



Universidad Nacional del Centro del Perú
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



MATERIAL DE ENSEÑANZA

094C Protección de Sistemas de Potencia

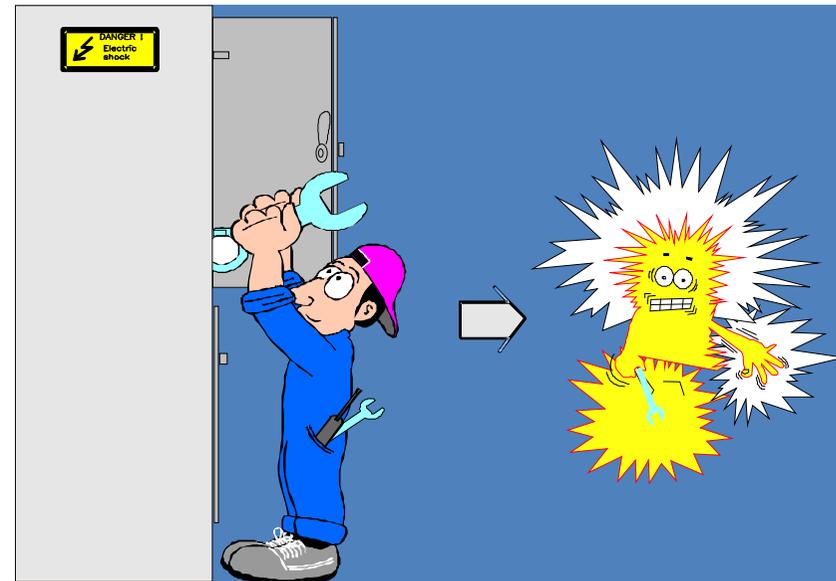
Elementos para el Diseño de los Sistemas de Protección

© Waldir Astorayme Taipe
wastorayme@hotmail.com

La Detección de las Fallas

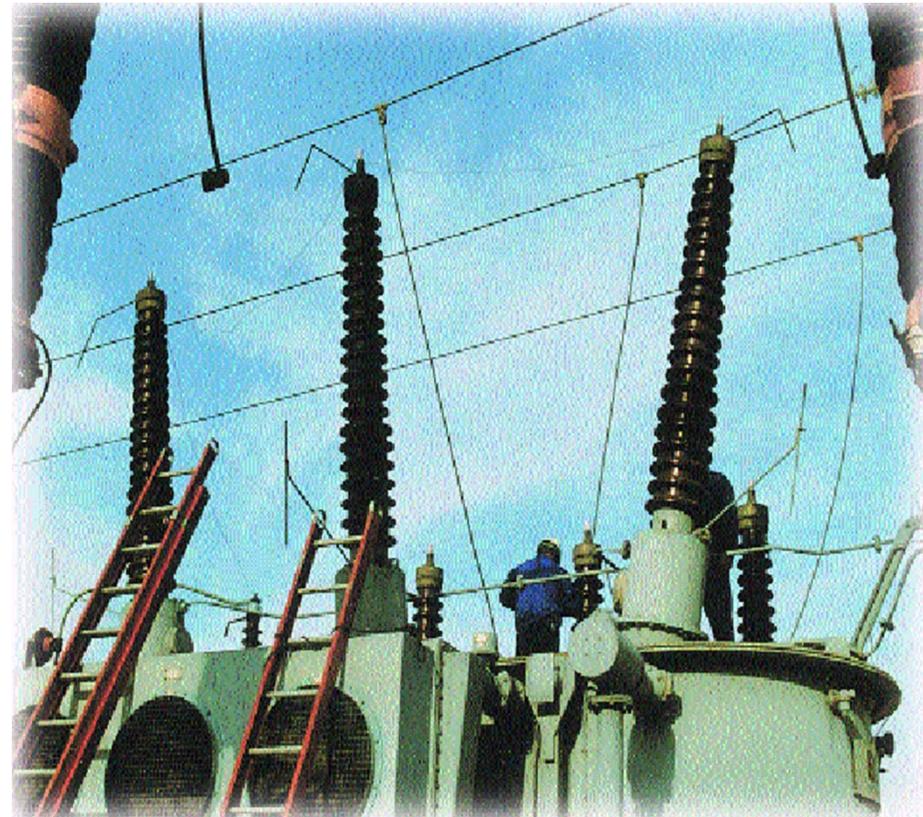
Funciones de protección del Sistema de Potencia

- Detección de las fallas.
- Desconexión de los elementos en falla.
- Indicación de las fallas.

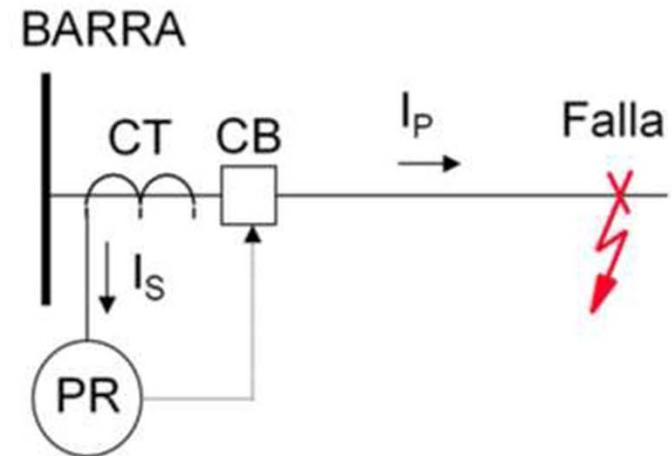
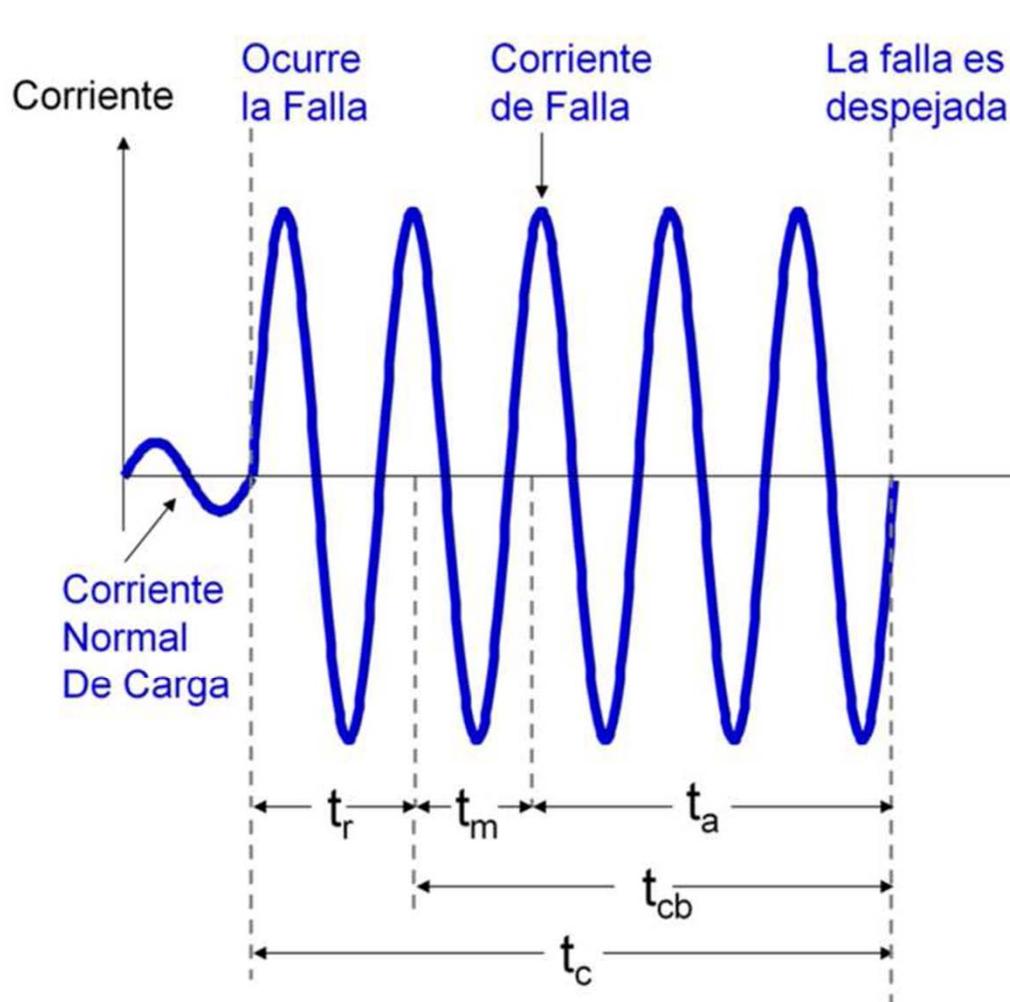


Dispositivos de Protección

- Fusibles.
- Reconectores automáticos.
- Seccionalizadores.
- Interruptores.
- Relés de protección.



Secuencia de eventos durante una falla



- t_r = tiempo del relé.
- t_a = tiempo de arco.
- t_{cb} = tiempo del interruptor.
- t_c = tiempo total de despeje.
- t_m = tiempo de actuación del mecanismo.

Los Relés de Protección

Características

Las características funcionales son:

1. El relevador debe ser **sensible** a las sobretensiones momentáneas y también a las sobrecargas momentáneas.
2. El relevador **no debe alterar su operación** por variaciones en la tensión y en la corriente.
3. El **consumo propio** de potencia del relevador debe ser tan **bajo** como sea posible.
4. **Su funcionamiento no debe ser alterado** por cambios en la configuración de la red considerados como normales como son: conexión y desconexión de cargas, entrada y salida de líneas, etc.
5. El relevador debe operar cualquiera que sea la naturaleza y situación de la falla para lo cual ha sido seleccionado.

Requisitos Básicos

La protección ideal será aquella que actúa solamente ante los disturbios para los que ha sido instalada, que los hiciera en el menor tiempo posible y que su precio fuera mínimo.

Este ideal no es fácil de conseguir, por lo que es menester valorar una serie de aspectos.

Los requisitos más destacables son:

a) Seguridad. La probabilidad de no actuación de un sistema o componente cuando no debe hacerlo.

b) Obediencia. La probabilidad de actuación de un sistema o componente cuando debe hacerlo.

- c) **Fiabilidad**. La probabilidad de que un sistema o componente actúe única y exclusivamente cuando debe hacerlo. La fiabilidad de un equipo es el producto de la seguridad y obediencia. Disponer dos relés en paralelo aumenta la obediencia y disminuye la seguridad del sistema; por el contrario, dos relés en serie aumenta la seguridad y disminuyen la obediencia.
- d) **Precisión**. La respuesta a los valores de entrada.
- e) **Rapidez**. El tiempo invertido desde la aparición de la falla hasta el momento en que cierra sus contactos el relé. El aumento de la rapidez implica una disminución de la fiabilidad.
- f) **Flexibilidad**. Para adaptarse a los cambios funcionales.

- g) **Simplicidad**. En el diseño, reduciendo al mínimo el número de funciones e interacciones.
- h) **Mantenimiento**. Reducción al mínimo de piezas sujetas a desgaste, evitando el mantenimiento periódico.
- i) **Facilidades de prueba**. Se valora que el equipo tenga incorporados dispositivos que faciliten su verificación sin que sea necesario desconectar ningún conductor para realizar las pruebas.
- j) **Autodiagnóstico**. La inclusión de funciones de autoverificación en la protección. Esta es una de las ventajas que aportan las protecciones digitales.
- k) **Modularidad**. El montaje de las protecciones en módulos enchufables posibilita la localización y reparación de las averías.
- l) **Precio**. Reducido.

Principio de operación

Es el conjunto de equipos necesarios para la detección, evaluación y eliminación de la falla.

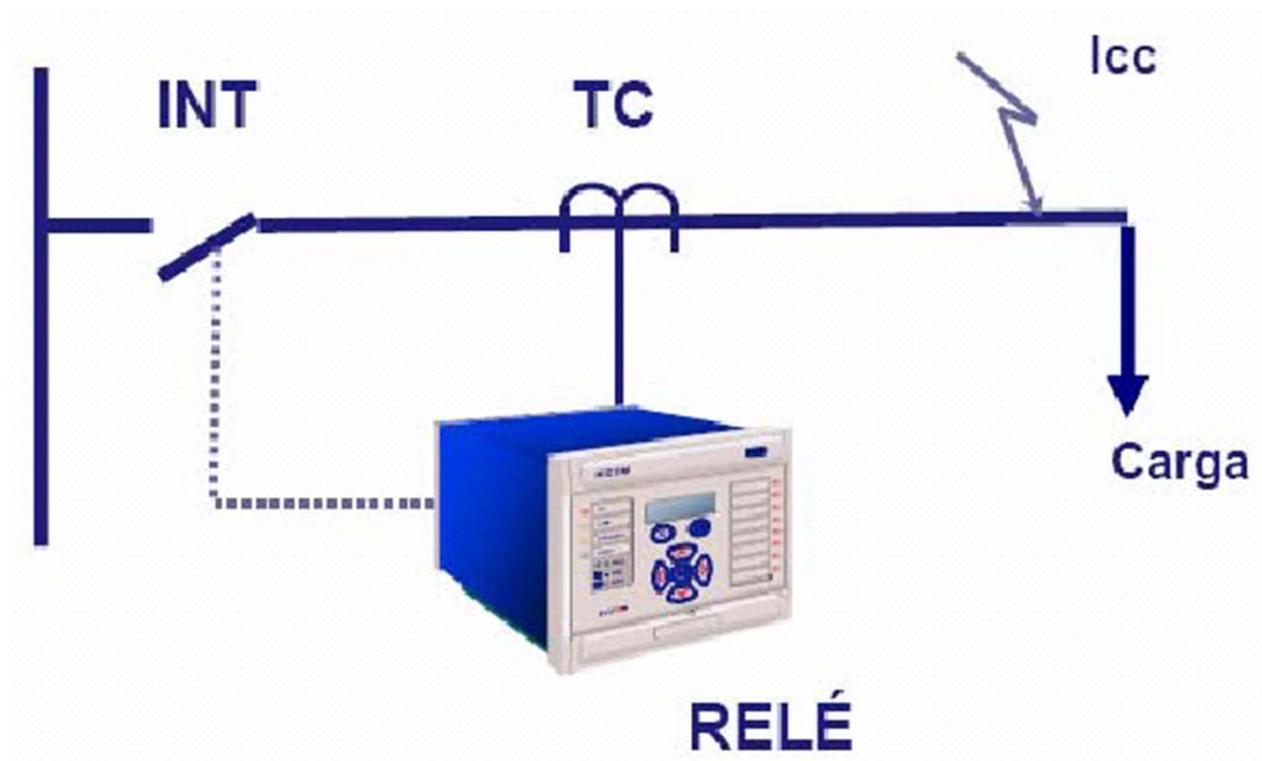


Diagrama esquemático de operación.

Principio de operación

Los relés detectan rápidamente la falla y dan la orden de disparo al interruptor de potencia.

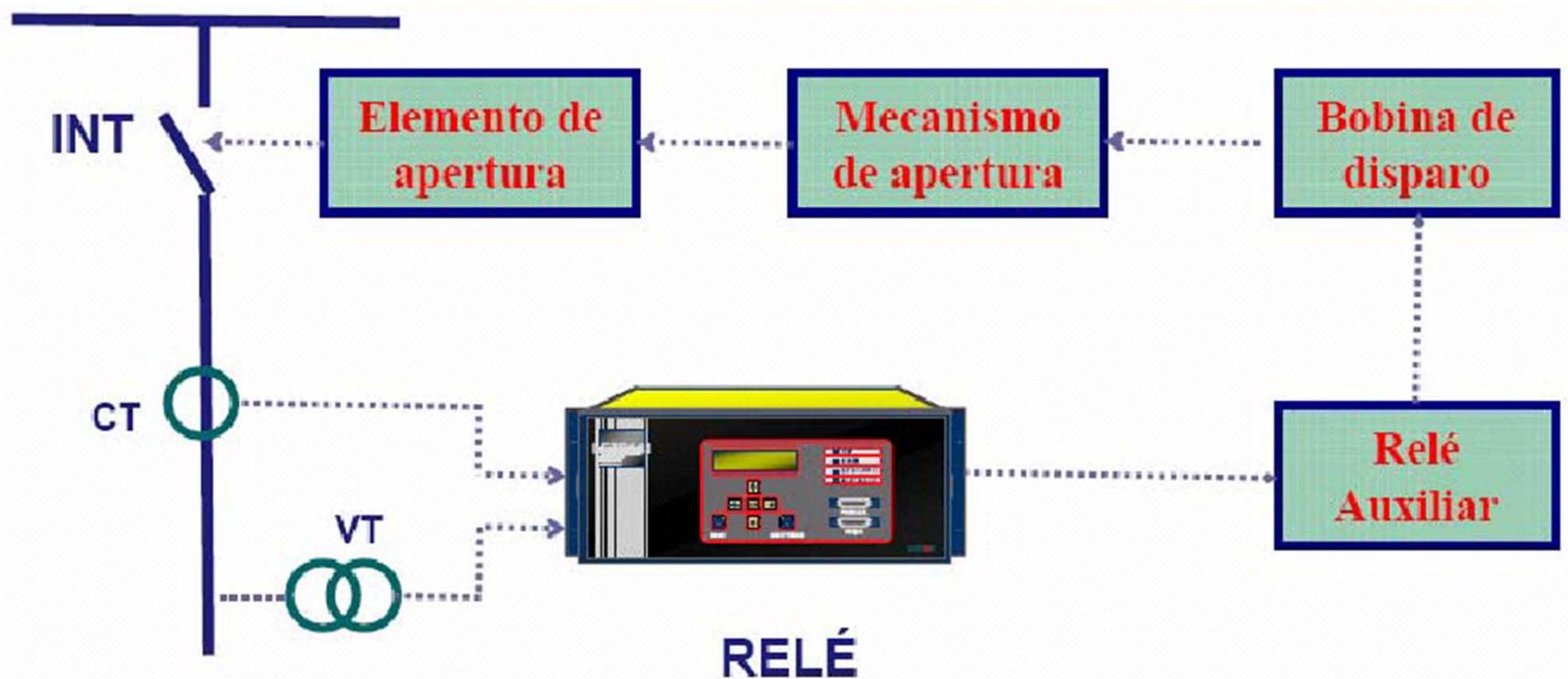


Diagrama esquemático de operación.

Diseño de Relés de Protección

- Relés Electromecánicos.
- Relés Electrónicos Analógicos.
 - Tubos de vacío y de gas.
 - Estado Sólido (Transistores, Circuitos Integrados).
- Relés Microprocesados (Digitales).

Component

	MTBM Years	MTTM Hours	MTBF Years	MTTR Hours	Place the cur
Circuit Breaker	15	10	200	24	
Combined Module	15	10	200	24	
Compact Moving Part	15	4	200	12	
Compact Fixed Contacts	100	0	6000	8	
Disconnecting Switch	5	4	200	12	

Compact isolation time h

Breaker isolation time h

Total no. of bays

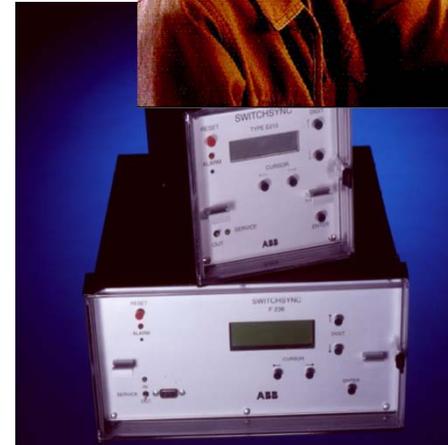
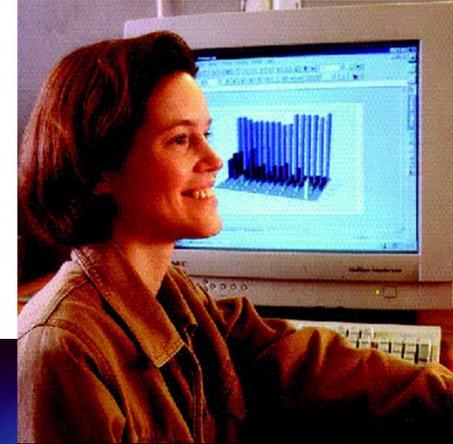
Loss of 1 throughgoing load kUSD/h

Loss of 2 throughgoing loads kUSD/h

Time period years

Relés Electromecánicos

- ❑ La investigación comenzó a fines del siglo XIX.
- ❑ La familia de relés fue completada en la década de los años de 1930.
- ❑ Aún son utilizados.



Relés Electromecánicos

- ❑ La investigación comenzó a fines del siglo XIX.
- ❑ La familia de relés fue completada en la década de los años de 1930.
- ❑ Aún son utilizados.



Relés Electrónicos Analógicos (Tubos de vacío y de gas)

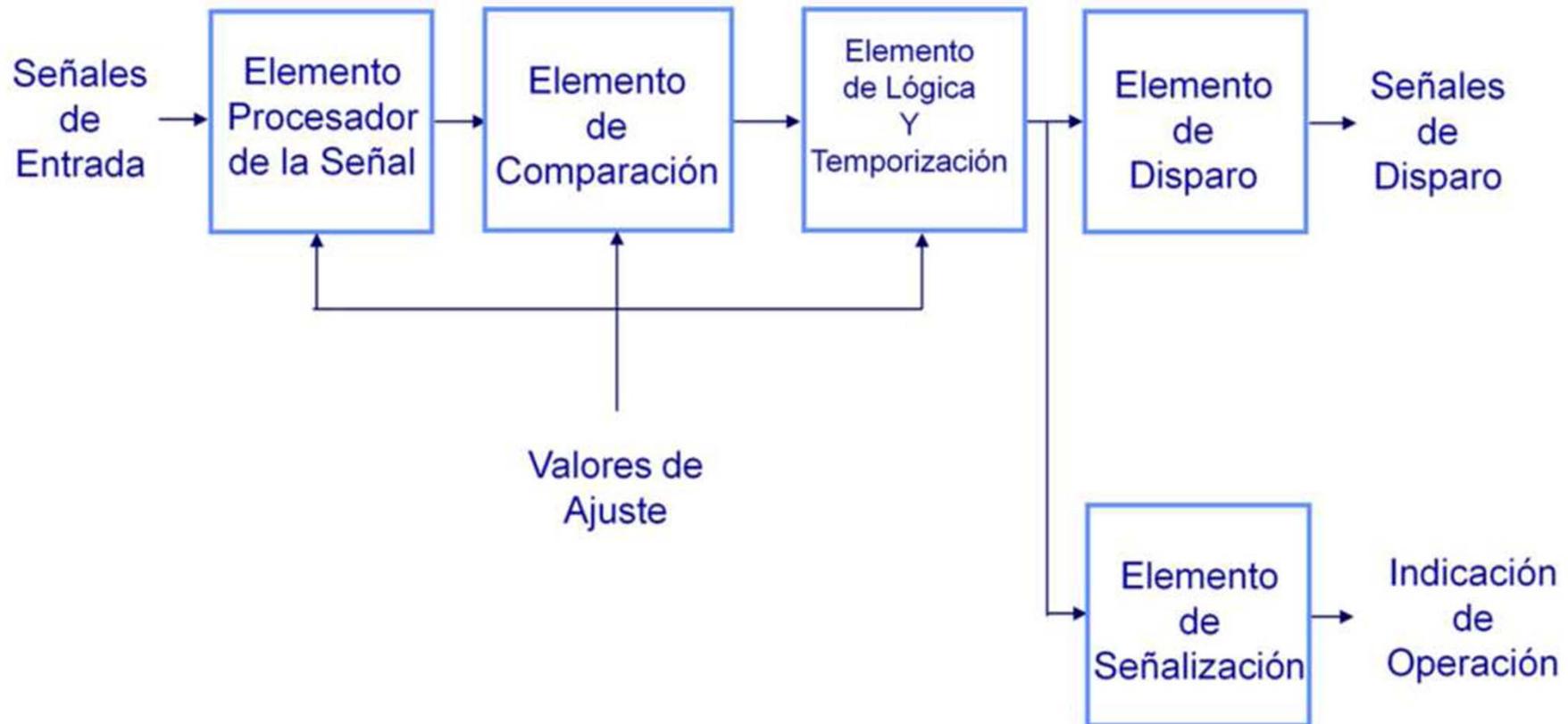
- ❑ La investigación comenzó en la década de los años de 1930.
- ❑ Un relé comercial apareció en el año de 1948.
- ❑ Baja confiabilidad.



Relés de Estado Sólido

- La investigación comenzó en la década de los años de 1940.
- Los primeros productos comerciales aparecieron a fines de la década del año de 1950.
- Desarrollo completo en la década de 1960.
- Ventajas sobre los relés electromecánicos.

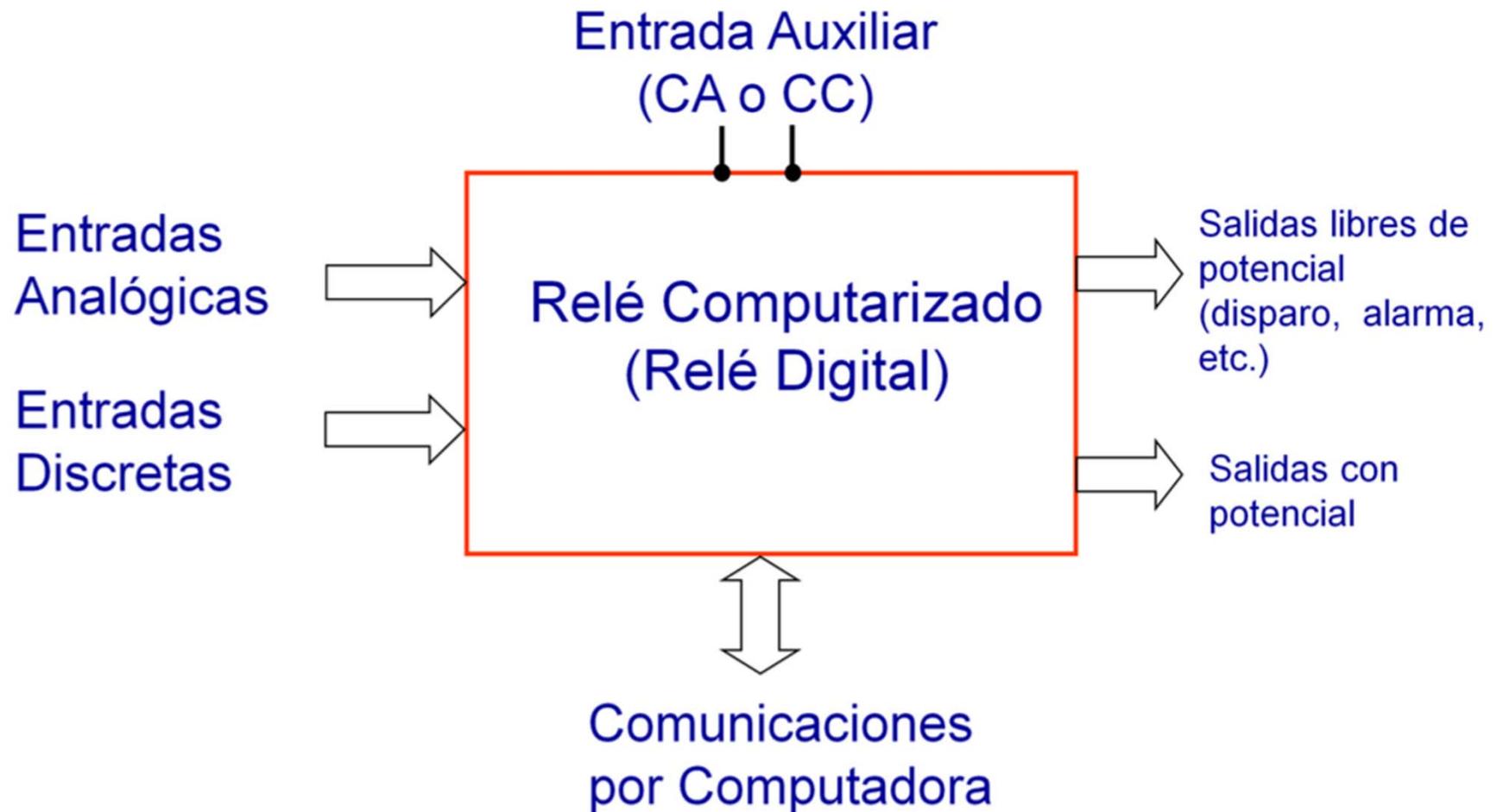
Arquitectura del Relé Analógico



Relés Digitales

- La investigación comenzó en la década de los años de 1960.
- Desarrollos básicos: Comienzos de la década de los años de 1970.
- Una solución técnica y económica: El Microprocesador.
- Relés comerciales: Comienzos de la década de los años de 1980.

Esquema de entrada / salida de un Relé Digital



Ventajas de los Relés Digitales

- Bajo Costo.
- Multifuncionalidad.
 - Protección y control.
 - Medición.
 - Registro de fallas.
 - Capacidad de comunicación.
- Compatibilidad con los sistemas digitales integrados.
- Alta confiabilidad.
 - Relés (integración, auto-chequeo).
 - Sistema de protección (supervisado por los relés).

Ventajas de los Relés Digitales

Sensibilidad y selectividad.

- Nuevos principios de Protección.
- Nuevas características operativas de los Relés.

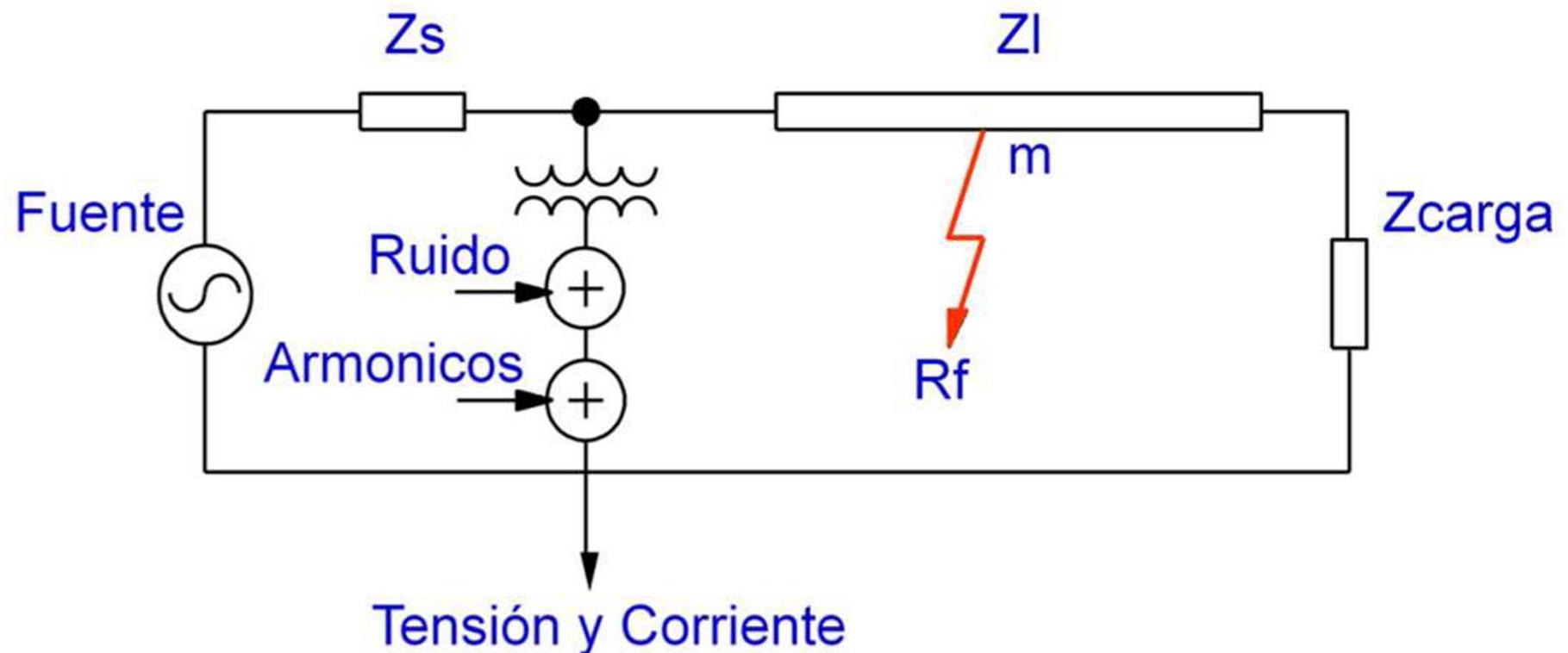
Libre de mantenimiento.

Consumo reducido en TCs y TPs.

Protección adaptativa.

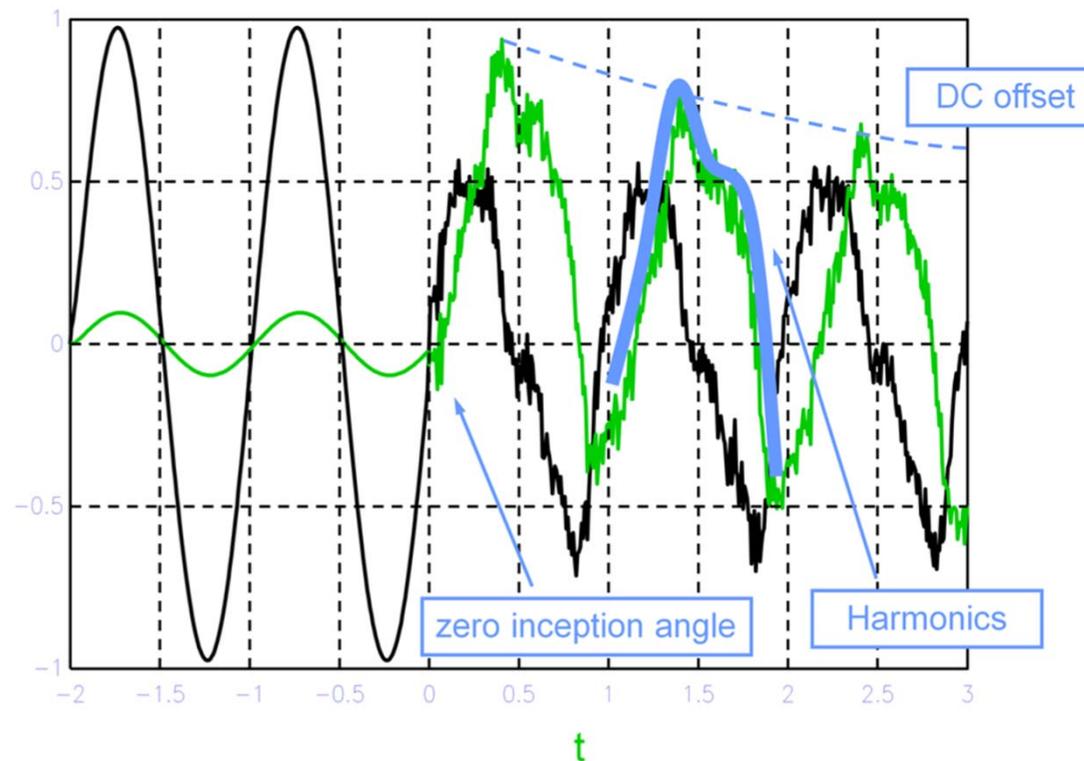
Modelo del Sistema de Potencia

El modelo de sistema de potencia debe poseer una forma de inyectar ruido y armónicos a las señales del filtro para poder comparar la actuación de las distintas técnicas de filtrado.



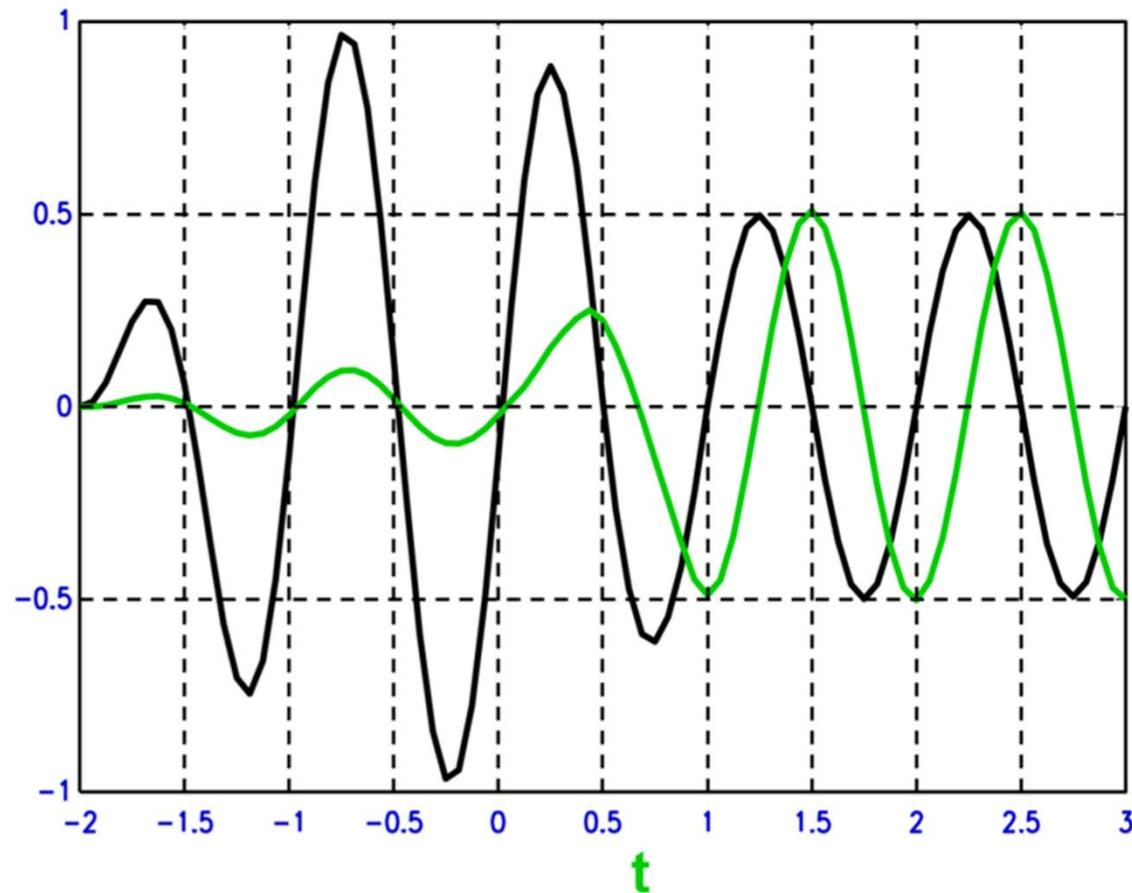
Tensión y Corriente

Conjunto de ondas de tensión y de corriente generadas por el modelo de sistema de potencia ilustrado en la diapositiva anterior. Las ondas (y su forma) son el resultado de una falla en el modelo de sistema de potencia ubicada en el extremo de la línea y que no tiene resistencia de falla.



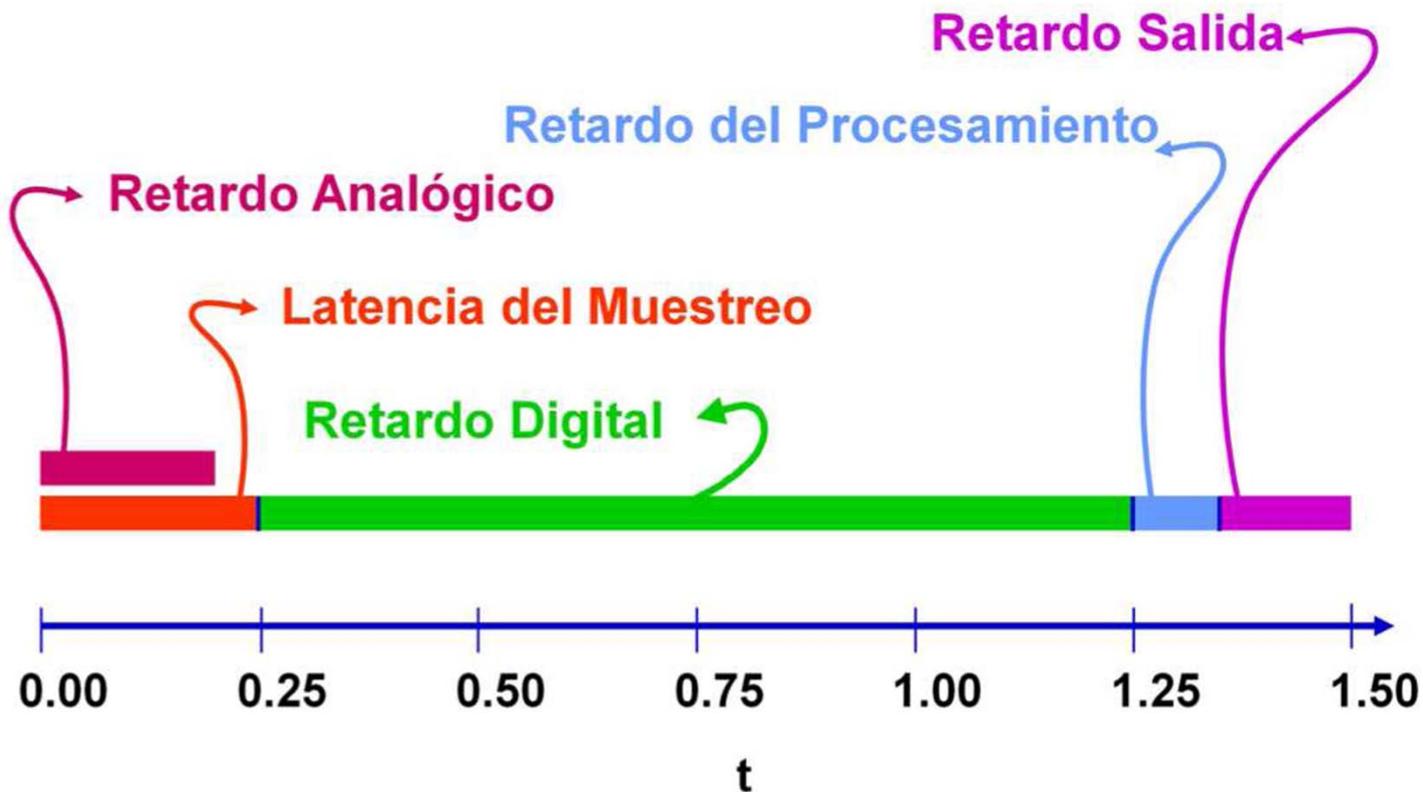
Tensión y Corriente Filtradas

Las cantidades filtradas deben verse limpias de armónicos, desplazamiento de CC o ruido. El análisis de estas cantidades producirá fasores de corriente y de tensión apropiados.



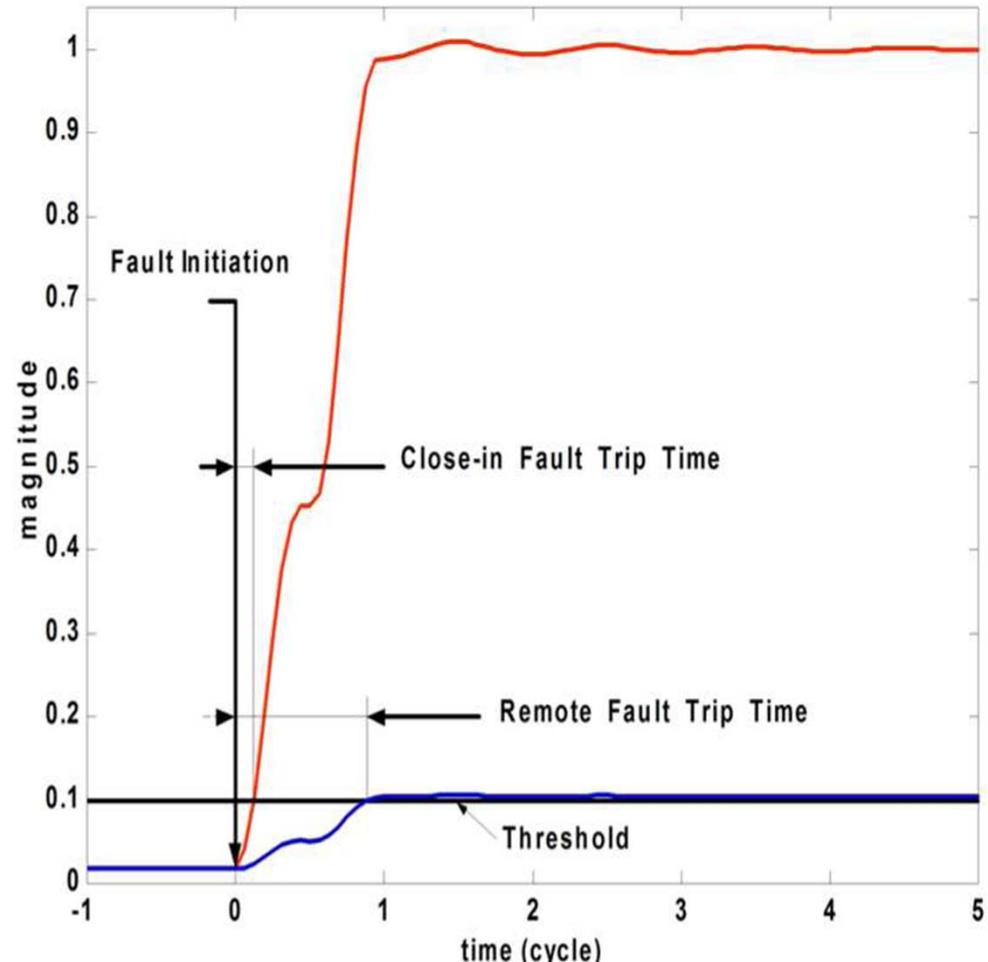
¿Qué es lo que retarda la operación de un Relé?

El gráfico ilustra el efecto de todos los factores que inciden sobre el tiempo. Nótese que el filtro digital es el más influyente en la velocidad del relé.



Velocidad de operación del Relé vs. Falla

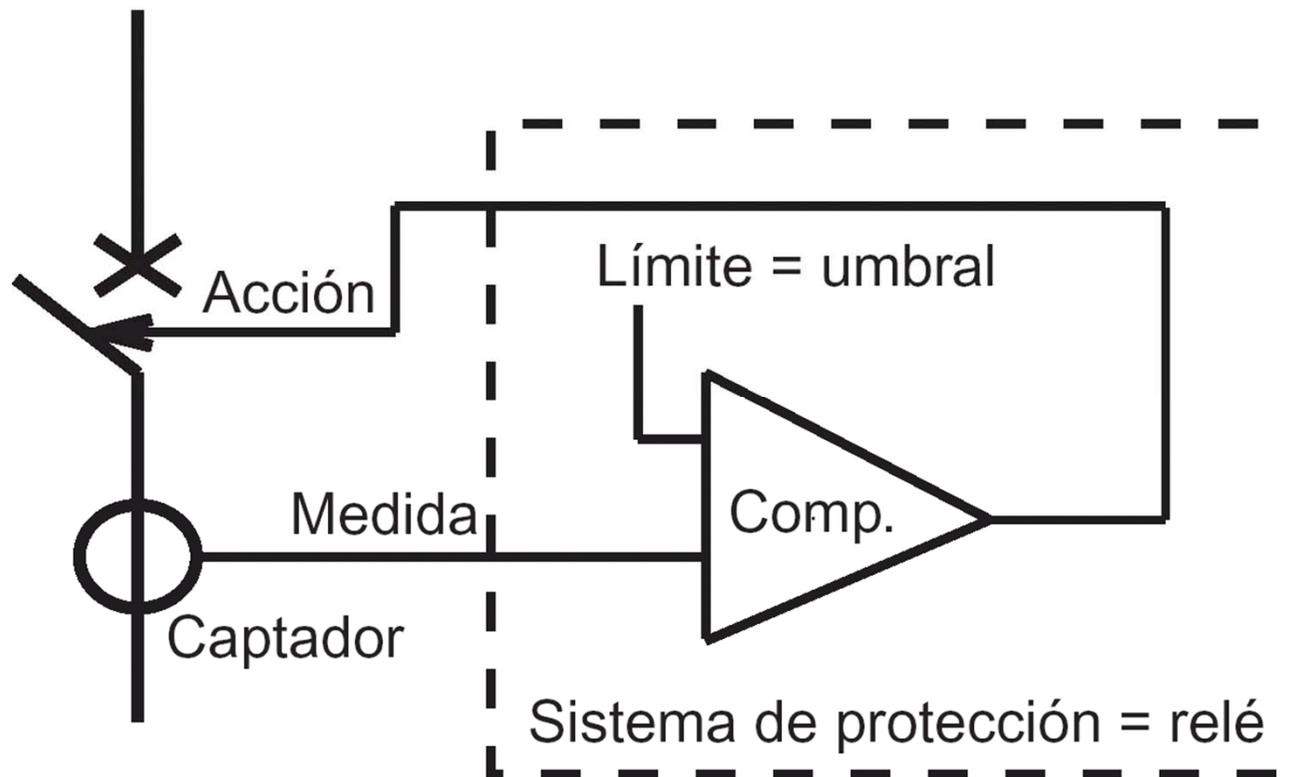
Uno de los factores que más afectan a la velocidad de operación del relé es la ubicación de la falla. El umbral del torque de disparo es indicado por una línea horizontal de magnitud por unidad igual a 0,1. Al producirse una falla cercana, puede verse que el desarrollo del torque para ese tipo de falla es mucho más pronunciado y el tiempo de disparo es mucho menor.



Características y Funcionabilidad de los Relés de Protección

Relés Indirectos

Los relés de protección son dispositivos que deciden una acción, generalmente la apertura de un interruptor automático.



Relés Indirectos

La función principal de los relevadores es determinar lo más pronto posible la existencia de un cortocircuito en el sistema por lo que la mayoría de los relevadores operan en más o menos de un ciclo de la frecuencia del sistema (17mseg a 60Hz).

Los relevadores deben ser selectivos en su operación, deben aislar aquellas partes del sistema en falla, minimizando el número de elementos que se desconectan de la red.

Relés Indirectos

Requisitos:

RAPIDEZ

EL TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA DEBE SER LOS MAS REDUCIDO POSIBLE, DE TAL FORMA DE REDUCIR LOS EFECTOS DEL CORTOCIRCUITO Y MANTENER LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELECTRICO.

SENSIBILIDAD

EL SISTEMA DE PROTECCIONES DEBE SER CAPAZ DE DETECTAR FALLAS EN CONDICIONES DE MINIMA GENERACION, CONDICION DE OPERACIÓN DEL SISTEMA ELECTRICO EN EL QUE CIRCULA LA MINIMA CORRIENTE DE FALLA.

SELECTIVIDAD

SIGNIFICA QUE SOLAMENTE EL COMPONENTE DEL SISTEMA ELECTRICO QUE TENGA LA FALLA SEA DESCONECTADO.

FIABILIDAD

OBEDIENCIA: OPERAR CORRECTAMENTE CUANDO SEA REQUERIDO.

SEGURIDAD: NO OPERAR ANTE CAUSAS EXTRAÑAS.

Relés de Sobrecorriente

Relés de Sobrecorriente

Los relés de sobrecorriente pueden ser instantáneos (50, 50N), o pueden tener un tiempo de retardo intencional (51, 51N) para respaldo de la protección.

Hay dos tipos de relés de sobrecorriente con tiempo de retardo.

En los relés de tiempo definido, el tiempo de operación es fijo.

En los relés de tiempo inverso, el tiempo de operación disminuye en tanto la corriente del relé aumenta.

Hay un comportamiento adaptativo implícito en los elementos de tiempo inverso: operan más rápidamente ante fallas cercanas o de mayor corriente.

Tipos de Relés de Sobrecorriente

Basado en la características del tiempo de operación

- Instantáneo (50).
- Tiempo Definido (51 ó 50).
- Inverso (51).
- Mixto (50 – 51).



Ajuste del Relé de Sobrecorriente

El proceso para determinar el ajuste del tiempo de actuación del relé involucra: 1) El cálculo de un valor del tiempo de retardo en elementos de tiempo definido; y 2) Selección de una curva de tiempo/corriente para los elementos de tiempo inverso, de entre una familia de curvas.

Elementos del 51.

- Ajuste de arranque.
- Ajuste del tiempo de retardo.
 - Tiempo definido: Ajuste de tiempo.
 - Tiempo inverso: Selección de curva.

Elementos del 50: Ajuste de arranque.

Elementos de Sobrecorriente Instantáneos (50)

Características de los elementos 50 Electromecánicos

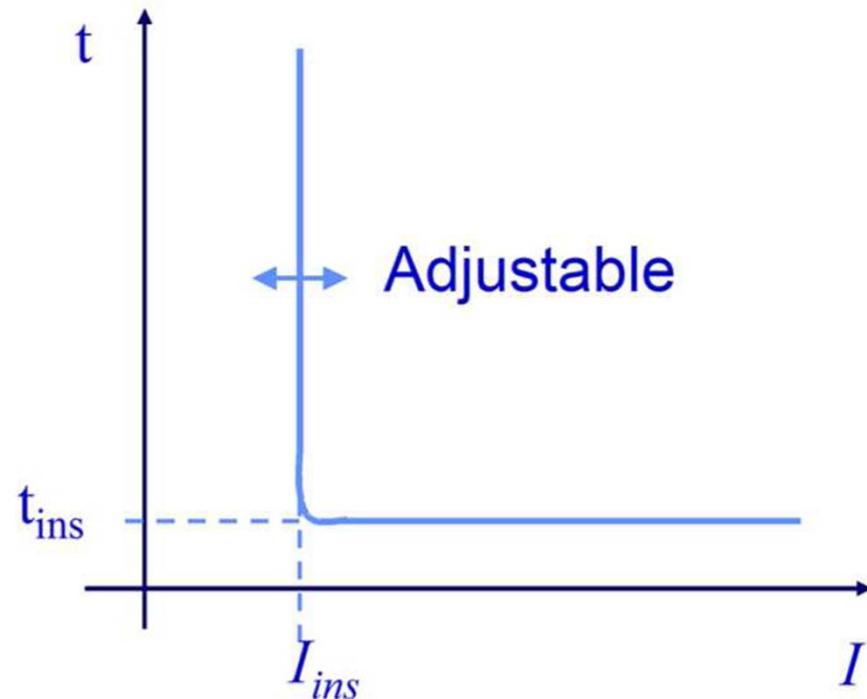
- Adecuados para sistemas de CA y CC.
- Tiempos de operación menor a 3 ciclos.
- Torque variable en el tiempo: vibración.
- Baja relación Reset (Rearme) / Arranque.
- Afectados por el desplazamiento de CC.
- Sobre-alcance o rebasamiento.

Curva de tipo Instantáneo (50)

El relé de sobrecorriente instantáneo cierra sus contactos muy rápidamente, una vez superado el umbral de corriente. En el campo de la protección, “instantáneo” significa “sin demora intencional”. Estos relés están diseñados para operar con la máxima velocidad que brinda la tecnología. El tiempo de operación es de 0,5 y 1,5 ciclos.

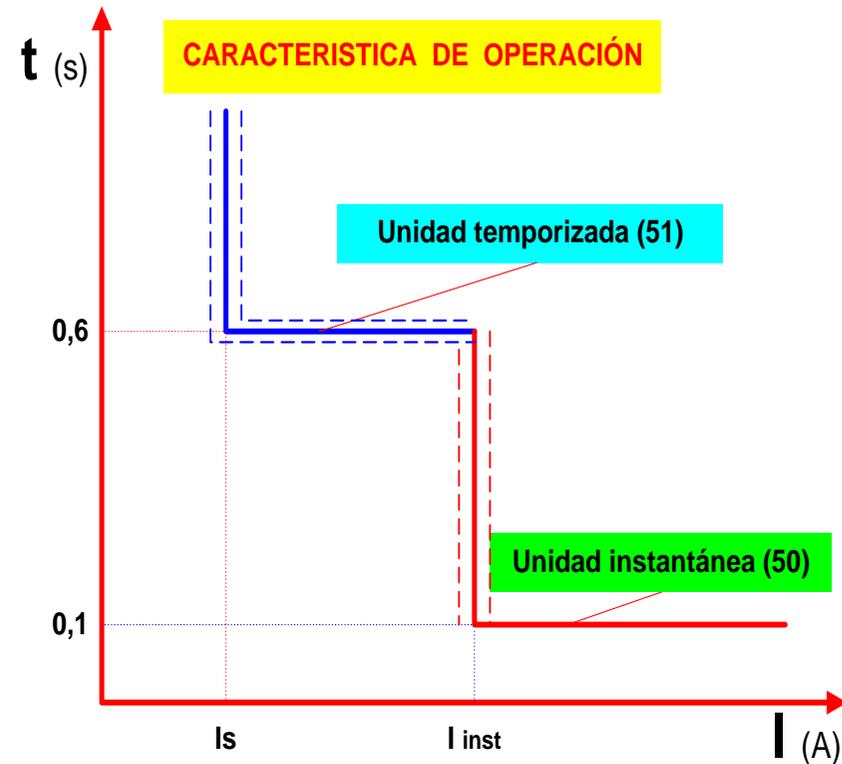
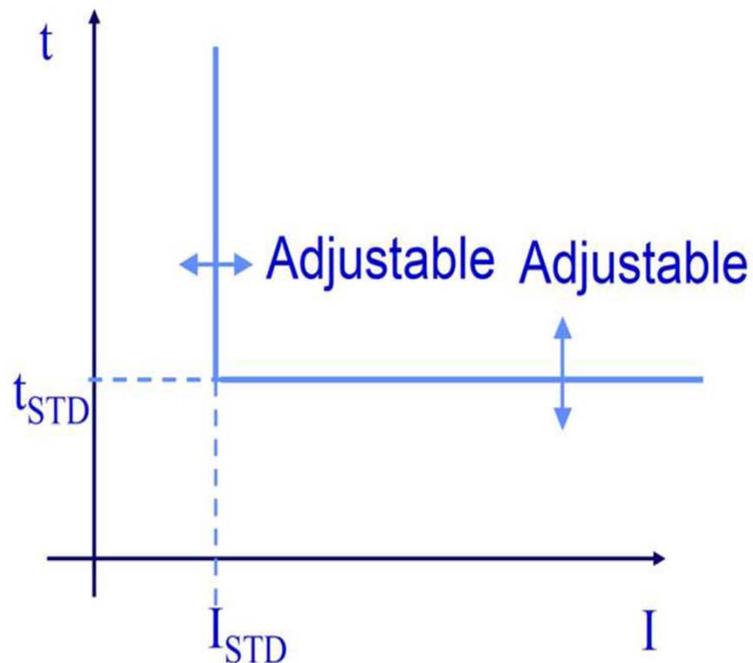
La corriente de arranque (su umbral) es ajustable y el usuario puede elegir el ajuste dentro de un rango relativamente extenso.

Time $t_{ins} < 1.5$ cycles



Curva de tipo de Tiempo Definido (50 ó 51)

Opera con algún retardo, es ajustable (así como el umbral de corriente). En un relé de tiempo definido bien diseñado, el tiempo de operación será siempre el mismo, independientemente del valor de la corriente.



Características del relé de tiempo definido

- ❑ Un relé de este tipo operará siempre en el mismo tiempo, para todo valor de sobre- intensidad superior al valor de calibración.
- ❑ Si no incluye retardo en la actuación, se trata de un relé de característica instantánea (50).
- ❑ Se aplican en mayoría a los alimentadores radiales.

Ventajas de los elementos 50 Digitales

- Sin vibración.
- El filtro digital rechaza el desplazamiento de CC:
No hay sobre-alcance.
- La relación Reset / Arranque es igual a 1.
- Facilita el cumplimiento de los criterios de selectividad.
- El tiempo de operación es más preciso ya que es independiente, lo cual permite una graduación más precisa de los tiempos entre los interruptores sucesivos.
- Otras ventajas generales, propias de los relés digitales.

Desventajas del relé de tiempo definido

- ❑ Al aumentar el número de relés conectados en serie, aumenta hacia la fuente el tiempo de operación. En consecuencia, las fallas más severas, se aíslan en mayores tiempos.
- ❑ Por lo tanto se debe tener especial cuidado en que los tiempos de operación de la protección no sean demasiados prolongados.



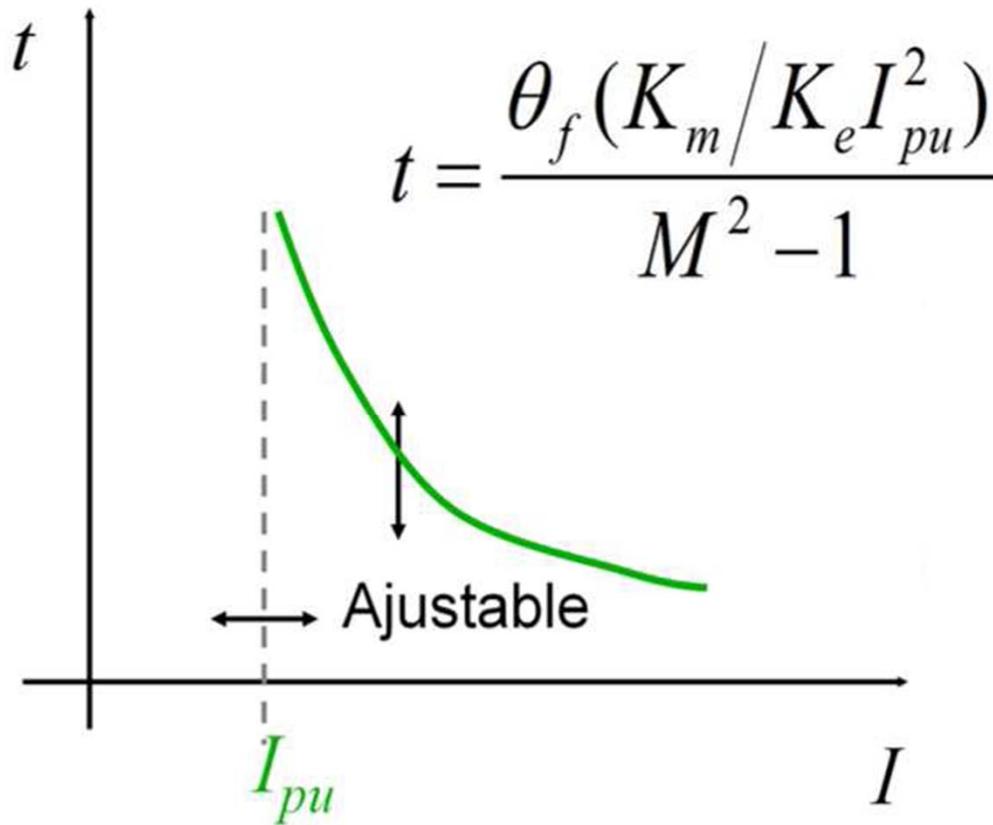
Elementos de Sobrecorriente de Tiempo Inverso (51)

Características del principio de inducción

- Adecuados para sistemas de CA.
- El torque no varía con el tiempo: No hay vibración.
- Rechazo natural al desplazamiento de CC: Bajo sobre-alcance o rebasamiento.

Tiempo de operación del relé a disco de inducción

Ajuste de la curva de tiempo



- El desplazamiento del contacto móvil θ_f es ajustable.
- El dial temporizador ajusta el ángulo del desplazamiento total.

Tiempo de operación del relé

Primera Aproximación

Esta es la expresión simplificada para aproximar el tiempo de operación del relé.

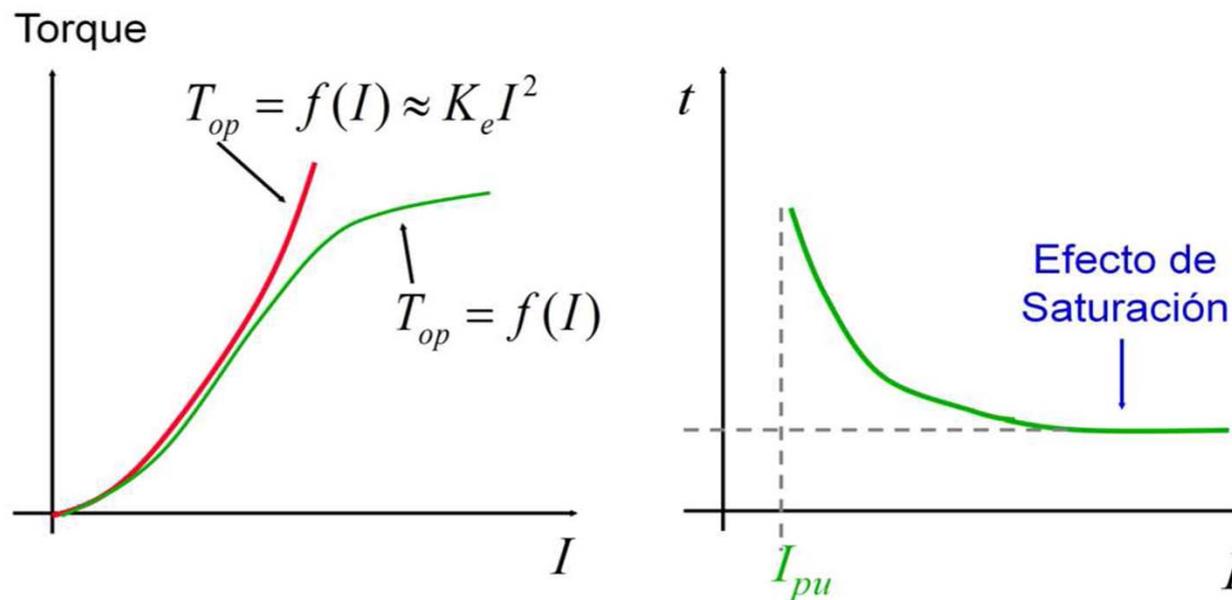
$$t = \frac{\theta_f (K_m / K_e I_{pu}^2)}{M^2 - 1}$$

Se define: $TD \cdot A = \theta_f (K_m / K_e I_{pu}^2)$

$$t = TD \frac{A}{M^2 - 1}$$

Saturación del núcleo de hierro

El núcleo de hierro demuestra un comportamiento no lineal. Para corrientes mayores, el torque no es proporcional al cuadrado de la magnitud de la corriente y de hecho el núcleo se satura. Esto no incrementa la velocidad del disco y por consiguiente, da por resultado un límite más bajo para el tiempo de operación del relé. La curva tiempo/corriente se vuelve “plana” para grandes corrientes.



Efecto de la Saturación

Considerando en expresiones aproximadas

Las ecuaciones muestran un método para considerar la saturación, la cual funciona bien en muchos casos.

Sin considerar la saturación:

$$t = TD \frac{A}{M^2 - 1}$$

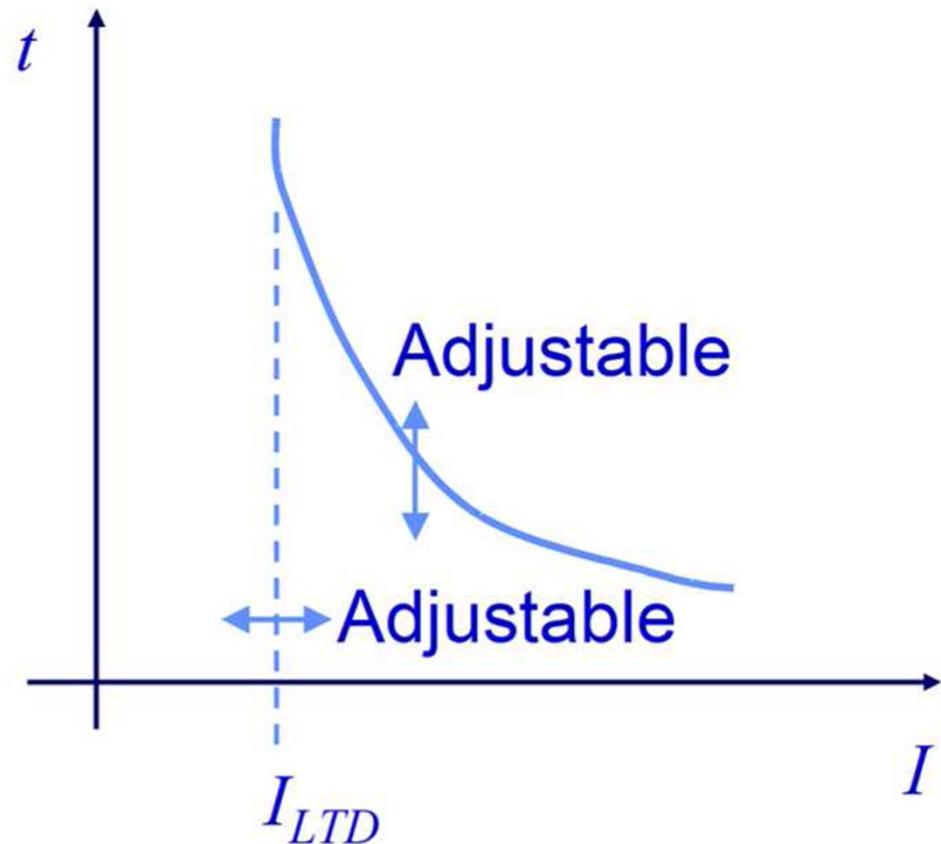
Considerando la saturación:

$$t = TD \left[\frac{A}{M^P - 1} + B \right]$$

Curva de Tipo Inverso (51)

Tiene una propiedad exclusiva: el tiempo de operación del relé disminuye cuando la corriente aumenta. Este comportamiento coordina bien con la curva de daño del equipamiento eléctrico.

Las características de tiempo inverso pueden aplicarse en todo tipo de sistemas radiales, especialmente aquellos con fusibles y reconectadores (re-enganchadores) automáticos.



Resumen de los ajustes del elemento de inducción 51

Se resume los ajustes típicos de los elementos de sobrecorriente de inducción de tiempo inverso. Seleccionamos una derivación en la corriente de la bobina del relé para ajustar la corriente de arranque. Esto determina el valor de la constante K_e en la ecuación de la corriente de arranque. Controlando la posición inicial del disco, definimos el tiempo de retardo para cada valor de corriente.

Ajuste de la corriente de arranque.

- Derivaciones de la bobina de corriente del relé.

Ajuste de la curva Tiempo / Corriente.

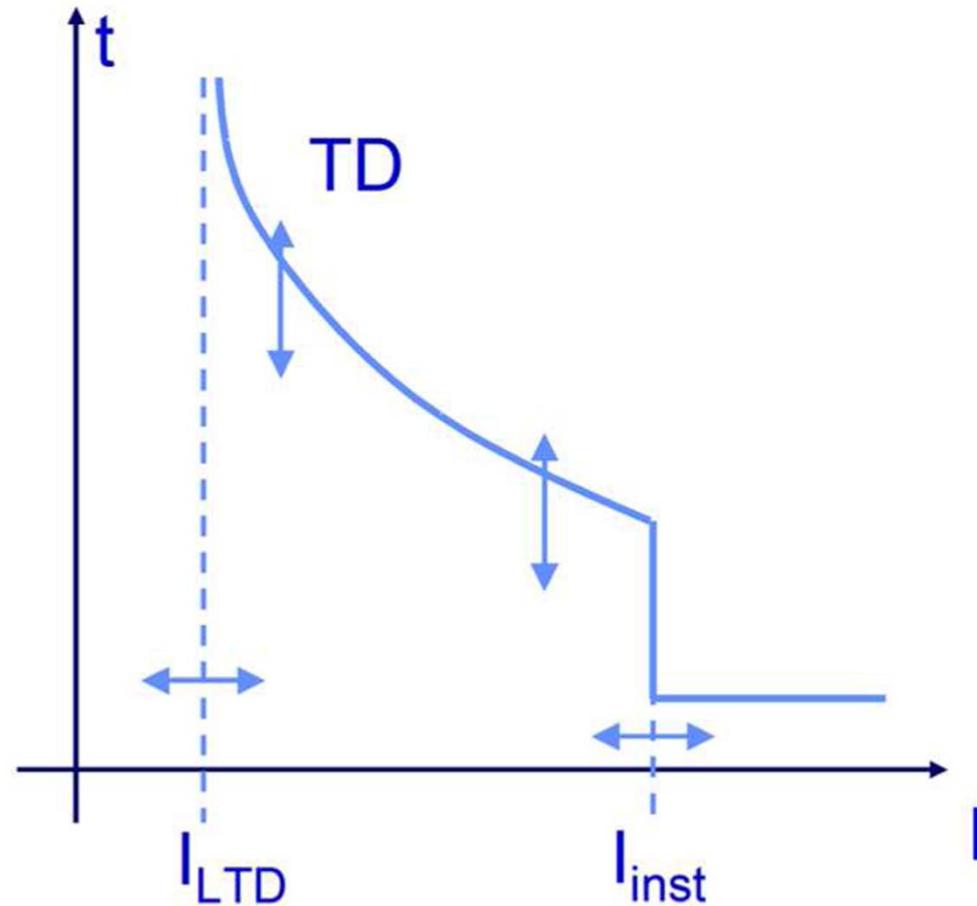
- Control de la posición inicial del disco (ajuste del dial temporizador).

Elementos de Sobrecorriente de Tiempo Inverso - Instantáneo

Curvas de Tipo Mixto (1)

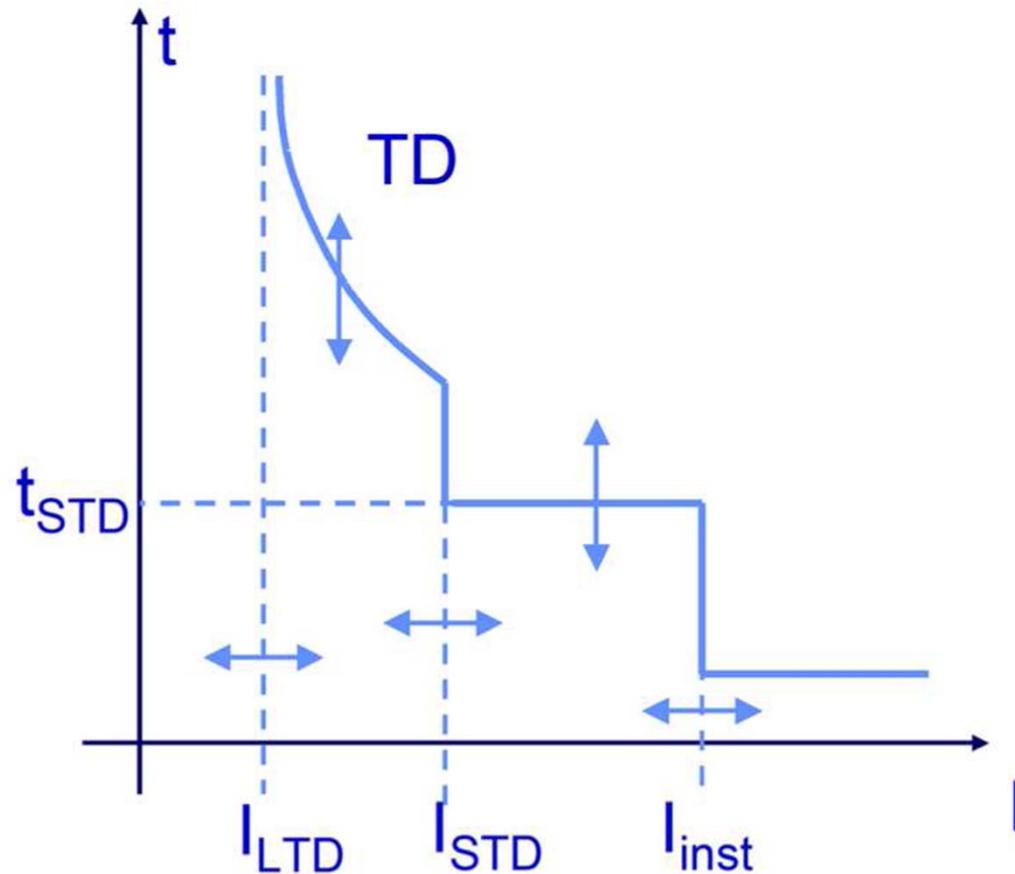
Las curvas mixtas tienen todas las ventajas de los distintos tipos de relés de sobrecorriente.

Están contruidos como unidades separadas, podemos implementar los principios de la protección de sobrecorriente utilizando una combinación de elementos instantáneos y de tiempo definido o una combinación de elementos instantáneos y de tiempo inverso.



Curvas de Tipo Mixto (2)

- Un elemento de tiempo muy inverso.
- Un elemento de tiempo definido de retardo corto (o breve).
- Un elemento instantáneo.

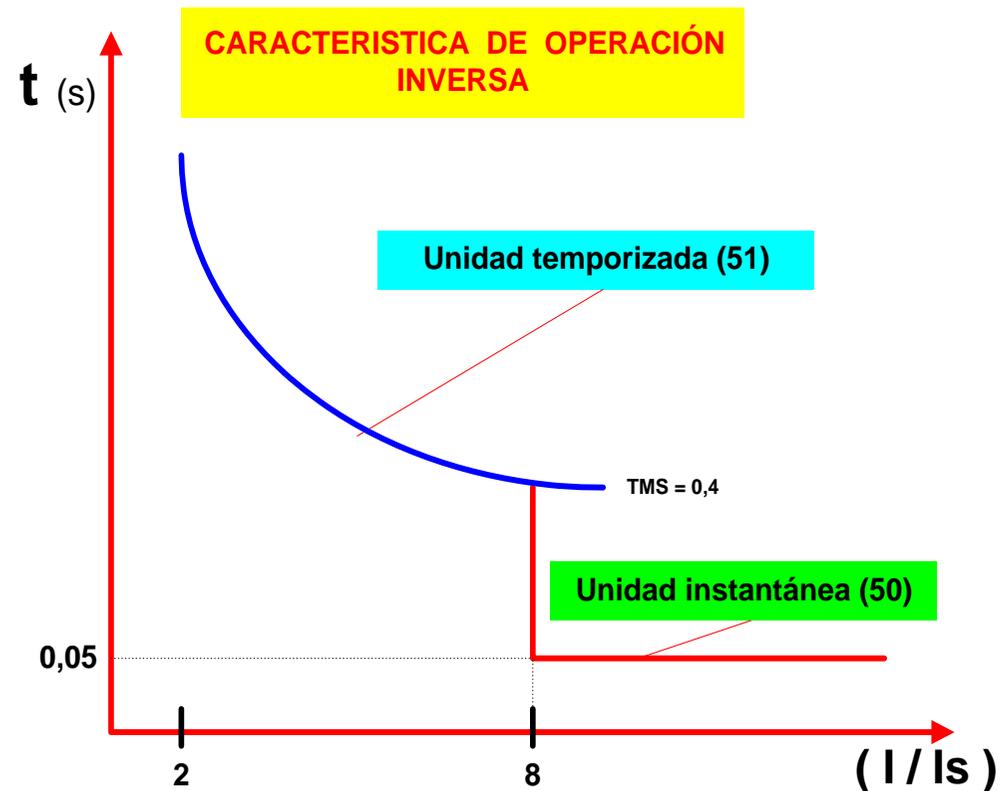


Curvas de Tipo Mixto (2)

Curva tiempo inverso

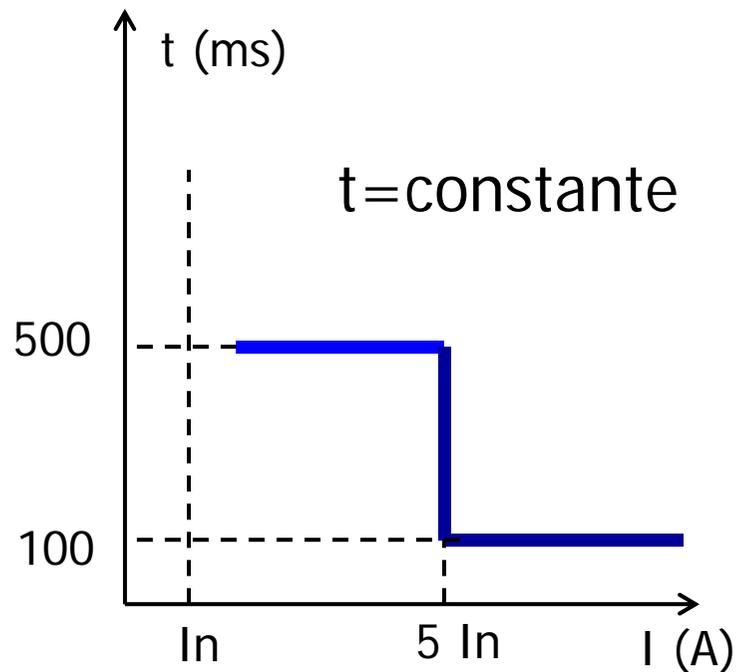
Proporciona una actuación en menor tiempo para un valor de intensidad mayor.

Permite coordinar la actuación de varios relés situados en distintas posiciones del sistema eléctrico.

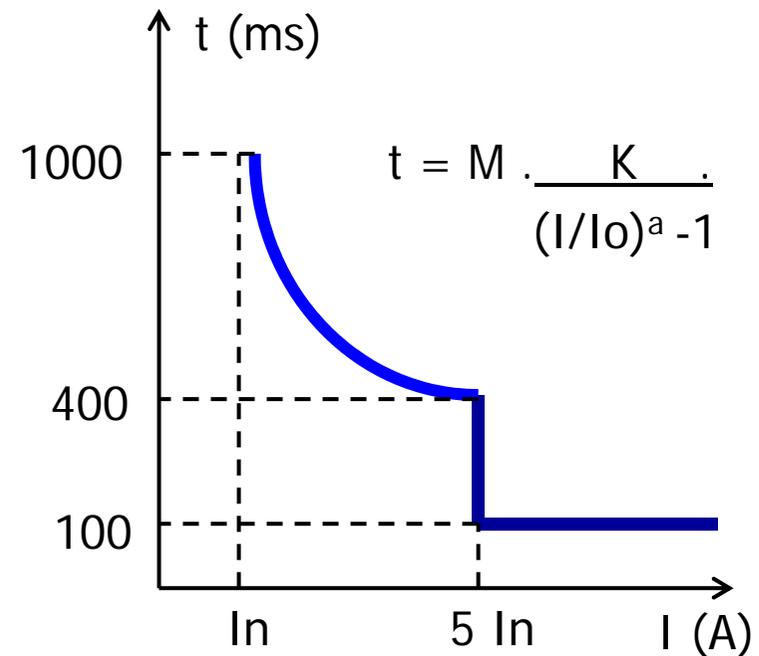


Curvas de Operación

Operación a tiempo definido o fijo.



Operación a tiempo inverso: I, VI, EI



Curvas de Coordinación

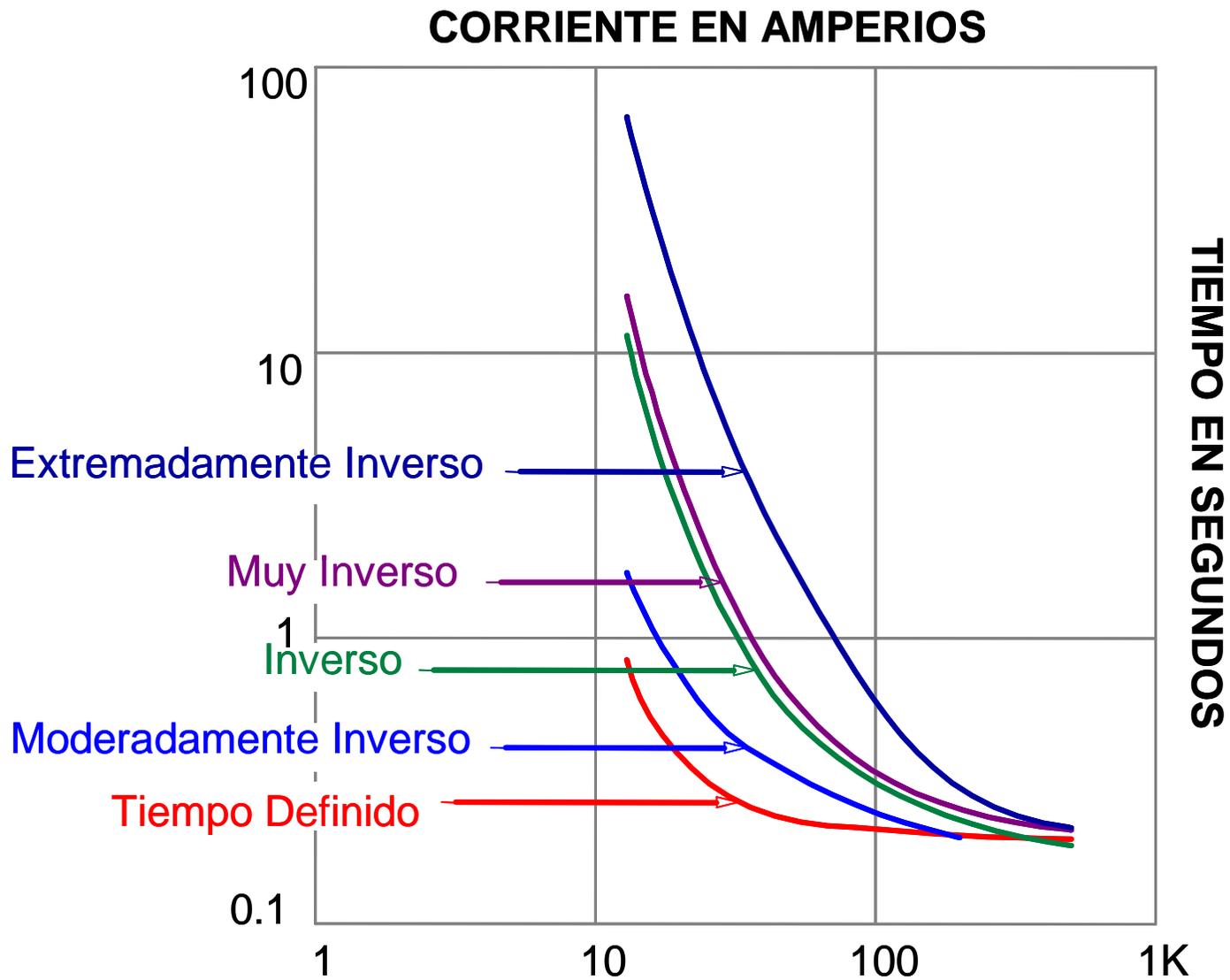
NORMA IEC:

- Normalmente inverso (NI).
- Muy inversa (VI).
- Extremadamente inversa (EI).

NORMA ANSI:

- Extremadamente inversa (EI).
- Muy inversa (VI).
- Normalmente inverso (NI).
- Inverso tiempo corto (I-st).
- Extremadamente inverso tiempo corto (EI-st).
- Extremadamente inverso tiempo largo (EI-lt).
- Inverso tiempo largo (I-lt).

Características Inversas



Relés de Tiempo Normalmente Inverso (N.I.)

- ❑ Se aplican generalmente cuando el valor de la **corriente de cortocircuito depende grandemente de la capacidad de generación** del sistema en el momento de la falla. **Aplicable a sistemas de generación**. Es decir cuando a lo largo de la línea existen grandes variaciones de la corriente de falla (cortocircuito).

Cuando $Z_s \ll Z_L$,

Z_s = impedancia de la fuente.

Z_L = impedancia de la línea hasta el punto de falla

- ❑ Su principal ventaja es la de tener menores tiempos de operación a altas potencias de cortocircuito.

Figura:
Curva
Inversa

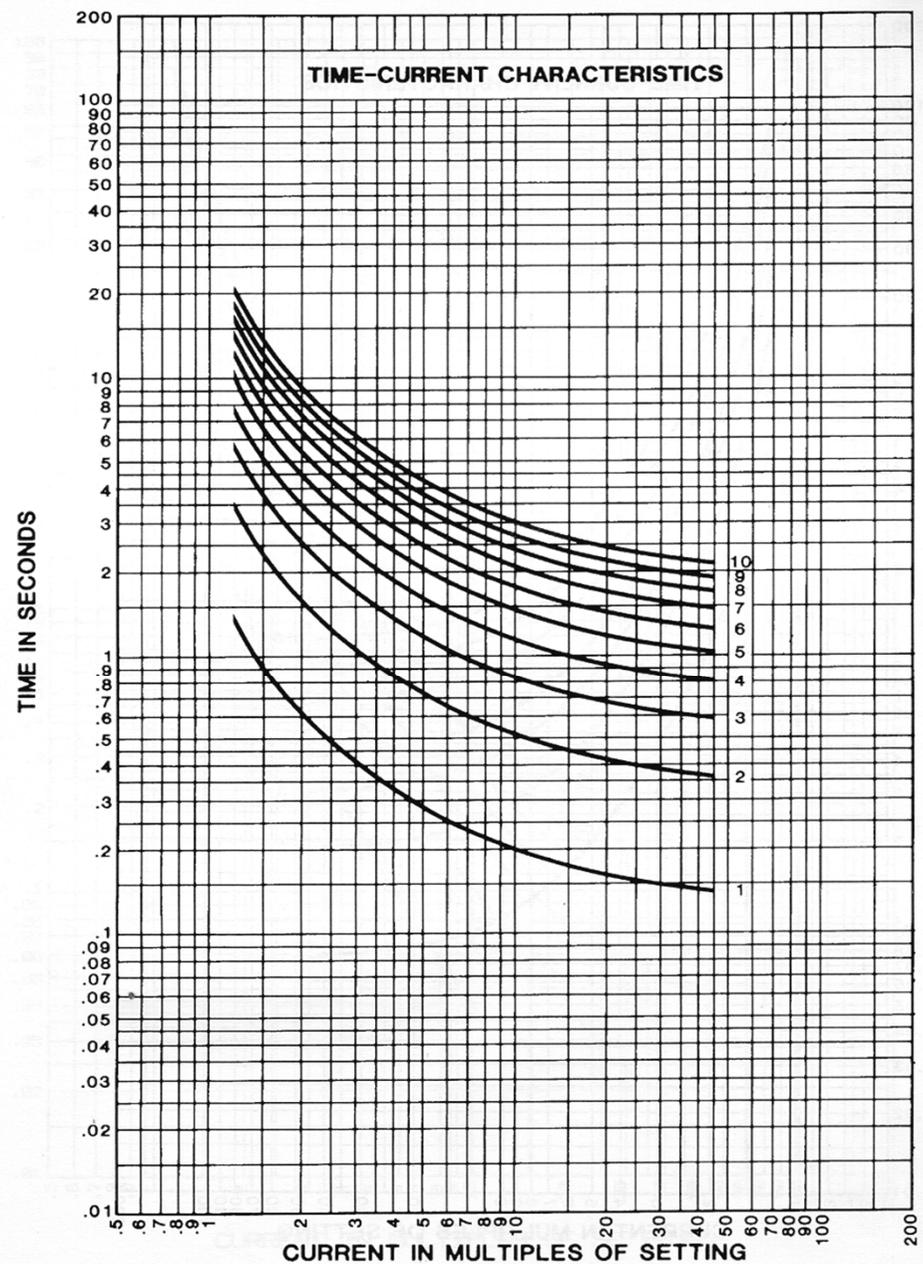


Figure A3. Inverse Curve

Relés de Tiempo Muy Inverso (M.I.)

- ❑ Se caracteriza por tener una curva más inversa que la anterior, **es lento para valores bajos de sobrecorriente** y **rápido para valores altos de sobrecorriente**.
- ❑ Se aplican preferentemente en sistemas donde el valor de la intensidad de cortocircuito circula a través de cualquier relé que depende mayormente de la posición relativa de donde se halla instalado el relé a la falla y en poca cuantía de la capacidad de generación del sistema, ya que se supone se alimenta de una red muy grande.

Relés de Tiempo Muy Inverso (M.I.)

- ❑ Es conveniente en sistemas de gran capacidad de generación donde el nivel de cortocircuito depende prácticamente de la impedancia donde ocurre el cortocircuito (la corriente de falla se reduce notablemente a medida que aumenta la distancia a la fuente).

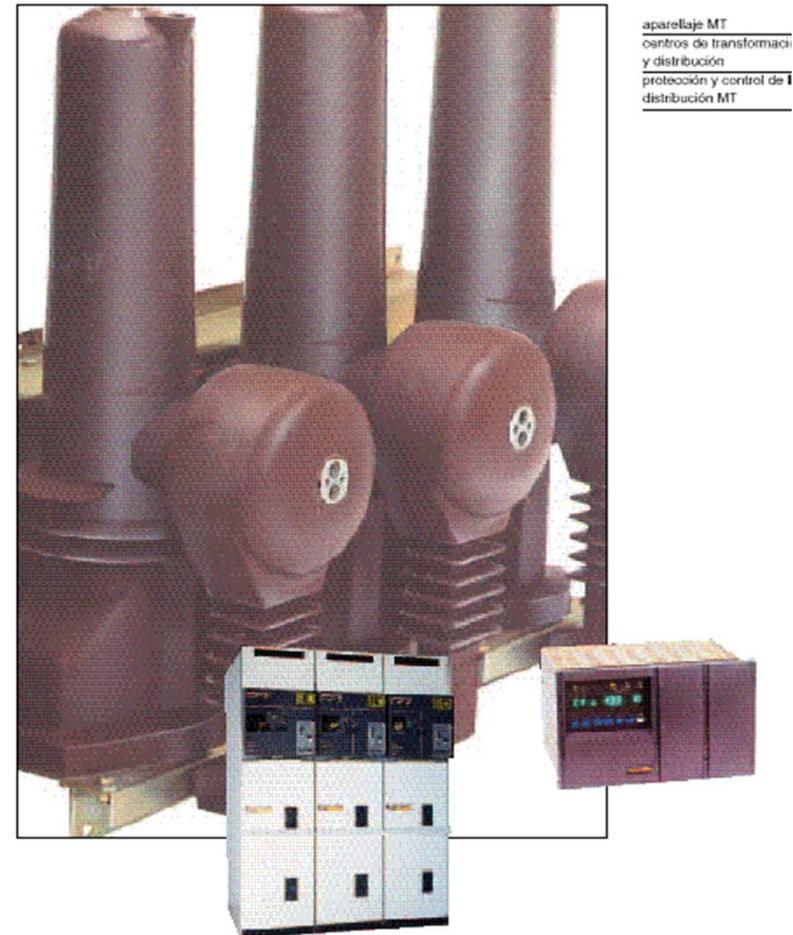
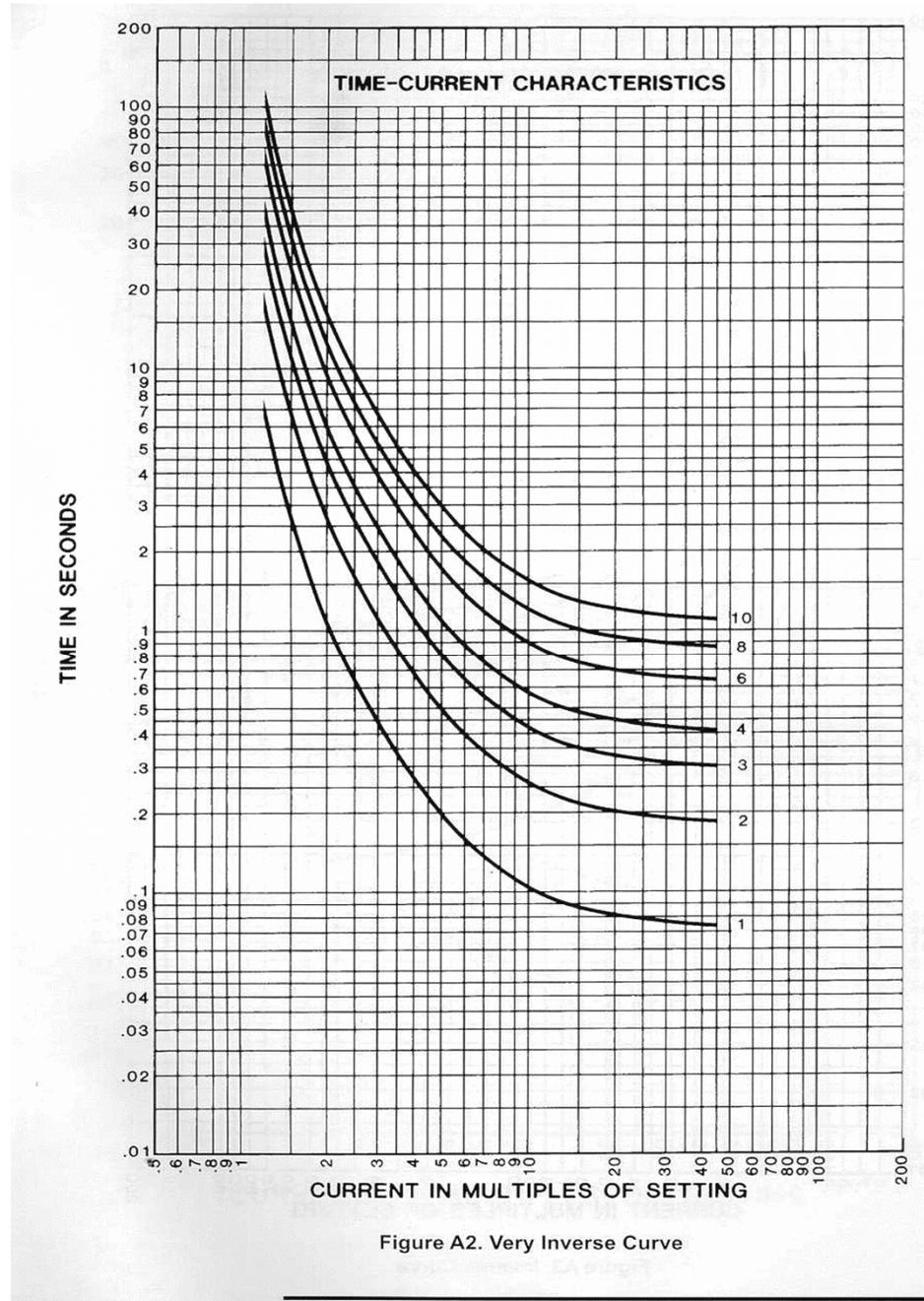


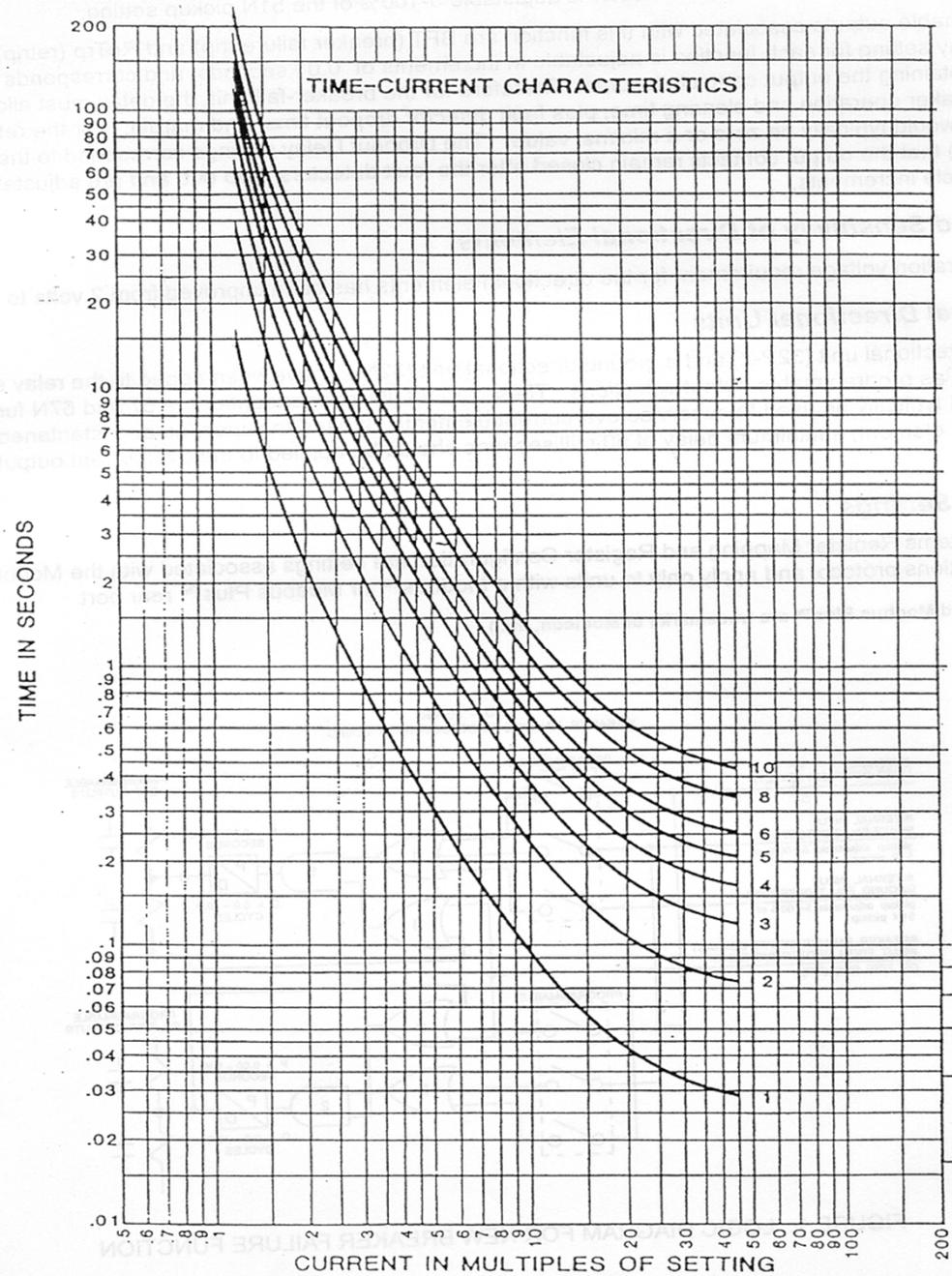
Figura:
Curva
Muy
Inversa



Relés de Tiempo Extremadamente Inverso (N.I.)

- ❑ Son adecuados para aplicaciones tales como los alimentadores de los sistemas de distribución, donde se tenga una temporización suficiente para permitir la re-energización del circuito, sin que haya disparos innecesarios en el período inicial de avalancha (picos de corriente por conexión de bombas, molinos, calentadores, etc.) y al mismo tiempo coordine bien con los fusibles de alto poder de ruptura.
- ❑ También se emplea para actuar con las componentes de secuencia negativa, en la **protección de grandes generadores**.
- ❑ Permite ajustes más precisos para evitar sacar de servicio al generador.

Figura:
Curva
Extrema-
damente
Inversa



Tiempo de actuación del Relé

$$t = TMS \left[\frac{k}{\left(\frac{I}{I_S} \right)^\alpha} + C \right]$$

Donde

t = Tiempo de actuación del Relé (variable dependiente)

I = Corriente que mide el Relé (variable independiente)

α = Parámetro que define la curva característica de operación del Relé

I_S = Corriente de Arranque del Relé

TMS = Constante de ajuste del Relé

K = Constante de ajuste del Relé

C = Constante de ajuste del Relé

Tiempo de actuación del Relé

Constantes de tiempo

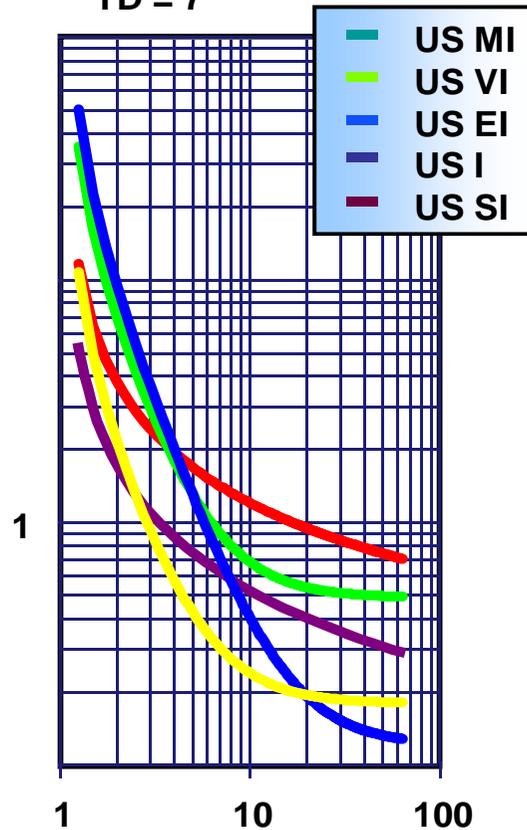
Las constantes α y k determinan el grado de característica inversa del relé y para los esquemas estándar las constantes son :

Característica		IEC/BS			ANSI/IEEE		
		α	K	C	α	K	C
Tiempo definido		-	0	1			
Normal Inverso	NI	0.02	0.14	0	2.0938	8.9341	0.17966
Muy Inverso	VI	1	13.5	0	2	3.922	0.0982
Extremadamente Inverso	EI	2	80	0	2	5.64	0.02434
Inverso de Largo Tiempo	LI	1	120	0	2	5.6143	2.18592

Curvas de Coordinación

Curvas según la norma IEEE

Tiempo de operación (s)
TD = 7



Moderada Inversa IEEE

Muy Inversa IEEE

Extremadamente Inversa IEEE

Inversa US CO8

Inversa de tiempo corto US CO2

$$t = \frac{TD}{7} x \left\{ \left[\frac{0.0515}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0.02} - 1} \right] \right\} + 0.114$$

$$t = \frac{TD}{7} x \left\{ \left[\frac{19.61}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1} \right] \right\} + 0.491$$

$$t = \frac{TD}{7} x \left\{ \left[\frac{28.2}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1} \right] \right\} + 0.1217$$

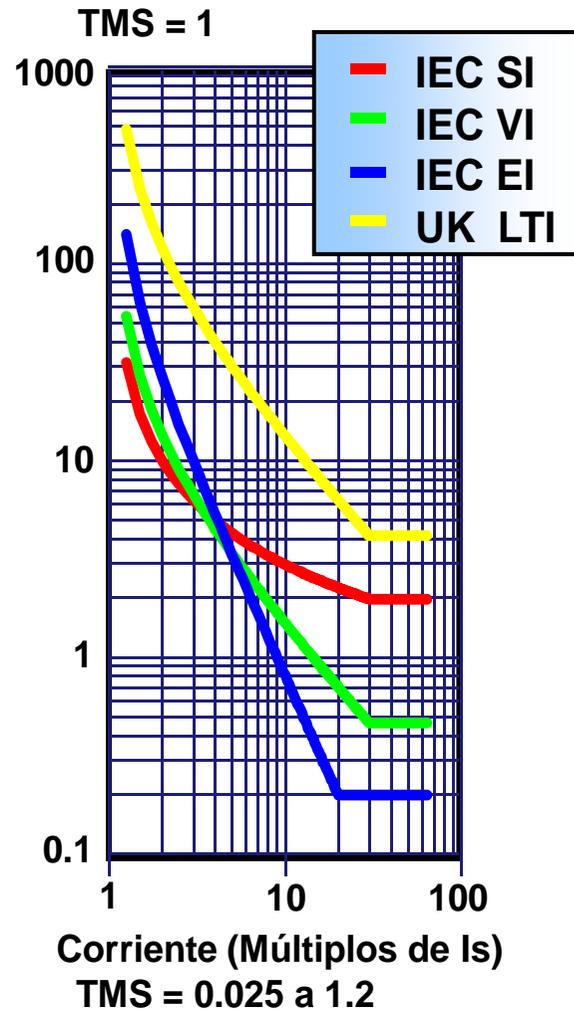
$$t = \frac{TD}{7} x \left\{ \left[\frac{5.95}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1} \right] \right\} + 0.18$$

$$t = \frac{TD}{7} x \left\{ \left[\frac{0.02394}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0.02} - 1} \right] \right\} + 0.01694$$

Curvas de Coordinación

Curvas según la norma IEC

Time de Operación (s)



Inversa Standard
IEC

$$t = TMS \times \left(\frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_s} \right)^{0.02} - 1} \right)$$

Muy Inversa IEC

$$t = TMS \times \left(\frac{13.5}{\left(\frac{I}{I_s} \right) - 1} \right)$$

Extremadamente
Inversa IEC

$$t = TMS \times \left(\frac{80}{\left(\frac{I}{I_s} \right)^2 - 1} \right)$$

UK Inversa tiempo
largo

$$t = TMS \times \left(\frac{120}{\left(\frac{I}{I_s} \right) - 1} \right)$$

Ecuación de la curva de sobre-intensidad con retardo de tiempo

NORMA IEC:

$$\textit{Tiempo de Desconexión} = \left(\frac{K}{\left[\frac{G}{G^b} \right]^\alpha} \right) \times \textit{dial de tiempo}$$

Tiempo de reajuste = Instantáneo

$\left[\frac{G}{G^b} \right]$ = Múltiplos de la corriente de puesta en marcha.

Dial de tiempo = Rango de 0,05 a 1,0 en pasos de 0,05.

Ecuación de la curva de sobre-intensidad con retardo de tiempo

NORMA ANSI:

$$\text{Tiempo de Desconexión } n = \left(\frac{A}{M^P - C} + B \right) x \left(\frac{14n - 5}{9} \right)$$

$$\text{Tiempo de Re ajuste} = \left(\frac{D}{|1 - EM|} \right) x \left(\frac{14n - 5}{9} \right)$$

M=Múltiplos de la corriente en puesta en funcionamiento (I/I_{PU}).

n=Ajuste de dial de tiempo (rango de 1 a 10 en pasos de 0,1).

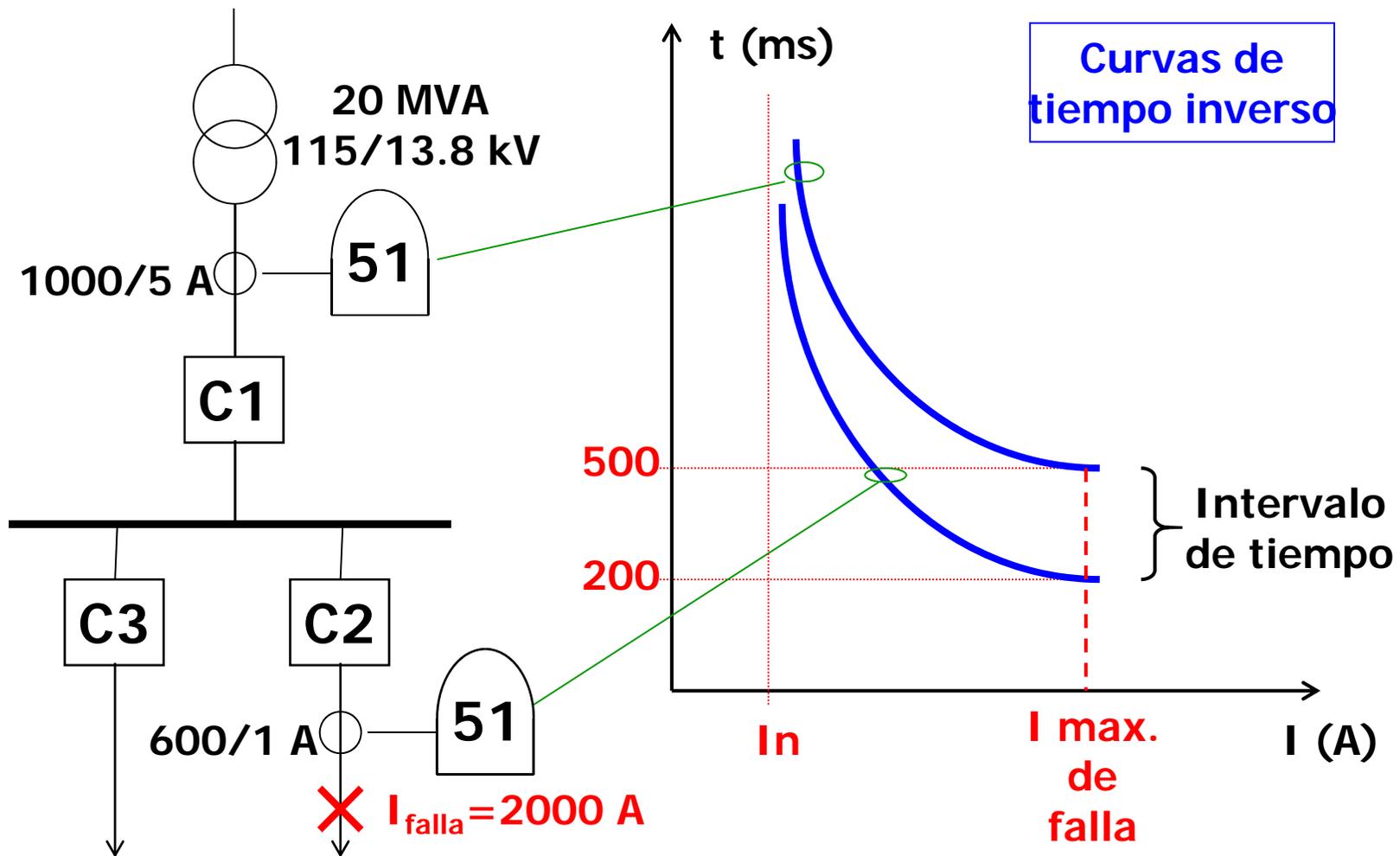
Constantes para las características de sobreintensidad con retardo de tiempo

Curva	A	B	C	P	D	E	K	α
Extremadamente Inversa	6.407	0.025	1	2.0	3	0.998	80.0	2.0
Muy Inversa	2.855	0.0712	1	2.0	1.346	0.998	13.5	1.0
Inversa	0.0086	0.0185	1	0.02	0.46	0.998	0.14	0.02
Inversa de Corto Tiempo	0.00172	0.0037	1	0.02	0.092	0.998		
Ext. Inversa de Corto Tiempo	1.281	0.005	1	2.0	0.6	0.998		
Ext. Inversa de Tiempo Prolongado	64.07	0.250	1	2.0	30	0.998		
Muy Inversa de Tiempo Prolongado	28.55	0.712	1	2.0	13.46	0.998		
Inversa de Tiempo Prolongado	0.086	0.185	1	0.02	4.6	0.998	120.0	1.0
Curva del Reconector #8	4.211	0.013	0.35	1.8	3.29	1.5		

NORMA ANSI

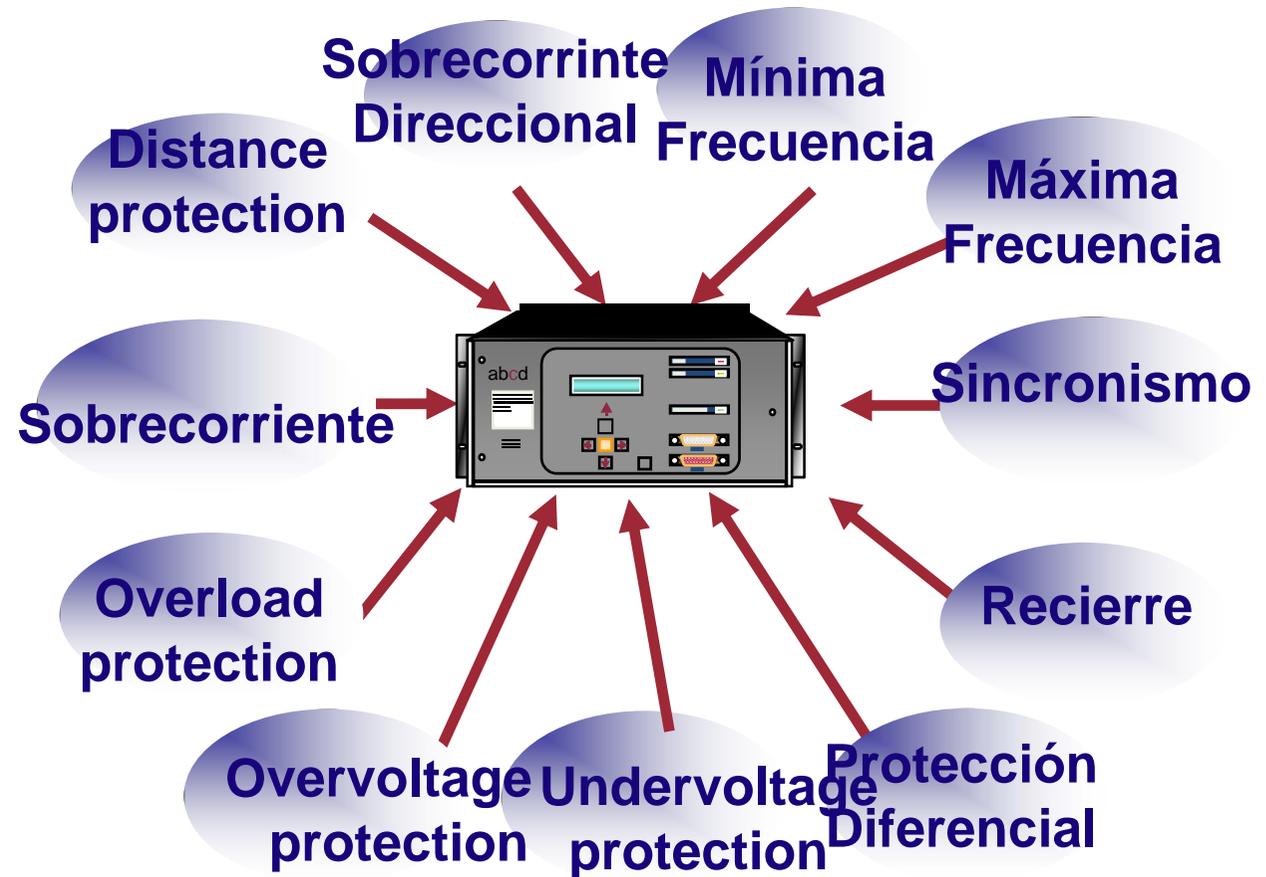
NORMA IEC

Coordinación de la Protección



Principio de Aplicación de los Relés

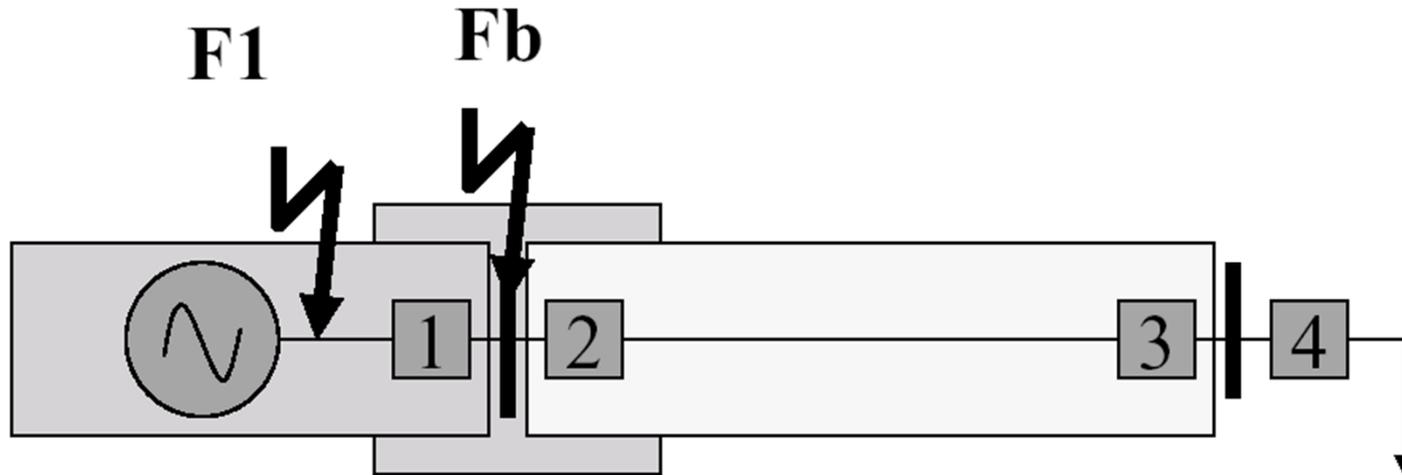
- Protección principal.
- Protección de respaldo.
- Protección de respaldo remoto.
- Protección de respaldo local.
- Protección redundante.



Protección Principal

- ❑ Son las que actúan en primera instancia ante una falla en su zona de protección
- ❑ Ante una falla en una zona de protección principal, los relés provocarán disparo de los interruptores comprendidos dentro de esa zona.
- ❑ Debe existir un traslape al rededor de los interruptores, esto se hace con la finalidad de eliminar, la posibilidad de espacios muertos o áreas no protegidas.

Protección Principal



Falla en F1 → Actúa CB 1

- ❑ Si la falla es en Fb. Si no hay traslape seria un espacio muerto o zona sin protección al ocurrir la falla disparan CB1 y CB2.
- ❑ Al ocurrir una falla en el interruptor no existe garantía que el interruptor involucrado en la falla opere correctamente.

Protección de Respaldo

- ❑ Esquema de protección que deberá operar en caso que la protección principal no lo haga.
- ❑ La protección de respaldo usualmente desconecta partes mayores que la parte fallada, pero esto es necesario si se quiere despejar la falla.

TODA PROTECCION DE RESPALDO DEBE SERVIR DE APOYO, TANTO PARA EL RELÉ COMO PARA EL INTERRUPTOR.

Protección de Respaldo Remoto (PRR)

- ❑ Las Fallas se despejan desde una S.E. adyacente a donde se produjo la falla.
- ❑ Actúan en mayor tiempo que la protección principal (Lentos).
- ❑ Generalmente el despeje involucra mayor instalación.
- ❑ No resulta muy caro implementar y añadir a las protecciones primarias las funciones de respaldo remoto.

Protección de Respaldo Local (PRL)

- ❑ Cuando la protección PRR no son aconsejables se instala PRL.
- ❑ En la protección de PRL las fallas se despejan a través de los relés ubicados en la misma S.E. o instalación.
- ❑ Este tipo de PRL provee el respaldo por avería del interruptor y relé.
- ❑ Es recomendable, que la protección de respaldo local sea totalmente independiente de la protección principal, en cuanto a circuitos de control, transformadores de corriente y de potencial.

Selección de Interruptores

Definiciones Básicas

PERTURBACIONES .- Son alteraciones de los principales parámetros de los sistemas eléctricos de corriente continua ó alterna. Los parámetros eléctricos principales son : Tensión, corriente y frecuencia siendo sus unidades Voltios, Amperios y frecuencia respectivamente.

CORRIENTES ANORMALES.- Alteración de la corriente nominal por encima de los valores establecidos estos pueden ser :

- **Alta intensidad.-** Estan conformados por las corrientes de cortocircuitos asimétricos y simétricos. Se dan entre $2I_n < I_{\text{nominal}} < 10 I_n$. El tiempo de duración 50 - 250 mseg.
- **Baja intensidad.-** Cuando se sobrepasa la corriente nominal entre $1I_n < I_{\text{nominal}} < 1.5 I_n$. Conformados por las corrientes de sobre carga.

El tiempo de duración es de hasta muchos segundos y/o uno o varios minutos según sea el caso.

Definiciones Básicas

TENSIONES ANORMALES.- Se denominan así cuando los niveles de la tensión están fuera de los valores normalizados. En los sistemas industriales se dan dos casos:

Sobre tensiones.- Deterioran los aislamientos de los equipos y sistema eléctrico y pueden producir fuertes descargas a tierra. Pueden ser de origen:

Externo.- Descargas atmosféricas (Corta duración).

Interno.- Maniobras y frecuencia industrial.

Sub tensiones.- Aparecen debido a perturbaciones ocurridas dentro del sistema eléctrico. Su origen se debe a:
Sobrecarga en la línea del sistema eléctrico.

La central de generación entrega una baja tensión.

En el arranque de los motores de inducción.

Definiciones Básicas

FRECUENCIAS ANORMALES.- Cuando la frecuencia de operación se halla fuera del margen establecido se dan :

- Sub frecuencia (inferior a la frecuencia nominal), se debe a un desbalance $KW_{\text{generación}} < KW_{\text{carga}}$.
- Sobre frecuencia (superiores a la frecuencia nominal), se debe a un desbalance $KW_{\text{generación}} > KW_{\text{carga}}$.

INVERSION DE POTENCIA.- El flujo de potencia activa debe estar predeterminado en un solo sentido. El cambio de sentido del flujo implica una situación anormal por lo que se debe utilizar un relé de potencia inversa.

OTRAS.- Para aplicaciones particulares es posible detectar condiciones anormales de : Impedancias, temperaturas, presiones, vibraciones, comparaciones de corrientes y tensiones de entrada y salida, corrientes de secuencia a cero entre otros.

Normas Internacionales

La IEC 947 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION) tiene el objetivo de armonizar en todas las formas posibles el conjunto de reglas y de disposiciones aplicables al sector de baja tensión. La IEC 947 es dividida en varios artículos como sigue:.

- **947 - 1** Reglas generales.
- **947 - 2** Interruptores automáticos.
- **947 - 3** Interruptores, seccionadores Interruptor - seccionador y fusibles.
- **947 - 4** Contactores y arrancadores.
- **947 - 5** Equipos y elementos para circuitos de mando.
(Sensores de proximidad, temperatura, etc)
- **947 - 6** Equipos de conexión a funciones múltiples.
(Arrancador integral o transferencia automática)
- **947 - 7** Materiales accesorios
(Bloques de unión para conductores de cobre)

Descripción general

SECCIONAMIENTO.- A fin de trabajar en forma segura en instalaciones, máquinas y su equipamiento eléctrico, debe ser posible aislar eléctrica y físicamente todos los circuitos de potencia y de control de la línea de distribución.

El seccionamiento se realiza **sin carga**.

Reglamentado por la IEC 947 -3

INTERRUPTOR.- Permite la conexión y desconexión de un circuito **con carga**, así como la parada de emergencia.

Reglamentado por las normas internacionales:

IEC 947 – 2.	Para < 1Kv	Instalaciones insdustriales
VDE 0102 – 1	Para < 1Kv	Instalaciones insdustriales
VDE 0102 – 2	Para > 1Kv	Instalaciones insdustriales
IEC 898	Para < 1Kv	Instalaciones domiciliarias

Interrupidores

VENTAJAS

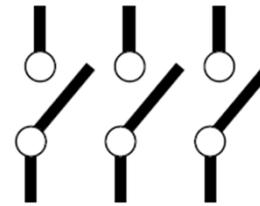
Abre y cierra con carga.
Es regulable.
Muy selectivo.
Rearmable.
Ocupa poco espacio.
Tiene cámara de extinción.
Están actualizados.
Dan seguridad mecánica.

DESVENTAJAS

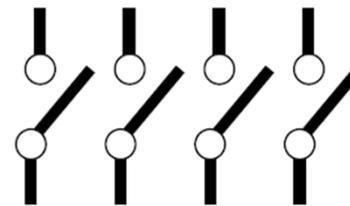
Relativamente caro.
Caro.
Muy caro



Interruptor unipolar



Interruptor tripolar



Interruptor tetrapolar

Clasificación de los interruptores

Los INTERRUPTORES AUTOMATICOS (IA) modernos se clasifican como sigue:

- Magnéticos fijos.
- Magnético regulable.
- Termomagnéticos fijos
- Térmico fijo y magnético regulable.
- Térmico regulable y magnético fijo
- Térmico fijo y magnético regulable.
- Térmico y magnético regulable.

Térmica Protección contra las sobrecorrientes.

Magnética Protección contra las corriente de corto circuito.

Descripción general

Interruptores termomagnéticos.- Han sido diseñados especialmente para despejar en forma rápida las fallas de sobrecorriente y cortocircuito. El tiempo del despeje dependerá de la regulación a la cual ha sido sometido (ver curvas del interruptor termomagnético).

La selección está definida por la norma IEC 947, NEMA AB-1 y UL-489.

Para hacer su selección tener en cuenta:

- Corriente nominal.
- Tensión nominal.
- Altitud de diseño.
- Corriente de cortocircuito.
- Temperatura de trabajo.
- Tipo de carga.
- Demás instrucciones del fabricante.

Descripción general

PROTECCION CONTRA CORTO CIRCUITO.-

Cualquier instalación puede estar sujeta a fallas eléctricas y mecánicas. Con el fin de evitar que éstas fallas causen daños a la carga y a su equipamiento es necesario prever protecciones contra corto circuitos y sobrecargas.

El objetivo de la protección contra corto circuitos es **detectar y cortar, lo mas pronto posibles**, corrientes anómalas de **2 a 10 veces** la corriente nominal de la carga.

Función incluida en:

- . Interruptores magnéticos para motores.
- . Interruptores termomagnéticos para motores.
- . Interruptores para cargas diversas.

Descripción general

PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS.-

La protección contra sobrecargas permite detectar incrementos de corriente entre **1 a 1.5** veces la corriente nominal de la carga; y desconectar el sistema para evitar el deterioro de los materiales aislantes de los conductores y carga evitando así un corto circuito.

Es también posible añadir otras protecciones, como la protección contra fallas de aislamiento, pérdida de fase, desbalance de tensiones y corrientes, etc.

Los dispositivos específicos son :

- . Relé térmico contra sobrecarga para motores.
- . Interruptores **termo**magnéticos para cualquier carga.

Descripción general

Disyuntores.- Son dispositivos de maniobra y protección que pueden actuar como simples interruptores de corriente en condiciones normales de trabajo o como protección en condiciones anormales, hay dos tipos: Abiertos y cerrados y pueden ser monofásicos, bifásicos y trifásicos. Los disyuntores más utilizados poseen disparadores térmicos para protección contra **sobre corriente** y disparadores magnéticos para protección contra **corto circuitos**.

La gran ventaja de los disyuntores en relación con los fusibles es la capacidad de interrupción de la corriente en sus tres fases en forma simultánea por sobre corriente y por corto circuito, además la protección es mas selectiva.

Las desventajas son las siguientes : Alto costo y menor velocidad de actuación en cortocircuitos.

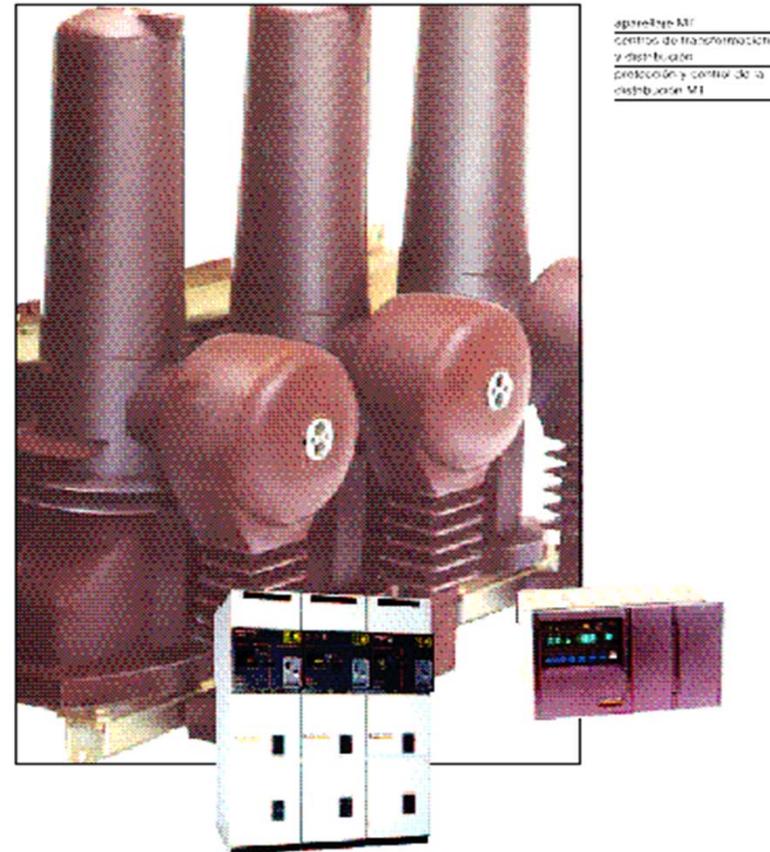
Interruptores



- Es un dispositivo mecánico con capacidad de energizar o abrir un circuito eléctrico durante condiciones normales o de interrumpir corrientes de cortocircuito.

Maniobra de los interruptores

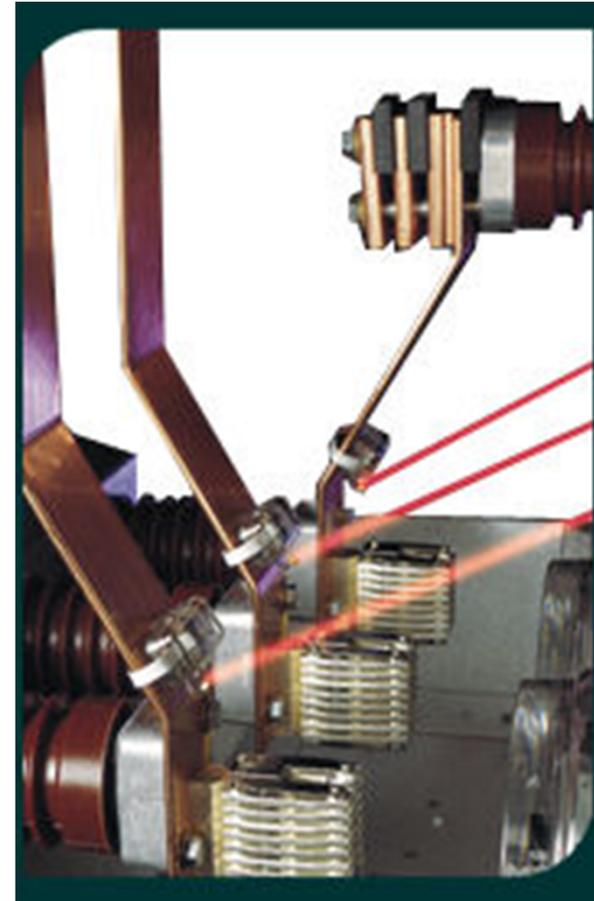
- La apertura o cierre de los interruptores pueden ser iniciados manual o automáticamente.
- Las operaciones automáticas son iniciadas por los relés de protección o de control asociados con el interruptor.



Medio donde se interrumpe el arco

El arco se interrumpe en :

- Pequeño volumen de aceite.
- Aire comprimido.
- Gas, SF6.
- Vacío.



Mecanismo de apertura

- Hidráulico (nitrógeno comprimido).
- Neumático (aire comprimido).
- Neumático - hidráulico.
- Mecanismo de resorte.

Especificaciones de los interruptores

- Tensión nominal.
- Corriente nominal.
- Capacidad de ruptura.
- Capacidad de cierre.
- Tiempo de operación.
- Corriente admisible de breve duración (por ejemplo 3 s).

Hexafloruro de azufre (SF₆)

- Es un gas no inflamable.
- Rigidez dieléctrica varias veces mayor que la del aire a la misma presión. A una presión de 2 bars es igual a la del aceite, por lo que es un excelente aislante.
- Es un gas electronegativo, esto es, tiene una gran afinidad con electrones libres y capacidad de interrumpir corrientes muy superior a la del aire y muchos gases.
- La pérdida de gas debido a la disociación durante la interrupción de la corriente es despreciable, por lo que se construyen totalmente sellados, con una vida útil de hasta 20 años.

Interruptor en vacío

- La extinción del arco se efectúa en ambiente inerte, lo que permite un mantenimiento reducido en el interruptor.
- El desgaste de los contactos es mínimo.
- Se recomienda que después de 10 años de servicio o después de 10,000 maniobras, un mantenimiento mínimo de lubricación en sus partes mecánicas.
- No se producen, ni productos de descomposición, ni efectos recíprocos con el ambiente, gracias al tubo de vacío cerrado herméticamente.

Conclusión

- Ambos equipos resultan muy útiles para la protección de redes aéreas debido a la cantidad de fallas transitorias a las que se ven sometidas, ya que todos los interruptores precisan de recierres rápidos y frecuentes. La rápida recuperación dieléctrica del tramo de maniobra después de la extinción del arco, permite el siguiente ciclo a la capacidad nominal de cortocircuito:
 - O - 0,3s - CO - 15s - CO - 15s - CO - 15s - CO.
 - (O = desconexión, C = conexión).

Selección de Interruptores

Para seleccionar los **INTERRUPTORES AUTOMATICOS** resulta indispensable conocer previamente lo siguiente:

- 1.- Constitución electromecánica de los IA.
- 2.- Los parámetros de funcionamiento (I_n , V_n , etc).
- 3.- Las condiciones ambientales de trabajo.
- 4.- Interpretación correcta de los catálogos del fabricante.
- 5.- Las perturbaciones de los sistemas eléctricos.
- 6.- Las características técnicas de los equipos de los IA.
- 7.- Métodos de solución del corto circuito.

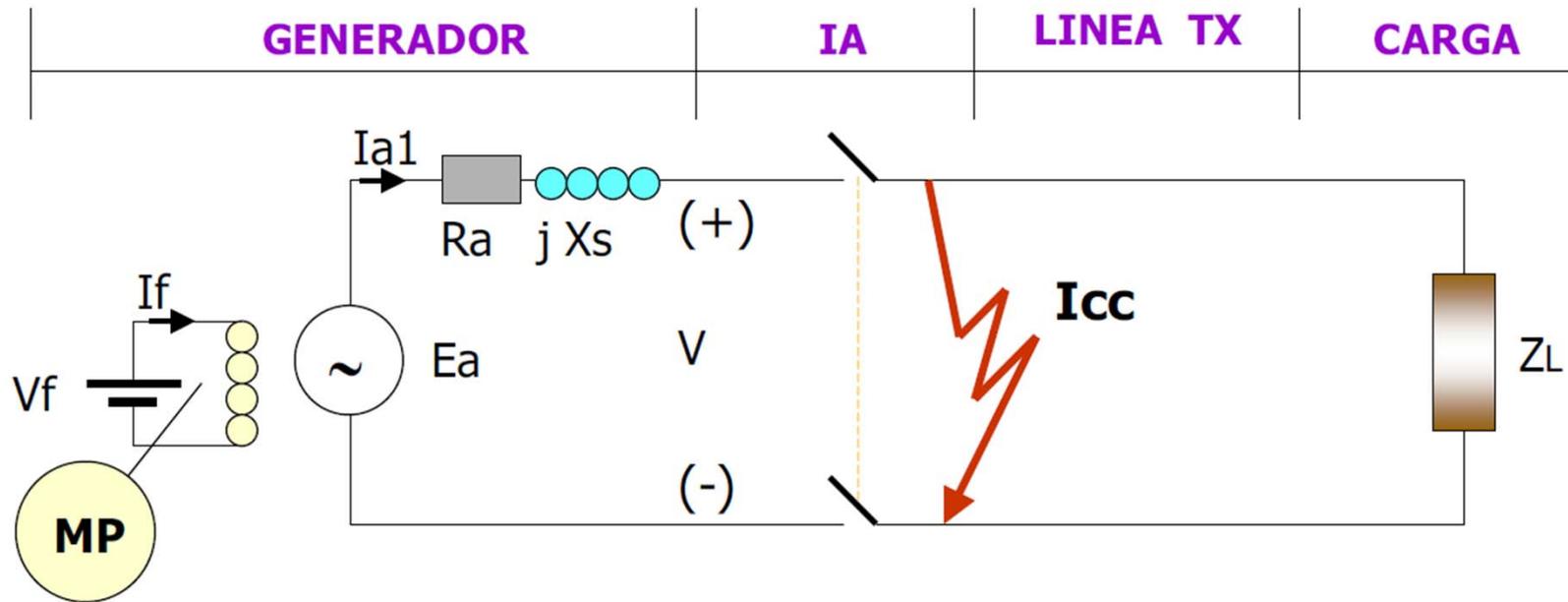
Definiciones Básicas

CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.- Es el abundante flujo de electrones que fluye por un punto defectuoso mientras dura la falla.

MODELO.- Es la representación física de un sistema eléctrico para lo cual se utilizan elementos pasivos (R, L y C) y elementos activos (fuentes AC).

INTERRUPTOR.- Equipos diseñados para despejar, en forma rápida, las fallas de sobrecorriente y corto circuito ocurridos en un sistema eléctrico.

Definiciones Básicas



Quando se produce el corto circuito sucede :

- El Generador ve que Z_{total} cae brusacmente.
- En consecuencia el generador inyecta una alta corriente llamado corriente de cortocircuito I_{cc} .
- El IA debe despejar la falla de inmediato.

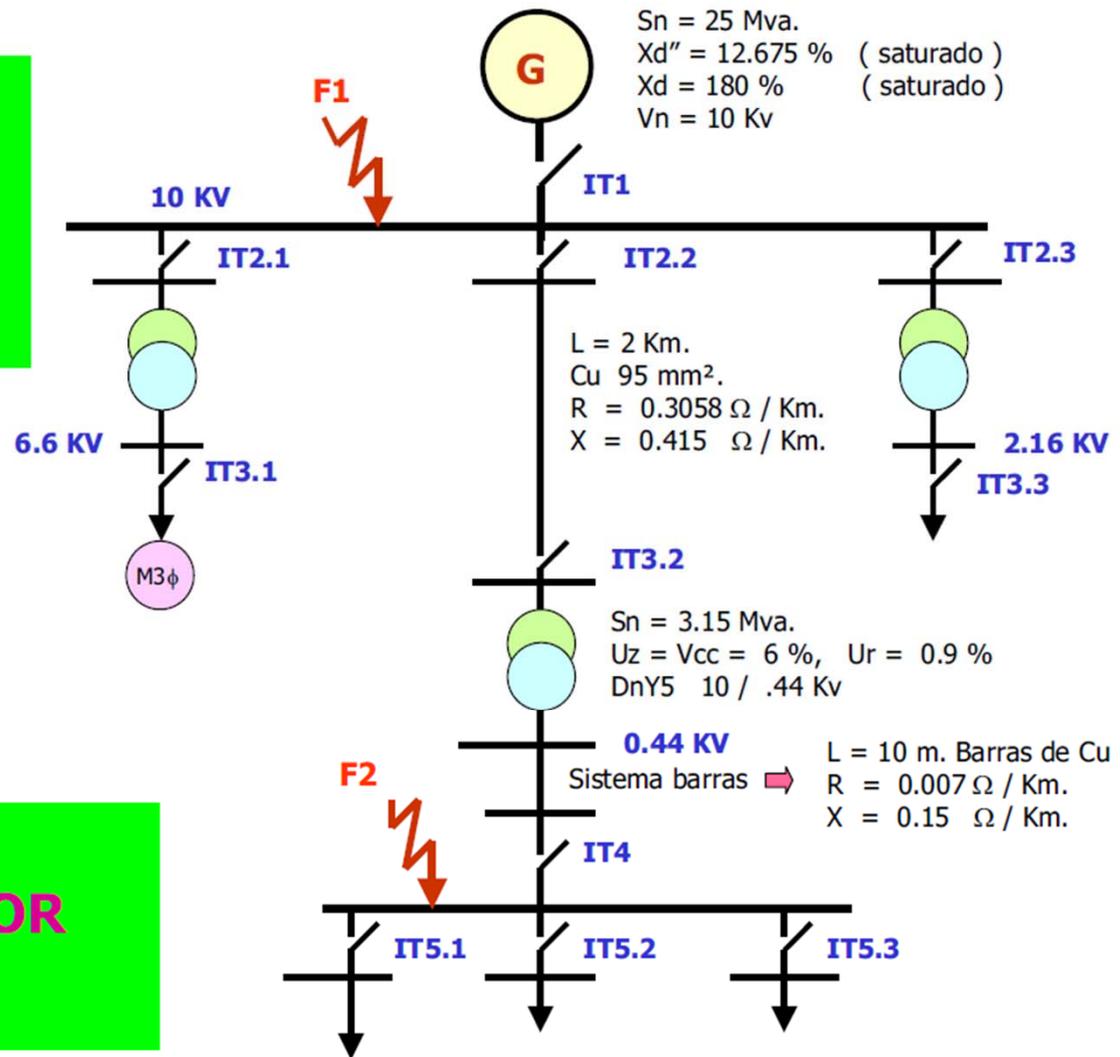
Tipos de Cortocircuitos

1.- CORTO CIRCUITO
CERCANO AL
GENERADOR

FALLA F1

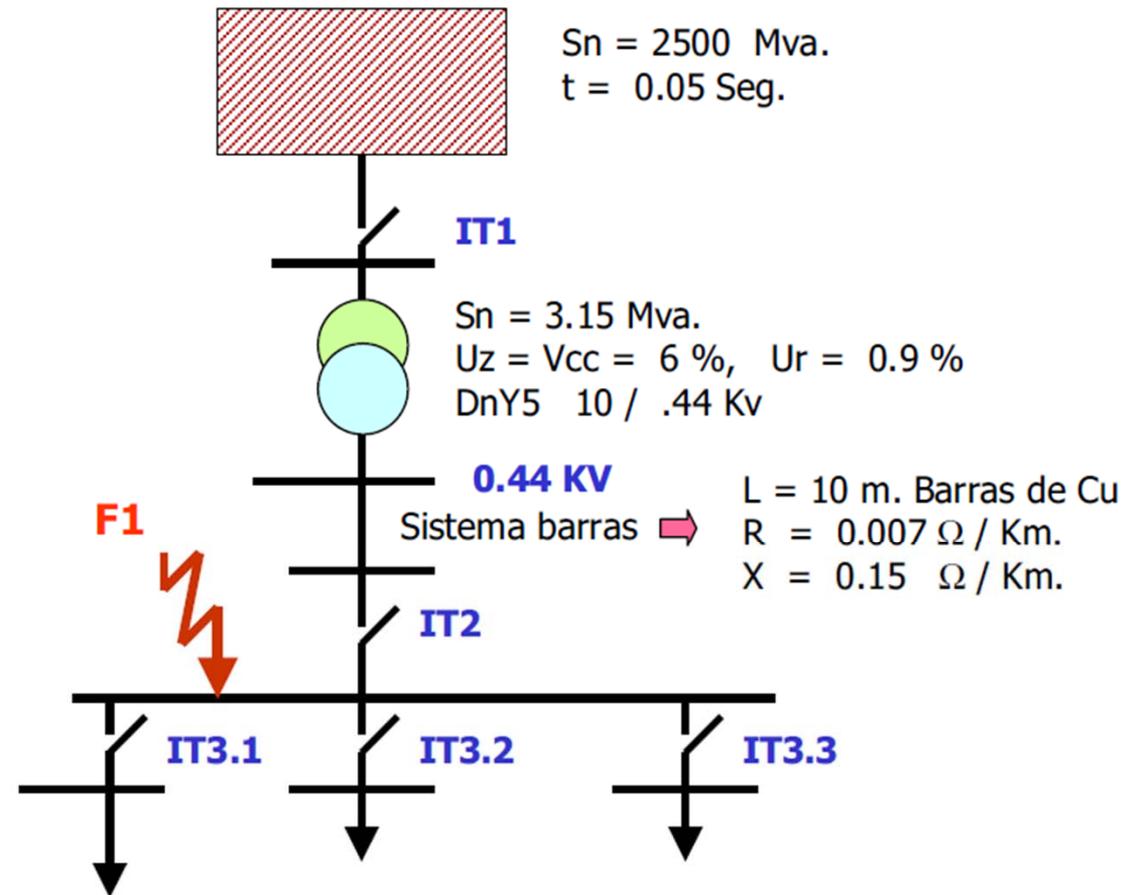
2.- CORTO CIRCUITO
LEJANO AL GENERADOR

FALLA F2



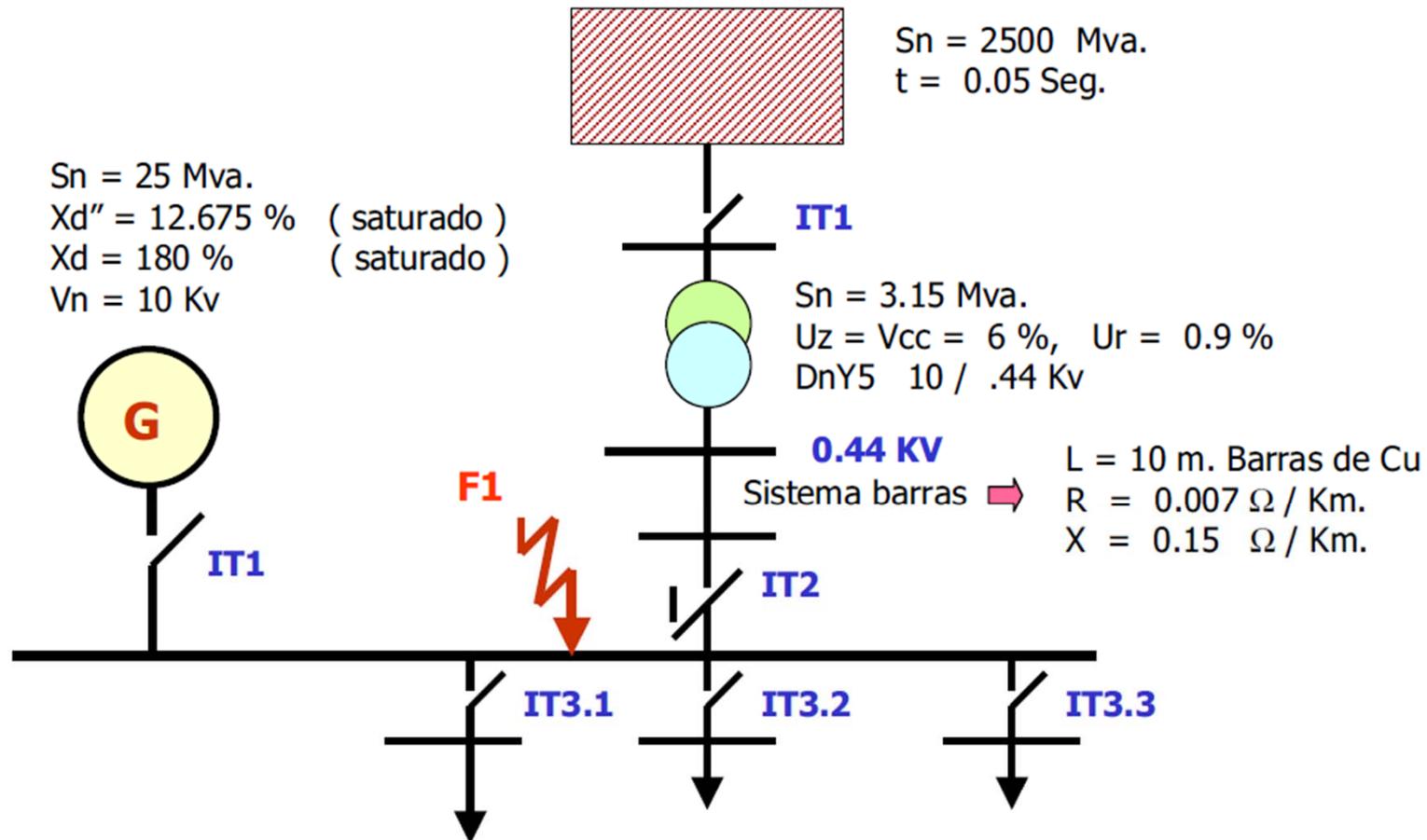
Tipos de Cortocircuitos

3.- CORTO CIRCUITO DENTRO DE UNA RED



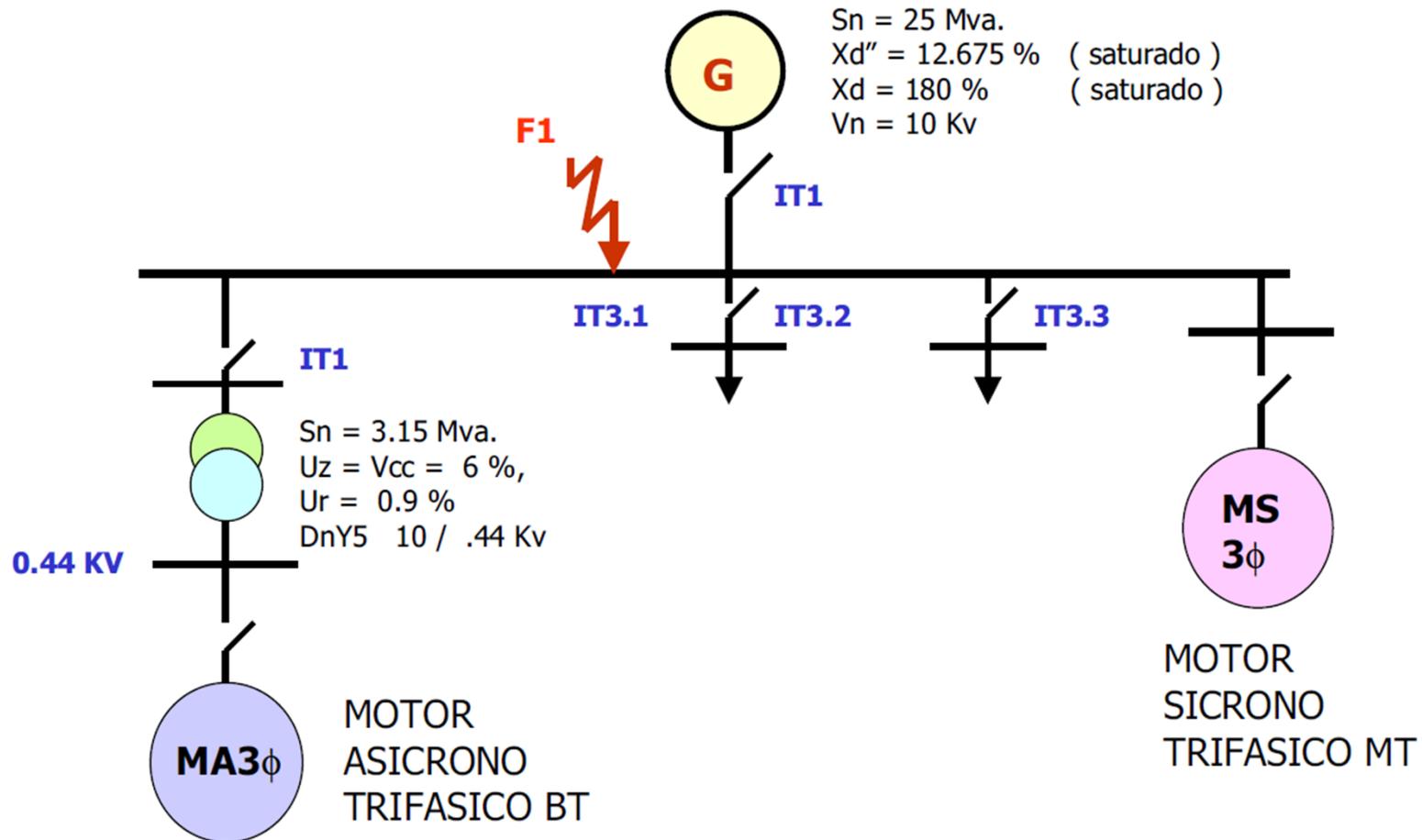
Tipos de Cortocircuitos

4.- CORTO CIRCUITO EN ALIMENTACION MULTIPLE



Tipos de Cortocircuitos

5.- CORTO CIRCUITO ESPECIALES



Selección de Interruptores

Por lo general las Cias suministradoras proporcionan el nivel de Corto circuito (MVA_{sc}) en el punto de conexión de las plantas industriales.

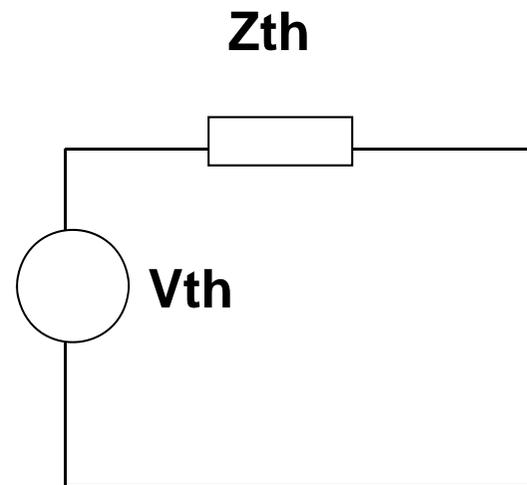
$$MVA_{sc} = \sqrt{3} kV_{nom} |I_{sc}| \times 10^{-3}$$

$$MVA_{base} = \sqrt{3} kV_{base} |I_{base}| \times 10^{-3}$$

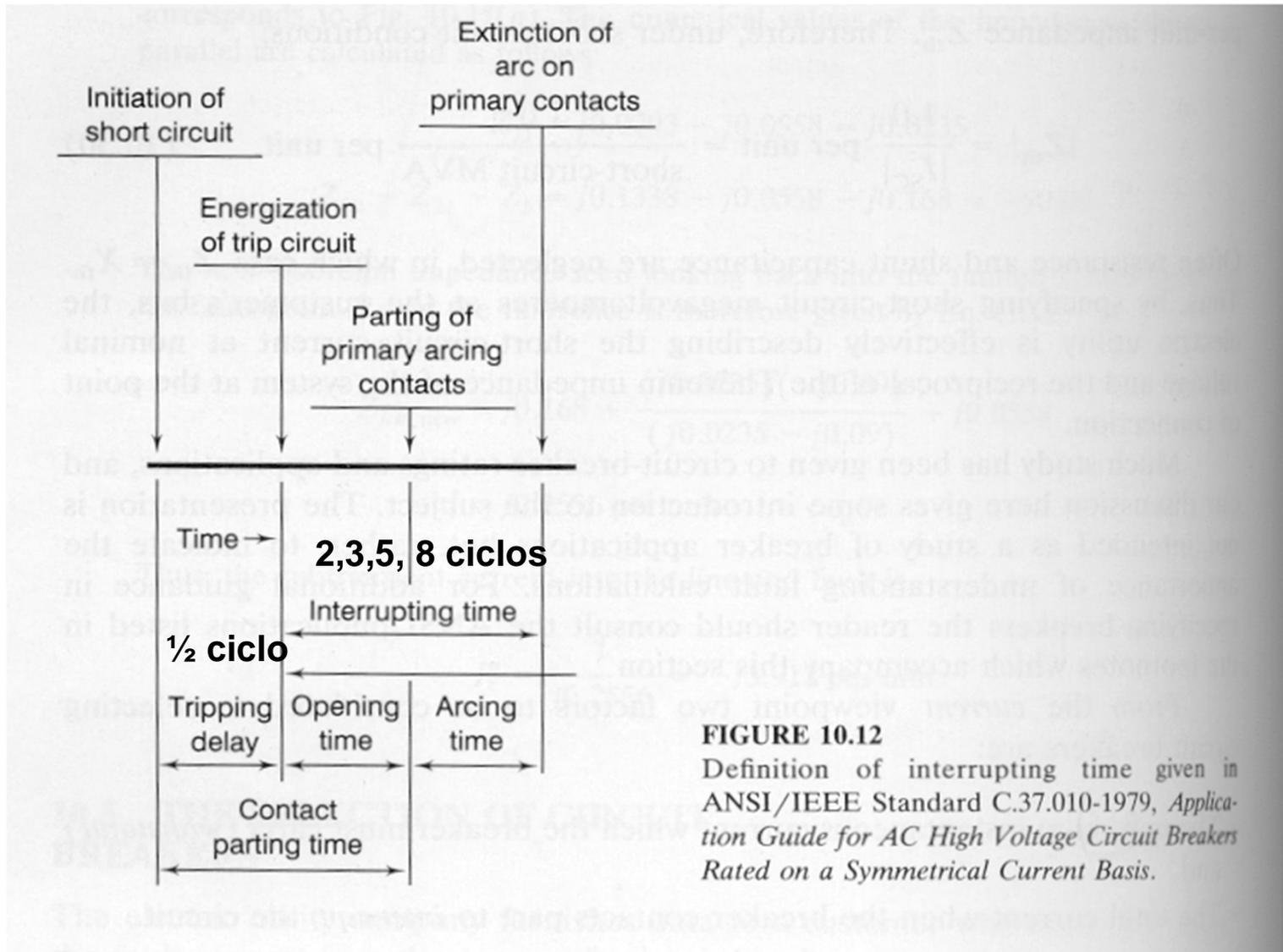
$$Si kV_{nom} = kV_{base}$$

$$MVA_{sc} pu = |I_{sc}| en pu$$

$$|Z_{Th}| = \frac{1}{|I_{sc}|} = \frac{1}{|MVA_{sc}|} pu$$



Definición del tiempo de interrupción



Desde el punto de vista de la corriente se deben considerar dos factores en la selección de los interruptores.

La corriente máxima instantánea que el interruptor debe soportar.

Esta corriente contiene además de la componente simétrica, una componente asimétrica (CD). A esta corriente se le conoce como corriente momentánea y por mucho tiempo los interruptores se especificaban en base a esta corriente.

La corriente total cuando los contactos del interruptor inician la apertura para interrumpir el circuito. Esta corriente define la capacidad interruptiva y depende de la “velocidad” del interruptor. Esta “velocidad” puede definirse como el tiempo transcurrido entre la ocurrencia de la falla y la extinción total del arco eléctrico. En interruptores de media tensión, este tiempo toma valores entre 2 y 8 ciclos.

El tiempo de interrupción nominal de un interruptor es el período entre el instante de Energización del circuito de disparo y la extinción del arco en una maniobra de apertura.

La corriente que un interruptor debe interrumpir es asimétrica, ya que todavía contiene una componente de directa decayente.

En la actualidad, por lo general se especifica la capacidad interruptiva en términos de la componente simétrica de la corriente. El fabricante de los interruptores toma en cuenta la Componente de CD en el diseño de estos.

Los interruptores son identificados por su voltaje nominal (nominal-voltage), tal como 69 kV. Entre otros factores se especifican: Corriente continua nominal, voltaje máximo nominal, rango de Voltaje de operación (K), y corriente de corto circuito nominal a máximo voltaje.

El voltaje máximo nominal de un interruptor es el máximo valor rms de voltaje para el cual el Interruptor fue diseñado.

El factor de rango de voltaje, K es el cociente entre el máximo valor de voltaje y el límite inferior del rango de voltaje de operación. K determina el rango de voltajes en el cual, el producto corriente de corto circuito nominal x voltaje de operación es constante.

$$\frac{Vmáx}{K} \leq V_{op} \leq Vmáx \Rightarrow I_{int} = \left[\frac{V_{max}}{V_{op}} \right] I_{int\ nom} ;$$

$$V_{op} \leq \frac{Vmáx}{K} \Rightarrow I_{int} = K * I_{int\ nom}$$

Ejemplo:

Interruptor clase 69 kV. K = 1.21, I cont nominal=1200A, I int nom=19 kA, Vmáx=72.5 kV
Determinar la capacidad interruptiva si el voltaje de operación del sistema es 66 kV.

$$I_{máx} = K * I_{int\ nom} = 22.99kA; V_{mín} = \frac{72.5}{1.21} \approx 60kV$$

$$I_{int@ 66kV} = \left[\frac{72.5}{66} \right] 19kA = 20.87kA$$

Método E/X

Desprecia Resistencia, carga estática, corriente de prefalla.

$$Xg'=Xg'', X_m'=1,5 X_m''$$

Se desprecia el efecto de los motores de inducción menores de 50 HP y para los motores de mayor tamaño se usan factores de multiplicación, los cuales se aplican al valor de X_d'' .

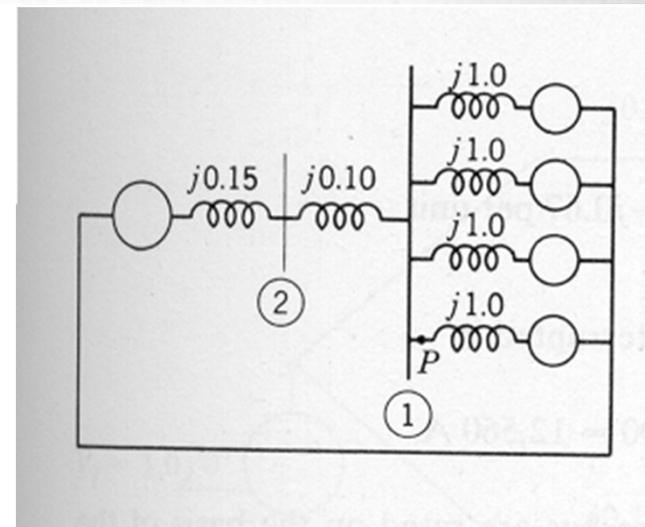
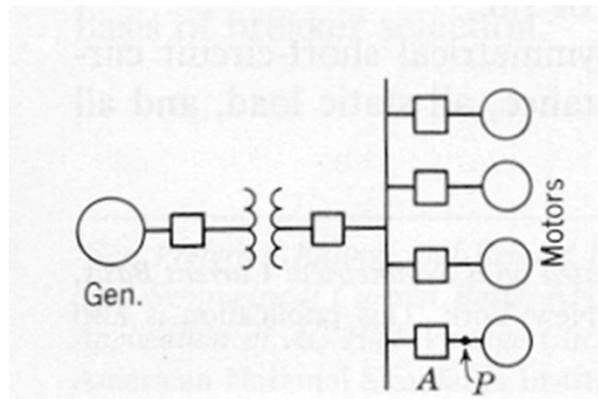
$X/R < 15 \Rightarrow$ I interruptiva del dispositivo \geq I_{sc} calculada.

$X/R > 15$ o desconocida \Rightarrow I interruptiva del dispositivo $\geq 1,25$ I_{sc} calculada.

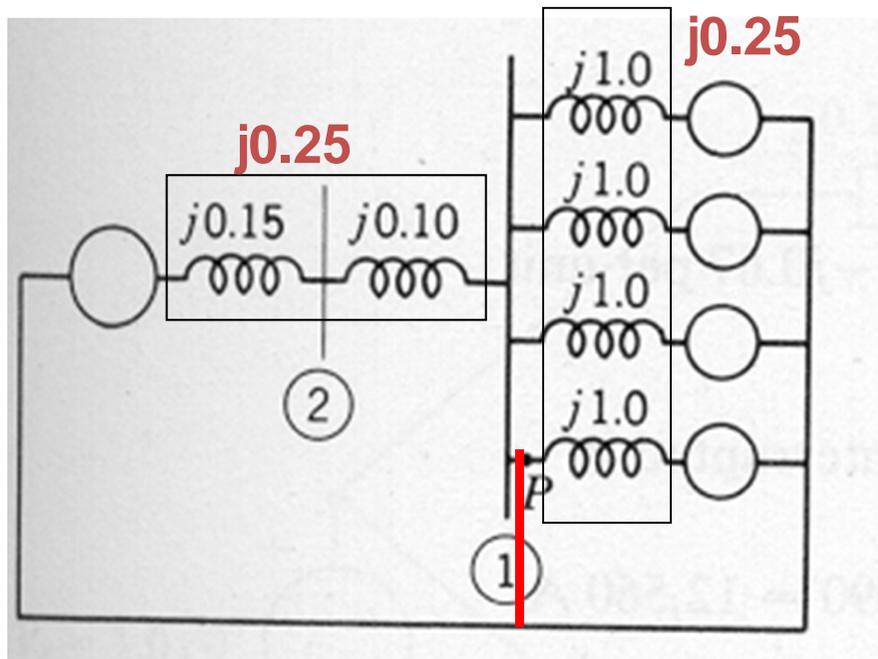
La guía de aplicación de ANSI especifica un método corregido para tomar en cuenta las constantes de tiempo de decaimiento de las componentes de CA y CD cuando $X/R > 15$. Este método también toma en cuenta la velocidad de operación de los interruptores.

Ejemplo de cálculo de capacidad momentánea e interruptiva

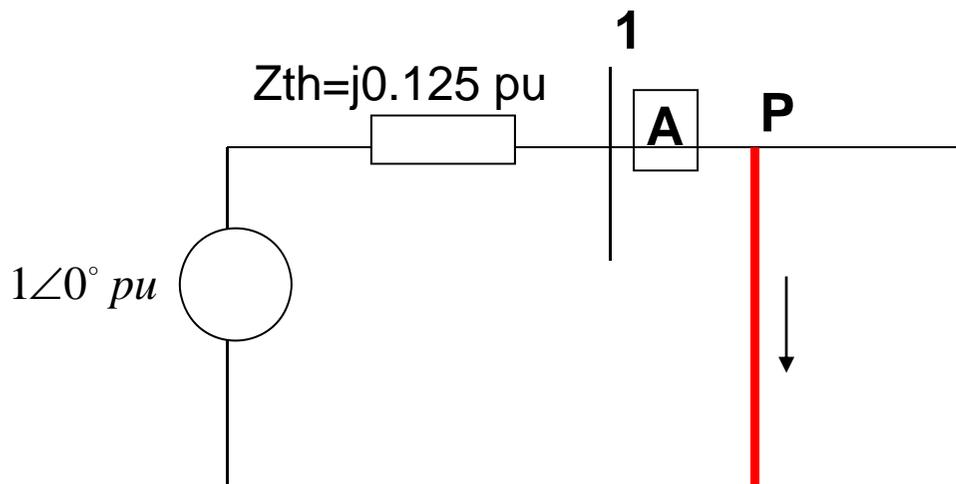
Example 10.7. A 25,000-kVA 13.8-kV generator with $X_d'' = 15\%$ is connected through a transformer to a bus which supplies four identical motors, as shown in Fig. 10.13. The subtransient reactance X_d'' of each motor is 20% on a base of 5000 kVA, 6.9 kV. The three-phase rating of the transformer is 25,000 kVA, 13.8/6.9 kV, with a leakage reactance of 10%. The bus voltage at the motors is 6.9 kV when a three-phase fault occurs at point P . For the fault specified, determine (a) the subtransient current in the fault, (b) the subtransient current in breaker A , and (c) the symmetrical short-circuit interrupting current (as defined for circuit-breaker applications) in the fault and in breaker A .



Ejemplo de cálculo de corrientes de corto circuito y de capacidad de los interruptores
 Cálculo de capacidad momentánea

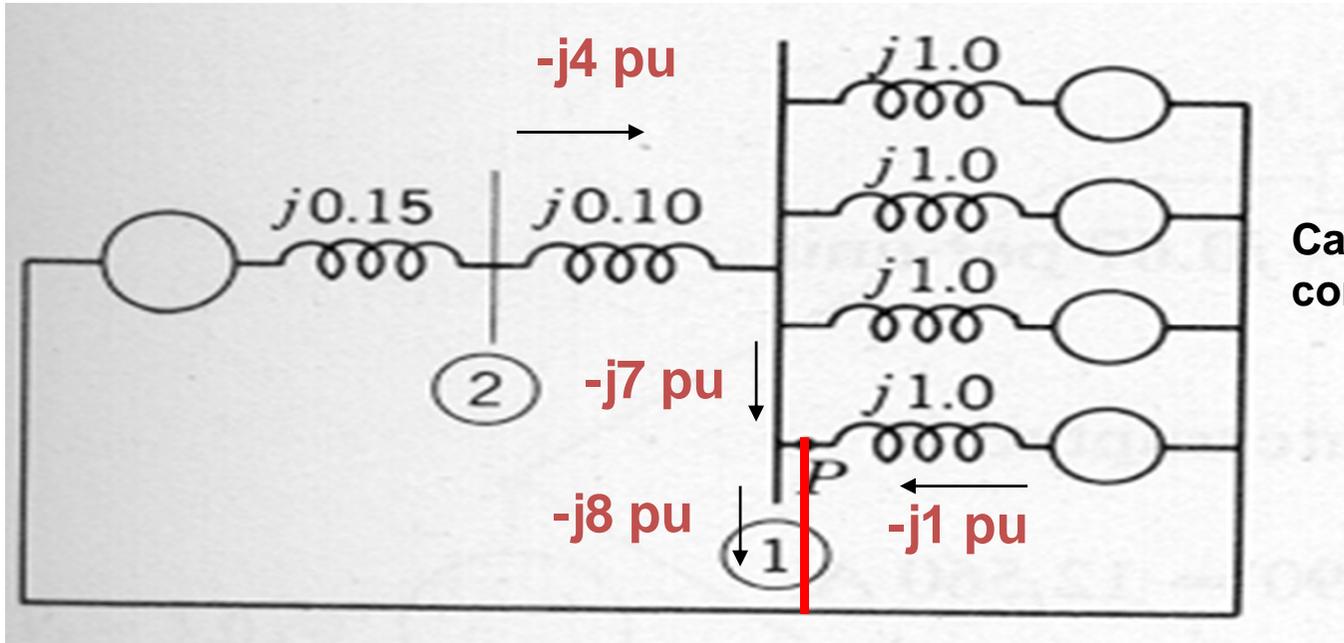


$$I_g'' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.25} = -j4 pu$$

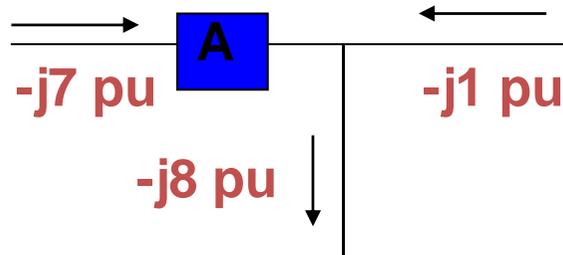


$$I_{M1}'' = I_{M2}'' = I_{M3}'' = I_{M4}'' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j1} = -j1 pu$$

$$I_f'' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.125} = -j8 pu$$



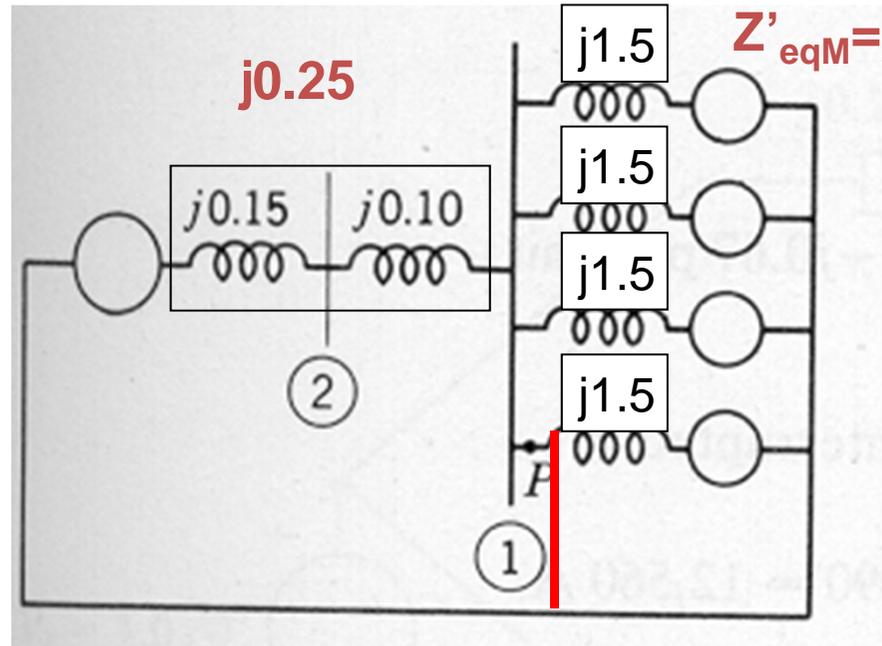
Cada motor contribuye con -j 1 pu



Capacidad momentánea, calculada Usando reactancias subtransitorias

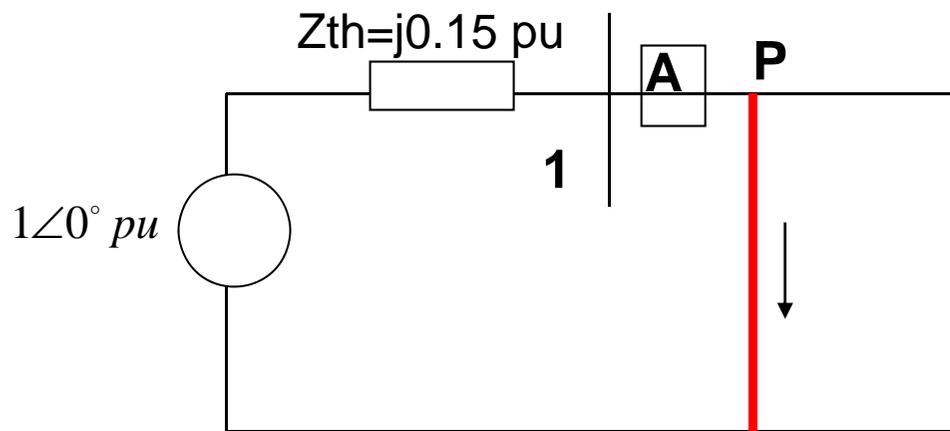
$$I_A'' = 7 \left[\frac{25}{\sqrt{3}(6.9)} \right] = 14.63 \text{ kA}$$

Ejemplo de cálculo de corrientes de corto circuito y de capacidad de los interruptores
 Cálculo de capacidad interruptiva (Para los motores usar reactancias transitorias en lugar de subtransitoria, $X_M' = 1.5 X_M''$)



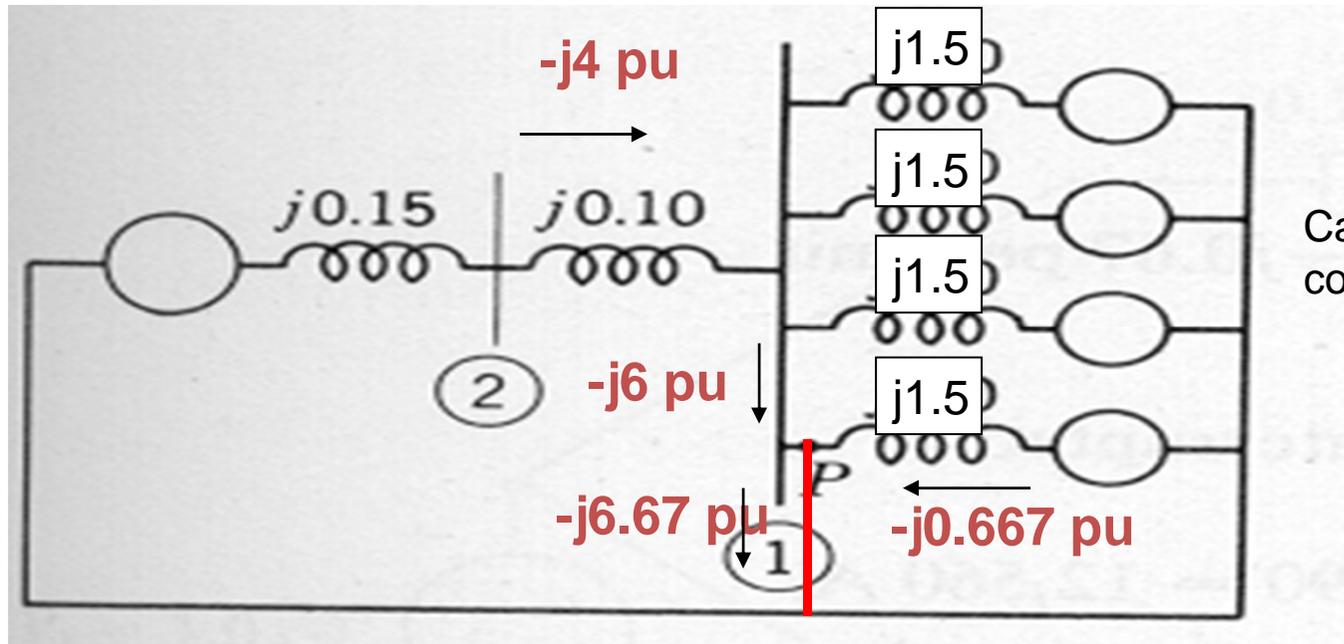
Utilizando X_M' en lugar de X_M''

$$I_g'' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.25} = -j4 pu$$

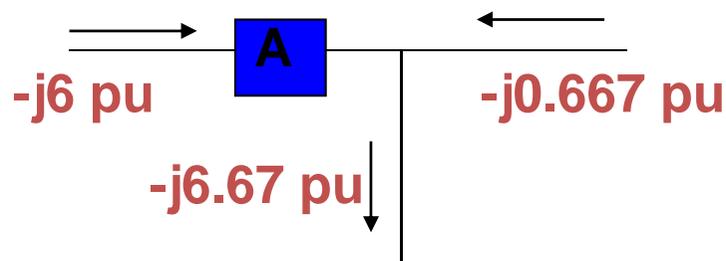


$$I_{M1}' = I_{M2}' = I_{M3}' = I_{M4}' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j1.5} = -j0.667 pu$$

$$I_f' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.15} = -j6.67 pu$$



Cada motor contribuye con $-j0.667$ pu

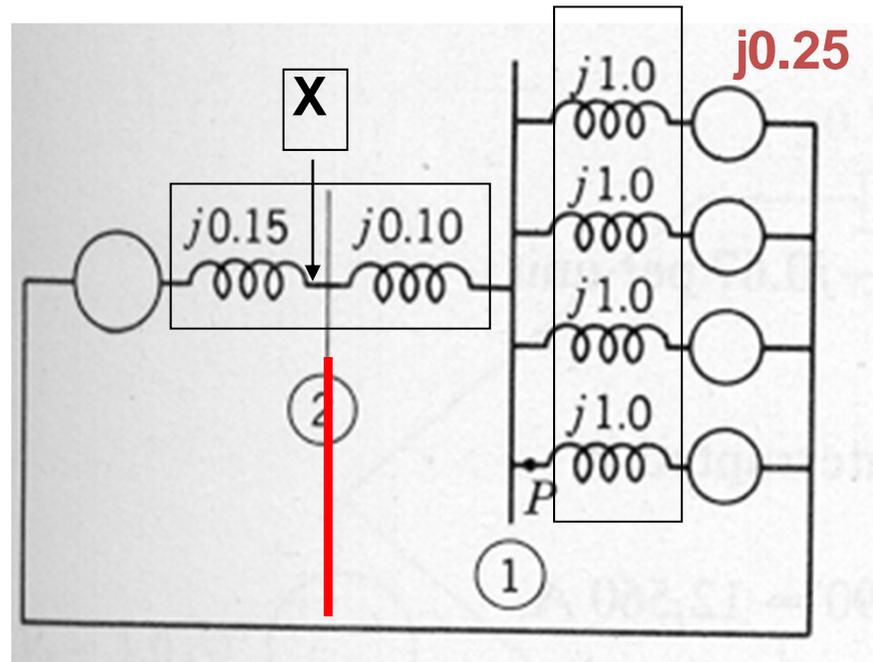


Capacidad interruptiva, calculada usando reactancias transitorias para los motores

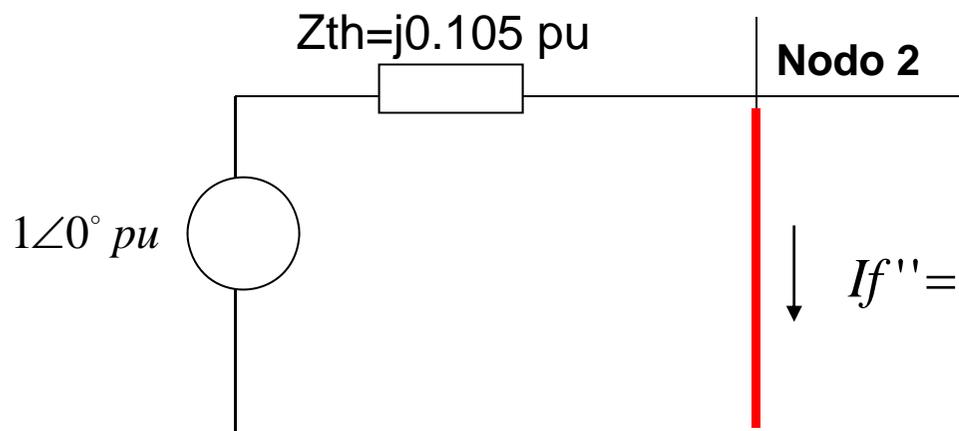
$$I_A' = 6 \left[\frac{25}{\sqrt{3}(6.9)} \right] = 12.56 \text{ kA}$$

La capacidad interruptiva es menor a la capacidad momentánea

Ejemplo de cálculo de corrientes de corto circuito y de capacidad de los interruptores
 Cálculo de capacidad momentánea (Falla en el **nodo 2**)



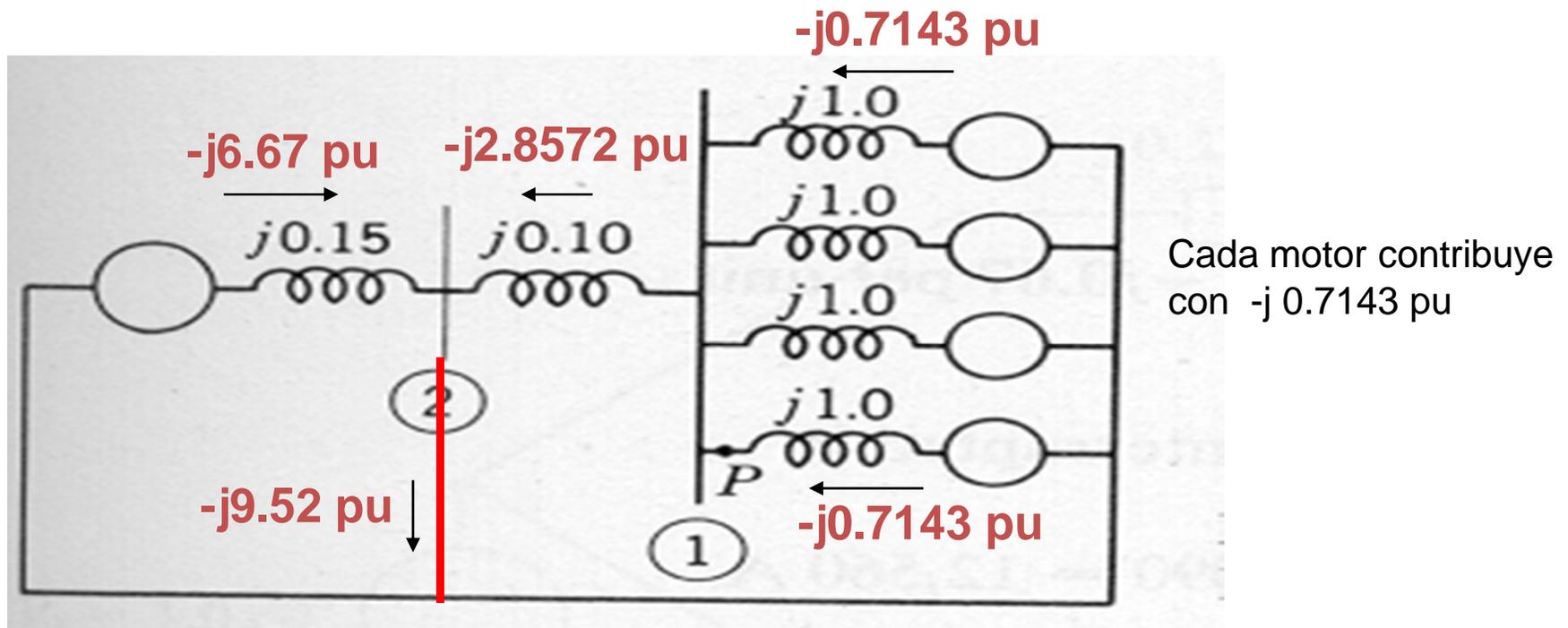
$$I_g'' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.15} = -j6.67 \text{ pu}$$



$$I_x'' = 6.67 \left[\frac{25}{\sqrt{3}(13.8)} \right] = 6.98 \text{ kA}$$

$$I_f'' = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0.105} = -j9.52 \text{ pu}$$

Nota: Interruptor X está
 En zona con $V_{base} = 13.8 \text{ kV}$



$$Y_{bus} = j \begin{bmatrix} -16.67 & 10 \\ 10 & 14 \end{bmatrix} pu$$

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.105 & 0.075 \\ 0.075 & 0.125 \end{bmatrix} pu$$

$$V_j = V_{jpf} \left[1 - \frac{Z_{jf}}{Z_{ff}} \right]$$

$$V_2 = 1 \angle 0 \left[1 - \frac{j0.075}{j0.105} \right] = 0.2857 \angle 0 pu$$

$$IM'' = \frac{1 - 0.2857}{j1} = -j0.7143 pu$$



Universidad Nacional del Centro del Perú
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



MATERIAL DE ENSEÑANZA

094C Protección de Sistemas de Potencia

¡Muchas Gracias!

© Waldir Astorayme Taipe
wastorayme@hotmail.com