



### **6. Fallas en sistemas eléctricos de potencia**

**6.1 Introducción**

**6.2 Mallas de secuencia**

**6.3 Cortocircuitos**

**6.4 Fases abiertas**

**6.5 Protecciones**



## Definición del Problema

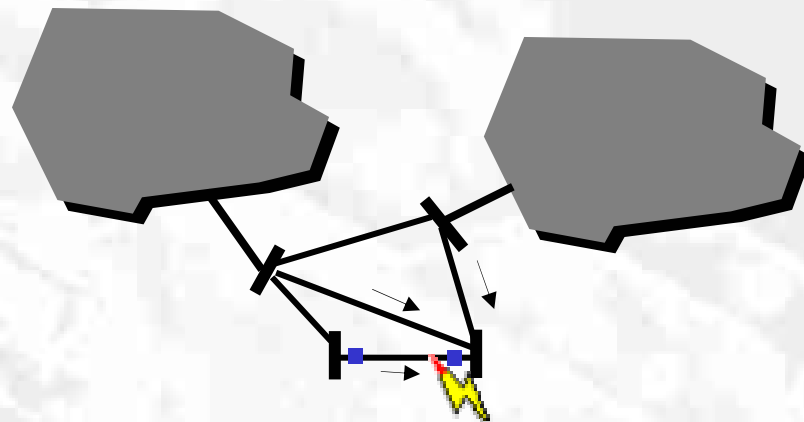
análisis de fallas en los sistemas eléctricos de potencia se enmarca en un problema más amplio denominado --> **Cálculo de condiciones anormales**





## Motivos para su estudio

- Dimensionamiento de interruptores
- Deconectores, fusibles
- Ajuste de relés de protección
- equipos en general



## Causas de Cortocircuito

Porcentaje [%]	Razón/Motivo	Ejemplo
70 a 80	Atmosféricas	Rayos, tempestades, neblina, hielo, nieve, salinidad, etc.
7 a 15	Mecánicas	Roturas de conductores, aisladores, golpes, caídas,
8 a 10	Eléctricas	Aislantes envejecidos, errores humanos.



### Cortocircuitos más frecuentes

- Monofásicos --> 70 a 80 %
- Bifásicos a tierra --> 10 %
- Trifásicos --> 8 a 10 %

### Tipos de fallas

- Simétricas --> trifásicas
- Asimétricas --> monofásicas y bifásicas

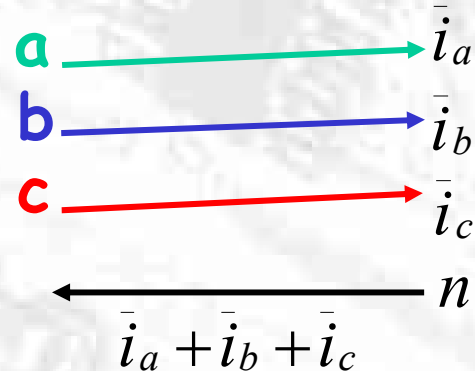
### Otras características

- Fallas fugaces --> 90 a 95 %
- Elevado costo de evitarlas --> compromiso inversión vs. seguridad de servicio

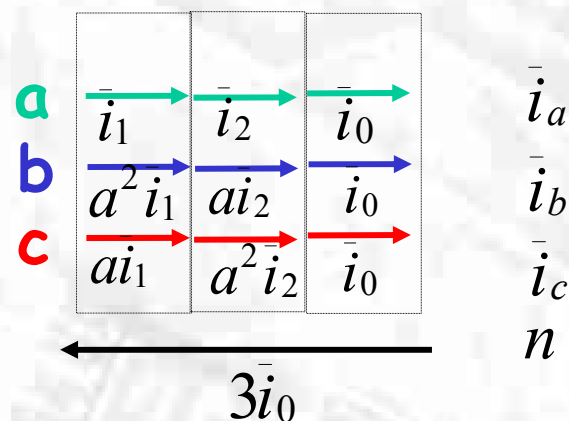


## Componentes Simétricas (Fortescue 1918)

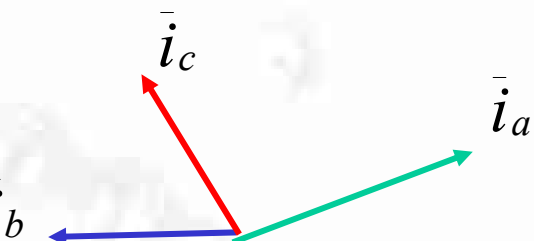
Transformación lineal que permite expresar un sistema desequilibrado en tres sistemas equilibrados que se superponen



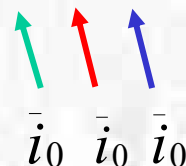
**Transformación lineal**



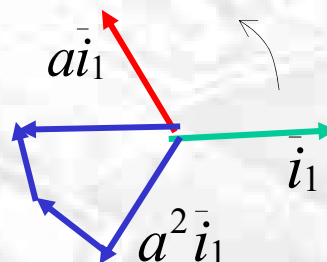
**Set a-b-c**



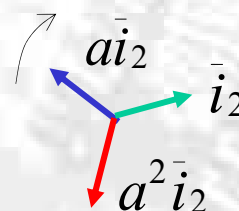
**Secuencia cero**



**Secuencia positiva**



**Secuencia negativa**





$$\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \underset{\mathbf{A}}{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}$$

factor de giro

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$



$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$$

## Ejemplo

Obtenga las componentes simétricas para las siguientes corrientes no balanceadas:

$$\bar{i}_a = 1.6 \angle 25^\circ$$

$$\bar{i}_b = 1.0 \angle 180^\circ$$

$$\bar{i}_c = 0.9 \angle 132^\circ$$



$$\bar{i}_0 = 0.4512 \angle 96.45^\circ$$

$$\bar{i}_1 = 0.9435 \angle -0.055^\circ$$

$$\bar{i}_2 = 0.6024 \angle 22.3157^\circ$$



## Transformación inversa

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \mathbf{A}^*$$

$\mathbf{A}^{-1}$

- sistema levantado de tierra --> secuencia cero no puede existir
- expresiones análogas para voltajes

$$\Rightarrow V^{012} = \mathbf{A}^{-1} V^{abc}$$

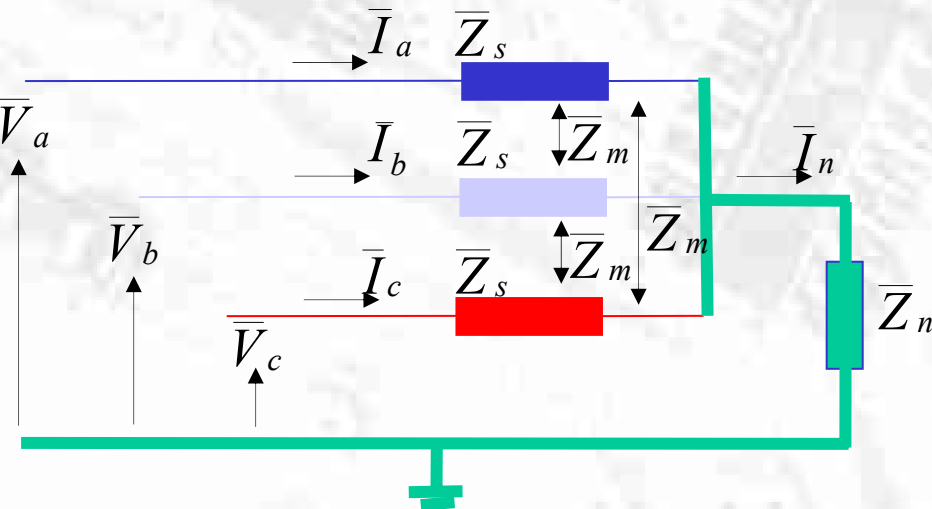
## Cálculo de potencia

$$\begin{aligned} S_{(3\phi)} &= V^{abcT} I^{abc*} = (\mathbf{A} V^{012})^T (\mathbf{A} I^{012})^* = V^{012T} \mathbf{A}^T \mathbf{A}^* I^{012*} = 3(V^{012T} I^{012*}) \\ &= 3v_0 i_0^* + 3v_1 i_1^* + 3v_2 i_2^* \end{aligned}$$

## Impedancias de Secuencia

Corresponden a las impedancias de un equipo o componente a las corrientes de las distintas secuencias ( $Z^0$ ,  $Z^1$ ,  $Z^2$ ).

## Impedancias de Secuencia: Cargas conectadas en estrella



$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

$$V_a = Z_s I_a + Z_m I_b + Z_m I_c + Z_n I_n$$

$$V_b = Z_m I_a + Z_s I_b + Z_m I_c + Z_n I_n$$

$$V_c = Z_m I_a + Z_m I_b + Z_s I_c + Z_n I_n$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}^{abc} = \mathbf{Z}^{abc} \mathbf{I}^{abc}$$

$$\mathbf{A} \mathbf{V}^{012} = \mathbf{Z}^{abc} \mathbf{A} \mathbf{I}^{012}$$



$$\mathbf{A}\mathbf{V}^{012} = \mathbf{Z}^{abc}\mathbf{A}\mathbf{I}^{012} \quad \rightarrow \quad \mathbf{V}^{012} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Z}^{abc}\mathbf{A}\mathbf{I}^{012} \quad \rightarrow \quad \mathbf{Z}^{012} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Z}^{abc}\mathbf{A}$$

$$= \mathbf{Z}^{012}\mathbf{I}^{012}$$

$$\mathbf{Z}^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_m + \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}^{012} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + 3\bar{Z}_n + 2\bar{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s - \bar{Z}_m \end{bmatrix} \quad \text{Zm=0} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + 3\bar{Z}_n & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s \end{bmatrix}$$

$\bar{Z}_0$        $\bar{Z}_1$        $\bar{Z}_2$

$$\bar{V}_0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 \quad \bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \quad \bar{V}_2 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2$$

## Impedancias de Secuencia: Líneas de Transmisión

(+, -) secuencia positiva  
y secuencia negativa

Por tratarse de un elemento estático, valores asociados a secuencias + y - son iguales. Se aplica todo lo visto hasta el momento.

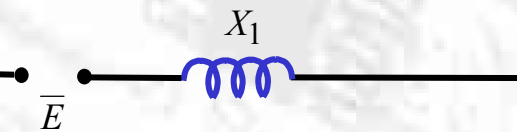
(0) secuencia cero

Para determinar la impedancia serie de secuencia cero hay que considerar tanto el efecto del retorno por tierra, como también los conductores de guardia de las líneas, en caso que ello existan, ya que la corriente se reparte entre ambos caminos. Dificultad de modelar la conductividad de la tierra debido a heterogeneidad de la resistividad de la tierra.

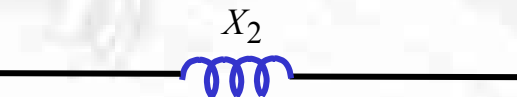
- Línea de simple circuito sin conductor de guardia
- Impedancia mutua de secuencia cero entre dos circuitos sin conductor de guardia
- Impedancia equivalente de secuencia cero de un doble circuito
- Impedancia equivalente de secuencia cero de dos líneas con tres terminales
- Línea de simple circuito con conductor de guardia

## Impedancias de Secuencia: Generador Síncrono

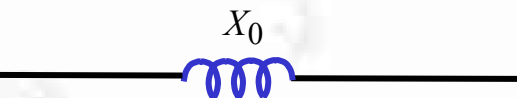
Equivalente monofásico del generador síncrono, necesario para estudios de fallas con mallas de secuencia.



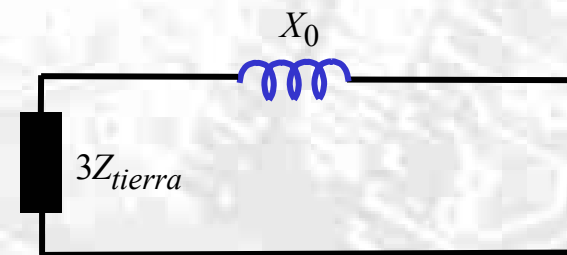
(+) secuencia positiva



(-) secuencia negativa



(0) secuencia cero  
sólo si neutro está  
conectado a tierra





## Secuencia Negativa

$X_2$  distinto de  $X_1 \rightarrow$  campo eléctrico del estator rota en sentido contrario al campo mecánico del rotor.

Aplicar tensiones de sec. negativa de pequeña amplitud al estator con la máquina rotando a velocidad nominal en sentido positivo y con el campo cortocircuitado.  $X_2 = V_a / I_a$

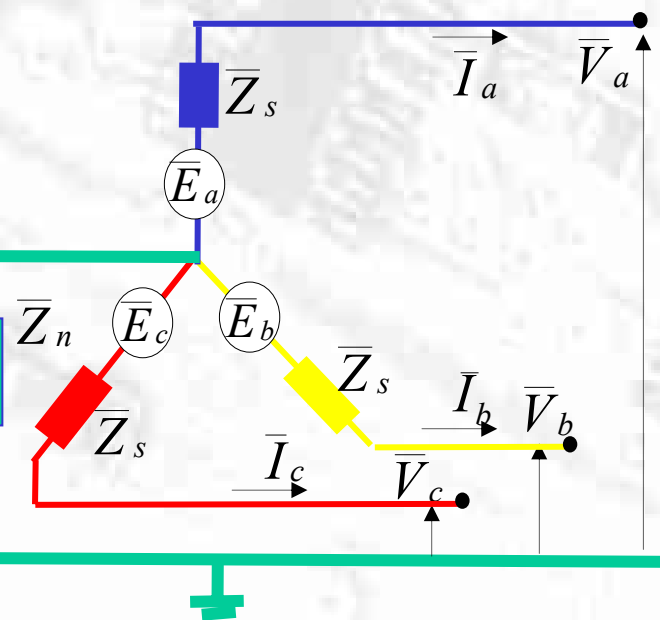
## Secuencia Cero

Tiene valor pequeño. Se aplica tensión sinusoidal  $V_a$  a las tres fases en paralelo, haciendo girar la máquina a velocidad nominal y con el campo cortocircuitado.



## Fallas de Secuencia de un Generador Bajo Carga

Situación de generador con neutro a tierra a través de impedancia  $Z_n$ .



- Voltajes internos trifásicos balanceados con secuencia positiva de fasores

$$\mathbf{E}^{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} E_a$$

- Ley de voltajes de Kirchhoff

- Balance de corrientes

$$\bar{V}_a = \bar{E}_a - \bar{Z}_s \bar{I}_a - \bar{Z}_n \bar{I}_n$$

$$\bar{I}_n = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c$$

$$\bar{V}_b = \bar{E}_b - \bar{Z}_s \bar{I}_b - \bar{Z}_n \bar{I}_n$$

$$\bar{V}_c = \bar{E}_c - \bar{Z}_s \bar{I}_c - \bar{Z}_n \bar{I}_n$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_n & \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_n & \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{V}^{abc} = \mathbf{E}^{abc} - \mathbf{Z}^{abc} \mathbf{I}^{abc}$$

$$\mathbf{A} \mathbf{V}^{012} = \mathbf{A} \mathbf{E}^{012} - \mathbf{Z}^{abc} \mathbf{A} \mathbf{I}^{012}$$

$$\mathbf{A}\mathbf{V}^{012} = \mathbf{A}\mathbf{E}^{012} - \mathbf{Z}^{abc}\mathbf{A}\mathbf{I}^{012}$$

$$\rightarrow \mathbf{V}^{012} = \mathbf{E}^{012} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Z}^{abc}\mathbf{A}\mathbf{I}^{012}$$

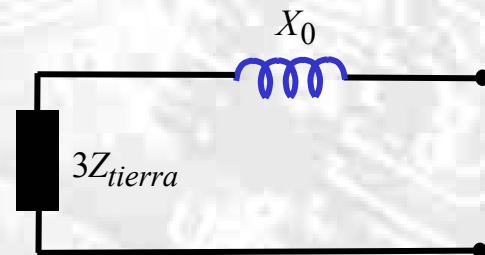
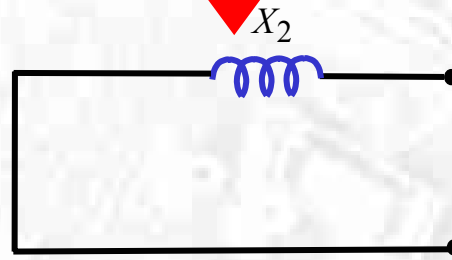
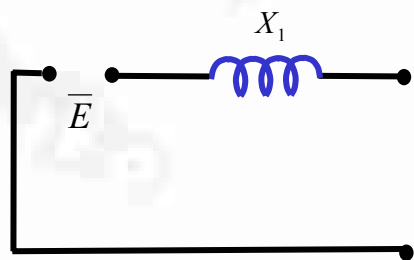
$$= \mathbf{E}^{012} - \mathbf{Z}^{012}\mathbf{I}^{012}$$

$$\mathbf{Z}^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_n & \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n & \bar{Z}_n \\ \bar{Z}_n & \bar{Z}_n & \bar{Z}_s + \bar{Z}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}^{012} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_s + 3\bar{Z}_n & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix}$$

- Dado que se consideran fem balanceados

$$\mathbf{E}^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix}$$



## Impedancias de Secuencia: Transformadores

(+) secuencia positiva

Depende de tipo de conexión (desfase +)

(-) secuencia negativa

Depende de tipo de conexión (desfase -)

(0) secuencia cero

La representación en secuencia cero depende de:

1. Tipo de núcleo:

- acorazado --> permite retorno de sec (0) por núcleo ferromagnético
- banco de transformadores  $1\phi$  --> permite retorno de sec 0 por núcleo ferromagnético
- núcleo --> flujo de secuencia cero retorna por el aire

2. Tipo de conexión:

- Estrella, Delta, Puesta a tierra



## Secuencia Cero

Se cortocircuitan las tres fases del primario, aplicando una tensión sinusoidal  $V_o$  entre ellas y el neutro (tierra). Al cortocircuitar y poner a tierra los bornes del secundario, y medir la corriente  $I_o$  que circula se obtendrá:  $Z_o = V_o/I_o$ .





## Simplificaciones en el cálculo de C-C

- fems en fase y con mismo valor.

La razón es la dificultad de poder determinar fems pre-falla.

- Se desprecia efecto de:

- cargas (corriente de c-c  $\gg$  corriente de carga)
- susceptancias de líneas
- admitancias de magnetización de transformadores

- Reactancia secuencia + = Reactancia secuencia -

- Se desprecia las impedancias mutuas de sec + y sec - entre circuitos en paralelo



Simplificaciones adecuadas para cálculos manuales de fallas.

Estas simplificaciones no son válidas para estudios de fases abiertas --> estudios de flujos de potencia



### Metodología General

Datos de entrada al sistema:

- estado de operación estacionario
- información para especificar comportamiento transiente
- especificación del tipo y punto de ocurrencia de la falla



Transformación a componentes de secuencia:

- variables  $V$ ,  $I$
- impedancias



Interconexión de mallas de secuencia en punto de falla:

- depende de tipo de falla
- impedancia de cortocircuito

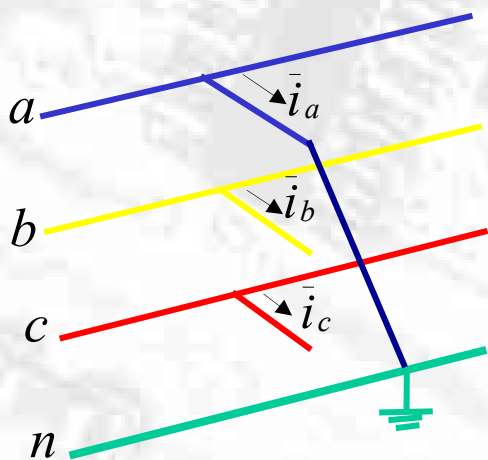


Cálculo de corrientes y potencias de falla:

- resolución de mallas de secuencia interconectadas
- cálculo de corrientes en puntos de falla
- contribuciones desde otros puntos,
- cálculo de variables eléctricas en  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .



## Cortocircuito Monofásico a Tierra



Descripción de tipo de  
C-C

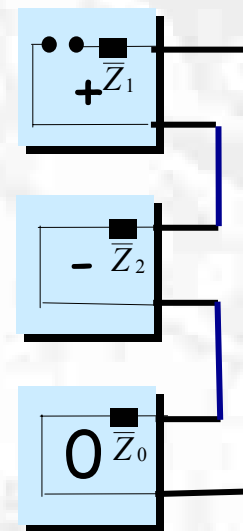
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \\ \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables



$$\bar{v}_0 + \bar{v}_1 + \bar{v}_2 = 0$$

$$\bar{i}_0 = \bar{i}_2 = \bar{i}_1 = \frac{1}{3} \bar{i}_a$$



Conexión  
Serie

Interconexión de  
mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

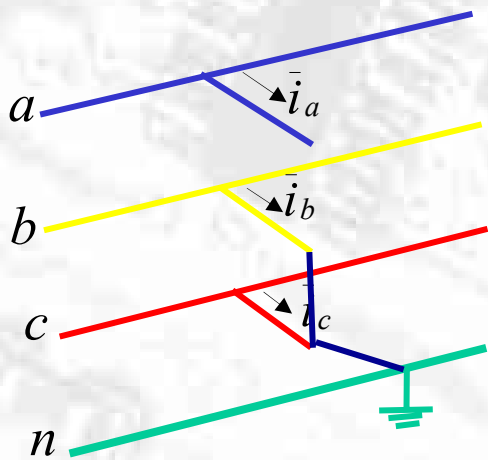
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$



## Cortocircuito Bifásico a Tierra



Descripción de tipo de C-C

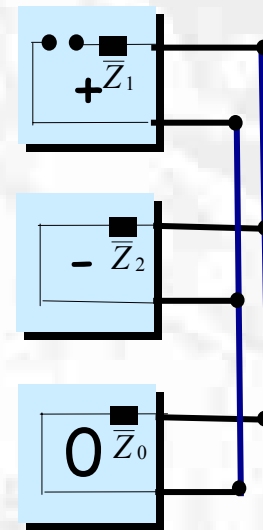
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables



$$\bar{i}_0 + \bar{i}_1 + \bar{i}_2 = 0$$

$$\bar{v}_0 = \bar{v}_2 = \bar{v}_1 = \frac{1}{3} \bar{v}_a$$



Interconexión de mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

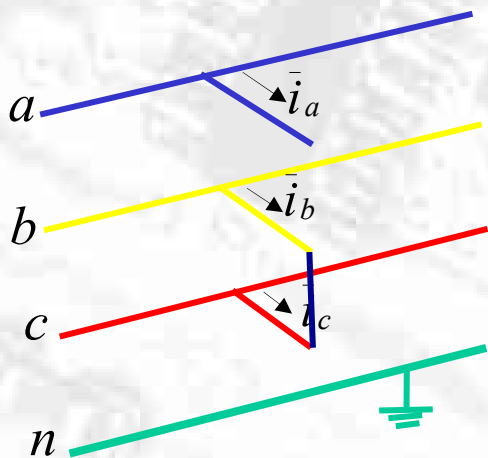
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$



## Cortocircuito Bifásico



Descripción de tipo de C-C

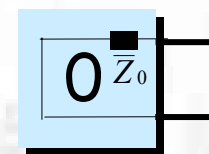
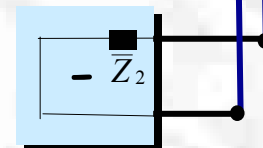
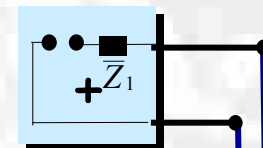
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_c \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{i}_c \\ -\bar{i}_b \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables



$$\bar{i}_0 + \bar{i}_1 + \bar{i}_2 = 0 \quad \bar{i}_0 = 0$$

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_1$$



Interconexión de mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

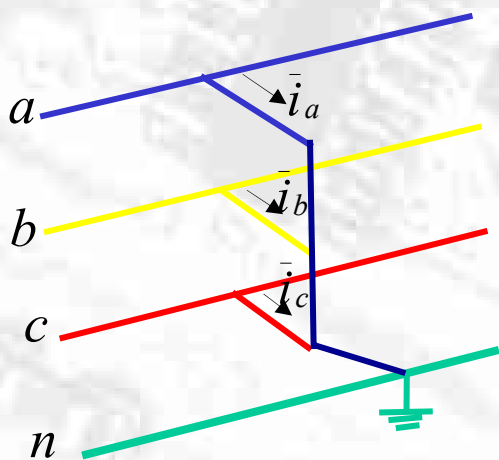
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$



## Cortocircuito Trifásico



Descripción de tipo de C-C

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix}$$

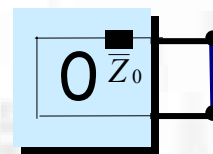
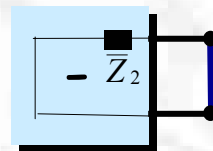
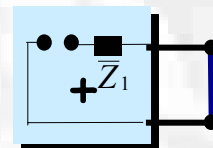
Conocimiento de variables



$$\bar{v}_0 = 0$$

$$\bar{v}_1 = 0$$

$$\bar{v}_2 = 0$$



Interconexión de mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

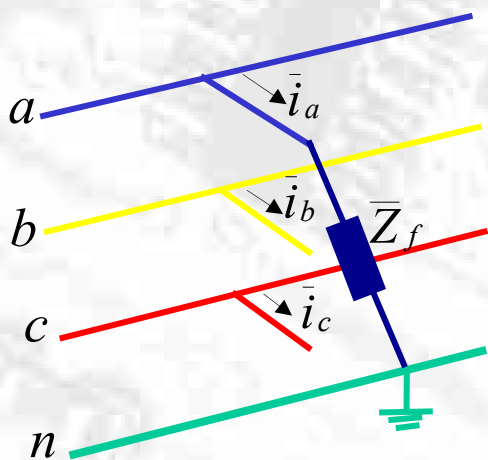
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$



## Cortocircuito Monofásico a tierra con impedancia $Z_f$



Descripción de tipo de C-C

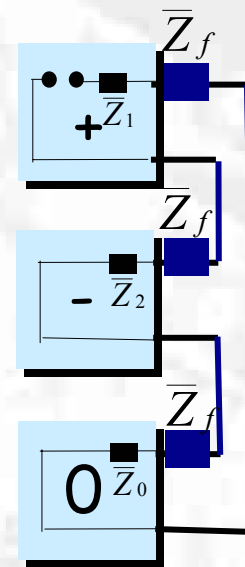
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_f \bar{i}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables



$$\bar{v}_0 + \bar{v}_1 + \bar{v}_2 = \bar{Z}_f \bar{i}_a$$

$$\bar{i}_0 = \bar{i}_2 = \bar{i}_1 = \frac{1}{3} \bar{i}_a$$



Conexión Serie

Interconexión de mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_0 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$

## Datos para estudio de cortocircuito

En un sistema interconectado, al conectar una nueva carga, se entregan niveles de cortocircuito a través de los valores de C-C trifásico y Monofásico.

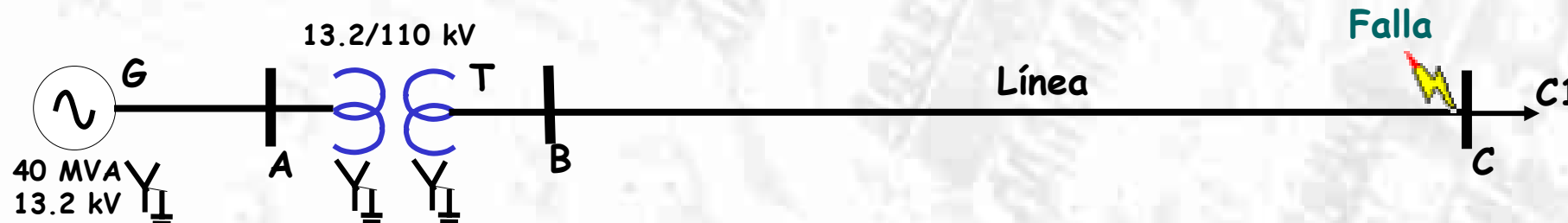
### Falla Trifásica a Tierra

$$I_{falla} = \frac{E}{x_1}$$

### Falla Monofásica a Tierra

$$I_{falla} = \frac{3E}{x_1 + x_2 + x_0}$$

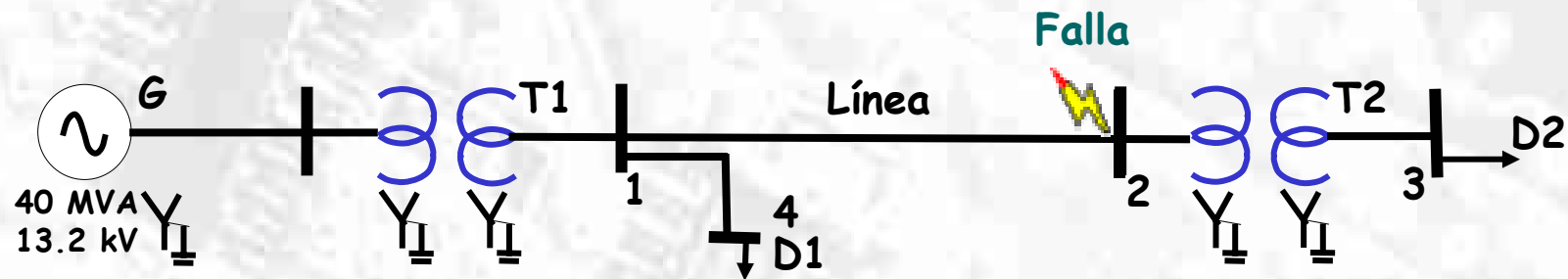
Ejemplo (base 40 MVA):



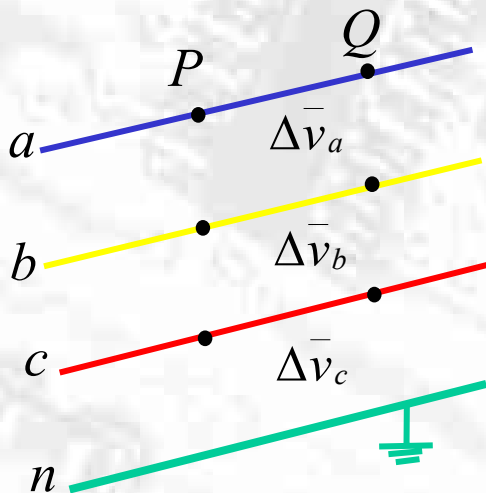




## Ejemplo 2:



## Planteamiento General en Mallas de Secuencia



Descripción

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables

No es válido supuesto de despreciar corrientes de carga frente a corrientes de falla.

$$\begin{bmatrix} \bullet & p \\ n & + \\ & q \end{bmatrix}$$

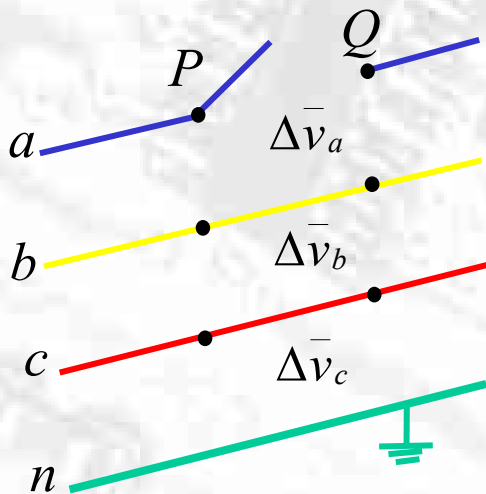
$$\begin{bmatrix} \bullet & p \\ n & - \\ & q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bullet & p \\ n & 0 \\ & q \end{bmatrix}$$

Interconexión de mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_0 \\ \Delta \bar{v}_1 \\ \Delta \bar{v}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_0 \\ \Delta \bar{v}_1 \\ \Delta \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$

## Una Fase Abierta



Descripción

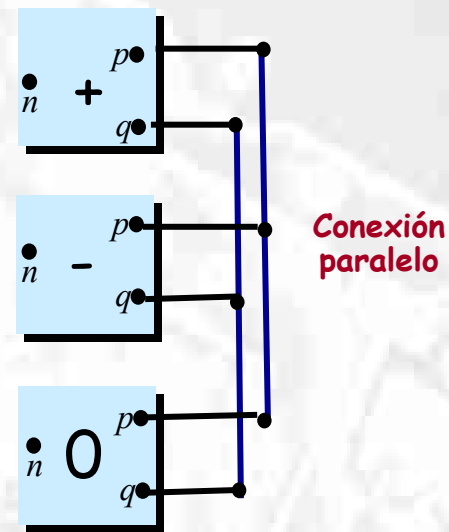
$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables



$$\bar{i}_0 + \bar{i}_1 + \bar{i}_2 = 0$$

$$\Delta \bar{v}_0 = \Delta \bar{v}_2 = \Delta \bar{v}_1$$

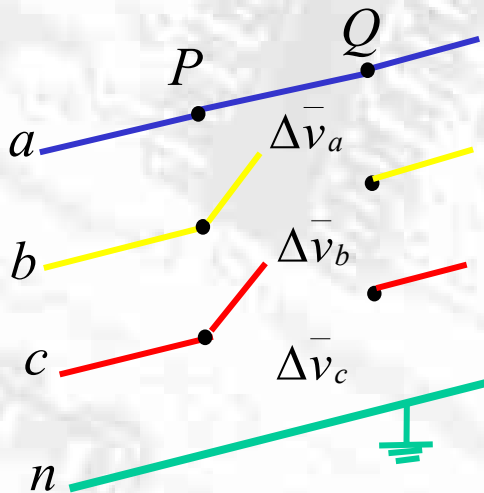


Interconexión de mallas de secuencia

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_0 \\ \Delta \bar{v}_1 \\ \Delta \bar{v}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_0 \\ \Delta \bar{v}_1 \\ \Delta \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$



## Dos Fases Abiertas



Descripción

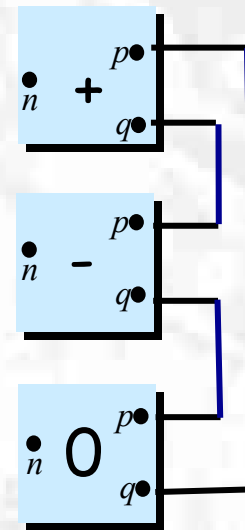
$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \\ \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Conocimiento de variables



$$\Delta \bar{v}_a + \Delta \bar{v}_b + \Delta \bar{v}_c = 0$$

$$\bar{i}_0 = \bar{i}_2 = \bar{i}_1$$



Conexión  
Serie

Interconexión de  
mallas de secuencia

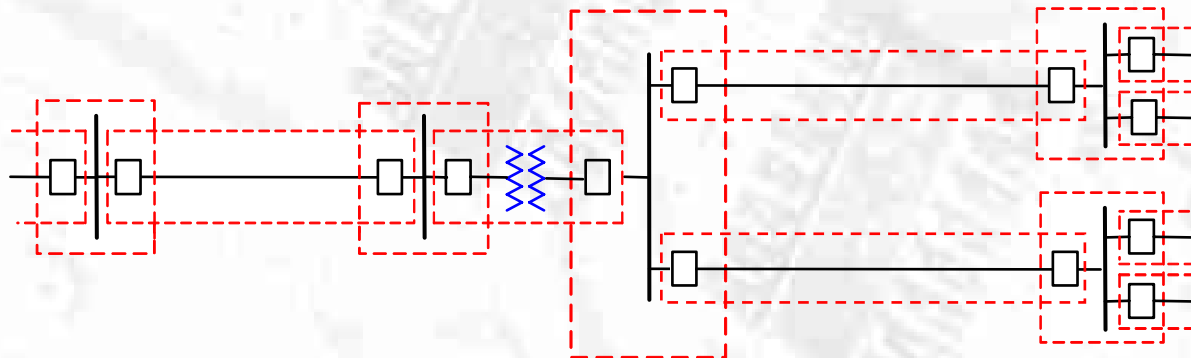
$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_0 \\ \Delta \bar{v}_1 \\ \Delta \bar{v}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_0 \\ \Delta \bar{v}_1 \\ \Delta \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{v}_a \\ \Delta \bar{v}_b \\ \Delta \bar{v}_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}$$

## Concepto General

- Protección de equipos
- Protección de personas
- Estabilidad del sistema

## • Sistemas de Protección

- Transformadores de medida
- Relés de protección
- Relés auxiliares
- Interruptores
- Desconectadores
- Sistemas de baterías



Traslape de Protecciones

- **Confiabilidad**
- **Rapidez**
- **Sensibilidad**
- **Selectividad o discriminación**



### Esquemas de Protecciones

Número	Función
12	Detector de sobre velocidad
14	Detector de baja velocidad
21	Detector de distancia
23	Control de temperatura
25	Verificador de sincronismo
27	Detector de subtensión
32	Detector de dirección de potencia activa
37	Detector de baja corriente o potencia baja
40	Detector de baja corriente de campo de una máquina
47	Detector de secuencia de fases
49	Detector térmico
50	Detector de sobrecorriente instantáneo
51	Detector de sobrecorriente con tiempo diferido
52	Interruptor
55	Detector de factor de potencia
59	Detector de sobretensión
67	Detector de sobretensión direccional
74	Alarma
79	Reconexión
81	Detector de frecuencia
85	Carrier o hilo piloto
87	Detector por diferencia
94	Desenganche o disparo (trip)

Números NEMA más usados

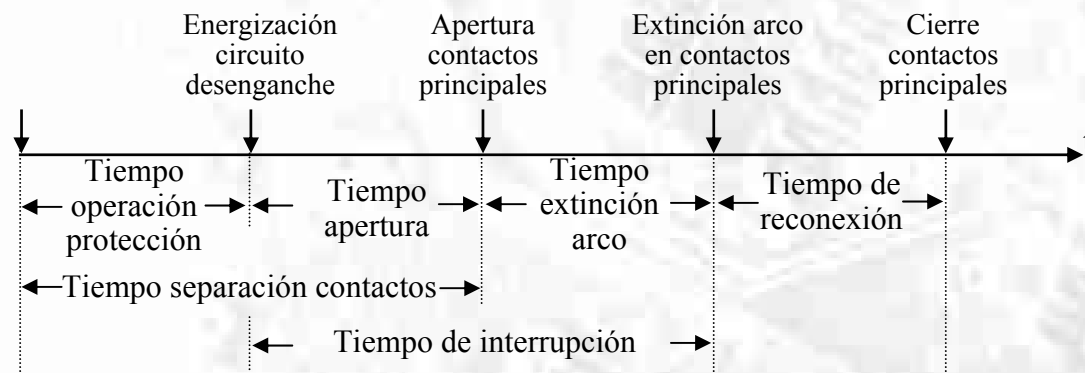


### Breve descripción de los siguientes aspectos

1. **Sistemas de Baterías**
2. **Transformadores de medida**
  - **TTPP, TTCC**
3. **Relés de protección**
  - **Detección por corriente (50, 51)**
  - **Detección diferencial de corriente (87)**
  - **Detección por corrientes de secuencia**
  - **Detección por tensión (59, 27)**
  - **Detección por tensión residual**
  - **Detección por frecuencia (81)**
  - **Detección por aceleración de la frecuencia**
  - **Detección por comparación de ángulos**
  - **Detección por distancia (21)**



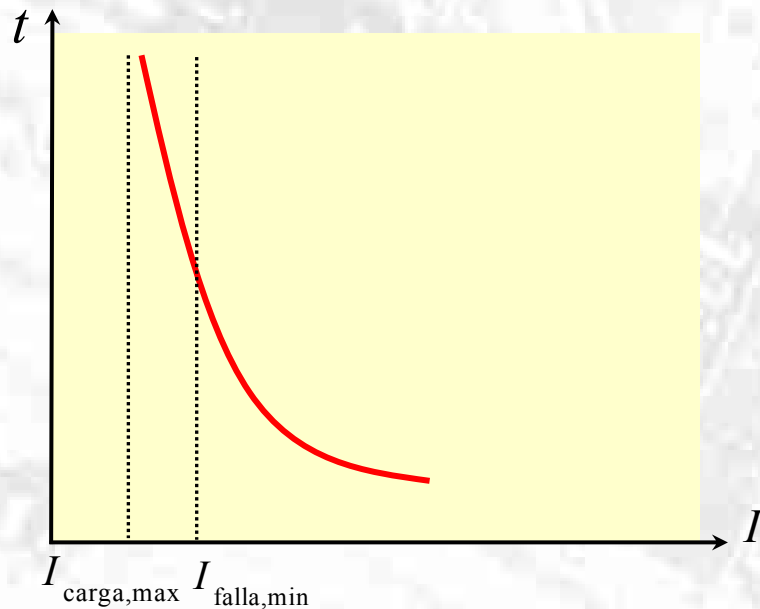
4. Los circuitos de control
5. Interruptores de poder
  - Interruptor en aceite
  - Interruptores de aire comprimido
  - Interruptores con hexafloruro de azufre ( $\text{SF}_6$ )
6. Fusibles y reconectadores
7. Protección de los usuarios, redes de distribución, redes de transporte, generadores.



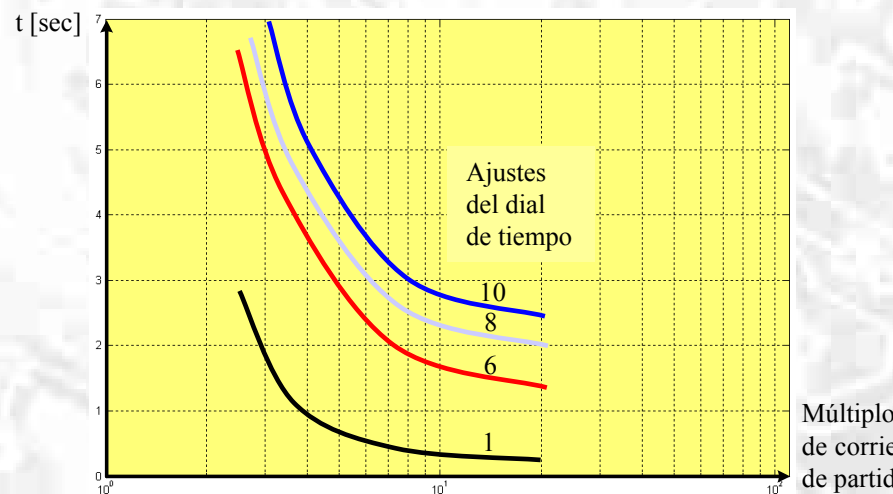
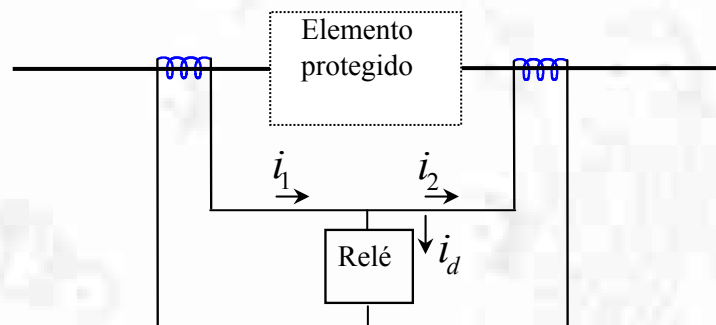
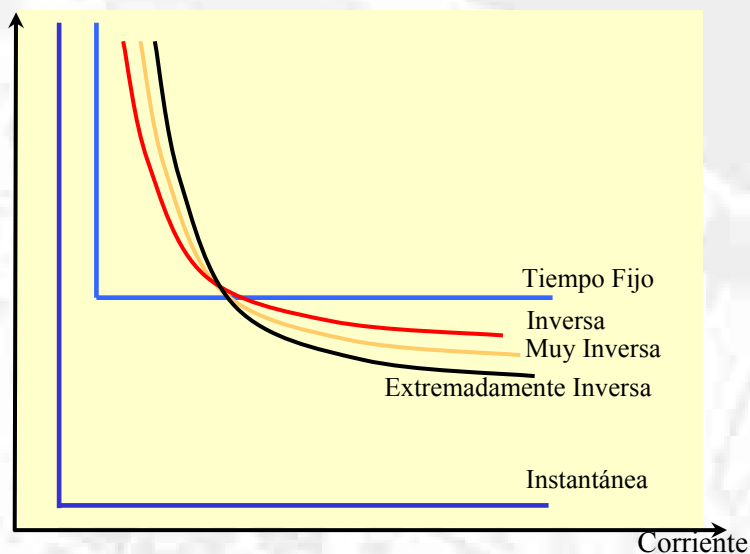




## Imágenes de Apoyo (I)



Tiempo de Operación



## Imágenes de Apoyo (II)

