



garza
electrothermal

“Mejoras en generadores de impulsos de alta tensión: Alta versatilidad y eficiencia de pruebas”

Daniel III Garza de los Santos, M. Sc.
Director General & Director Técnico
Garza Electrothermal SA de CV
Monclova, México

SISEE, Cali, Colombia 13 de Octubre de 2016

INDICE

1.-INTRODUCCION

2.- ANTECEDENTES

3.-CASO ESPECIFICO

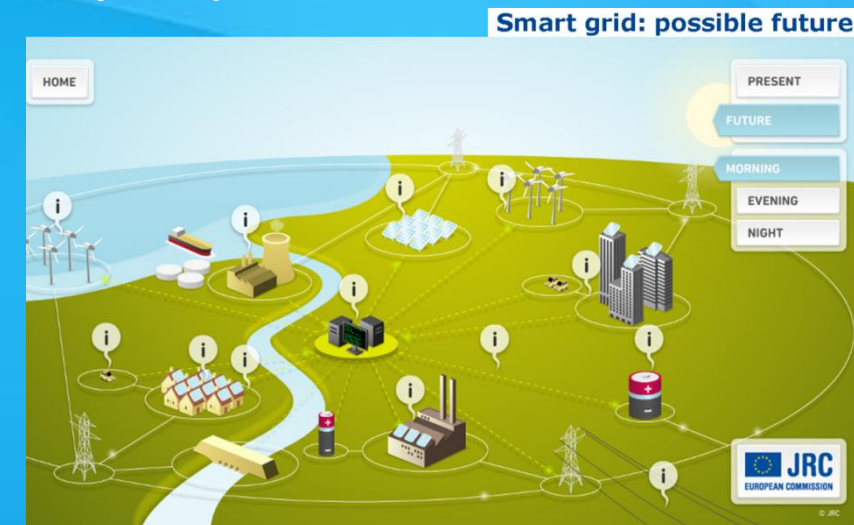
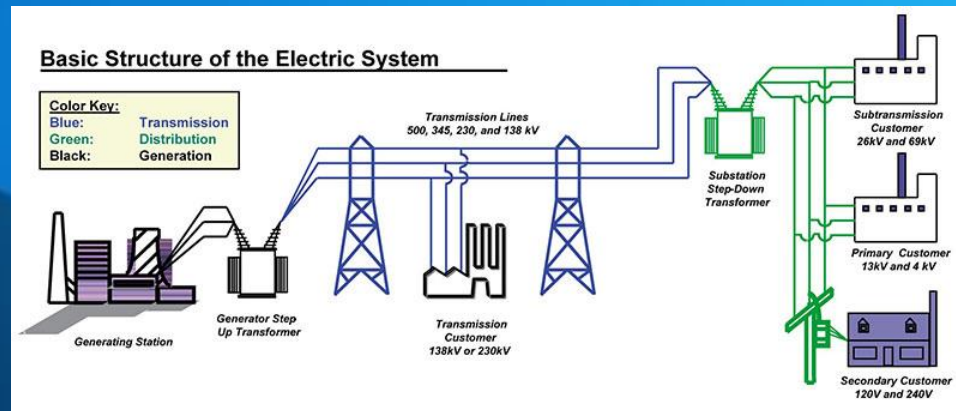
4.-APLICACIONES: MODO DE USO

5.-CONCLUSIONES



1. INTRODUCCION

En la actualidad contamos con redes eléctricas de transmisión y distribución cada vez más complejas, que exigen diferentes grados de seguridad del sistema eléctrico con el que abastecemos de energía a nuestros hogares, comercios y empresas.



Las normas o estándares nacionales han seguido de cerca esta evolución y se han adaptado de manera correspondiente para cumplir con las exigencias actuales de seguridad de la operación de las redes, integridad física de los equipos e integridad del elemento humano en contacto con el sistema operativo.

Los sistemas de potencia deben no solo soportar la tensión nominal (U_m) que corresponde a la tensión mas alta de operación del sistema en particular, si no también las sobretensiones a las que se somete el mismo. Es por tanto que es necesario realizar pruebas de alta tensión a los equipos de alta tensión tanto en etapa de diseño, como en la etapa previa a la puesta en marcha.

+ Interconectividad → Redes + complejas → + Requerimientos sobre los niveles de aislamiento

Las técnicas básicas de aplicación y medición de la alta tensión en los distintos tipos de equipos se encuentran plasmadas en los diferentes estándares nacionales e internacionales y hacen referencia a ensayos con tensiones de tipo alterno, continuo, impulso tipo relámpago e impulso de maniobra.

2. ANTECEDENTES

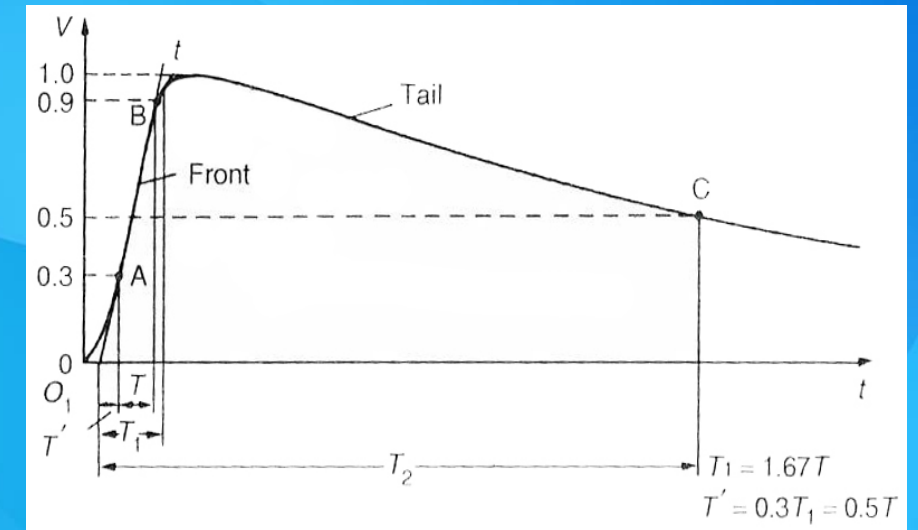
Teoría básica de impulsos de alta tensión

Impulsos de alta tensión

EXTERNOS

Los rayos que terminan en el sistema eléctrico inducen transitorios de tensión con un dv/dt (incremento) muy rápido que ocasionan ondas viajeras que pueden dañar el aislamiento del sistema al viajar por el mismo

La forma de onda de impulso tipo relámpago estandarizada consiste un impulso tipo doble exponencial de 1.2/50 μs , 1.2 $\mu s \pm 30\%$ de tiempo de frente y 50 $\mu s \pm 20\%$ de tiempo de cola o de valor medio según lo asentado en la IEC 60060-1 procedente de observaciones empíricas.



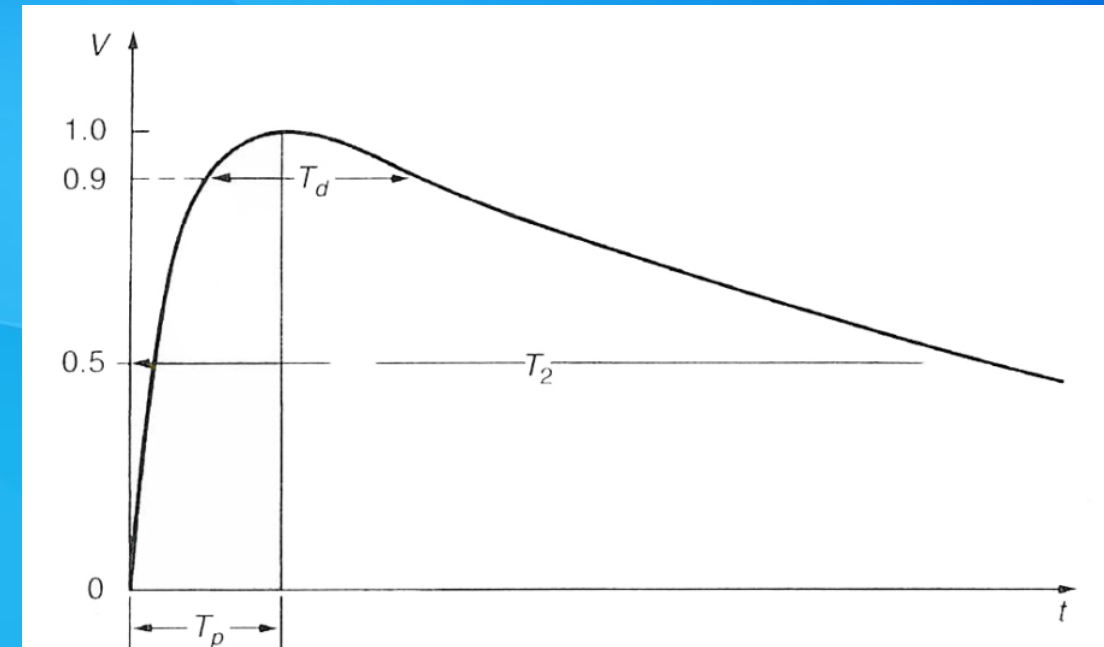
Impulso tipo relámpago	Lab/IEC60 060-1 (LI)	On-site/IEC 60 060-3 (OLI)
Tiempo de frente	1.2 $\mu s \pm 30\%$ (0.84 a 1.5 μs)	0.8 a 20 μs (Envolvente)
Tiempo de cola (50% pico)	50 $\mu s \pm 20\%$ (40 a 60 μs)	40 to 100 μs (Envolvente)
Incertidumbre del tiempo	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$ (Envolvente)
Tolerancia del valor pico	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$ (oscilación)
Incertidumbre del valor pico	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$ (oscilación)
Contenido de oscilaciones	$\pm 5\%$ (promedio)	OK, 15 to 400kHz

Impulsos de alta tensión

INTERNOS

Existen otros impulsos de tensión de carácter interno, es decir inherentes a los cambios repentinos de los estados del sistema de potencia, a dichos impulsos se le conoce como impulsos de maniobra. Para tensiones nominales mayores a 300kV, los impulsos de maniobra se convierten en el factor dominante de diseño de los equipos, particularmente al considerar las distancias en aire.

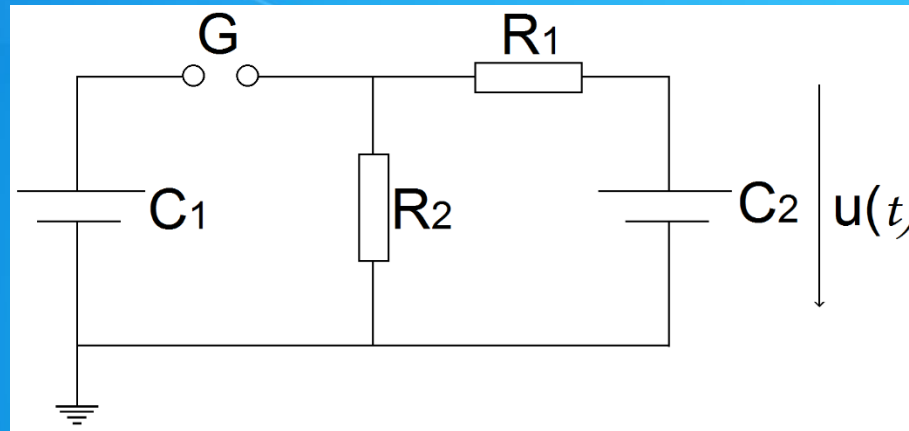
La sensibilidad de los equipos a dicho impulso debe ser probada por tanto mediante una onda de impulso con una fuente $250\mu\text{s} \pm 20\%$ y de cola o valor medio de $2500\mu\text{s} \pm 60\%$, de acuerdo a la IEC 60060-2.



Impulso tipo maniobra	Lab/IEC60 060-1 (SI)	On-site/IEC 60 060-3 (OSI)
Tiempo de frente	$250\mu\text{s} \pm 20\%$ (200 a $300\mu\text{s}$)	200 a $400\mu\text{s}$ (Envolvente)
Tiempo de cola (50% pico)	$2500\mu\text{s} \pm 60\%$ (1 a 4 ms)	$2500\mu\text{s} \pm 60\%$ (1 a 4 ms, Env.)
Incertidumbre del tiempo	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$ (Envolvente)
Tolerancia del valor pico	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$ (oscilación)
Incertidumbre del valor pico	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$ (oscilación)
Contenido de oscilaciones		OK, 1 to 15 kHz

Generación de impulsos de alta tensión

De acuerdo al siguiente circuito:



La energía almacenada en la condensador del generador de impulsos C_1 es:

$$W = \frac{1}{2} C_1 U_{0,max}^2, \text{ típicamente } C_1 \gg C_2$$

La solución a la ecuación de $u(t)$ mediante un método apropiado de resolución de ecuaciones diferenciales tiene por resultado:

Generación de impulsos de alta tensión

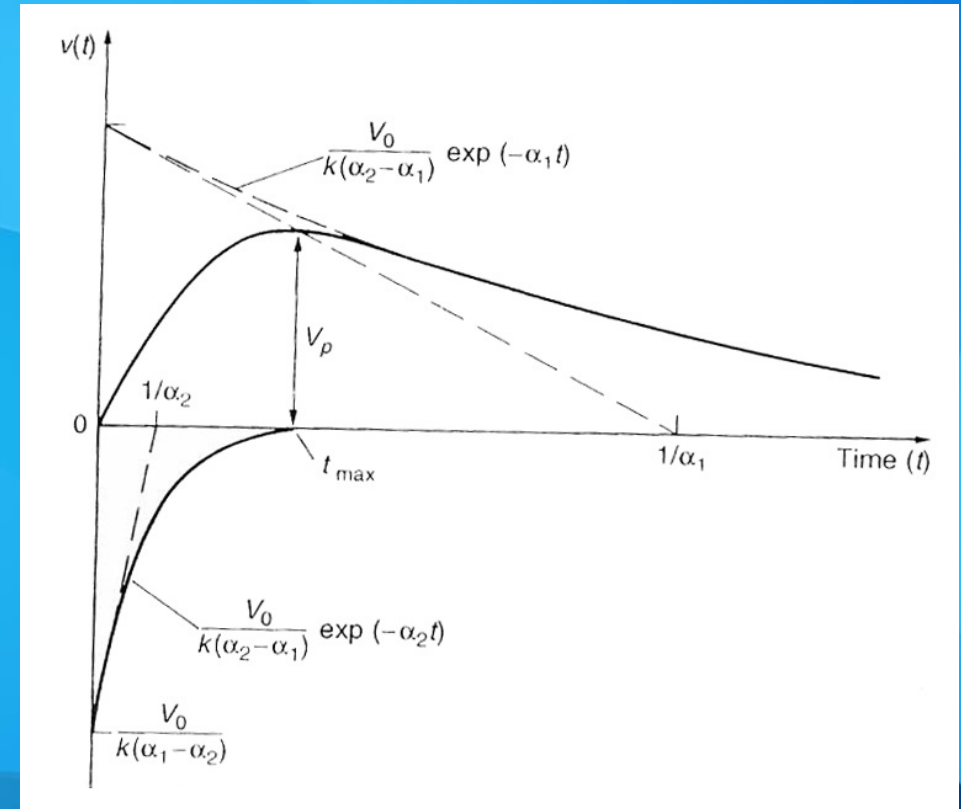
$$u(t) = \frac{U_o}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}]$$

Donde las constantes de tiempo y la constante k están dadas por:

$$\alpha_{1,2} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad k = R_1 C_2$$

Y las constantes a y b por

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) \quad b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right)$$



Generación de impulsos de alta tensión

La eficiencia del circuito está dada por

$$\eta = \frac{U_p}{U_0} = \frac{1}{1 + (C_2/C_1)}$$

y las resistencias de los circuitos de prueba por

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right]$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right]$$

Generación de impulsos de alta tensión

Resolviendo numéricamente para α_1 y α_2 se obtiene:

T_1 / T_2 [μs]	T_p / T_2 [μs]	$1 / \alpha_1$ [μs]	$1 / \alpha_2$ [μs]
1.2/5	-	3.48	0.8
1.2/50	-	68.2	0.405
1.2/200	-	284	0.381
250/2500	-	2877	104
-	250/2500	3155	62.5

Tensión aplicada vs. impulsos de alta tensión

Comparemos ahora las características de los equipos de prueba tradicionales en lo que se respecta a los equipos de alta tensión aplicada (CA) e impulso.

TIPO DE EQUIPO	ALTERNA	IMPULSO
Prueba (nombre común)	Tensión aplicada	NBAI (Relámpago) y Maniobra
Rango de tensiones	0...2200 kV	0...7200 kV
Rango de capacidades	50 A	0...7200 kJ
Duración de prueba	Corto (1 a 5 min)	Corto o largo (No. de impulsos)
Cálculos del ensayo	$Q=U^2\omega C$, factor seguridad	$f_{\text{circuito}} = f(C_1, C_2, L_{\text{circuito}})$
Eficiencia circuito de prueba	Casi 100%	$\eta_{\text{circuito}} = \eta(C_1, C_2, R_1, R_2)$
Influencia del circuito de prueba	Baja	Alta
Configuración especial del equipo	Ninguna, sólo conexiones	Conexiones, cortos, resistencias, etc.
Modos de operación	Manual / Semi- / Automático	Manual / Semi- / Automático (conf. no)
Tipo de reconexión	Manual o Automática	Manual para altos NBAI
Eficiencia operativa ($\eta_{\text{test}} = \frac{n_{\text{ensayos}}}{t}$)	Alta	Baja
Versatilidad del equipo	Alta si $Q_{\text{test}} < Q_{\text{fuente}}$	Media (requiere configuración adecuada)

De la tabla extraemos:

$$\eta_{\text{equipo tensión aplicada}} > \eta_{\text{equipo impulso}}$$

$$\begin{aligned} \uparrow \eta &= \downarrow \$ \\ \downarrow \eta &= \uparrow \$ \$ \$ \$ \end{aligned}$$

Seria deseable, por lo tanto, contar con un diseño de generador de impulsos más eficiente, buscando emular la simplicidad y versatilidad inherente de un equipo de tensión aplicada

3. CASO ESPECIFICO

Consideremos ahora un generador de impulsos de 1600kV, 8 etapas de 200 kV, 1 μ F por etapa y las ecuaciones de la sección 2 para una forma de onda tipo impulso relámpago en pruebas en transformadores (1000 a 10 000pF)

$T_1 / T_2 = 1.2/50$ μs	$U_e = 200$ kV	$U_g = 1600$ kV	$n = 8$	Unidad
C_{div}	100	100	100	pF
C_{transf}	1000	5000	10000	pF
C_1	0.125	0.125	0.125	μF
C_2	1100	5100	10100	pF
R_1	371.45	82.68	43.36	Ω
R_2	540.82	524.09	504.57	Ω
R_1'	46.44	10.34	5.42	Ω
R_2'	67.61	65.52	63.08	Ω

$n = 8$ etapas de capacitores

$T_1 / T_2 = 1.2/50$ μs	$U_e = 200$ kV	$U_g = 400$ kV	$n = 2$	Unidad
C_{div}	100	100	100	pF
C_{transf}	1000	5000	10000	pF
C_1	0.125	0.125	0.125	μF
C_2	1100	5100	10100	pF
R_1	369	80.23	40.92	Ω
R_2	136.1	135.02	133.69	Ω
R_1'	46.13	10.03	5.12	Ω
R_2'	17.02	16.88	16.72	Ω

$n = 2$ etapas de capacitores

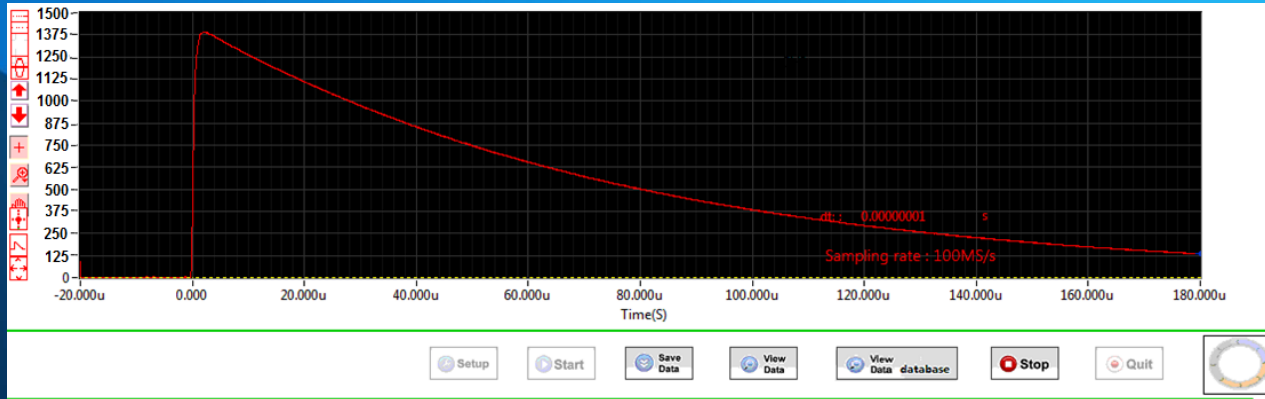
Consideremos ahora un generador de impulsos de 1600kV, 8 etapas de 200 kV, 1 μ F por etapa y las ecuaciones de la sección 2 para una forma de onda tipo impulso relámpago en pruebas en transformadores (1000 a 10 000pF)

$T_1 / T_2 = 1.2/50$ μ s	$U_e = 200$ kV	$U_g = 600$ kV	$n = 3$	Unidad
C_{div}	100	100	100	pF
C_{transf}	1000	5000	10000	pF
C_1	0.125	0.125	0.125	μ F
C_2	1100	5100	10100	pF
R_1	369.41	80.64	41.33	Ω
R_2	203.93	201.5	198.55	Ω
R_1'	46.18	10.08	5.17	Ω
R_2'	25.5	25.19	24.82	Ω

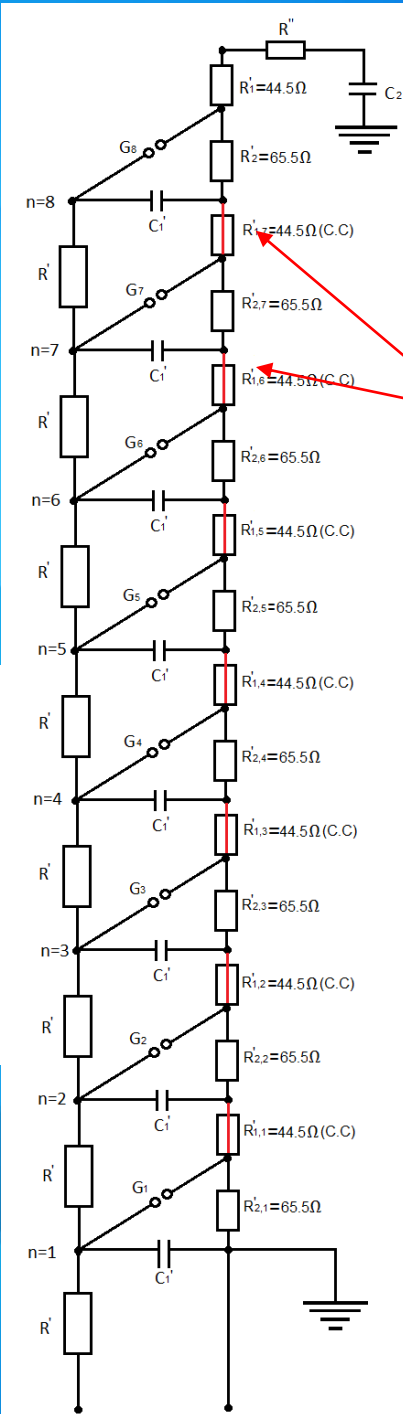
n = 3 etapas de capacitores

1) Ejemplo 1, resistencias iguales por etapa, transformadores de 10 000 pF, $n=8$, $U_0 \sim U_{gen}$

$R_1 = 44.5 \Omega$, 7 corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 524.08 \Omega$, no hay corto circuitos en R_2'



CH2 Upeak: **1380.40** kV
 CH2 T1: **1.20587** uS
 CH2 T2: **55.7937** uS
 Overshoot: **0.002201**

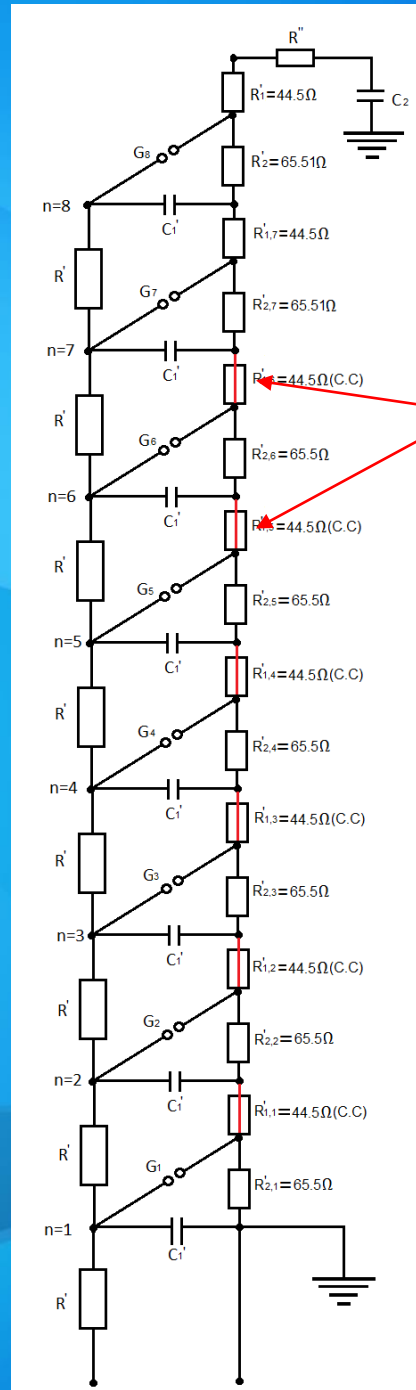
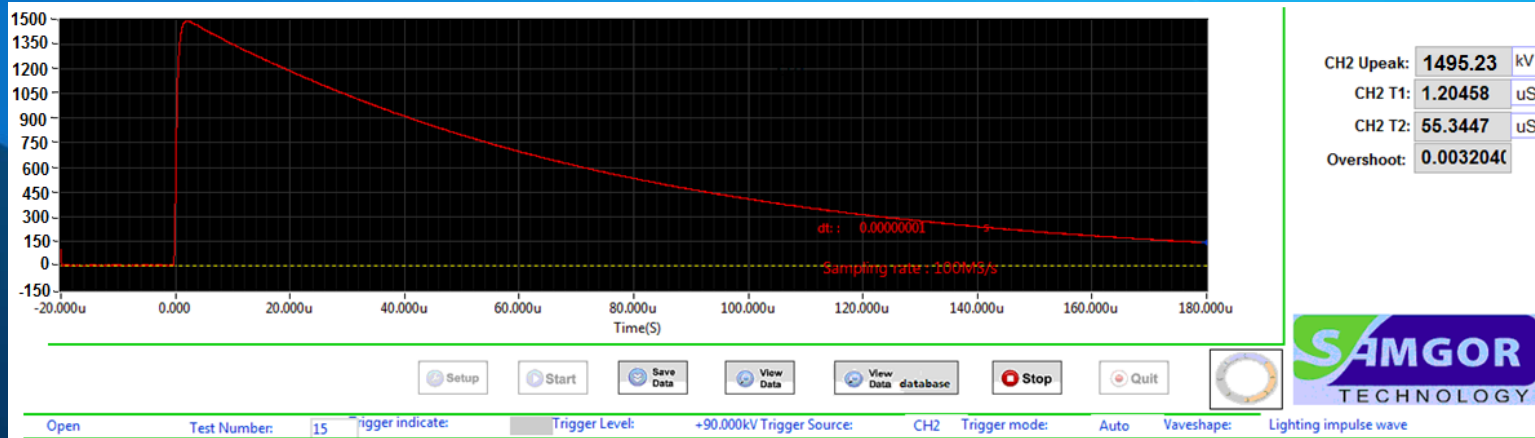


corto circuitos
(en rojo)

2) Ejemplo 2, resistencias iguales por etapa, transformadores de 5000 pF, $n=8$, $U_0 \sim U_{gen}$

$R_1 = 89 \Omega$, 6 corto circuitos en R_1'

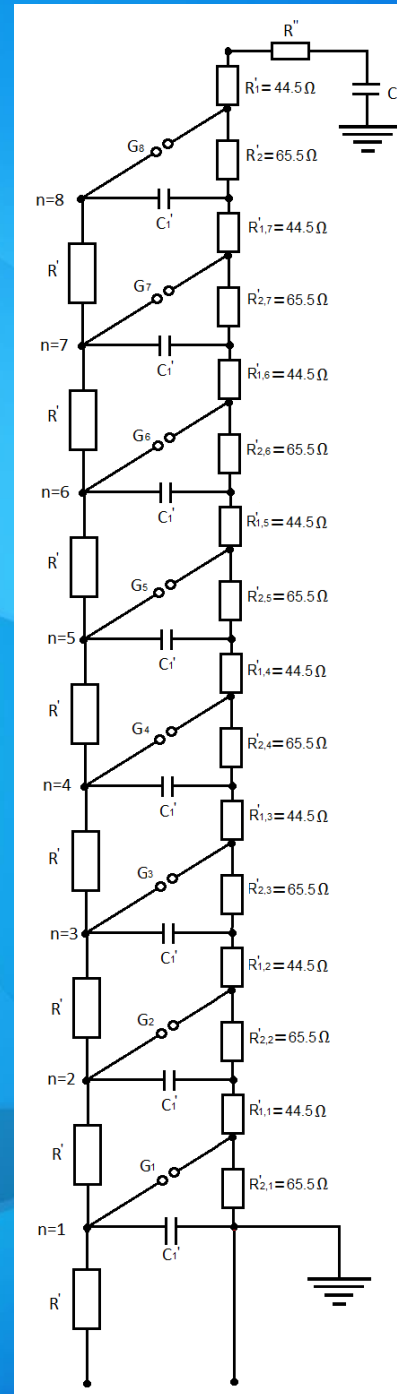
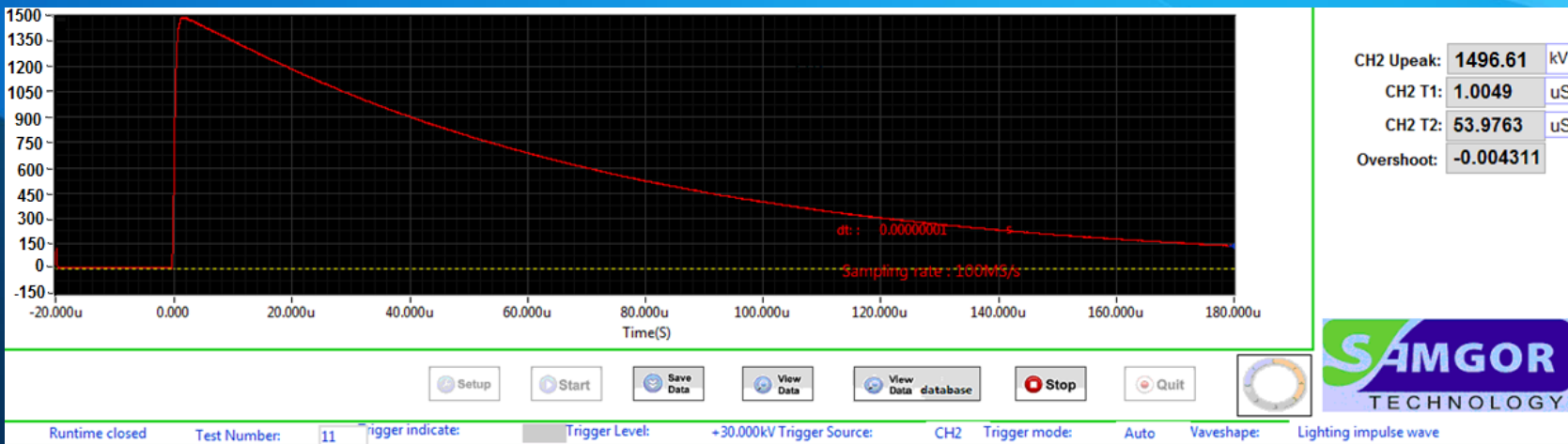
$R_2 = 524.08 \Omega$, no hay corto circuitos en R_2'



corto circuitos (en rojo)

3) Ejemplo 3, resistencias iguales por etapa, transformadores de 1000 pF, $n=8$, $U_0 \sim U_{gen}$

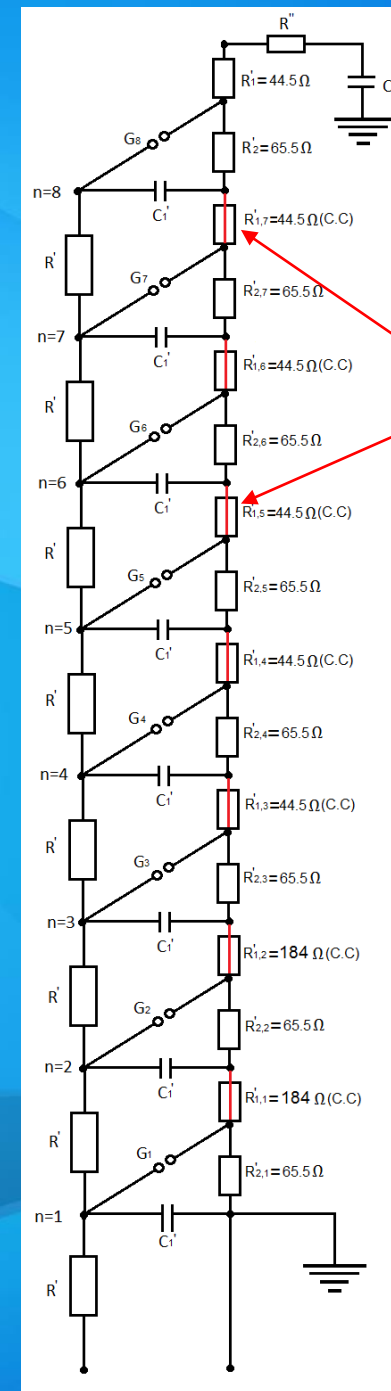
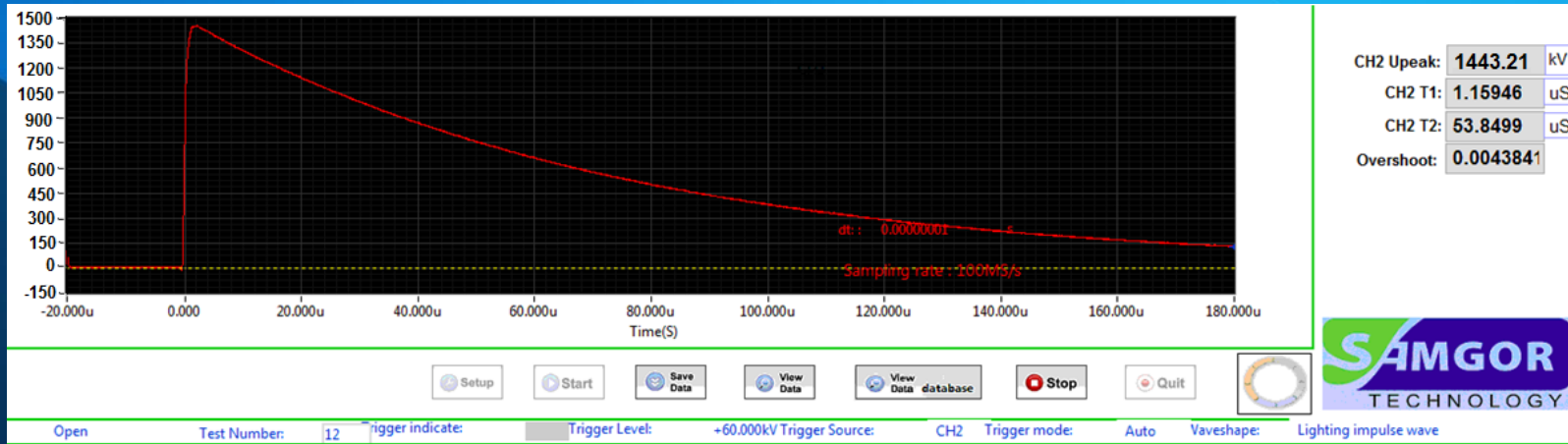
$R_1 = 356 \Omega$, no hay corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 524.08 \Omega$, no hay corto circuitos en R_2'



corto circuitos
(en rojo)

4) Ejemplo 4, resistencias desiguales por etapa, (generadores con gap de sincronización de disparo) transformadores de 10 000 pF, $n=8$, $U_0 \sim U_{gen}$

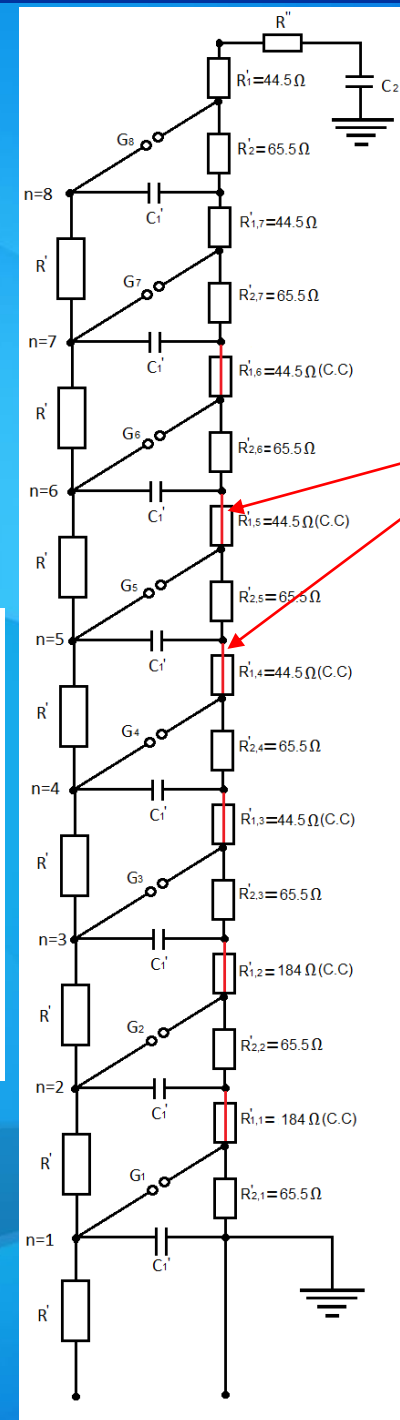
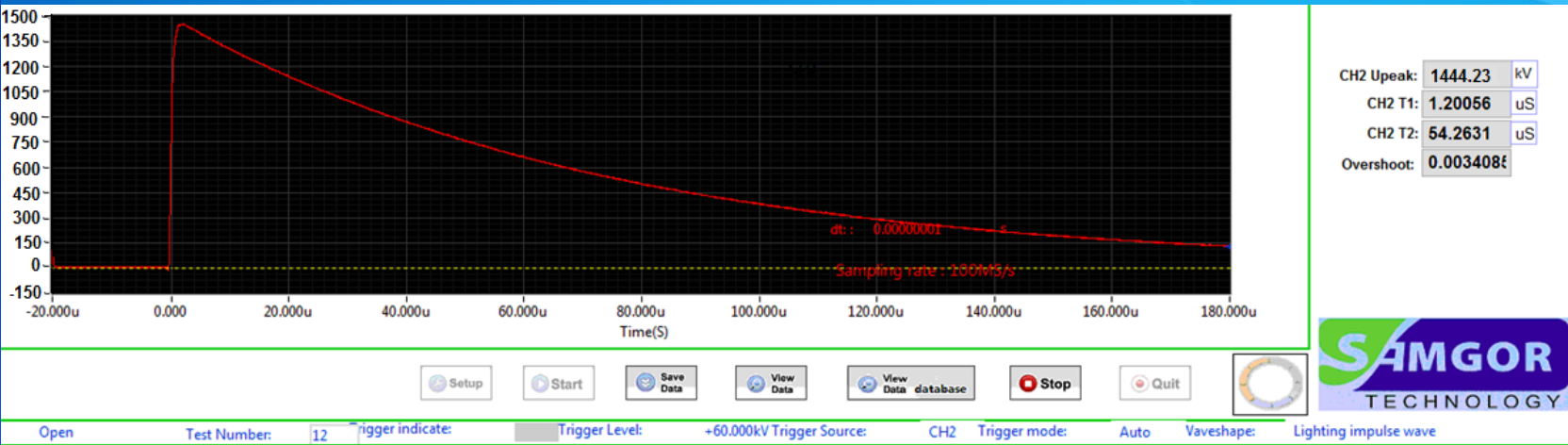
$R_1 = 44.5 \Omega$, 7 corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 524 \Omega$, no hay corto circuitos en R_2'



corto circuitos
(en rojo)

5) Ejemplo 5, resistencias desiguales por etapa, (generadores con gap de sincronización de disparo) transformadores de 5,000 pF, $n=8$, $U_0 \sim U_{gen}$

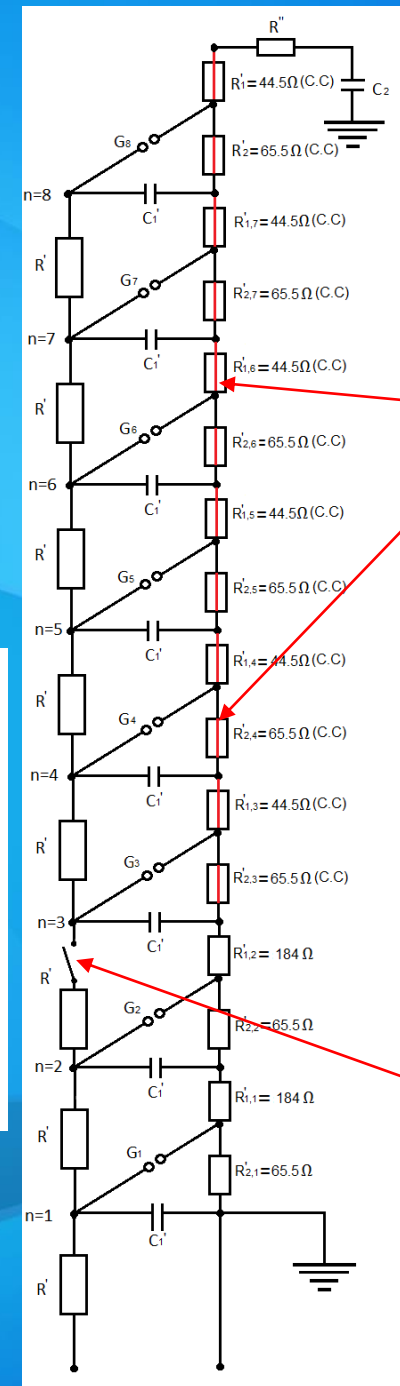
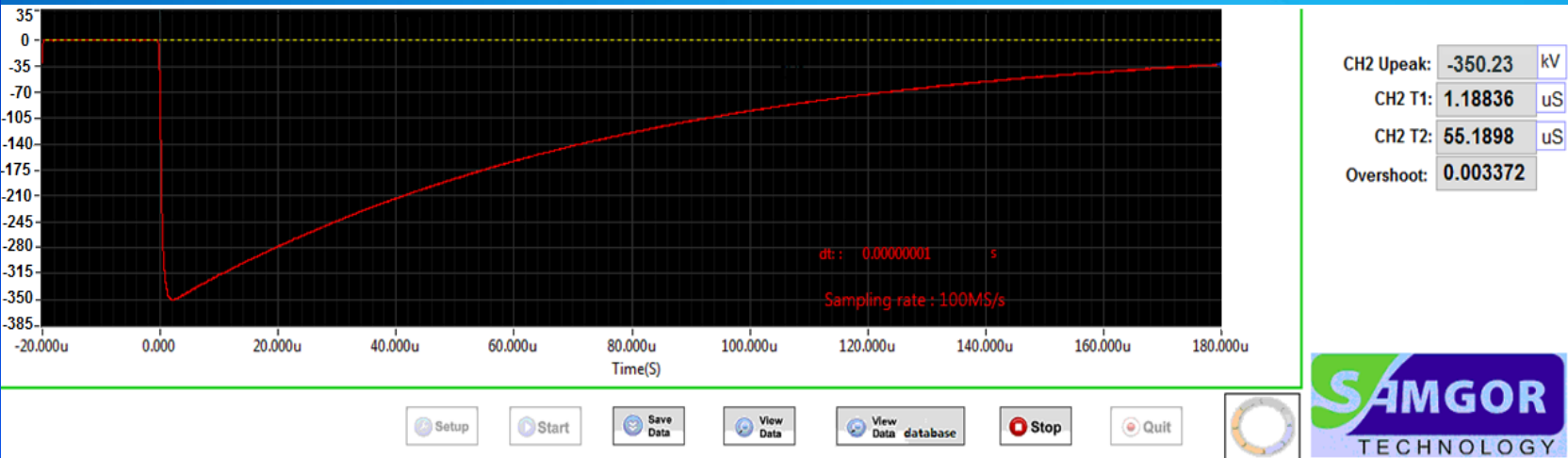
$R_1 = 89 \Omega$, 6 corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 524 \Omega$, no hay corto circuitos en R_2'



corto circuitos
(en rojo)

6) Ejemplo 6, resistencias desiguales por etapa, (generadores con gap de sincronización de disparo) transformadores de 1 000 pF, $n=2$, $|U_0| \sim 0.25 U_{gen}$

$R_1 = 368 \Omega$, 6 corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 131 \Omega$, 6 corto circuitos en R_2'
 Un circuito abierto en R' de $n = 2$

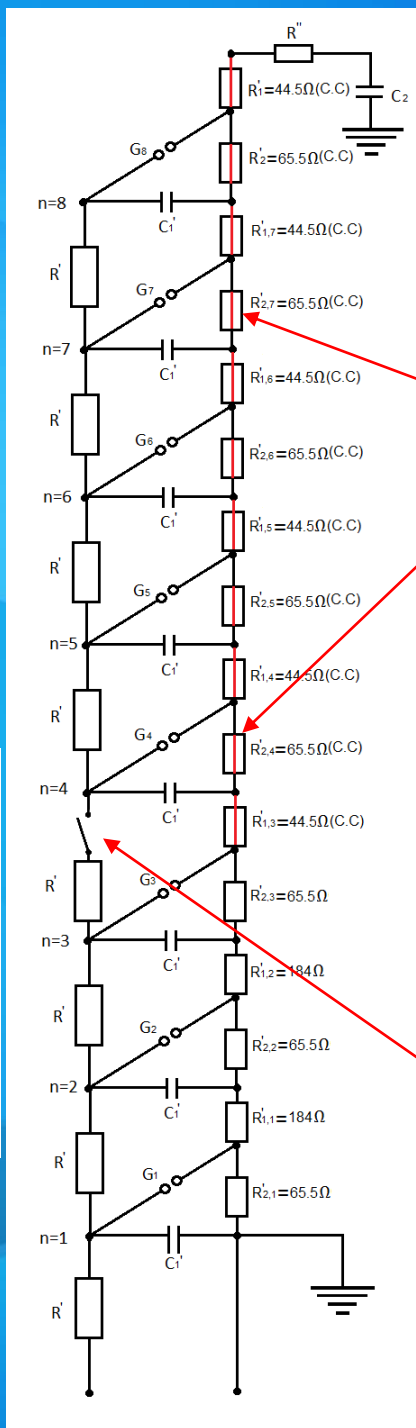
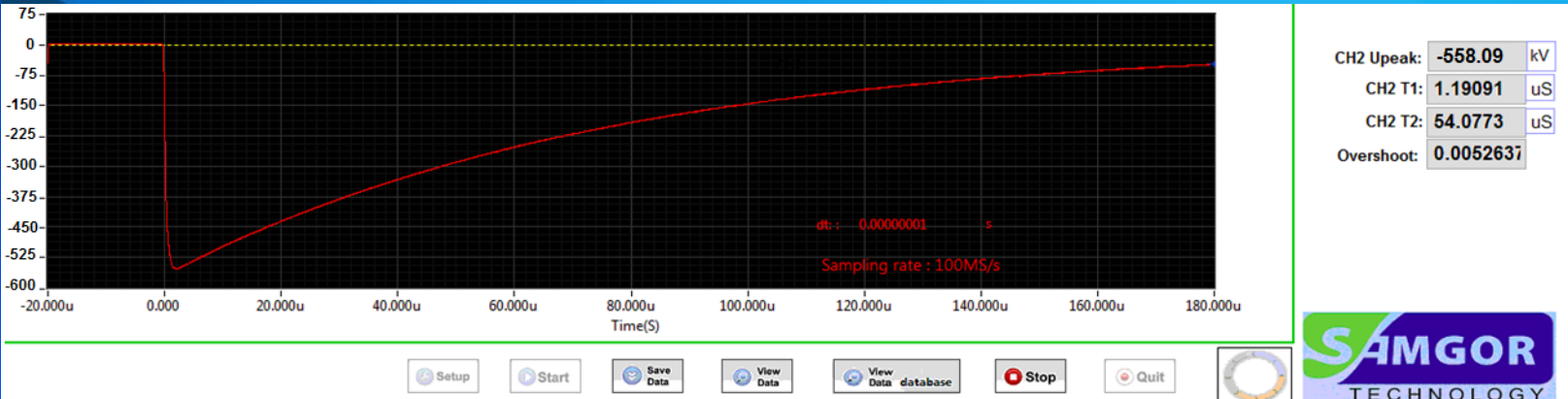


corto circuitos
(en rojo)

abierto

7) Ejemplo 7, resistencias desiguales por etapa, casos extremos, transformadores de 10,000 pF y $|U_0| \sim 0.375 U_{gen}$ n =3 y transformadores de 1 000 pF y $|U_0| \sim 0.375 U_{gen}$ n =3. Analizando el último caso:

$R_1 = 368 \Omega$, 6 corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 196.5 \Omega$, 5 corto circuitos en R_2'
 Un circuito abierto en R' de n = 3

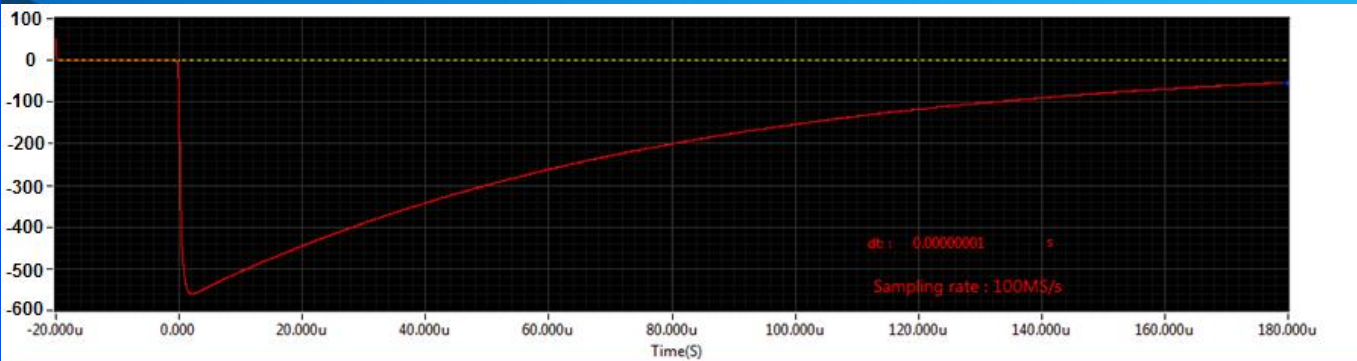


corto circuitos (en rojo)

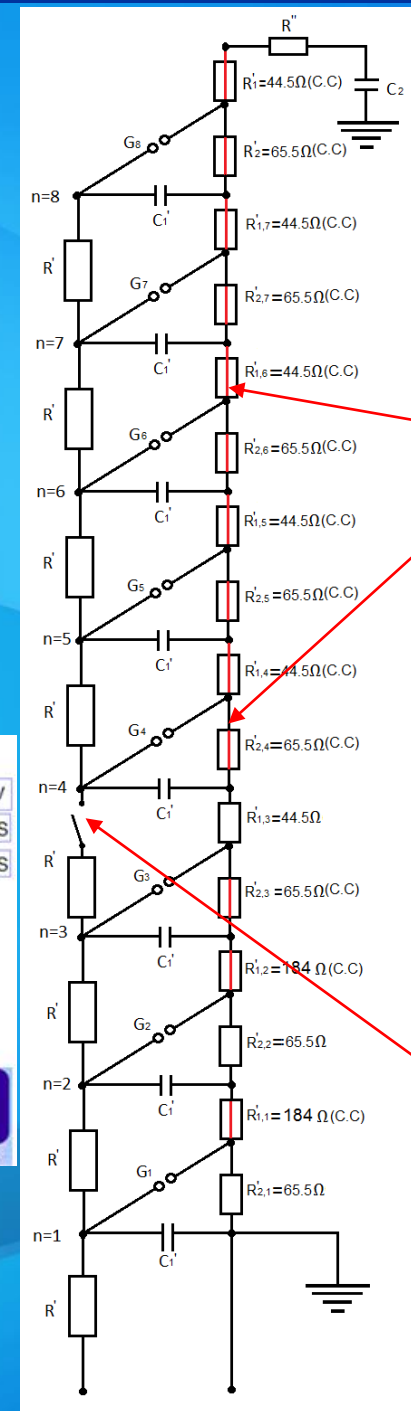
abierto

8) Ejemplo 8, resistencias desiguales por etapa, transformadores de 10,000 pF y $|U_0| \sim 0.375$, $n=3$:

$R_1 = 44.5 \Omega$, 7 corto circuitos en R_1'
 $R_2 = 196.5 \Omega$, 5 corto circuitos en R_2'
 Un circuito abierto en R' de $n = 3$



CH2 Upeak:	-559.10	kV
CH2 T1:	1.19631	uS
CH2 T2:	55.4495	uS
Overshoot:	0.003246	



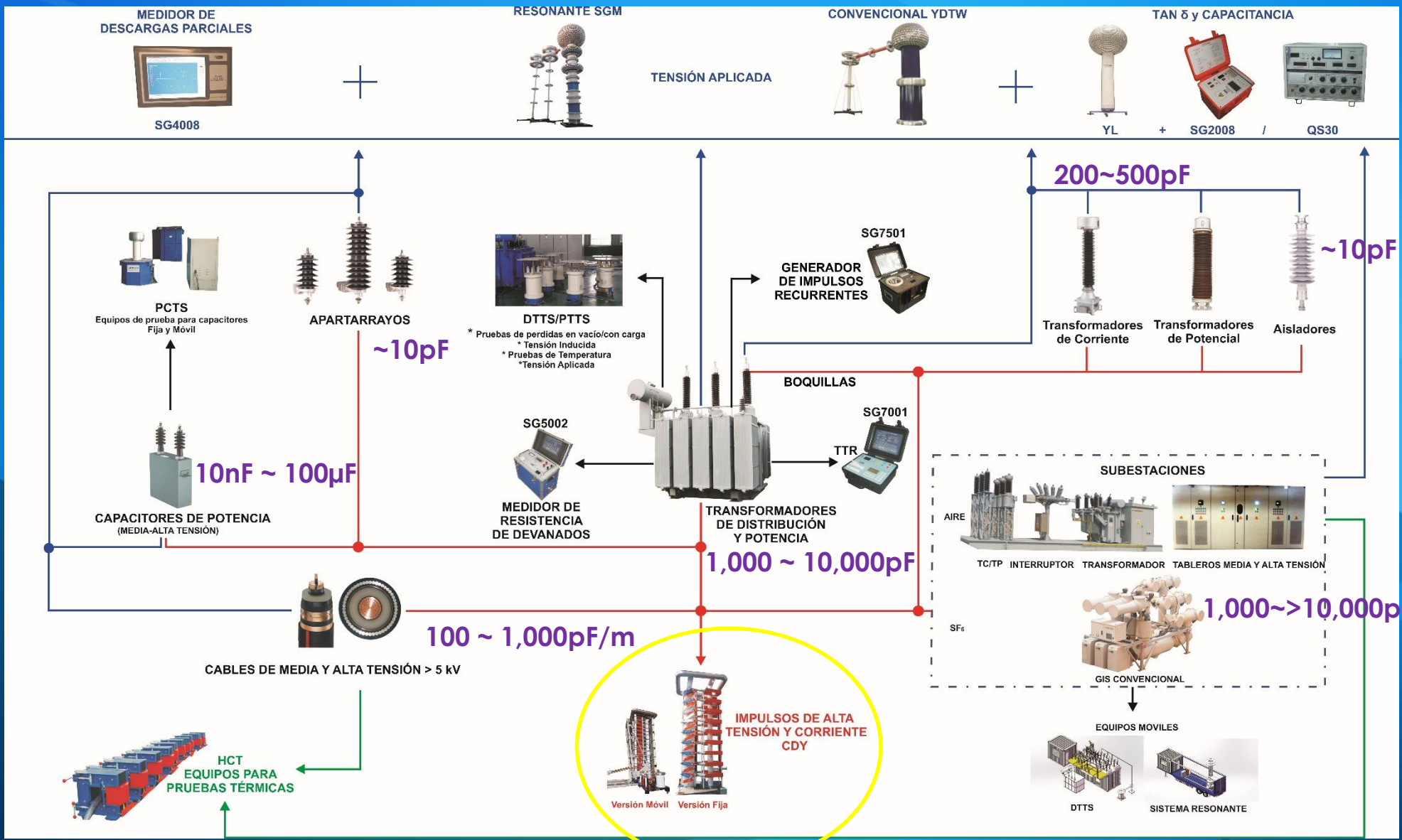
corto circuitos (en rojo)

abierto

Se puede demostrar que que una graduación aún mas escalonada de los valores de las resistencias de frente y cola en los casos anteriores propuestos pueden permitir un paso más fino de ajuste para permitir prácticamente probar la gama completa de objetos de prueba producidos en una fábrica de transformadores o que se encuentren en el campo, siempre y cuando sus requerimientos de tensión de prueba que no excedan la capacidad máxima del generador. Se puede diseñar el equipo de manera similar para las pruebas de impulso tipo maniobra.

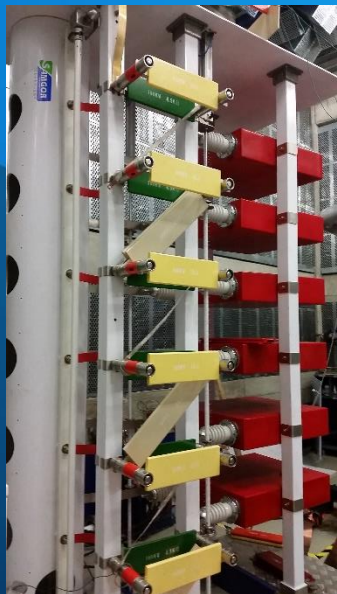
Los valores de resistencias seleccionados anteriormente aplican para el rango de capacitancias de carga presentes en transformadores, así como también subestaciones GIS, por ser muy similares en magnitudes.

Se ha encontrado también que el mismo diseño se puede modificar para cumplir los requerimientos de otros objetos de prueba tales como aisladores, cables etc.

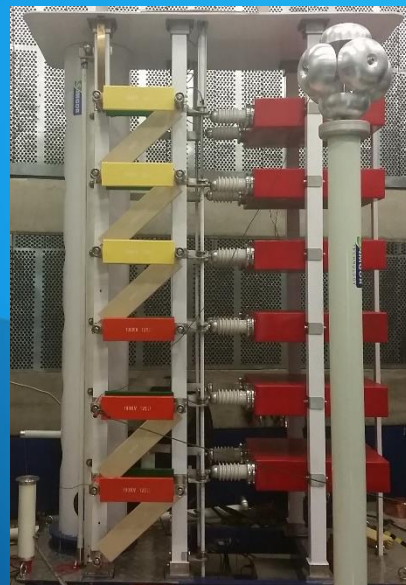


4. APLICACIONES: MODO DE USO

Del punto anterior podemos extraer que un generador de impulsos con tal funcionalidad no sólo cuenta con características versátiles de prueba sino que contribuye a incrementar la eficiencia del laboratorio de impulsos de manera considerable al no requerir gran cantidad de ajustes manuales en el circuito del generador, similar a la operación de un equipo de pruebas de tensión aplicada.



Corto circuitos en R_1' y etapas reducidas manualmente

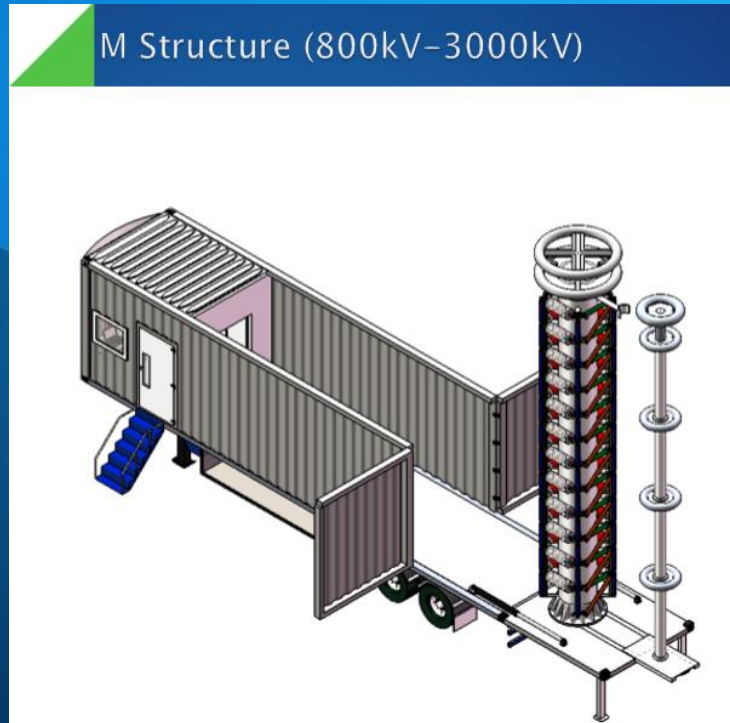


Corto circuitos en R_1' , R_2 entre etapas y etapas reducidas automáticamente

Laboratorio de impulsos móvil

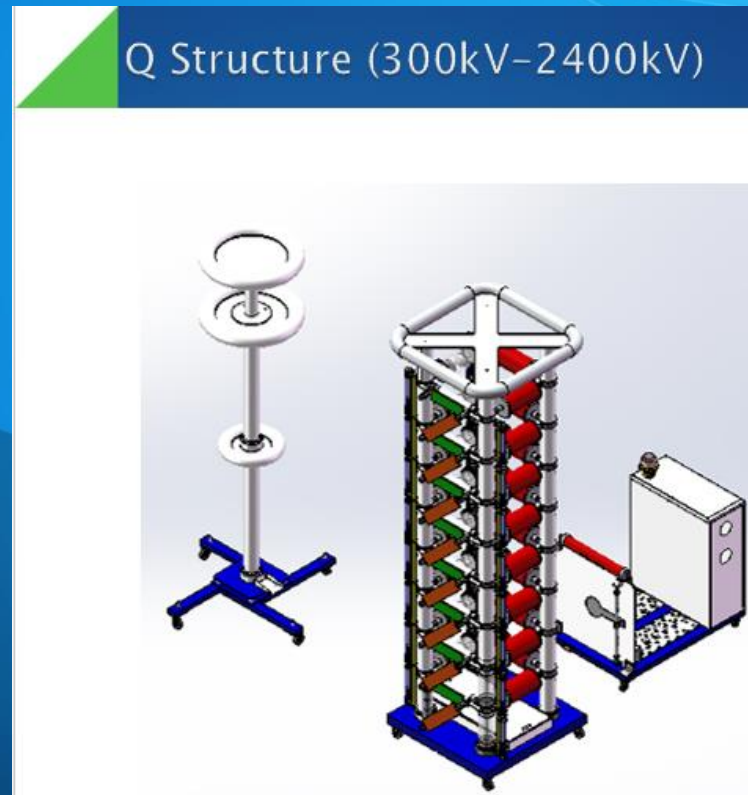
Esta es un aplicación ideal para el equipo propuesto ya que un laboratorio móvil puede contar con un rango muy amplio de objetos de prueba (amplio rango de capacitancias).

Un equipo que se pueda erigir en sitio sin necesidad de armado prolongado y que además cuente con este sistema podría incluso recurrir a una estructura mas robusta y segura del mismo sin necesidad de sacrificar versatilidad y eficiencia.



Laboratorio de impulsos fijo

Con un generador con este diseño tanto los fabricantes como laboratorios de prueba ya no tendrían que tener varios generadores de diferentes niveles de tensión para satisfacer sus necesidades, debido a la alta versatilidad y eficiencia de prueba en un solo equipo para diferentes niveles de tensión y capacitancia.



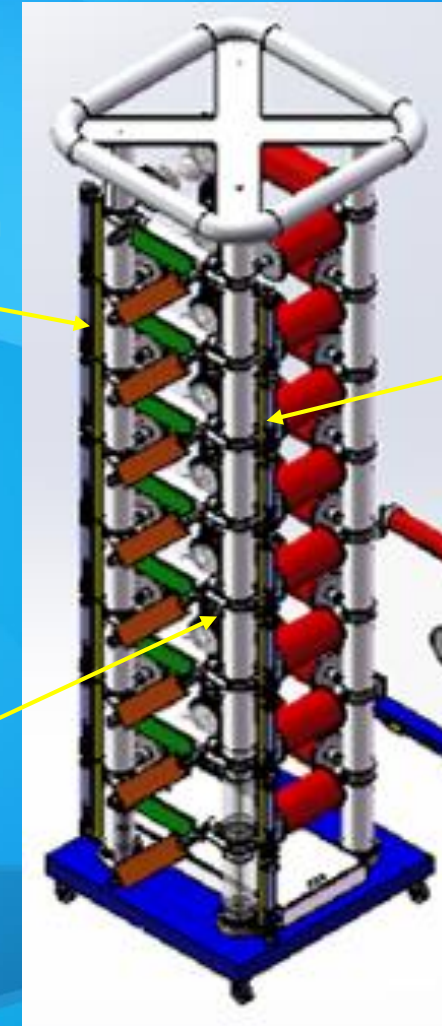
Usos y posibilidades

- Una de las alternativas en el uso del equipo sería la introducción de los valores de resistencia de y cola deseados en función de los tiempos deseados o introduciendo un valor de capacitancia aproximado del equipo bajo prueba y mediante el uso de las ecuaciones aquí descritas y un algoritmo adaptativo el mismo software ajuste los valores de resistencia y etapas requeridas en función de la tensión requerida.
- Otra alternativa sería que mediante la opción de disparos de prueba a tensión reducida el equipo podría iterar brevemente en 2 o 3 disparos para encontrar los parámetros válidos y ajustarse automáticamente mediante un algoritmo apropiado, esto sería especialmente valioso para objetos de pruebas con características desconocidas en cuanto a su capacitancia.

Corto circuito en R_1'

Corto circuito en R_1' & R_2'

Abierto en R' (detrás)



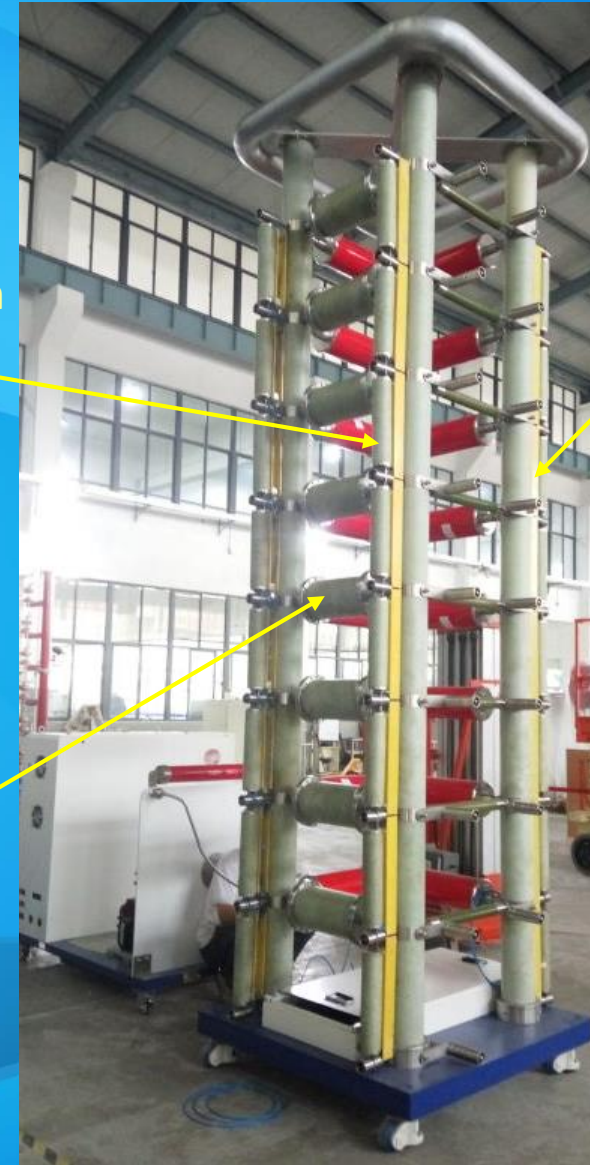
Oscilaciones y pruebas especiales

- De acuerdo a las características RLC del circuito de prueba de alta tensión, es probable que se presenten oscilaciones que interfieran con la medición de los tiempos y el valor pico (overshoot). De la misma manera se puede contar con un equipo de pruebas totalmente automático, se puede tener un equipo de compensación de oscilaciones en el pico multi-etapa cuyas etapas pudieran seleccionarse ya sea de modo automático desde el mismo software de control de la consola de impulsos.
- Lo mismo procedería para la incorporación de circuitos Glaninger (Objetos de prueba con bajos valores de inductancia)

Corto circuito en R_1'

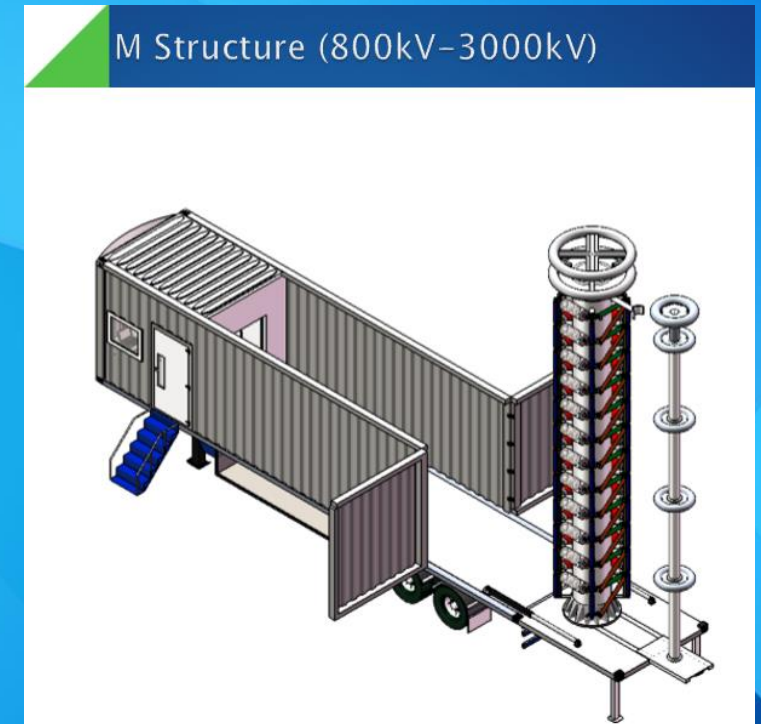
Corto circuito en R_1' & R_2'

Abierto en R' (detrás)



5. CONCLUSIONES

- Dentro de las exigencias actuales y la tendencia a futuro de las necesidades del sector eléctrico cada vez mas complejo y las normas que lo rigen, un equipo generador de impulsos como el aquí presentado encajaría perfectamente en las instalaciones de los laboratorios de ensayo incrementando la eficiencia y versatilidad tanto de los laboratorios fijos, como móviles.
- Un refinamiento aún mas exacto de la operación del generador de impulsos aquí discutido consistiría en la subdivisión del generador en etapas inferiores a 100kV ($U_0 = 300 \sim 800\text{kV}$) y el uso de capacitores serie por etapa que al ser seleccionadas o dejados fuera del circuito extenderían el rango de prueba sobre todo al momento de operar en modo de etapas reducidas. Las opciones de desarrollo continuo para esta tecnología serían muy amplias y como se ha investigado hasta ahora, muy viables.



FIN

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Dudas:
danielgarza@garzaelectrothermal.com