

Coordinación del Aislamiento

Conceptos

Prof. Juan Bautista R.
UNI - FIEE

Exposición para uso estrictamente académico y por tanto no se comercializa.

Sobretensión

Tensión anormal existente entre fase y tierra o entre fases, cuyo valor pico es superior al valor pico de la máxima tensión de operación normal de un equipo (V_m) o sistema (V_s).

Tabla con las tensiones máximas para el equipo según su respectiva tensión nominal:

Tensiones Nominales del Sistema. (kV)		Tensión Máxima para el Equipo. (kV)
66	69	72.5
110	115	123
132	138	145
150	161	170
220	230	245
275	287	300
330	345	362
380	400	420
500		525
700 a 750		765

.....Sobretensión

Los valores en p.u. de las amplitudes de las sobretensiones estarán referidos al valor pico fase-tierra de la tensión más elevada del sistema (V_s), así:

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_s = 1.0 \quad pu$$

La sobretensión tiene un carácter aleatorio y variable en el tiempo es difícil de caracterizar, sus parámetros: duración, amplitud y efectos en el sistema son sólo una aproximación estadística.

Una sobretensión puede destruir el material y en consecuencia producir, discontinuidad del servicio eléctrico.



Clasificación de las Sobreensiones

En función de su origen:

Las sobreensiones pueden producirse por factores externos o internos a la red.

- **A frecuencia industrial.**
- **De maniobra.**
- **Atmosféricas.**

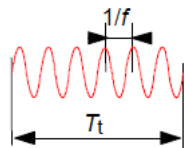
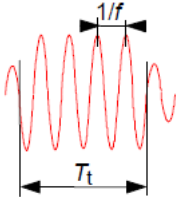
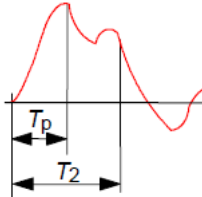
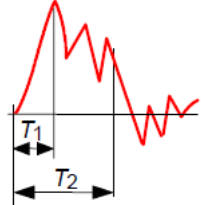
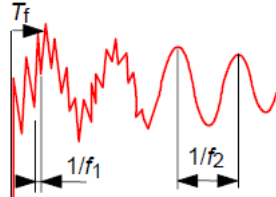
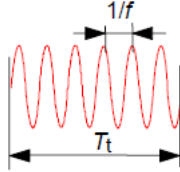
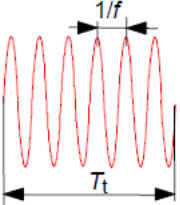
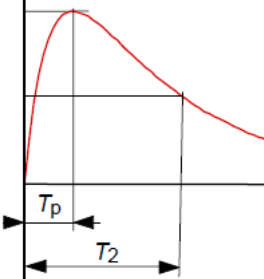
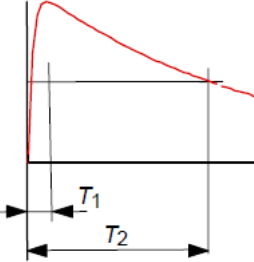


Clasificación de las Sobreteniones

En función de la forma de onda y tiempo de duración son:

- **Permanentes (continuas).**
- **Temporales.**
- **De frente lento.**
- **De frente rápido.**
- **De frente extra rápido.**



Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes	 $f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a
^a To be specified by the relevant apparatus committees.					

Sobretensión permanente de frecuencia industrial

Se origina bajo condiciones normales de operación, por tanto: $f = 60\text{Hz}$ o próxima y al ser permanente su duración puede corresponder al tiempo de vida del equipo.

En la práctica el valor rms de estas tensiones pueden variar de un punto a otro del sistema, sin embargo para efectos de estudios de coordinación de aislamiento se asume como constante e igual al de la tensión más elevada de la red (V_s), que a su vez, para niveles de Alta Tensión corresponde a la tensión más elevada para equipos (V_m).



Sobretensiones temporales

De duración relativamente larga y de frecuencias cercanas a la fundamental, se consideran como de frecuencia industrial, y amplitudes inferiores a las de otros tipos de sobretensión.

Se originan debido a fallas a tierra u operaciones de maniobra como por ejemplo:

- **rechazo de carga,**
- **efecto Ferranti y**
- **efectos de resonancia y ferroresonancia,**

De acuerdo al origen de la sobretensión se definen sus parámetros característicos como: amplitud, forma de onda y duración.



Causas que originan obretensiones temporales

FALLAS A TIERRA:

Es la más común: CC 1ϕ (caída de un conductor de fase).

Menos probables: las fallas bifásicas o trifásicas en las que la tierra no está involucrada.

La amplitud de las sobretensiones generadas depende de la conexión del neutro a tierra en el sistema y de la ubicación de la falla, con el neutro conectado a tierra las amplitudes de las sobretensiones son menores.



La magnitud depende del factor de falla a tierra (***k***),

$$k = \frac{\left(\begin{array}{c} \textit{Tensión mas elevada} \\ \textit{en las fases no falladas} \\ \textit{en presencia de falla} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \textit{Tensión en condiciones} \\ \textit{normales de operación} \\ \textit{en el punto de falla} \end{array} \right)}$$

tomando en cuenta valores de voltaje fase-tierra, rms y a frecuencia industrial.

k depende sobretodo del tipo de conexión a tierra del neutro.

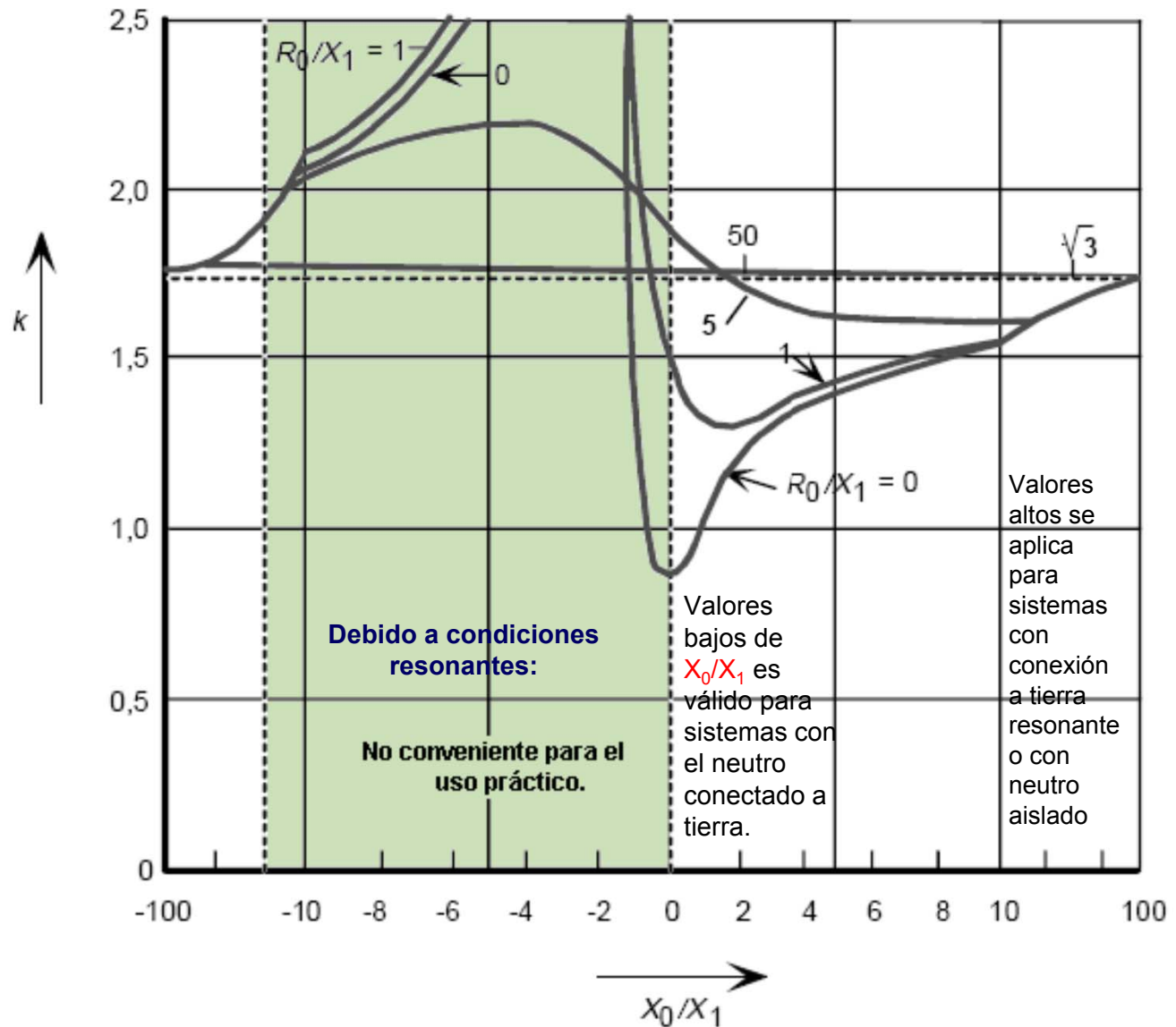


El factor de falla a tierra se puede determinar en función de las impedancias de secuencia positiva ($Z_1 = R_1 + jX_1$) y cero ($Z_0 = R_0 + jX_0$) del sistema, tomando en cuenta la resistencia de falla R_f . La Figura muestra valores de k en función de las relaciones de X_0/X_1 y R_0/X_1 asumiendo que $R_1 \ll X_1$, y que por lo tanto $R_1/X_1 \approx 0$. También se asume que la resistencia de falla a tierra es muy pequeña, esto es $R_f \approx 0$.

Se pueden identificar tres rangos de factores de falla a tierra, en función de los valores de la relación: $\frac{X_0}{X_1}$

y de acuerdo a la característica de conexión a tierra del sistema





Factor de falla a tierra (k) en función de X_0/X_1 y $R_1/X_1 = R_f = 0$

El rango de valores altos de X_0/X_1 , positivos o negativos, se aplica para sistemas con conexión a tierra resonante o con neutro aislado.

□ El rango de valores positivos y bajos de X_0/X_1 es válido para sistemas con el neutro conectado a tierra.

□ El rango de valores negativos y bajos de X_0/X_1 , que corresponde a la zona sombrada en la figura, no es conveniente para aplicaciones prácticas debido a condiciones resonantes.

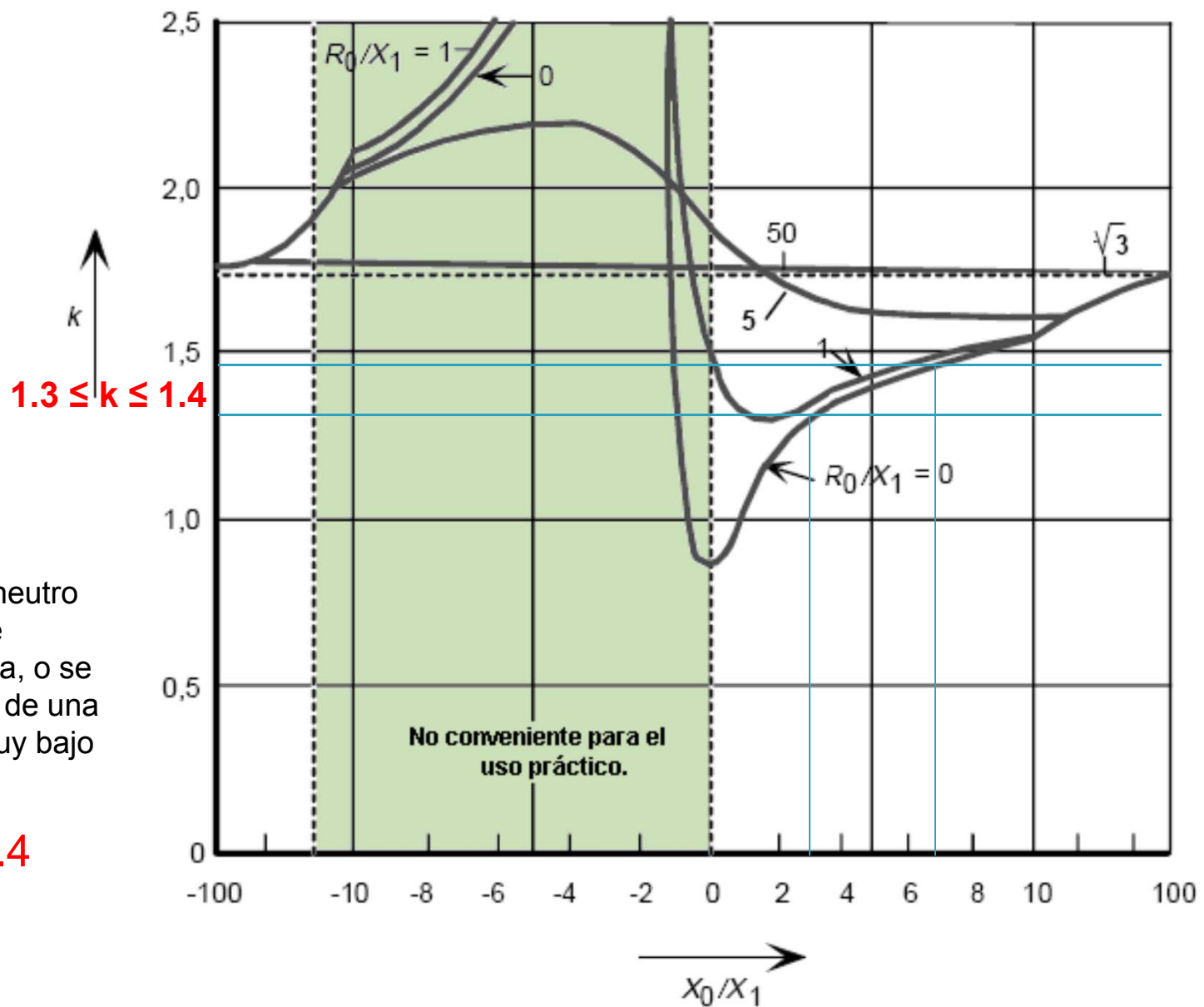


En **EAT o UAT**, normalmente el neutro está sólidamente conectado a tierra, o se conecta a través de una resistencia de muy bajo valor.

Entonces:

$$1.3 \leq k \leq 1.4$$





En **EAT o UAT**,
normalmente el neutro
está sólidamente
conectado a tierra, o se
conecta a través de una
resistencia de muy bajo
valor. Entonces:

$$1.3 \leq k \leq 1.4$$

El tiempo de permanencia de la sobretensión = al tiempo de duración de la falla, esto es, hasta que la falla sea despejada.

En sistemas con neutros conectados a tierra la permanencia de la sobretensión es menor a 1 segundo.

$$T_{\text{falla}} < 1 \text{ seg}$$

En sistemas con el neutro conectado a tierra a través de un reactor (sistema con conexión de neutro a tierra resonante) y con despeje de falla, *la duración de la sobretensión es menor a 10 segundos.*

Mientras que *en sistemas sin despeje de fallas a tierra la sobretensión puede estar presente por varias horas*, razón por la cual se podría definir al voltaje continuo de frecuencia industrial como el valor de la sobretensión temporal mientras dura la falla.



Rechazo de Carga:

Podría suscitarse ante una **operación indebida de un interruptor**, dando como resultado la elevación del voltaje en todo el sistema.

Esto se debe a que ante la pérdida súbita de carga, el flujo de corriente disminuye, por lo tanto el efecto capacitivo de las líneas se incrementa y la caída de tensión a través de las impedancias se reduce.



Rechazo de Carga....

Las sobretensiones temporales debidas al rechazo de carga **son función de la carga rechazada**, de la disposición del sistema después de la desconexión y de las características de las centrales de generación involucradas, tales como las regulaciones de voltaje y velocidad de los generadores que actuarán para disminuir los valores de las sobretensiones intentando llevar al sistema a condiciones normales de operación.



Incrementos de voltaje considerables ocurren ante un súbito rechazo de carga en el extremo alejado de una línea larga que se alimenta por su otro extremo.

Bajo estas circunstancias se produce el efecto Ferranti, que se manifiesta por una onda de tensión de crecimiento lineal a lo largo de la línea, dando como resultado que la tensión en el extremo abierto y sin carga sea mayor que la tensión en el extremo de la fuente.

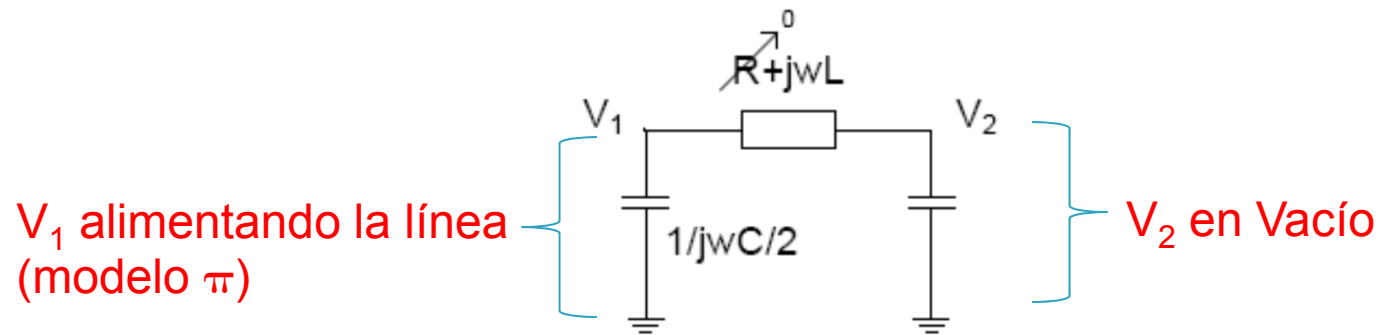


Los equipos más afectados por estas sobretensiones son los de la subestación del extremo de la línea en el cual ocurrió el rechazo de carga.

En sistemas con líneas relativamente cortas las sobretensiones generadas son bajas.



La Figura muestra el modelo π de una línea de transmisión, de donde al aplicar un divisor de tensión se puede obtener la relación entre el voltaje en el extremo sin carga y el voltaje en el extremo de alimentación de una línea bajo efecto Ferranti



Modelo π de una línea de transmisión para el cálculo de la relación V_2/V_1 .



Considerando que $R \ll \omega L$, se puede despreciar la resistencia serie R y entonces se tiene:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{2}j\omega C}}{\frac{1}{\frac{1}{2}j\omega C} + j\omega L}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2}}$$



Donde:

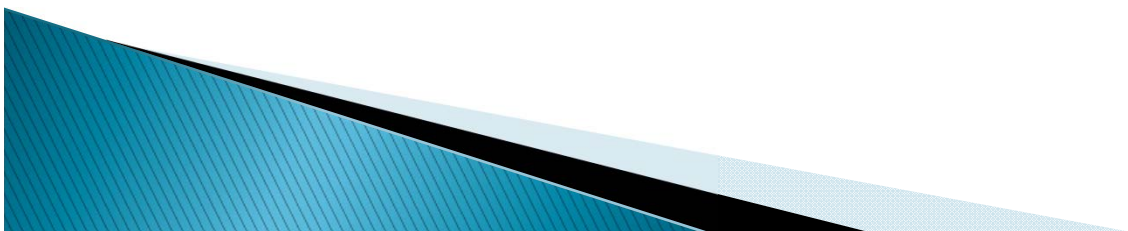
V_2 es el voltaje en el extremo abierto o sin carga de la línea.

V_1 es el voltaje en el extremo dónde se está alimentando a la línea.

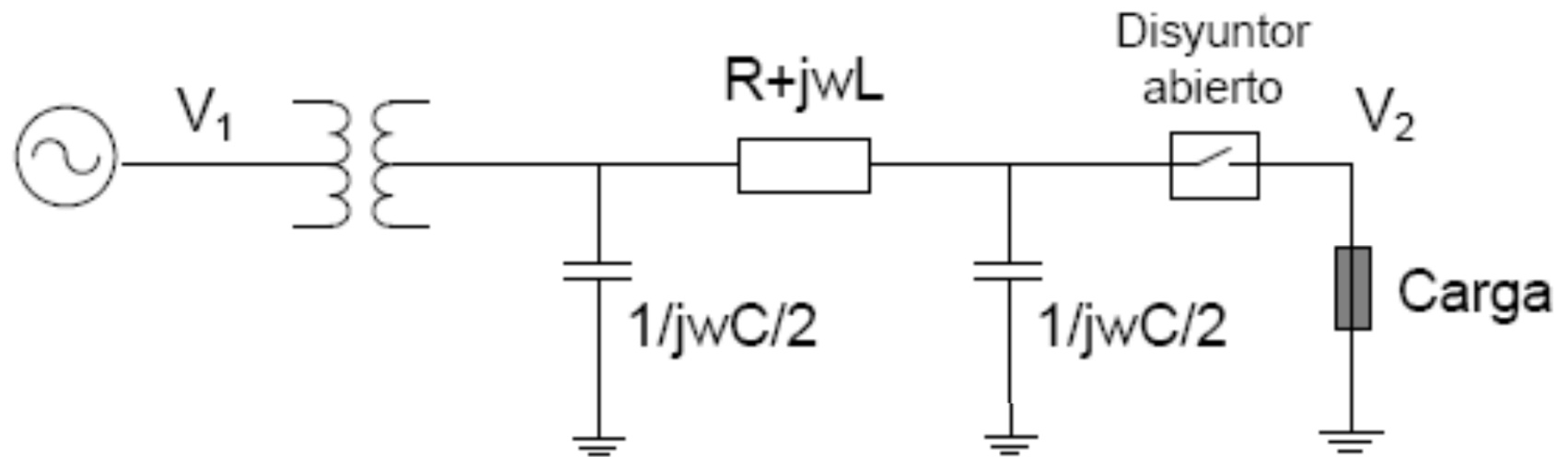
L es la inductancia total de la línea en función de su longitud.

C es la capacitancia total de la línea en función de su longitud.

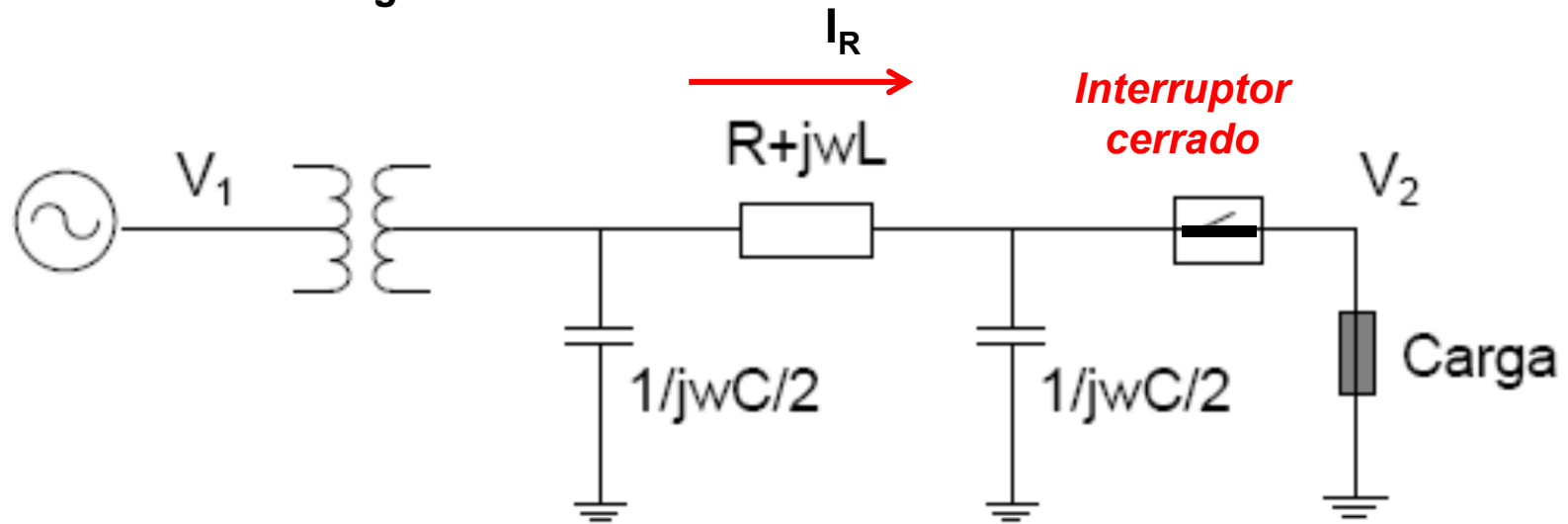
La relación de V_2/V_1 debido al efecto capacitivo de la línea en vacío será siempre mayor que 1.



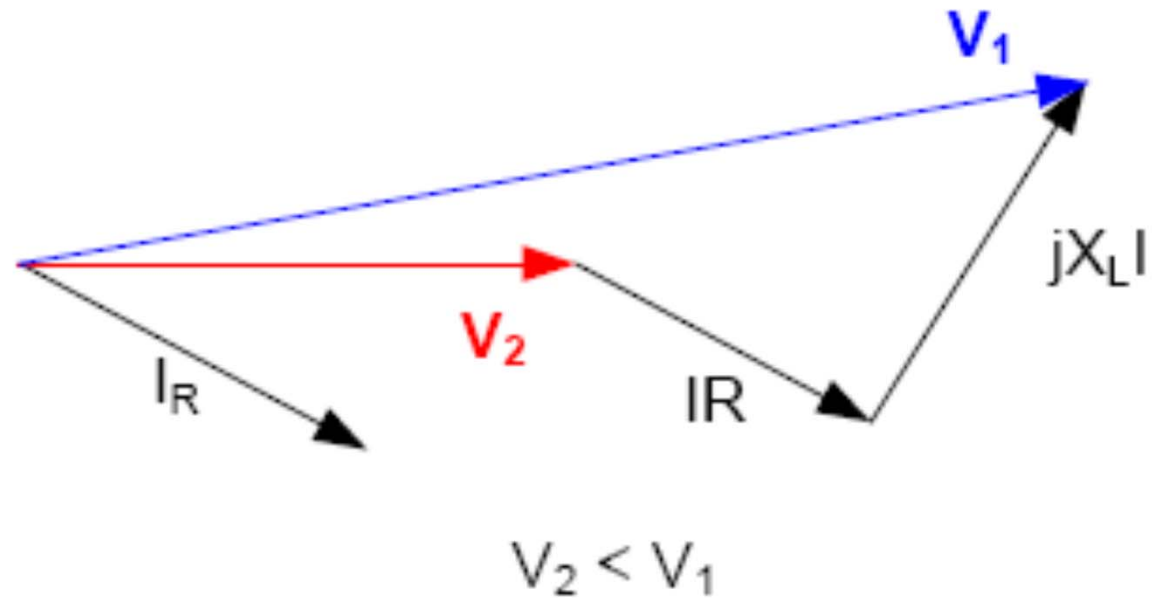
Rechazo de carga: Sistema radial.



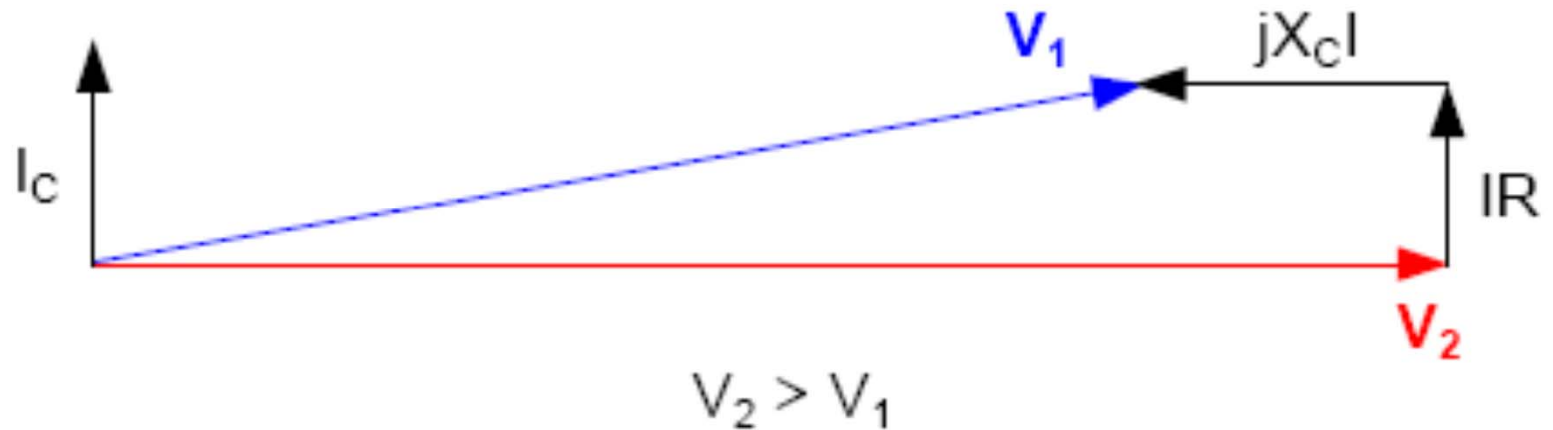
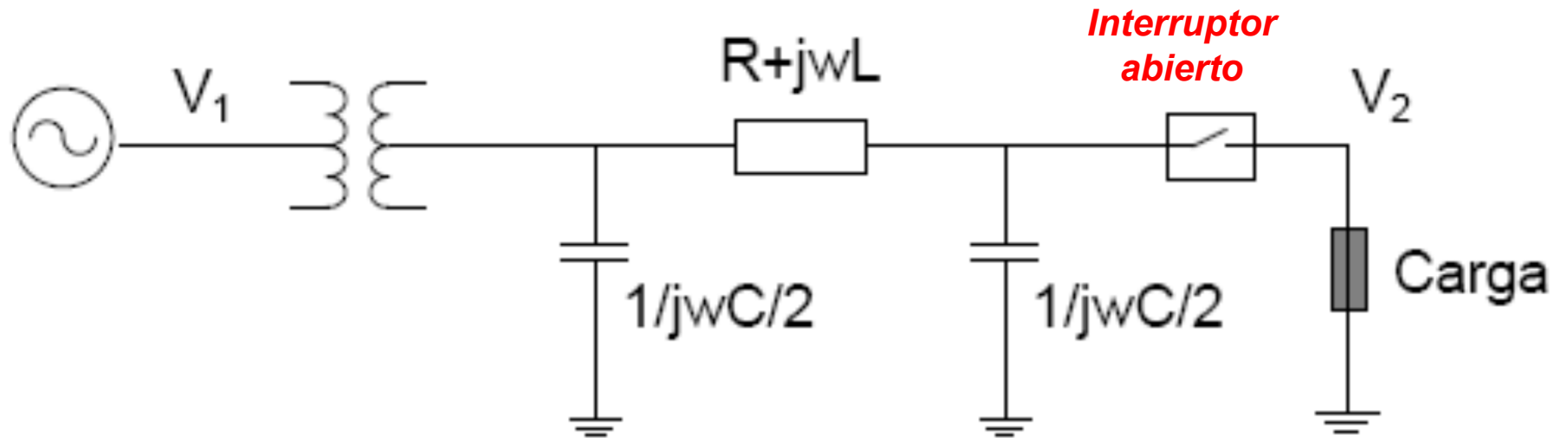
Rechazo de carga: Sistema radial.



Antes del Rechazo de carga.



Rechazo de carga: Sistema radial.



Después del Rechazo de carga.

En sistemas no muy extensos un rechazo de toda la carga puede generar sobretensiones fase-tierra con ***amplitudes $< 1.2 \text{ p.u.}$*** , y cuya duración puede ser de varios minutos dependiendo del equipo de control de voltaje asociado.

En sistemas extensos un rechazo de toda la carga puede generar sobretensiones fase-tierra cuyas ***amplitudes $\sim 1.5 \text{ pu}$*** , e incluso superiores en presencia de efecto Ferranti o resonancia. La duración de estas sobretensiones puede ser de algunos segundos.



Las sobretensiones debidas al rechazo de carga son iguales para las tres fases del sistema y se controlan mediante compensación reactiva.

El uso de reactores en derivación, capacitores en serie o compensadores estáticos, reducen la elevación del voltaje.



Resonancia y Ferroresonancia:

El fenómeno de resonancia ocurre cuando un circuito que está conformado por inductores y capacitores lineales es alimentado por un voltaje con una frecuencia aproximadamente igual a la frecuencia natural del sistema, en este caso existe un único punto de resonancia.



Resonancia y Ferroresonancia....

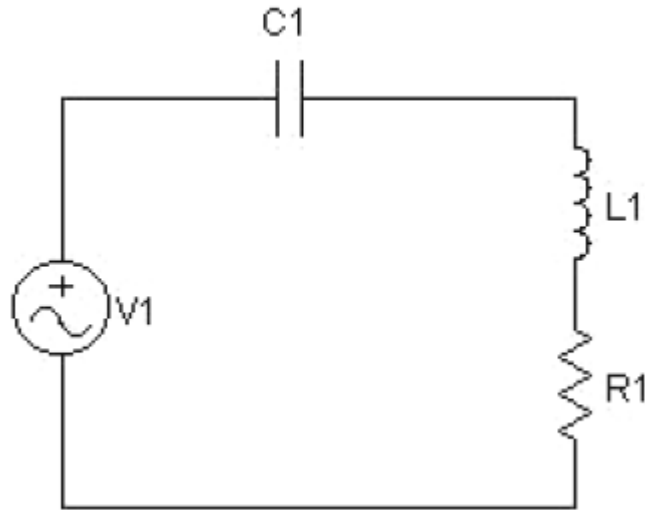
La ferroresonancia es un fenómeno de resonancia no lineal, es decir cuando se tiene por ejemplo una inductancia variable lo cual ocasionará que se puedan presentar varios puntos de resonancia y por ende una mayor probabilidad de ocurrencia.

Este tipo de fenómeno puede afectar a las redes eléctricas puesto que provoca la presencia de armónicos anormales y sobretensiones transitorias o permanentes que ponen el peligro al material eléctrico.



Nota aparte sobre Resonancia

Para el circuito serie:



$$\bar{Z} = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)$$

Si:

$$\omega L > \frac{1}{\omega C},$$

Se comporta como un circuito inductivo

$$\omega L < \frac{1}{\omega C}.$$

Se comporta como un circuito capacitivo

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

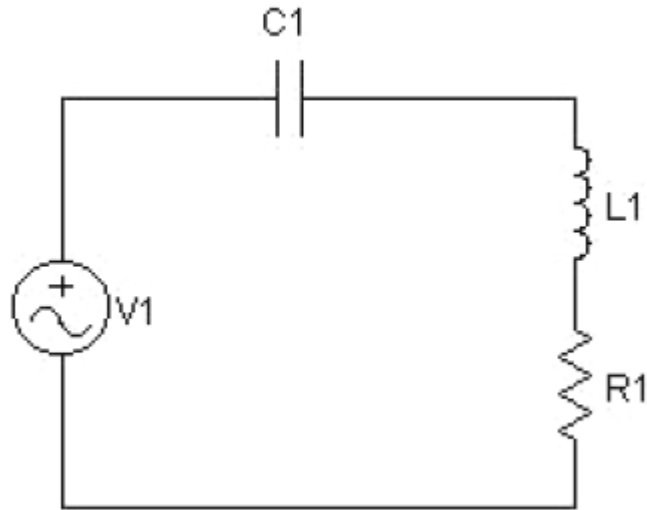
Para este caso, el circuito se encontrará en resonancia, ya que la impedancia será resistiva pura.(tensión en fase con la corriente).

Este tipo de circuito se denomina también *Resonante en Tensiones*, dado que los módulos de las tensiones en los componentes reactivos, son iguales pero opuestos en fase y se cancelan.

En este caso la CORRIENTE ES MAXIMA

Nota aparte sobre Resonancia

Para el circuito serie:



$$\bar{Z} = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

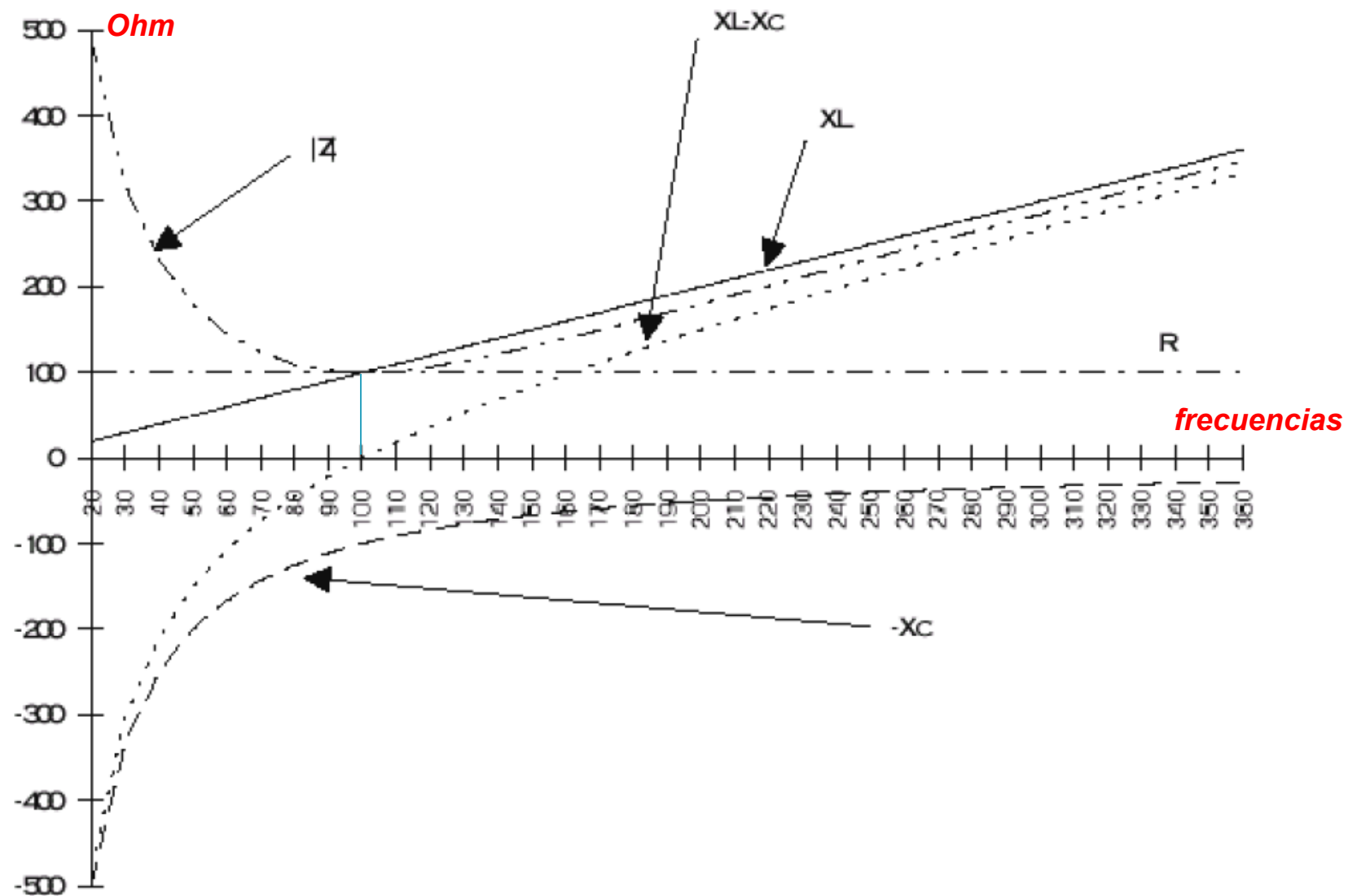
Frecuencia de resonancia

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$



Nota aparte sobre Resonancia



Nota aparte sobre Resonancia

En resonancia se cumple que: $|\bar{V}_C| = |\bar{V}_L|$

$$|\bar{V}_L| = \omega L |\bar{I}|, \text{ pero } |\bar{I}| = \frac{|\bar{V}|}{R}$$

$$|\bar{V}_L| = \frac{\omega_0 L}{R} |\bar{V}|$$

$$\bar{Z} = R.$$

Definamos:

$$Q_0 = \frac{|V_L|}{|V|} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{X_L}{R} \quad \text{factor de selectividad o simplemente Q del circuito.}$$

Es conveniente que los circuitos resonantes, en general, tengan un Q elevado, pues su comportamiento será mucho más dependiente de la frecuencia en la vecindad de la resonancia. Esto sucederá cuando la resistencia sea pequeña. El factor Q se suele llamar también *factor de sobretensión* o también *factor de calidad*.

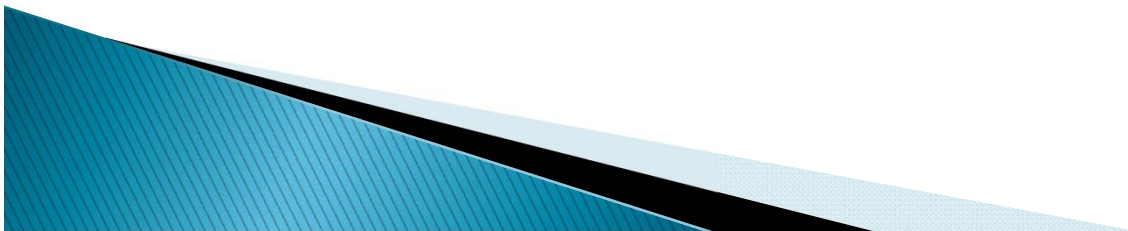
Sigue.... verlo

La ferresonancia se produce, entonces, cuando se tiene las condiciones propicias:

Una inductancia no lineal (transformadores de potencia, transf. Tipo inductivos y reactancias en derivación) con circuito magnético saturable, un condensador (cables, líneas largas, Transf de tensión tipo capacitivos, capacitancias serie o en derivación para compensación) y una fuente de tensión.



Esto hace que las redes eléctricas sean susceptibles de presentar configuraciones favorables para provocar el fenómeno de la ferorrresonancia.



La ferrorresonancia aparece, principalmente

- con la conexión o desconexión de transformadores o cargas,
- aparición o despeje de fallas y
- trabajos bajo tensión,

Que son eventos en los que existe la posibilidad de una transición brusca de un estado estable normal (sinusoidal a frecuencia de red) a otro estado estable ferrorresonante caracterizado por fuertes sobretensiones y por importantes tasas de armónicos peligrosas para los equipos.



Las sobretensiones temporales debido a resonancia y ferroresonancia pueden alcanzar valores muy altos.

Sin embargo debido a que en un sistema de potencia **se debe prevenir y limitar las sobretensiones de esta naturaleza, éstas no se consideran para la selección de pararrayos ni para el diseño del aislamiento.**



¿Cómo limitar las sobretensiones temporales debido resonancia y ferroresonancia?

Desintonizando al sistema de la frecuencia de resonancia.

¿y cómo se logra esto?

1. Cambiando la configuración del sistema, o
2. *Utilizando resistencias damping* (que se coloca en paralelo o en serie con el circuito resonante en serie para reducir el factor Q, o resistencia que se coloca para aumentar la amortiguación).



De lo analizado:

*En sistemas con el neutro sólidamente conectado a tierra la sobretensión temporal de mayor amplitud y por tanto la más severa es la originada por **rechazos de carga.***



¿Si se presentan sobretensiones temporales simultáneas?

por ejemplo:

Falla a tierra junto con rechazo de carga u otras combinaciones,

Resultado: la necesidad de pararrayos con grados de protección superiores y como consecuencia niveles de aislamiento también superiores.

Esto se justifica técnica y económicamente solamente si la probabilidad de ocurrencia simultánea es suficientemente alta.

En la práctica la probabilidad de que las combinaciones más probables ocurran es baja, por lo tanto no se consideran.



Sobretensiones de Frente lento:

Se originan ante la operación de equipos de maniobra o súbitas modificaciones en la topología de la red eléctrica.

Ejemplos:

- energización y re-cierre de una línea,
- inicio y despeje de fallas,
- rechazos de carga y
- establecimiento o interrupción de corrientes capacitivas o inductivas.



Sobretensiones de Frente lento....

También se generan por descargas atmosféricas sobre las líneas de transmisión en puntos alejados a la subestación.

Todos estos eventos provocan fenómenos transitorios que se traducen en una onda de sobretensión caracterizada por tener un frente de onda de algunas decenas a miles de microsegundos.



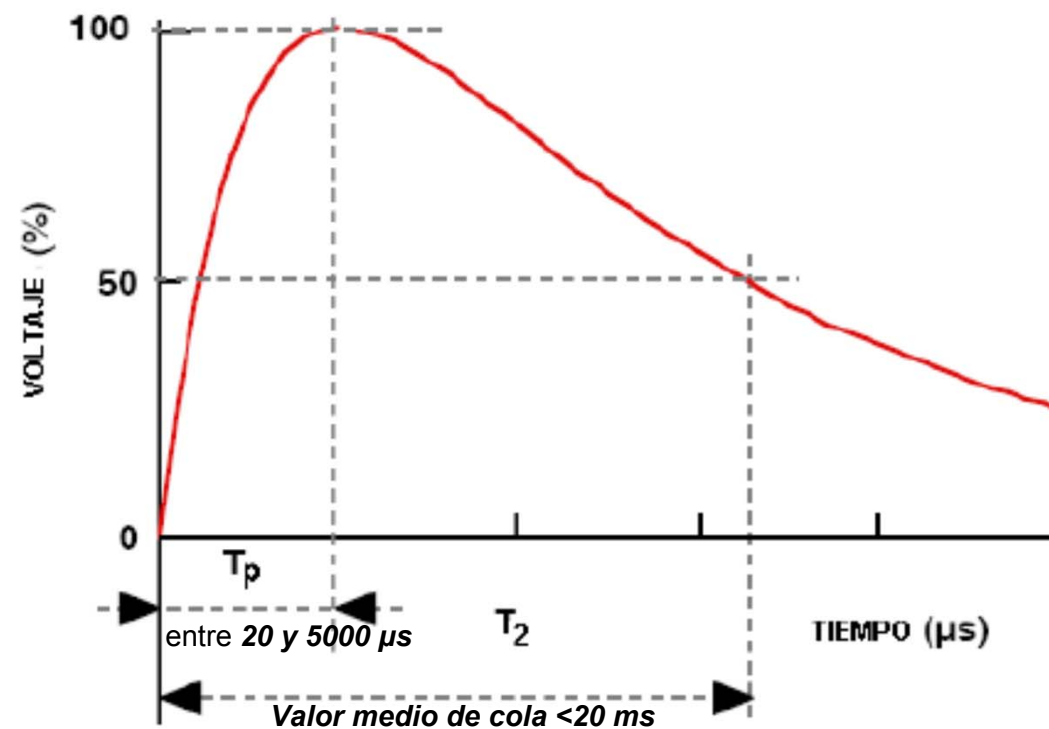
Sobretensiones de Frente lento....

Es así que los voltajes de prueba estandarizados de impulso tipo maniobra tienen un **frente de onda** de entre *20 y 5000 μ s* y un *tiempo al valor medio de cola menor a 20 ms.*



Onda típica.

Son de mayor magnitud que las sobretensiones temporales.



Forma de onda de sobretensión tipo maniobra

Causas que originan sobretensiones de Frente lento

Energización y recierre de líneas 3 ϕ :

Generan sobretensiones en las tres fases de la línea.

Cada cierre o recierre produce tres sobretensiones fase-tierra y por lo tanto tres sobretensiones entre fases.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Al energizar una línea de transmisión en vacío la sobretensión se origina por la discrepancia de polos en el cierre del interruptor (cierre no simultaneo de sus contactos).



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Luego de haber cerrado la primera fase se generan ondas de tensión en las otras dos fases, producto de su acoplamiento.

Estas ondas *se propagan a lo largo de la línea* hasta alcanzar su otro extremo, en donde al chocar con la impedancia de circuito abierto, se reflejan para superponerse con las ondas que continúan propagándose, produciéndose así la sobretensión.



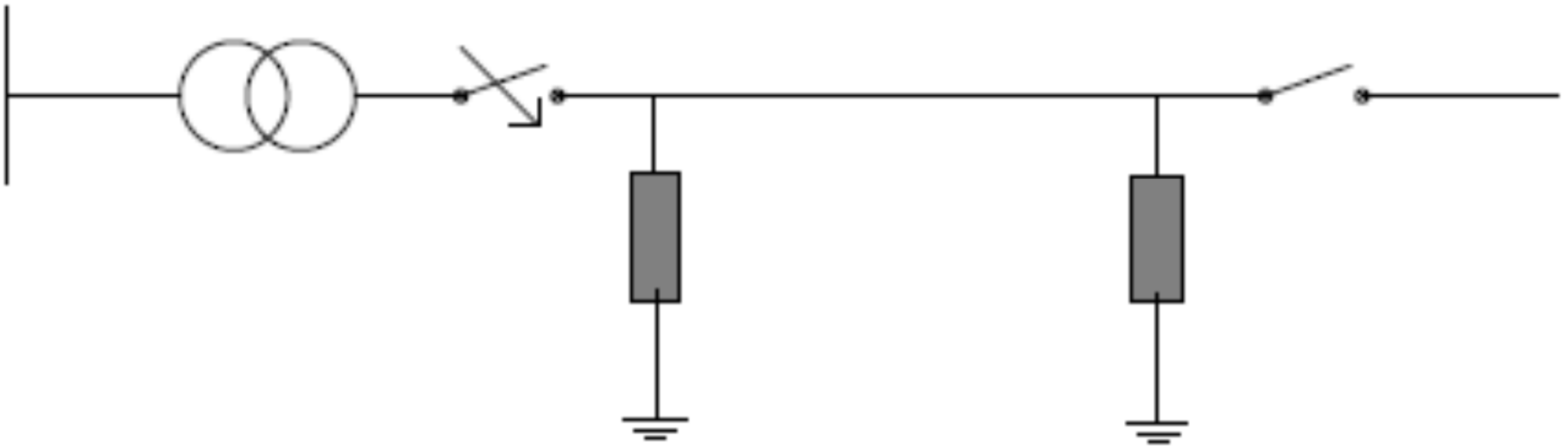
Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

En caso que la línea a energizar no termine en circuito abierto sino en un transformador, el fenómeno se vuelve más complicado debido a las características no lineales de su impedancia y la presencia de armónicos.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Energización de una línea de transmisión en vacío:



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

El recierre de una línea de transmisión tiene por objeto despejar fallas transitorias, y por lo tanto tiene involucrado los procesos de apertura y cierre de los interruptores de línea.

Considerando el caso que el interruptor tenga que desconectar una línea en vacío, debido a la naturaleza capacitiva del circuito al momento de interrumpir la corriente por su paso por cero, la tensión estará pasando por su valor máximo, lo cual provoca que las tres fases queden con una tensión aproximadamente igual al valor pico de la tensión fase – tierra de la fuente de alimentación.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

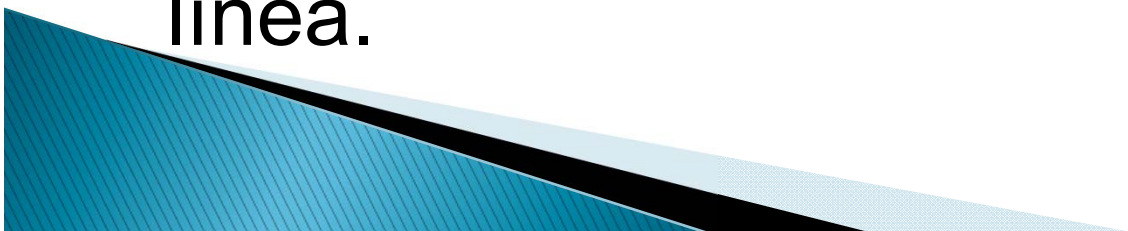
Por consiguiente, como producto de esta maniobra se genera la denominada *“carga atrapada”*, que permanecerá en la línea por largos períodos de tiempo, en el orden de minutos, a no ser que sea drenada por medio de reactores o transformadores de potencial inductivos.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Posterior a la apertura se ejecuta el recierre, que es en donde se pueden generar altas sobretensiones.

Esto ocurre como producto de la gran diferencia de potencial que se puede generar en caso de que el recierre ocurra antes de haber drenado la carga residual o si los polos del interruptor cierran cuando la tensión del sistema tenga polaridad opuesta a la de la línea.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

De aquí que es importante contrastar los tiempos de recierre con el tiempo que tarda la línea en evacuar la carga atrapada.

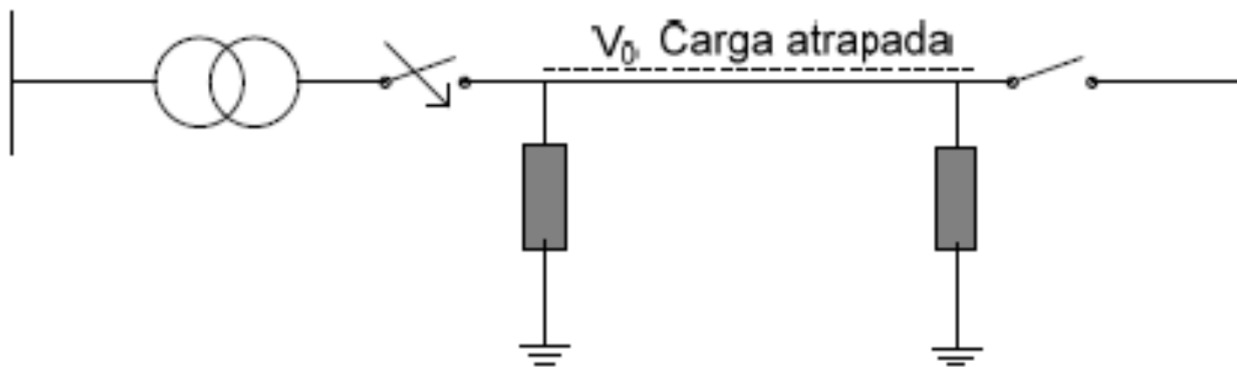
Siendo este último factible de modificar con el uso de reactores o resistencias de preinserción en los interruptores.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Se ilustra el recierre de una línea con carga atrapada.

Las sobretensiones originadas durante el recierre son de mayor amplitud que las originadas en la energización, debido principalmente a la carga atrapada.



Recierre (Energización de una línea con carga residual).



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

La magnitud de estas sobretensiones dependerá de las características propias del sistema, tales como:

- 1. Particularidades de los interruptores,**
- 2. Porcentaje de compensación,**
- 3. Tipo de fuente de energización y**
- 4. Punto de la onda de tensión en el que se realiza la maniobra.**

Adicionalmente las sobretensiones por energización están también influenciadas por la longitud de la línea y la potencia de cortocircuito de la barra desde la cual se energiza la línea.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Mientras que en el caso de recierres la magnitud de las sobretensiones depende también del tipo de recierre, esto es, de si el ***recierre es trifásico o monofásico.***

En recierres trifásicos las sobretensiones son mayores debido a la carga atrapada en la línea, mientras que en recierres monofásicos la magnitud de las sobretensiones es incluso menor que las debidas a energización, salvo en casos en los que efectos como resonancia o efecto Ferranti sean muy significativos.

En sistemas de extra alta tensión es común el uso de interruptores con recierre monofásico.

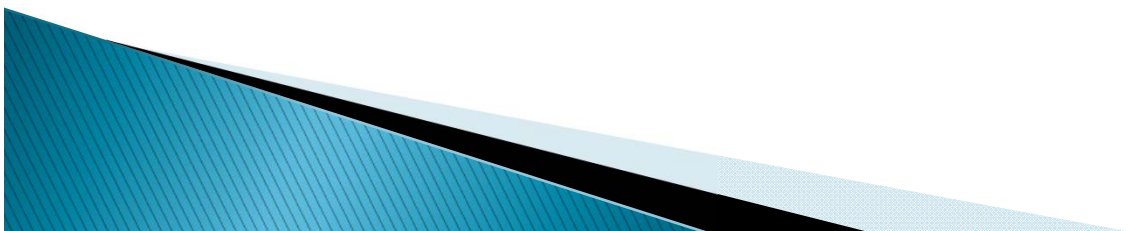


Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Las sobretensiones debidas a energización y recierre de líneas son de naturaleza probabilística ya que para un mismo tipo de maniobra se puede tener diferentes valores de sobretensión.

Esto se debe a que la magnitud de la sobretensión depende del punto de la onda de tensión en el que el interruptor cierre sus contactos y de la discrepancia de polos, que son factores que varían de una maniobra a otra.

De aquí que *se debe realizar un estudio estadístico de estas sobretensiones para poder obtener la distribución de frecuencias de sus amplitudes.*



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

De acuerdo al número de sobretensiones máximas por cada operación de maniobra que se consideren para construir la función de distribución de sobretensiones se tiene dos métodos:

1. el fase – pico y
2. el caso – pico.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Método fase - pico.- de cada operación de maniobra se escoge el máximo valor de sobretensión fase - tierra en cada una de las fases, para incluirlas en la distribución de probabilidad de sobretensión. Esto es, por cada operación se tiene tres valores máximos.

Método caso – pico.- de cada operación de maniobra se escoge únicamente el máximo valor de sobretensión fase – tierra de entre las tres fases, para incluirlas en la distribución de probabilidad de sobretensión. Esto implica tener un solo valor, el máximo de entre todos, por cada operación.



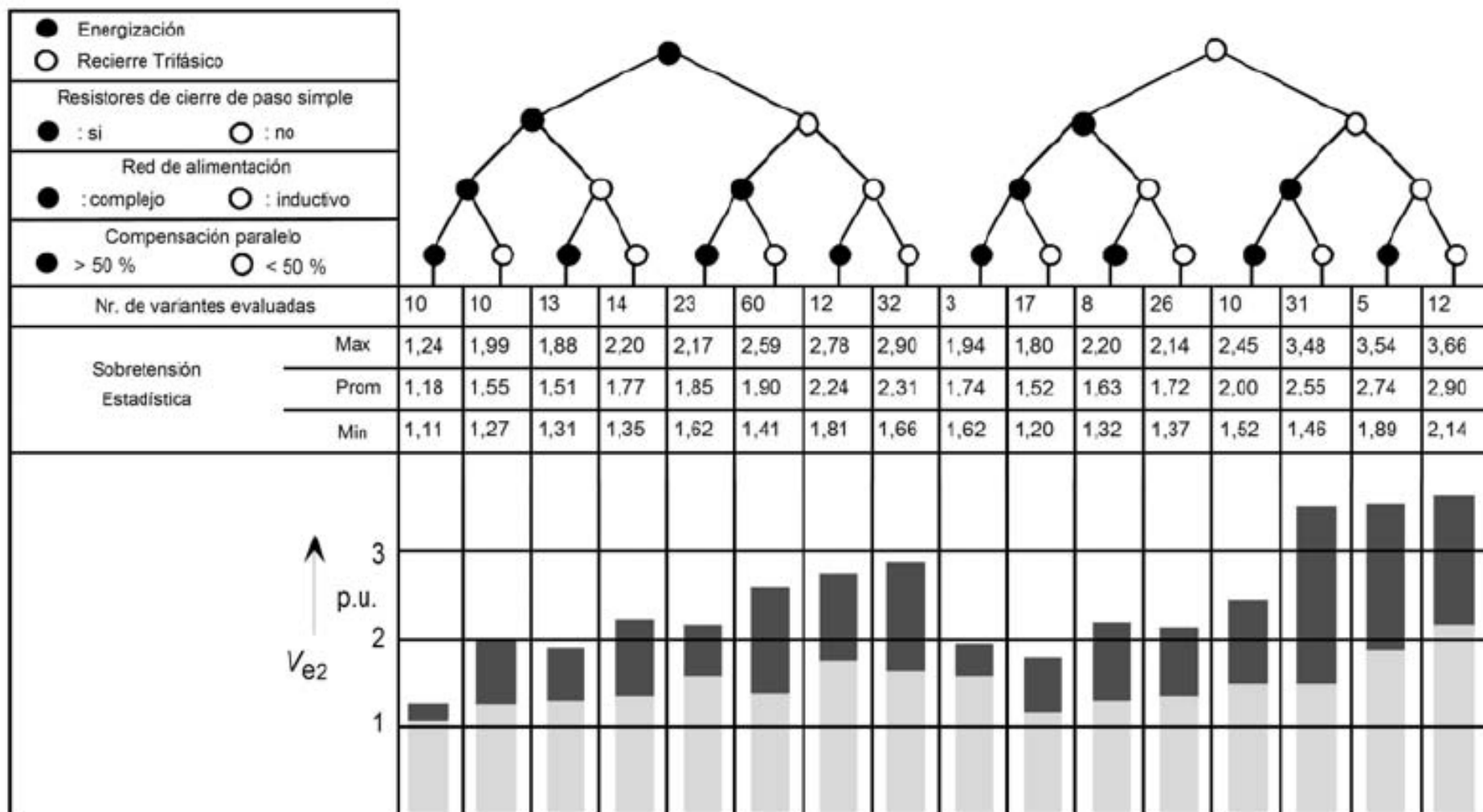
*En caso de no contar con simulaciones o pruebas que permitan la aplicación de estos métodos y la construcción de una función de distribución de sobretensiones **existen valores típicos de sobretensiones estadísticas (V_{e2})**.*

Estos valores corresponden a sobretensiones causadas por eventos específicos, en este caso energización y recierre de líneas, *con un 2% de probabilidad* de que igualen o superen el valor dado para V_{e2} .



La Figura siguiente muestra una guía para la selección de las sobretensiones estadísticas *fase-tierra* en función de parámetros conocidos del sistema, sin la presencia de pararrayos y en el extremo de la línea donde las sobretensiones son mayores.

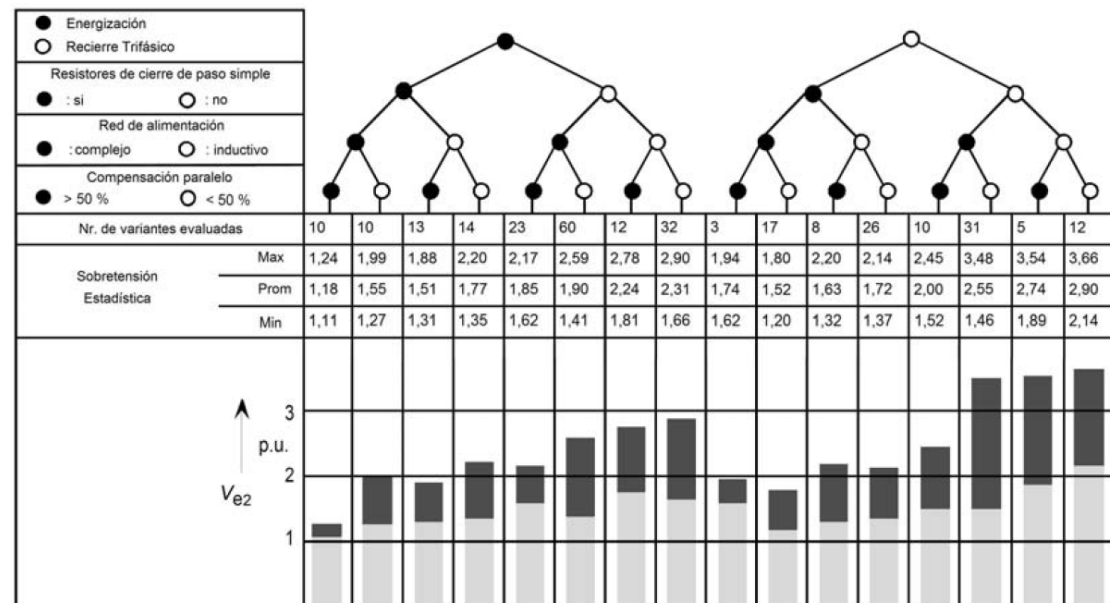




Guía para la selección de V_{e2} para sobretensiones de frente lento por eventos de energización y reenergización de líneas

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Los valores presentados en la Figura son aplicables para ambos métodos, *fase – pico y caso - pico* y corresponden al resultado de pruebas y estudios de campo que incluyen el efecto de la mayoría de los factores que determinan la magnitud de las sobretensiones.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Los efectos considerados son:

- Discriminar entre una maniobra de energización o recierre.
- interruptores con o sin resistencias de preinserción.
- Red de alimentación complejo o inductivo.
- Compensación en derivación o paralelo.



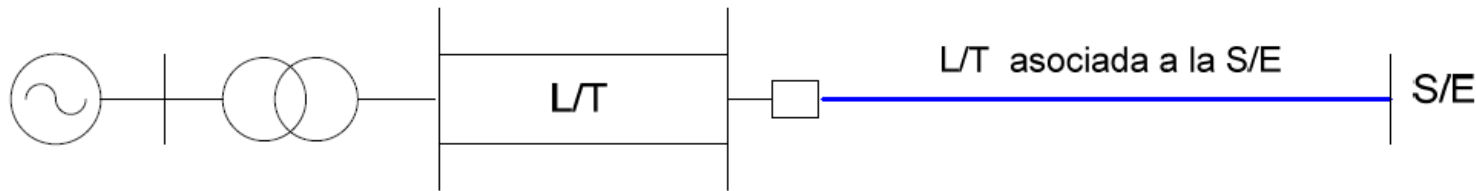
En lo que respecta a la red de alimentación, se refiere a la configuración del sistema desde el cual se energiza la línea.

Se distingue dos posibilidades, alimentación compleja o inductiva.

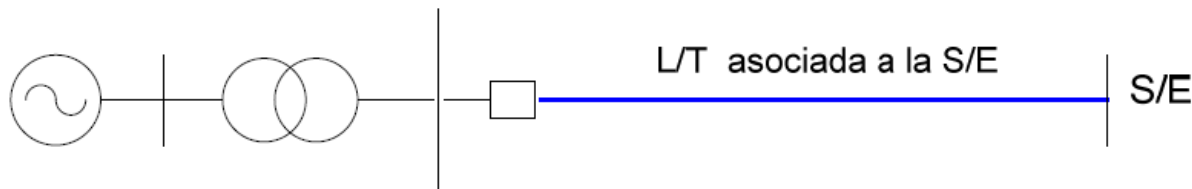
La alimentación compleja implica tener por lo menos una línea de transmisión conectada entre la barra de generación y la línea que alcanza la subestación.



Mientras que la *alimentación inductiva implica alimentar la línea que alcanza la subestación únicamente a través de un transformador*. La Figura muestra en forma gráfica estos conceptos.

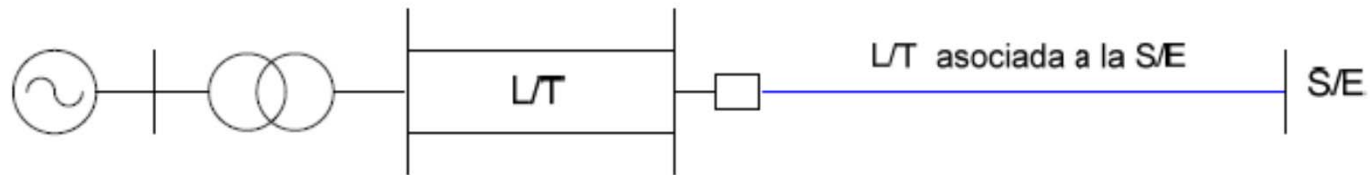


(a) *La alimentación compleja*

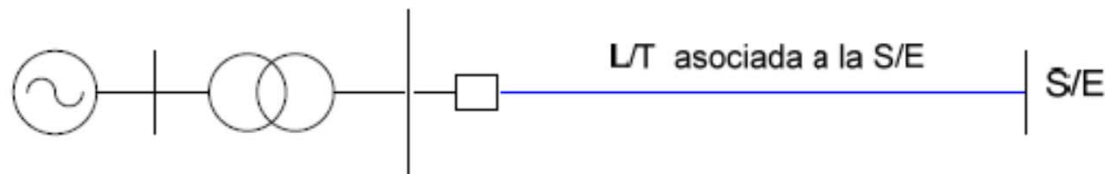


(b) *alimentación inductiva*





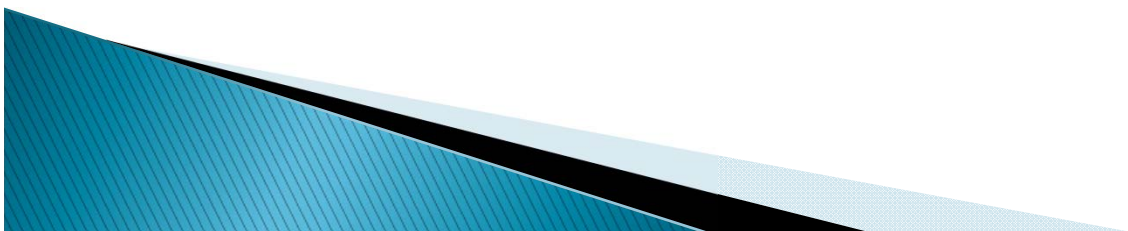
(a)



(b)

Red de alimentación. (a) Compleja a través de otra L/T. (b) Inductiva, únicamente a través de un transformador.

Además cabe mencionar, que no se considera el uso de interruptores con mando sincronizado.



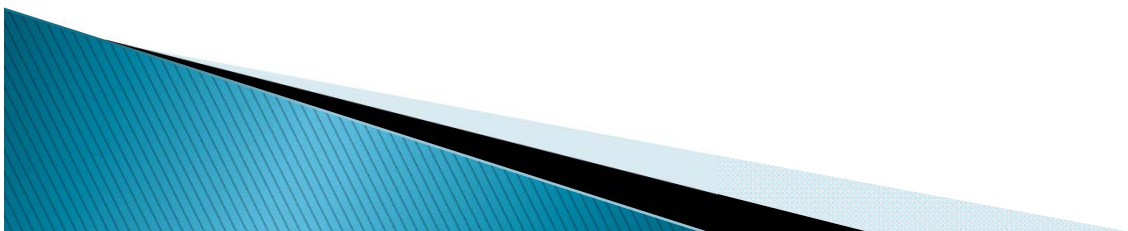
Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

En base de la norma IEEE 1313.2-1999 se presenta la Tabla que muestra valores típicos de sobretensiones estadísticas debidas a recierre, con y sin el uso de resistores de preinserción.

Sobretensiones estadísticas de frente lento V_{e2} típicas por recierre de líneas [12].

	Sobretensión estadística V_{e2} p.u
Con Resistencias de preinserción	1.8 – 2.0
Sin Resistencias de preinserción	2.8 – 3.0

En caso de requerirlo, el valor de la sobretensión estadística fase-fase (V_{p2}) puede ser estimado en base del valor de la sobretensión estadística fase-tierra (V_{e2}) a partir de la Figura Siguiende.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

El valor de la sobretensión estadística fase-fase (V_{p2}) se puede estimar en base del valor de la *sobretensión estadística fase-tierra* (V_{e2}) de acuerdo a la Figura donde se ilustra valores de V_{e2} en función de la relación entre los valores estadísticos fase-fase y fase-tierra. La parte superior de la curva corresponde a las sobretensiones trifásicas por recierre, mientras que el tramo inferior se aplica a las sobretensiones por energización.

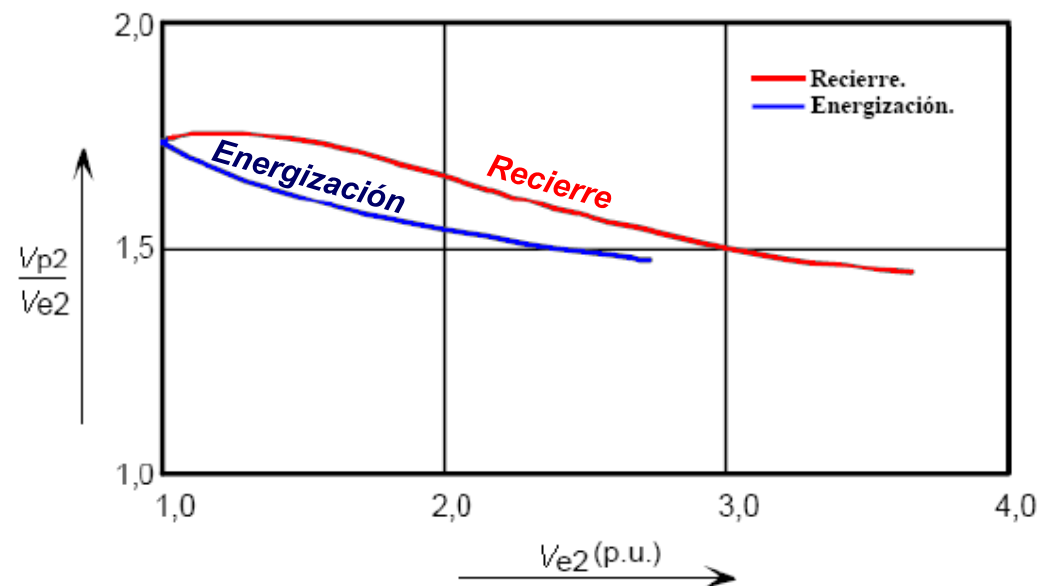


Figura G.1. Relación entre V_{e2} y V_{p2}/V_{e2} [7].

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Las sobretensiones por maniobras en líneas pueden ser controladas mediante el uso de *resistencias de preinserción* en los interruptores, el cierre controlado del interruptor, transformadores de tensión inductivos, compensación o pararrayos.

El uso de resistencias de preinserción es uno de los métodos más efectivos para controlar sobretensiones generadas en la operación de interruptores.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Estas *resistencias de preinserción se conectan en serie a la línea previo al cierre de los contactos principales del interruptor* para una vez que el interruptor ha efectuado el cierre se forme un divisor de tensión con la resistencia preinsertada para así reducir la tensión inicial.

Una vez que esto ha sucedido las resistencias se cortocircuitan para ser eliminadas del circuito.

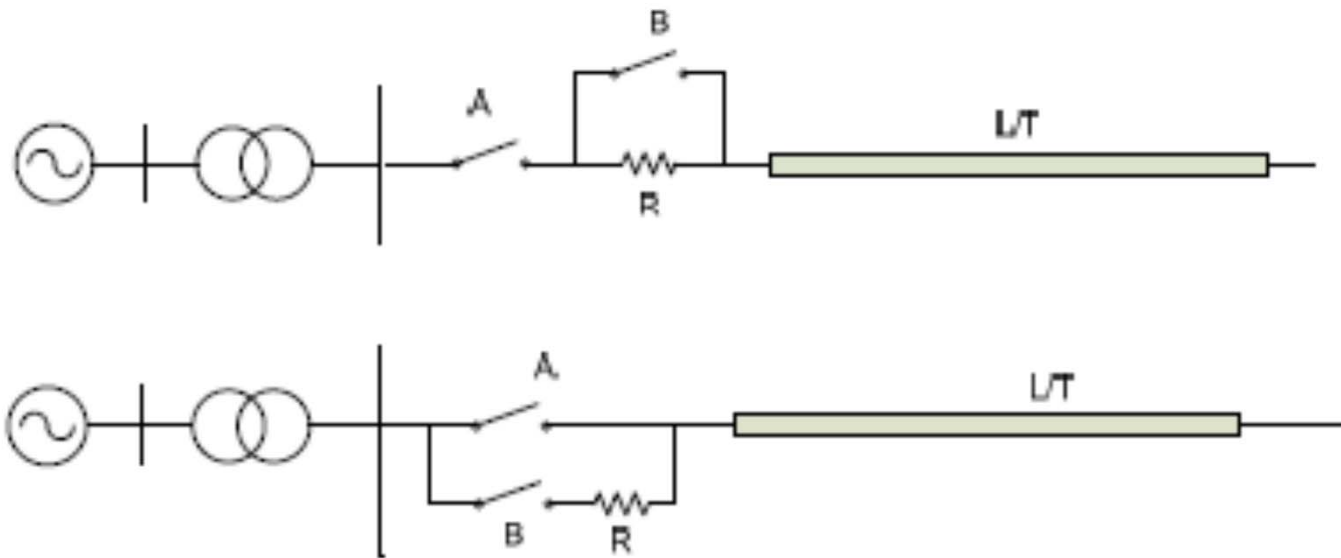
Estas operaciones si bien producen transitorios en la línea, con una selección adecuada de la resistencia y del tiempo de su permanencia pueden limitar las sobretensiones en gran medida.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

La Figura muestra dos arreglos para el uso de las resistencias de preinserción. En ambos casos debe primero cerrarse el contacto A para permitir que entre la resistencia R, y luego de un intervalo de tiempo deberá cerrar B para cortocircuitar a R.

El valor de R suele ser similar al de la impedancia característica de la línea, y su tiempo de permanencia está entre 6 y 15 ms.



Arreglos para la maniobra de una LT usando resistencias de preinserción R

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

En operaciones de recierre en donde se tiene *sobretensiones elevadas producto de la carga atrapada, el uso de resistencias de preinserción es importante.*

Sin embargo, *la presencia de pararrayos de óxido de zinc, con muy buena capacidad de absorber energía ha permitido eliminar, en algunos casos, las resistencias de preinserción,* que en algunos países no han producido buenas experiencias.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

El cierre controlado del interruptor mediante el uso de interruptores sincronizados es otra medida que junto con las resistencias de preinserción reducen la sobretensión a lo largo de toda la línea.

Considerando que las sobretensiones en la energización son función de la tensión a través de los contactos del disyuntor en el instante de cierre, se podrán disminuir si esta tensión tiende a cero.

Así durante la energización esta condición se cumple cuando la tensión de alimentación pasa por cero, mientras que en un recierre, en donde existe carga atrapada, la menor tensión en los contactos del interruptor ocurre cuando la diferencia de potencial entre la tensión de alimentación y la tensión residual es nula.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

En un sistema trifásico, existen dos posibilidades para el cierre de contactos de un interruptor con el fin de conseguir estas condiciones.

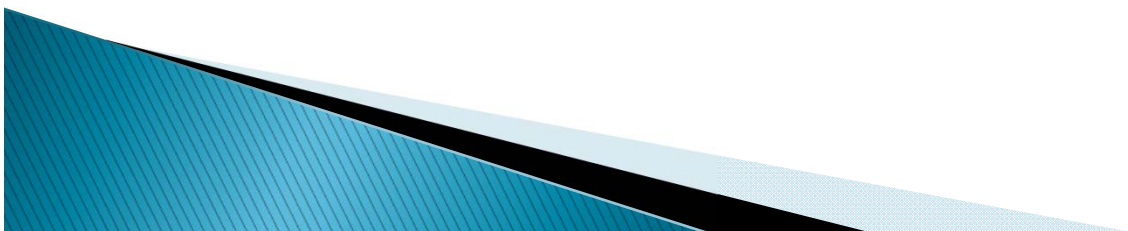
1. La primera implica cerrar las tres fases simultáneamente, cuando la tensión en una de ellas esté pasando por cero.
2. Una segunda opción, y que brinda mejores resultados es cerrar las tres fases consecutivamente cuando la tensión en cada una de ellas pase por cero.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

*Los transformadores de tensión inductivos conectados en los terminales de la línea, reducen las **cargas atrapadas** en las fases después de su apertura, ya que sirven como camino de drenaje de esta carga.*

Dando como resultado que las sobretensiones de frente lento por el recierre trifásico subsecuente sean comparables con las de energización de la línea.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Los pararrayos solamente reducen sobretensiones cercanas a ellos.

Sin embargo, al interior de una subestación los efectos de separación de los pararrayos pueden ser omitidos, es decir, el voltaje de impulso de maniobra es aproximadamente el mismo a través de toda la subestación. Por lo tanto, el pararrayos proporciona protección a todo el equipo conectado.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Inicio y despeje de falla:

Sobretensiones de frente lento se producen en el momento de inicio y despeje de fallas debido a:

1. Los transitorios que se producen al pasar desde el voltaje normal de funcionamiento a la sobretensión temporal en las fases sin falla y,
2. Por el retorno desde un voltaje cercano a cero al voltaje normal de operación en la fase fallida, respectivamente. Ambos eventos únicamente producen sobretensiones fase-tierra.



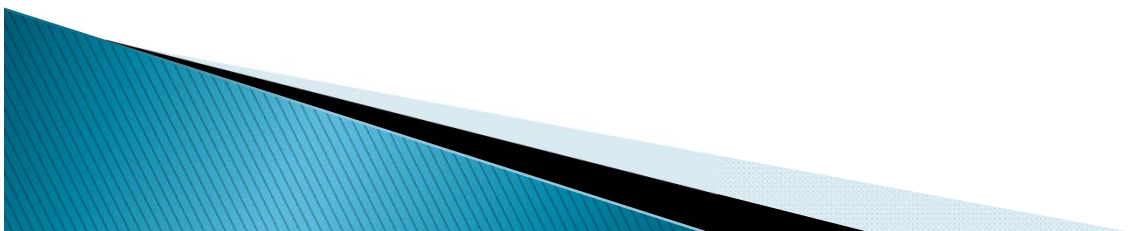
Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Inicio y despeje de falla....

La magnitud de estas sobretensiones es función del factor de falla a tierra (k). A continuación se muestra las expresiones que permiten determinar el valor máximo estimado de las sobretensiones originadas en el inicio y durante el despeje de una falla, así:

Al inicio de la falla: $V_e = (2k - 1) \text{ p.u}$

En el despeje de la falla: $V_e = 2 \text{ p.u}$



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Rechazo de carga:

Un evento de rechazo de carga involucra dos tipos de sobretensiones:

1. Una sobretensión transitoria que se genera en los primeros ciclos subsecuentes a la apertura del interruptor que desconecta la carga rechazada y, que corresponde a una sobretensión de frente lento, y,
2. Una sobretensión sostenida que aparece posterior al transitorio que a su vez corresponde a la sobretensión rechazo de carga ya analizada.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Rechazo de carga....

La magnitud depende del porcentaje de carga rechazada.

Las mayores, ante un rechazo total de carga.

Producen mayores solicitaciones en los equipos de la subestación terminal en donde se produjo el rechazo.

El valor de esta sobretensión es menor que los debidos por energización y recierre, es por esto que para sistemas de muy alta tensión (mayor a 245 kV), *las sobretensiones de frente lento debidas al rechazo de carga se deben tomar en cuenta únicamente en caso que las sobretensiones debidas a energización y re-cierre de líneas se controlen a valores inferiores a 2.0 p.u.*



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Conmutación de corrientes inductivas y capacitivas:

Operaciones de interrupción de corrientes inductivas o capacitivas, pueden dar lugar a sobretensiones de frente lento.

Debido a que las corrientes están desfasadas alrededor de 90° con respecto a la tensión.

Por ello, al momento en el que se interrumpe la corriente por su paso por cero, la tensión estará en su valor máximo, lo cual ocasiona incrementos o transitorios en la tensión que aparece entre los contactos del interruptor luego de haber sido interrumpida la corriente.

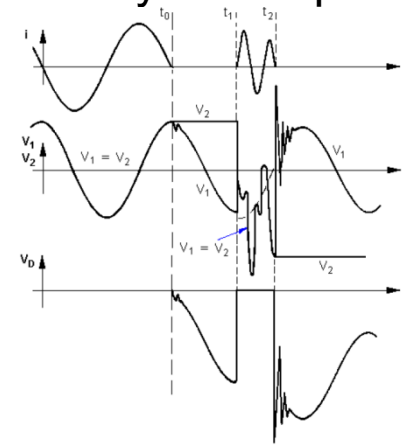
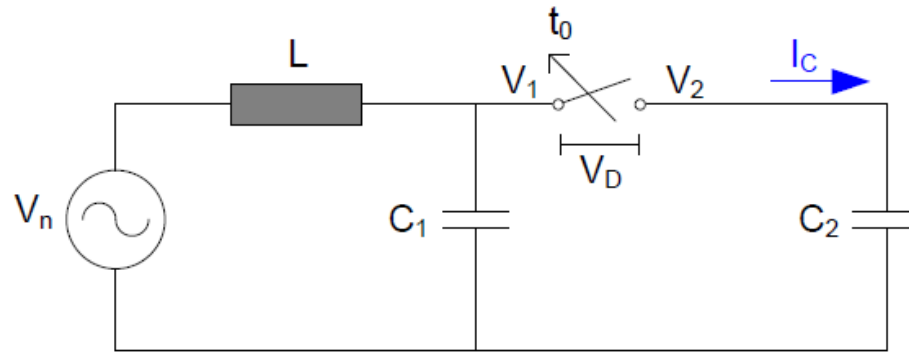
Esta tensión se denomina tensión de restablecimiento del interruptor.

Sobretensiones de mayor magnitud se pueden generar en caso de ocurrir una reignición del arco en los contactos del disyuntor.



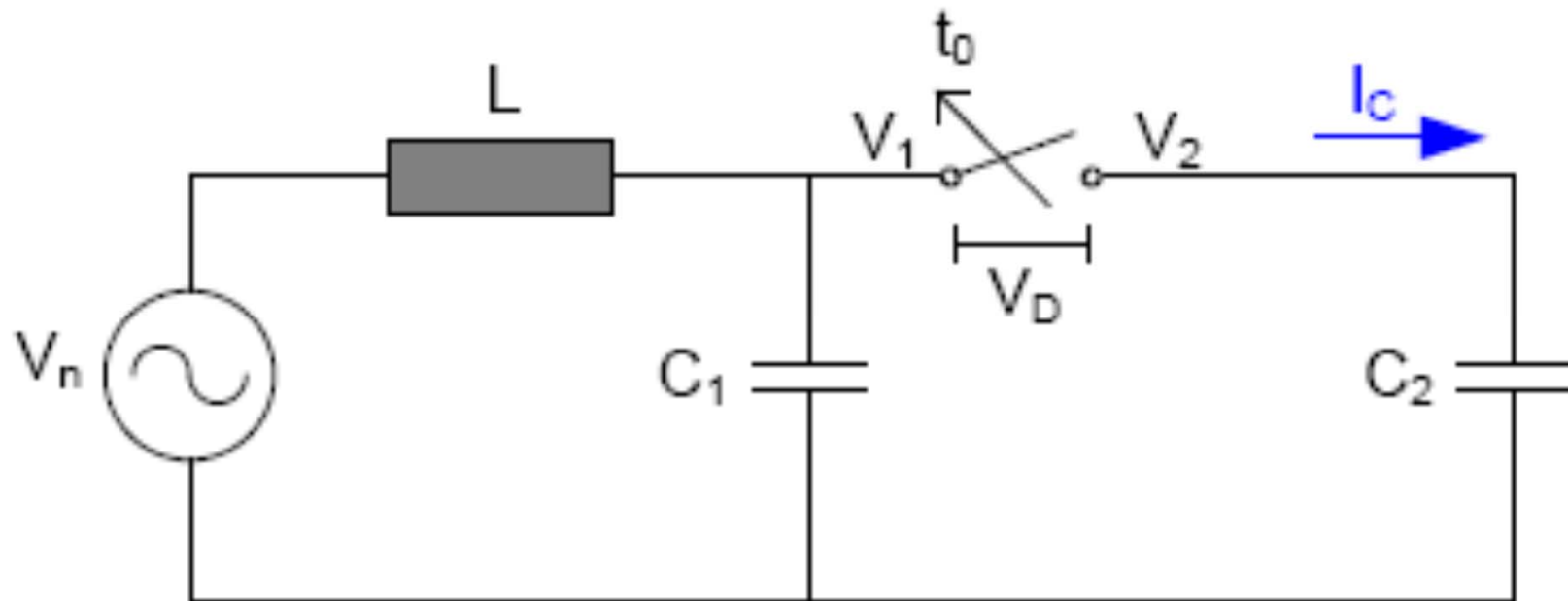
Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Interrupción de una corriente capacitiva.- para analizar esta maniobra se considerará un circuito de carga capacitiva alimentado a través de una fuente inductiva. La Figura muestra el circuito de carga capacitiva y el comportamiento de las ondas de corriente y tensión asociadas.

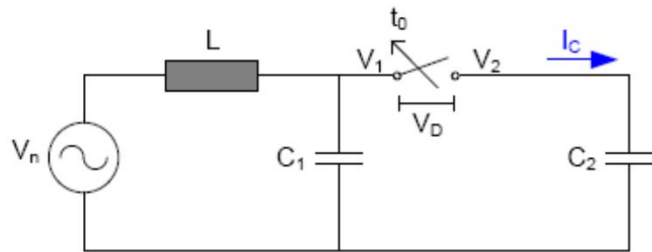
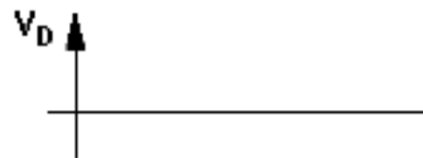
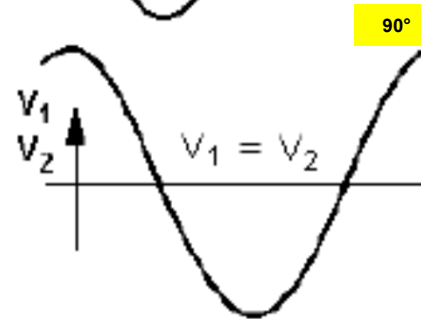
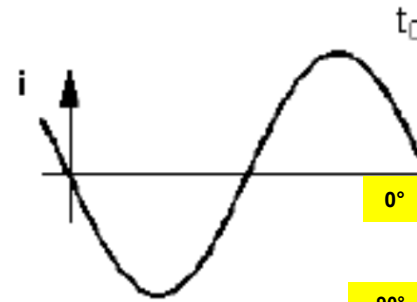


Tal como se muestra en la figura, previo a la apertura de los contactos del disyuntor la corriente adelanta 90° a la tensión, ya que es predominantemente capacitiva. Con el fin de interrumpir la corriente, los contactos del disyuntor se abren pero la corriente continúa fluyendo hasta su siguiente paso por cero donde el arco pierde conductividad y la corriente se interrumpe, en este instante la tensión está en su valor máximo.

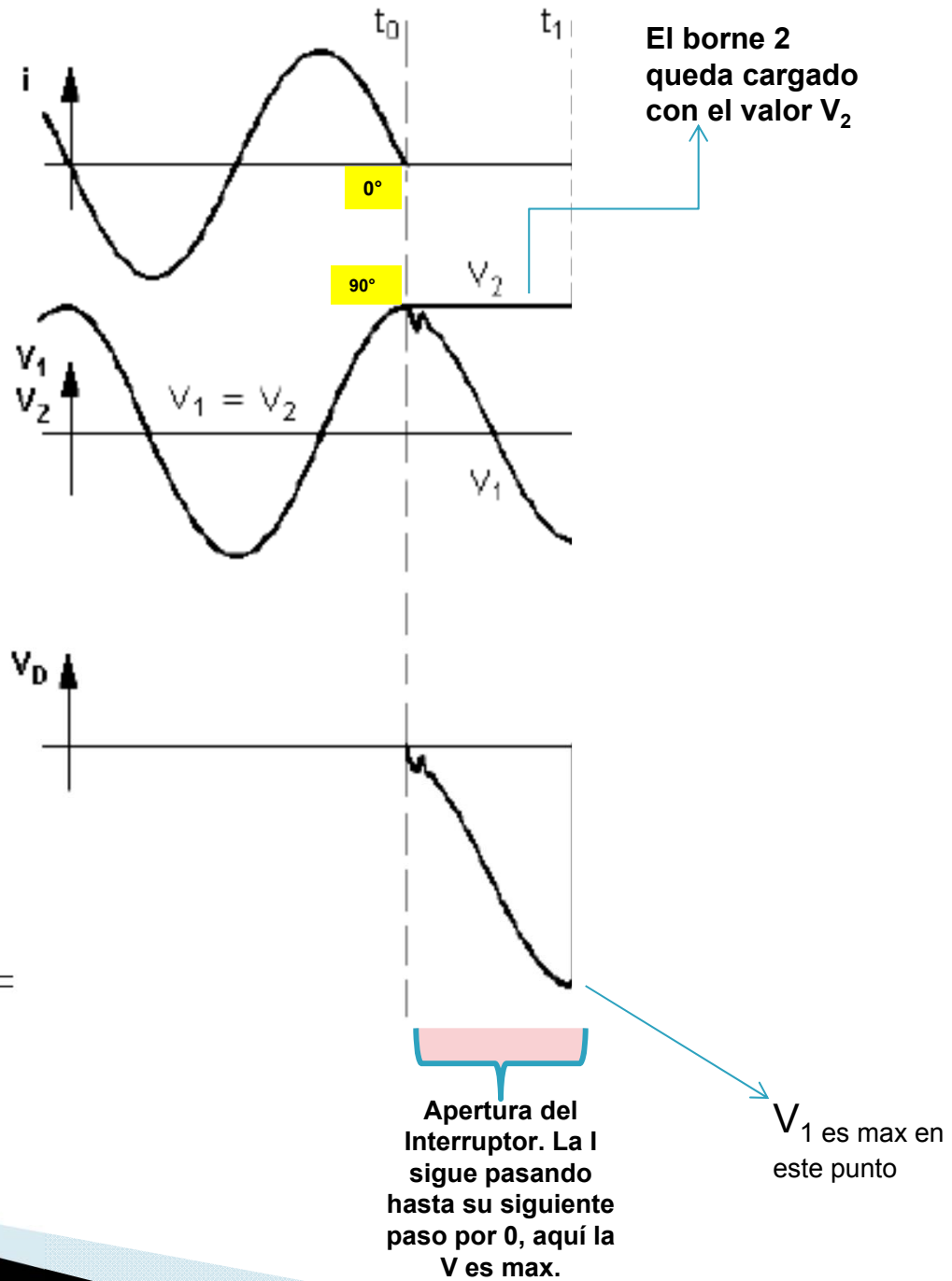
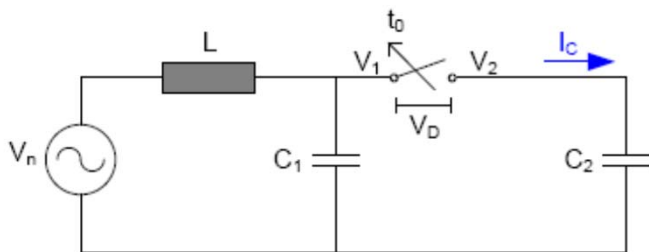
Apertura de un circuito predominantemente Capacitivo



Antes de la apertura del
circuito
predominantemente
Capacitivo

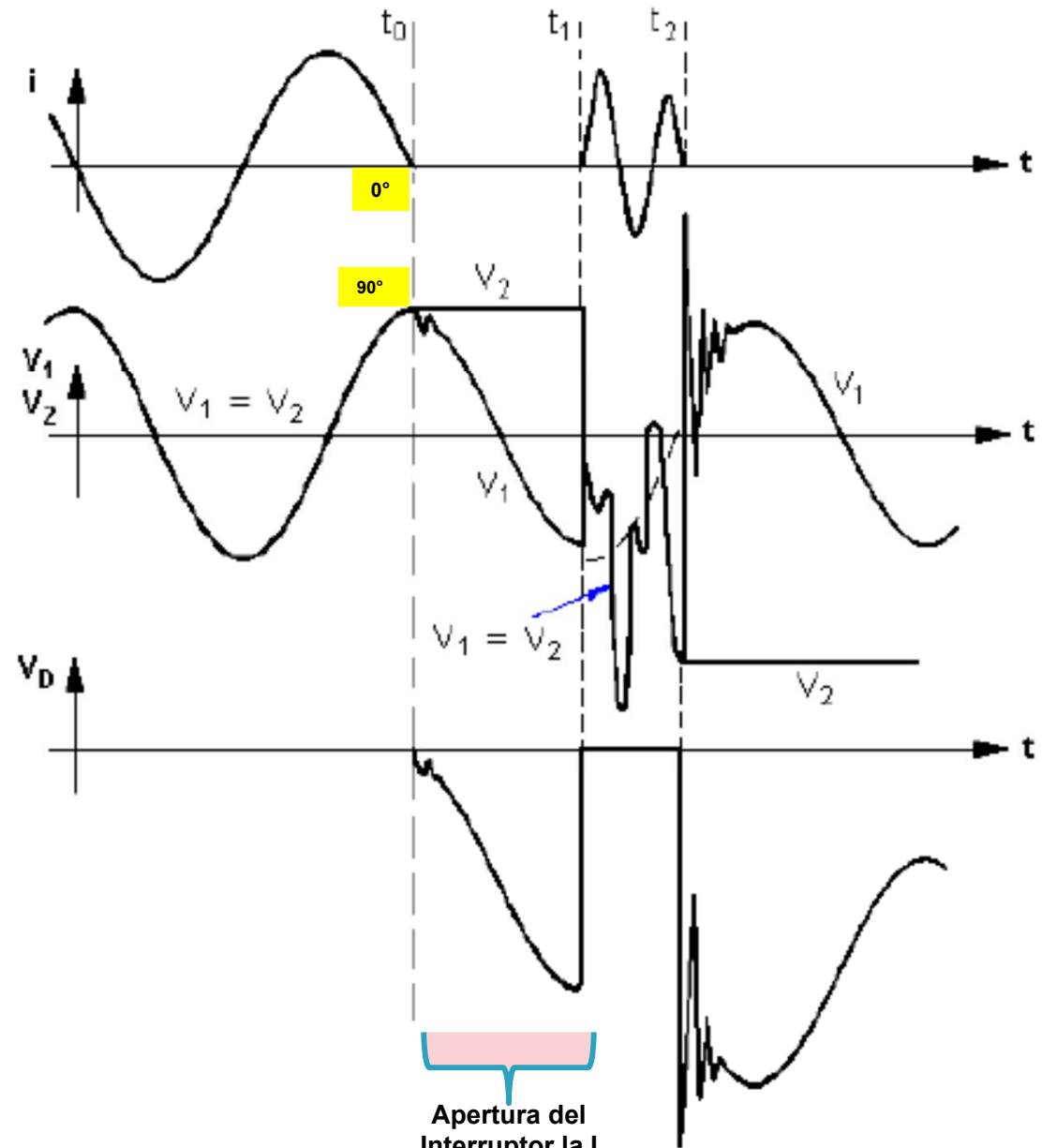


Apertura de un circuito predominantemente Capacitivo



**Apertura de un circuito
predominantemente
Capacitivo**

Formas de onda
de corriente y
tensión



Apertura del
Interruptor la I
sigue pasando
hasta su siguiente
paso por 0, aquí V
es max.

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

La corriente se ha interrumpido y el capacitor de carga C2 queda cargado a la tensión máxima de la fuente +1 p.u. Conforme la tensión de la fuente cambia de polaridad, la tensión de reestablecimiento en el disyuntor aumenta hasta que la tensión de la fuente alcanza su valor máximo y la de reestablecimiento un valor de 2 p.u. En este punto del proceso, si entre los contactos del disyuntor no hay una rigidez dieléctrica suficiente se producirá el reencendido del arco, como es el caso de la figura.

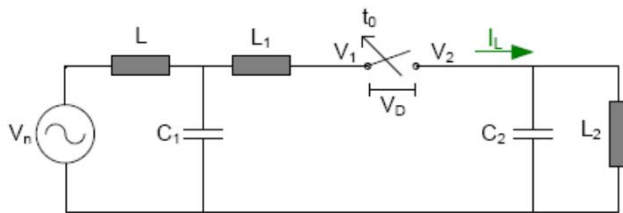
Una vez que ha ocurrido la reignición, la corriente vuelve a ser interrumpida a su paso por cero, dejando al capacitor cargado a una tensión superior, de incluso 3 p.u. Una segunda reignición podría ocurrir cuando la tensión de reestablecimiento alcance su nuevo valor máximo de hasta 4 p.u. Si nuevas reigniciones ocurren este proceso podría ser recurrente y la tensión podría ir incrementándose cada vez más, en la práctica la falla del aislamiento interrumpiría el proceso. En sistemas de potencia, este tipo de corrientes aparecen ante la apertura de líneas de gran longitud en vacío, o bancos de condensadores.



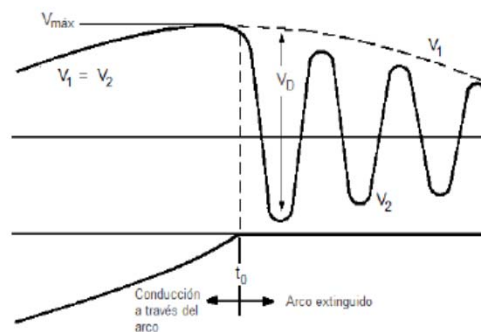
Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Interrupción de corrientes inductivas.- para analizar esta maniobra se considera el circuito mostrado (a) cuya corriente de carga es predominantemente inductiva. Las Figuras (b) y (c) muestran el comportamiento transitorio de la tensión.

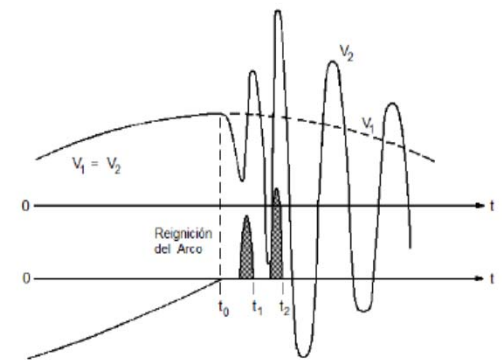
Análogo al caso anterior, previo a la apertura de los contactos del interruptor la corriente retrasa 90° a la tensión, debido a su naturaleza inductiva. Con el fin de interrumpir la corriente, los contactos abren y la corriente continúa fluyendo a través del arco formado entre los contactos hasta su paso por cero, donde el arco se extingue, en este instante la tensión está en su valor máximo.



(a)



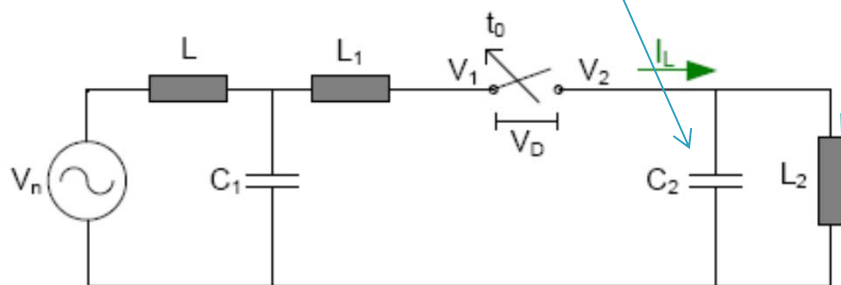
(b)



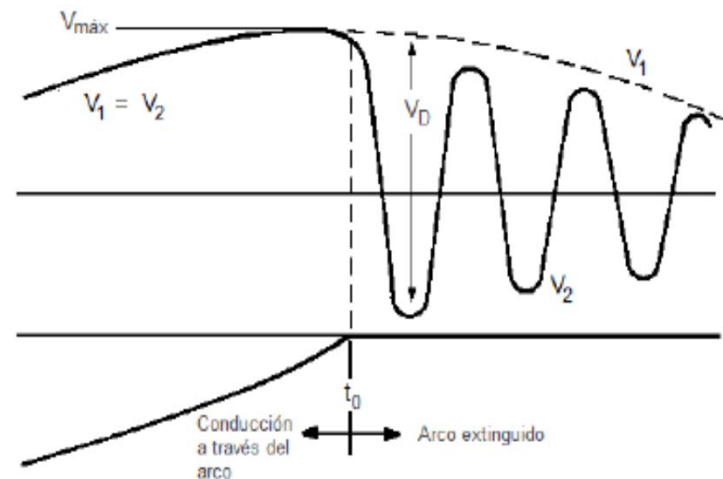
(c)

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Si el arco se extingue sin que ocurra reignición como se muestra en la Figura (b), la tensión del lado de la carga oscilará a una frecuencia mayor que la fundamental debido al efecto de las capacitancias parásitas representadas en C_2 y la inductancia de carga L_2 , en este instante la tensión de reestablecimiento crece instantáneamente hasta su valor máximo para luego amortiguarse.



(a)

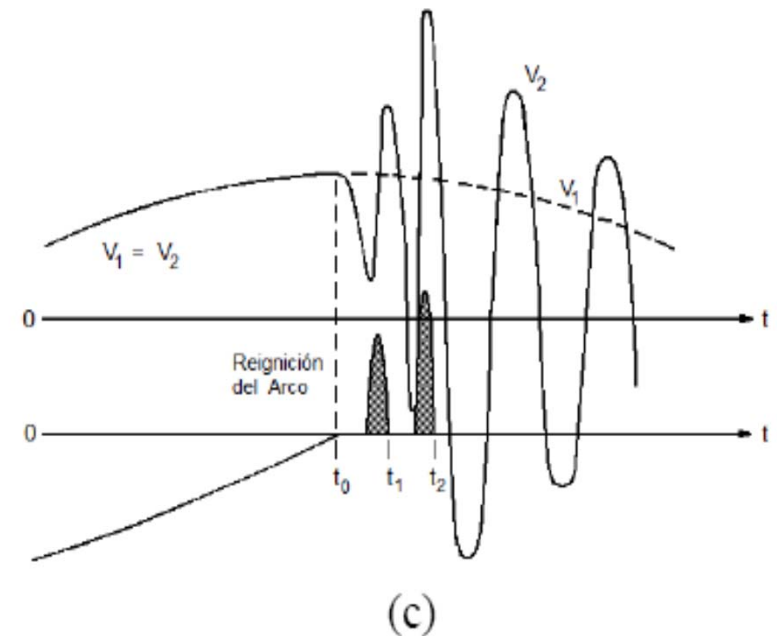


(b)

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Debido a que la tensión de reestablecimiento se aplica entre los contactos del interruptor, pueden existir condiciones de reignición, en cuyo caso la corriente vuelve a circular y la tensión del lado de la carga trata de seguir a la tensión del lado de la fuente. Luego, una vez que la corriente pase por cero y se extinga el arco la tensión de reestablecimiento vuelve a alcanzar su valor máximo que debido a estas condiciones es mucho mayor que en caso de no tener reignición, alcanzando incluso valores mayores que la tensión de la fuente.

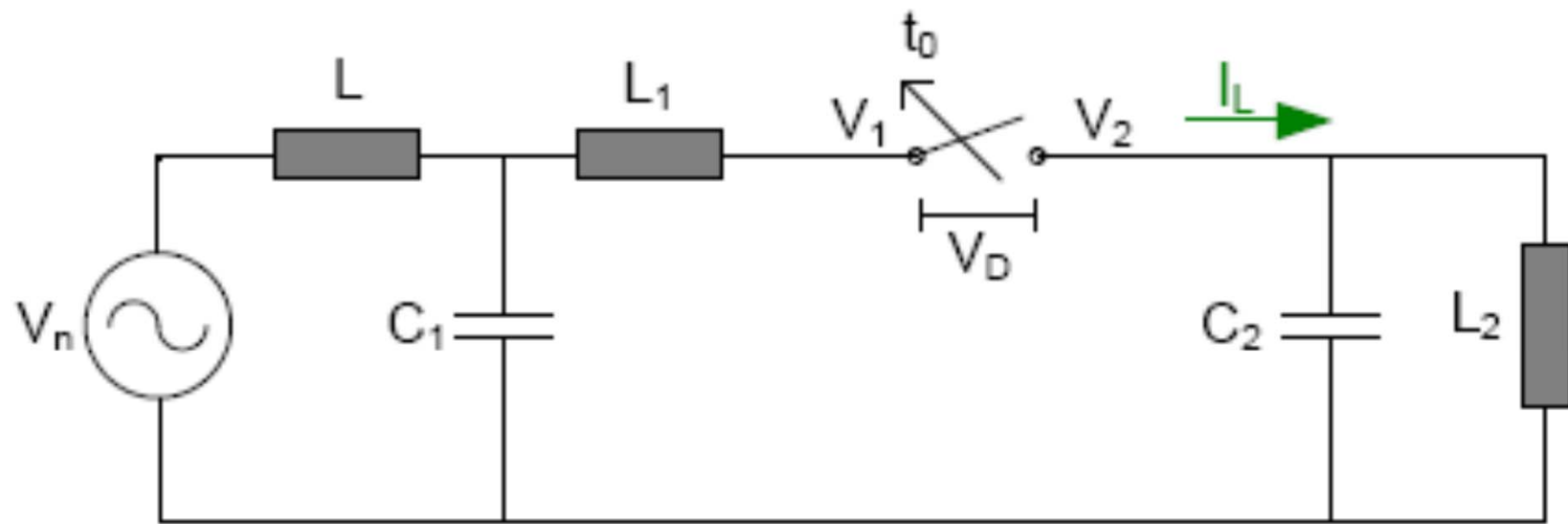
Este proceso se ilustra en la Figura (c) y puede repetirse varias veces en función del número de reencendidos, provocando que la tensión del lado de la carga aumente considerablemente. Cabe notar que el arco se extingue cuando la corriente del inductor de carga pasa por cero y por lo tanto la energía será inicialmente almacenada en el capacitor. Por lo tanto, la razón por la cual la tensión tiende a incrementarse es un fenómeno capacitivo.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Interrupción de una corriente inductiva

Circuito Inductivo

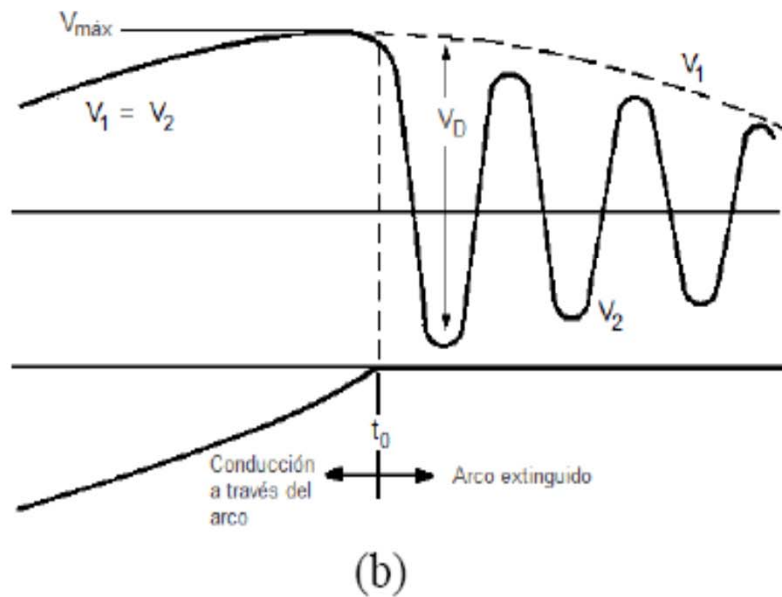


(a)

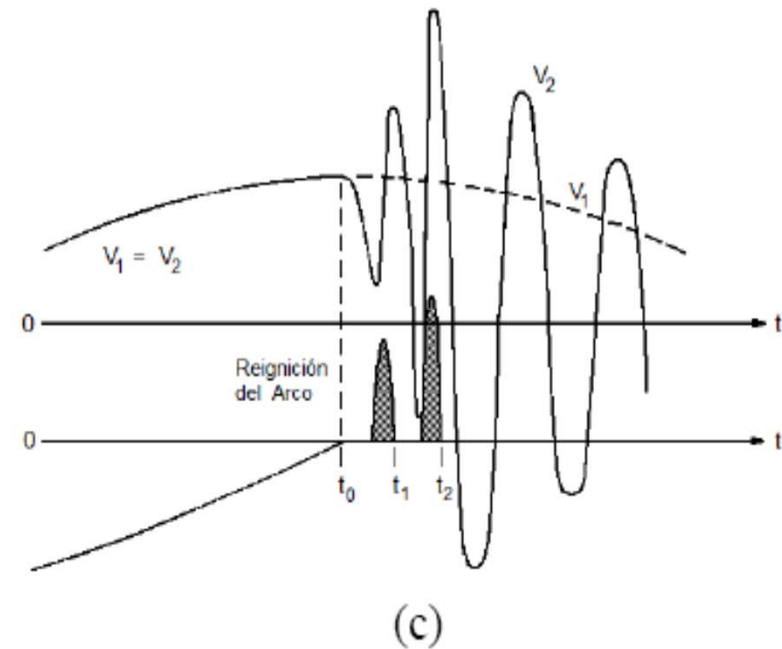
Causas que originan sobretensiones de Frente lento

Interrupción de una corriente inductiva, Circuito Inductivo

b) Transitorio durante la interrupción de una corriente inductiva, sin ignición

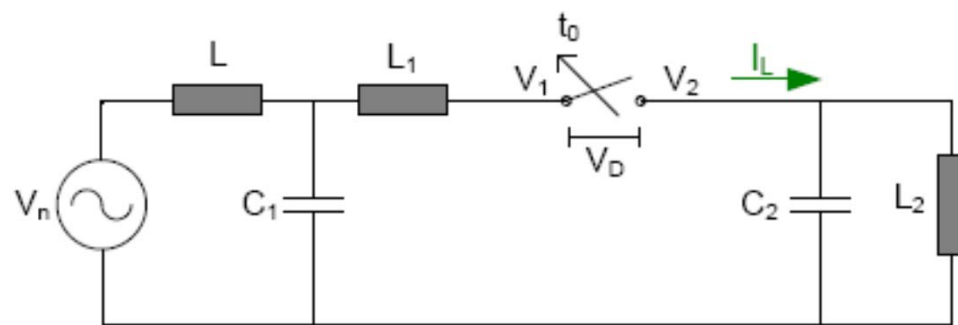
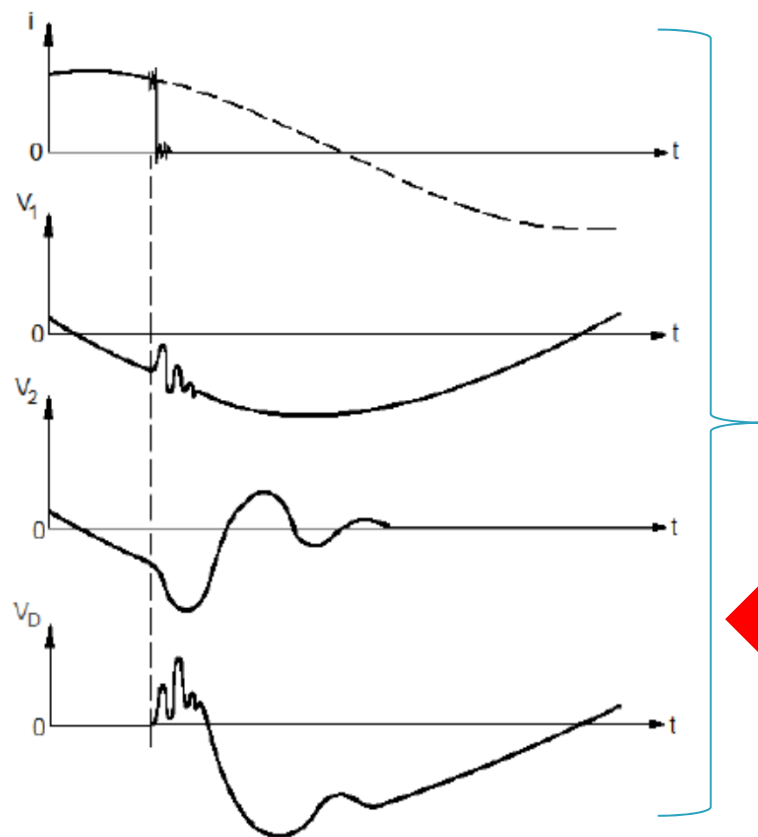


c) Transitorio durante la interrupción de una corriente inductiva, con reignición



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

La Figura muestra en forma independiente las formas de onda de voltaje y corriente durante la apertura de una corriente inductiva, tomando como base el circuito de la Figura (a) antes analizada.



(a)

Formas de onda de corriente y tensión durante la interrupción de una corriente inductiva.

Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

En sistemas de potencia, este tipo de sobretensiones aparecen ante la interrupción de corrientes de magnetización de transformadores o reactores y ante la interrupción de corrientes de arranque en motores.

Para evitar la presencia de sobretensiones tanto de origen capacitivo como inductivo se deberá seleccionar interruptores adecuados, con el fin de evitar la reignición del arco, que es la peor condición para la generación de sobretensiones de esta naturaleza.



Causas que originan sobretensiones de Frente lento...

Descargas Atmosféricas:

Sobretensiones de frente lento debido a descargas atmosféricas tienen lugar cuando: *la caída del rayo es distante al conductor de fase*, la corriente de la descarga es lo suficientemente pequeña como para no causar una descarga disruptiva en el aislamiento de la línea y la descarga atmosférica ocurre a una distancia lo suficientemente lejana de la subestación como para obtener sobre ella una sobretensión de frente lento. *Este criterio se aplica en sistemas con líneas largas* (longitudes *superiores a 100 km*).

Debido a que las sobretensiones de frente lento por descargas atmosféricas tienen amplitudes poco significativas en comparación con otro tipo de sobretensiones de frente lento, y debido a que su tiempo de frente de onda no es crítico para el aislamiento, estas sobretensiones son de menor importancia y en la mayoría de los casos no se consideran.



Sobretensiones de Frente Rápido

Las sobretensiones de frente rápido se originan a partir de descargas atmosféricas y operaciones de maniobra, siendo estas últimas de menor importancia debido a que su amplitud es mucho menor.



Sobretensiones de Frente Rápido...

Descargas atmosféricas:

Las descargas atmosféricas son un fenómeno natural muy común, en el mundo se producen alrededor de 1000 tormentas cada día.

Lamentablemente este fenómeno natural representa un potencial problema para las redes eléctricas, principalmente para las redes aéreas y a la intemperie que son las más afectadas, ya que se pueden generar sobretensiones que podrían provocar la falla del aislamiento de los equipos. En una línea de transmisión el flameo de la cadena de aisladores no produce ningún daño, no así en los equipos de la subestación que podrán verse seriamente afectados.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Descargas atmosféricas....

En una subestación la incidencia de una descarga atmosférica podría darse de dos maneras:

La primera es considerar la caída del rayo dentro del patio de la subestación afectando directamente a los equipos y

La segunda, que el rayo incida sobre la línea de transmisión asociada a la subestación, en cuyo caso, se forman olas de sobretensión que se propagan a través de las líneas hasta alcanzar los equipos.

En la práctica, que una descarga atmosférica incida dentro de la subestación es un evento muy poco probable, debido a que su área de exposición es relativamente pequeña, además de tener el sistema de apantallamiento. De aquí que, el estudio de descargas atmosféricas se realizará más bien con respecto a las descargas que alcancen las líneas.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Por lo general las descargas atmosféricas (rayos), tienen polaridad negativa y se caracterizan por tener una descarga piloto o principal seguida de algunas descargas subsecuentes, todas a través del mismo canal plasmático.

Sin embargo, aproximadamente un 10% de las descargas atmosféricas son de polaridad inversa y se caracterizan por ser de mayor amplitud y por lo tanto más severas que las de polaridad negativa, también son de frente un poco más lento y no presentan descargas subsiguientes.

Si bien una característica importante de una descarga atmosférica es la *corriente*, esta *es de muy corta duración*, razón por la cual es de mayor interés proteger a los equipos frente a las sobretensiones que se originan antes que de la corriente en si misma.



Sobretensiones de Frente Rápido...

Las ondas de tensión de prueba estandarizadas de impulso tipo rayo tienen un frente de onda de entre 0.1 y 20 μs y un tiempo al valor medio de cola menor a 300 μs .

La amplitud se define como un valor máximo asumido o mediante una distribución de probabilidad de los valores picos. La Figura muestra la forma de onda típica de una sobretensión de frente rápido.

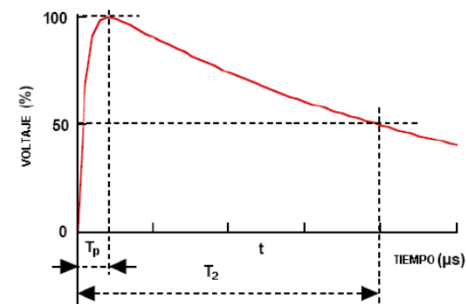


Figura 2.13. Forma de onda de sobretensión tipo rayo [11].

Sobretensiones de Frente Rápido....

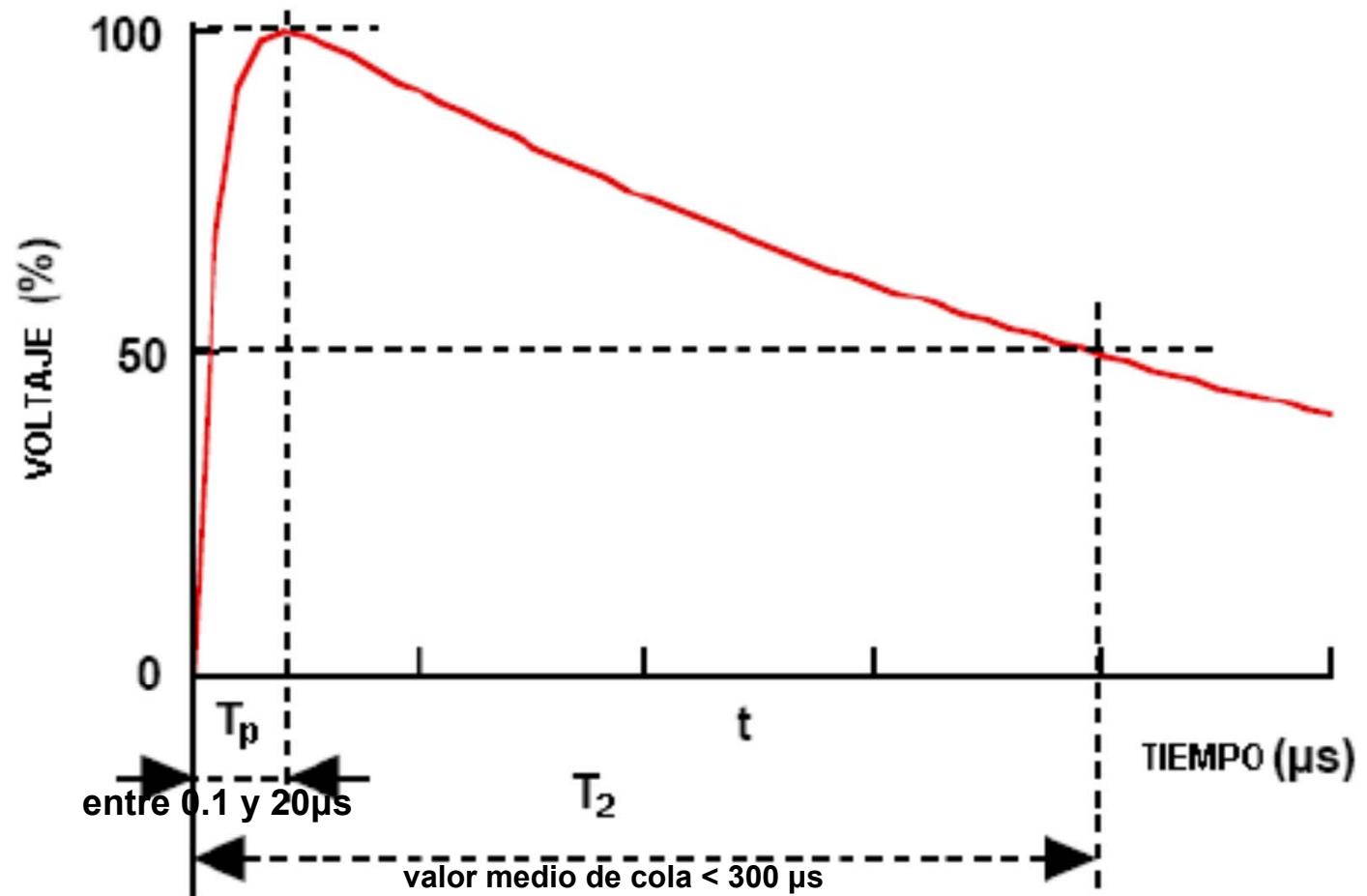


Figura 2.13. Forma de onda de sobretensión tipo rayo [11].

Sobretensiones de Frente Rápido....

La amplitud de *las sobretensiones de origen atmosférico no tiene ninguna relación con la tensión de servicio*, ya que por su naturaleza aleatoria puede llegar a ser muy elevada respecto a la tensión nominal del sistema.

Sin embargo en sistemas con tensiones nominales mayores a 345 kV debido a su alto nivel de aislamiento, las sobretensiones atmosféricas no son determinantes, siendo las sobretensiones más relevantes las de maniobra.

Los efectos de las descargas atmosféricas, y por lo tanto las sobretensiones de frente rápido dependen del lugar en dónde cae el rayo respecto de la red. Es así que se pueden presentar los siguientes eventos:



Sobretensiones de Frente Rápido....

Descargas atmosféricas directas.- una descarga de este tipo ocurre cuando el rayo cae directamente sobre los conductores de fase producto de una falla de apantallamiento en la línea.

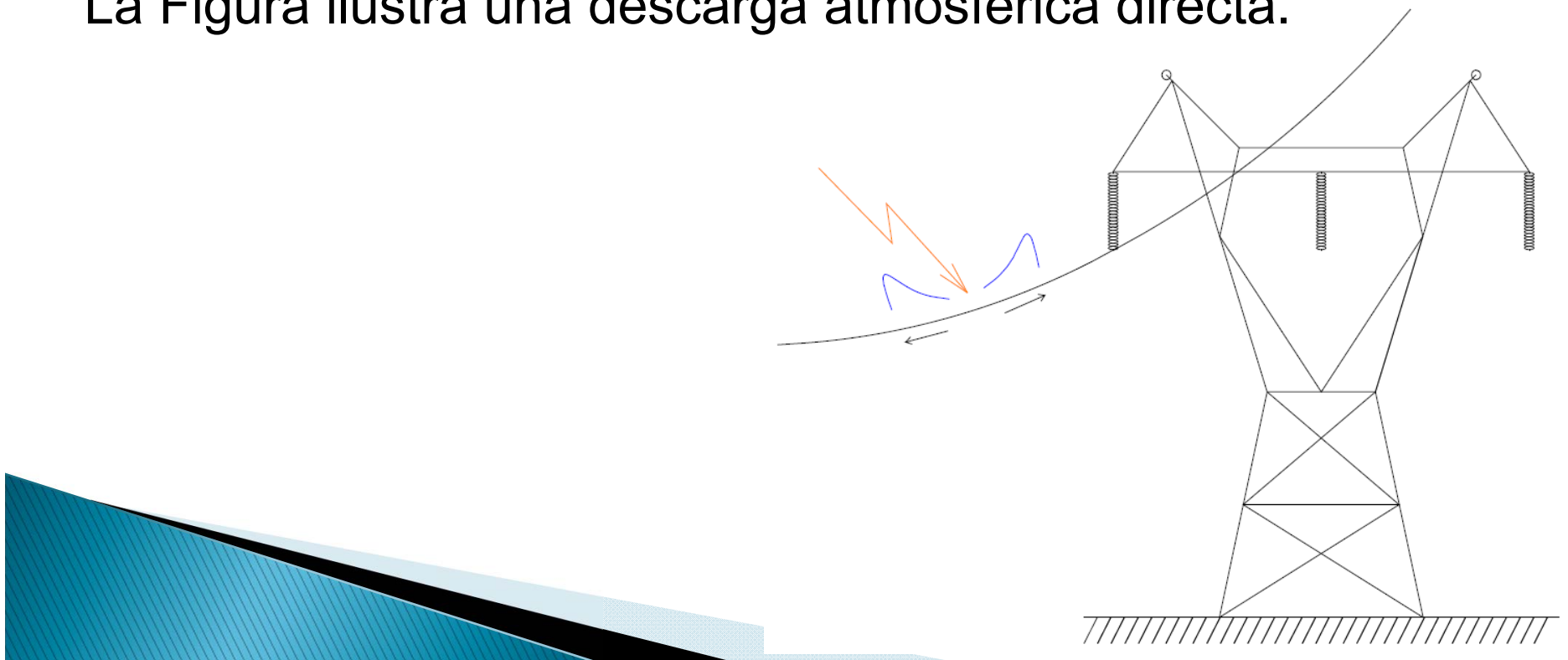
Este tipo de incidencia produce altas sobretensiones debido a que *dos ondas viajeras de sobretensión se propagan en sentidos contrarios a partir del punto de incidencia del rayo, que luego al encontrar un punto de discontinuidad, como por ejemplo un interruptor abierto, un transformador u otras líneas, en parte se refleja retornando hacia el punto de incidencia y en parte se transmite a través de la discontinuidad.*



Sobretensiones de Frente Rápido....

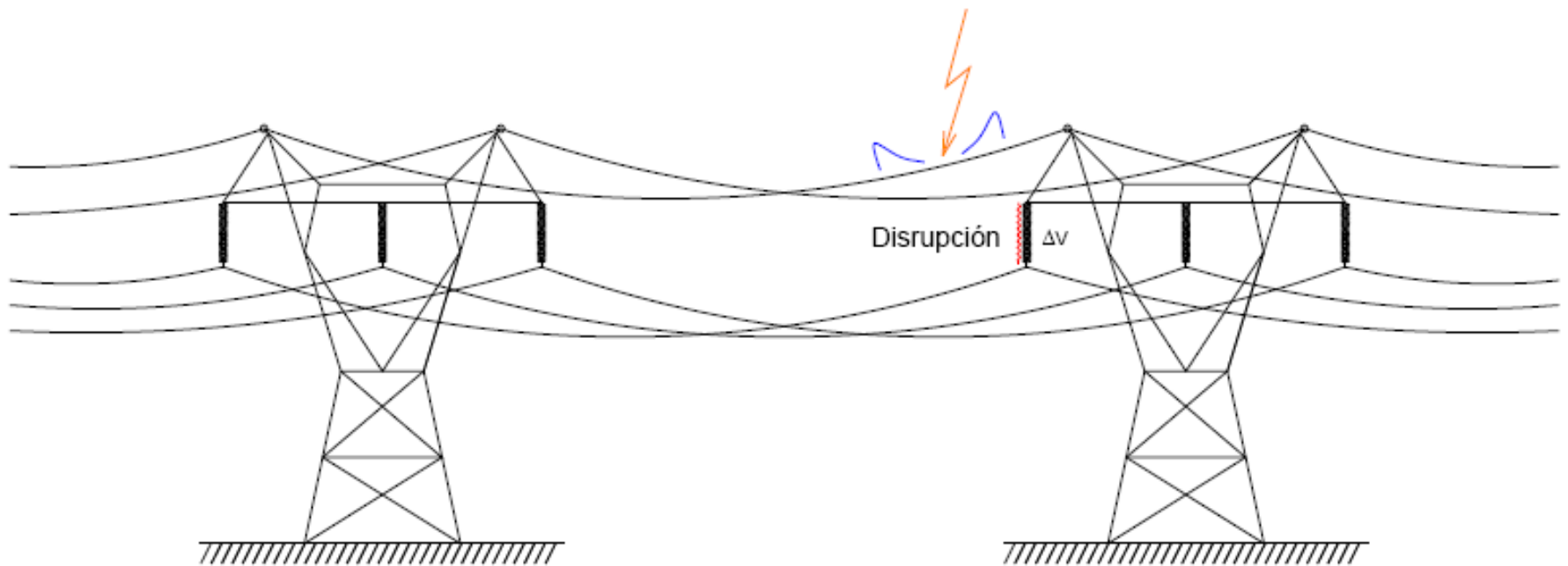
Descargas atmosféricas directas... En caso que *la onda que avanza por la línea encuentre un transformador, se reflejará totalmente conservando la polaridad.*

Esta onda reflejada al superponerse con la onda incidente da como resultado una sobretensión del doble de magnitud. La Figura ilustra una descarga atmosférica directa.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Flameo inverso.- ocurre cuando la descarga atmosférica ha caído sobre el sistema de apantallamiento (hilo de guarda o la torre) y la diferencia de potencial generada entre la estructura y el conductor de fase supera el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores, provocándose el flameo o disrupción sobre la cadena. La Figura ilustra el evento de un flameo inverso.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Flameo inverso....

Aún cuando la descarga golpee al hilo de guarda en la mitad del vano, la disrupción ocurrirá a través de la cadena de aisladores, ya que es el punto de menor aislamiento entre los conductores de fase y el hilo de guarda, además que a lo largo del vano las distancias entre estos conductores es lo suficientemente grande como para impedir la disrupción entre ellos.

Por lo tanto, tener una disrupción entre el hilo de guarda y el conductor de fase a lo largo del vano es un evento muy poco probable.

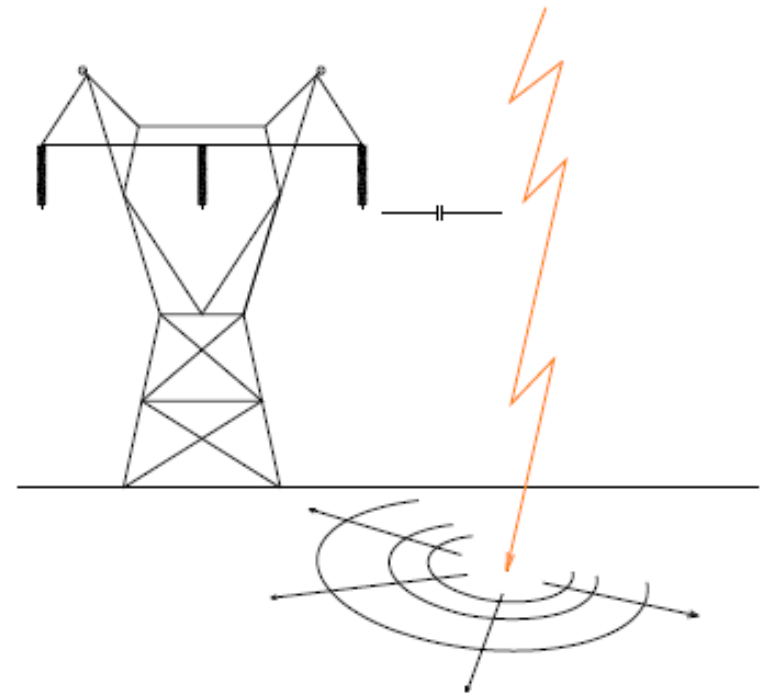
La presencia de sobretensiones por *flameo inverso en sistemas de extra alta* tensión *son menos probables* que en sistemas con voltajes nominales inferiores a 245 kV, *debido a que la resistencia del aislamiento para estos sistemas suele ser mayor* que la diferencia de potencial generada.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Descargas atmosféricas próximas a la línea.-

se refiere a las descargas atmosféricas a tierra en las cercanías de una línea y que generan sobretensiones inducidas en ella. La Figura ilustra este evento.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Descargas atmosféricas próximas a la línea....

Las tensiones inducidas alcanzan valores de hasta alrededor de 500 kV, por lo que son de interés únicamente para sistemas cuyo nivel de aislamiento sea inferior a la tensión inducida.

Así, para *sistemas > 69 kV las tensiones inducidas no se consideran.*



Sobretensiones de Frente Rápido

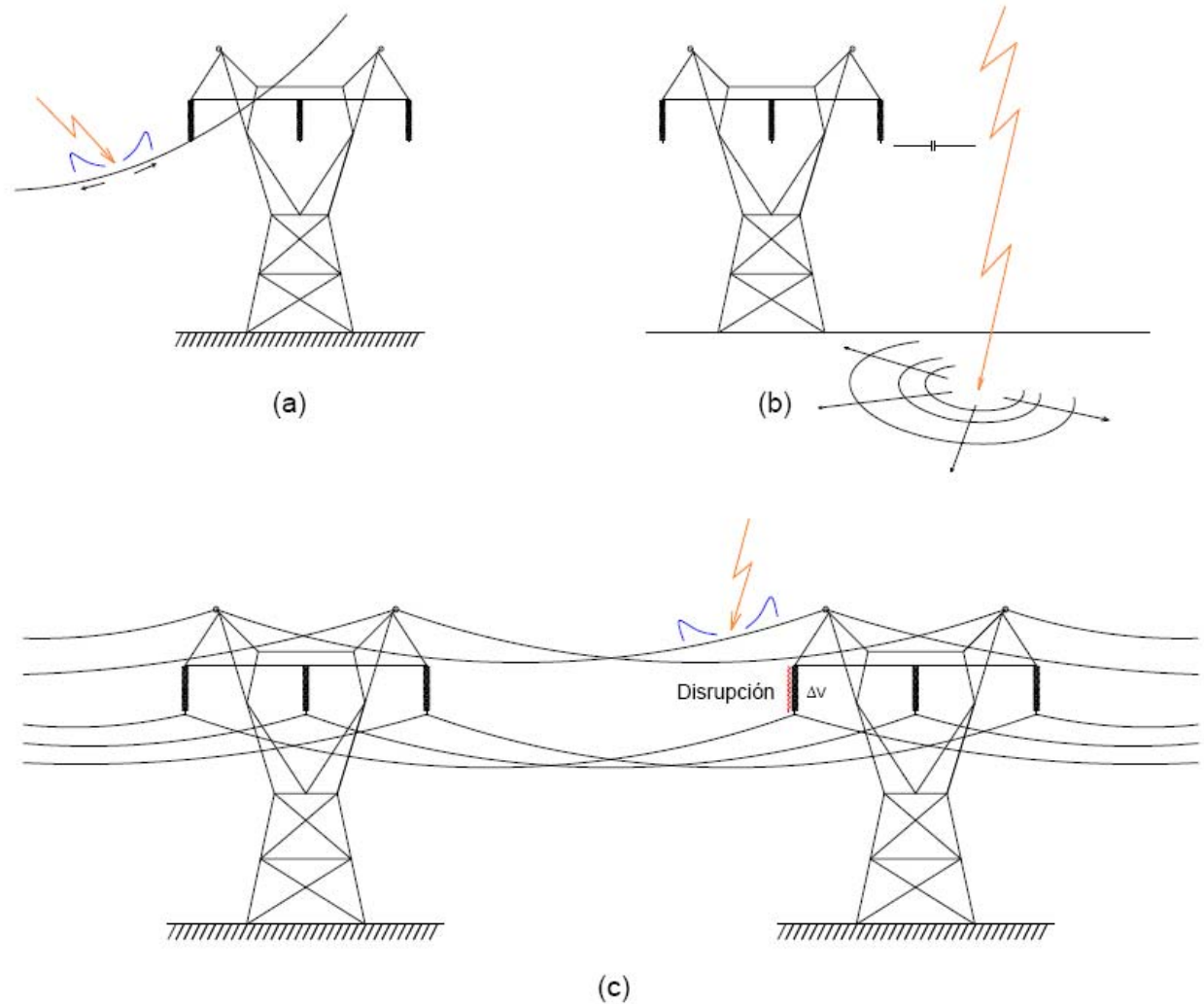


Figura 2.14. Eventos de descargas atmosféricas. (a) Descarga atmosférica directa, (b) Descarga atmosférica cercana a la línea. (c) Flameo inverso. [13]

Sobretensiones de Frente Rápido....

En general, las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas en la red de transmisión originan ondas de tensión que llegan hasta los equipos de la subestación a la cual están conectadas, provocando a su vez, sobretensiones en la subestación.



Sobretensiones de Frente Rápido....

La severidad de estas sobretensiones y su tasa de ocurrencia dependen de: la amplitud y forma de onda de la sobretensión en la línea vinculada, el número de líneas conectadas, el tamaño y disposición de la subestación y el sistema de protección y apantallamiento tanto de las líneas como de la subestación.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Para subestaciones o equipos de una subestación *sin protección de pararrayos el parámetro más importante es la amplitud de la sobretensión que llega a la subestación.*

Dicha amplitud por lo general es demasiado elevada como para ser considerada en la coordinación de aislamiento. Sin embargo, el uso de pararrayos como elemento de protección es casi siempre considerado.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Para subestaciones protegidas por pararrayos, se debe tomar en cuenta la pendiente de la onda de sobretensión que llega desde la línea y la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo a proteger.



Sobretensiones de Frente Rápido....

La pendiente de la onda de sobretensión que llega a la subestación se *reduce* principalmente por el efecto corona en la línea.

Además, si el rayo cae a cierta distancia de la subestación, se consigue tener un sobrevoltaje de menor amplitud en ella.



Las sobretensiones atmosféricas en subestaciones se pueden evitar mediante el adecuado diseño de las líneas de transmisión conectadas a ellas.

Por ejemplo, para evitar descargas atmosféricas directas sobre los conductores se debe realizar un diseño confiable del apantallamiento de la línea mediante hilos de guarda, cuya función es interceptar a la descarga atmosférica directa y conducir la corriente del rayo a tierra a través de las estructuras metálicas, dando como resultado que las sobretensiones que ingresen a la subestación sean menos severas.



Mientras que, para *evitar flameos inversos se recomienda la disminución de la impedancia de puesta a tierra de la estructura*, el aumento de aislamiento y mantener separaciones adecuadas entre: los conductores de fase y la estructura, entre el hilo de guarda y los conductores de fase y entre conductores de fase.



Sobretensiones de Frente Rápido....

Métodos análogos a los anteriormente descritos para el blindaje de líneas transmisión se pueden también utilizar para el blindaje de subestaciones, entre ellos el uso de conductores a tierra aéreos (cables de guarda) y mástiles metálicos.



Sobretensiones de Frente Rápido

OPERACIONES DE MANIOBRA

Estas sobretensiones de frente rápido ocurren principalmente:

1. al conectar o desconectar equipo en subestaciones o,
2. por descargas disruptivas en el aislamiento externo.

Esto a su vez provoca un fuerte estrés sobre el aislamiento interno cercano.



Sobretensiones de Frente Rápido

La forma de onda de las sobretensiones de *frente rápido por maniobra* corresponde a la forma de onda normalizada del impulso tipo rayo.

Su magnitud, depende de las características de los equipos de corte y seccionamiento, y es en la mayoría de los casos menor que la magnitud de las sobretensiones de origen atmosférico, razón por la cual no se considera.

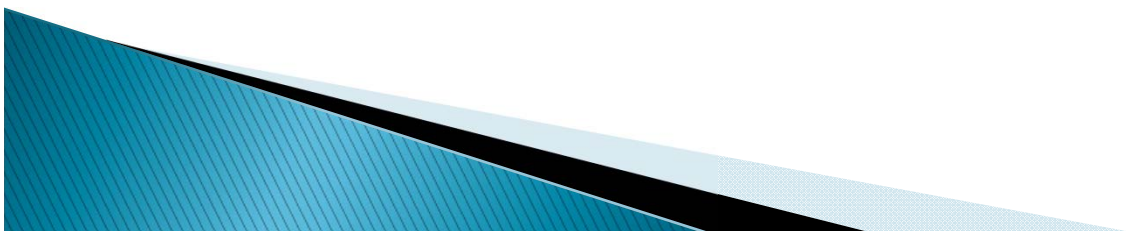


Sobretensiones de Frente Rápido

Los *valores máximos* esperados para la amplitud de estas sobretensiones son:

- *2 p.u* en el caso de interruptores sin reencendido del arco eléctrico y
- *3 p.u* para disyuntores con reencendido.

En la actualidad, con las nuevas tecnologías en interruptores, particularmente en SF6, la probabilidad de reencendido es muy baja.



Sobretensiones de Frente Rápido

La ocurrencia simultanea de sobretensiones de frente rápido *por maniobra en más de una fase es altamente improbable*, razón por la que, se asume que el máximo voltaje fase-fase es el valor del voltaje fase-tierra.

Para controlar las sobretensiones de frente rápido por maniobra,

1. Uso de descargadores de sobretensiones, se debe seleccionar un adecuado equipo de corte y seccionamiento, como por ejemplo, interruptores libres de reignición, con corte en baja corriente y,
2. Con resistencias de apertura o cierre.



Sobretensiones de Frente Extra Rápido

Las sobretensiones de frente extra rápido *se originan* principalmente por operaciones de maniobra o fallas *en subestaciones aisladas en gas (GIS)*, así como en transformadores de subestaciones de media tensión con conexiones cortas con los equipos de maniobra.

En GIS las sobretensiones de frente extra rápido se generan debido a la propagación no amortiguada de la onda de sobretensión dentro de la subestación.

Cuando la sobretensión abandona la GIS, su amplitud se amortigua rápidamente y además el tiempo de frente de onda aumenta hasta corresponder al de una sobretensión de frente rápido.



La forma de onda de este tipo de sobretensión se caracteriza por el rápido incremento en su amplitud, tanto así que el *tiempo que tarda en alcanzar su valor pico* o frente de onda es incluso $< 1 \mu s$.

En operaciones de desconexión, subsiguiente al frente de onda aparece una oscilación con $f > 1 \text{ MHz}$.

El *tiempo de duración* de estas sobretensiones es por lo general, $< 3ms$.

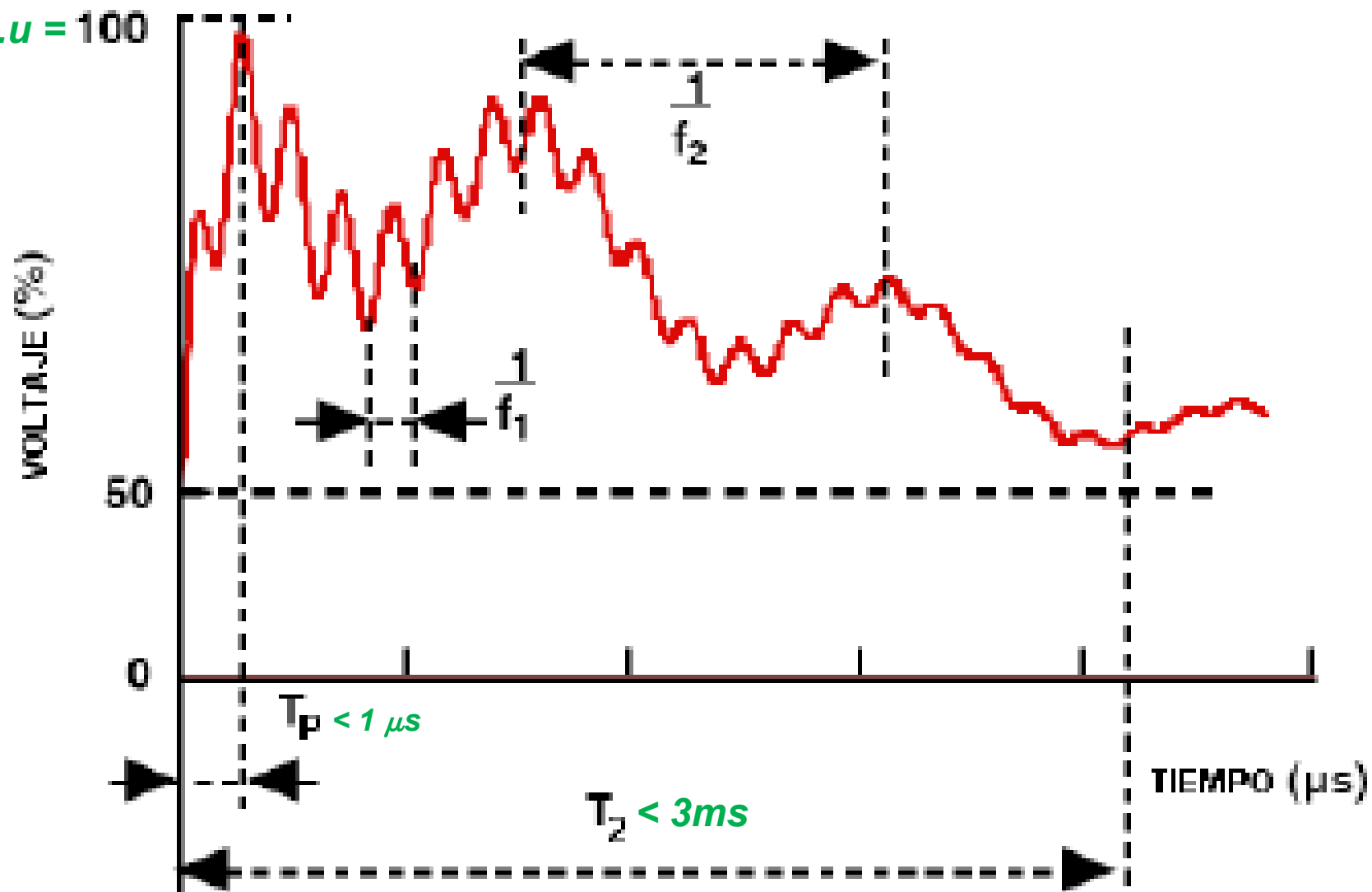


La amplitud de la sobretensión depende tanto de las características del equipo de maniobra así como de la configuración de la subestación.

Se puede asumir que *es posible limitar su valor hasta a 2.5 p.u.* La Figura siguiente muestra la forma de onda característica de una sobretensión de frente extra rápido, dónde se puede apreciar los criterios anteriormente mencionados.



$2.5 \text{ p.u.} = 100$



Forma de onda de sobretensión de frente extra rápido.

En GIS donde las sobretensiones presenten oscilaciones de entre 0.2 MHz a 2 MHz y con amplitudes de 1.5 veces superiores al voltaje de descarga disruptiva, se recomienda proteger el equipo con pararrayos. Sin embargo, las altas frecuencias de las ondas de sobretensión pueden provocar fenómenos de resonancia en los devanados de los transformadores, que se pueden evitar con la instalación de capacitores de valores adecuados para contrarrestar el fenómeno.



Dado que las sobretensiones de frente extra rápido ocurren principalmente en GIS, para subestaciones exteriores o aisladas en aire (*AIS*), *no se consideran.*



RESUMEN DE SOBRETENSIONES

A continuación se muestra un resumen de las características de cada una de las sobretensiones anteriormente analizadas.

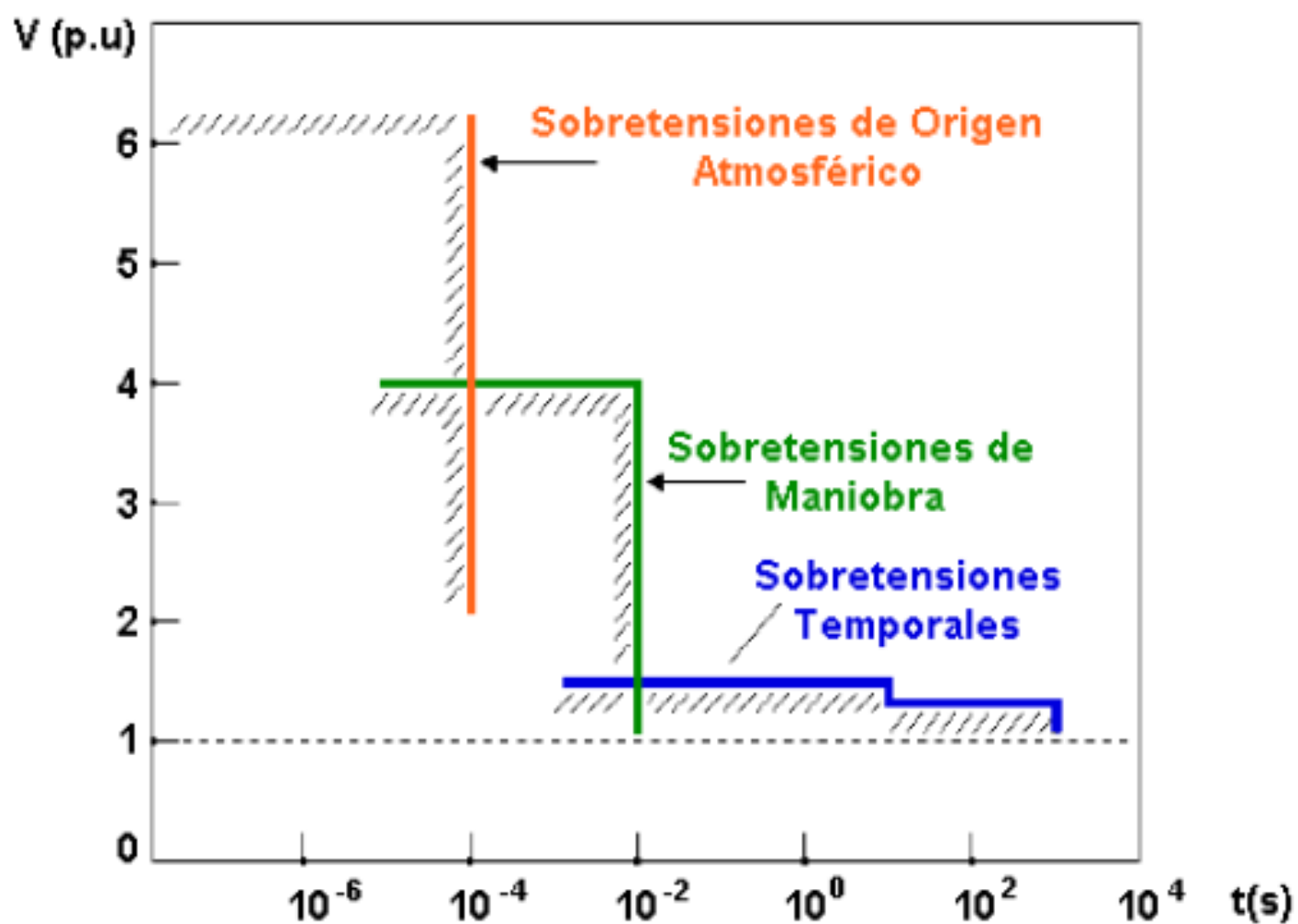


RESUMEN DE SOBRETENSIONES...

Breve clasificación de sobretensiones según su origen ***

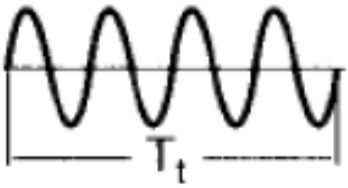
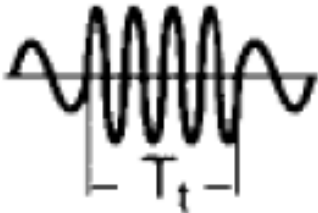
Tipo de sobretensión (causa)	Amplitud de la sobretensión (p.u) MT-AT	Duración	Amortiguamiento
A frecuencia industrial (defecto aislamiento)	$\leq \sqrt{3}$	Larga > 1s	Débil
De maniobra (interrupción de cortocircuito)	1.5 a 4	Corta 1ms	Medio
Atmosférica (caída directa del rayo)	≈ 2 a 6	Muy corta 1 a 10 μ s	Fuerte



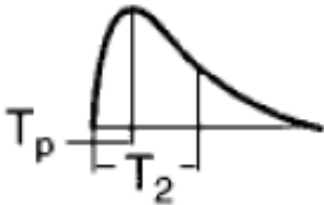
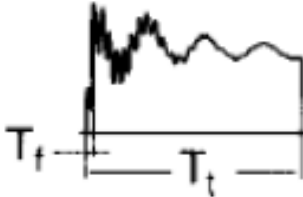


Representación gráfica de las sobretensiones de un sistema de extra alta tensión.

Clases, formas de onda y tiempos característicos de sobretensiones

Clase de sobretensión	Baja frecuencia	
	Permanente	Temporal
Forma		
Gama de formas (frecuencia, frente de subida, duración)	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$
Forma normalizada	$f = 50 \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t (*)$	$48 \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$
Ensayo de tensión soportada normalizada	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración

* A especificar por el fabricante del equipo.

Clase de sobretensión	Transitoria		
	De frente lento	De frente rápido	De frente muy rápido
Forma			
Gama de formas (frecuencia, frente de subida, duración)	$5000 \mu\text{s} > T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	(*)
Ensayo de tensión soportada normalizada	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	(*)

* A especificar por el fabricante del producto.

Analizada la naturaleza y las características de las sobretensiones que pueden aparecer en una subestación, se definirá:

1. Las características de los elementos de protección y,
2. el nivel de aislamiento que los elementos de la subestación deberán tener ante cada una de ellas.



RANGOS DE TENSION MAS ELEVADA

La Norma IEC 71-1 define dos rangos de voltajes para los sistemas eléctricos en función de la tensión más elevada para los equipos.



Rango I: Comprende tensiones desde 1 kV hasta 245 kV incluido. A este rango pertenecen las redes de distribución, subtransmisión y transmisión en alta tensión.

Rango II: Tensiones superiores a 245 kV. Este rango se aplica en redes de transmisión de extra alta tensión.



Diferentes aspectos operacionales se aplican a cada rango, por ello en el estudio de coordinación de aislamiento se deben tomar en cuenta criterios inherentes a cada uno de ellos por separado.



Fin parte 1

Gracias

