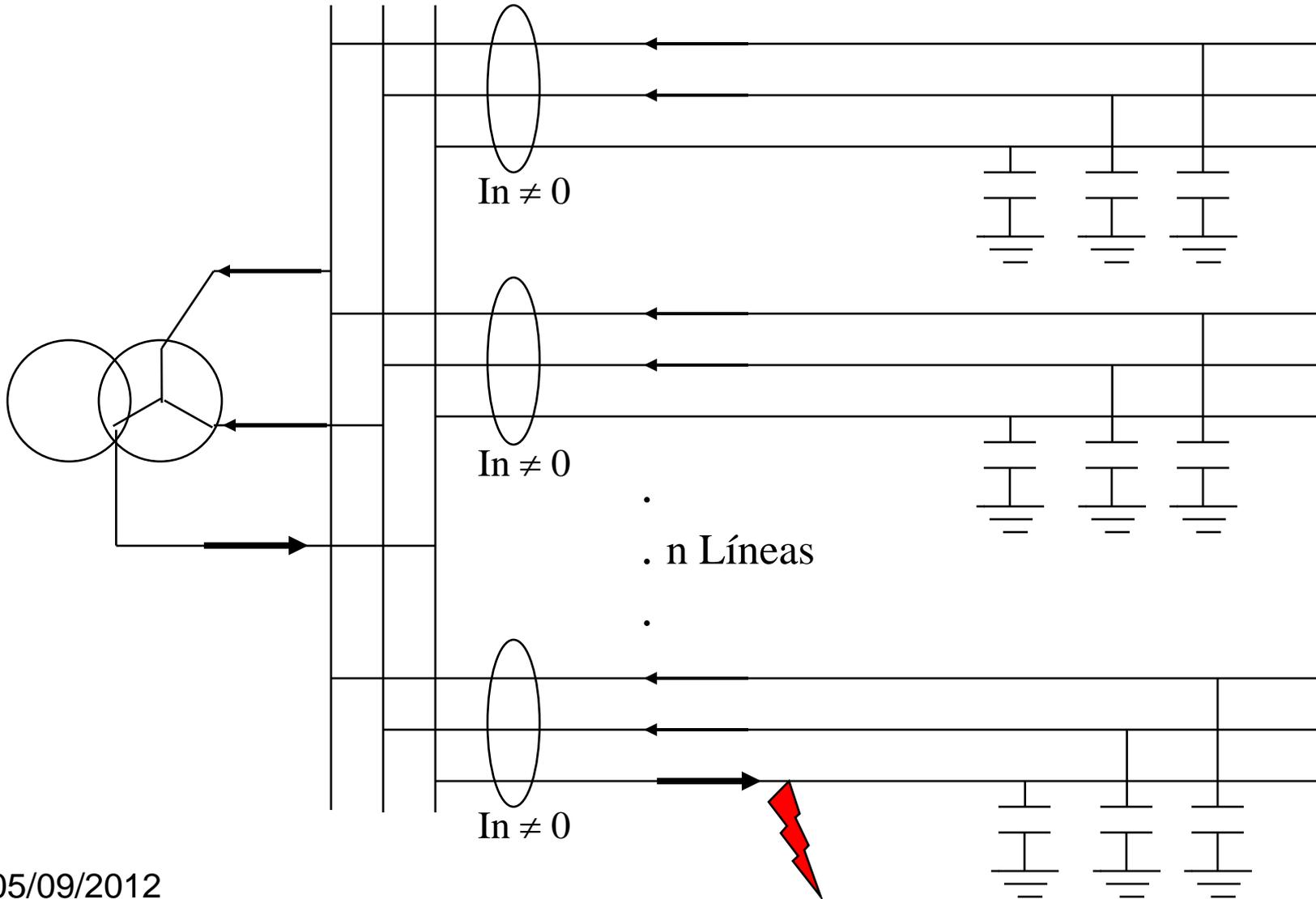
$$-V_{ng} = Z_n * I_n$$

$$I_n = V_{an} / Z_n$$

**Sobretensión en las fases sanas.  
 Corriente de falta limitada al valor del  
 desequilibrio capacitivo.**



## Neutro aislado. Falta monofásica





## Valores típicos

Capacidad a tierra por fase:

- Líneas aéreas: 5 nF/km
  - Cables subterráneos: 250 nF/km
- 1km cable = 50 km línea aérea !!!

Condensadores acoplo telecontrol:

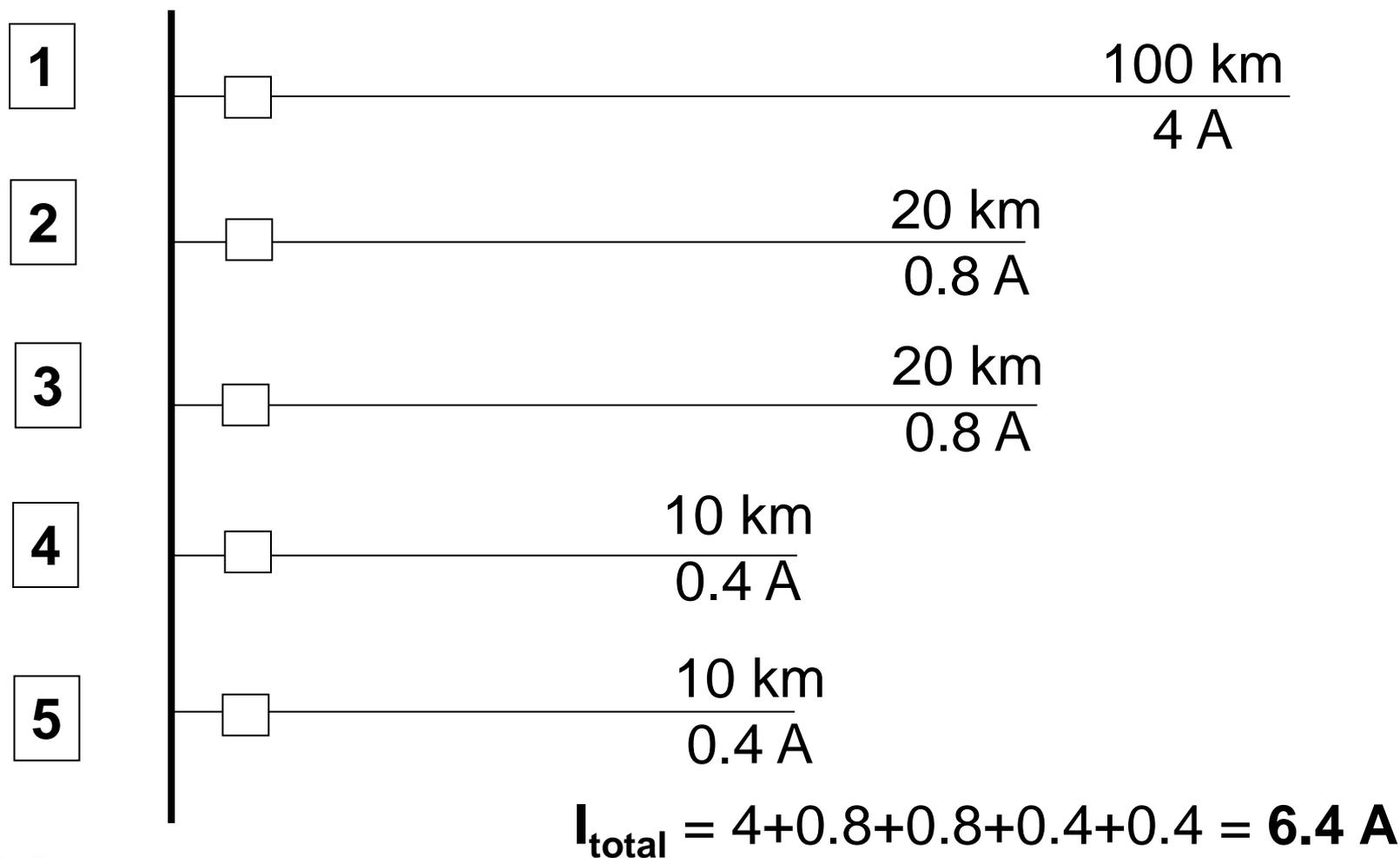
- Salida subestación: 640 nF (=2.5 km cable)
- Punto telecontrolado: 100 nF (=0.4 km cable)

Aportación a falta monofásica con Neutro Aislado:  
(para 15 kV)

- Líneas aéreas: 0.04 A/km
- Cables subterráneos: 2 A/km

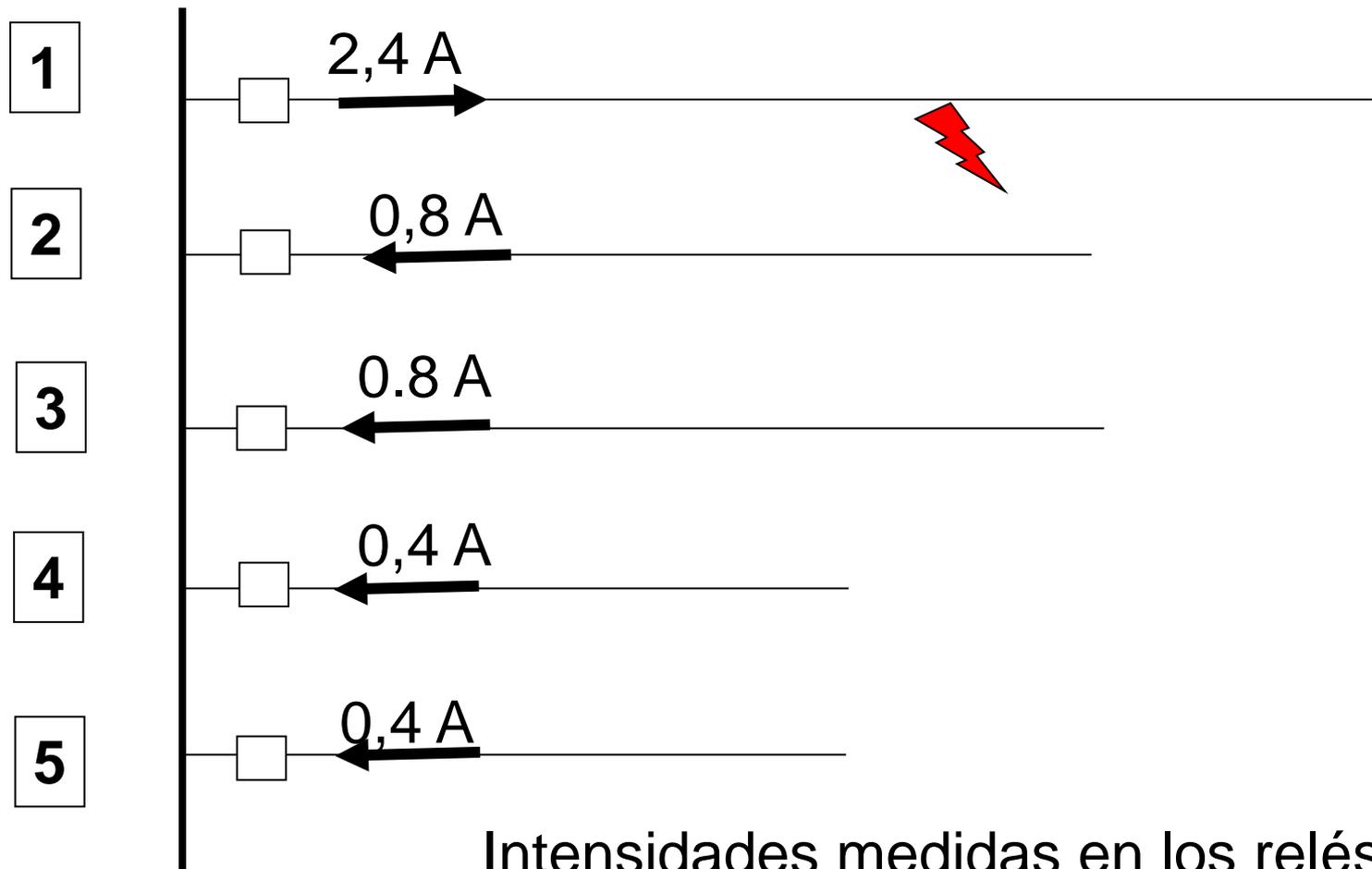


## Ejemplo Distribución aérea en 15 kv





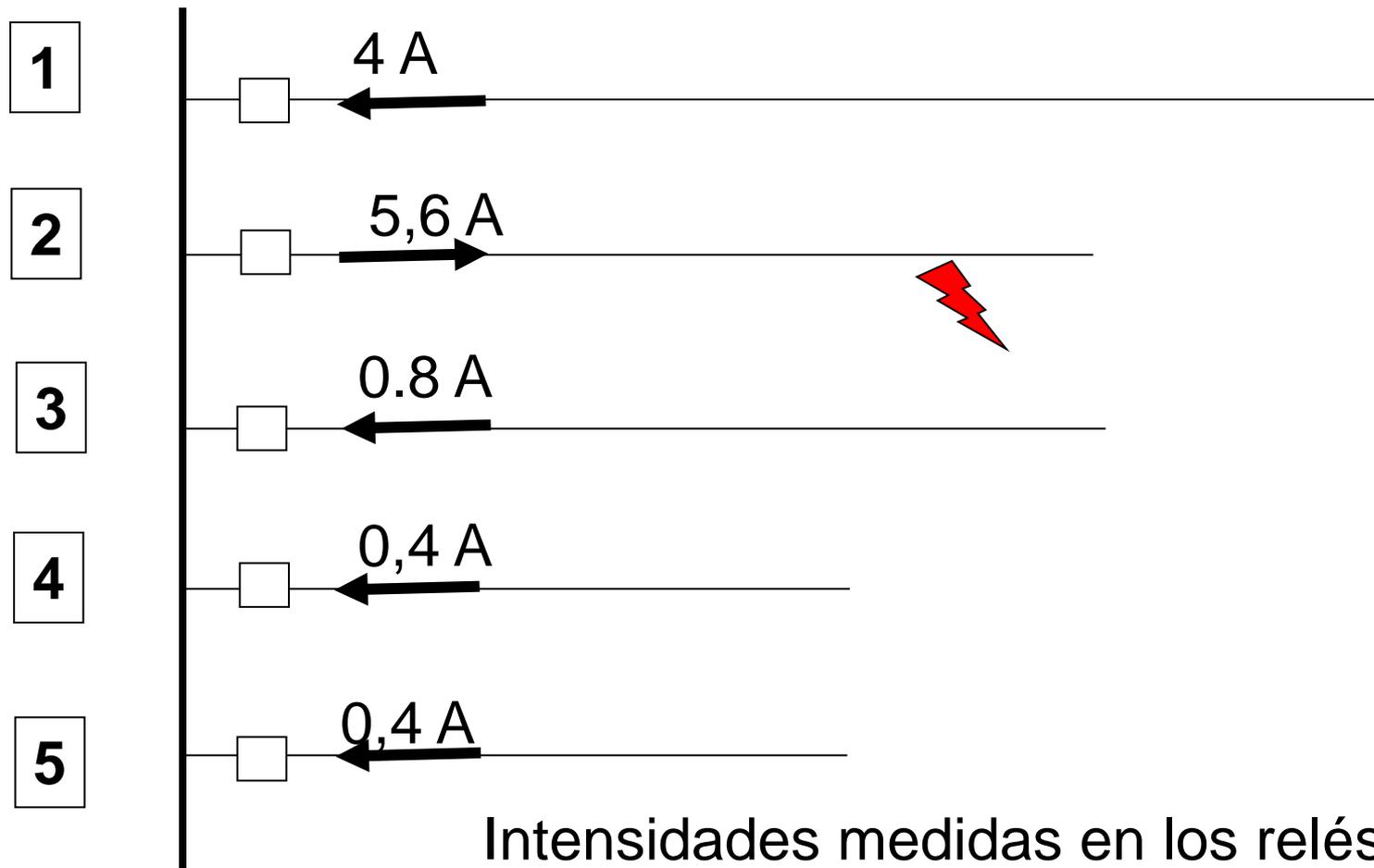
## Ejemplo Falta monofásica en línea 1



Intensidades medidas en los relés

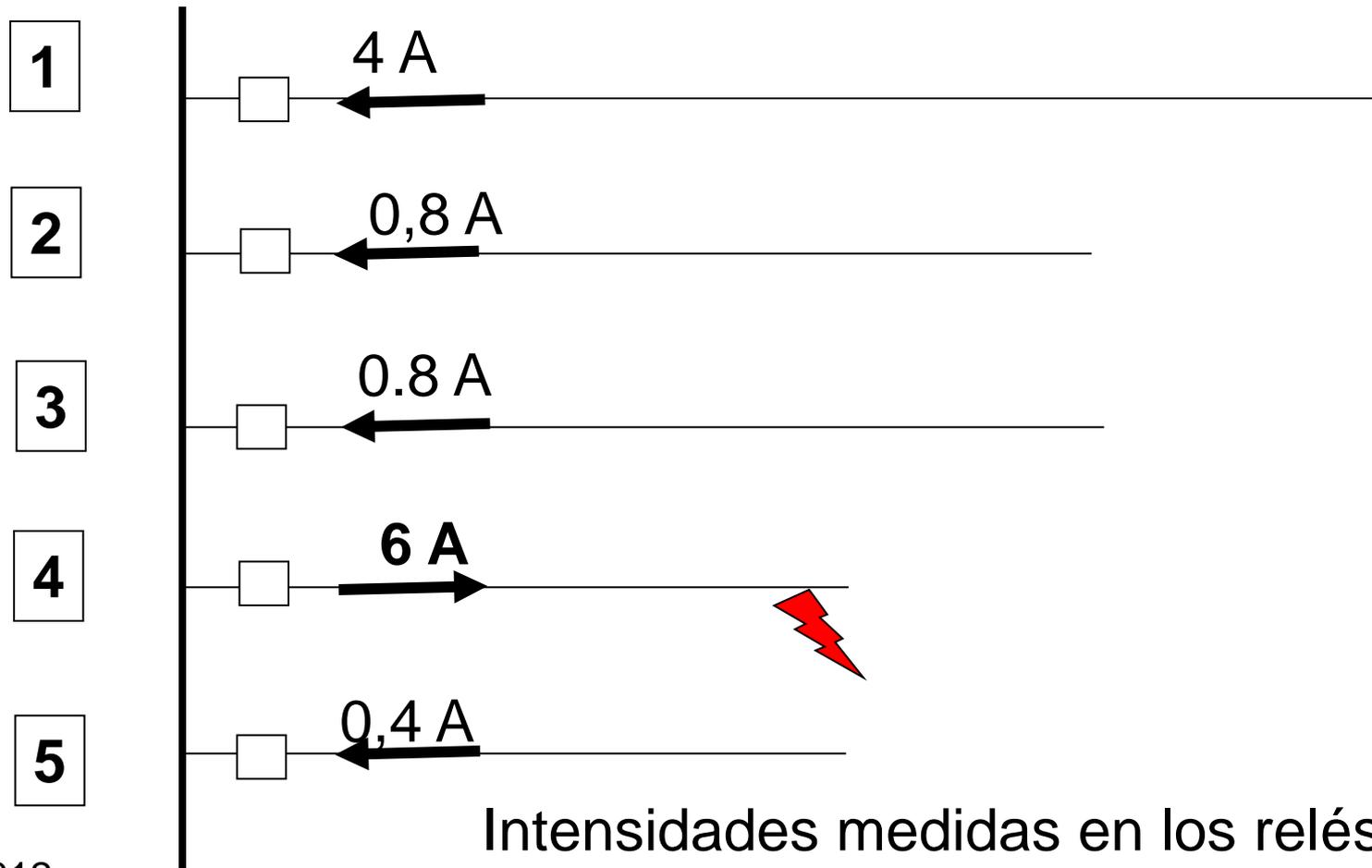


## Ejemplo Falta monofásica en línea 2





## Ejemplo Falta monofásica en línea 4

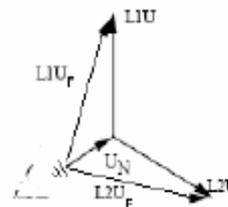
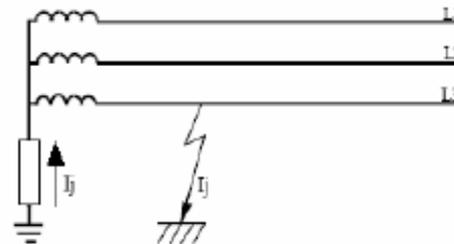




## Distribución de corrientes de falta a tierra en neutro puesto a tierra

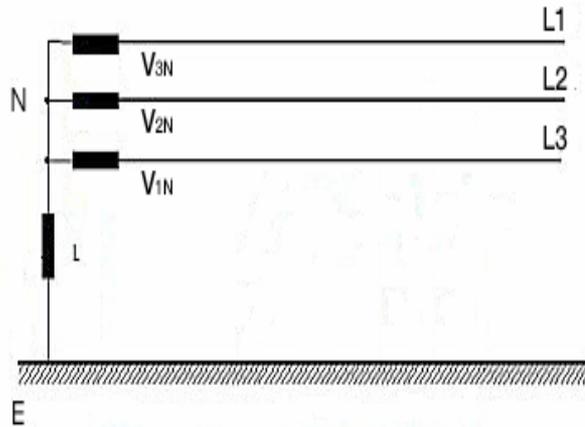
Cuando se produce una falta a tierra en un sistema con neutro aislado las corrientes de falta se distribuyen de forma que:

- La fase en falta se pone a tensión de tierra en el punto de falta
- La circulación de corriente de falta depende de la magnitud de la impedancia de puesta a tierra y de la localización del punto de falta
- La corriente que circula por la puesta a tierra es igual a la corriente de falta  $I_t = I_f$





- Los sistemas con neutro puesto a tierra con reactancia son aquellos que están operados con una conexión del neutro a tierra a través de una reactancia de valor fijo.





- **Ventajas:**

- Permite reducir las sobretensiones transitorias siempre y cuando:

- $X_0 < 10X_1$

- **Desventajas:**

- $I_{1\phi} > 25\% I_{3\phi}$  (60% valor preferente)

- La reducción de la corriente de falta no es tan elevada como en el caso de puesta a tierra con resistencia, por lo que no es una alternativa a esta última

**Este método se utiliza fundamentalmente para puesta a tierra de neutros de generadores y para puesta a tierra de transformadores de subestación**



- La **Bobina Petersen** es una reactancia variable que se conecta entre el neutro del transformador de potencia de una subestación y la malla de puesta a tierra.

También se le define como un medio o sistema de puesta a tierra resonante.

- Su característica más importante es que durante las fallas a tierra, la corriente inductiva de la reactancia cancela la corriente de falla capacitiva aportada por la red, de forma que la intensidad que circula por el punto de falla se reduce a una pequeña corriente resistiva. De esta forma su comportamiento es como una limitadora de la corriente de falla a tierra.



- Su principal ventaja es ante la ocurrencia de faltas monofásicas en las líneas de distribución de energía eléctrica, que forman la gran mayoría de las redes eléctricas. La bobina Petersen posibilita la explotación de la red durante largo tiempo en estas condiciones de falla, permite reducir drásticamente los disparos transitorios de las protecciones, con la consiguiente mejora del servicio e incluso reducción del mantenimiento de los respectivos interruptores.

Para el buen funcionamiento de las bobinas Petersen, éstas han de estar sintonizadas correctamente, de manera que la Reactancia Capacitiva de la red pueda ser compensada por la Reactancia Inductiva de la bobina.

Como las redes de distribución son intrínsecamente cambiantes, los sistemas de puesta a tierra resonantes necesitan un sistema de sintonización y de control que los reconfigure dinámicamente, que se adapten o se ajusten a la par con los cambios que se realicen en la red eléctrica.





## Política de reenganche

Líneas aéreas:

2 intentos para falta monofásica

1 s (RR) y 20 s (RL)

1 intento para falta polifásica

1 s

Líneas subterráneas:

Sin reenganche

Líneas mixtas:

1 intento (1s) si tienen más de 1 km aéreo

Líneas con Cogeneradores:

Bloqueo por presencia de tensión en línea



## Falta serie (fase interrumpida)

- La fase interrumpida solo proporciona tensión y corriente residual por el desequilibrio capacitivo
- Las corrientes de carga siguen sumando cero, pero se desequilibran provocando que algunas fases en BT tengan baja tensión
- Además, se producen calentamientos anormales en los motores trifásicos de inducción
- Las protecciones de línea MT no detectan esta condición



## Condiciones límite: Falta serie-paralelo

- Consiste en la rotura del conductor y el contacto a tierra del lado consumo
- La protección la ve como una falta extremadamente resistiva, puesto que la carga se pone “en serie” con la falta
- Generalmente, no es posible detectar esta condición



## Problemas más frecuentes en explotación

### Disparo de varias líneas

- Correcto:
  - Falta en otra fase desencadenada al aparecer una primera falta (Simultánea).
  - Falta en otra fase desencadenada al eliminarse la primera (Consecutiva)
- Incorrecto:
  - Residual sin falta. Desequilibrio capacitivo.
  - Problemas en la medida de intensidad
  - Línea mal polarizada



## Problemas más frecuentes en explotación (cont.)

### Disparo de Trafo

- Correcto:
  - Ferroresonancia
  - Insuficiente aportación capacitiva (líneas fuera de servicio)
  - Asimetría en las capacidades internas del trafo
- Incorrecto:
  - Línea sin tensiones ó con tensión incorrecta
  - Fallo protección
  - Fallo interruptor de línea



## Problemas más frecuentes en explotación (cont.)

### No Disparo

- Falta resistiva por encima del nivel de sensibilidad
- Falta serie
- Falta serie-paralelo por encima del nivel de sensibilidad



## ANEXO DE CÁLCULO DE PUESTA A TIERRA

### DATOS DE PARTIDA:

- Tensión de servicio:  $U = 20.000V$
- Puesta a tierra de neutro:  $R_n = 30\Omega$   
 $X_n = 0$
- Nivel de aislamiento de las instalaciones de BT del CT:  $V_{bt} = 8.000V$   
( valores normalmente utilizados de la tensión soportada por la instalación de baja tensión son:  
4000,6000,8000 y 10000V)

### CARACTERÍSTICAS DEL CT

- Situado en un edificio destinado a otros usos.
- Dimensiones del local (a=5m, b=4m).

### CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

- Resistividad del terreno:  $\rho = 100\Omega \times m$



### Resistencia máxima de puesta a tierra de las masas del CT ( $R_t$ ) e intensidad de defecto ( $I_d$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d \times R_t \leq V_{bt} \\ I_d = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}} \end{array} \right.$$

$$I_d = \frac{V_{bt}}{R_t} = \frac{8000}{R_t}$$

$$I_d = \frac{8000}{R_t} = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}}$$

$$\frac{8000}{R_t} = \frac{20000}{\sqrt{3} \sqrt{(30 + R_t)^2 + 0^2}}$$



$$\frac{8000}{R_t} = \frac{20000}{\sqrt{3}\sqrt{(30 + R_t)^2 + 0^2}}$$

$$\frac{8}{R_t} = \frac{20}{\sqrt{3}(30 + R_t)}$$

$$(30 + R_t) = \frac{20 \times R_t}{8 \times \sqrt{3}}$$

$$R_t = 67,7\Omega$$

$$I_d \leq 118A$$

RESISTENCIA MÁXIMA DE  
PUESTA A TIERRA DE LAS  
MASAS

CORRIENTE DE  
DEFECTO



### Selección del electrodo tipo ( Método UNESA)

$$k_r \leq \frac{R_t}{\rho} = \frac{67,7}{100} \leq 0,677 \frac{\Omega}{\Omega \times m}$$

Se selecciona un electrodo con 2 picas alineadas de 2 metros de longitud, separación entre picas de 3m, sección del conductor de cobre de 50mm<sup>2</sup> y profundidad del electrodo de 0,5m.

### **ELECTRODO 5/22**





### Parámetros del electrodo elegido

$$k_r = 0,201 \frac{\Omega}{\Omega \times m}$$

$$k_p = 0,0392 \frac{V}{\Omega \times m(A)}$$

### Medidas de seguridad adicionales para evitar tensiones de contacto exterior

- Las puertas y rejillas metálicas que dan al exterior del centro no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión debido a defectos o avería.
- En el piso del CT se instalará mallazo cubierto por una capa de hormigón de 10cm conectado a la puesta a tierra de protección del CT.



**Valores de la resistencia de puesta a tierra ( $R'_t$ ), intensidad de defecto ( $I'_d$ ) y tensiones de paso ( $V'_p$ ) del electrodo seleccionado, para la resistividad del terreno media ( $\rho$ )**

- Resistencia de puesta a tierra ( $R'_t < R_t$ )

$$R'_t = k_r \times \rho = 0,201 \times 100 = 20,1 \Omega$$

- Intensidad de defecto

$$I'_d = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{(R_n + R'_t)^2 + X_n^2}} = \frac{20.000}{1,73 \sqrt{(30 + 20,1)^2 + 0^2}} = 230,7 A$$

- Tensión de paso en el exterior

$$V'_p = k_p \times \rho \times I'_d = 0,0392 \times 100 \times 230,7 = 904 V$$

- Tensión de defecto

$$V'_d = R'_t \times I'_d = 20,1 \times 230,7 = 4637 V$$

- Duración total de la falta

Consideramos relé a tiempo independiente:  $t' = 0,5s$ ,  $I'_a = 50A$ .



### Separación entre los sistemas de puesta a tierra de protección (masas) y de servicio (neutro de b.t.)

Se han previsto puestas a tierra separadas e independientes:

$$D = \frac{\rho \times I_d}{2\Pi \times U} = \frac{100 \times 230,7}{6283} \geq 3,7m$$

(U=1000V) (ITC-BT-18 y MIE-RAT-13)



### VALORES ADMISIBLES

#### Tensiones de paso en el exterior

MIE-RAT-13 establece que la tensión máxima aplicable al cuerpo humano, entre mano y pies que se puede aceptar es la siguiente:

$$V_{ca} = \frac{k}{t^n}$$

Para  $t=0,05s$ ;  $0,9 < t < 0,1$ ; (MIE-RAT-13)

$$k = 72$$

$$t = 1$$

➤ Tensión de paso en el exterior:

$$V_p = \frac{10 \times k}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) = \frac{10 \times 72}{0,5^1} \left(1 + \frac{6 \times 100}{1000}\right) = 2304V$$



### COMPROBACIÓN DE QUE LOS VALORES CALCULADOS SATISFACEN LAS CONDICIONES EXIGIDAS

TENSIONES DE PASO Y CONTACTO EN EL INTERIOR	Como medida de seguridad se instala en el piso del CT un mallazo conectado a la puesta a tierra de protección del CT
TENSIONES DE CONTACTO EXTERIOR	Como medida de seguridad las puertas y rejillas que dan al exterior del CT no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión debido a detectores y averías
TENSIÓN DE PASO EN EL EXTERIOR	Valor calculado= $V'p=904\text{ V}$ < Valor admisible = $Vp = 2304\text{ V}$
TENSIÓN DE DEFECTO	Valor calculado= $V'd=4637\text{ V}$ < Valor admisible = $Vbt= 8000\text{ V}$
INTENSIDAD DE DEFECTO	Valor calculado= $I'd=230,7\text{ V}$ > Valor actuación = $I= 50\text{ A}$



# Protecciones en Subestaciones

## Curso de Subestaciones – Xunta de Galicia







