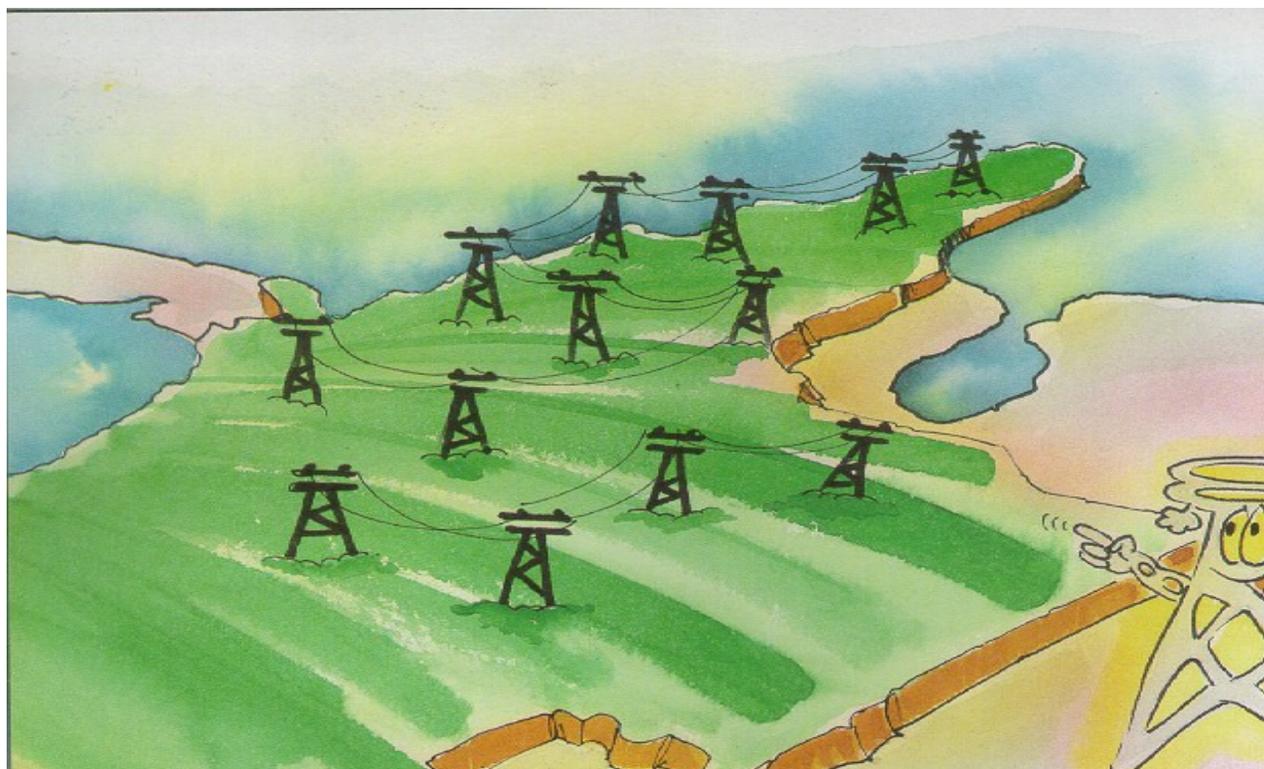




# PROTECCIONES – HERRAMIENTAS ANÁLISIS DE FALLAS



## PROTECCIONES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Jorge Antonio Jaimes Báez - MPE Ingeniero Eléctricista

# BIBLIOGRAFÍA

- **Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia** – Héctor Jorge Altuve Ferrer- Universidad Autónoma de Nuevo León- México
- **GUÍAS PARA EL BUEN AJUSTE Y LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL STN.** Ingeniería Especializada Blandon – IEB – Julio 2000
- **Curso Protecciones Eléctricas** – Ingeniería Especializada Blandon – 2011
- **Protective relaying – Principles and applications.** J Lewis Blackburn Marcel Dekker, Inc. – 1987
- **IEEE BUFF BOOK - Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Comercial Power Systems** IEEE Industrial and Commercial Power Systems Committee. 1990
- **Electrical Distribution-System Protection.** Cooper Power Systems. Third Edition – 1990
- **Manual de Protecciones para Sistemas Eléctricos de Potencia.** Orlando Ortiz, César Rozo, Sandra Mendoza, William Chaparro. U. Nacional – ISA -2000
- **Protecciones Eléctricas – Notas de Clase.** Gilberto Carrillo Caicedo. UIS. 2007
- **Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión** – Segunda Edición. HVM - Mejía y Villegas Consultores.



# HERRAMIENTAS ANÁLISIS DE FALLAS



**Tema 1:** Componentes Simétricas

**Tema 2:** Cortocircuito Trifásico (capacidad de cortocircuito)

**Tema 3:** Cortocircuito monofásico:

- Representación de los equipos en redes de secuencia
- Redes de secuencia para tipos de falla

**Tema 4:** Cálculo de corrientes de cortocircuito



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



- La evaluación del comportamiento de sistemas trifásicos balanceados, es posible realizarlo utilizando la representación “por fase”. Esto es, se resuelve el problema de la misma manera que si fuese un sistema monofásico, y las cantidades de las otras dos fases difieren de los fasores obtenidos en la representación por fase en  $\pm 120^\circ$ .
- En el caso de sistemas desbalanceados, no es posible evaluar su comportamiento con la representación por fase de la manera tan directa que se hace con los sistemas balanceados, lo cual provoca que el análisis de estos sistemas se complique.



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



- El método de componentes simétricas permite extender el análisis por fase a sistemas que contienen cargas desbalanceadas
- Este método fue presentado en 1918 por Charles LeGeyt Fortescue. Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas eléctricos trifásicos desbalanceados.
- Las componentes simétricas permiten escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con  $n$  fases) como la suma de  $n$  sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición (uno de secuencia cero).



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



- El método de componentes simétricas, desde el punto de vista matemático es una transformación lineal ya que permite desacoplar un sistema balanceado de orden “n” en “n” sistemas independientes.

## Componentes Simétricas en Sistemas Trifásicos.

- Este método permite analizar un sistema de fasores trifásico desbalanceados mediante tres sistemas de tres fasores balanceados denominados de secuencia positiva, negativa y cero.



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



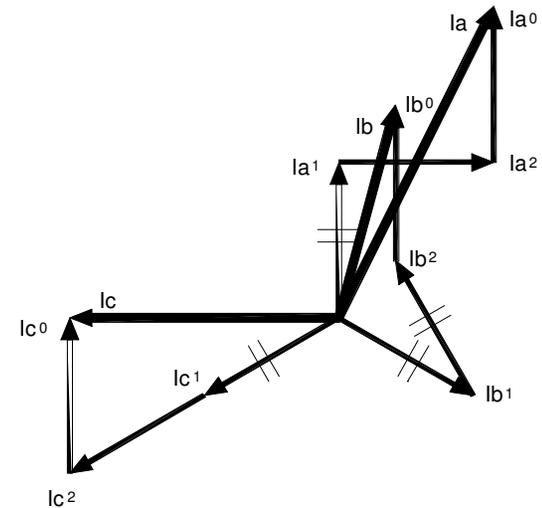
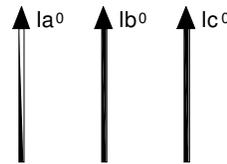
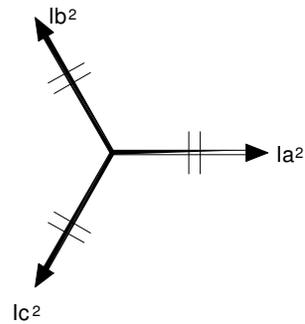
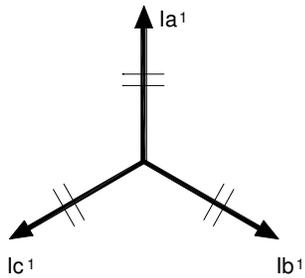
- Componentes de Secuencia Positiva:
  - Consiste en tres fasores de igual magnitud desfasados  $120^\circ$  con la misma secuencia de fase que los fasores originales.
- Componentes de Secuencia Negativa:
  - Consiste en tres fasores de igual magnitud desfasados  $120^\circ$  con una secuencia de fase opuesta a la de los fasores originales.
- Componentes de Secuencia Cero:
  - Consiste en tres fasores de igual magnitud y desfase cero entre ellos





# COMPONENTES SIMÉTRICAS

- La relación es biunívoca, es decir, que sólo hay una forma de pasar del Sistema A al Sistema B y viceversa.



$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2}$$



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



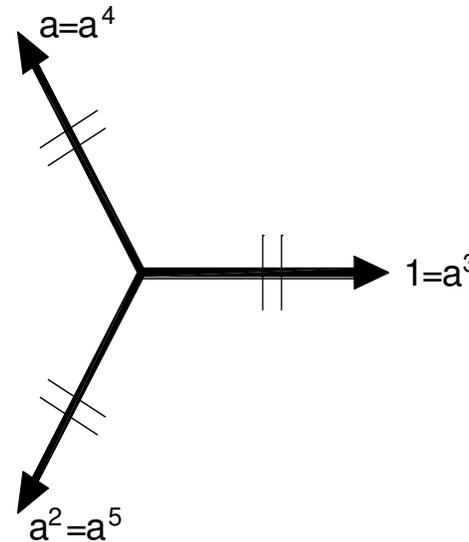
- Representación de la relación ortonormal

*Operador a:*

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

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

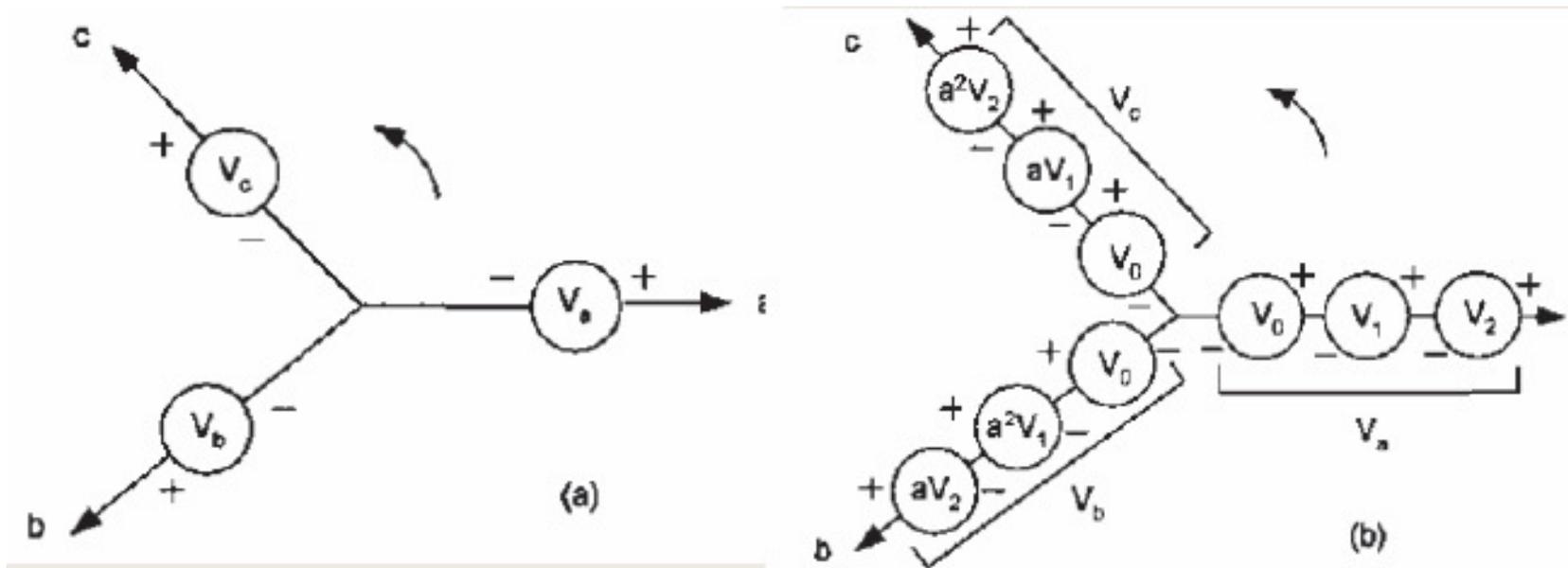
$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$





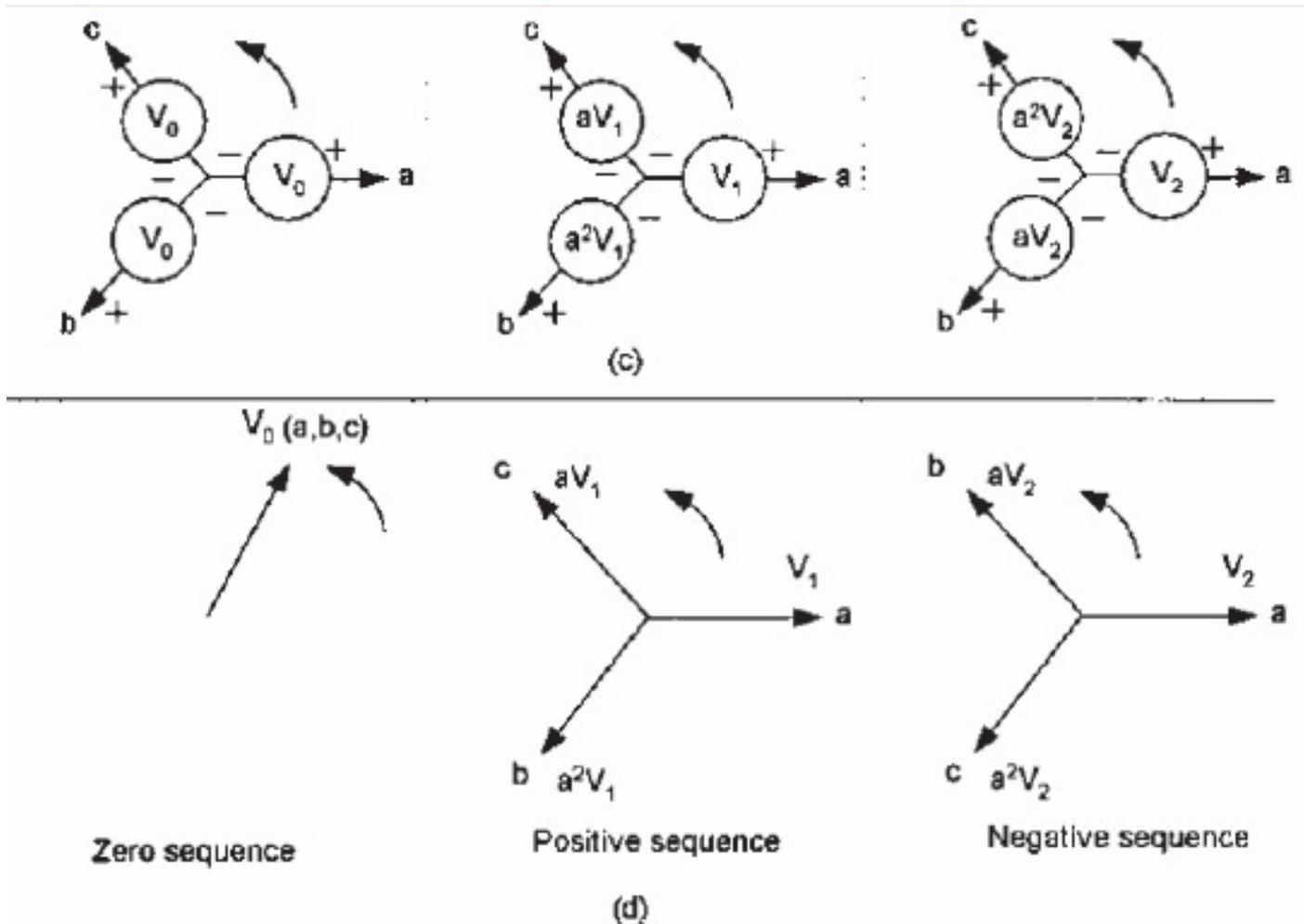
# COMPONENTES SIMÉTRICAS

- Gráficamente, la evolución progresiva de pasar de cantidades de fase a cantidades de secuencia se presentan en las figuras:





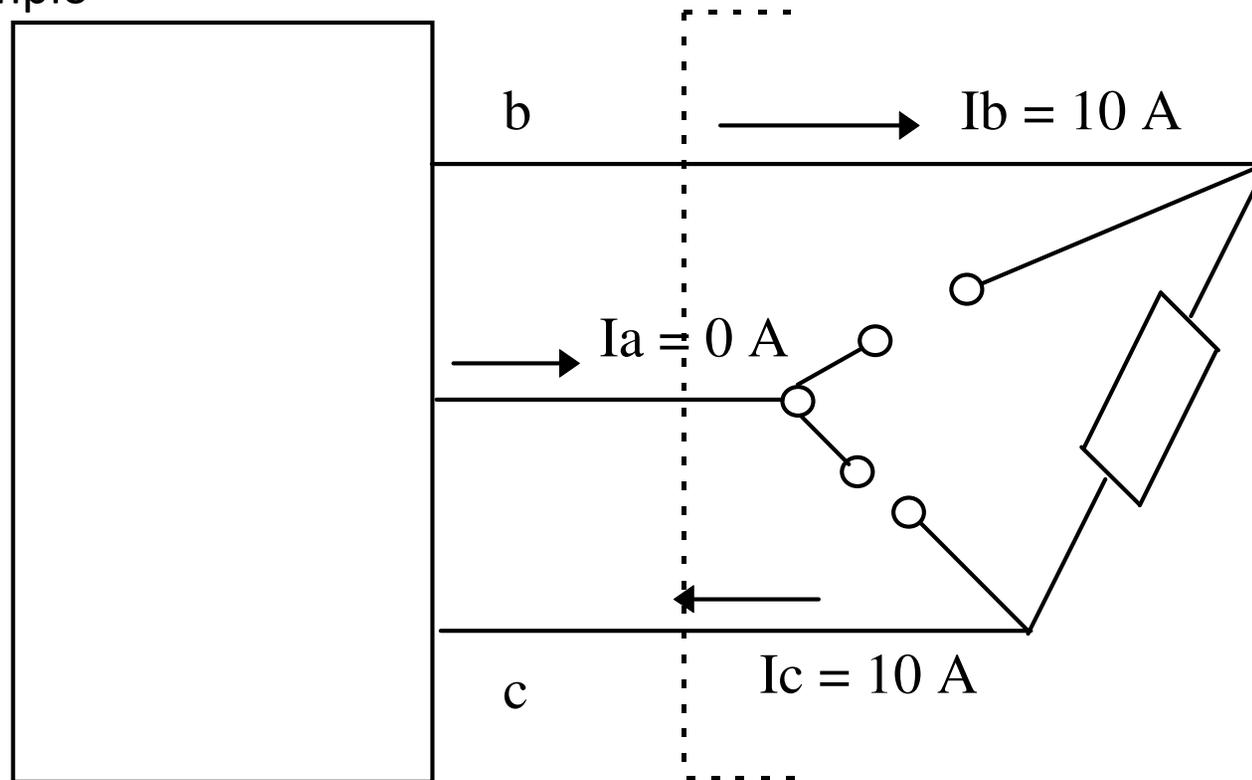
# COMPONENTES SIMÉTRICAS





# COMPONENTES SIMÉTRICAS

- Ejemplo



La fase “rara”  
siempre es la fase “a”



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



- En general

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{[A]}$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

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



# COMPONENTES SIMÉTRICAS



Para el ejemplo:

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

$10 \angle 180^\circ$

$I = 0$

No involucra tierra

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(10a - 10a^2) = \frac{10}{3}(a - a^2) = \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(10a^2 - 10a) = \frac{10}{3}(a^2 - a)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

Herramientas

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 + \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ + \frac{10}{\sqrt{3}} \angle -90^\circ = 0$$



# CORTOCIRCUITO



Un Cortocircuito (CC) es la unión eléctrica inapropiada de dos o más puntos de la red del SP a través de una  $Z_{cc} \rightarrow 0$

Los CC son causados por múltiples agentes internos y externos:

- **Internos:** Fallas de aislamiento (en bobinas, en subestaciones, en equipos de control, etc.)
- **Externos:**
  - Atmosféricos: Los rayos crean un  $\Delta|V|$  grande entre fases y se rompe el aislamiento. (50%)
  - Maniobras: Operación de interruptores provocando TRV (Transient Recovery Voltage) el cual produce  $\Delta|V|$  grandes y cortocircuitos por ruptura del aislamiento. (30%)
  - Naturales, humanos: bosques, animales, fundaciones de torres que pierden solidez, niños que juegan, violencia, explosiones, alambres entre fases, madera húmeda, etc. (20%)



# CORTOCIRCUITO

## Clasificación



### Simétricos:

- Contacto entre las tres fases con  $Z_{cc} \rightarrow 0$
  - Contactos entre las tres fases y el neutro con  $Z_{cc} \rightarrow 0$  (no importa “n”)
  - Estudio sobre la fase “a” solamente. Estudio de simetría fasorial (módulos iguales en a, b, c; ángulos  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$ ,  $120^\circ$ )
  - Son los más graves en cuanto al bloqueo en la transferencia de potencia.
  - Es el menos frecuente y provoca reacciones especiales (no senoidales) en máquina rotativa y en la red eléctrica.
- **Asimétricos:**
- Involucra necesariamente las tres fases (a, b, c), por ejemplo, dos fases a tierra, 2 fases, una fase a tierra, etc.
  - Siempre se tienen dos fases contra una, la fase diferente en el análisis matemático de la red se designa como fase a



# CORTOCIRCUITO

## Clasificación



### Fallas Simétricas y Asimétricas en Sistemas de Potencia

Tipo de falla					
Fallas	Asimétricas			Simétricas	
Frecuencia de aparición	0,7	0,15	0,08	0,05	0,02
Gravedad en $P_{ij}$	30%	45%	75%	100%	100%
Gravedad en $  I_{falla}$	120%	60%	70%	100%	100%
Modelo de la falla - Conexión					
Diagramas de conexión de secuencias (1, 2, 0)					



# CORTOCIRCUITO



## Trifásico

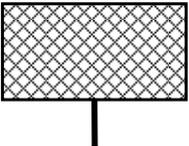
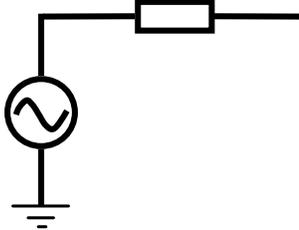
- Este cortocircuito es el que se calcula más fácilmente debido a que es completamente simétrico, es decir, que en las tres fases del sistema de potencia ocurre exactamente lo mismo y por consiguiente es suficiente calcular el cortocircuito solo en una fase. Para el cálculo de este cortocircuito se puede utilizar el concepto de los Megavoltamperios de cortocircuito teniendo en cuenta que éstos son proporcionales a la admitancia, por lo tanto, cuando los circuitos están en paralelo, éstos se suma, y cuando los circuitos están en serie, el resultado es el producto sobre la suma.



# CORTOCIRCUITO



## Trifásico

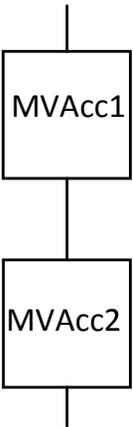
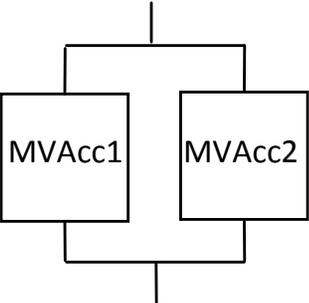
Símbolo	Descripción	Equivalente eléctrico	MVAcc equivalentes
	Equivalente de cortocircuito		$MVAcc3\varphi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times Icc3\varphi_{sistema}$
	Transformador de potencia		$MVAcc3\varphi_{trafo} = \frac{S_{trafo}}{Z1cc}$
	Circuito de distribución, línea de transmisión		$MVAcc3\varphi_{circuito} = \frac{V^2}{Z1}$



# CORTOCIRCUITO



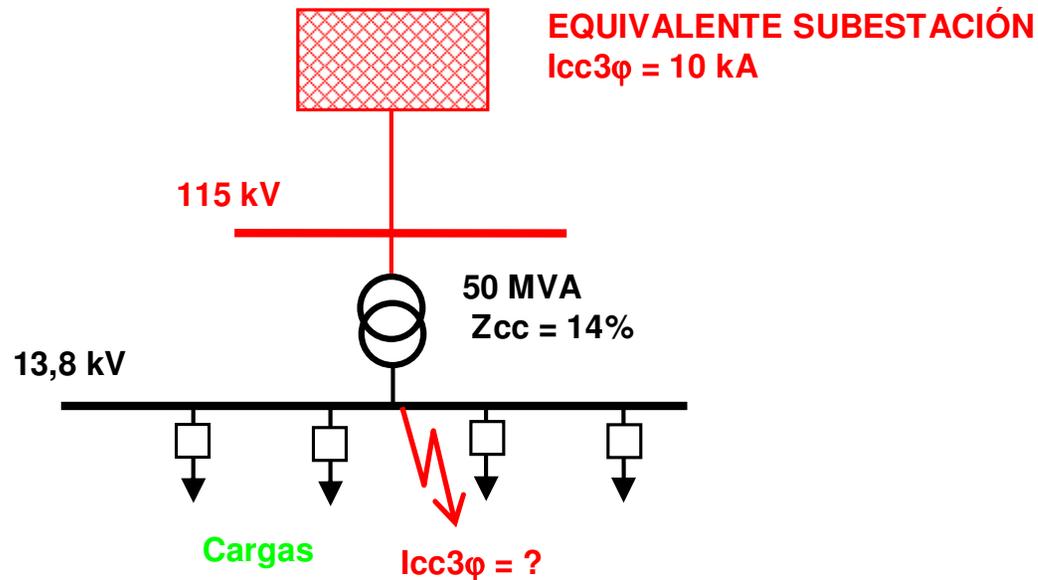
## Trifásico

	<p>Conexión serie</p> $MVA_{Acc} = \frac{MVA_{Acc1} \times MVA_{Acc2}}{MVA_{Acc1} + MVA_{Acc2}}$
	<p>Conexión paralelo</p> $MVA_{Acc} = MVA_{Acc1} + MVA_{Acc2}$



# CORTOCIRCUITO

## Trifásico



$$MVAcc3\phi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times I_{cc3\phi_{sistema}} = \sqrt{3} \times 115 \times 10 = 1991,9 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{trafo} = \frac{S_{trafo}}{Z_{1cc}} = \frac{50}{0,14} = 357,1 \text{ MVA}$$

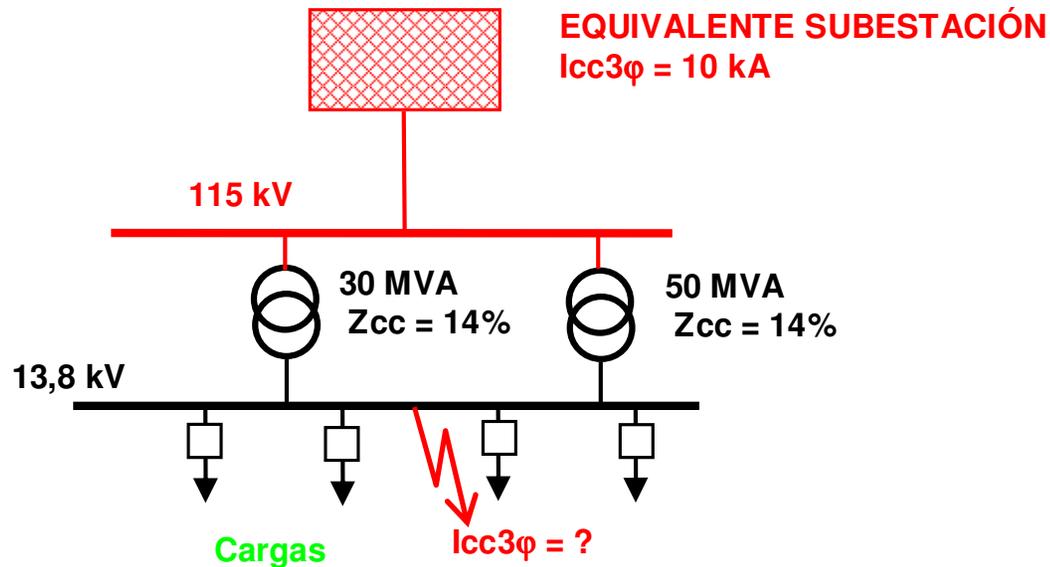
$$MVAcc3\phi_{barra13,8} = \frac{MVAcc3\phi_{trafo} \times MVAcc3\phi_{sistema}}{MVAcc3\phi_{trafo} + MVAcc3\phi_{sistema}} = \frac{357,1 \times 1991,9}{357,1 + 1991,9} = 302,81 \text{ MVA}$$

$$I_{cc3\phi_{barra13,8}} = \frac{MVAcc3\phi_{barra13,8}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{302,81}{\sqrt{3} \times 13,8} = 12,67 \text{ kA}$$



# CORTOCIRCUITO

## Trifásico



$$MVAcc3\varphi_{trafo1} = \frac{S_{trafo1}}{Z_{1cc}} = \frac{30}{0,14} = 214,3 \text{ MVA} \quad MVAcc3\varphi_{trafo2} = \frac{S_{trafo2}}{Z_{1cc}} = \frac{50}{0,14} = 357,1 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\varphi_{trafos} = MVAcc3\varphi_{trafo1} + MVAcc3\varphi_{trafo2} = 357,1 + 214,3 \text{ MVA} = 571,4 \text{ MVA}$$

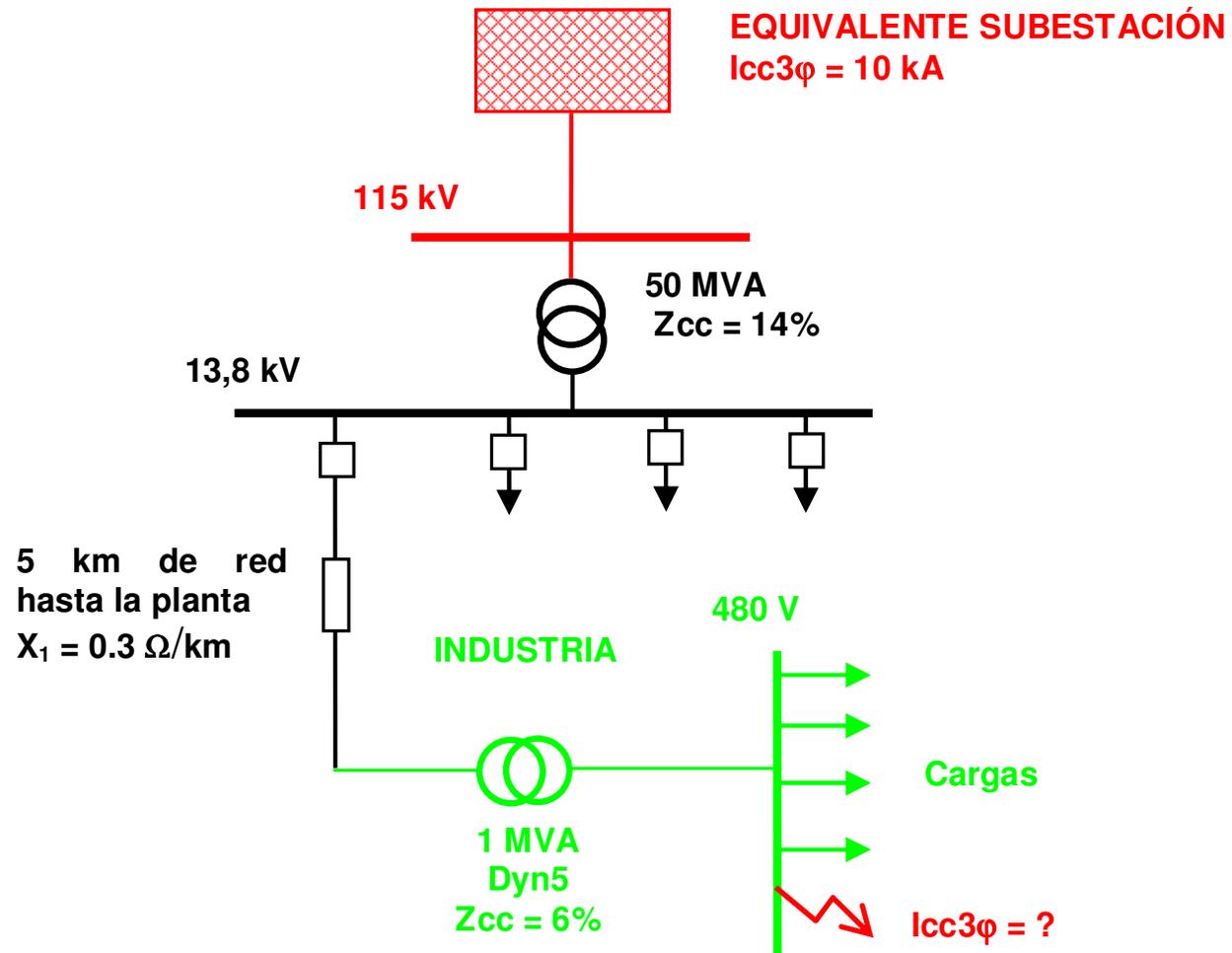
$$MVAcc3\varphi_{barra13,8} = \frac{MVAcc3\varphi_{trafos} \times MVAcc3\varphi_{sistema}}{MVAcc3\varphi_{trafos} + MVAcc3\varphi_{sistema}} = \frac{571,4 \times 1991,9}{571,4 + 1991,9} = 440 \text{ MVA}$$

$$I_{cc3\varphi_{barra13,8}} = \frac{MVAcc3\varphi_{barra13,8}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{440}{\sqrt{3} \times 13,8} = 18,58 \text{ kA}$$



# CORTOCIRCUITO

## Trifásico





# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de secuencia*

- Las redes de secuencia son la representación de una de las tres fases (fase a tierra o neutro) de un sistema trifásico balanceado y muestran como fluirían las corrientes de secuencia en el SEP en caso de existir. Estas redes se construyen a partir del “punto de falla”, por la interconexión de las impedancias de secuencia de las componentes del SEP.



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de secuencia*

- En el análisis de SEP's se asume que en condiciones normales de operación éste es perfectamente balanceado (simétrico) y el desbalance (asimetría) ocurre únicamente en el punto de falla.
- En la realidad ésta consideración no se cumple en forma estricta. Sin embargo, el error de mantener esta consideración es despreciable en la mayoría de las veces.



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de secuencia*

- En análisis de SEP's el “punto de falla” se considera como el punto del SEP, donde ocurre el desbalance (ocurre algún corto circuito, apertura de alguna fase o un desbalance en la carga).
- Los voltajes representados en las redes de secuencia son de línea a neutro.



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de secuencia*

- De las redes de secuencia, la única red activa (con fuentes de voltaje) es la red de secuencia positiva.
- El voltaje de la fase “a” se toma como referencia, y los voltajes de las fases restantes se expresan con referencia a la fase “a”.



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

- Los estudios típicos de fallas en los SEP's consideran únicamente un instante de tiempo después de ocurrir la falla o el desbalance en el SEP.
- El modelo matemático del SEP para estudios de fallas es descrito adecuadamente por conjuntos de ecuaciones puramente algebraicas
- El modelo matemático del SEP describe la interacción de las redes de secuencia positiva, negativa y cero interconectadas en el “**punto de falla**”.



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



## *Representación de los equipos en redes de secuencia*

### Impedancias de Secuencia de las componentes del SEP.

- Una característica de las impedancias de secuencia positiva y negativa de elementos estáticos, lineales y simétricos son idénticas.
- La impedancia de este tipo de elementos es independiente de la secuencia de fases siempre que los voltajes que se les apliquen sean balanceados.
- Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de las componentes del SEP se obtienen aplicando la transformación de componentes simétricas a su modelo matemático en el marco de referencia de fase.



# CORTOCIRCUITO

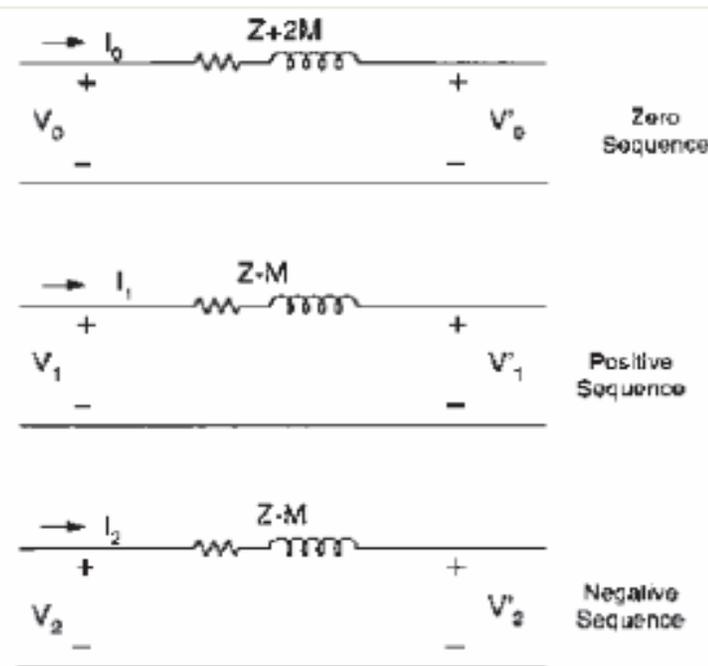
## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

#### □ Líneas de Transmisión.

- Los circuitos equivalentes de las impedancias de secuencia de una línea trifásica balanceada simétrica son:





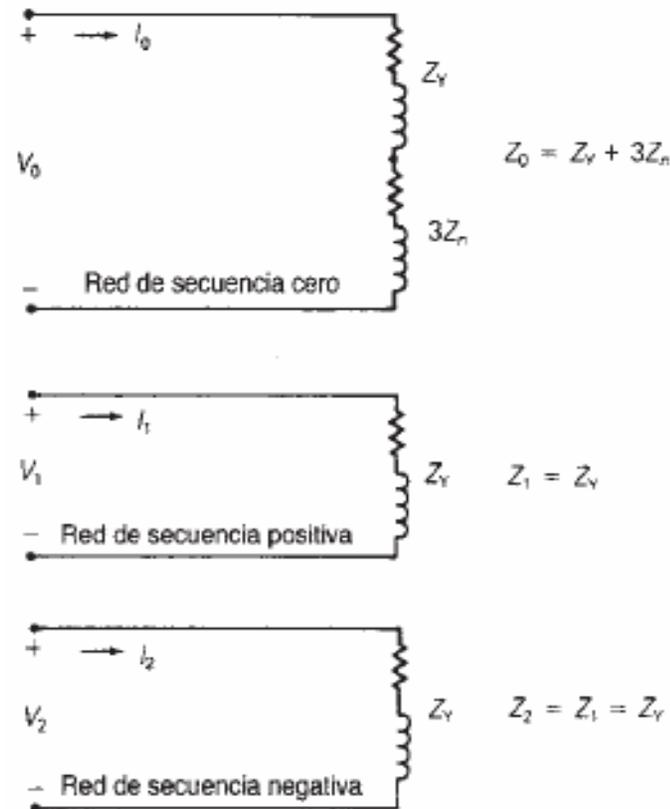
# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

#### Cargas conectadas en estrella aterrizada.





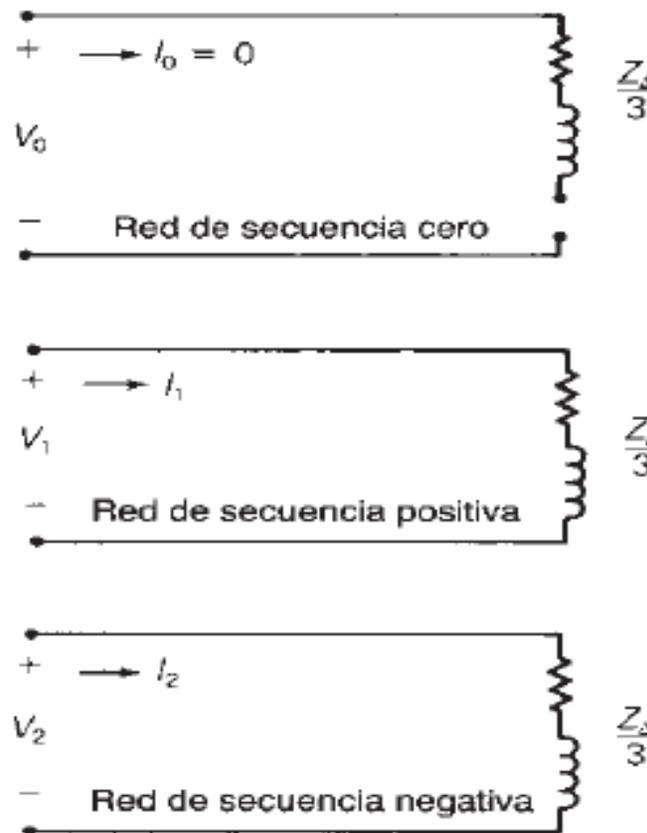
# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

- ❑ Cargas conectadas en estrella sin conexión a tierra o en delta.





# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

- Transformador trifásico bidevanado con varias conexiones en devanados

Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

- Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados

Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

- Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados

Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit

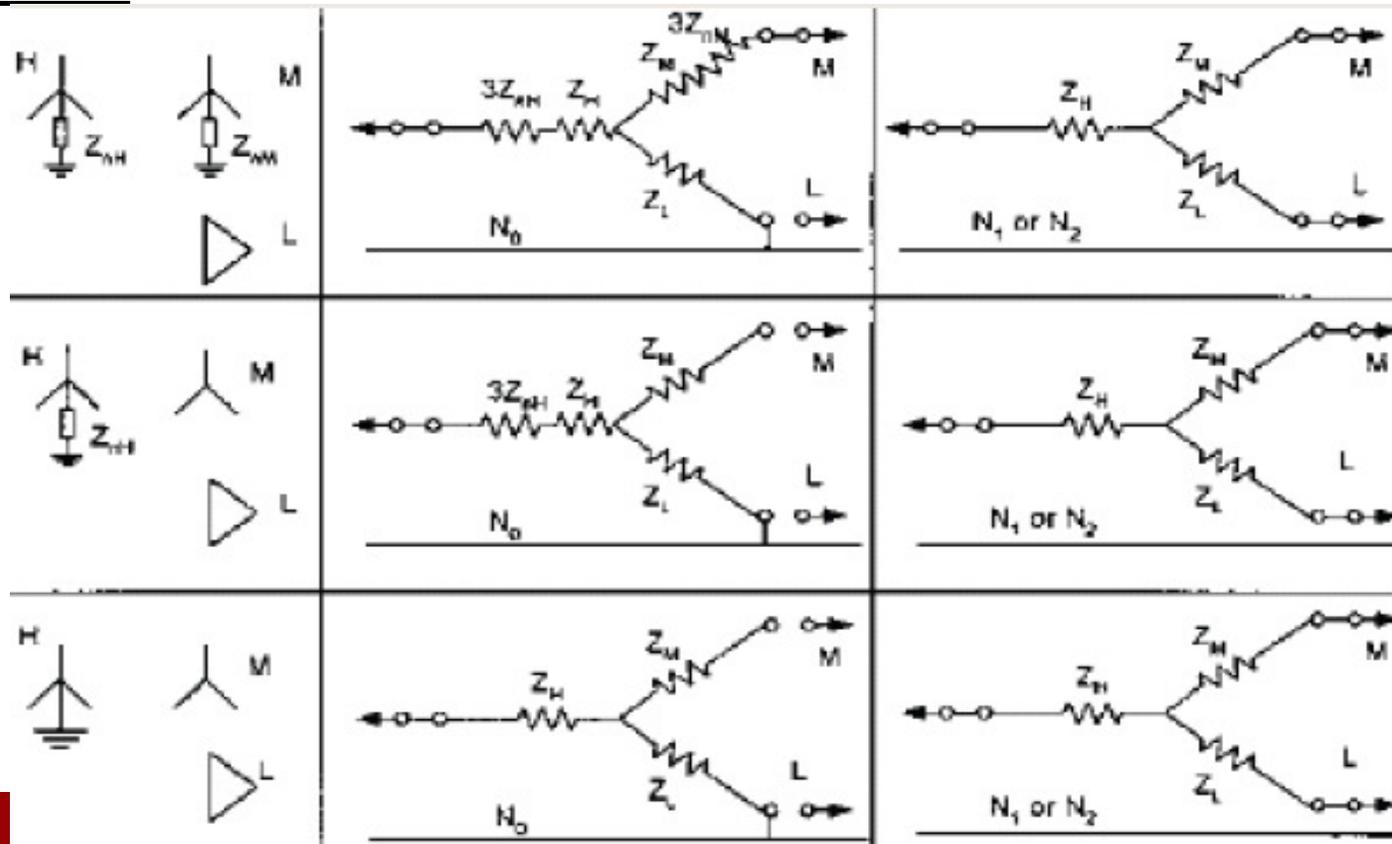


# CORTOCIRCUITO

## Monofásico

### *Representación de los equipos en redes de secuencia*

- Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados





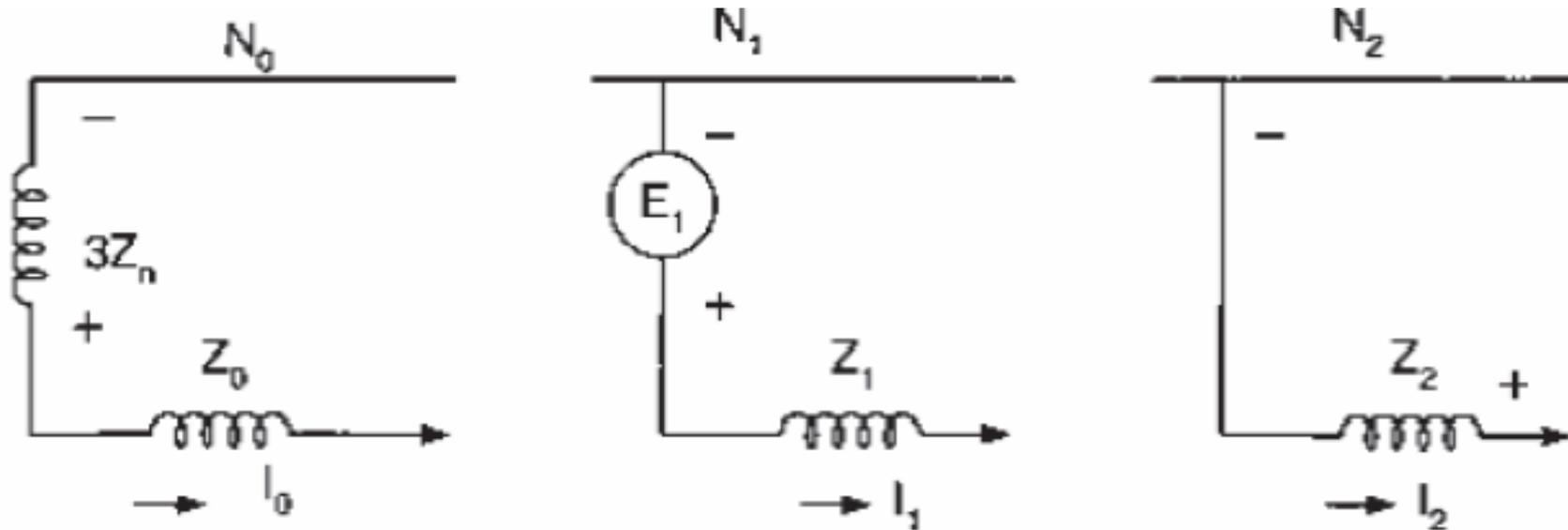
# CORTOCIRCUITO Monofásico



*Redes de secuencia*

*Representación de los equipos en redes de secuencia*

□ Generador Síncrono:





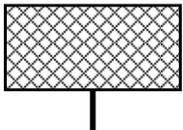
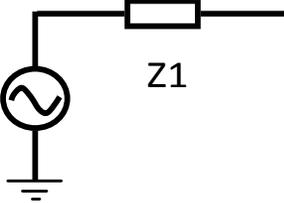
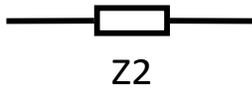
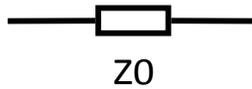
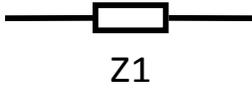
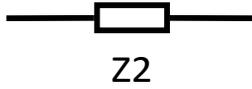
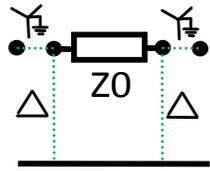
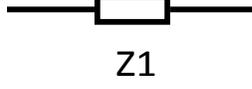
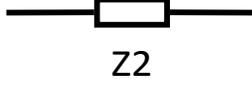
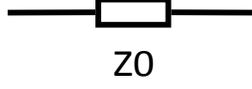
# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### Redes de secuencia

## Representación de los equipos en redes de secuencia

Símbolo	Descripción	Secuencia (+)	Secuencia (-)	Secuencia (0)
	Equivalente de cortocircuito			
	Transformador de potencia			
	Circuito de distribución, línea de transmisión			



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Análisis de fallas – Redes de Secuencia*

- La ocurrencia de fallas o corto circuitos en SEP's es un fenómeno de naturaleza aleatoria.
- Una falla es en realidad una conexión no planeada que modifica drásticamente la condición de operación de un SEP.
- El impacto de la falla en la operación del SEP en el tiempo, siendo en los primeros ciclos después de su ocurrencia donde se presentan los valores mayores de corrientes



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



## *Análisis de fallas – Redes de Secuencia*

- El estudio completo de fallas en SEP's requiere de estudios dinámicos (estabilidad transitoria) con el propósito de conocer el impacto de éstas, sobre el comportamiento de diversas variables del SEP conforme transcurre el tiempo.
- En forma genérica, las fallas en un SEP suelen ser clasificadas como fallas simétricas y asimétricas, o fallas en derivación y fallas serie



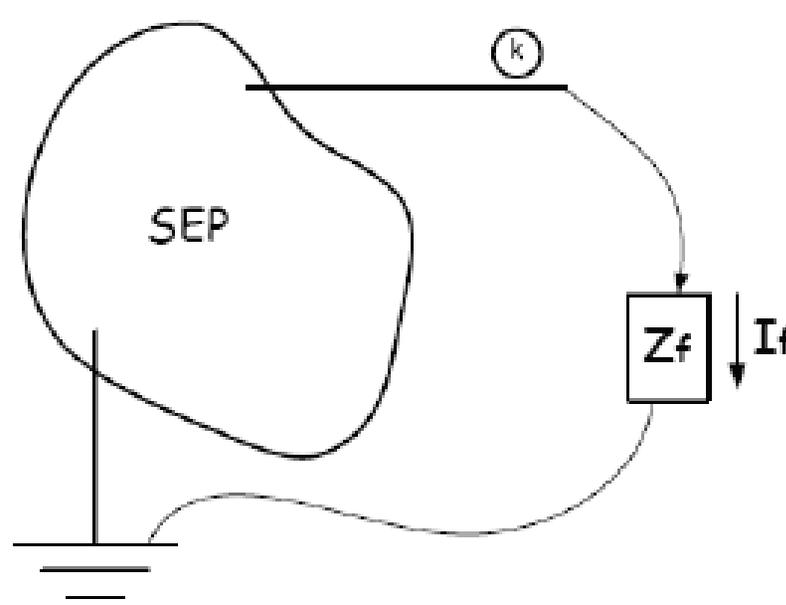
# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Análisis de fallas – Redes de Secuencia*

- Conceptualmente, la ocurrencia de una falla en el SEP's puede representarse como la conexión de una impedancia ( $Z_f$ ) a través de la cual circulará una corriente ( $I_f$ ) como se muestra en la siguiente figura:





# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Cálculo Corriente de Fallas – Redes de Secuencia*

- El procedimiento para el cálculo de las corrientes de falla en sistemas trifásicos balanceados, el modelo del SEP estará definido por la interconexión de sus redes de secuencia según el tipo de falla que habrá de ser analizada.
- El tipo de fallas que con mayor frecuencia experimenta un SEP son las asimétricas o desbalanceadas.



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Cálculo Corriente de Fallas – Redes de Secuencia*

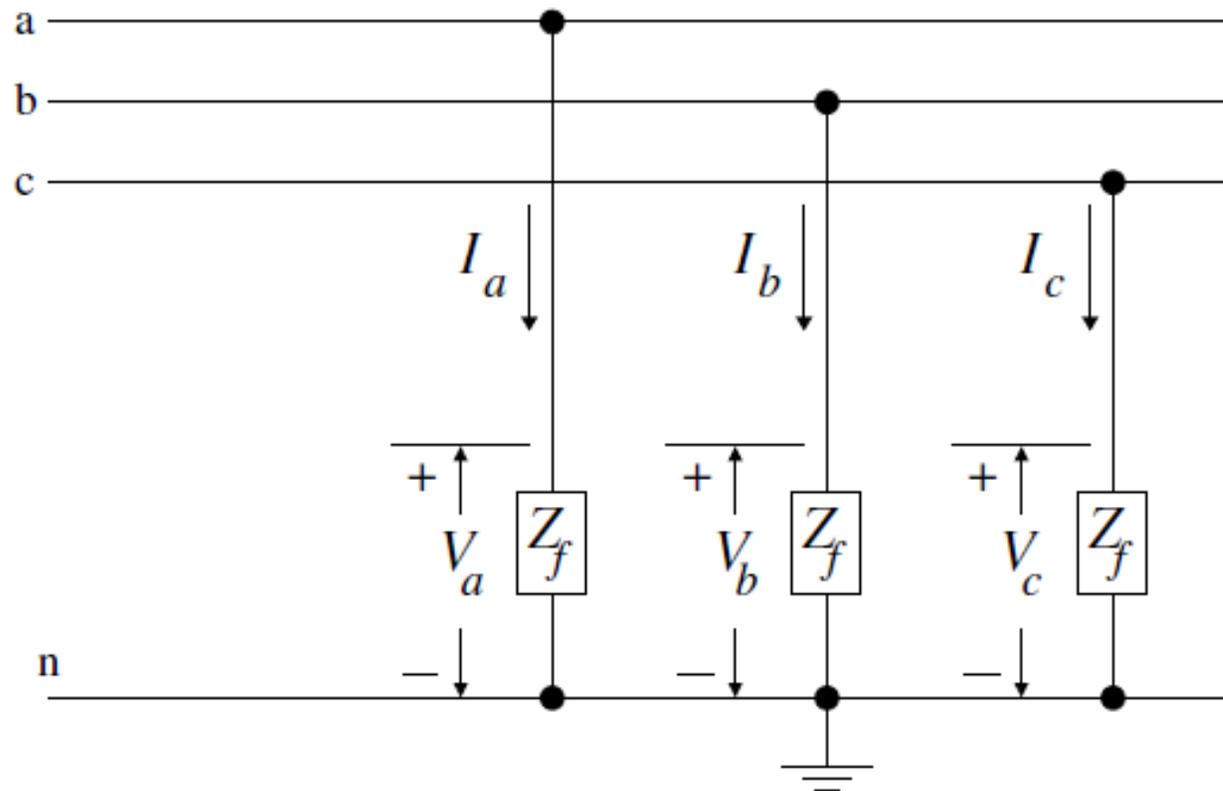
- Según la frecuencia con que ocurren en un SEP, se tiene el orden siguiente:
  - Falla sencilla línea (fase) a tierra (representa aproximadamente el 70% de las fallas que experimenta un SEP)
  - Falla línea a línea (fase a fase).
  - Fallas doble línea a tierra.
  - Fallas trifásicas balanceadas



# CORTOCIRCUITO Monofásico



## *Redes de Secuencia – Falla trifásica a tierra*





# CORTOCIRCUITO Monofásico



## *Redes de Secuencia – Falla trifásica a tierra*

### Condiciones de Falla:

$$V_a = I_a Z_f$$

$$V_b = I_b Z_f$$

$$V_c = I_c Z_f$$



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



## *Redes de Secuencia – Falla trifásica a tierra*

### Matrices secuencias:

- En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

- En función de sus componentes simétricas, se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{a(0)} \\ V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a(0)} \\ I_{a(1)} \\ I_{a(2)} \end{bmatrix}$$

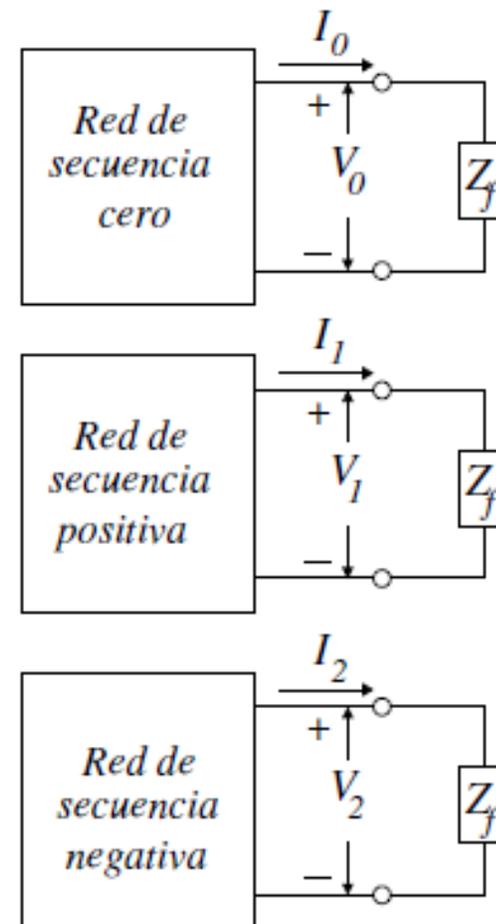


# CORTOCIRCUITO Monofásico

## *Redes de Secuencia – Falla trifásica a tierra*

### Red de secuencias:

- Las ecuaciones de secuencia de la ecuación se representan gráficamente:



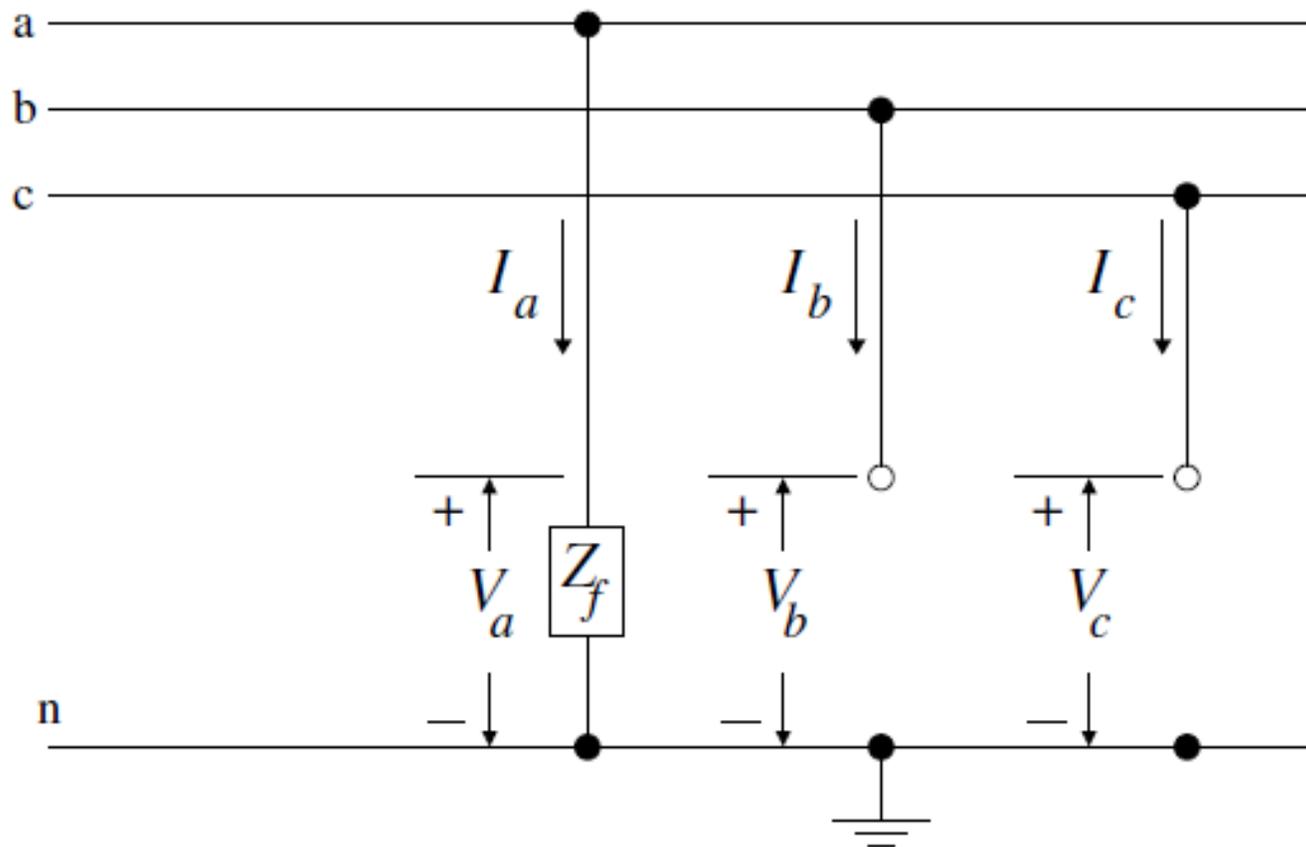


# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de Secuencia – Falla línea a tierra*





# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



## *Redes de Secuencia – Falla línea a tierra*

### Condiciones de Falla:

- De la figura se obtiene:

$$I_b = 0, I_c = 0 \wedge V_a = I_a Z_f$$

- De la anterior ecuación  $I_b = I_c$ , por tanto reemplazando en sus componentes, se tiene:

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

- Si se manipula la ecuación:

$$(a^2 - a) I_{a(1)} = (a^2 - a) I_{a(2)}$$



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de Secuencia – Falla línea a tierra*

- Por tanto:

$$I_{a(1)} = I_{a(2)}$$

- También:

$$I_b = I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = 0$$

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

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

$$I_{a(0)} = I_{a(1)}$$



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de Secuencia – Falla línea a tierra*

- Además por la ecuación de definición:

$$V_a = Z_f I_a$$

$$V_{a(0)} + V_{a(1)} + V_{a(2)} = Z_f (I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)})$$

$$V_{a(0)} + V_{a(1)} + V_{a(2)} = 3Z_f I_{a(1)}$$

- Reemplazando éstas ecuaciones en conexión de redes de secuencia, obtenemos lo siguiente:



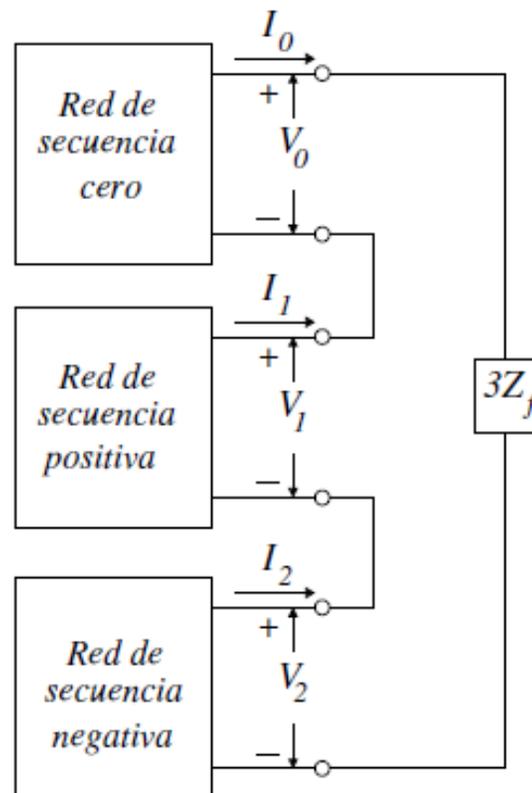
# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



### *Redes de Secuencia – Falla línea a tierra*

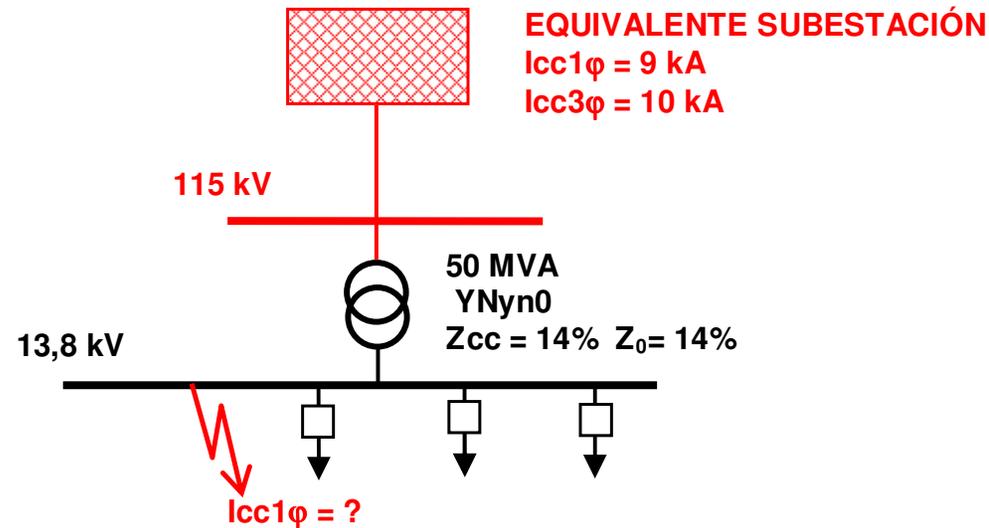
- Interconexión de redes de secuencia para una falla línea a tierra:





# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



- Se llevan todas las impedancias al lado de 13,8 kV
- Impedancia del transformador de potencia
- Para el transformador de potencia

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z_{pu} \quad Z_{base} = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{50} = 3,81\Omega$$

$$Z_{trafo}(\Omega_{13,8}) = Z_{base} \times Z_{pu} = 3,81 \times 0,14 = 0,5334\Omega$$



# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



- Para el sistema:
- Primero se debe hallar la impedancia de secuencia positiva, la cual solo está relacionada con el nivel de cortocircuito trifásico

$$Z1(\Omega_{115}) = \frac{V}{\sqrt{3} I_{cc3\phi}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \times 10000} = 6,64\Omega$$

$$Z0(\Omega_{115}) = \frac{\sqrt{3}V}{I_{cc1\phi}} - Z1(\Omega) - Z2(\Omega) = \frac{\sqrt{3} \times 115000}{9000} - 2 \times 6,64 = 8,85\Omega$$

- Ahora, estos resultados se deben pasar a los valores vistos en el lado de 13,8 kV

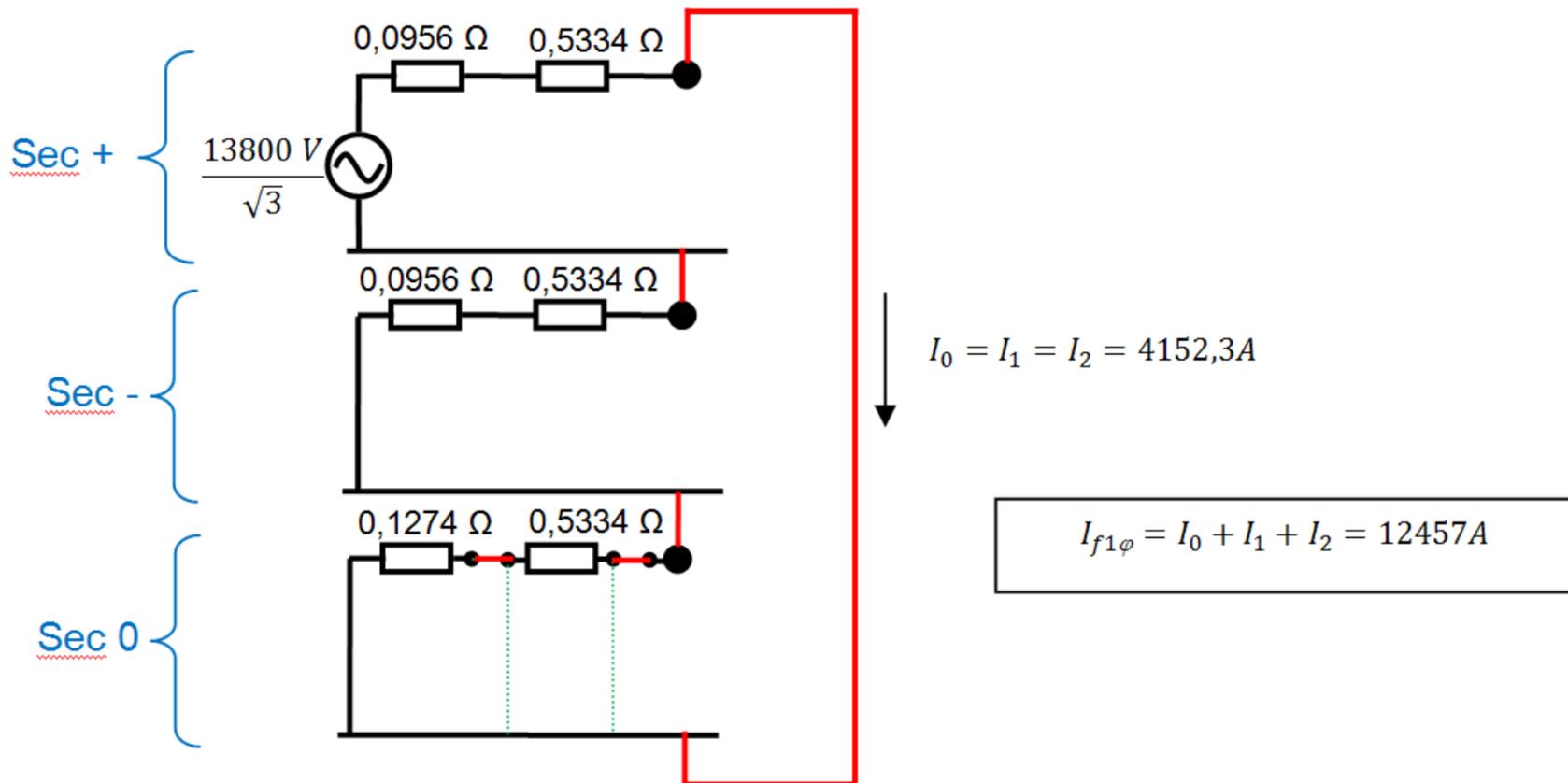
$$Z1(\Omega_{13,8}) = Z1(\Omega_{115}) \frac{13,8^2}{115^2} = 0,0956\Omega$$

$$Z0(\Omega_{13,8}) = Z0(\Omega_{115}) \frac{13,8^2}{115^2} = 0,1274\Omega$$



# CORTOCIRCUITO Monofásico

## • Transformador en conexión YNyn

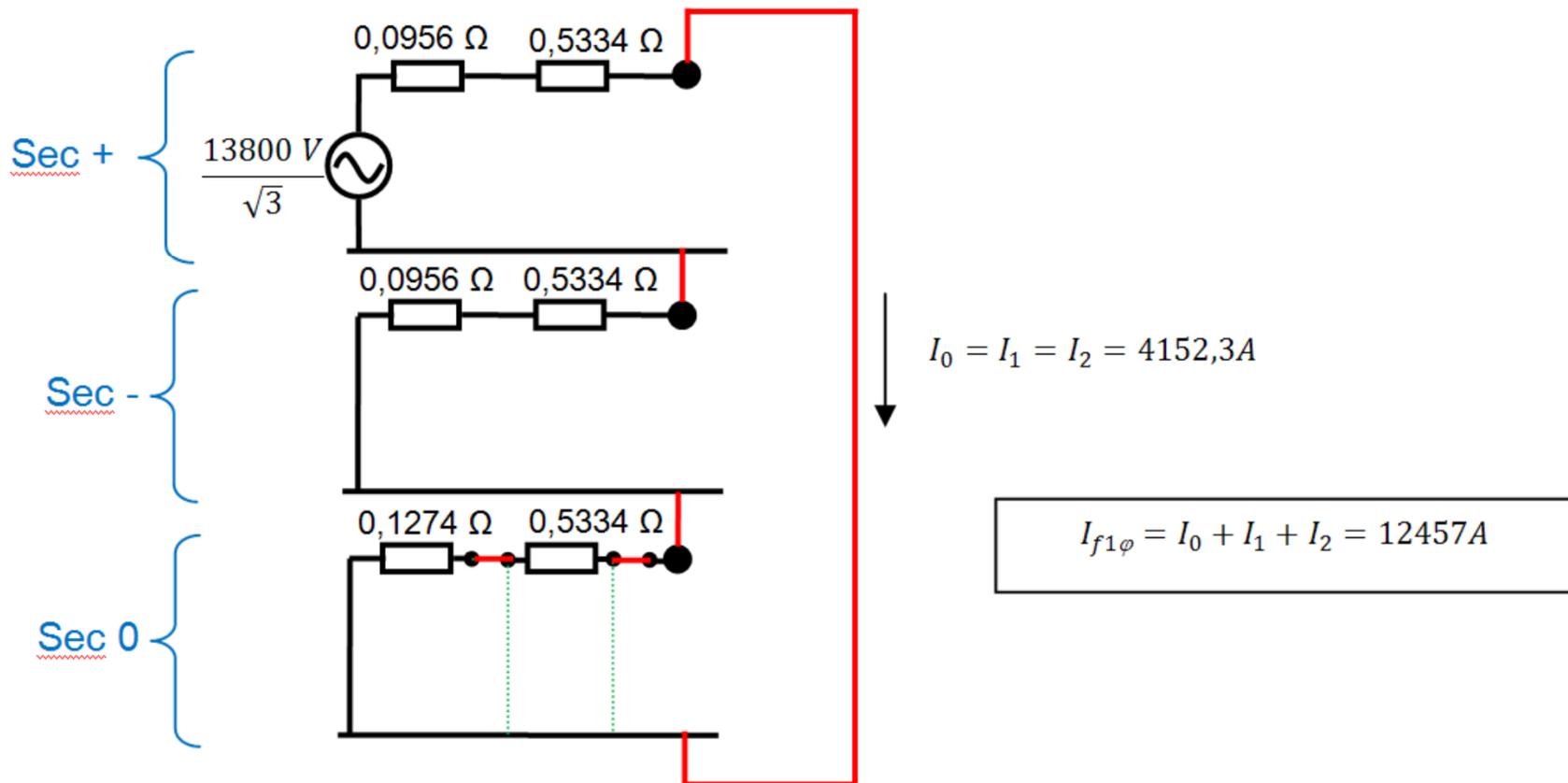




# CORTOCIRCUITO

## Monofásico

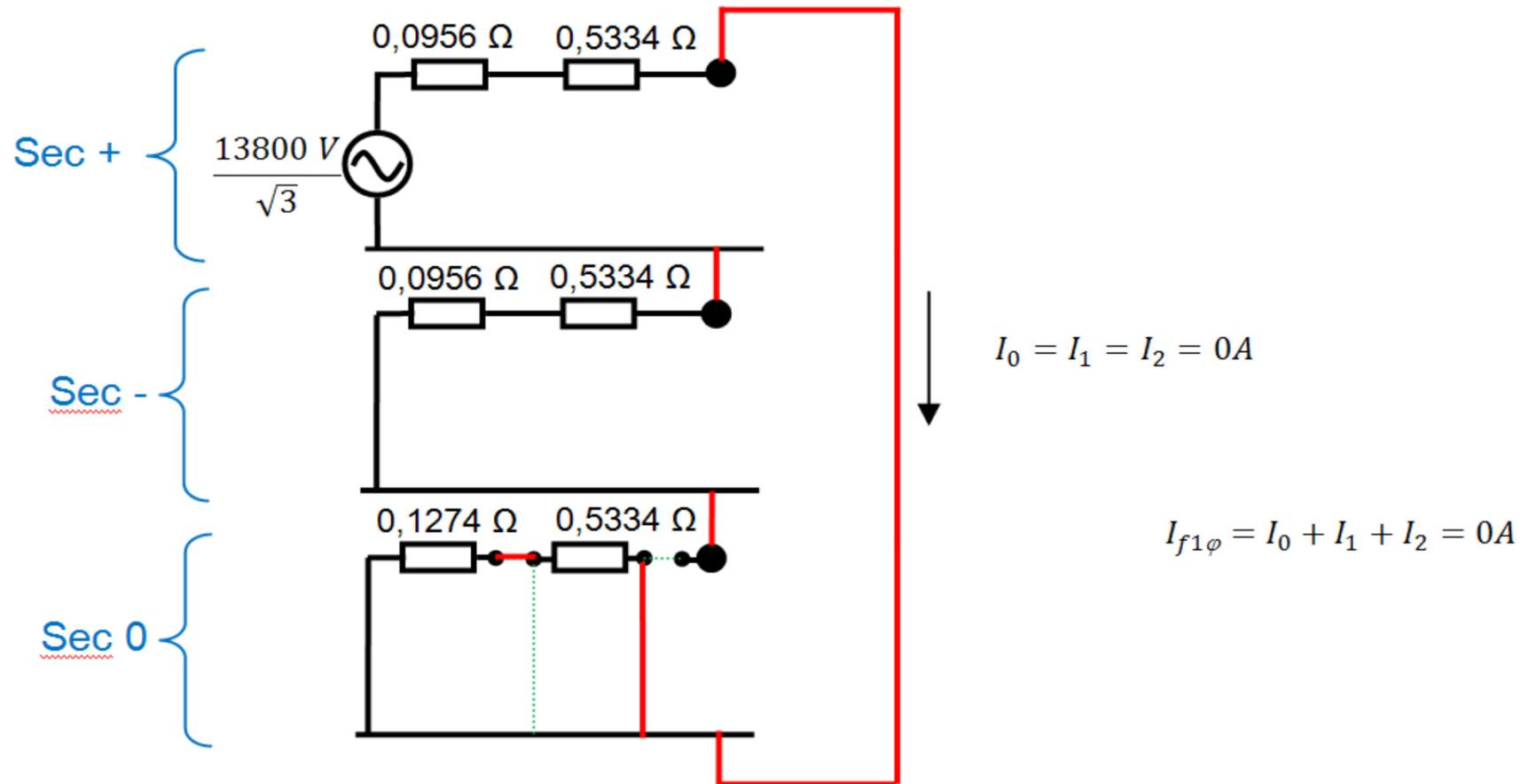
### • Transformador en conexión YNyn





# CORTOCIRCUITO Monofásico

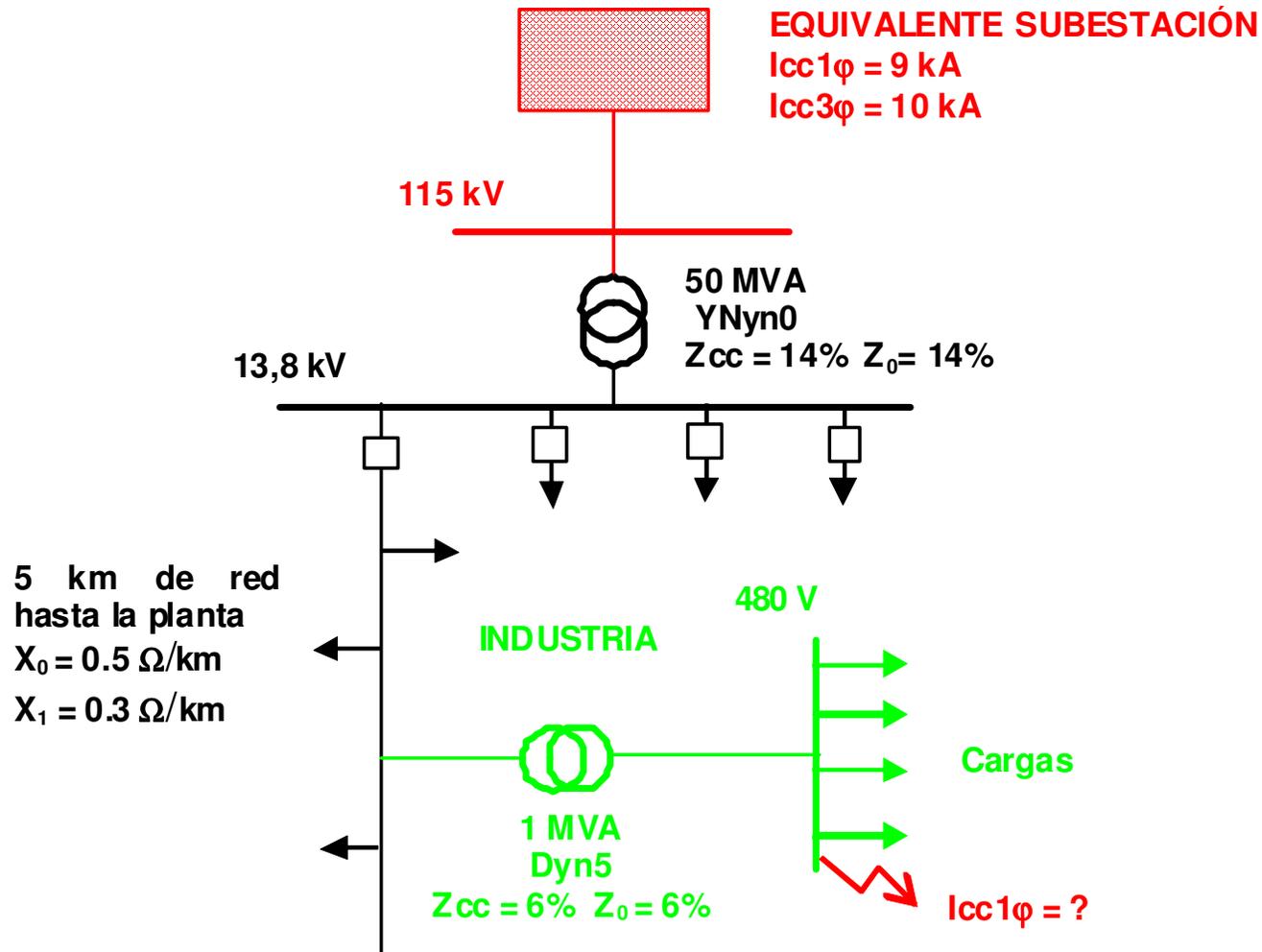
- Transformador en conexión YD





# CORTOCIRCUITO

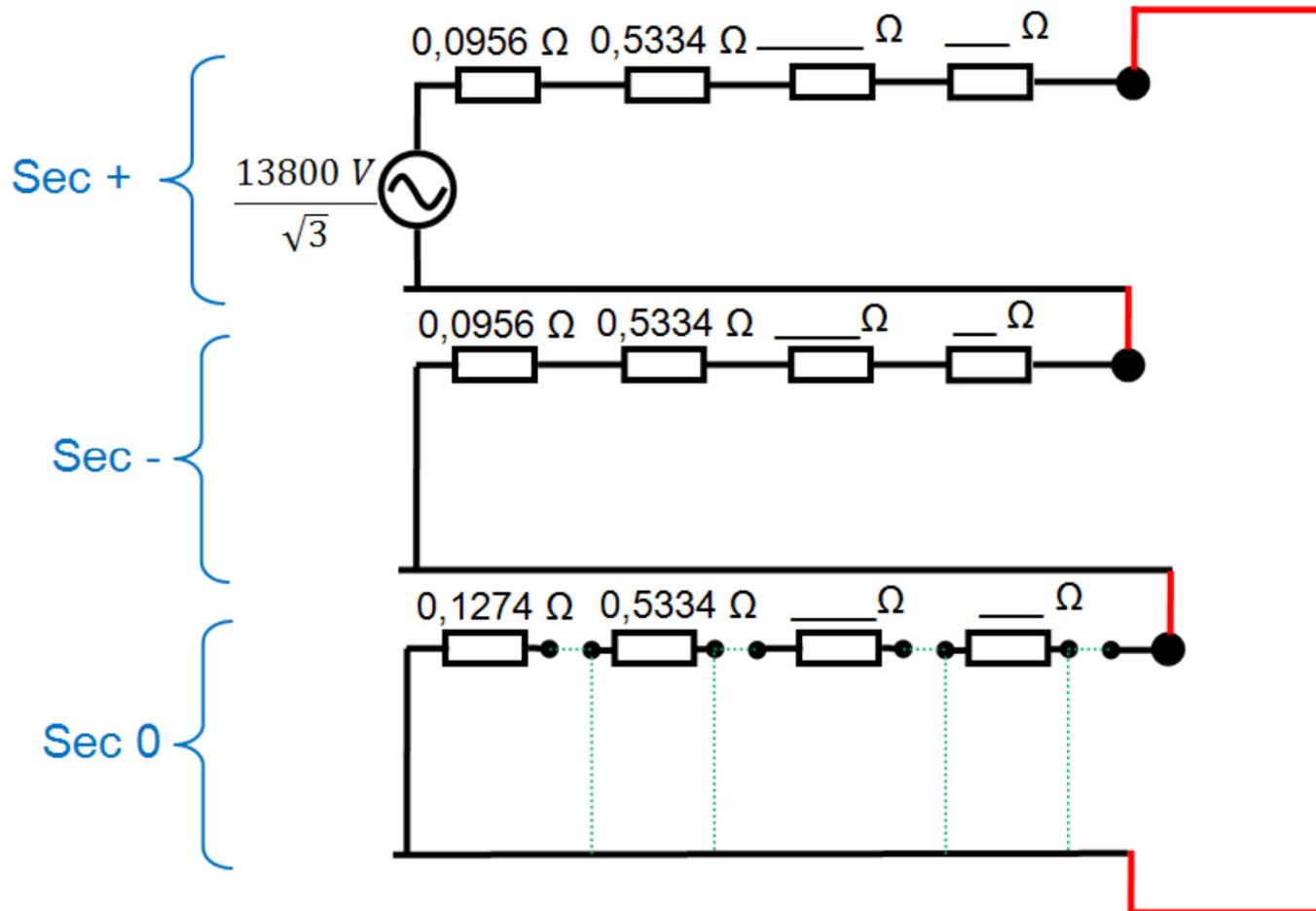
## Monofásico





# CORTOCIRCUITO

## Monofásico



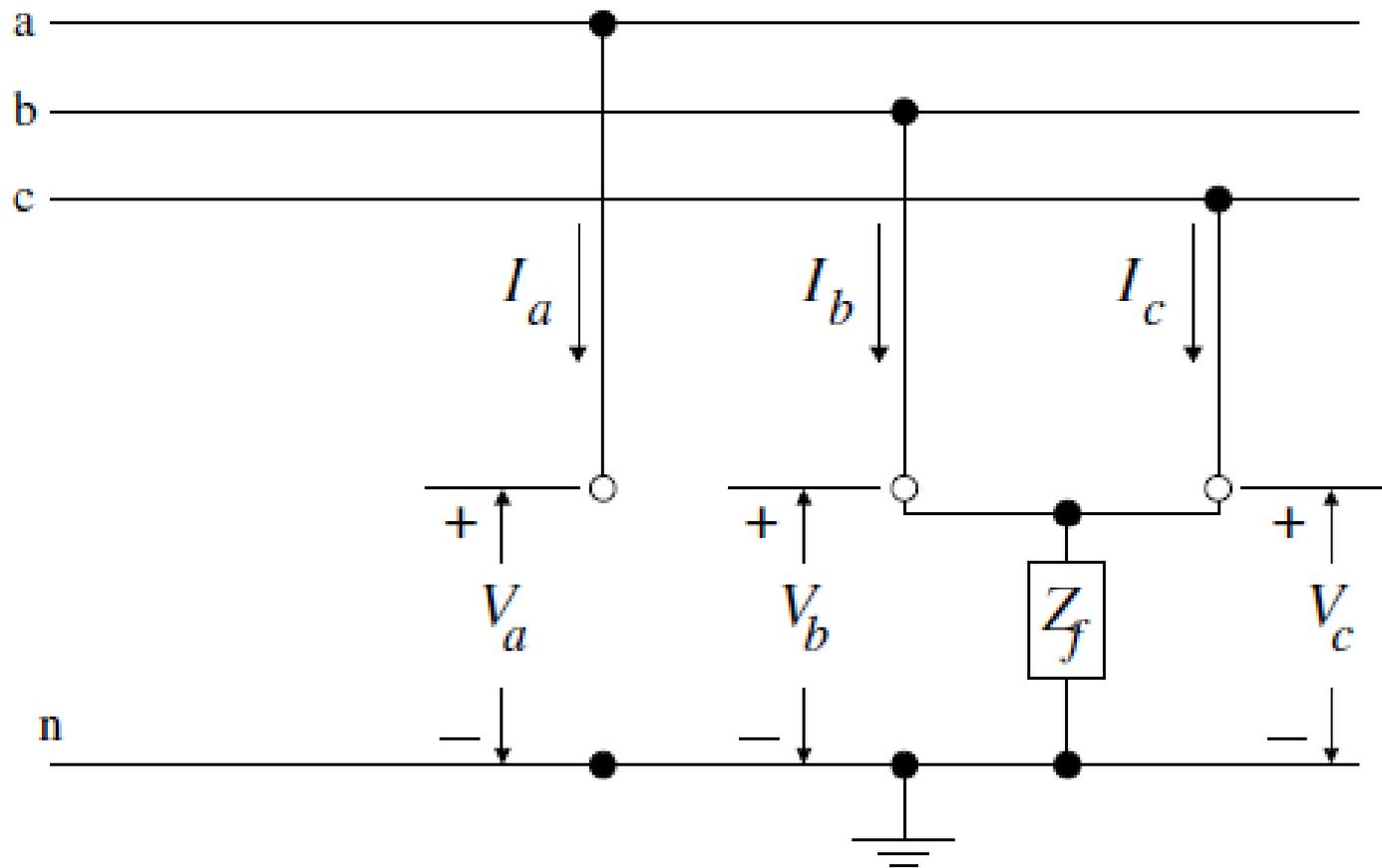


# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea a tierra*





# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea a tierra*

Condiciones de Falla:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c$$

$$V_b = Z_f (I_b + I_c)$$

- De la ecuación la se tiene que:

$$I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$$



# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea a tierra*

- De la ecuación  $V_b = V_c$  se tiene:

$$V_{a(0)} + a^2V_{a(1)} + aV_{a(2)} = V_{a(0)} + aV_{a(1)} + a^2V_{a(2)}$$

- Si se simplifica se tiene:

$$V_{a(1)} = V_{a(2)}$$

- De la ecuación  $V_b$  se tiene:

$$V_{a(0)} + a^2V_{a(1)} + aV_{a(2)} = (I_{a(0)} + a^2I_{a(1)} + aI_{a(2)} + I_{a(0)} + aI_{a(1)} + a^2I_{a(2)}) Z_f$$



# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea a tierra*

- Que se simplifica:

$$V_{a(0)} - V_{a(1)} = [2I_{a(0)} + (a^2 + a)(I_{a(1)} + I_{a(2)})] Z_f$$

$$V_{a(0)} - V_{a(1)} = 3I_{a(0)}Z_f$$

- Lo mismo que para los casos anteriores, en general y de manera simultánea se deben satisfacer las ecuaciones planteada mediante la interconexión de las redes de secuencia:

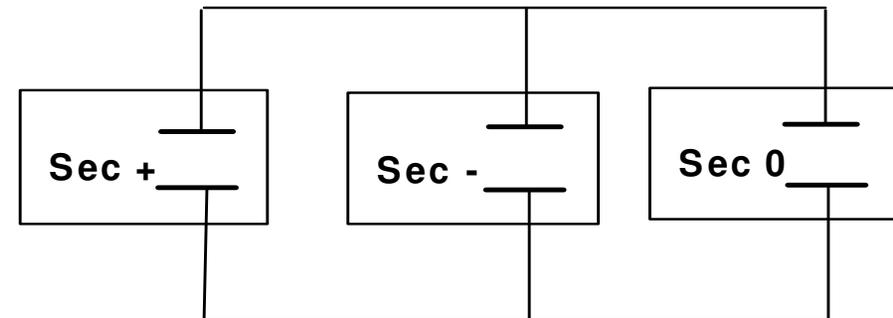
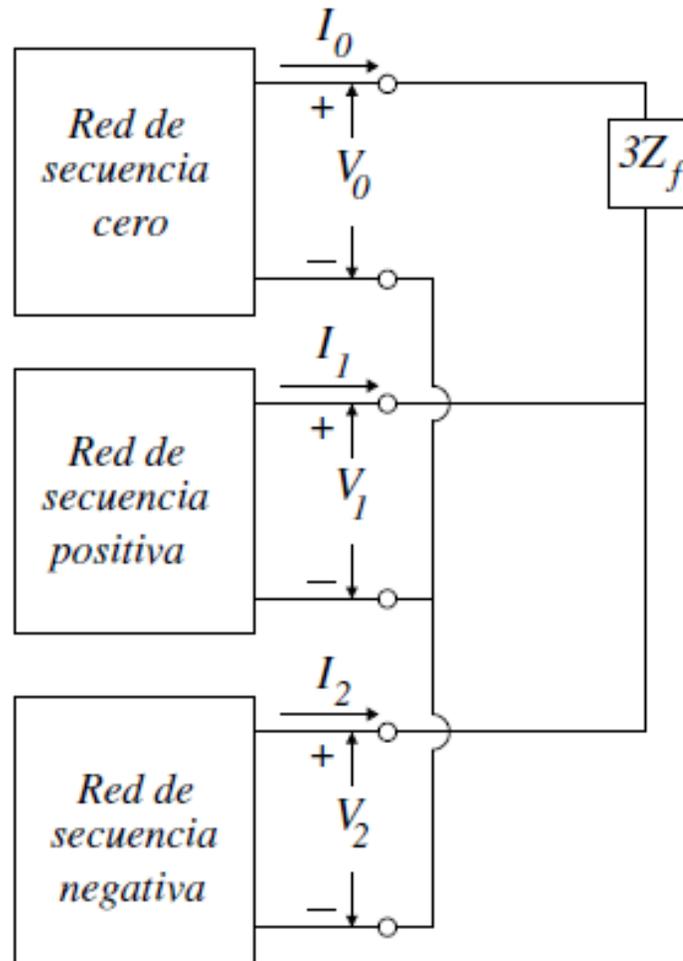


# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### Redes de Secuencia – Falla línea - línea a tierra



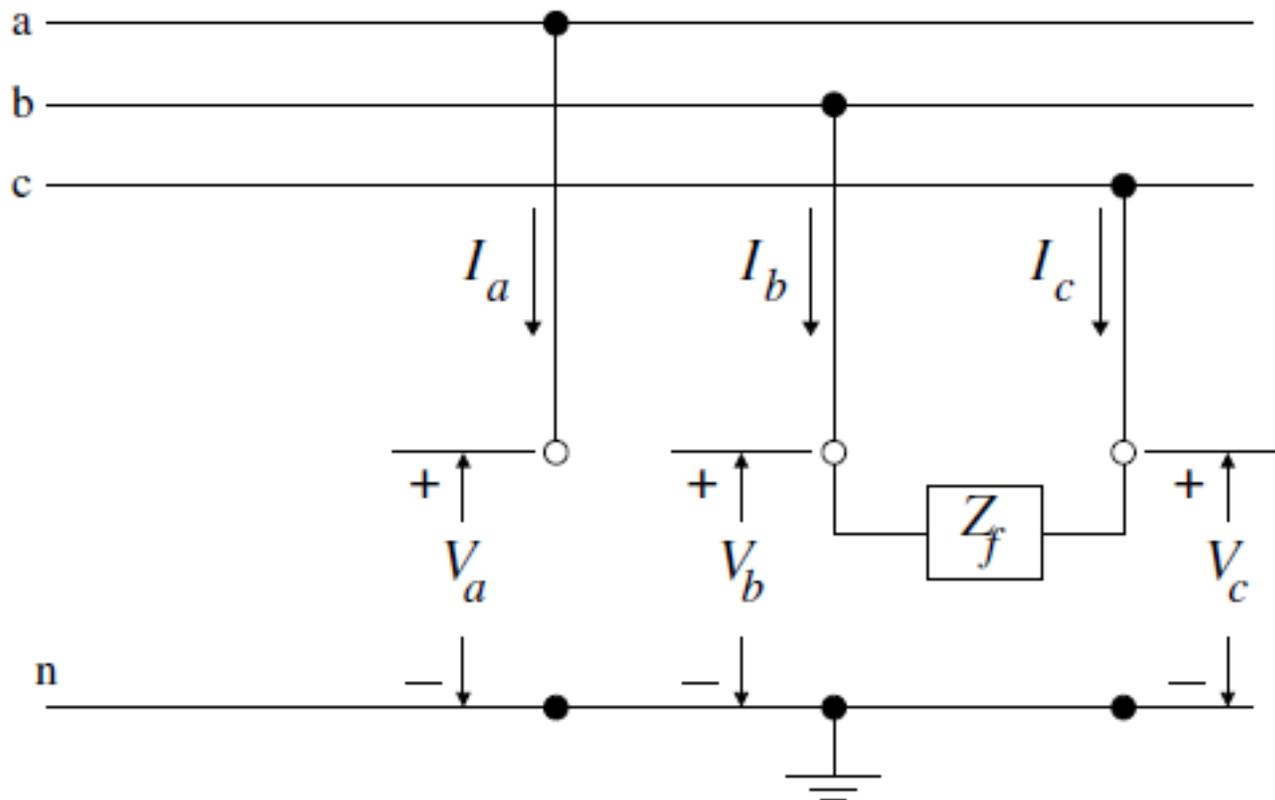


# CORTOCIRCUITO

## Bifásico aislado a tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea*





# CORTOCIRCUITO

## Bifásico aislado a tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea*

Condiciones de Falla:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = Z_f I_b + V_c$$

$$I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$$



# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea*

- Y de la ecuación  $I_b = -I_c$  se tiene:

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

- Al manipular la ecuación anterior:

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

- Al reemplazar la en la ecuación anterior:

$$3I_{a(0)} = 0$$

- Entonces:

$$I_{a(0)} = 0$$



# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea*

- Se puede simplificar la ecuación  $I_a + I_b + I_c = 0$  así:

$$I_{a(1)} = -I_{a(2)}$$

- También se puede transformar la ecuación  $I_b = -I_c$  en sus componentes de secuencia:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = Z_f (I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)}) + V_{a(0)} + a V_{a(1)} + a^2 V_{a(2)}$$

- Si se simplifica esta ecuación y se manipula se tiene:

$$(a^2 - a) V_{a(1)} = (a^2 - a) I_{a(1)} Z_f + (a^2 - a) V_{a(2)}$$



# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea*

- 0:

$$V_{a(1)} = I_{a(1)}Z_f + V_{a(2)}$$

- En general y de manera simultánea se deben satisfacer las ecuaciones anteriores mediante la conexión de las redes de secuencia:



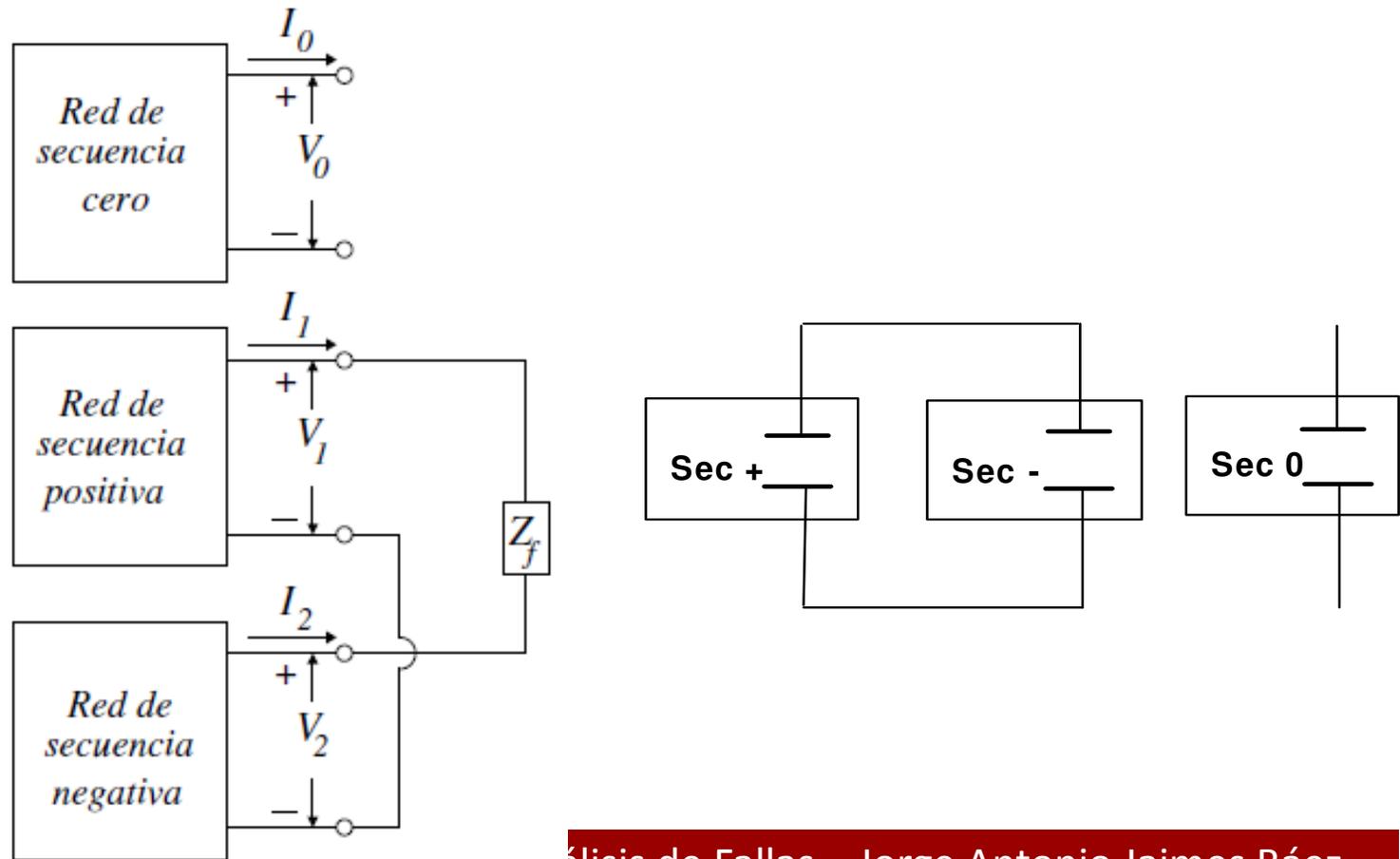
# CORTOCIRCUITO

## Bifásico a Tierra



### *Redes de Secuencia – Falla línea - línea*

- Interconexión de redes de secuencia para una falla línea a línea:





## EJEMPLOS



Con los siguientes datos de la red eléctrica se determinarán las corrientes y potencias de cortocircuito en las barras colectoras para una instalación formada por:

- a) Una acometida de la Compañía suministradora de 69 kV, 3 fases, 3 hilos, 60 Hz, con una potencia de cortocircuito de 500 MVA.
- b) Un transformador de 12 500 kVA, 69 kV/13,8 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 8%.
- c) Dos transformadores de 1 500 kVA, 13,8 kV/2,4 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 5,75%.
- d) Un transformador de 500 kVA, 13,8 kV /0,48 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 6,75%.
- e) Un transformador de 2 500 kVA, 13,8 kV /4,16 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 5,75%.
- f) Un transformador de 500 kVA, 13,8 kV /2,4 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 5,5%.
- g) Un transformador de 3 000 kVA, 13,8 kV /4,16 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 5,5%. de 16,7%.



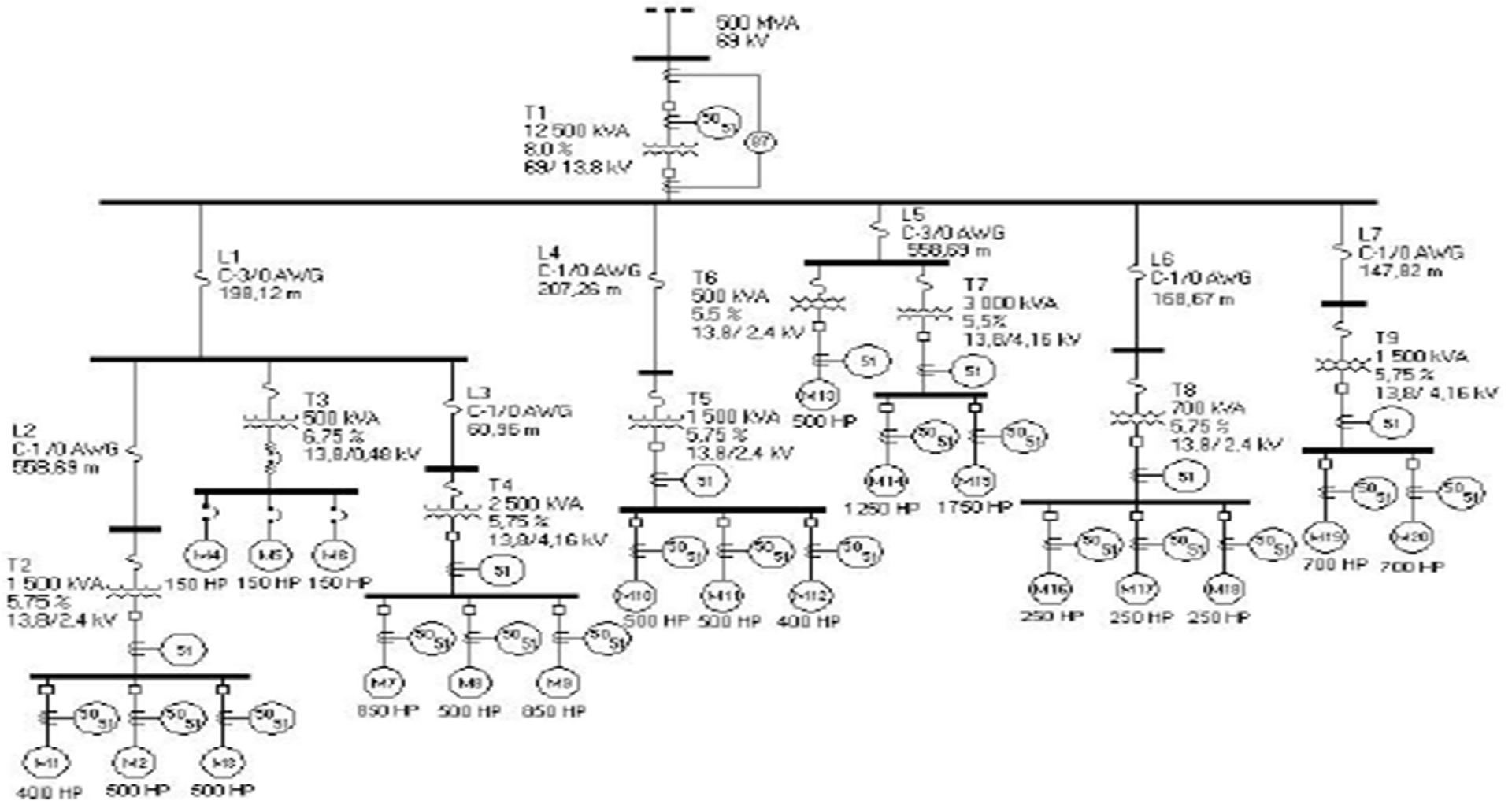
## EJEMPLOS



- h) Un transformador de 700 kVA, 13,8 kV /2,4 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 5,75%.
- i) Un transformador de 1 500 kVA, 13,8 kV /4,16 kV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 5,75%.
- j) Tres motores de 150 HP, de 2,4 kV V, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- k) Tres motores de 250 HP, de 2,4 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- l) Dos motores de 400 HP, de 2,4 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- m) Cinco motores de 500 HP, de 2,4 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%
- n) Un motor de 500 HP, de 4,16 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- o) Dos motores de 700 HP, de 4,16 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- p) Dos motores de 850 HP, de 4,16 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- q) Un motor de 1250 HP, de 4,16 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.
- r) Un motor de 1750 HP, de 4,16 kV, 60 Hz, con una reactancia de 16,7%.



# EJEMPLOS





## EJEMPLOS



### Procedimiento para el cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásico.

Se establecen los valores base de tensión y potencia.

$V_B = 69 \text{ kV}$

$S_B = 12,5 \text{ MVA}$

Ahora se calculan los valores en por unidad.

*Por lo que para la compañía suministradora es:*

$$Z_{pu} = 1 \times \frac{12,5 \text{ MVA}}{500 \text{ MVA}} = 0,025 \text{ pu}$$



## EJEMPLOS

*Transformador T1:*

$$Z_{pu} = \frac{8\%}{100\%} \times \frac{12,5 \text{ MVA}}{12,5 \text{ MVA}} = 0,08 \text{ pu}$$

De esta forma se procede a realizar los cálculos en por unidad para cada uno de los transformadores que se encuentran en el sistema eléctrico industrial, los resultados se muestran en la tabla.

Tabla 2.4 Resultados en valores por unidad para los transformadores.

Nomenclatura	Transformador [kVA]	Impedancia [%]	Valor en por unidad [p.u.]
T-1	12 500	8	0,08
T-2	1 500	5,75	0,479
T-3	500	6,75	1,688
T-4	2 500	5,75	0,288
T-5	1 500	5,75	0,479
T-6	500	5,5	1,375
T-7	3 000	5,5	0,229
T-8	700	5,75	1,027
T-9	1 500	5,75	0,479



## EJEMPLOS

*Motor de 150 HP (en forma aproximada 1HP = 1 kVA):*

$$Z_{pu} = \frac{16,7\%}{100\%} \times \frac{12,5 MVA}{0,15 MVA} = 13,916 pu$$

De esta forma se procede a realizar los cálculos en por unidad para cada uno de los motores del sistema eléctrico industrial, los resultados se aprecian en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Resultados en valores por unidad para los motores.

Motor [HP]	Impedancia [%]	Valor en por unidad [p.u.]
150	16,7	13,916
250	16,7	8,350
400	16,7	5,218
500	16,7	4,175
700	16,7	2,982
850	16,7	2,456
1 250	16,7	1,670
1 750	16,7	1,192



## EJEMPLOS



Ahora se calcula la impedancia en por unidad para las 7 líneas, se tienen dos calibres 1/0 AWG y 3/0 AWG, sus valores de impedancia de acuerdo a la tabla 2.6 para una tensión de 15 kV son  $0,101 \frac{\Omega}{1000 \text{ ft}}$  y  $0,143 \frac{\Omega}{1000 \text{ ft}}$  respectivamente.

La línea 1 tiene una longitud de 198,12 m, por lo tanto su impedancia es:

$$Z = 0,101 \frac{\Omega}{1000 \text{ ft}} \times \left( 198,12 \text{ m} \times \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} \right) = 0,06565 \Omega$$

Y en por unidad:

$$Z_{pu} = (0,06565) \times \left( \frac{12,5 \text{ MVA}}{13,8 \text{ kV}^2} \right) = 0,00431 \text{ pu}$$



# EJEMPLOS



Tabla 2.6 Impedancia para conductores eléctricos de cobre trifásicos ( $\Omega/1000$  ft).

AWG o kcmil	En ducto magnético						En ducto no magnético					
	600 V y 5 kV sin aislamiento			5 kV y 15 kV con aislamiento			600 V y 5 kV sin aislamiento			5 kV y 15 kV con aislamiento		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
8	0,811	0,0754	0,814	0,811	0,0860	0,816	0,811	0,0603	0,813	0,811	0,0688	0,814
8	0,786	0,0754	0,790	0,786	0,0860	0,791	0,786	0,0603	0,788	0,786	0,0688	0,789
(sólido)	0,510	0,0685	0,515	0,510	0,0796	0,516	0,510	0,0548	0,513	0,510	0,0636	0,514
6	0,496	0,0685	0,501	0,496	0,0796	0,502	0,496	0,0548	0,499	0,496	0,0636	0,500
4	0,321	0,0632	0,327	0,321	0,0742	0,329	0,321	0,0506	0,325	0,321	0,0594	0,326
4	0,312	0,0632	0,318	0,312	0,0742	0,321	0,312	0,0506	0,316	0,312	0,0594	0,318
(sólido)	0,202	0,0585	0,210	0,202	0,0685	0,214	0,202	0,0467	0,207	0,202	0,0547	0,209
2	0,160	0,0570	0,170	0,160	0,0675	0,174	0,160	0,0456	0,166	0,160	0,0540	0,169
1/0	0,128	0,0540	0,139	0,128	0,0635	0,143	0,127	0,0432	0,134	0,128	0,0507	0,138
2/0	0,102	0,0533	0,115	0,103	0,0630	0,121	0,101	0,0426	0,110	0,102	0,0504	0,114
3/0	0,0805	0,0519	0,0958	0,0814	0,0605	0,101	0,0766	0,0415	0,0871	0,0805	0,0484	0,0939
4/0	0,0640	0,0497	0,0810	0,0650	0,0583	0,0929	0,0633	0,0398	0,0748	0,0640	0,0466	0,0792
250	0,0552	0,0495	0,0742	0,0557	0,570	0,0797	0,0541	0,0396	0,0670	0,0547	0,0456	0,0712
300	0,0464	0,0493	0,0677	0,0473	0,0564	0,0736	0,0451	0,0394	0,0599	0,0460	0,0451	0,0644
350	0,0378	0,0491	0,0617	0,0386	0,0562	0,0681	0,0368	0,0393	0,0536	0,0375	0,0450	0,0586
400	0,0356	0,0490	0,0606	0,0362	0,0548	0,0657	0,0342	0,0392	0,0520	0,0348	0,0438	0,0559
450	0,0322	0,0480	0,0578	0,0328	0,0538	0,0630	0,0304	0,0384	0,0490	0,0312	0,0430	0,0531
500	0,0294	0,0466	0,0551	0,0300	0,0526	0,0505	0,0276	0,0373	0,0464	0,0284	0,0421	0,0508
600	0,0257	0,0463	0,0530	0,0264	0,0516	0,0580	0,0237	0,0371	0,0440	0,0246	0,0412	0,0479
750	0,0216	0,0445	0,0495	0,0223	0,0497	0,0545	0,0194	0,0356	0,0405	0,0203	0,0396	0,0445



## EJEMPLOS



Tabla 2.7 Resultados en valores por unidad para las líneas.

Línea	Calibre	Longitud [m]	Impedancia [ $\Omega$ ]	Impedancia [pu]
1	1/0 AWG	198,12	0,06565	0,00431
2	3/0 AWG	558,69	0,26211	0,0172
3	3/0 AWG	60,96	0,02860	0,00187
4	3/0 AWG	207,26	0,09723	0,00638
5	1/0 AWG	558,69	0,18513	0,01215
6	3/0 AWG	168,67	0,07913	0,00519
7	3/0 AWG	147,82	0,06935	0,00455





# EJEMPLOS

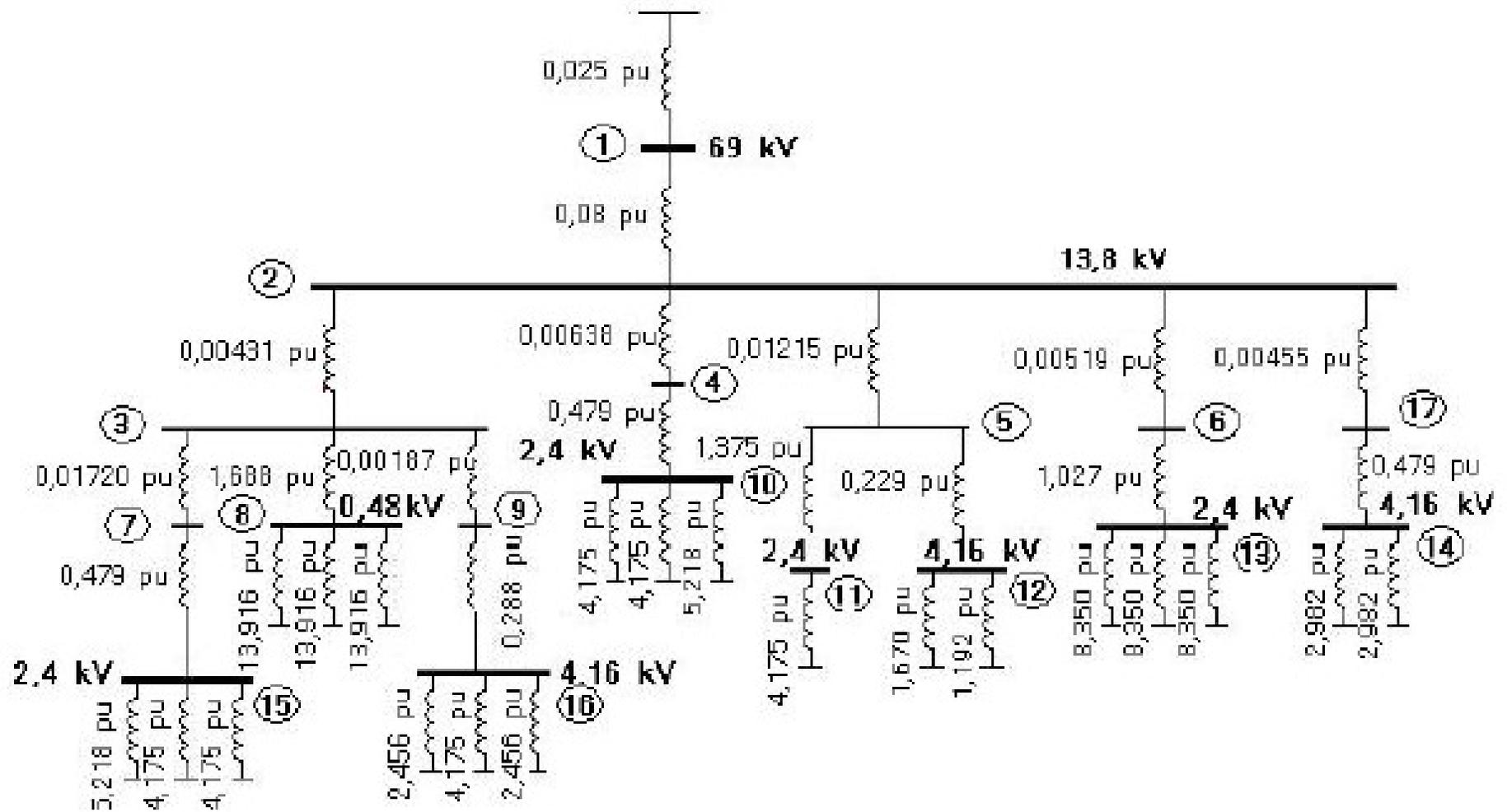


Figura 2.7 Diagrama de impedancias de la secuencia positiva  $[Z_+]$  en por unidad.



# EJEMPLOS

A partir de la figura 2.7 se realiza la reducción de la red para obtener el valor de la impedancia equivalente de Thévenin

## CÁLCULO EN BARRA COLECTORA 1.

La barra 15 tiene 3 impedancias en paralelo, que a la vez están en serie con la impedancia del barra 7 y la barra 3. Se aplica la reducción hasta obtener la impedancia equivalente como lo muestra la figura 2.8.

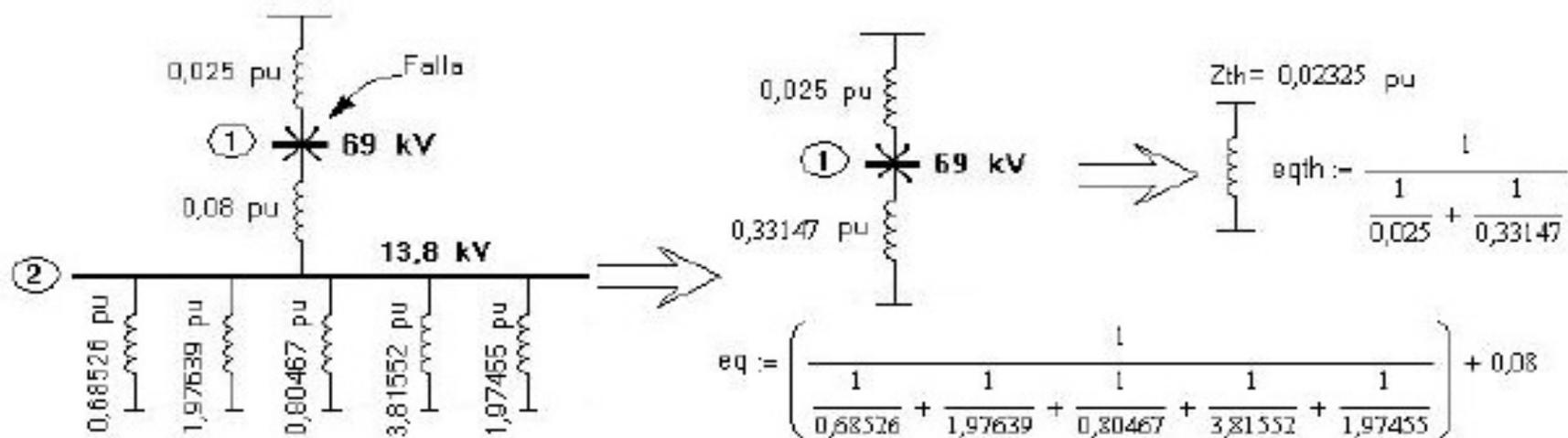


Figura 2.8 Reducción para obtener impedancia  $[Z_+]$  de Thévenin en barra 1.



## EJEMPLOS

Los valores de corriente de cortocircuito se obtienen a partir de la ecuación 2.1, 2.10 y 2.15. La corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1,0}{0,02325} = 43,010 \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{12\,500 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 69 \text{ kV}} = 104,592 \text{ A}$$

$$I_{cc_A} = 43,010 \text{ pu} \times 104,592 \text{ A} = 4,498 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica se obtiene a partir de la ecuación 2.19.

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_L \times I_{cc} \quad 2.19$$

Para este caso, la potencia de cortocircuito trifásica simétrica es:

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times 69 \text{ kV} \times 4,498 \text{ kA} = 537,632 \text{ MVA}$$



# EJEMPLOS



Tabla 2.8 Resultados de corriente y potencia de cortocircuito trifásico en cada barra.

Barra	Tensión [kV]	Impedancia equivalente [pu]	Corriente de cortocircuito [kA]	Potencia de cortocircuito [MVA]
1	69	0,02325	4,498	537,632
2	13,8	0,07406	7,601	168,782
3	13,8	0,07742	6,754	161,456
4	13,8	0,07995	6,541	156,347
5	13,8	0,08382	6,239	149,129
6	13,8	0,07905	6,615	158,127
7	13,8	0,09313	5,615	134,211
8	0,48	1,27564	11,790	9,802
9	13,8	0,07905	6,615	158,127
10	2,4	0,40816	7,367	30,625
11	2,4	1,07840	2,788	11,591
12	4,16	0,22000	7,885	56,818
13	2,4	0,79393	3,787	15,744
14	4,16	0,40720	4,260	30,700
15	2,4	0,41572	7,233	30,067
16	4,16	0,26713	6,494	46,798
17	13,8	0,07826	6,682	189,723



## EJEMPLOS



### **Procedimiento para el cálculo de las corrientes de cortocircuito monofásico.**

De los datos anteriores de los equipos que componen al sistema eléctrico industrial se realiza el cálculo de las impedancias de secuencia cero [ $Z_0$ ], donde las impedancias se pueden apreciar en la figura 2.9



# EJEMPLOS

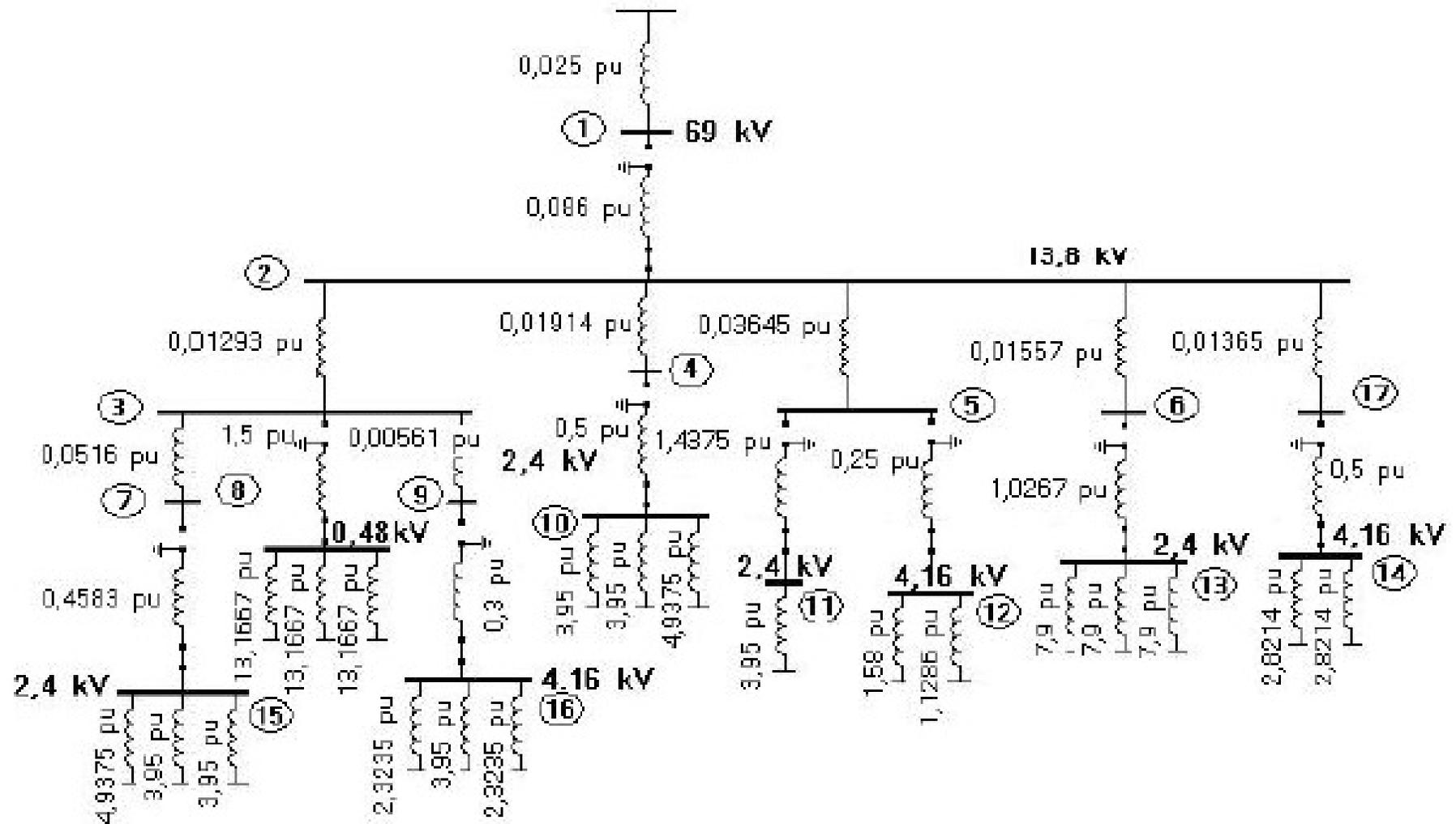


Figura 2.9 Diagrama de impedancias de la secuencia cero  $[Z_0]$  en por unidad.



## EJEMPLOS

A partir de la figura 2.9 se realiza la reducción de la red para obtener el valor de la impedancia equivalente de Thévenin de secuencia cero [ $Z_0$ ].

### CÁLCULO EN BARRA COLECTORA 1.

En la barra 1 solo se tiene la impedancia correspondiente a la fuente, ya que se encuentra aislado del resto del sistema por medio del transformador T1 a través de la delta, tal como lo muestra la figura 2.10.

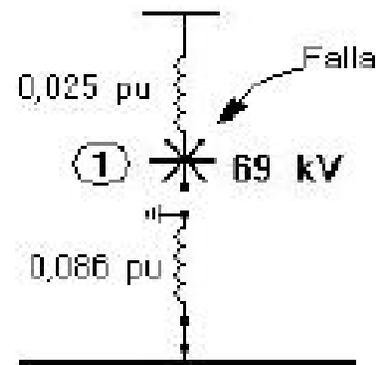


Figura 2.10 Reducción para obtener impedancia [ $Z_0$ ] de Thévenin en barra 1



## EJEMPLOS



Para el cálculo de la corriente de cortocircuito monofásico se emplean los valores de impedancias de secuencias, en este caso la impedancia de secuencia positiva ( $Z_+$ ) es el mismo valor que el la secuencia negativa ( $Z_-$ ), ya que el sistema es simétrico, mientras que la impedancia cero ( $Z_0$ ), es el calculado anteriormente. Empleando la ecuación 2.20 se obtiene la corriente de cortocircuito.

$$I_{cc_{pu}} = \frac{3,0}{Z_+ + Z_- + Z_0} \quad 2.20$$

La corriente de cortocircuito monofásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{3,0}{j0,02325 + j0,02325 + j0,025} = -j41,958 \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{12\,500 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 69 \text{ kV}} = 104,592 \text{ A}$$

$$I_{cc_{1\phi A}} = 41,958 \text{ pu} \times 104,592 \text{ A} = 4,388 \text{ kA}$$



## EJEMPLOS



La potencia de cortocircuito se obtiene a partir de la ecuación 2.21.

$$P_{cc1\phi} = \sqrt{3} \times V_L \times I_{cc} \quad 2.21$$

Para este caso la potencia de cortocircuito es:

$$P_{cc1\phi} = \sqrt{3} \times 69 \text{ kV} \times 4,388 \text{ kA} = 524,416 \text{ MVA}$$

De esta forma se procede a realizar el cálculo de las corrientes de cortocircuito monofásico en las otras barras. En la tabla 2.9 se observan los resultados.



# EJEMPLOS



Tabla 2.9 Resultados de corriente y potencia de cortocircuito monofásico en cada barra.

Barra	Tensión [kV]	Impedancia equivalente [pu]	Corriente de cortocircuito [kA]	Potencia de cortocircuito [MVA]
1	69	0,025	4,388	524,416
2	13,8	0,00351	10,346	247,293
3	13,8	0,00391	9,882	236,203
4	13,8	0,00414	9,563	228,577
5	13,8	0,00352	9,165	219,064
6	13,8	0,00352	9,707	232,019
7	13,8	0,00391	8,249	197,170
8	0,48	1,11793	12,283	10,212
9	13,8	0,00391	9,683	231,445
10	2,4	0,36916	7,610	31,634
11	2,4	1,05394	2,808	11,673
12	4,16	0,18119	8,377	60,359
13	2,4	0,73869	3,876	16,112
14	4,16	0,36916	4,397	31,681
15	2,4	0,34592	7,661	31,846
16	4,16	0,22486	6,856	49,399
17	13,8	0,00352	9,802	234,290