



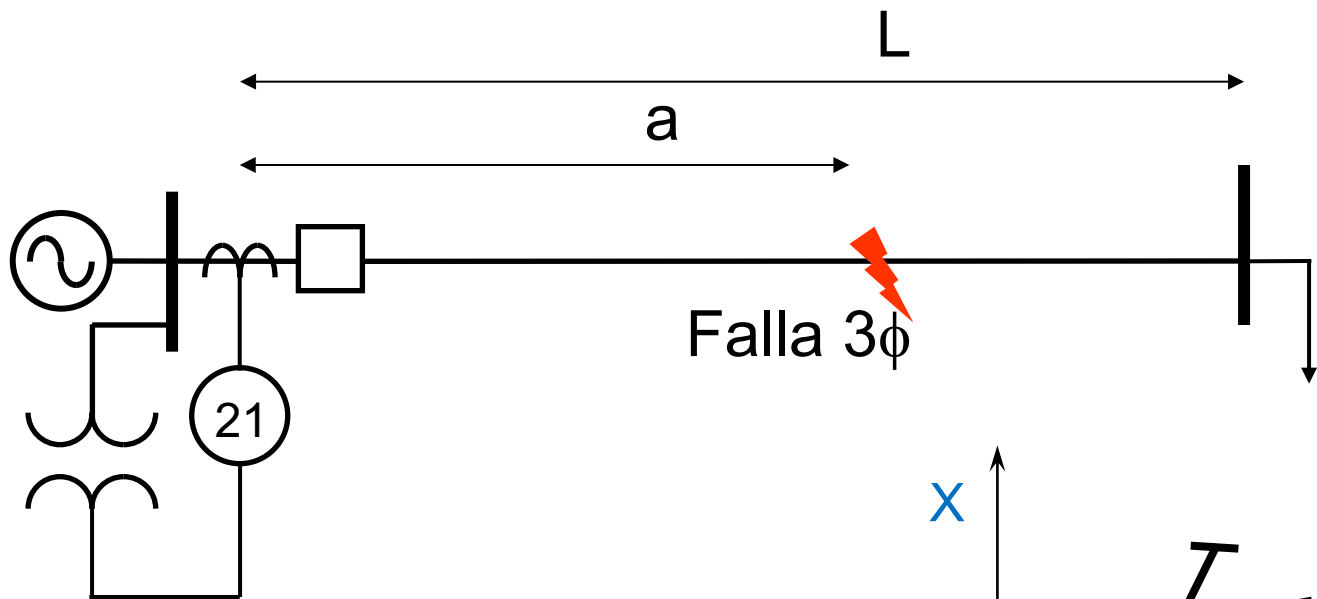
Protección de distancia

Dr. Ernesto Vázquez Martínez
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

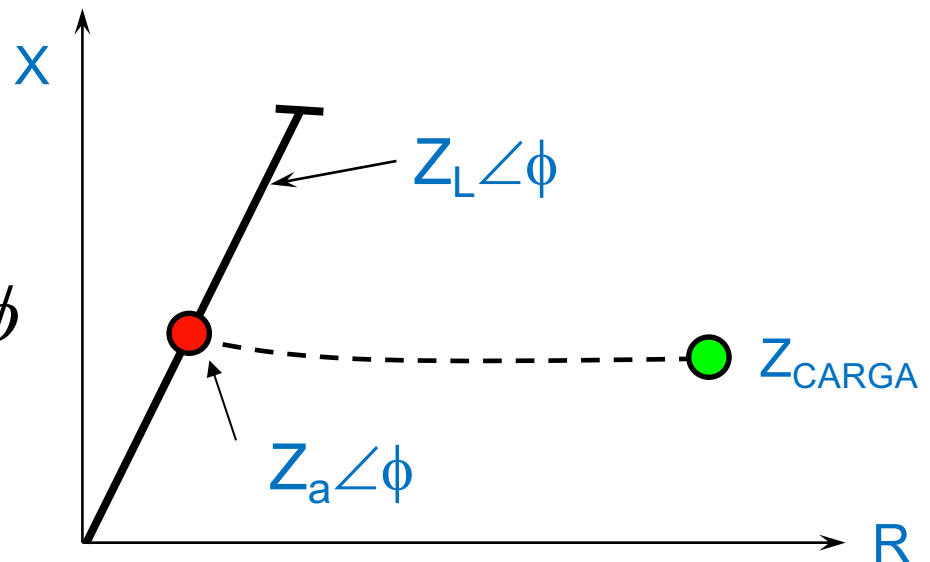
Protección de líneas de transmisión

- ▶ El problema clásico consiste en determinar correctamente la ubicación del cortocircuito, con independencia de su tipo y del régimen de operación del sistema.
- ▶ Sobrecorriente,
- ▶ Direccional de sobrecorriente,
- ▶ Distancia,
- ▶ Diferencial,
- ▶ Onda superpuesta y onda viajera.

Principio de operación



$$\underline{Z}_r = \frac{\underline{V}_r}{\underline{I}_r} = R_a + jX_a = Z_a \angle \phi$$



Áreas de aplicación

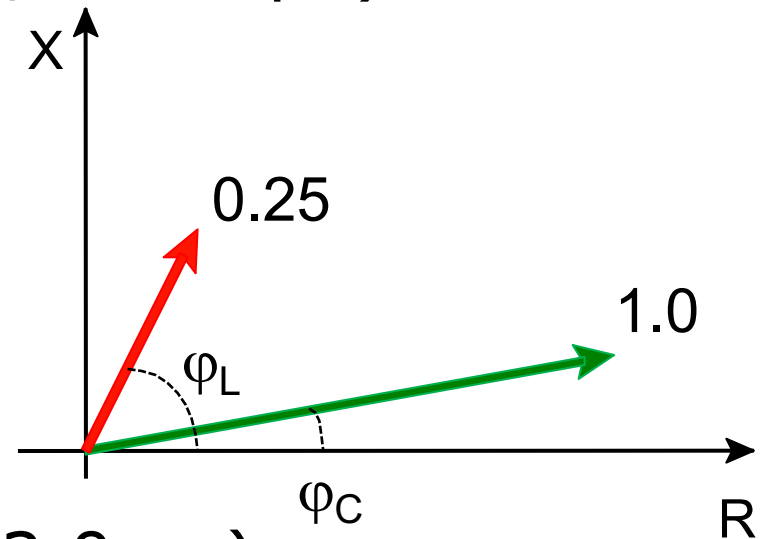
- ▶ Protección primaria y de respaldo en líneas de transmisión,
- ▶ Protección de respaldo en transformadores y generadores,
- ▶ Elementos de detección de fallas en esquemas tipo piloto,
- ▶ Protección en reactores y bancos de capacitores.

Características de la protección de distancia

- ▶ Es una protección con selectividad relativa (direccional) que mide la distancia eléctrica al punto del cortocircuito (secuencia positiva).
- ▶ Opera ante una reducción de la impedancia aparente medida por el relevador,
- ▶ La protección de distancia de fase es más sensible que las que responden a corriente.
- ▶ El alcance de la primera zona no depende de la impedancia Thevenin detrás del relevador, como en el caso del elemento 50.

Sensibilidad de la protección de distancia

- ▶ Régimen normal ($v=1.0$ pu, $i=1.0$ pu)
- ▶ RSC: $I=1$
- ▶ RD: $Z=1/1=1$

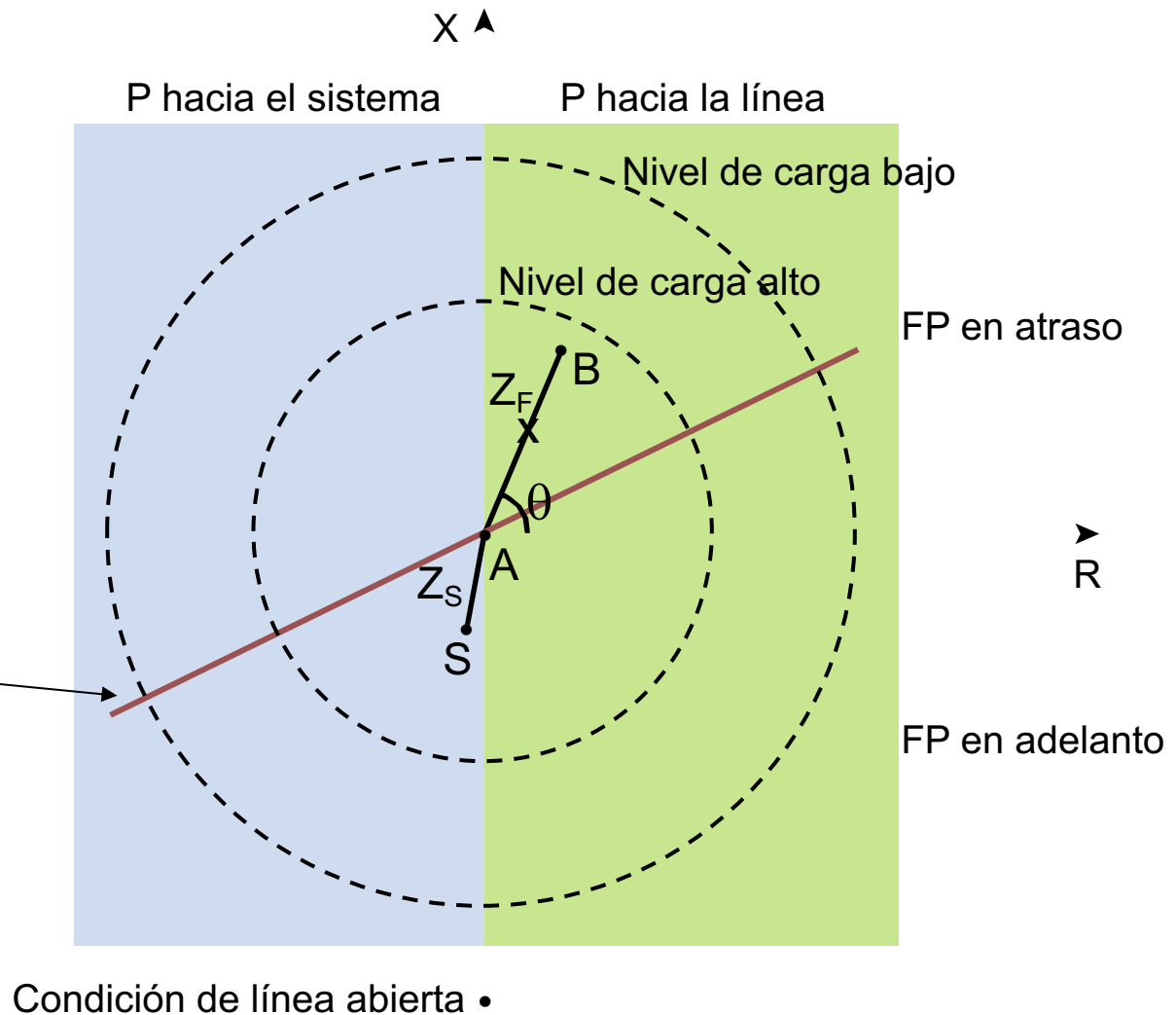


- ▶ Cortocircuito ($v=0.5$ pu, $i=2.0$ pu)
- ▶ RSC: $I=2$ (2 veces la de carga)
- ▶ RD: $Z=0.5/2=0.25$ (4 veces menor que la carga)

Comportamiento de la impedancia aparente medida

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

Línea de carga para FP=CTE



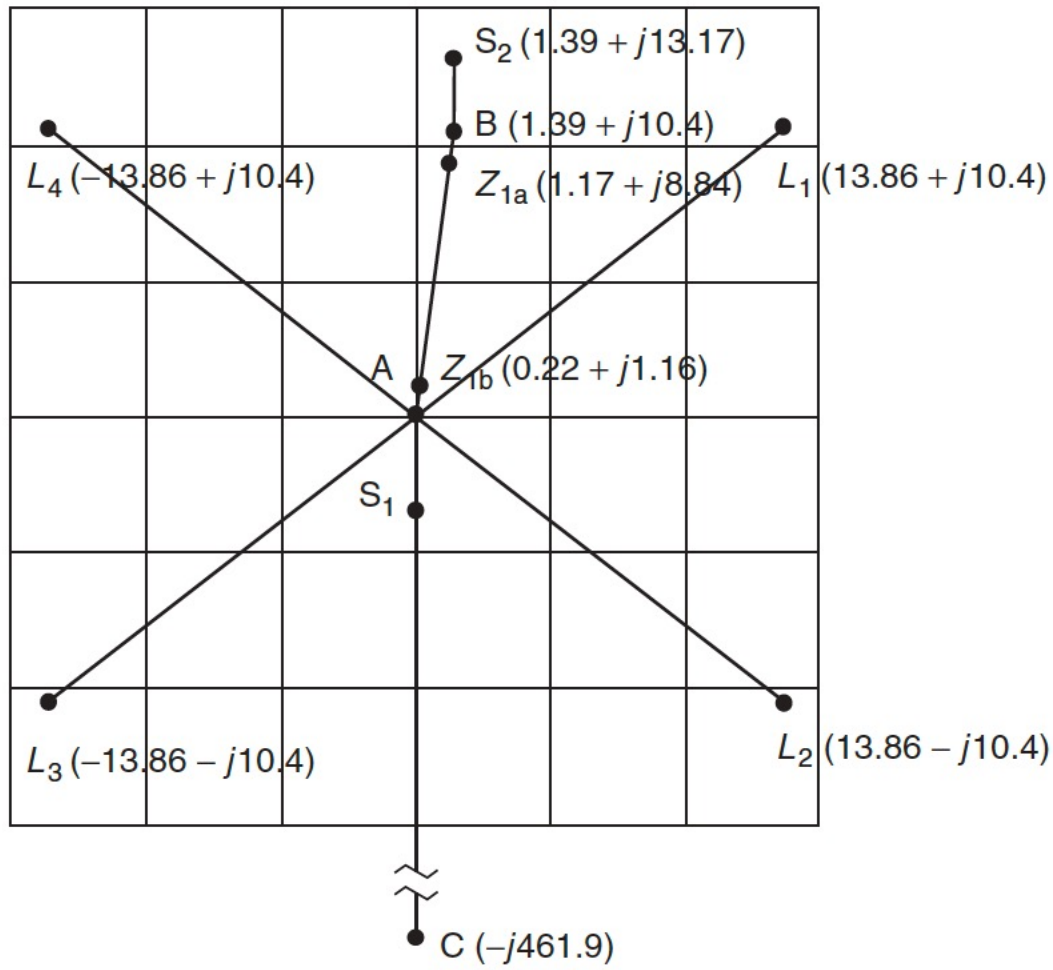
Impedancia medida por la protección

$$V_{\text{sec}} = \frac{V_{\text{prim}}}{n_{TP}}; \quad I_{\text{sec}} = \frac{I_{\text{prim}}}{n_{TC}}$$

$$Z_{\text{sec}} = \frac{V_{\text{sec}}}{I_{\text{sec}}} = \frac{\frac{V_{\text{prim}}}{n_{TP}}}{\frac{I_{\text{prim}}}{n_{TC}}} = \frac{V_{\text{prim}}}{I_{\text{prim}}} \frac{n_{TC}}{n_{TP}} = Z_{\text{prim}} \frac{n_{TC}}{n_{TP}} = \frac{Z_{\text{prim}}}{N}$$

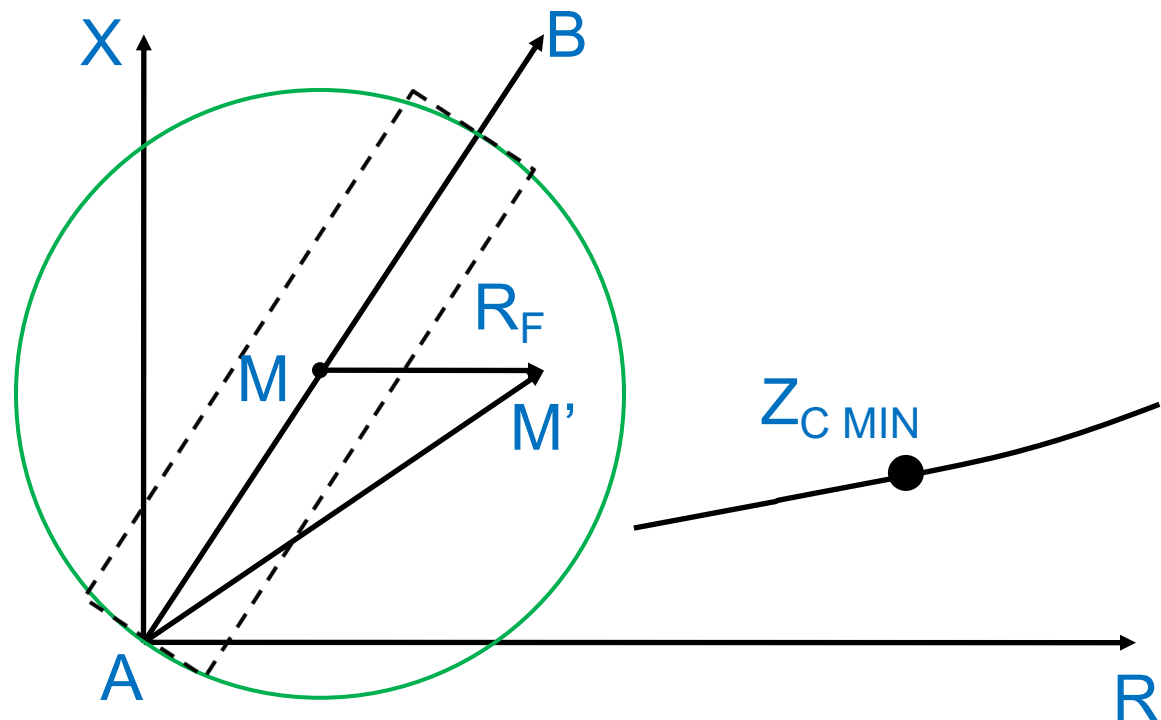
$$N = \frac{n_{TP}}{n_{TC}}$$

Ejemplo

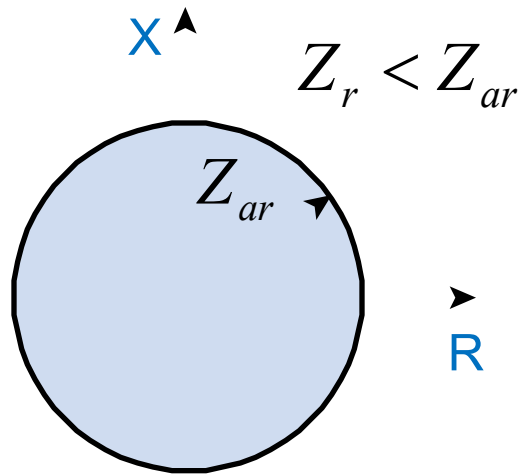


Selección de la característica de operación de un relevador de distancia

- ▶ Sensibilidad para fallas con resistencia.
- ▶ Insensibilidad ante variaciones de la carga.
- ▶ Insensibilidad durante oscilaciones de potencia.

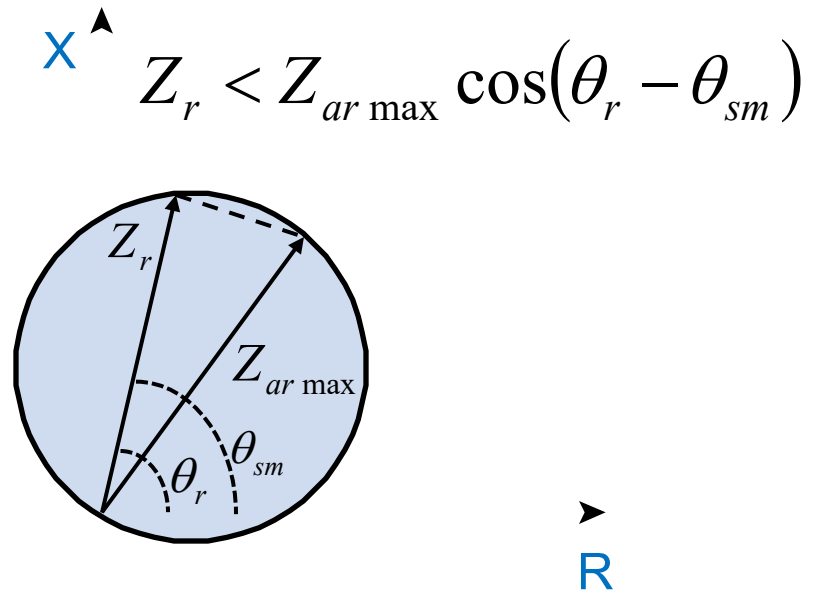


Tipos de características de operación (1): Características circulares

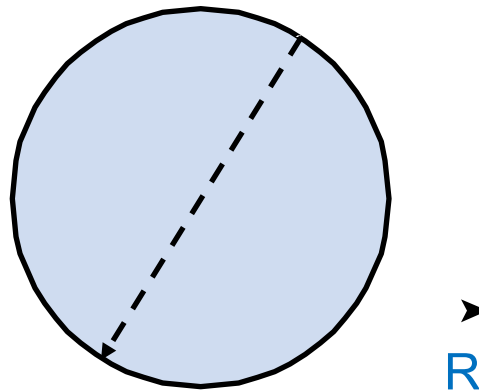


$\hat{R}$

$\hat{x}$

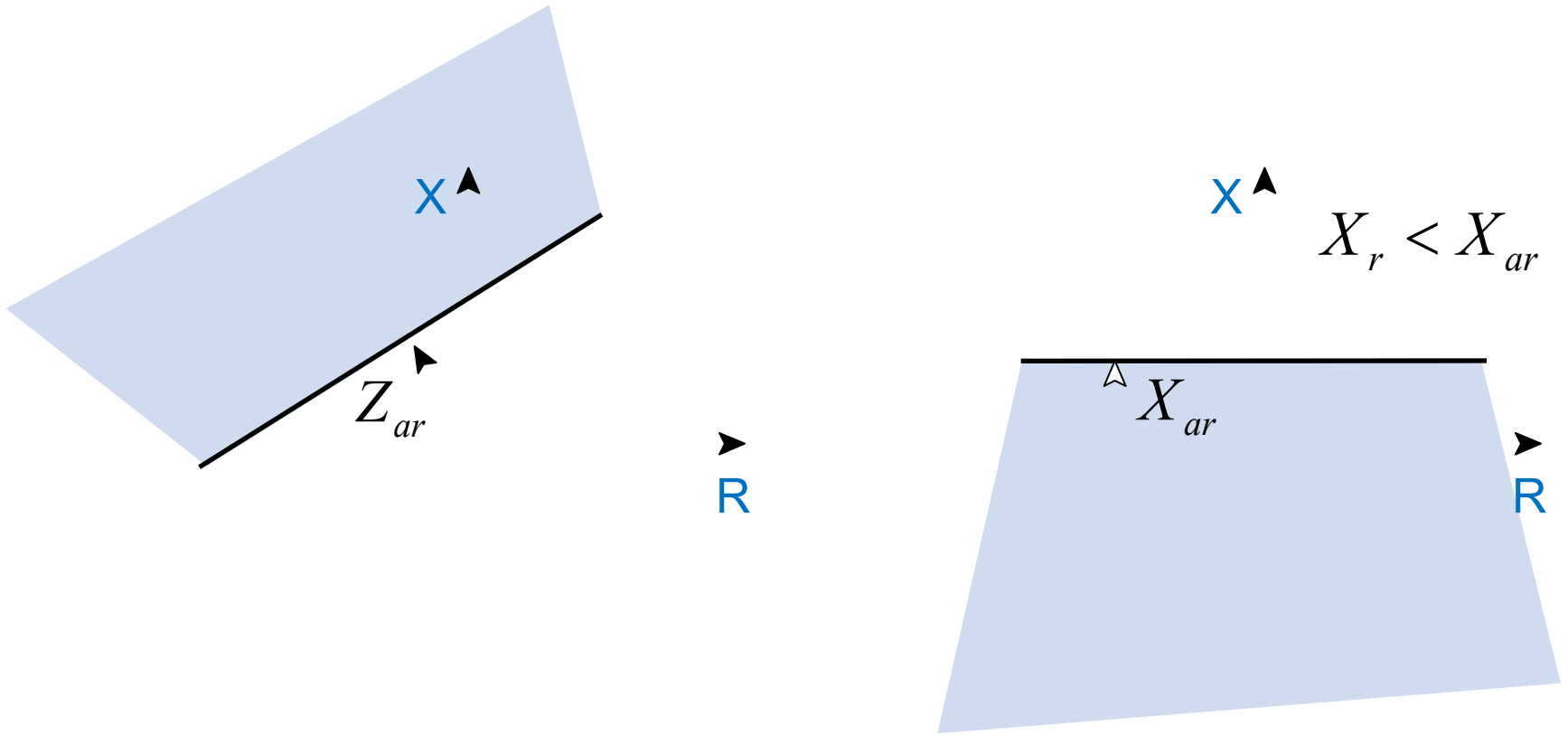


$\hat{R}$

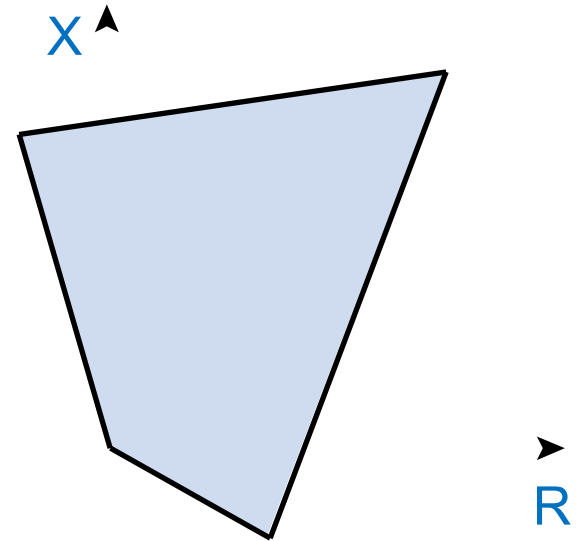
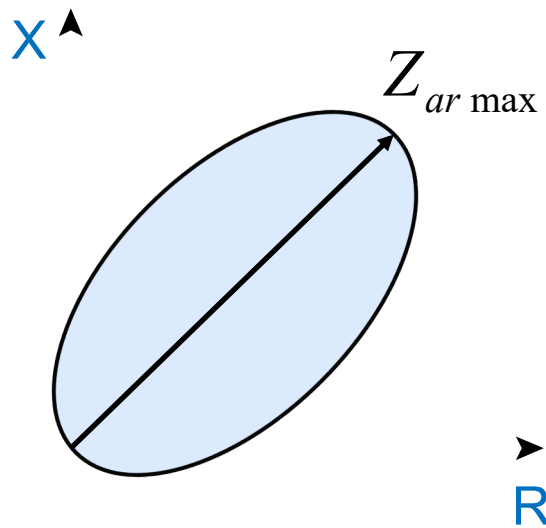


$\hat{R}$

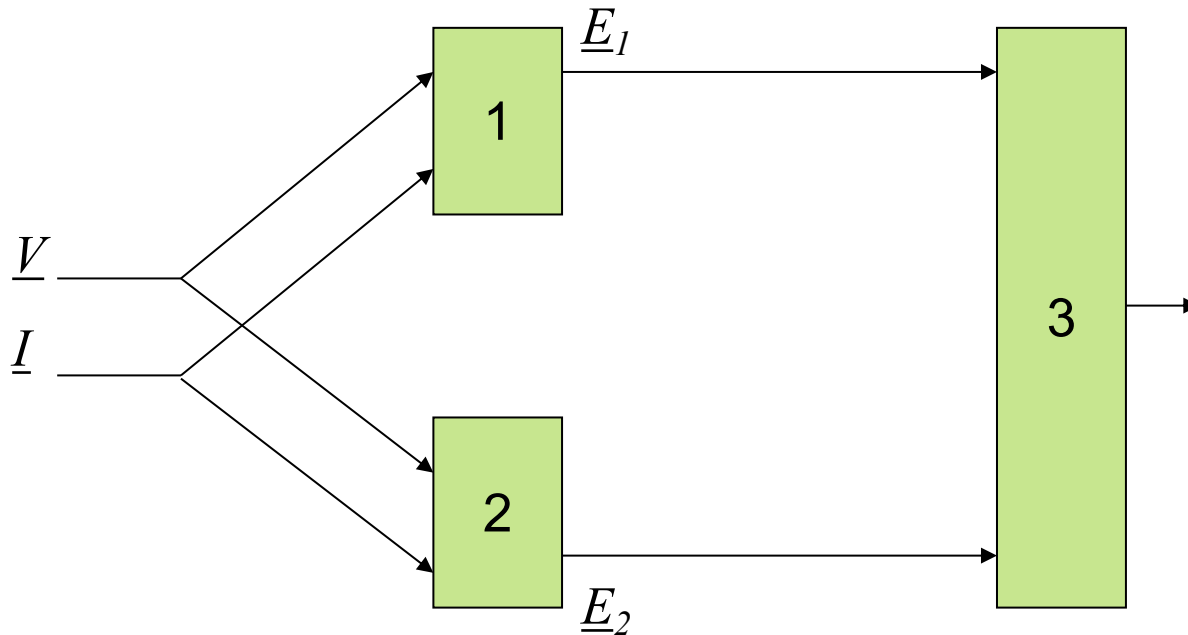
Tipos de características de operación (2): Características lineales



Tipos de características de operación (3): Características especiales



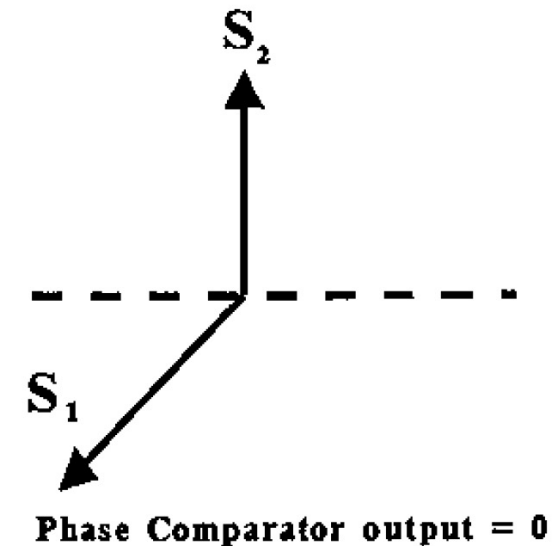
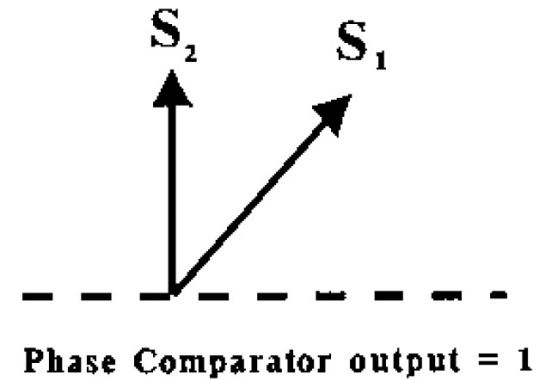
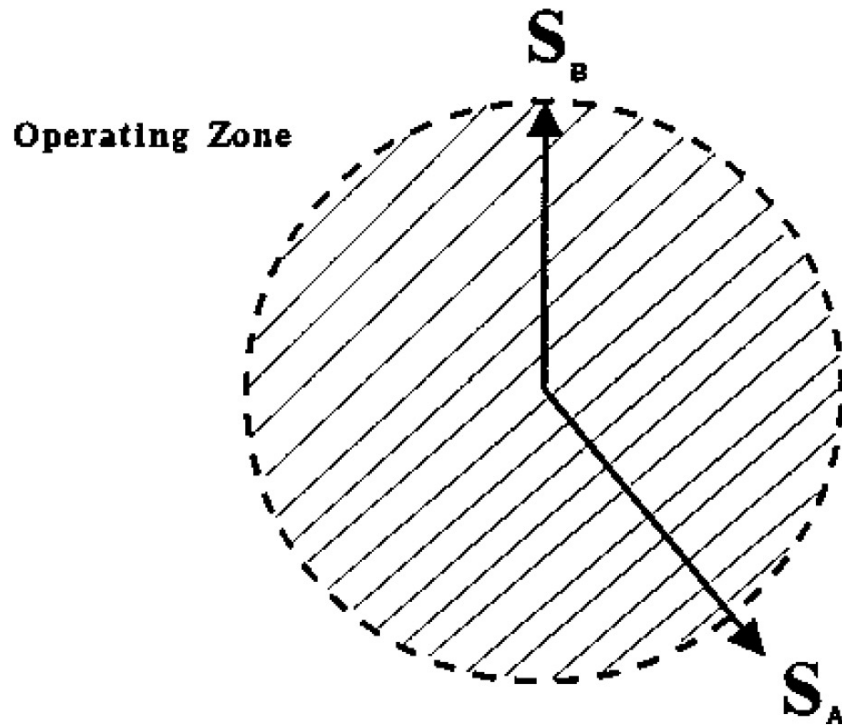
Comparación de señales $\rightarrow Z=V/I$



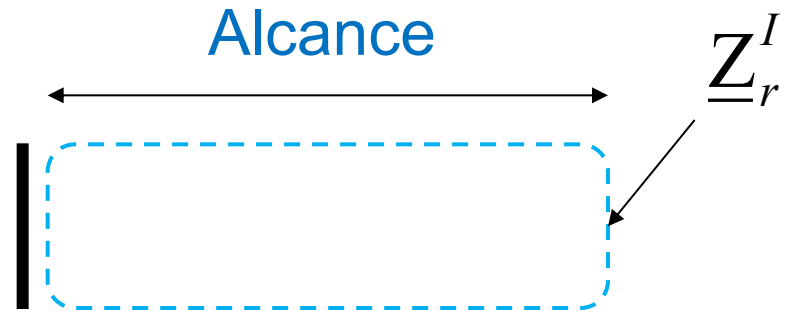
$$\underline{E}_1 = \underline{K}_1 \underline{V} + \underline{K}_2 \underline{I} \quad \text{Operación}$$

$$\underline{E}_2 = \underline{K}_3 \underline{V} + \underline{K}_4 \underline{I} \quad \text{Polarización}$$

Comparadores de dos señales



Determinación de la impedancia



- Condición de operación :

$$\underline{Z}_r = Z_a \angle \phi \leq \underline{Z}_r^I$$

- Relevador de distancia tipo mho :

$$e_1 = i_r Z_r^I - v_r$$

$$e_2 = v_r$$

Comparadores de dos señales

	Comparación de fase		Comparación de amplitud	
Tipo de relevador	$\underline{E}_1$ (operación)	$\underline{E}_2$ (polarización)	$\underline{E}_1$ (operación)	$\underline{E}_2$ (polarización)
Direccional	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r$	$\underline{V}_r$	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r - \underline{V}_r$	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r + \underline{V}_r$
Impedancia	$\underline{Z}_{ar} \underline{I}_r - \underline{V}_r$	$\underline{Z}_{ar} \underline{I}_r + \underline{V}_r$	$\underline{Z}_{ar} \underline{I}_r$	$\underline{V}_r$
Mho	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r - \underline{V}_r$	$\underline{V}_r$	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r$	$2\underline{V}_r - \underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r$
Mho desplazado	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r - \underline{Z}_d \underline{I}_r$	$\underline{V}_r - \underline{Z}_d \underline{I}_r$	$\underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r - \underline{Z}_d \underline{I}_r$	$2\underline{V}_r - \underline{Z}_{ar} \max \underline{I}_r - \underline{Z}_d \underline{I}_r$
Impedancia-ángulo	$\underline{Z}_{ar} \min \underline{I}_r - \underline{V}_r$	$\underline{Z}_{ar} \min \underline{I}_r$	$2\underline{Z}_{ar} \min \underline{I}_r - \underline{V}_r$	$\underline{V}_r$

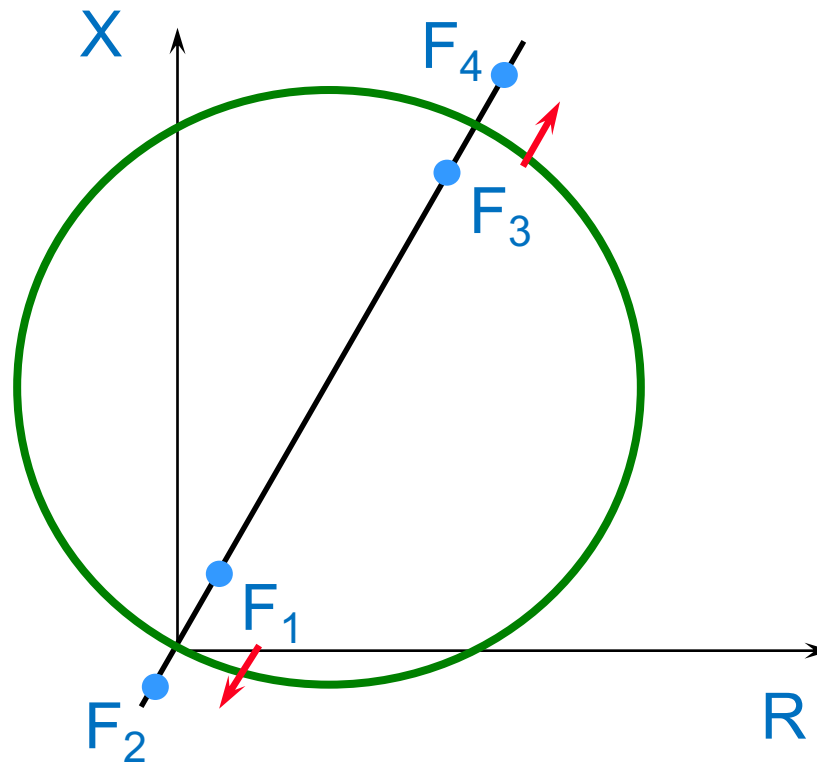
Ecuaciones básicas

$$\theta_1 \leq \arg \left(\frac{\vec{k}_1 \vec{V} + \vec{k}_2 \vec{I}}{\vec{k}_3 \vec{V} + \vec{k}_4 \vec{I}} \right) \leq \theta_2$$

$$\varphi_1 = \theta_1 - \lambda \leq \arg \left(\frac{\vec{Z} - \vec{B}}{\vec{Z} - \vec{A}} \right) \leq \theta_2 - \lambda = \varphi_2$$

$$A = -\vec{k}_4 / \vec{k}_3 \quad B = -\vec{k}_2 / \vec{k}_1 \quad \lambda = \arg(\vec{k}_1 / \vec{k}_3)$$

Significado de la polarización (mho)



$$\underline{E}_1 = -\underline{V}_r + \underline{Z}_{ar \max} \underline{I}_r$$

$$\underline{E}_2 = \underline{V}_r \quad (\text{no cambia de fase})$$

Conexión de relevadores de distancia

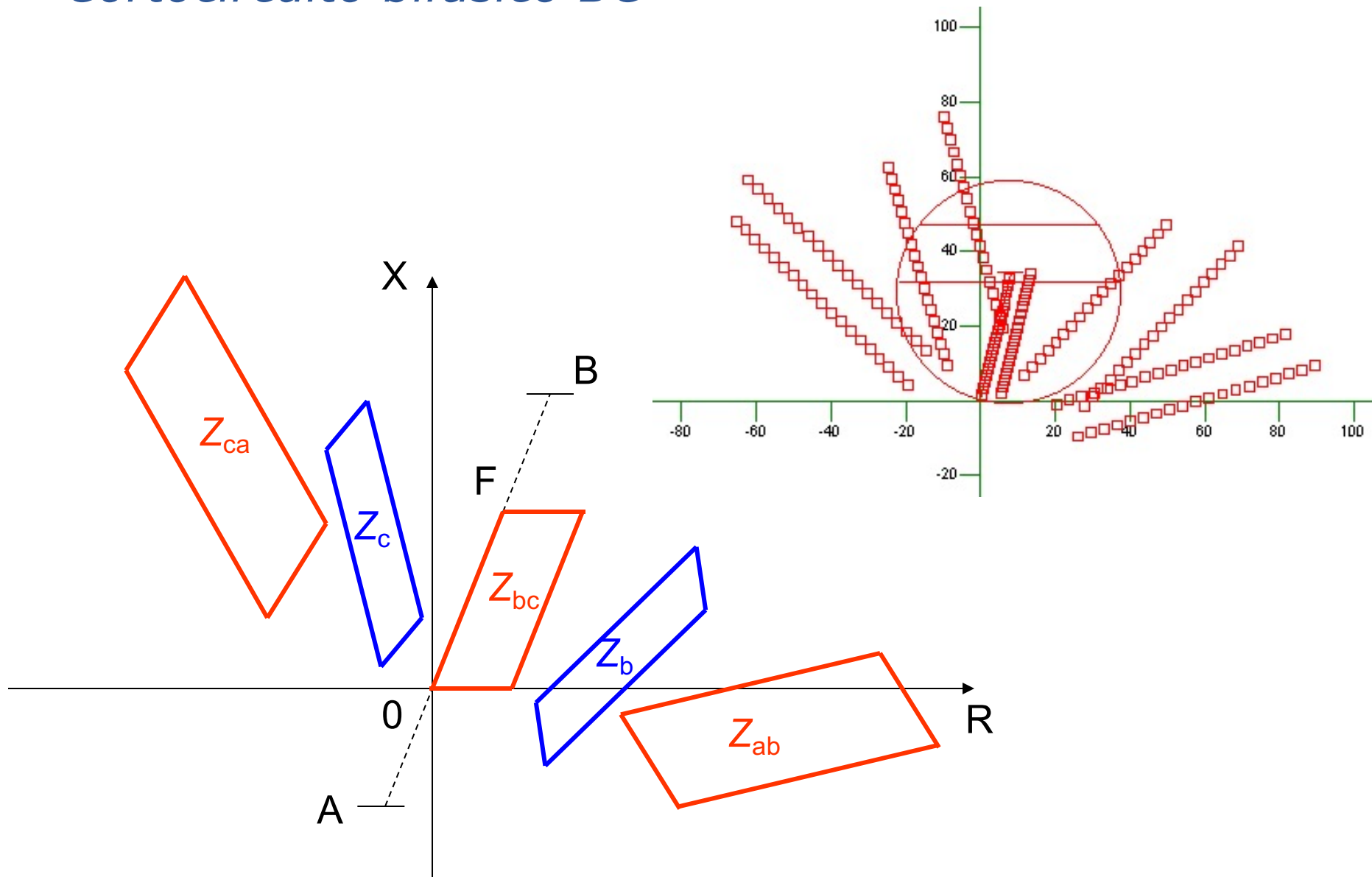
- ▶ Medición de la impedancia de secuencia positiva.
 - ▶ Relevadores de fase (ab, bc, ca),
 - ▶ Relevadores de tierra (ag, bg, cg) :
 - ▶ Compensación con corrientes de secuencia cero,
 - ▶ Compensación con corrientes de las fases no falladas.
- ▶ El tipo de conexión asegura que todos los relevadores de una línea de transmisión midan la misma impedancia en un cortocircuito trifásico, y para otras fallas, asegura que el relevador involucrado en el lazo de falla mida correctamente la impedancia hasta el punto de falla.

Conexiones de un relevador con autopolarización

		V	I
Fase	$A-B$	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$
	$B-C$	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$
	$C-A$	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$
Tierra	A	V_a	$I_a + k_0 I_{res}$
	B	V_b	$I_b + k_0 I_{res}$
	C	V_c	$I_c + k_0 I_{res}$

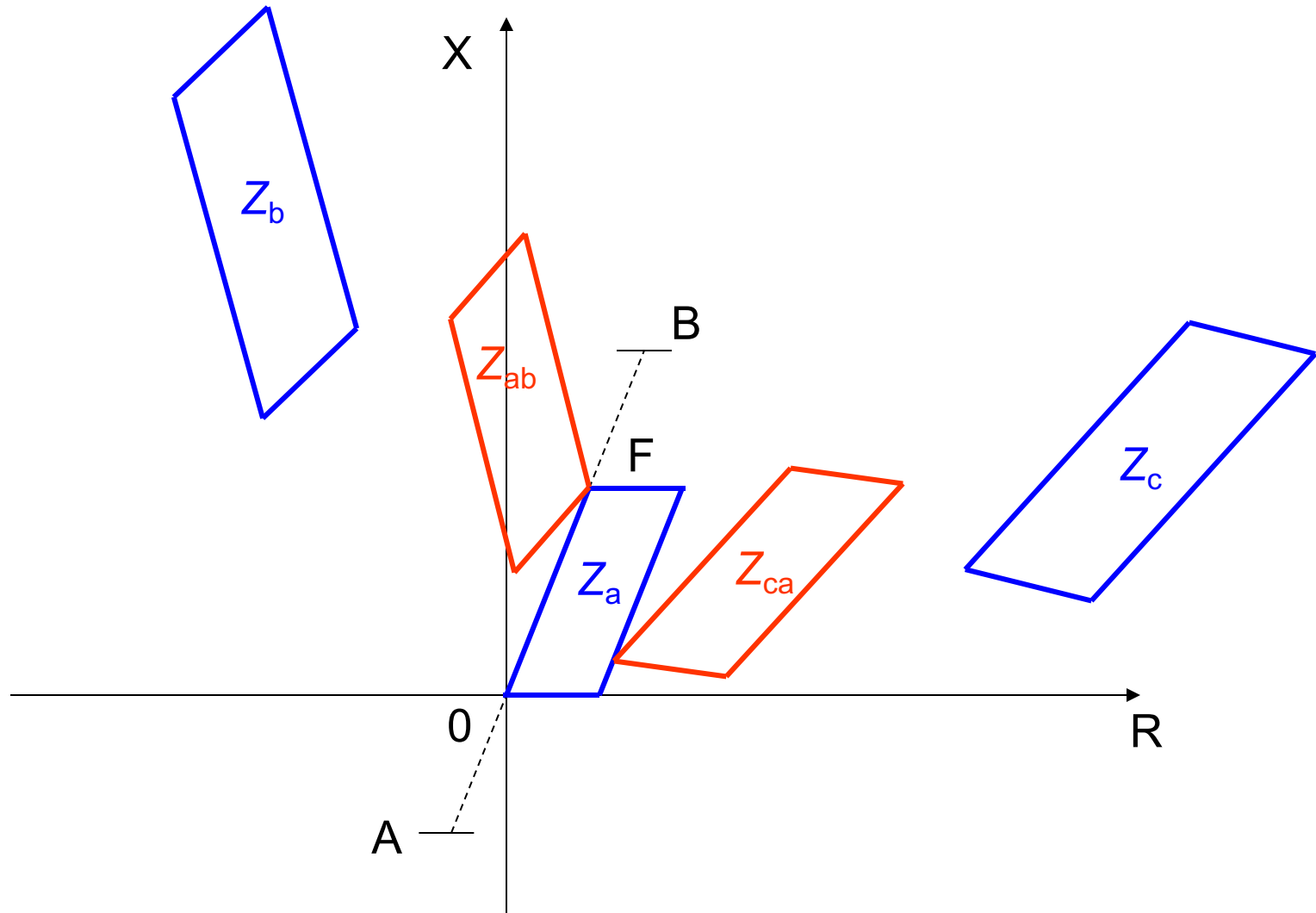
Impedancias medidas por los relevadores

Cortocircuito bifásico BC



Impedancias medidas por los relevadores

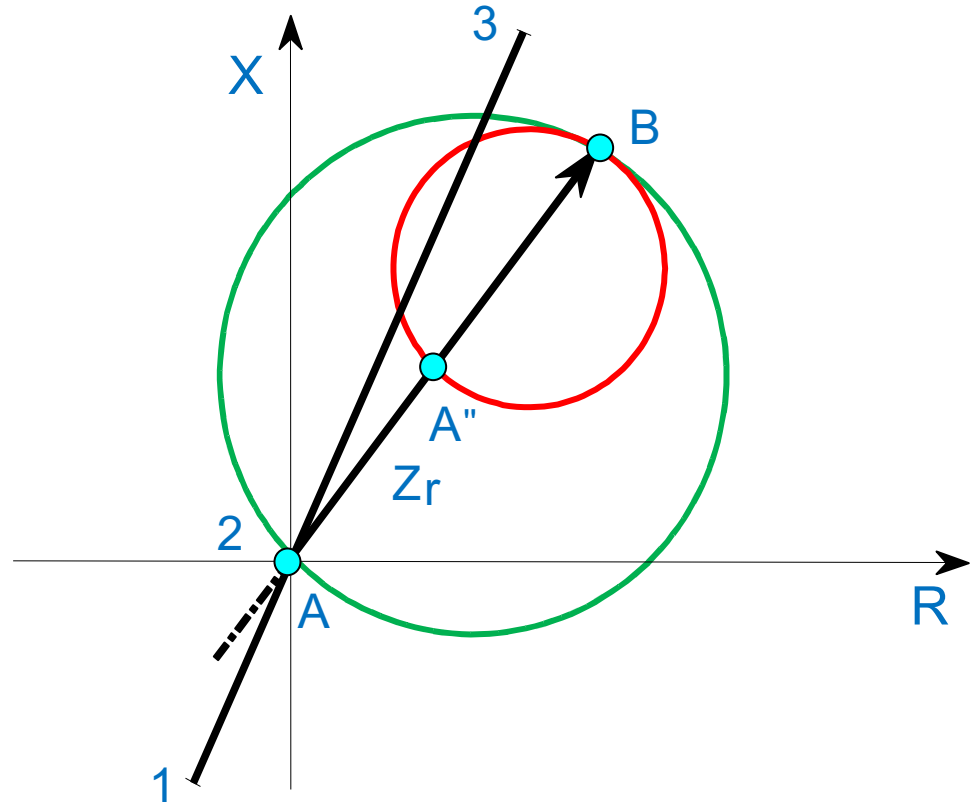
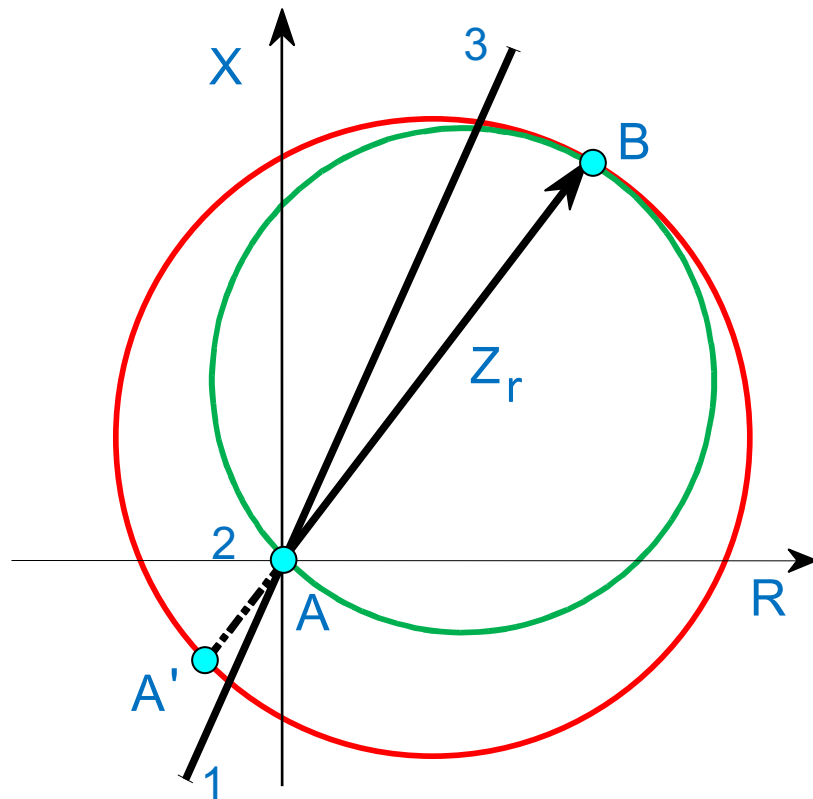
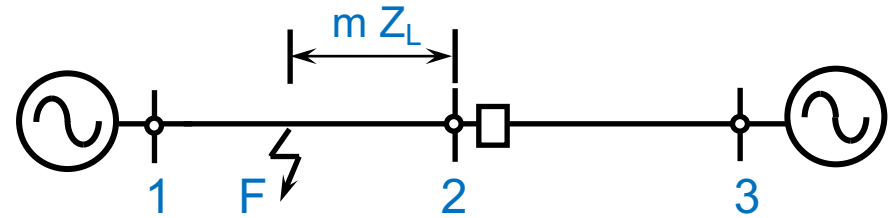
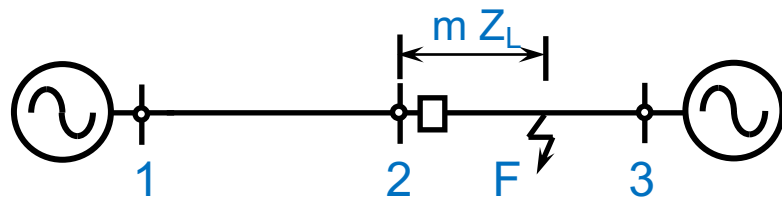
Cortocircuito monofásico A



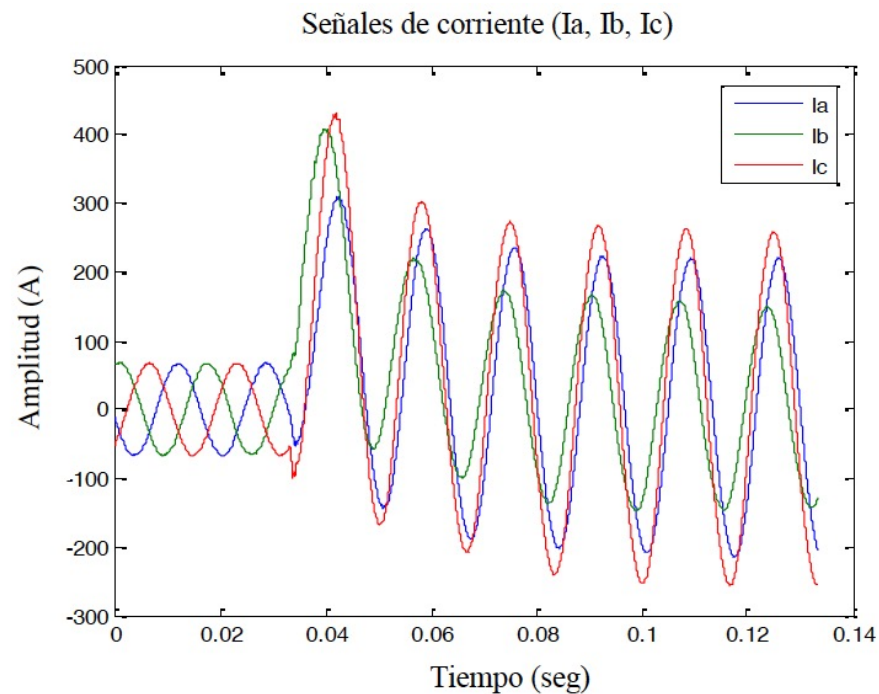
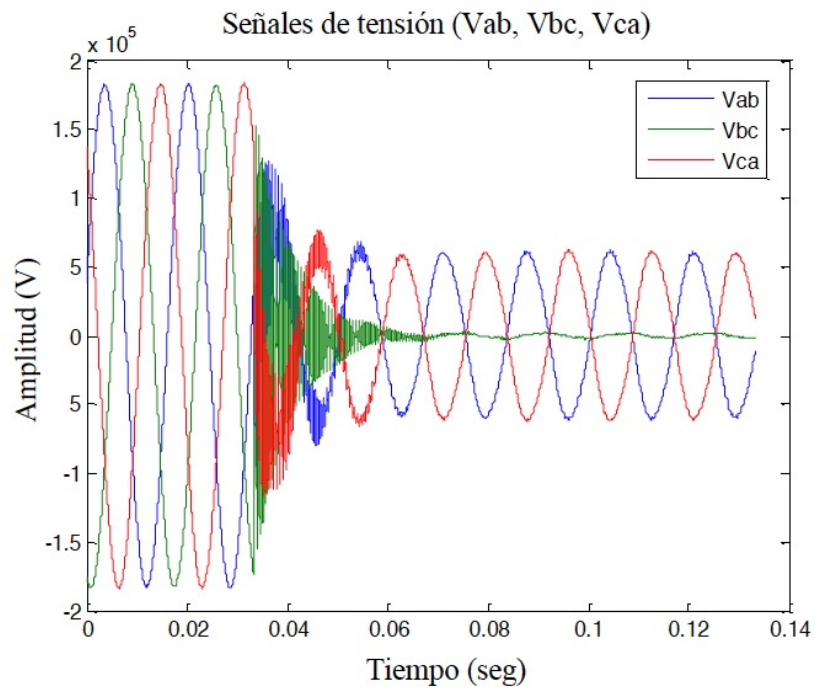
Alternativas de polarización

- ▶ Auto polarización,
- ▶ Polarización dual (voltajes de las fases no falladas),
- ▶ Polarización cruzada:
 - ▶ Voltajes de las fases no falladas,
 - ▶ Voltaje de secuencia positiva,
- ▶ Acción memoria (necesaria en caso de fallas trifásicas e inversiones de voltaje).

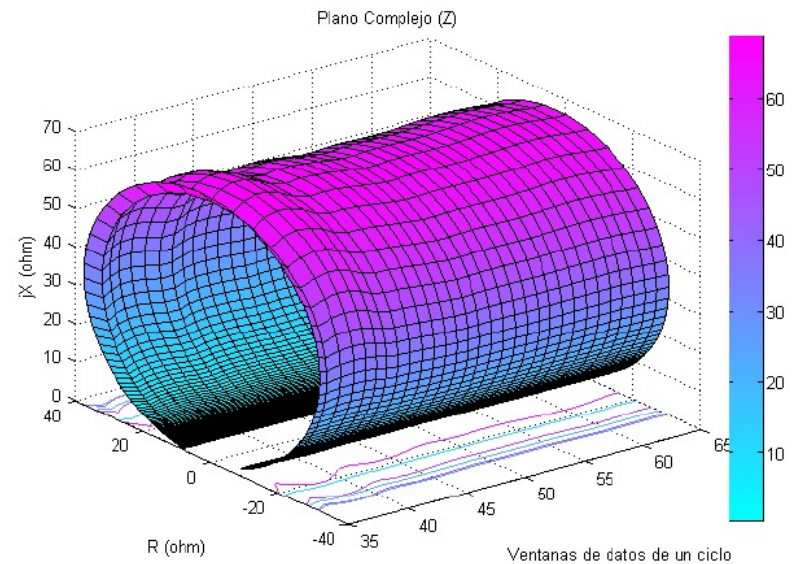
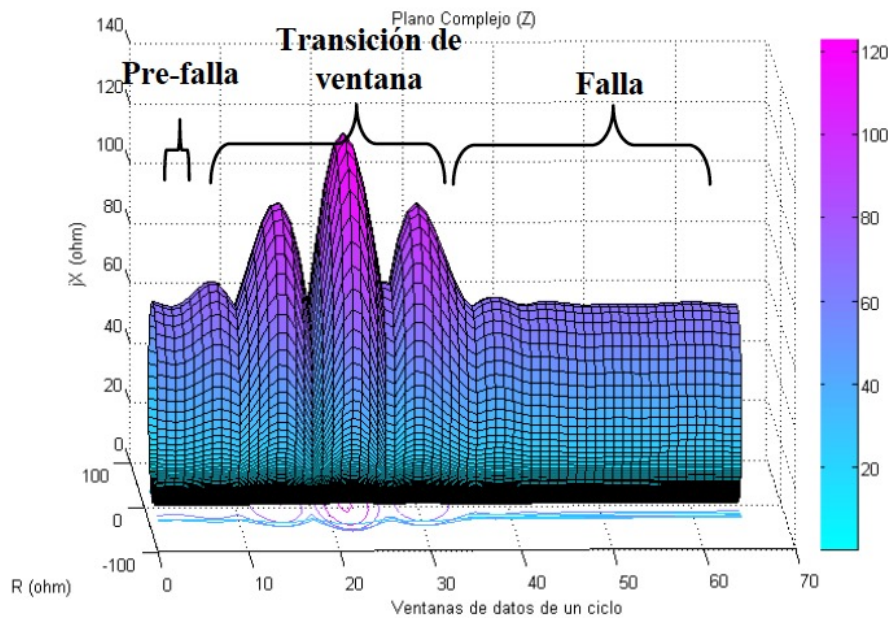
Operación durante fallas de un relevador de distancia mho polarizado (1)



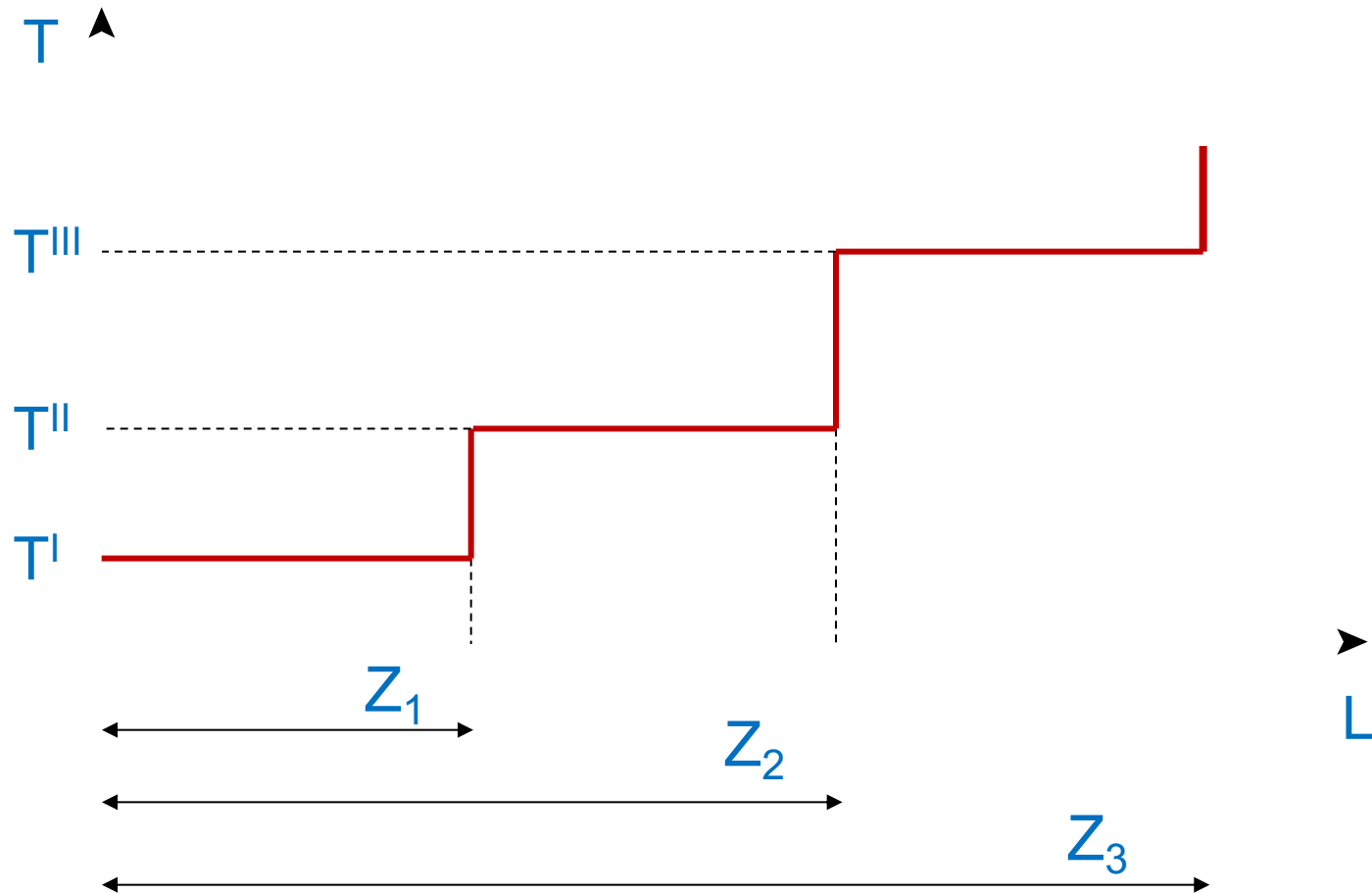
Señales típicas



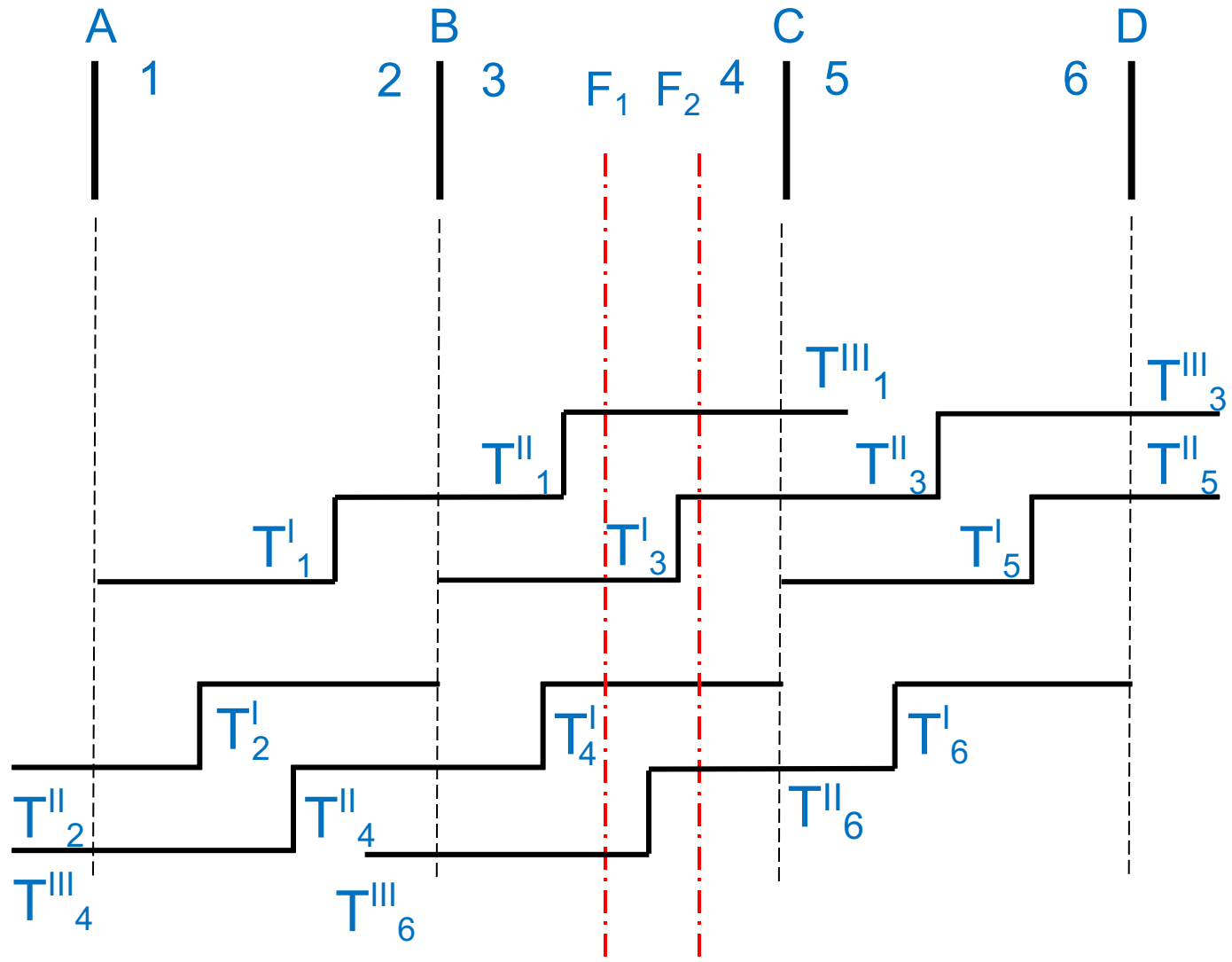
Impacto sobre las protecciones de distancia



Característica de 3 escalones de tiempo definido de la protección de distancia



Operación de la protección de distancia en una red con alimentación bilateral



Función de las zonas de protección en un relevador de distancia

▶ Primera zona

- ▶ Protección primaria del 80 al 90% de la línea propia.

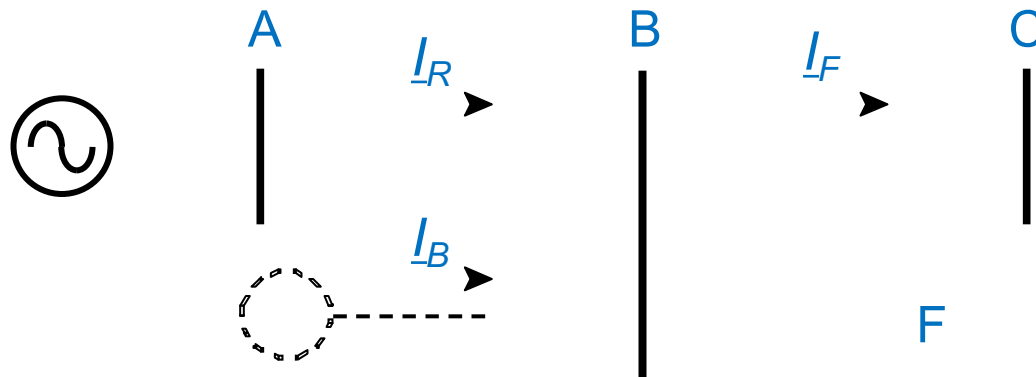
▶ Segunda zona

- ▶ Protección primaria del último porcentaje de la línea propia,
- ▶ Protección de respaldo de la barra al final de la línea,
- ▶ Ser insensible para fallas en el secundario de los transformadores conectados en la subestación remota.

▶ Tercera zona

- ▶ Protección de respaldo para todas las líneas adyacentes a la línea propia.

Efecto de fuente intermedia, infeed



$$\underline{Z}_R = \frac{\underline{V}_R}{\underline{I}_R} = \frac{(\underline{I}_R \underline{Z}_{AB} + \underline{I}_F \underline{Z}_{BC})}{\underline{I}_R}$$

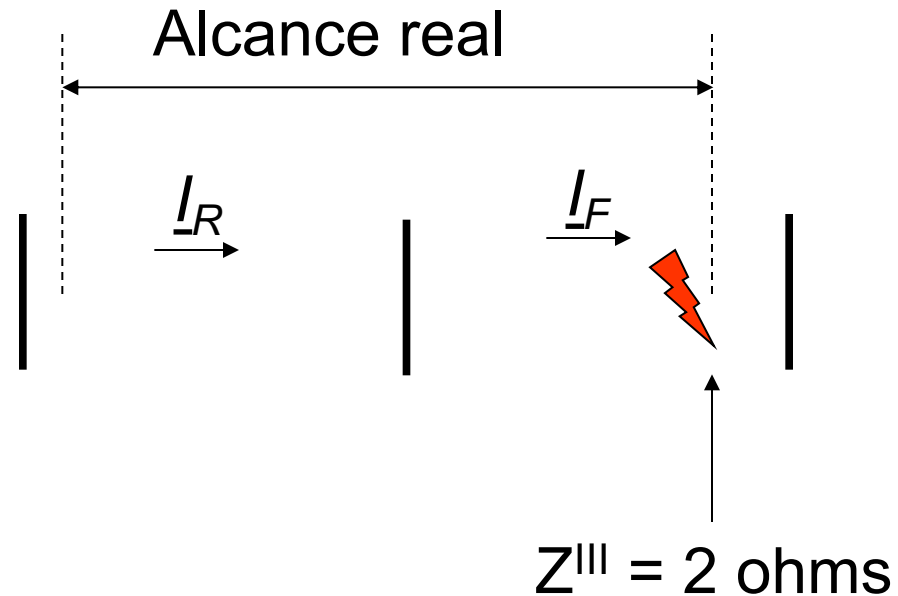
$$\underline{Z}_R = \underline{Z}_{AB} + \left(\frac{\underline{I}_F}{\underline{I}_R} \right) \underline{Z}_{BC}$$

$$\underline{Z}_R = \underline{Z}_{AB} + \underline{k}_i \underline{Z}_{BC}$$

Ejemplo

$$Z_L = 1.0 \text{ ohms}$$

$$1.0A \text{ } \odot \sim$$



$$Z_{\text{MEDIDA}} = 2 \text{ ohms}$$

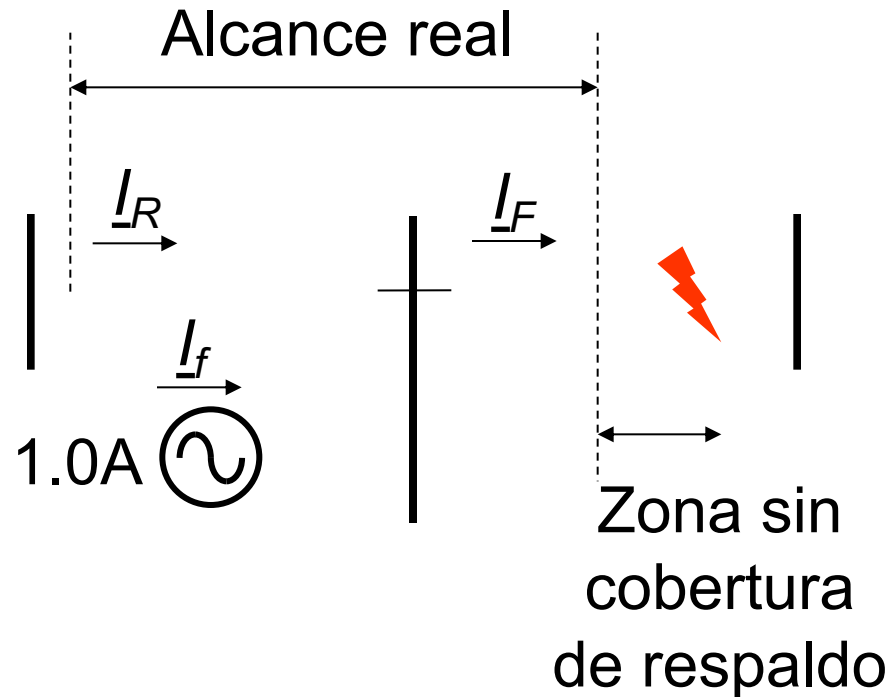
$$Z_{\text{AJUSTE}} = 2 \text{ ohms}$$

$$Z_{\text{MEDIDA}} \leq Z_{\text{AJUSTE}} \text{ (operación)}$$

Ejemplo

$$Z_L = 1.0 \text{ ohms}$$

1.0A 

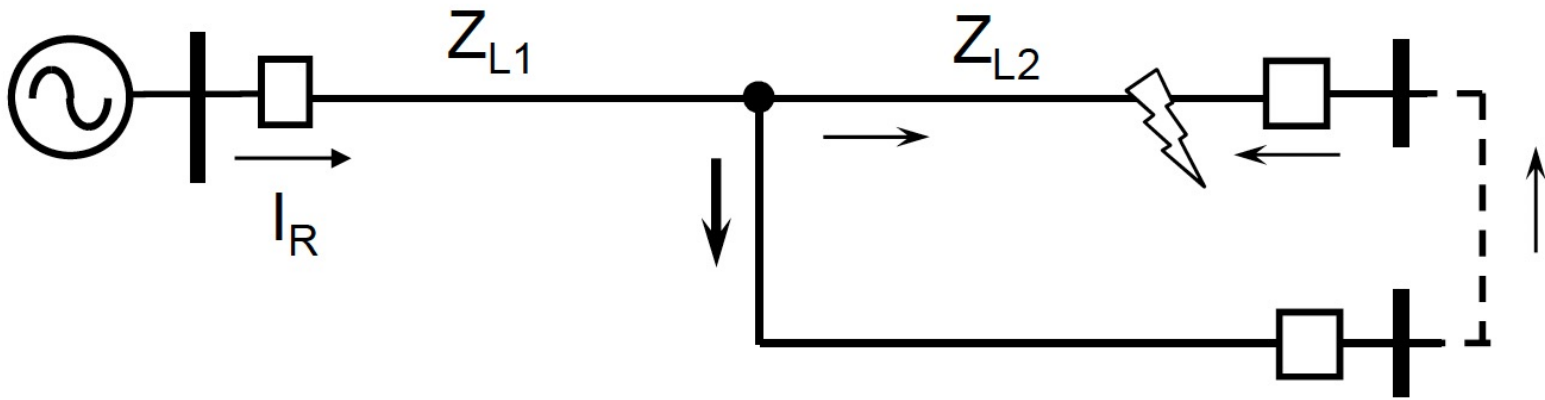
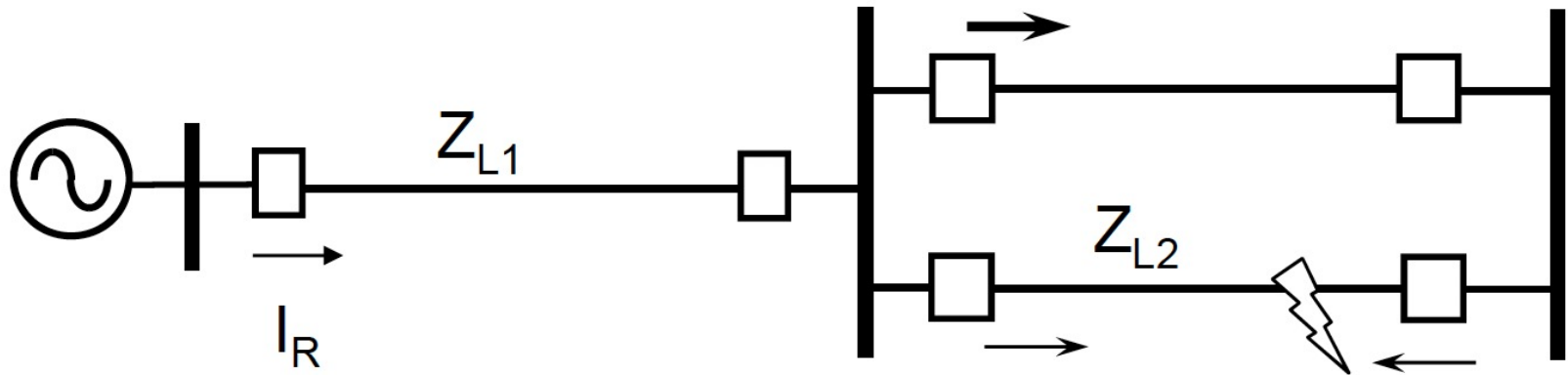


$$Z_{\text{MEDIDA}} = 3 \text{ ohms}$$

$$Z_{\text{AJUSTE}} = 2 \text{ ohms}$$

$$Z_{\text{MEDIDA}} > Z_{\text{AJUSTE}} \text{ (no operación)}$$

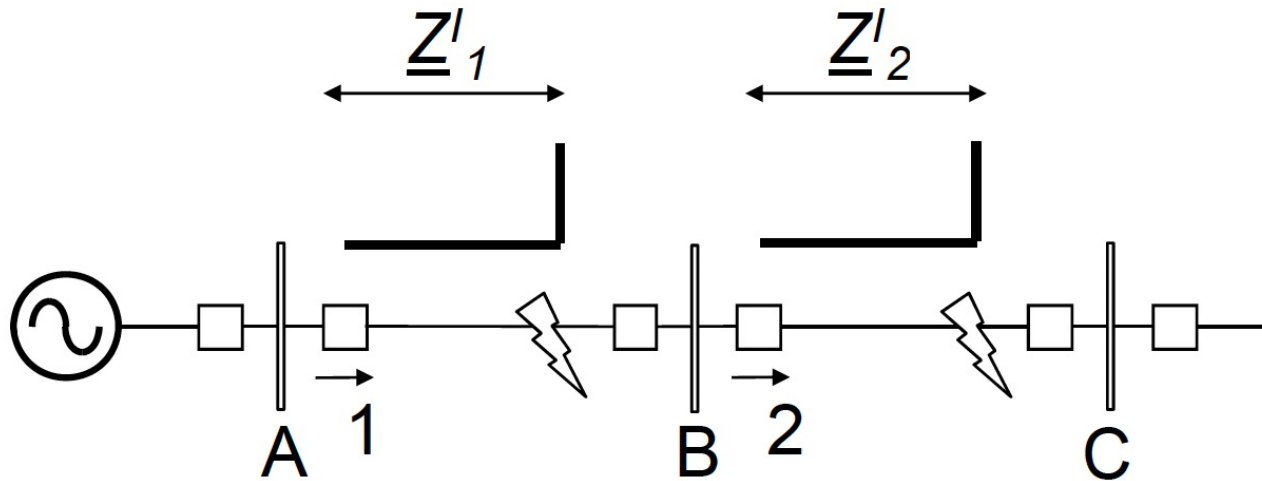
Efecto de fuente intermedia, outfeed



Objetivos de la coordinación

- ▶ El 100% de los elementos deben contar con cobertura de protección primaria y de respaldo.
- ▶ Las zonas de protección del mismo nivel no deben traslaparse para evitar coordinación por tiempo.
- ▶ Se debe asegurar niveles de sensibilidad en los límites del alcance de las zonas 2 y 3.
- ▶ De ser necesario, se deben verificar operaciones secuenciales.

Primera zona

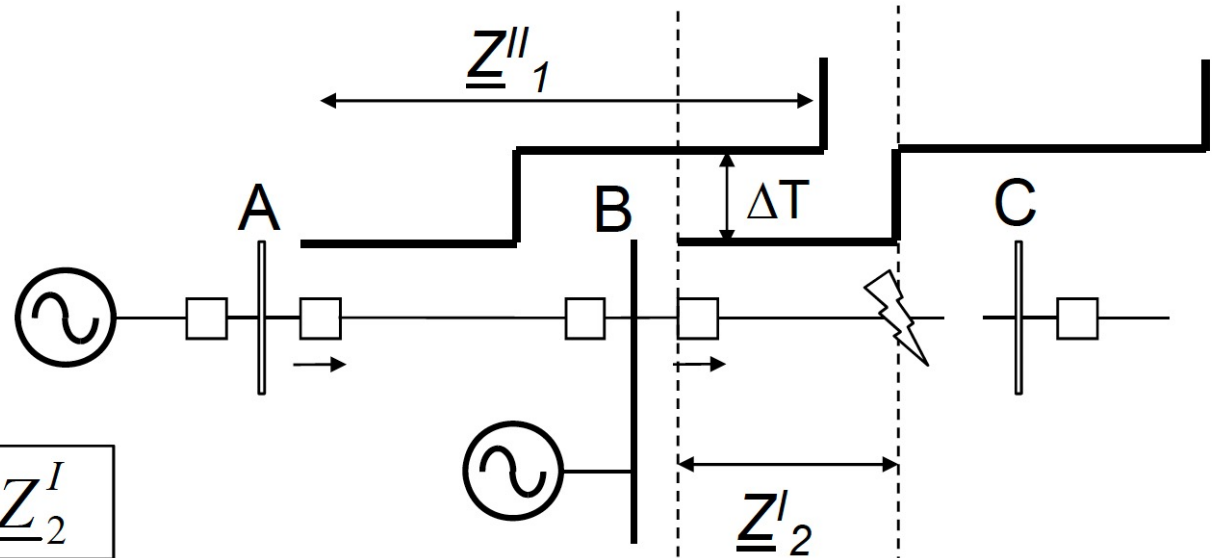


$$\underline{Z}_1^I < k^I \underline{Z}_{AB}$$

$0.8 < k^I < 0.9$ (*tipo de relevador*)

$$T_1^I \approx 0.05s$$

Segunda zona



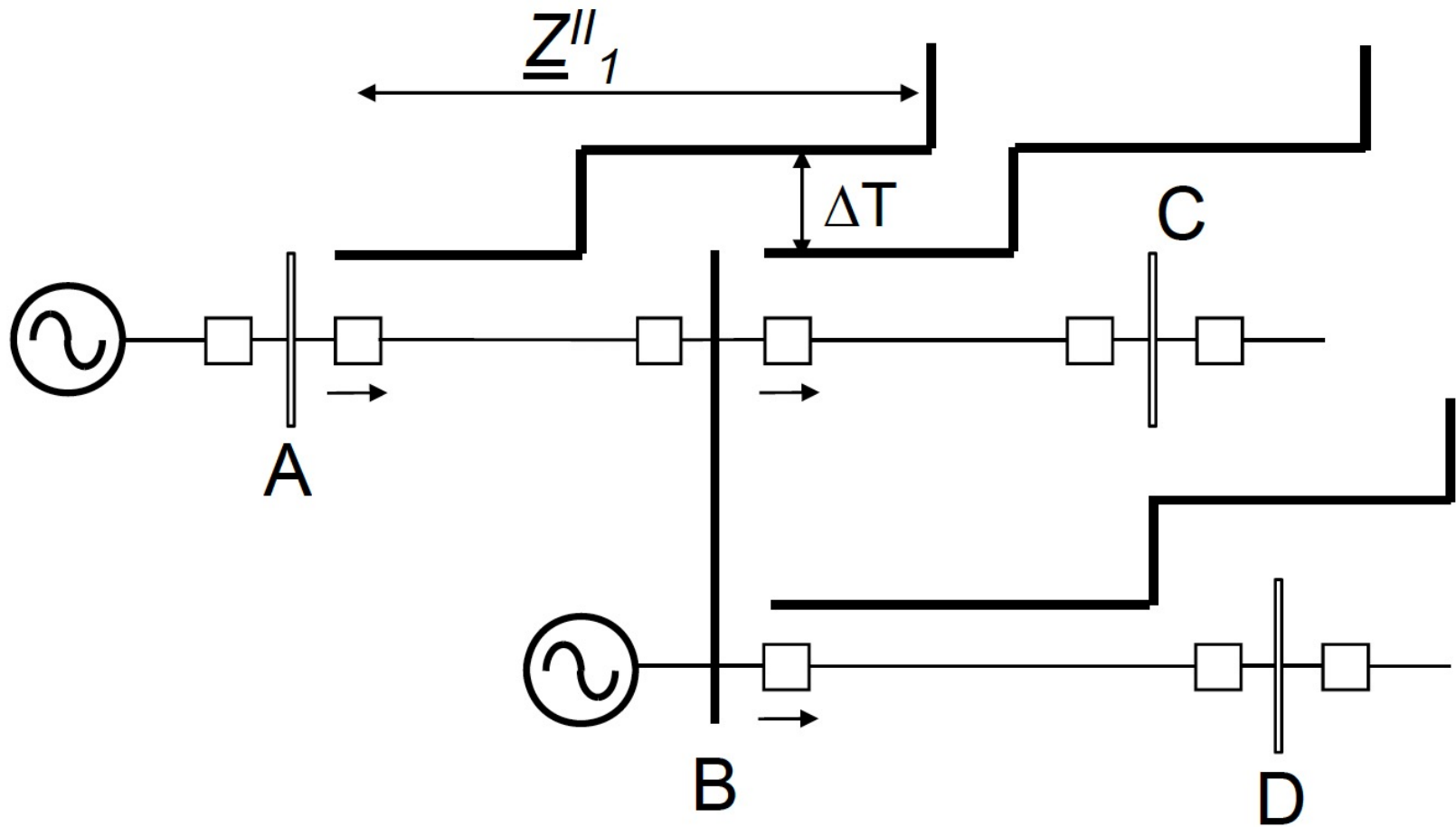
$$\underline{Z}_1^{II} < \underline{Z}_{AB} + \underline{k}_i \underline{Z}_2^I$$

$$\underline{k}_i = \underline{I}_F / \underline{I}_R$$

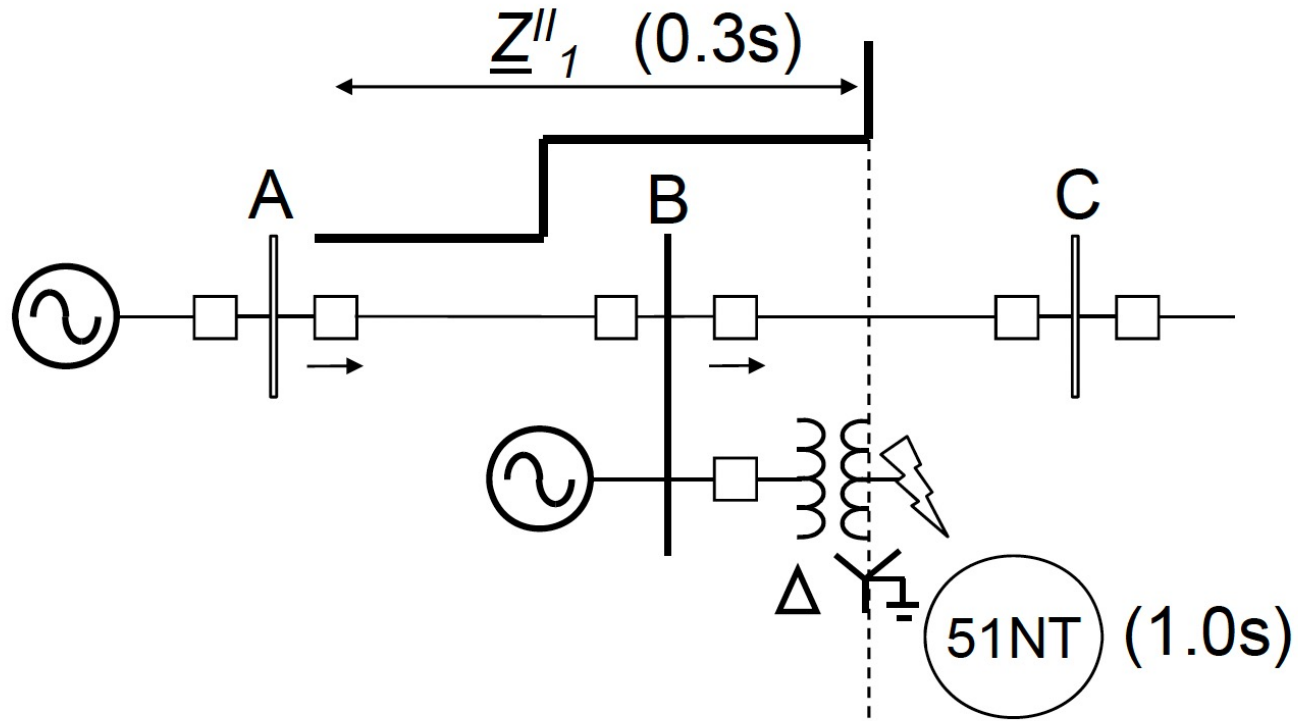
$$T_1^{II} = T_2^I + \Delta T \quad (0.2 < \Delta T < 0.4)$$

$$1.25 < K_S^{II} = \frac{\underline{Z}_1^{II}}{\underline{Z}_{AB}} < 1.50$$

Segunda zona (traslapes)



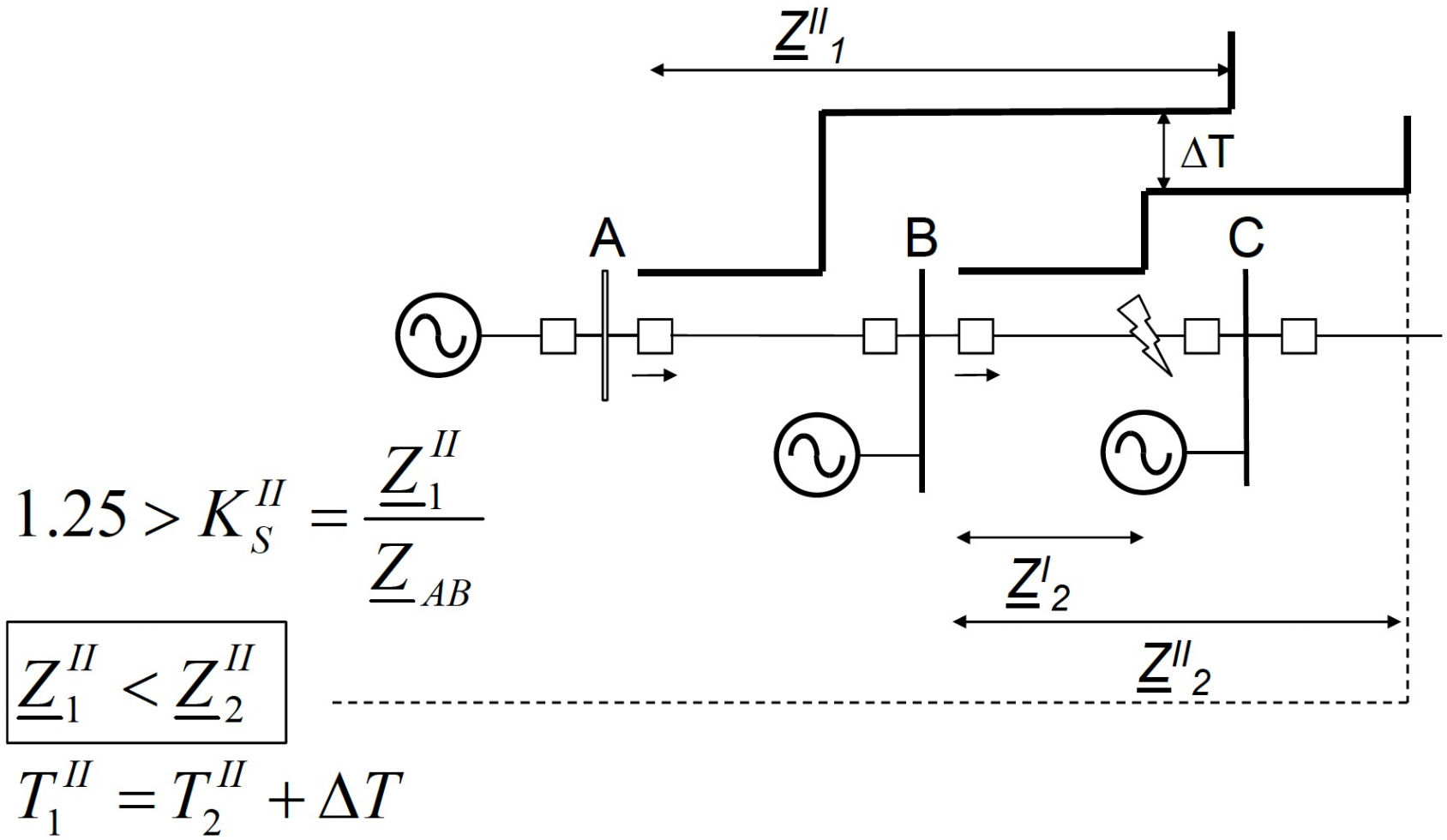
Segunda zona (transformadores)



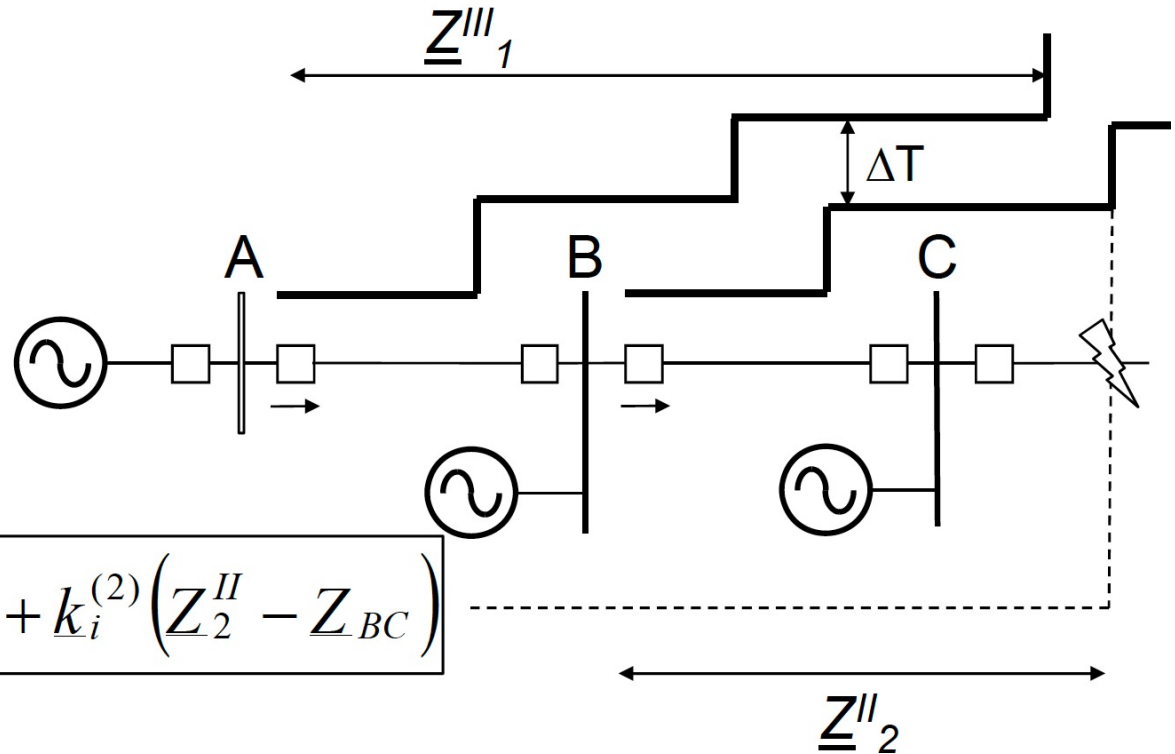
$$\underline{Z}_1^{II} < \underline{Z}_{AB} + k_i \underline{Z}_T$$

$$k_i = \underline{I}_F / \underline{I}_R$$

Segunda zona (coordinación por tiempo)



Tercera zona (zonas adyacentes)

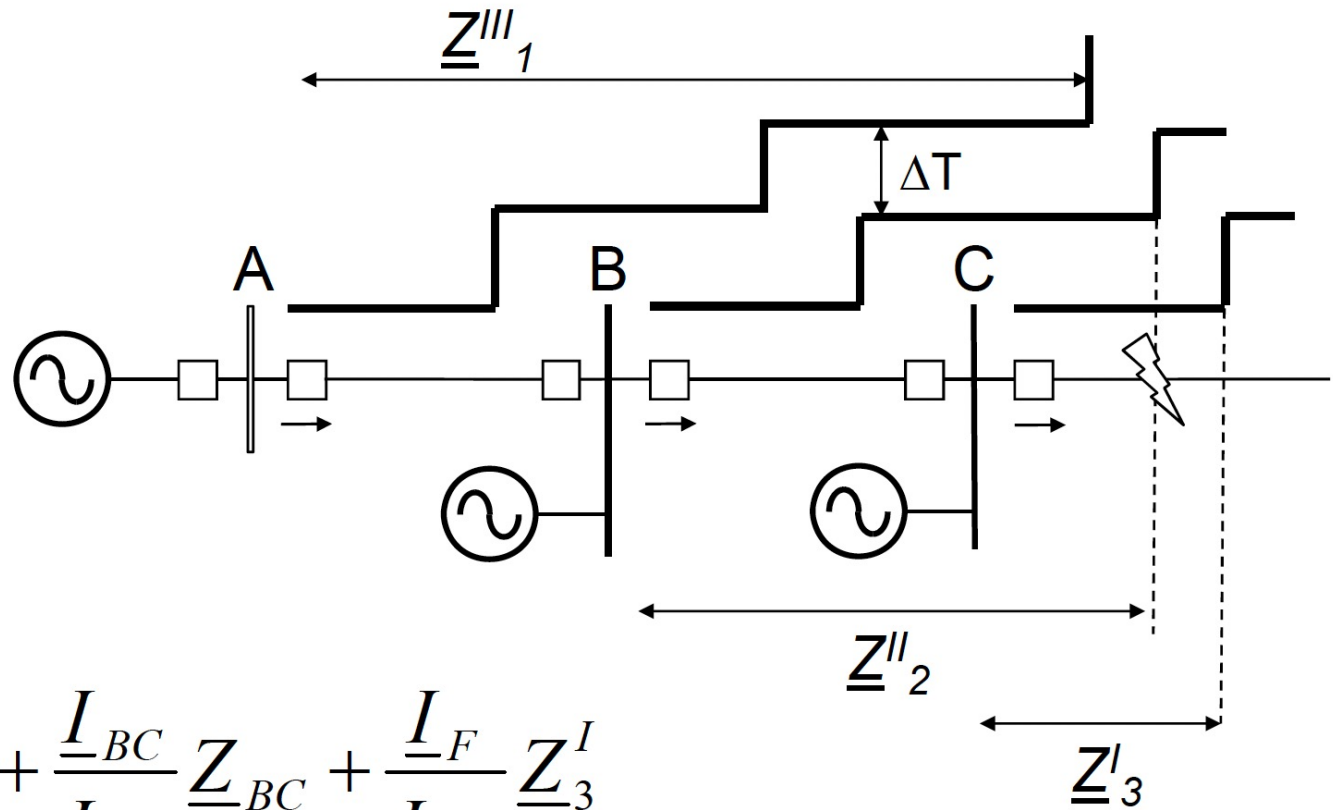


$$Z_1^{III} < Z_{AB} + k_i^{(1)} Z_{BC} + k_i^{(2)} (Z_2^{II} - Z_{BC})$$

$$T_1^{III} = T_2^{II} + \Delta T$$

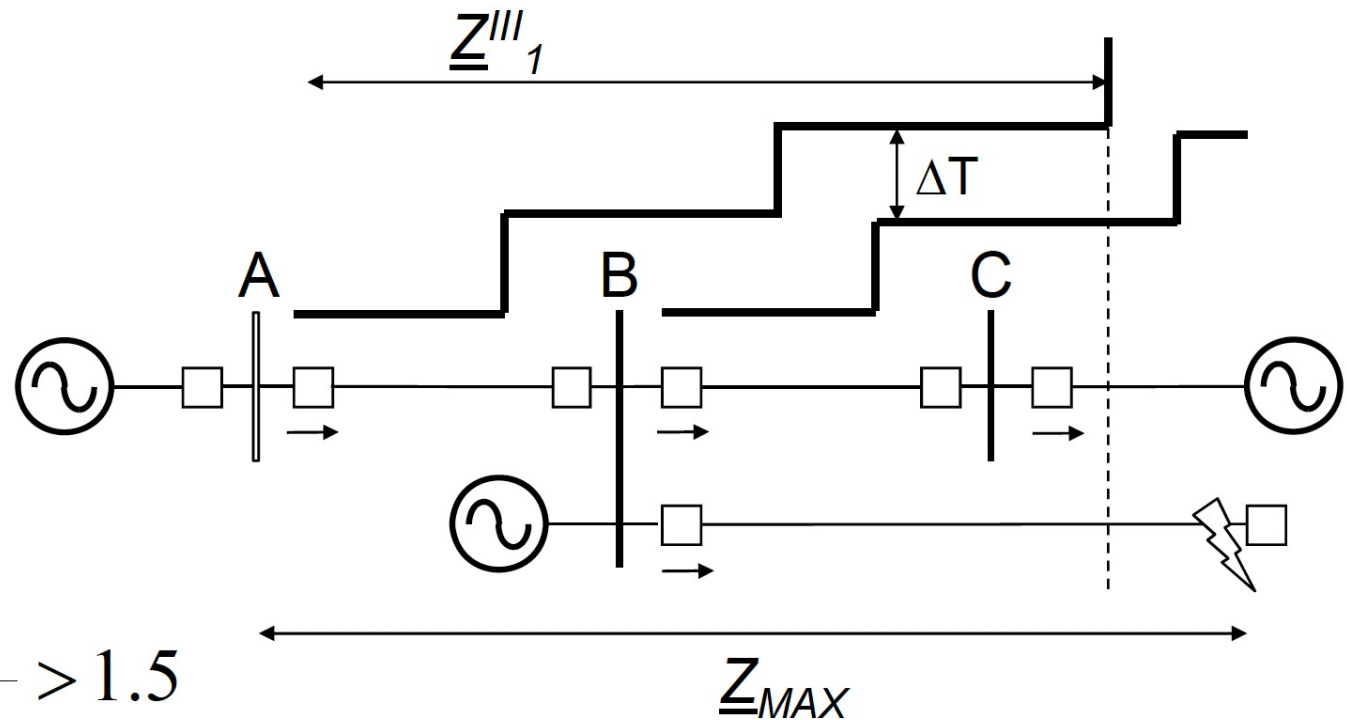
$$K_{S1}^{III} = \frac{Z_1^{III}}{Z_{AB}} > 1.5 \quad (\text{CC bifásico en B})$$

Tercera zona (primeras zonas)



$$\underline{Z}_1^{III} < \underline{Z}_{AB} + \frac{\underline{I}_{BC}}{\underline{I}_{AB}} \underline{Z}_{BC} + \frac{\underline{I}_F}{\underline{I}_{AB}} \underline{Z}_3^I$$

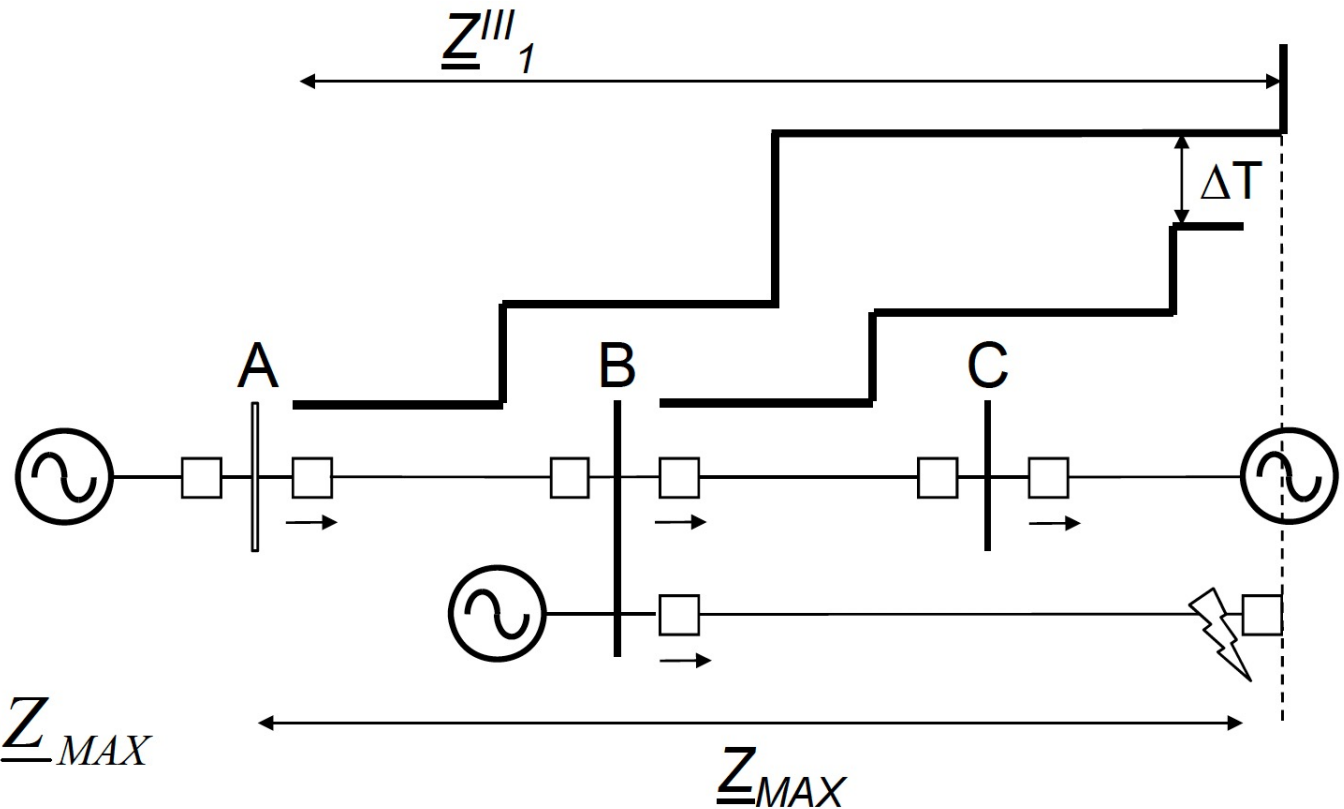
Tercera zona (cobertura de respaldo)



$$K_{S2}^{III} = \frac{Z_1^{III}}{Z_{MAX}} > 1.5$$

(típicamente para la
peor condición de infeed)

Tercera zona (cobertura de respaldo)



$$Z_1^{III} = (1.5) Z_{MAX}$$

$$T_1^{III} = T_2^{III} + \Delta T$$

Consideración de la carga

- ▶ La cargabilidad máxima de un relevador de distancia depende de su característica de operación en el plano complejo impedancia.

$$\underline{Z}_1^{III} < \underline{Z}_{C \min} = \frac{\underline{V}_{f \min}}{\underline{I}_{\max}} = \frac{\underline{V}_{L \min}}{\sqrt{3} \underline{I}_{\max}}$$

$$\underline{I}_{\max} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3} \underline{V}_{L \min} \cos \theta}$$

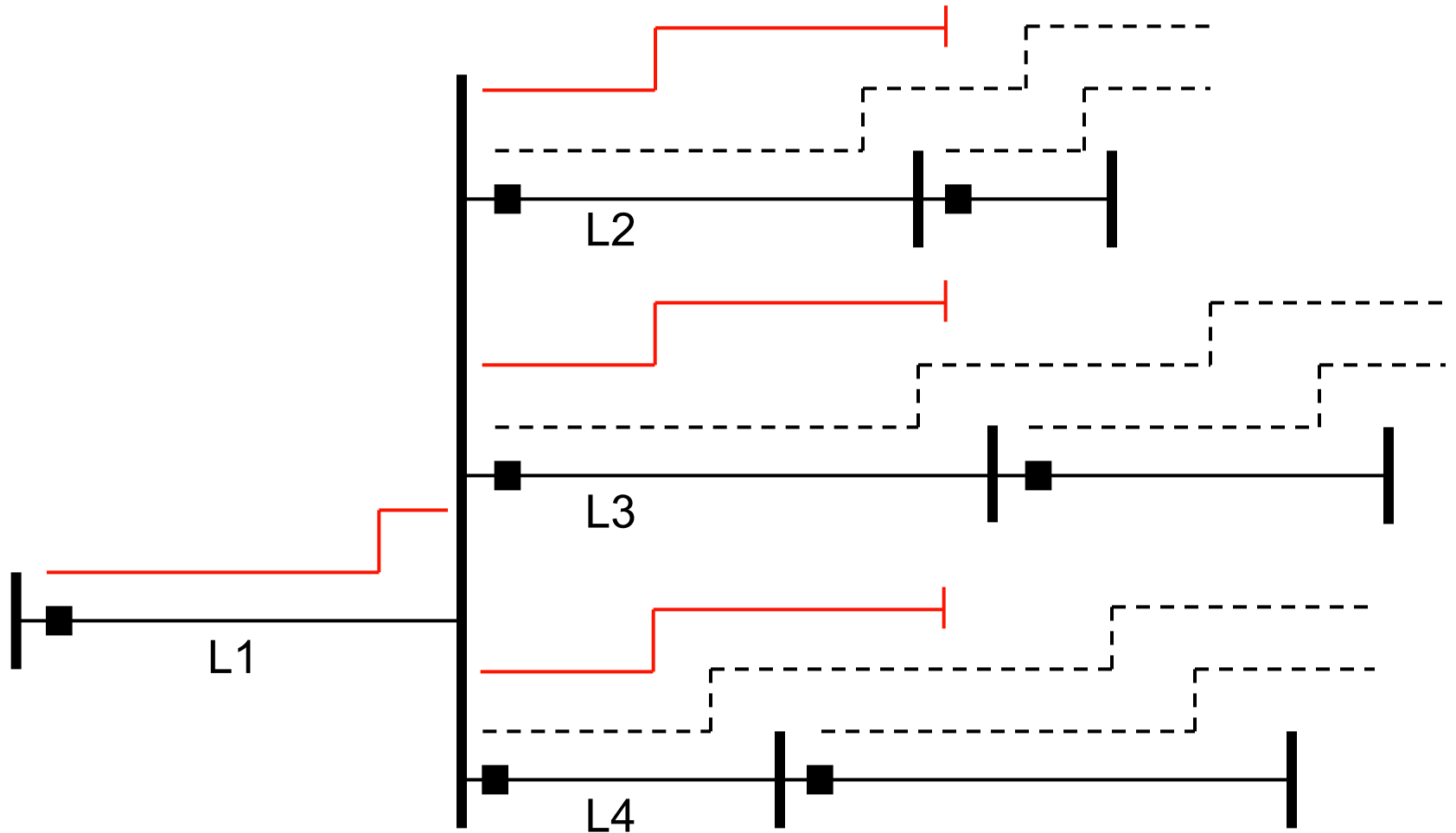
$$\underline{Z}_{C \min} = \frac{\underline{V}_{L \min}^2 \cos \theta}{P_{\max}}$$

$$\underline{S}_1^{MAX} = \frac{3 \underline{V}_L^2}{\underline{Z}_1^{III}}$$

Metodologías de coordinación

- ▶ Cualquier metodología que cumpla con los requisitos mínimos es válida en la práctica:
 - ▶ $Z^{II} = 50\%$ línea más corta por el infeed
 - ▶ $Z^{III} = 150\%$ línea más corta por el infeed
- ▶ El problema principal en la coordinación de distancia es la consideración del efecto de infeed:
 - ▶ Ajuste : mínimo infeed
 - ▶ Sensibilidad : máximo infeed

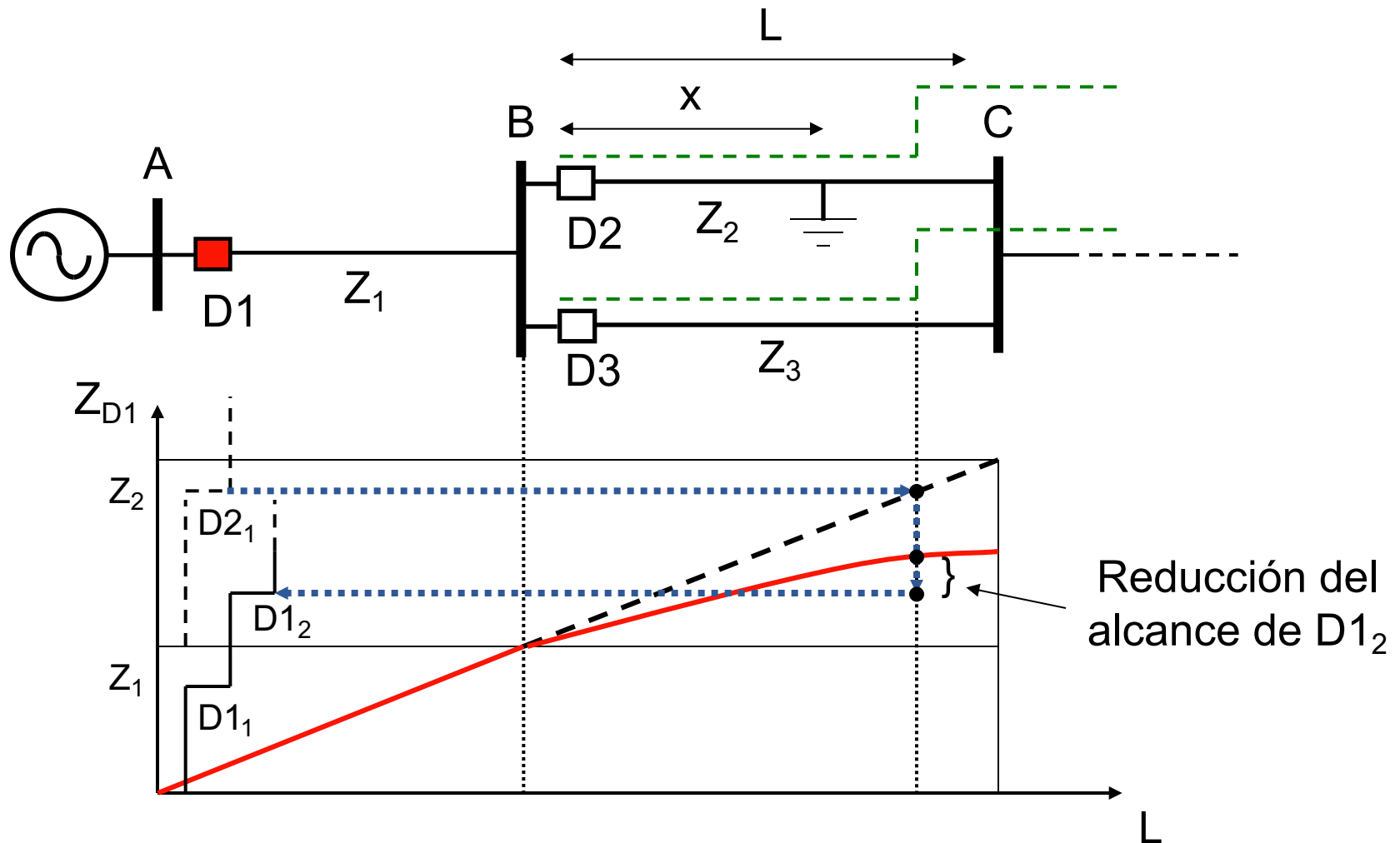
Problemas de coordinación



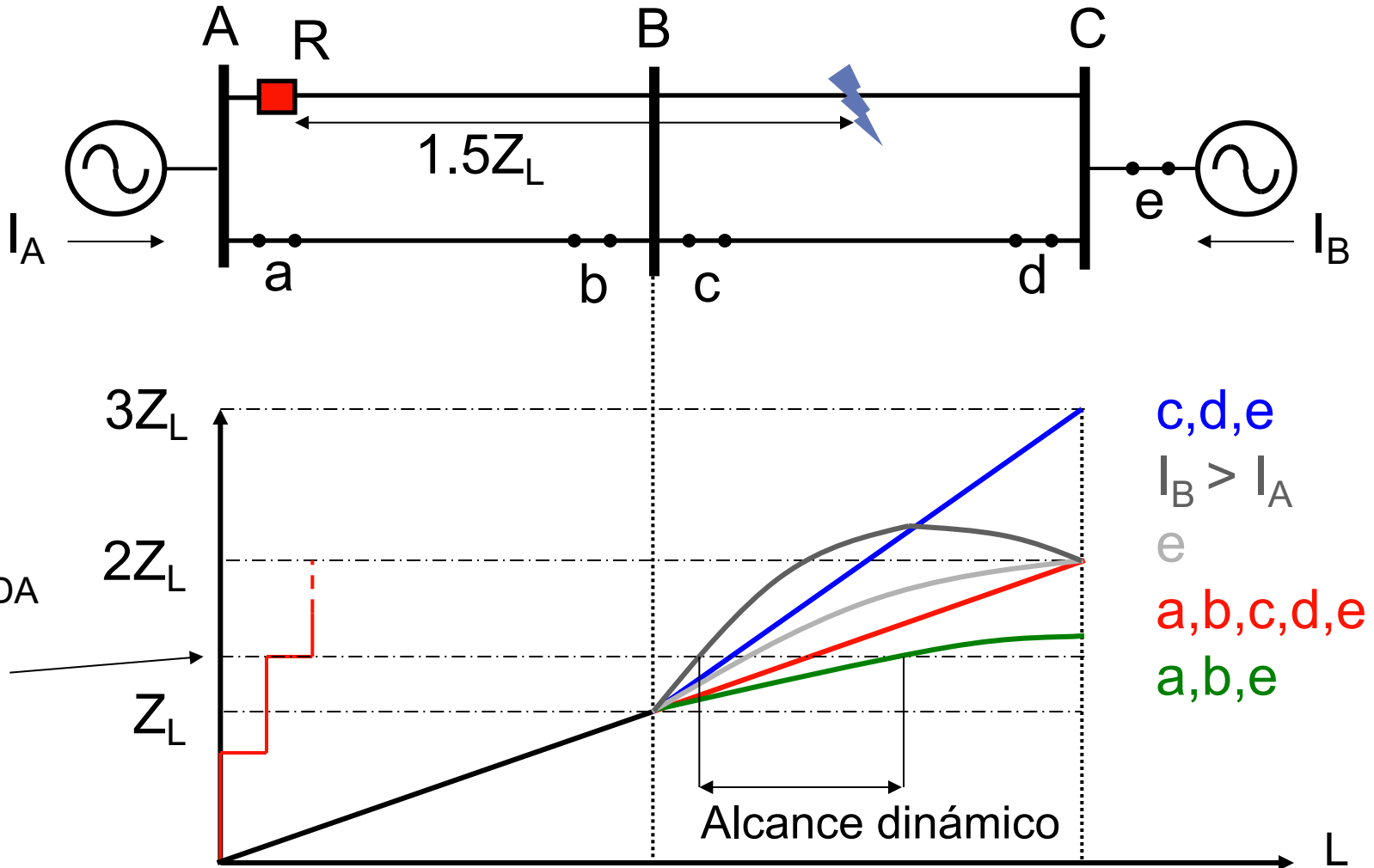
Operación de una tercera zona de protección en 400 kV (México)

- ▶ Ocurrencia de un cortocircuito.
- ▶ Protección primaria 1.
- ▶ Protección primaria 2.
- ▶ Protección de distancia (detectores de falla en un esquema piloto).
- ▶ Protección de respaldo de sobrecorriente.
- ▶ Protección de fallo de interruptor.
- ▶ Protección de respaldo remoto ($t_{op} \cong 1 \text{ seg.}$).

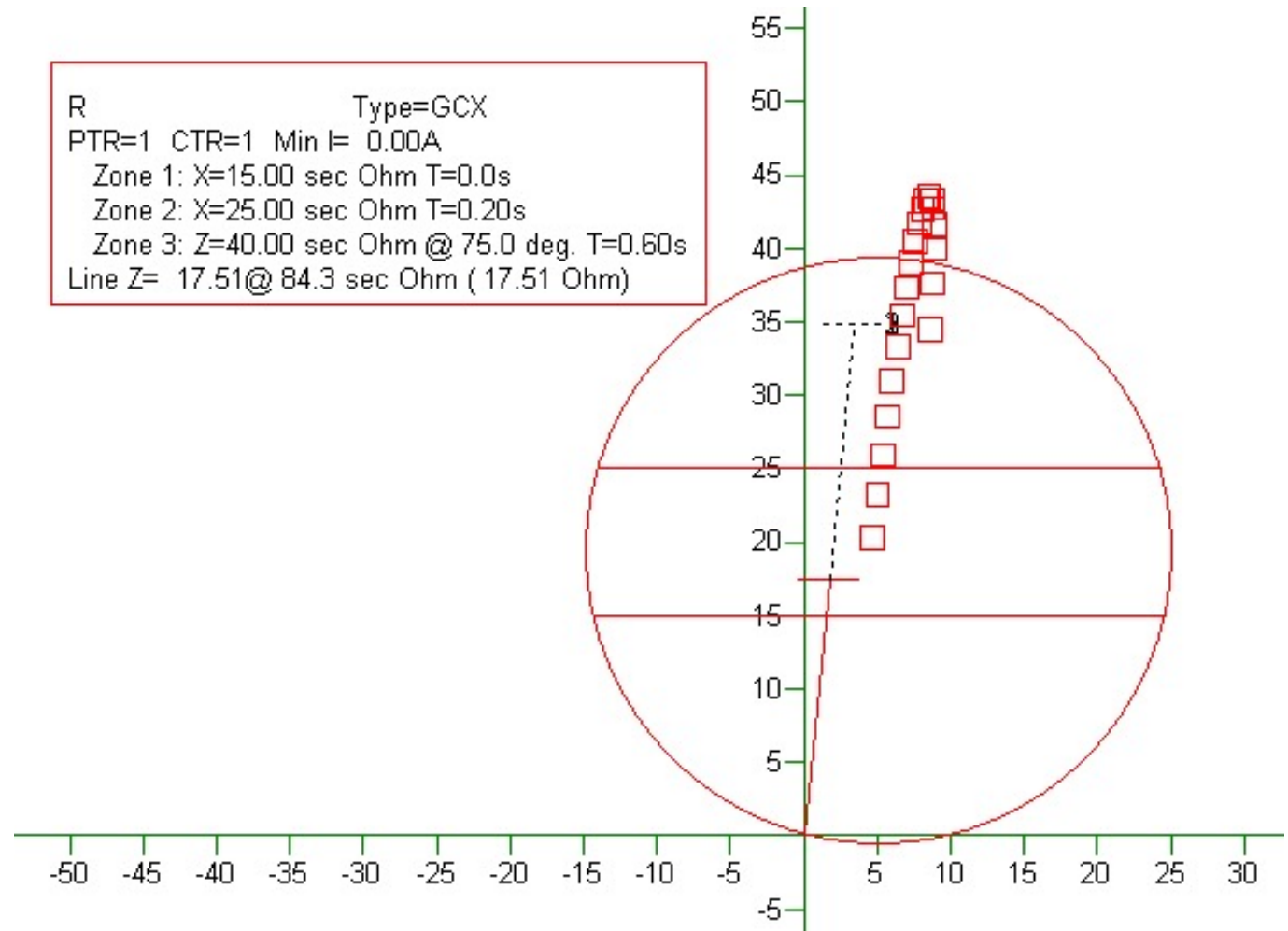
Criterios de coordinación en un circuito con líneas en paralelo



Impacto de la impedancia aparente



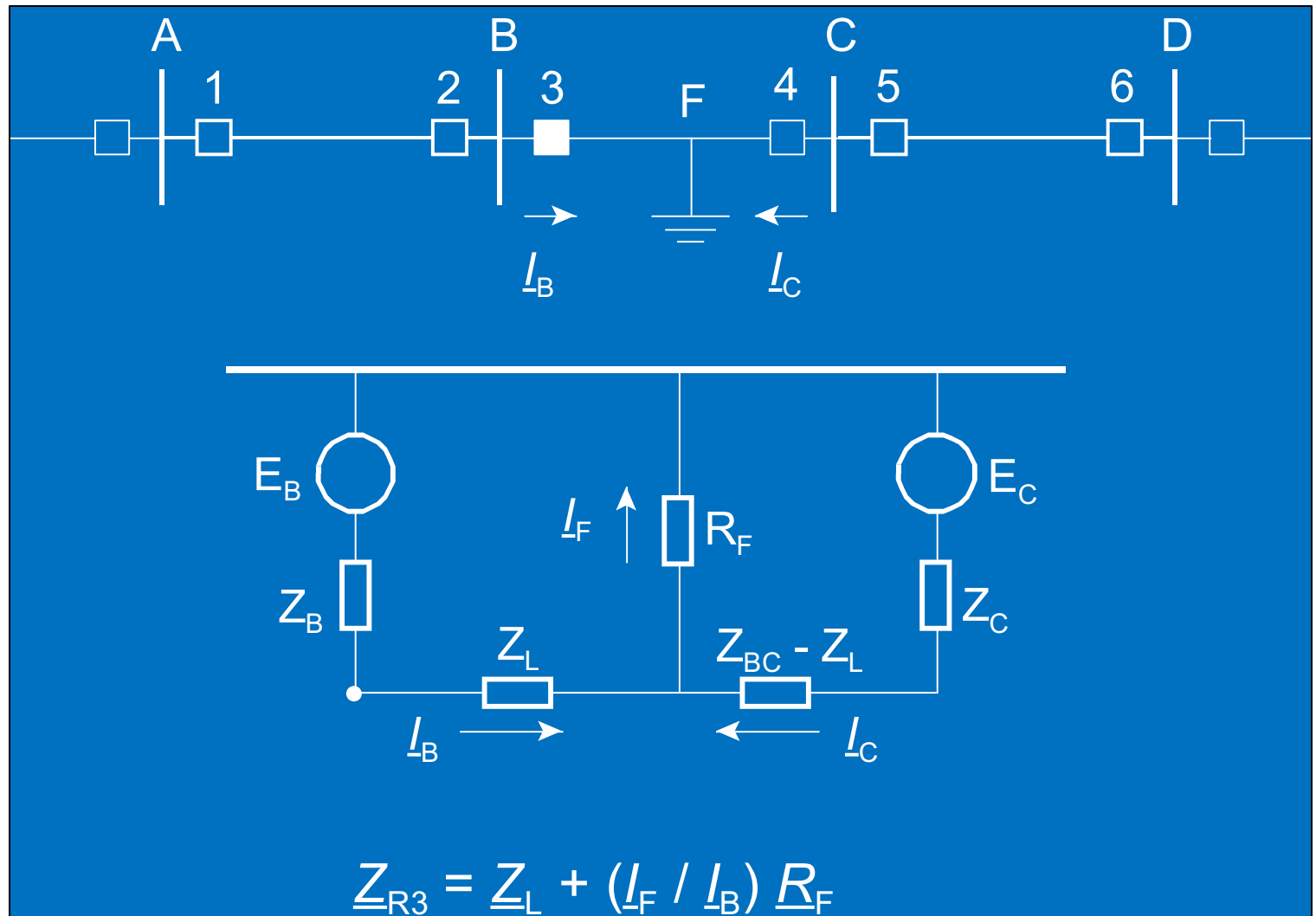
Impacto de la red en la impedancia aparente (simulación con $R_F = 0.5$ ohms)



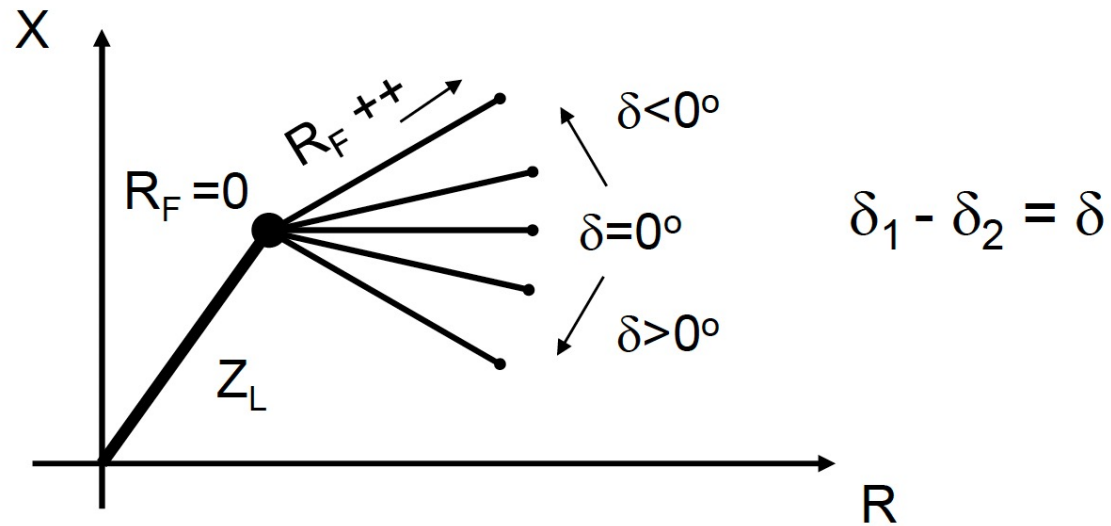
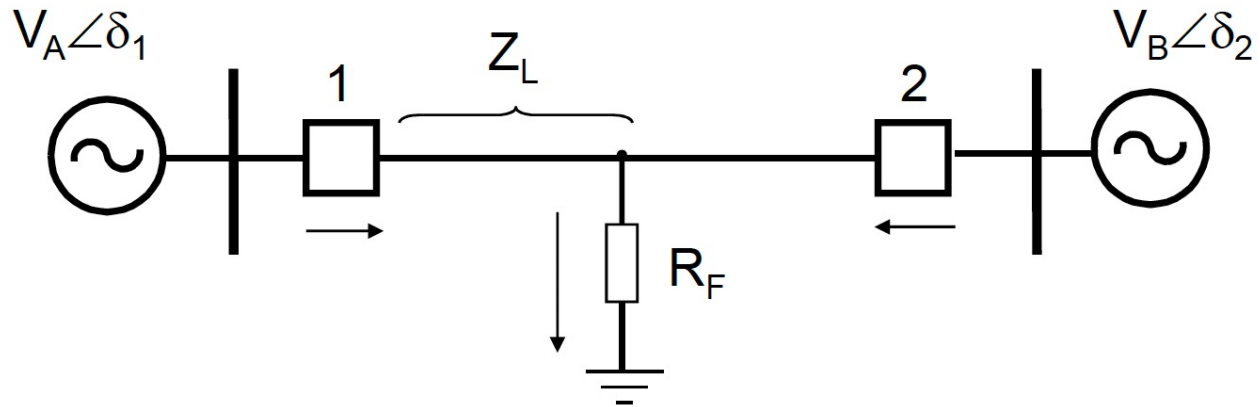
Factores que afectan la medición de impedancia

- ▶ Efecto de fuente intermedia (infeed y outfeed),
- ▶ Resistencia de falla,
- ▶ Efecto de la carga,
- ▶ Acoplamiento mutuo en líneas de transmisión,
- ▶ Inversión de corriente,
- ▶ Fallas evolutivas y múltiples,
- ▶ Fallas inter-circuitos,
- ▶ Saturación de TC y respuesta transitoria de los CCVT,
- ▶ Oscilaciones de potencia,
- ▶ Problemas de aplicación en:
 - ▶ Líneas con compensación serie,
 - ▶ Líneas con reactores en derivación,
 - ▶ Líneas multiterminales,
 - ▶ Líneas cortas.

Impacto de la resistencia de falla



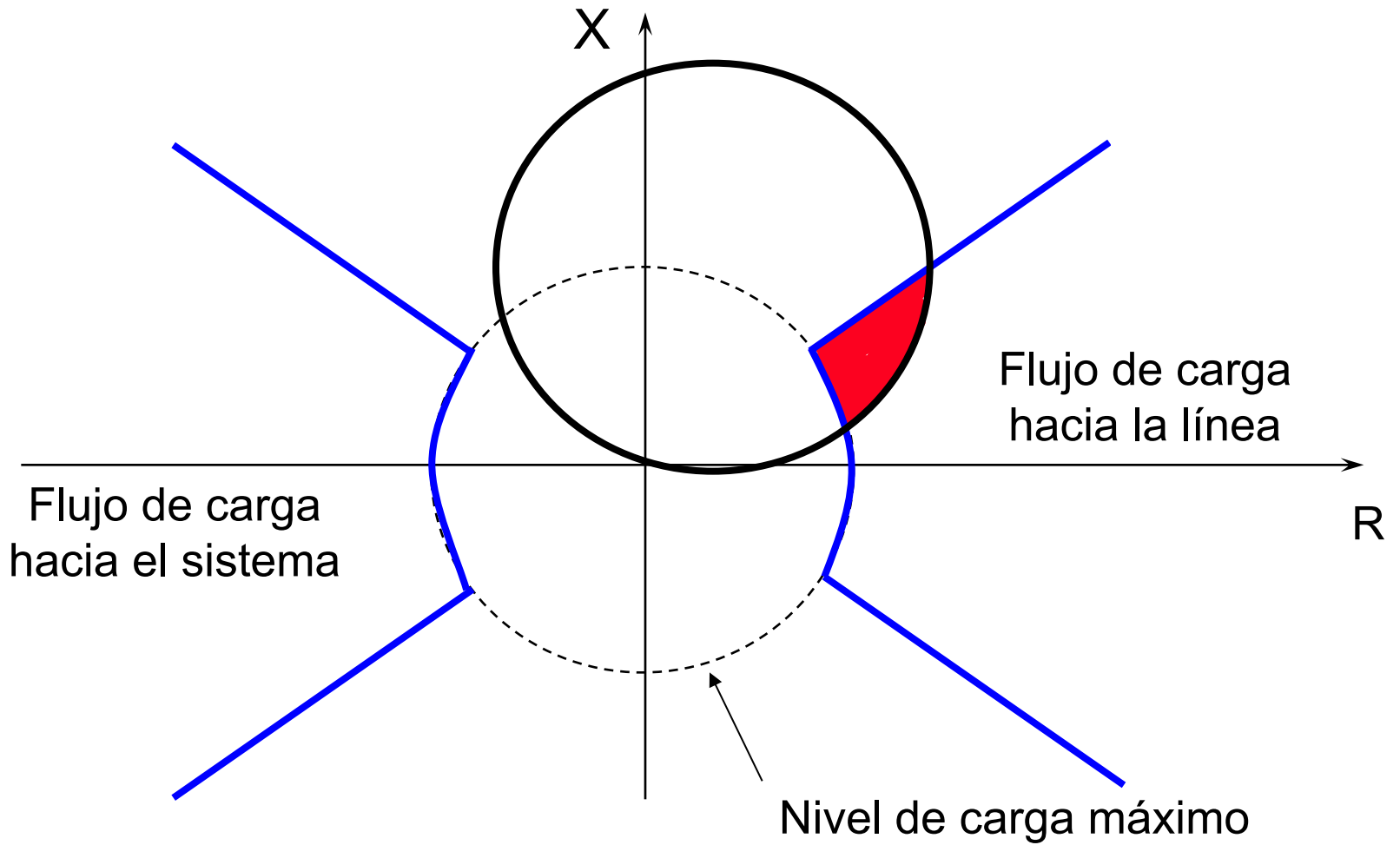
Impacto de la resistencia de falla



Impacto de la carga

- ▶ Ajustes de la tercera zona (cargabilidad del relevador).
- ▶ El incremento de la temperatura de los conductores de la línea de transmisión puede originar cortocircuitos.
- ▶ El disturbio del WSCC en 1996, y el de NY en 2003, fueron magnificados por la operación de terceras zonas por sobrecarga.

Impacto de la carga



Modelo térmico de los conductores de una línea de transmisión

- ▶ IEEE Std 738-1993, IEEE Standard for Calculating the Current Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors.
- ▶ S. E. Zocholl and A. Guzmán, "Thermal Models in Power System Protection," Proceedings of the 26th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 25–28, 1999.

$$\Delta TC = \left[\frac{I^2 \cdot [R_{ac} + (TC - 25) \cdot R_{delt}] + Q_{sun}}{THC} - \frac{TC - TA}{TRA \cdot THC} \right] \Delta T$$

$$TC_{new} = \Delta TC + TC_{old}$$



Protección de distancia

Dr. Ernesto Vázquez Martínez
Universidad Autónoma de Nuevo León, México