



COORDINACIÓN DE AISLACIÓN DE LÍNEAS
A LAS SOBRETENSIONES DE MANIOBRA

PLAN DE LA PRESENTACIÓN

✓INTRODUCCIÓN

✓ENERGIZACIÓN DE LÍNEA

✓RECIERRE DE LÍNEA

✓MEDIDAS DE MITIGACIÓN

✓PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LAS STM

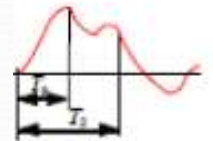
✓INFLUENCIA DEL VIENTO

✓EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS AISLACIONES

INTRODUCCION

Origen de la sobretensión: maniobras de apertura y cierre de la línea.

Forma de onda: Frentes de onda de décimas o centésimas de ms (ondas de “frente lento”), y tiempos de cola de unos pocos ms.



Valores de pico: 1,7 a 3 p.u. Críticos para las distancias de aislación en líneas EAT (300 kV o más).

Principales factores aleatorios en las tensiones impuestas:

- instante de la onda de tensión en que se produce el cierre de un disyuntor.
- dispersión estadística del instante exacto en que cierra el disyuntor de cada fase.

Maniobra típica a analizar para la coordinación de aislación de líneas aéreas de EAT:

Energización de línea en sus dos principales variantes:

- Energización programada de una línea en vacío sin carga.
- Recierre de una línea (energización de una línea en vacío con carga), por lo general precedida de una apertura a consecuencia de un cortocircuito

VALORES TÍPICOS DE SOBRETENSÕES DE MANIOBRA

Tipo de Manobra	Sem Equipamentos Especiais			Com Resistor (300 a 600Ω)		Com Sincronização Sem Resistor
	Valor Máximo em p.u.		Desvio Padrão %	Valor Máximo	Desvio Padrão %	Valor Máximo
	Início Linha	Fim Linha				
Energização de Linhas	1,5 a 2,5	2,0 a 3,0 ⁽¹⁾	15 a 20	1,3 a 2,2	4 a 8	1,45 a 1,7
Religamento Tripolar	2,0 a 3,0	3,0 a 5,0 ⁽²⁾	10 a 25	1,2 a 1,7 ⁽³⁾ 1,5 a 2,5		1,3 a 1,6
Religamento Monopolar	< 2,0	1,8 a 2,5 ⁽⁴⁾		< 1,8 ⁽⁴⁾ < 2,3		
Eliminação de Curto	< 2,0	< 2,5		1,5 ⁽³⁾		
Rejeição de Carga	1,25 a 1,75	1,5 a 2,0		1,5 ⁽³⁾		
Ocorrência de Curtos	1,3 a 1,6	1,6 a 2,2				
Abertura de Cargas Indutivas	2,5			1,3 a 1,5 ⁽³⁾		
Abertura de Linhas em Vazio	1,3 a 1,5					

- Notas: (1) Usando para-raios estes valores ficam entre 2 e 2,2
 (2) Valores indicados são pessimistas
 (3) Com resistor em abertura
 (4) Presença de reatores na linha

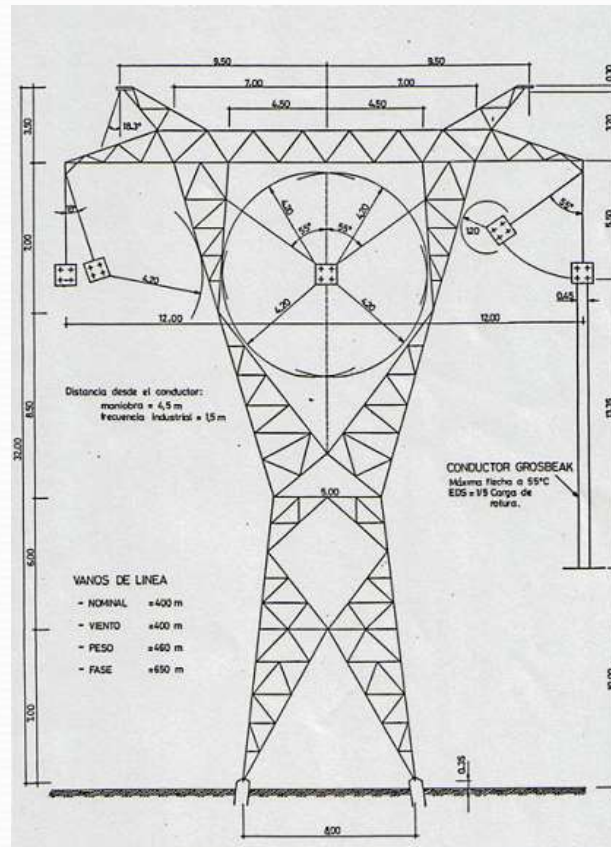
Distribución de probabilidad típica de una maniobra de energización de línea:



Principales factores aleatorios para la evaluación de la soportabilidad de las aislaciones :

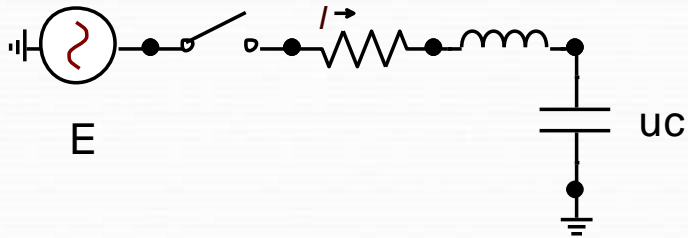
-la propia soportabilidad de las aislaciones en aire.

-la distribución de velocidades de viento, que hace variar las distancias de aislación asociadas a las cadenas en "I".



ENERGIZACION DE LINEA

Análisis simplificado de energización de una línea en vacío no compensada (sin reactor de línea):



R,L : parámetros longitudinales de la línea

C : capacitancia paralelo de la línea

$$L \frac{di}{dt} + R.i + \frac{1}{C} \int i . dt = E . \cos(\omega . t + \psi)$$

Se supondrá la energización en $t=0$, por lo que ψ identifica el instante de cierre.

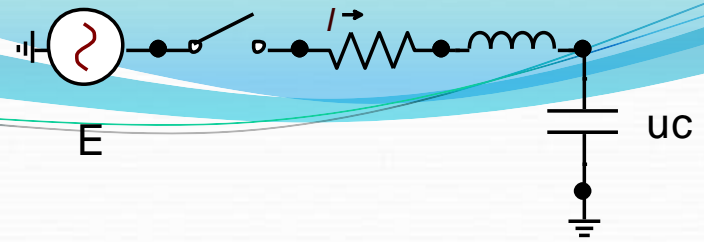
Condiciones iniciales

Suponiendo que la línea estaba inicialmente en vacío y descargada:

$$i(0)=0 \quad (\text{en vacío})$$

$$uc(0)=0 \quad (\text{descargada})$$

La ecuación diferencial se resuelve, como es habitual, superponiendo la solución de la ecuación homogénea (transitorio) con la solución de régimen. (Ver detalles en los apuntes)



Caso $\psi = 0^\circ$ (cierre en el pico de tensión)

$$u_c(t) = U_c^{re} \left[\cos(\omega.t) - e^{-\frac{t}{2.T}} \cos(\nu.t) \right]$$

$$i(t) = I^{re} \left[-\sin(\omega.t) + \frac{\nu}{\omega} e^{-\frac{t}{2.T}} \sin(\nu.t) \right]$$

U_c^{re} = tensión de régimen en el extremo abierto (condensador)

I^{re} = corriente de régimen

$$T = L/R$$

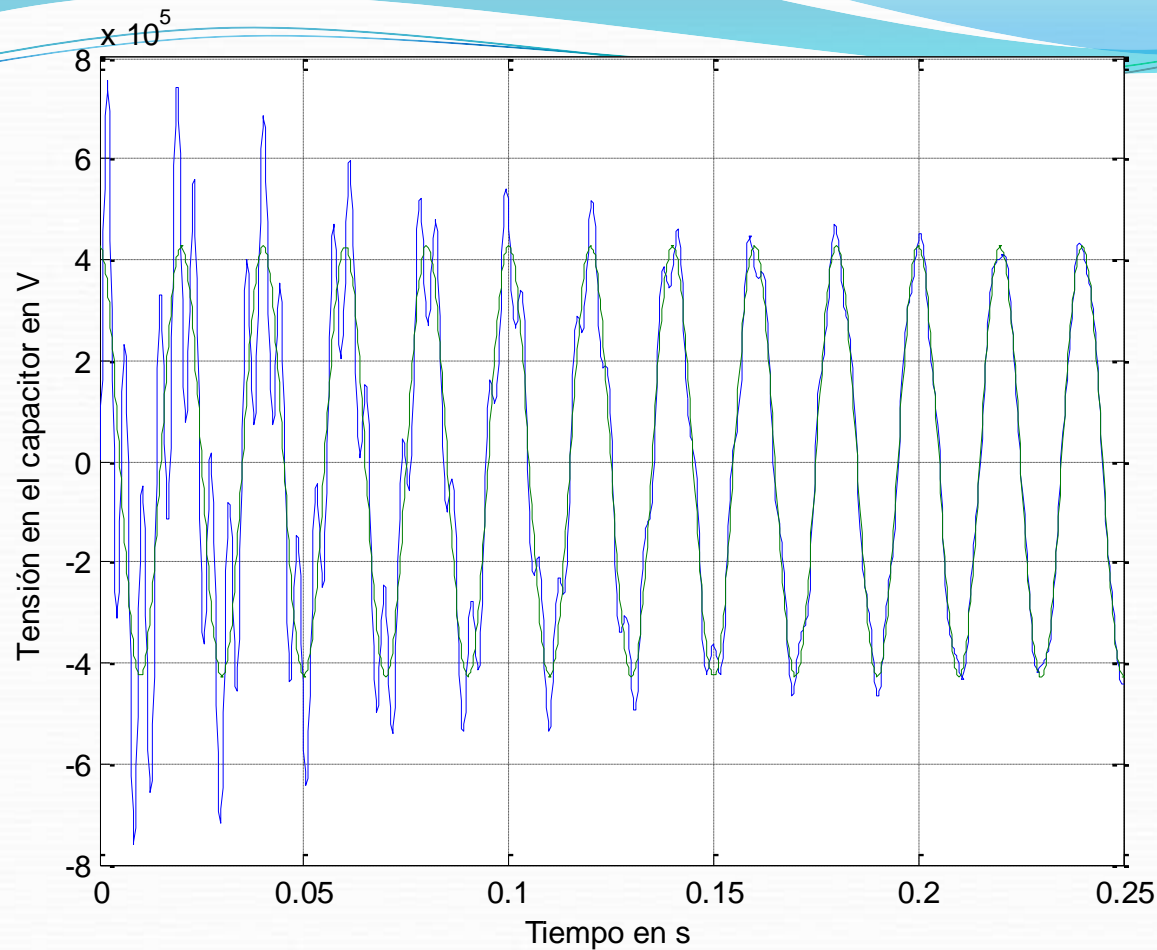
$$\nu \approx \sqrt{1/LC}$$

Dado que habitualmente $\nu \gg \omega$, resulta :

$$u_c(t) \approx 2U_c^{re} \quad \text{para } t=1/2 \text{ período de la oscilación natural.}$$

La corriente puede alcanzar valores mucho mayores, dado que la componente transitoria está afectada por el factor ν/ω .

(Ejemplo: para una línea de 500 kV típica de 200 km es $L=0,8$ mH/km, $C=0.014$ μ F/km, de dónde $\nu/(2\pi)=240$ Hz)



**El transitorio de tensión es una oscilación a la frecuencia natural del circuito, amortiguada con constante de tiempo $2T$.
Para una línea de 500 kV típica: $L=0,8$ mH/km; $R=0,03$ ohm/km; de dónde $2T=53$ ms**

Caso $\psi = 90^\circ$ (cierre en el cero de tensión)

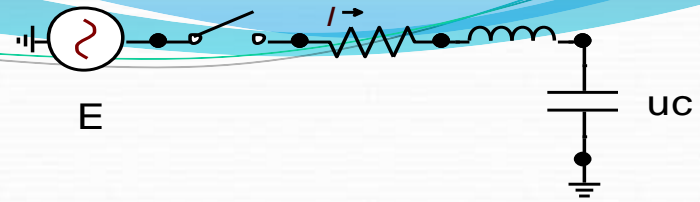
$$u_c = U_c^{re} \left[\sin(\omega.t) - \frac{\omega}{\nu} e^{-t/2T} \sin(\nu.t) \right]$$

$$i = I^{re} \left[\cos(\omega.t) - e^{-t/2T} \cos(\nu.t) \right]$$

La tensión en el capacitor no crece en forma apreciable durante el transitorio.

Principales conclusiones :

- ✓ Es de esperar tensiones de energización del orden de hasta 2 veces la tensión de régimen, y el valor depende del instante de cierre.
- ✓ El transitorio se manifiesta a través de una onda de frecuencia superior a la industrial, “superpuesta” a la onda de frecuencia industrial, y que se amortigua en unos pocos ciclos.
- ✓ El valor de pico es proporcional a la tensión de régimen, por lo que aumenta al crecer la longitud de la línea (efecto Ferranti).



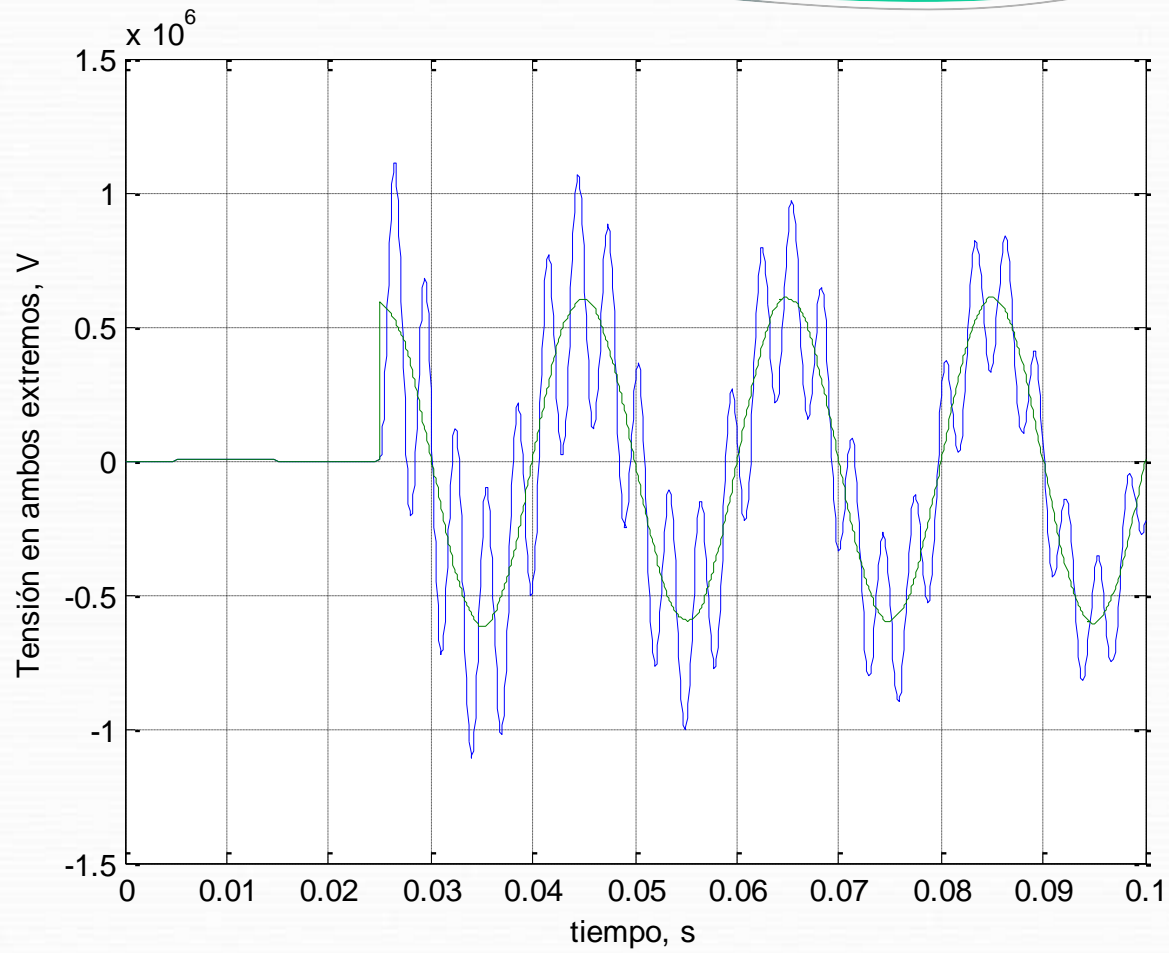
Modelos más precisos de la energización

Los casos “reales” de energización son bastante más complejos:

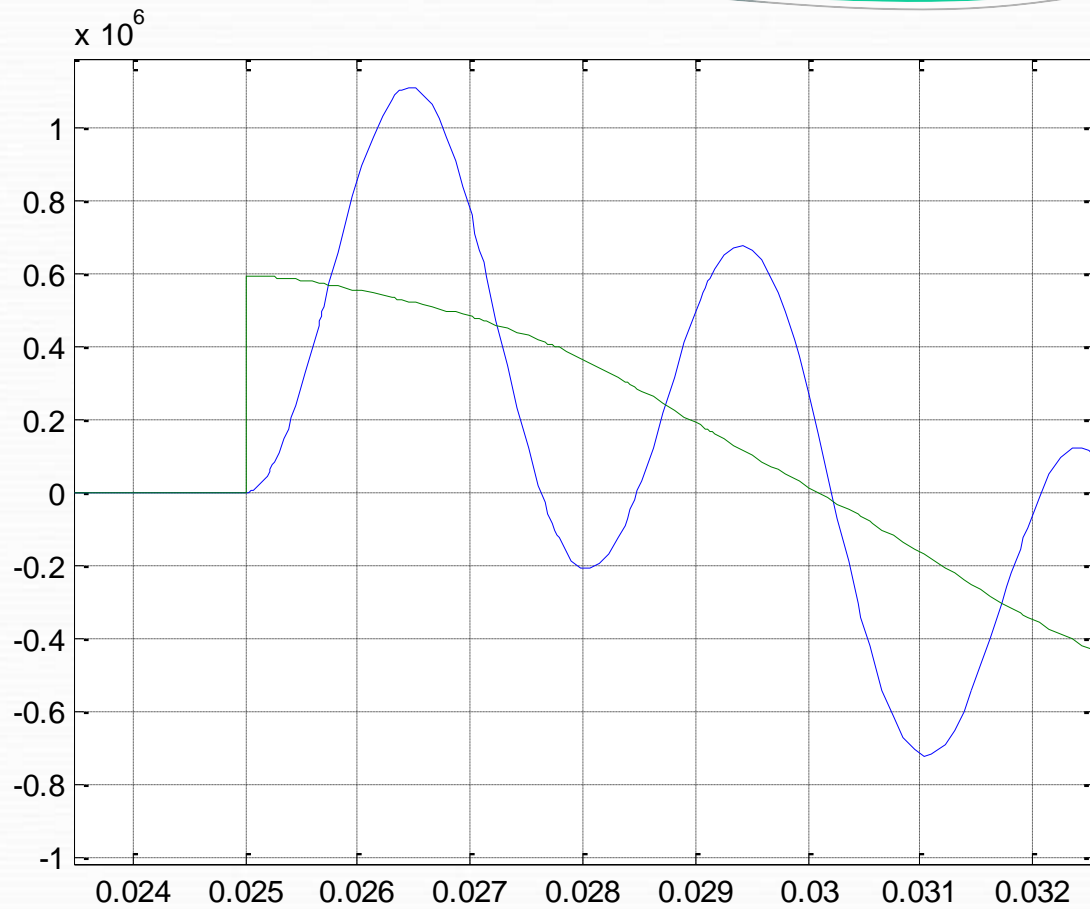
- ✓ El circuito tiene más de una frecuencia natural.
- ✓ Las líneas aéreas reales son trifásicas, por lo que el modelado simplificado no se puede hacer con un único circuito equivalente sino con 2 o 3 circuitos modales
- ✓ Debido a la dispersión mecánica de los contactos de los disyuntores, las 3 fases nunca se energizan simultáneamente.
Esto implica que:
 - Sólo la primer fase que cierra lo hace contra un capacitor descargado.
 - Aun cuando el funcionamiento de régimen sea perfectamente equilibrado, siempre existen condiciones de secuencia cero una vez producida la maniobra.

- ✓ **El modelo preciso para representar líneas aéreas no es el modelo sencillo de parámetros concentrados, sino un modelo de parámetros distribuidos.**

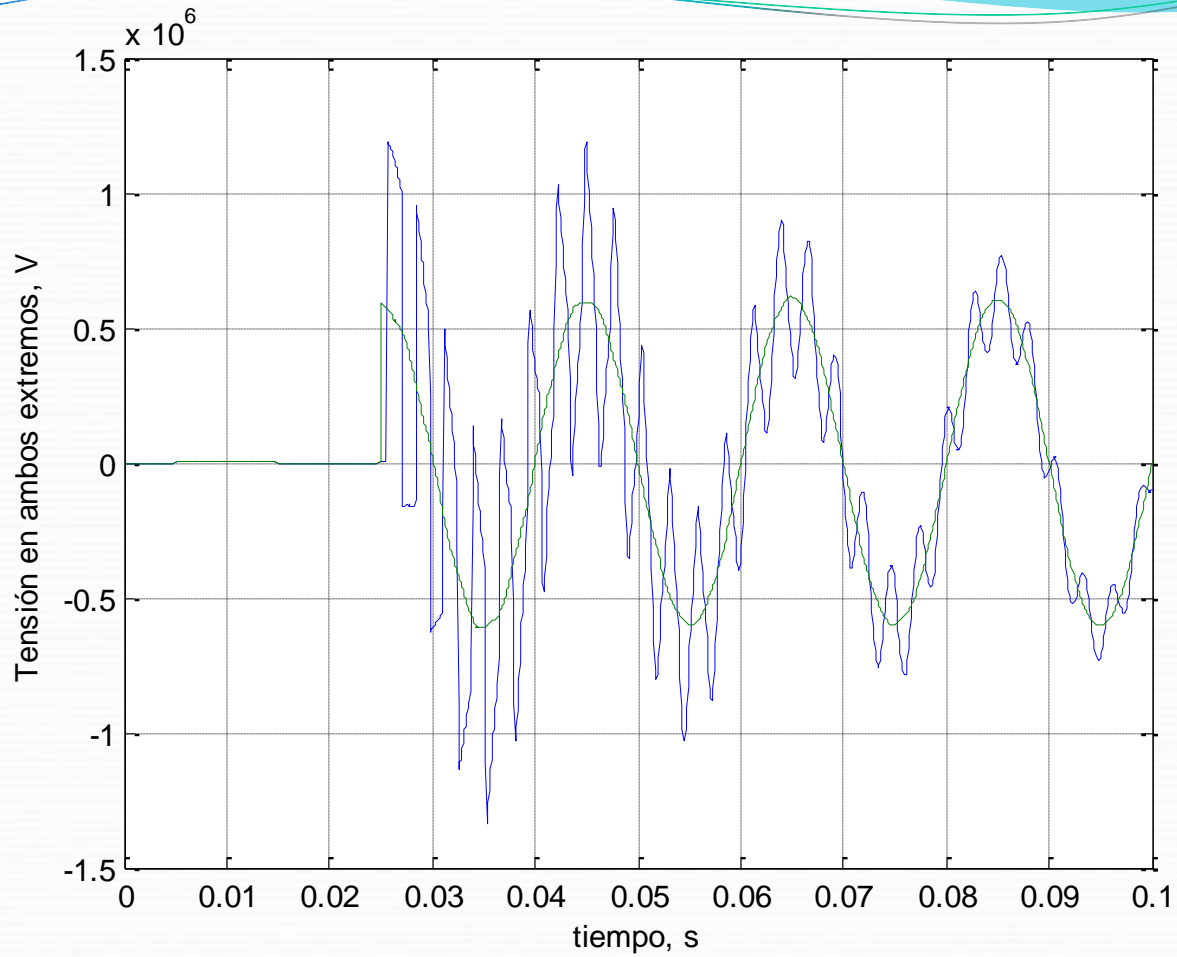
Las sucesivas ondas incidentes y reflejadas son las responsables del típico aspecto “puntiagudo” de los oscilogramas de tensión durante la energización



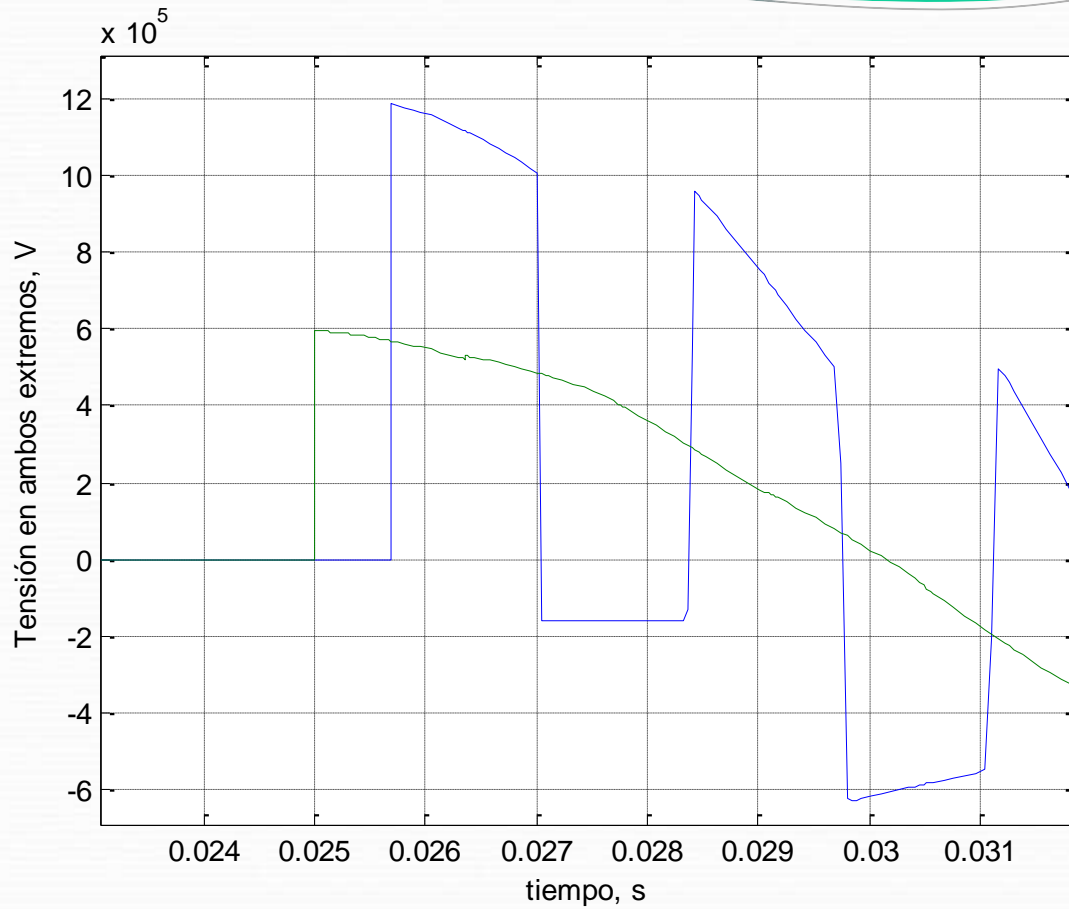
Energización usando parámetros concentrados (una sección π)



Zoom instante de la energización



Energización usando parámetros distribuidos



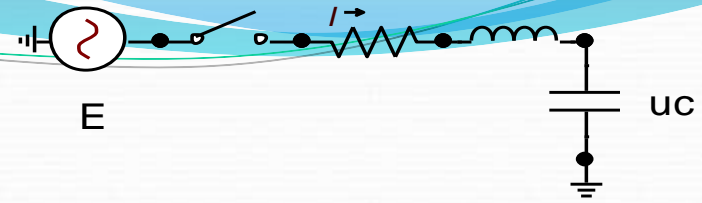
Zoom instante de la energización

Conclusión: si bien el análisis simplificado que mostramos da una idea bastante clara de cómo influyen los parámetros relevantes, el cálculo de sobretensiones de energización debe hacerse, en rigor, por medio de simulaciones digitales.

Requisitos de las simulaciones:

- ✓ “Barrer” adecuadamente todo el ciclo de frecuencia industrial (considerar todos los posibles instantes de cierre).
- ✓ Considerar diversos escenarios de generación (variación de la potencia de cortocircuito del lado fuente).

Características del modelado:



Tiempo total de estudio : unos pocos ciclos.

Máquinas representadas por fuentes de tensión.

Equivalentes de red por medio de circuitos de elementos concentrados.

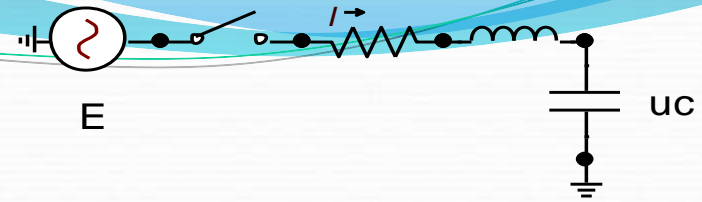
Líneas representadas con modelos de parámetros distribuidos, con posibilidad de representar líneas no traspuestas.

Reactores de línea modelados como elementos concentrados.

Descargadores de punta de línea con modelos no lineales específicos.

Disyuntores como llaves ideales, con la posibilidad de fijar instantes de cierre independientes para cada polo. Se deben incluir eventuales llaves auxiliares para modelar las resistencias de preinserción.

RECIERRE DE LINEA



Análisis simplificado

El análisis simplificado hecho para la energización convencional (sin carga atrapada) sigue siendo válido, pero ahora la condición inicial para la tensión en bornes del condensador pasa a ser $u_c(0) = U_0$

siendo U_0 la tensión “atrapada” en el capacitor en el momento del recierre

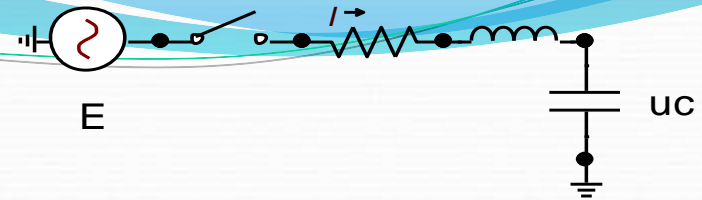
Los disyuntores abren en el cero de corriente \Rightarrow si se abre una línea en vacío, la línea queda cargada con el pico de tensión (el factor de potencia de la línea en vacío es casi nulo).

Si se recierra en el pico de polaridad opuesta, transcurrido medio ciclo de la frecuencia natural de la línea, la tensión en el condensador alcanza un valor de

$$u_c(t) \approx 3U_C^{re}$$

por lo que es un peor caso que el de energización en vacío

(Ver desarrollo detallado en los apuntes)

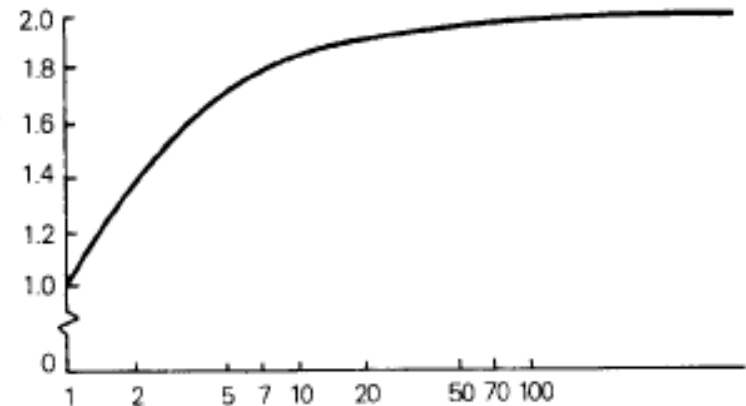
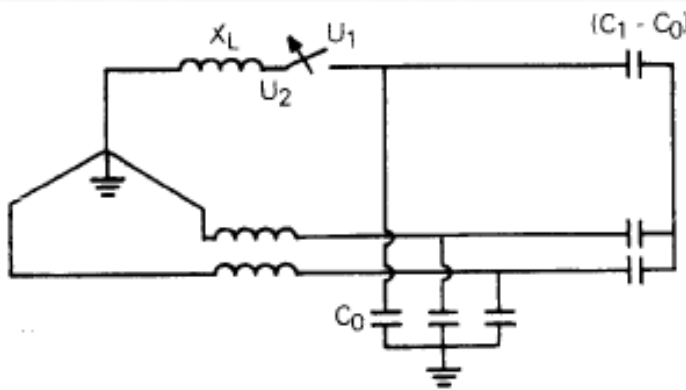


Carga atrapada en la línea

- ✓ La situación real de energización con carga atrapada se da cuando se abre una línea en vacío (situación que siempre se da para el segundo disyuntor que abre una línea con disyuntor en sus 2 extremos), con o sin falta, y luego se la recierra antes que tenga tiempo de drenar su carga atrapada.
- ✓ Las líneas sin dispositivos especiales para drenar la carga (resistencia de apertura) pueden conservar la carga durante mucho tiempo. El drenaje se realiza en tales casos lentamente a través de las cadenas de aisladores o (más rápido) a través de transformadores de tensión inductivos o reactores que puedan estar conectados a la línea abierta.
- ✓ Para el caso especial del reenganche automático rápido, los tiempos muertos son inferiores al segundo. Es de esperar, por lo tanto, que si la línea no tiene resistencias de apertura o transformadores de tensión inductivos, los cierres se hagan sobre una carga atrapada importante.

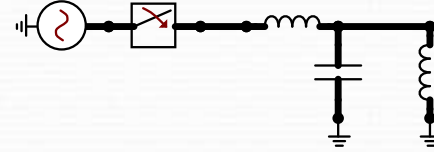
✓ Las aperturas se realizan en los ceros de corriente y las líneas en vacío son circuitos con factor de potencia casi nulo \Rightarrow es de esperar que las aperturas dejen “atrapadas” tensiones del orden de la tensión de pico de la fuente.

✓ En rigor: para líneas trifásicas esta tensión atrapada suele ser aun mayor para la primer fase que abre (valor típico: 1,2 p.u), a consecuencia del acoplamiento capacitivo con las fases aun cerradas



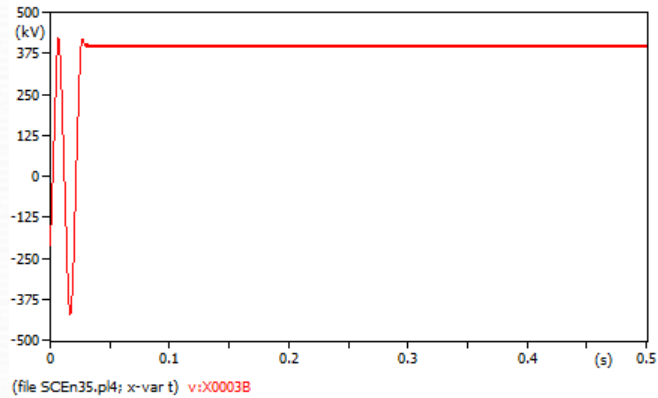
Tensión de pico primera fase en p.u. en función de C_1/C_0 .

✓ Si la apertura es trifásica y debida a una falta monofásica (situación muy habitual), la tensión atrapada en las fases sanas será aun mayor (efecto del factor de puesta a tierra)

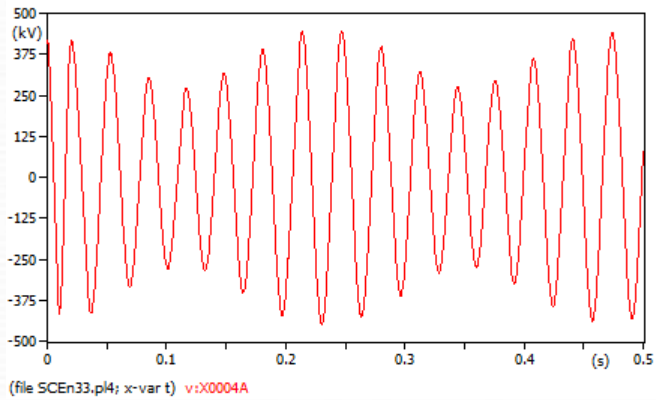


Influencia de los reactores de línea

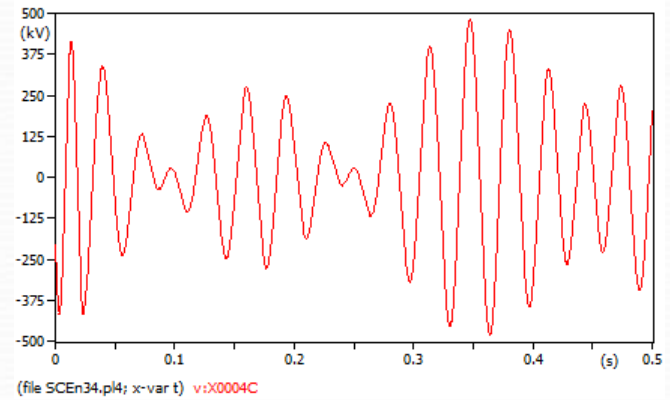
- ✓ La carga atrapada se mantiene oscilando (“ringing”) entre los reactores y las capacitancias de la línea, amortiguándose a causa principalmente de las pérdidas en el reactor.
- ✓ La oscilación se da a las frecuencias naturales del circuito.
Si la línea es trifásica hay 3 frecuencias naturales en el circuito: f_0 (secuencia cero), f_1 (secuencia positiva) y f_2 (secuencia negativa)
- ✓ Si una línea no traspuesta se modela como traspuesta ($f_1=f_2$) la oscilación de descarga de la carga atrapada no se modela correctamente \Rightarrow la tensión que se encuentra en la línea al momento del recierre puede llegar a subestimarse.



Sin reactor



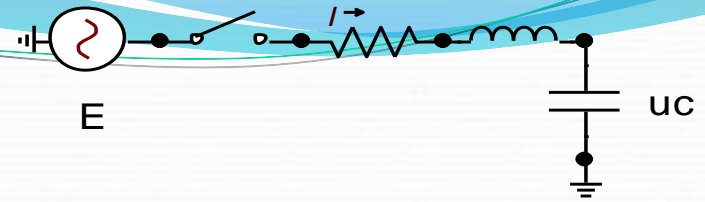
Traspuesta



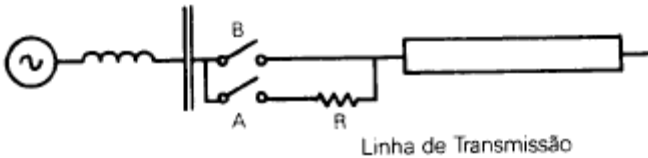
No traspuesta

MEDIDAS DE MITIGACION

Resistencias de preinserción



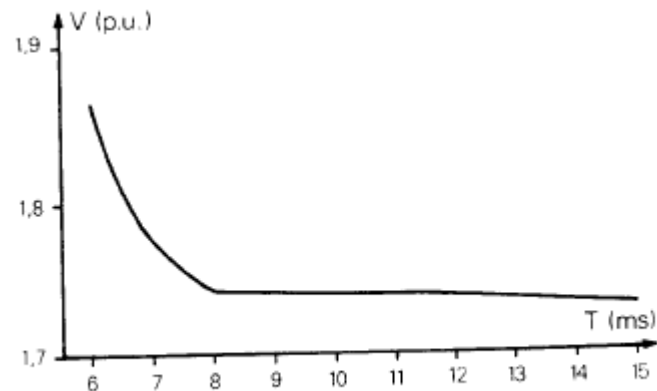
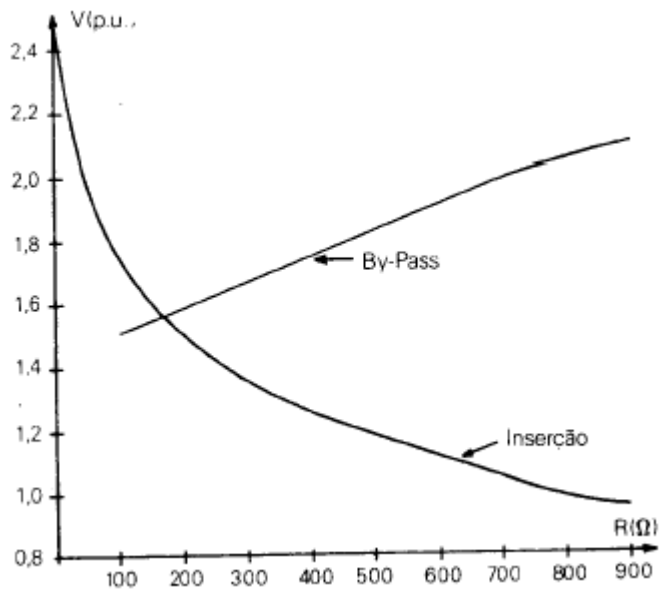
(a)



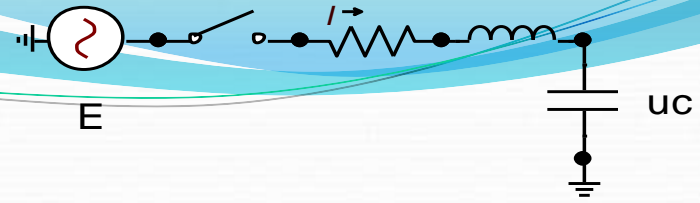
(b)

✓ Existe un valor óptimo del resistor que permite disminuir al máximo las sobretensiones de la línea.

Comentario: La existencia de este valor óptimo se debe a que el by-pass del resistor (que se realiza unos pocos ms después de su inserción, para evitar aumentar las pérdidas en la línea) produce un segundo “transitorio de energización” con valores de sobretensión crecientes al aumentar el resistor cortocircuitado.



- ✓ El valor óptimo del resistor suele ser del orden de la impedancia de onda de la línea (200 a 400 ohms), y se puede determinar mediante numerosas simulaciones con diferentes valores de resistencia.
- ✓ El resistor debe estar presente en el circuito durante al menos el doble del tiempo de tránsito de la línea, dado que es importante que amortigüe el pico de la onda reflejada que vuelve del extremo abierto. En la práctica suelen manejarse tiempos mayores (6 a 15 ms.), y se puede verificar que a partir de cierto tiempo no es de utilidad seguir manteniendo el resistor en el circuito.



Maniobra sincronizada

- ✓ Los picos del transitorio de energización se reducen mucho si en el momento de cierre la tensión de la fuente pasa por cero \Rightarrow se emite la orden de cierre en cada polo para que se cumpla con esta condición.
- ✓ Aspectos a tener en cuenta: tiempos mecánicos de cierre y rigidez dieléctrica del medio aislante del disyuntor.
- ✓ Para maniobras de recierre :el instante óptimo es aquél en el cuál la diferencia de tensiones a ambos lados del disyuntor es nula \Rightarrow se necesitan transformadores de tensión a ambos lados del disyuntor.

Descargadores en los extremos de línea

- ✓ Al controlar las tensiones localmente también controlan los picos de las ondas de tensión que vuelven al extremo opuesto. Su influencia es importante en el punto en que están colocados y no tanto en el resto de la línea

Reactores de línea: se dimensionan para controlar las tensiones en el extremo abierto (efecto Ferranti) en el estado de régimen luego de la maniobra.

Efectos sobre el transitorio de energización:

a) Al bajar el valor de tensión de régimen postmaniobra disminuye los valores de tensión del transitorio.

b) La terminación de la línea deja de ser una impedancia infinita (línea abierta) ⇒ disminuye el coeficiente de reflexión en el extremo receptor.

Comentario general sobre las medidas de mitigación:

Existe un límite práctico por debajo del cuál no es económico reducir las sobretensiones de maniobra: sobretensiones que aparecen en las fases sanas al ocurrir un cortocircuito (durante la falla y posterior apertura): del orden de 2 p.u.

PROCESAMIENTO ESTADISTICO DE LAS SOBRETENSIONES DE MANIOBRA

La sobretensión de maniobra a causa de energizaciones (con o sin carga atrapada) es una variable aleatoria con una cierta distribución de probabilidad.

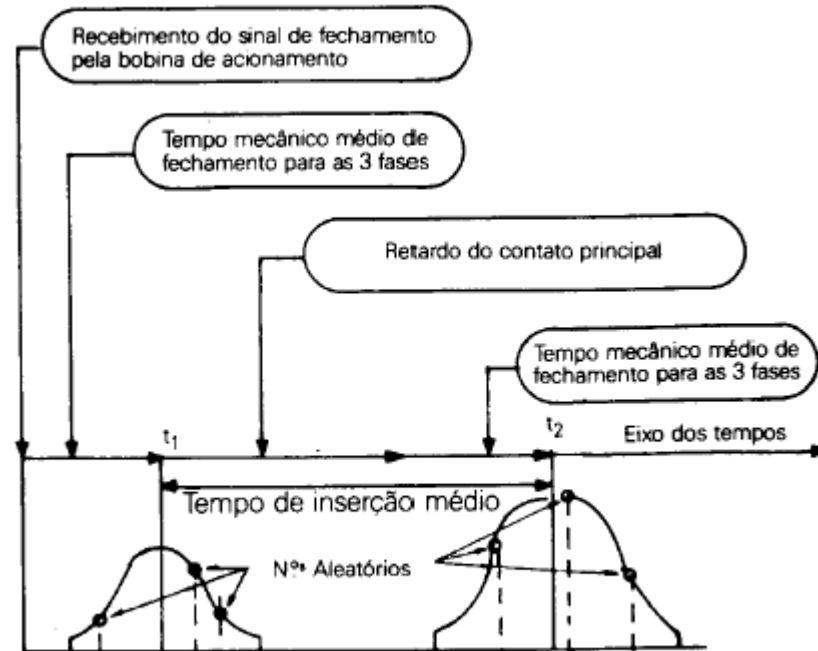
Principal factor aleatorio: instante de establecimiento de corriente con respecto a la onda de tensión de la fuente

Hipótesis habituales para las simulaciones:

- ✓ Distribución uniforme para el instante de cierre (energización de la bobina de cierre del disyuntor) en la onda de tensión.
- ✓ Distribución gaussiana para el cierre mecánico de los contactos.
- ✓ Potencia de cortocircuito mínima.

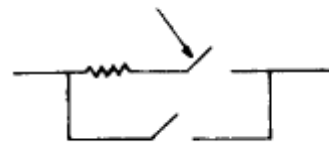
Uso del EMTP:

- ✓ El valor medio y la desviación “standard” de la distribución gaussiana son datos de entrada.



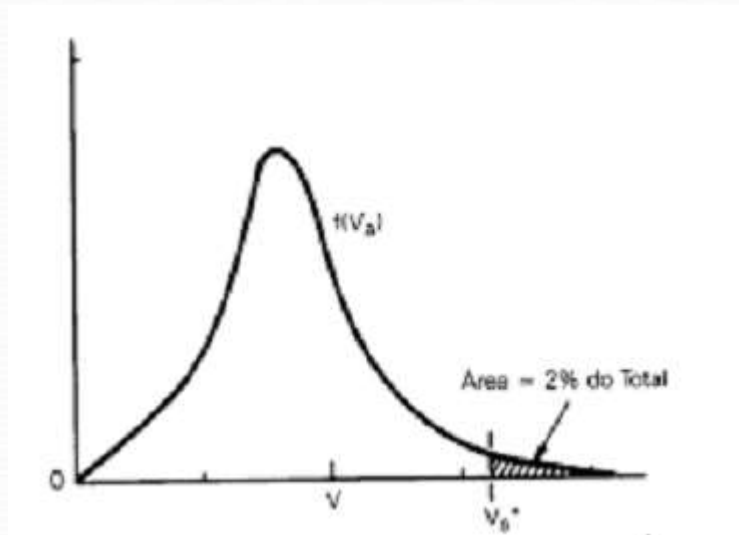
Contatos Secundários

Contatos Principais



Contatos Principais

- ✓ Se suelen simular unas 100 energizaciones, registrando los máximos entre las 3 fases.
- ✓ El EMTP se encarga de generar los correspondientes valores aleatorios y de calcular el valor medio U_{50} y la desviación standard σ .
- ✓ La distribución de sobretensiones se suele asumir gaussiana, truncada a 3σ (también es posible utilizar una distribución de Weibull: ver IEC 60071-2, Anexo C)



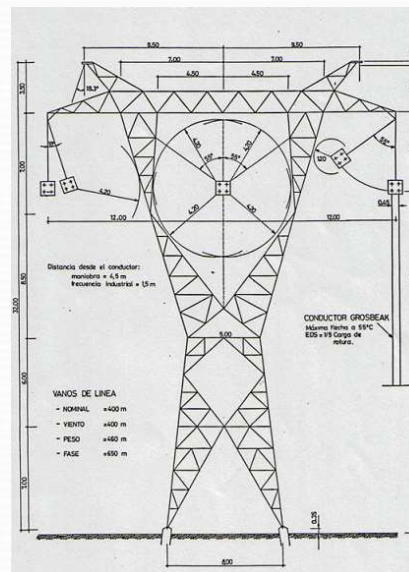
AGUANTE DE LAS AISLACIONES

La soportabilidad de las aislaciones en aire es una variable aleatoria con distribución gaussiana.

✓ Los parámetros de la distribución se obtienen a partir de ensayos de campo o laboratorio.

✓ Forma de onda “standard” 250/2500 μ s

✓ Polaridad positiva para ensayos fase-tierra (peor caso).



Fase-tierra

Método de los “factores de gap”: se definen las curvas de aguante de “gaps” de una determinada geometría en base a las curvas obtenidas para la geometría básica punta-plano.

Geometría punta-plano:

$$U_{50} = 500 \cdot d^{0,6}$$

d : longitud de “gap” (m)

U_{50} : valor medio de la distribución gaussiana (kV).

Desviación standard: aprox. 6 %

Para otras geometrías de “gaps”, el U_{50} dado por la fórmula anterior se afecta con un factor de “gap” $k > 1$:

$$U_{50} = k \cdot 500 \cdot d^{0,6}$$

Fase-fase: Ver apuntes

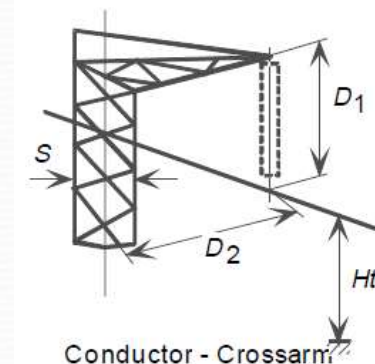
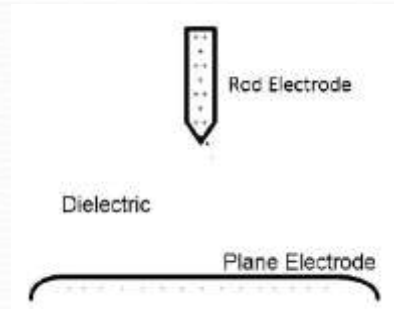
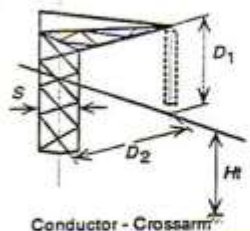
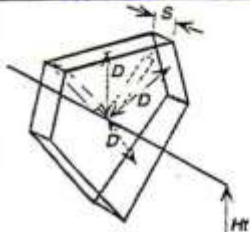
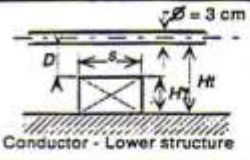
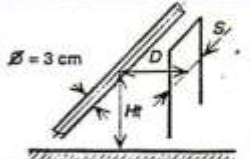
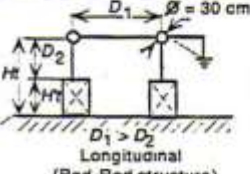


Tableau G.1 – Typical gap factors K for switching impulse breakdown phase-to-earth (according to [1] and [4])

Gap type	Parameters	Typical range	Reference value	
 <p>Conductor - Crossarm</p>	K	1,36 - 1,58	1,45	
	D_2 / D_1	1 - 2	1,5	
	Ht / D_1	3,34 - 10	6	
	S / D_1	0,167 - 0,2	0,2	
 <p>Conductor - Window</p>	K	1,22 - 1,32	1,25	
	H/D	8 - 6,7	6	
	S/D	0,4 - 0,1	0,2	
 <p>Conductor - Lower structure</p>	K	1,18 - 1,35	1,15 Conductor-Plane 1,47 Conductor-Rod	
	H'/Ht	0,75 - 0,75	0	0,909
	H'/D	3 - 3	0	10
	S/D	1,4 - 0,05	-	0
 <p>Conductor - Lateral structure</p>	K	1,28 - 1,63	1,45	
	H'/D	2 - 10	6	
	S/D	1 - 0,1	0,2	
 <p>Longitudinal (Rod-Rod structure)</p>	K	1,03 - 1,66	1,35	
	H'/Ht	0,2 - 0,9	0	
	D_1 / Ht	0,1 - 0,8	0,5	

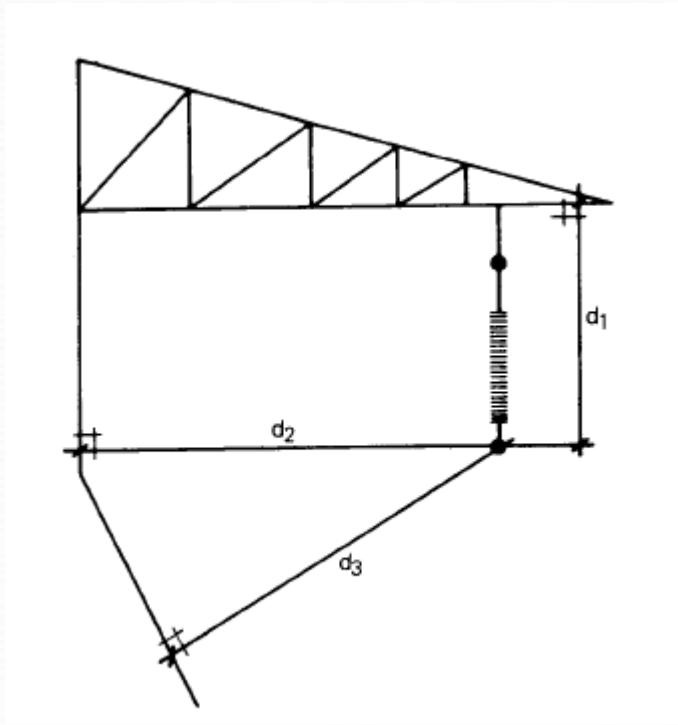
IEC 60071-2

Presencia de “gaps” en paralelo:

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)$$

P : probabilidad de falla de conjunto de 3 “gaps”

P_i : probabilidad de falla de cada “gap” “ i ”



Caso general (N “gaps” iguales):

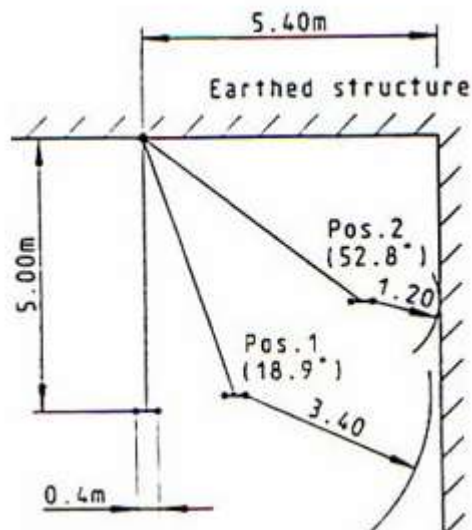
$1 - (1 - P)^N \approx NP$ si P es pequeña.

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLOGICAS

Las tensiones soportadas (medidas en condiciones de laboratorio) se deben corregir por las condiciones meteorológicas locales, principalmente la altura sobre el nivel del mar (Ver apuntes)

INFLUENCIA DEL VIENTO

Se debe tener en cuenta la variación de los “gaps” en estudio a consecuencia de la acción del viento sobre las cadenas en “I”. Se consideran velocidades de viento frecuentes (no extremas) (Ver apuntes)



EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LA AISLACION A LAS SOBRETENSIONES DE MANIOBRA

Método determinístico

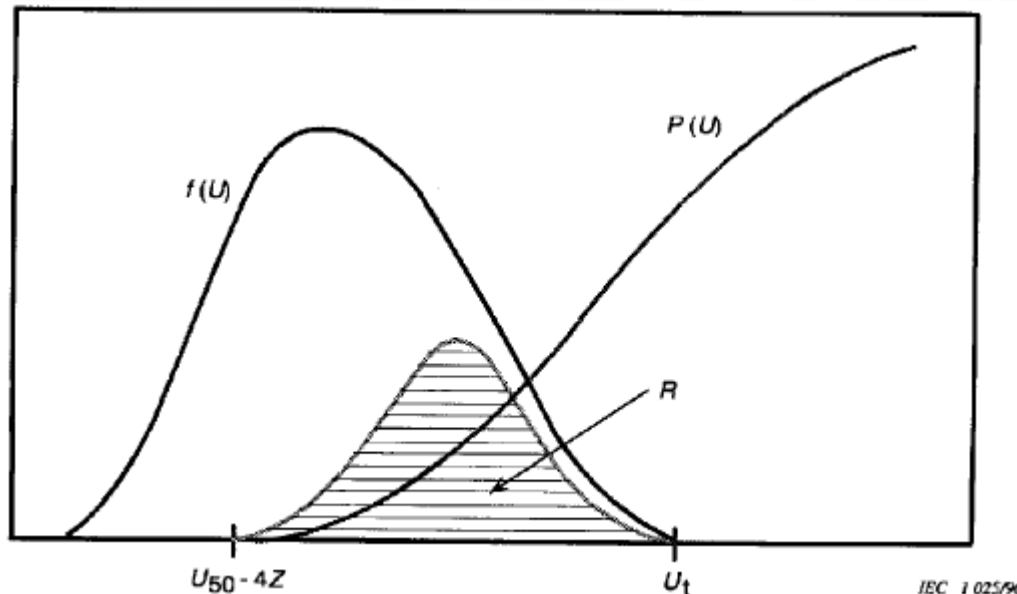
- ✓ Se consideran la sobretensión “máxima” impuesta U_{\max} (valor de truncamiento), y se verifica que la aislación la soporta con una cierta probabilidad de falla y un cierto factor de seguridad.
- ✓ La soportabilidad de las aislaciones se considera con una probabilidad de falla del 10 % (U_{90} , a 1,3 desviaciones “standard” de la media), y considerando la presencia de “gaps” en paralelo.
- ✓ El factor de seguridad mínimo que se considera es $K_S = U_{90} / U_{\max} = 1,05$.

Método estadístico “completo”

Conocida la densidad de probabilidad $f(U)$ de las sobretensiones impuestas y la distribución de probabilidad $P(U)$ de la falla de aislación, el riesgo de falla vale:

$$R = \int_0^{\infty} P(U) \cdot f(U) \cdot dU$$

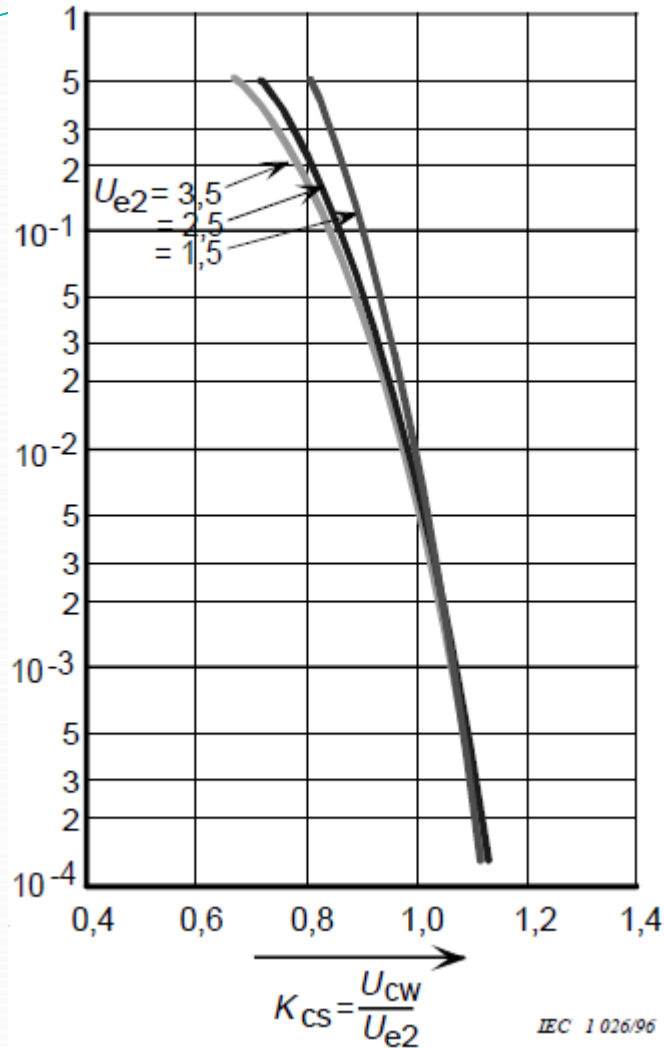
El valor de R así obtenido se debe comparar contra un valor máximo aceptable.



Método estadístico simplificado

- ✓ Se consideran las sobretensiones de maniobra impuestas U_{e2} , con una probabilidad de ser excedidas del 2 % (a 2,05 desviaciones “standard” de la media).
- ✓ La soportabilidad de las aislaciones se considera con una probabilidad de falla del 10 % (U_{90} , a 1,3 desviaciones “standard” de la media), y considerando la presencia de “gaps” en paralelo.
- ✓ Se elige U_{90} / U_{e2} de acuerdo al riesgo de falla R elegido, según curvas típicas.
- ✓ Se afecta el U_{90} así elegido con un factor de seguridad $K_s = 1,05$.

Case-peak method



Tasa de falla típica de: 0,05 a 0,005 por año (una falla cada 20 a 200 maniobras por año) para cada tipo de maniobra. (IEC 60071-2).

(IEC 60071-2)