

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“DISEÑO Y MODELO A ESCALA DE UN GENERADOR  
DE IMPULSOS DE TENSIÓN**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**SALVADOR ANGELINO ROCA POMA**

**PROMOCIÓN**

**1995-II**

**LIMA-PERÚ**

**2005**

## ÍNDICE

<b>SUMARIO</b>	5
<b>CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN</b>	6
1.1 Alcance.	6
1.2 La Necesidad de Plataformas de Pruebas de Impulso.	6
1.3 Planteamiento del problema.	6
1.4 Objetivos.	7
1.5 Hipótesis básicas para el diseño.	7
<b>CAPÍTULO II : LOS TRANSITORIOS DE TENSIÓN Y LAS SOBRETENSIONES IMPULSIONALES</b>	8
2.1 Los Transitorios de Tensión y su Origen.	8
2.2 Las Sobretensiones Impulsionales.	9
2.3 La Descarga de las Nubes	10
2.4 Sobretensiones de Rayo.	12
2.5 Mecanismos de Sobretensiones de Rayo.	13
2.6 Sobretensión de Maniobra.	17
<b>CAPÍTULO III: GENERACIÓN Y MEDIDA DE IMPULSOS DE TENSIÓN</b>	20
3.1 Perfiles Normalizados de Ondas de Impulsos de Tensión y de Corriente.	20
3.2 Generación de Impulsos de Tensión para propósitos de Prueba.	30
3.3 Análisis del Circuito Marx.	31
3.4 Sistema de Generación de Impulsos de Tensión.	49
3.5 Sistema de Medición de Impulsos de Tensión.	58
<b>CAPÍTULO IV: DISEÑO ELÉCTRICO A ESCALA DEL GENERADOR DE IMPULSO DE TENSIÓN</b>	74
4.1 Modelo a Escala del Generador de Impulso de Tensión.	74
4.2 Utilización del modelo a escala.	74
4.3 Métodos para la determinación de los elementos del circuito de Impulso de Tensión.	75
4.4 Diseño Eléctrico aplicado del Generador de Impulso de Tensión	79
4.5 Características de diseño del Generador de Impulso	88

<b>CAPITULO V:</b>	
<b>SIMULACIÓN APLICADO DEL DISEÑO</b>	92
5.1 Formato para los datos misceláneos.	92
5.2 Modelos de interruptores usados en el programa ATP.	93
5.3 Simulación del Circuito equivalente del Generador de Impulso de 10 etapas con ATP.	96
5.4 Simulación del Generador de Impulso de 10 etapas con el programa ATP.	109
5.5 Cumplimiento de los objetivos	126
5.6 Diseño Eléctrico del Generador de Impulso de Tensión de 10 kV	127
5.7 Simulación del Generador de Impulso de 1 etapa de 10 kV con el ATP	133
<b>CONCLUSIONES</b>	141
<b>RECOMENDACIONES</b>	143
<b>ANEXO</b>	144
A.1 Glosario de Términos	144
A.2 Formas de Onda de Impulso de Tensión.	147
A.3 Factores de Corrección de la Tensión.	149
A.4 Pruebas de Laboratorio que se realiza con el Generador de Impulsos de Tensión.	157
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	168

## SUMARIO

El aislamiento de la aparamenta eléctrica o de los componentes de Líneas de Transmisión o Estaciones de Transformación es a veces sometido durante la Operación, a sobretensiones que pueden ser originadas ya sea por un proceso de Reconfiguración de la Red, Fallas, descargas de Rayos o por Maniobras del Interruptor.

Principalmente las sobretensiones producidas por los Rayos son de magnitud suficiente para poder contornear o perforar los aislamientos eléctricos; por lo tanto hay mayor interés en verificar su sostenimiento como parte de la fabricación y previas a la operación eléctrica, sobre todo en aparatos para los rangos de Alta Tensión.

Nuestro estudio se orienta a la reproducción artificial de la forma y magnitud del impulso de tensión para pruebas aplicables a diversos aislamientos, lo cual es logrado con un Generador de Ondas de Tensión Impulsional que nos permitirá comprobar el sostenimiento de los aislamientos eléctricos respecto de las Sobretensiones Impulsionales de corta duración tales como una sobretensión tipo Rayo o tipo Maniobra. El modelo que proponemos simular se basa en el circuito Marx, que consiste esencialmente de un conexionado en etapas de Condensadores, Explosores y Resistores; de tal forma que luego de cargarse en paralelo los Condensadores por una fuente de tensión continua a través de los Resistores de carga, se descargarán todos ellos en serie a través de Explosores que hacen la conmutación serie produciéndose una Alta tensión que es aplicada al objeto bajo prueba.

La tesis se inicia con una revisión de Normas a fin de familiarizarnos con la terminología, posteriormente se estudia el circuito Marx, se determinan sus parámetros como parte del diseño y se detalla el proceso de modelado del circuito de Impulso.

Finalmente, se comparan los resultados de las simulaciones usando el programa ATP con respecto al cálculo teórico y se presentan los resultados de las simulaciones y las recomendaciones para la mejora del modelo.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Alcance**

El modelo se basa en el circuito Marx y con él se puede simular sobretensiones impulsionales de descarga atmosférica o transitorios de tensión de maniobra, que son fenómenos que inciden en un sistema de potencia y son objeto de reproducción en un Laboratorio de Alta Tensión.

Nuestro estudio está consagrado al análisis del circuito Marx, su modelamiento y la explicación de su comportamiento mediante un programa computacional.

La construcción de dicho modelo a escala en este caso excede los límites de recursos materiales y tiempo disponibles para la implementación física del Generador de Impulso de tensión con los componentes requeridos.

### **1.2 La Necesidad de Plataformas de pruebas de Impulso**

Debido a que todos los equipos de estaciones de transformación que están acoplados a una línea de transmisión, están sometidos potencialmente a sobretensiones originadas por las descargas atmosféricas o sobretensiones de maniobra; se hace necesario aplicar a tales equipos, pruebas de impulso de tensión que nos demuestren su capacidad de sostenimiento a dichas sobretensiones durante la operación normal con valores de magnitud y forma previstos por las Normas.

### **1.3 Planteamiento del problema**

Simular mediante el programa computacional ATP el comportamiento de un modelo a escala de un generador de impulso de tensión tipo Marx.

### **1.3.1 Formulación del problema**

Para llegar a la comprobación definiremos las ecuaciones fundamentales que gobiernan el comportamiento del circuito Marx, basados en las normas IEC-60, luego lo llevaremos a la práctica mediante el modelamiento computacional ATP con pruebas de laboratorio.

Finalmente haremos la recolección y el análisis de los datos, para las observaciones así como de los datos pertinentes para llegar a la evidencia de su funcionamiento.

### **1.3.2 Justificación**

Contribuir con el Laboratorio de Electricidad de la Universidad Nacional de Ingeniería con una plataforma de pruebas virtuales con tensiones impulsionales, lo cual se puede suplir con un dispositivo como el modelo que se propone construir.

## **1.4 Objetivos**

Examinar los criterios fundamentales que permitan el diseño y la simulación de un modelo a escala de un Generador de Ondas de Tensión Impulsional para pruebas de Alta Tensión en Laboratorio.

Dicho modelo se aplicaría en la simulación de Sobretensiones Impulsionales de Descarga Atmosférica.

## **1.5 Hipótesis Básicas para el diseño**

Nuestro modelo a escala del generador de impulso de tensión que proponemos que se construya, nos lleva a suponer que su funcionamiento y su comportamiento serán idénticos a los de uno real, para ello tendremos que elaborar un diseño basado del circuito Marx para poder comprobar si tal afirmación corresponde a la realidad.

## **CAPITULO II**

### **LOS TRANSITORIOS DE TENSIÓN Y LAS SOBRETENSIONES IMPULSIONALES**

Las descargas atmosféricas que producen Sobretensiones de Rayo siempre han representado un gran problema para los sistemas de transmisión de energía eléctrica hasta la Alta Tensión, puesto que la mayoría de fallas en ausencia de contaminación, son originados por este tipo de fenómeno en donde la probabilidad de ocurrencia está asociada a los niveles isocerámicos (número de días con tormenta al año)

Cada Rayo que cae sobre un conductor de fase, o en una torre o simplemente a proximidad de la línea, origina directamente en ella o por inducción, la circulación de una corriente impulsional muy elevada que puede variar entre 1.0 kA y 200 kA, con un valor medio de 25 kA de la distribución global.

#### **2.1 Los Transitorios de Tensión y su Origen**

Los Transitorios de tensión son manifestaciones de leyes físicas, independientes del control humano y se originan debido a cambios repentinos en la configuración de un circuito energizado, ya sea la apertura y cierre de interruptores de potencia, fallas que ocurren en el sistema, descarga de Rayos y otros disturbios inesperados; los cuales generalmente ocasionan sobretensiones transitorias o impulsos de tensión de magnitudes impredecibles; que, a pesar de lo breve de su duración, pueden ser peligrosas por las amplitudes que se producen y que pueden originar la ruptura o el deterioro del aislamiento del equipo.

Al originarse un transitorio se generan tensiones y corrientes que están compuestas por señales de diversas frecuencias, las cuales se atenúan o aparecen conforme se desarrolla el transitorio, lo que significa que la composición de armónicos de las tensiones y corrientes varían con el tiempo<sup>15</sup>. Esto se debe a que la corriente en una inductancia no puede cambiar repentinamente y la tensión a través de un capacitor no varía instantáneamente puesto que la energía almacenada toma un tiempo determinado en redistribuirse en un circuito eléctrico.

Los fenómenos transitorios que ocurren en un sistema de potencia debido a razones expuestas anteriormente son de análisis muy complejo, ya que se requiere conocer su forma, magnitud y tiempo de duración.

El estudio de las sobretensiones, que describiremos brevemente en el presente capítulo, nos permitirá dar criterios sobre un adecuado diseño de equipos, y sobre la operación y funcionamiento de un sistema de potencia con largas Líneas de Transmisión y con extensa cobertura.

## 2.2 Las Sobretensiones Impulsionales

### a. Definición : Sobretensión Impulsional

Es toda sobre-elevación de tensión en función del tiempo entre un conductor de fase y tierra o entre 2 conductores de fase, su magnitud es elevada y de naturaleza transitoria cuyo valor de cresta sobrepasa el valor de la tensión máxima de servicio ( $U$ ) o la tensión máxima para el aislamiento a frecuencia industrial ( $U_m$ ) en un sistema eléctrico. ( $U\sqrt{2} / \sqrt{3}$  ó  $\sqrt{2} U_m$  respectivamente)

La relación entre las tensiones nominales ( $U_n$ ) y  $U_m$  se dan en la tabla 2.1 según publicación Nro. 137 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

Tensión Nominal $U_n$ (kV)	Tensión máxima para el aislamiento $U_m$ (kV)
110-115	123
132-138	145
220-230	245
275-287	300
330-345	362
380-400	420
500	525
700-750	765

Las Sobretensiones transitorias o de Impulso aparecen después de ocurrir un impacto de Rayo o una maniobra en la red, duran un tiempo del orden de los microsegundos ( $\mu s$ ), para luego atenuarse, se caracterizan por su aperiodicidad y



su forma unidireccional; a su vez según su origen se subdividen en dos categorías:

- Sobretensiones de Rayo.
- Sobretensiones de Maniobra

#### **b. Características de las Sobretensiones Impulsionales:**

- Son fenómenos electromagnéticos cuyas consecuencias inmediatas pueden ser apreciados a simple vista por la presencia de arcos eléctricos.
- Toda onda de sobretensión está acompañada de una onda de sobrecorriente que tiene la misma forma con amplitud distinta en un mismo instante<sup>8</sup>.
- Pueden ser observados mediante un osciloscopio o impresos con un oscilógrafo; se trata de una onda aperiódica, inicialmente con un pico elevado y después decreciente hasta anularse.
- Las sobretensiones impulsionales se trasladan a lo largo de una Línea de Transmisión en forma de ondas cuya amplitud se va amortiguando al alejarse del punto de partida, hasta que recuperan la normalidad después de múltiples reflexiones<sup>2</sup>.
- Las sobretensiones de Rayo o de Maniobras, son ondas impulsionales que al ser aplicadas al aislamiento pueden ocasionar descarga disruptiva en diferentes intervalos de tiempo que están asociados a diversas partes de su perfil geométrico, ya sea en el frente, en la cresta o en la cola de la onda.

### **2.3 La Descarga de las Nubes**

La formación de las nubes o masas de agua en forma de vapor, se acompaña de fenómenos electrostáticos de separación de cargas: las partículas ligeras, cargadas positivamente, son arrastradas por las corrientes de aire ascendentes y las partículas pesadas, cargadas negativamente caen por la acción de su propio peso.

Las nubes de tormenta se caracterizan por la formación de centros cargados en su interior, la parte superior de su desarrollo está constituida por cristales de hielo

cargados positivamente, mientras que la parte inferior donde predominan pequeñas gotas de agua tiende a cargarse negativamente dando lugar a la presencia del campo eléctrico en la superficie del suelo.

El proceso de descarga de las nubes, se inicia con un efluvio piloto, el cual al desplazarse hacia tierra crea un canal ionizado negativo con fuerte concentración en su punta alrededor de él.

Cuando el efluvio piloto se aproxima al suelo y a las prominencias, el campo eléctrico aumenta a 4 ó 5  $kV/cm$  y al alcanzar el gradiente crítico disruptivo del aire ( $30kV/cm$ ) se suscita la aparición de descargas ascendentes (tierra-nube) visibles de corriente muy intensa y de corta duración, que se propagan a velocidad próxima a la luz y una de las cuales perfora el aire alcanzando al piloto y produciéndose una descarga atmosférica completa, con la neutralización de los centros de carga de la nube y del suelo, acompañada de una fuerte luminosidad ascendente denominada “neutralización”. Después de 40-80 ms, se puede producir otra descarga (nube-tierra) desde otro centro cargado de la nube, o una descarga hacia la nube a través del mismo canal ionizado, este tipo de fenómeno puede repetirse varias veces como descargas de retorno que caen en lugares indeterminados sobre el suelo.

Según la carga de la nube, los rayos pueden ser de polaridad negativa o positiva, en climas templados los rayos negativos representan un 80% a 90% del total. Este proceso disruptivo se desarrollará más fácilmente en lugares donde la resistividad del suelo es baja (zonas freáticas, mineras, terrenos pantanosos), ver figura 2.1.

G: cable de guarda  
 Q: efluvio piloto  
 L: Inductancia equivalente de la Estructura  
 R: Resistencia equivalente del suelo

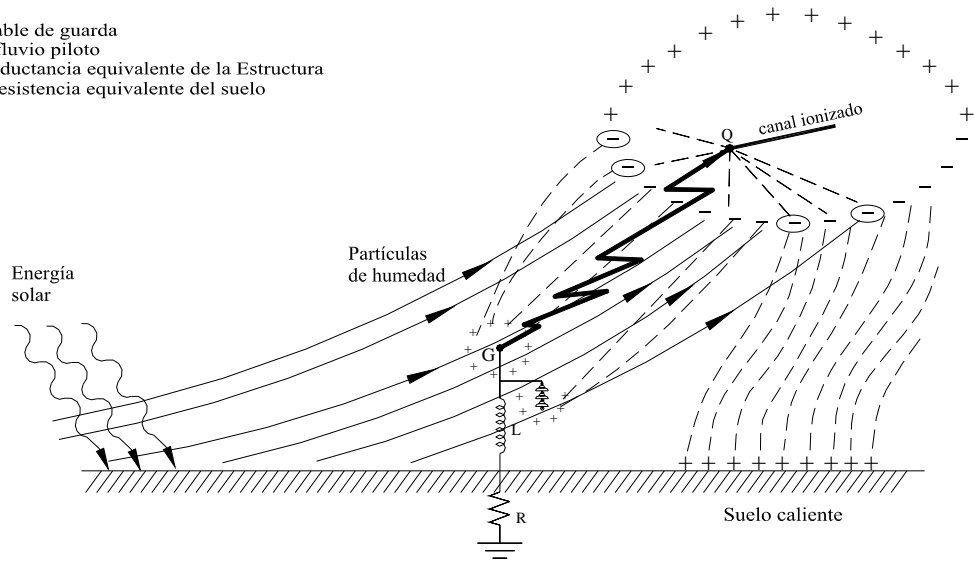


Fig. 2.1 Esquema de los acoplamientos electrostáticos que permite el impacto del Rayo de polaridad negativa en una estructura

La forma real de la onda observada del rayo es muy variable: consiste de una frente de elevada pendiente hasta la amplitud máxima (de algunos microsegundos hasta unos 20  $\mu\text{s}$ ), seguido de una cola de valores decrecientes con una duración de algunas decenas de  $\mu\text{s}$ . Figura 2.2

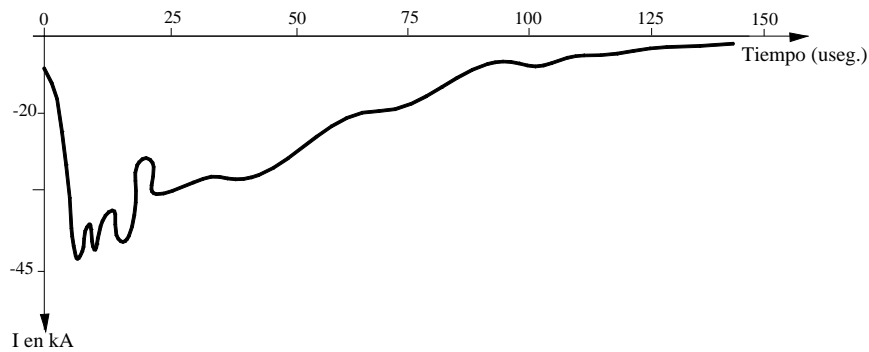


Figura 2.2 Oscilograma de una corriente de rayo de polaridad negativa.

## 2.4 Sobretensiones de Rayo

Se producen luego de la descarga de una nube, dichas sobretensiones tienen una forma de onda con frente escarpado de elevado gradiente y característica unipolar, que se desplazan a lo largo de los conductores en ambos sentidos a partir del punto

de origen, y después de alcanzar su valor máximo desciende progresivamente con una pendiente suave; durante su desplazamiento la onda sufre una atenuación debido a la propagación, y a los efectos corona y joule.

La característica de las sobretensiones transitorias de rayo puede ser simulada en Laboratorio, mediante una onda de impulso de tensión normalizada con parámetros  $1.2 / 50 \mu\text{s}$ , que viene a ser el impulso tipo rayo cuyo tiempo de frente ( $t_f$ ) es de  $1.2 \mu\text{s}$  y el tiempo de valor medio o cola ( $t_c$ ) es de  $50 \mu\text{s}$ , como en la figura 2.3:

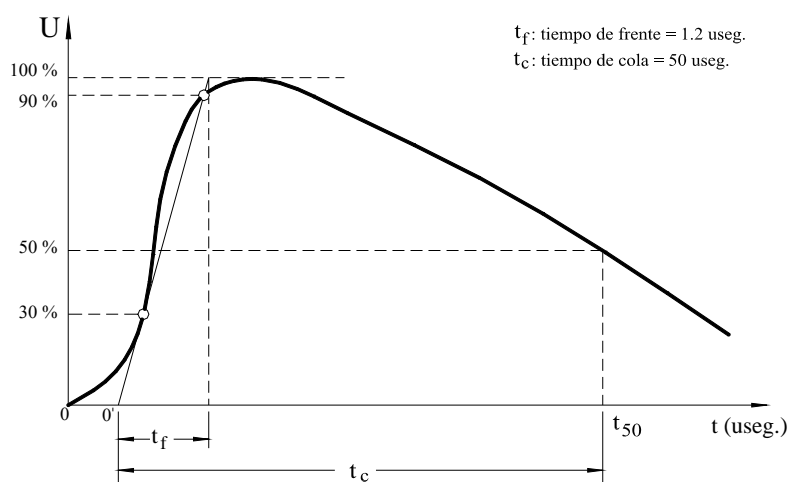


Fig. 2.3. Onda de impulso de Tensión Normalizada IEC: 60-2, tipo Rayo 1.2/50 useg.

## 2.5 Mecanismos de Sobretensiones de Rayo

Las sobretensiones de Rayo se presentan según el mecanismo de impacto en las Líneas de Transmisión y en las Estaciones de Transformación que es la infraestructura más expuesta, dependiendo de la forma como varía el campo eléctrico formado, se conocen tres mecanismos que están en relación con el trayecto final de las descargas:

### 2.5.1 Mecanismo de Tensión Inducida

Se presenta cuando las nubes descargan rayos que caen a tierra en puntos cercanos a las Líneas o Subestaciones y por efecto de inducción electrostática y

electromagnética introducen transitorios de sobretensión en todos los conductores; esto se debe a la carga inicial de la línea que se libera bruscamente como consecuencia de la desaparición del campo eléctrico entre la nube y la Línea de Transmisión.

Esta carga inducida se desplaza en forma de ondas de tensión de configuración bipolar con amplitudes significativas en el instante inicial.

### 2.5.2 Mecanismo de Falla del efecto Faraday

Se produce cuando la descarga cae sobre un conductor de fase, en este caso el cable de guarda que ejerce la protección Faraday sobre la línea no lo protege adecuadamente ante corrientes de rayo de amplitudes inferiores a los valores previstos en el diseño de la disposición de los conductores en la torre de transmisión. La corriente del rayo inyectada en la Línea de Transmisión origina un drástico cambio de estado de las cargas preexistentes provocando la propagación de dos ondas planas de tensión en direcciones opuestas y a la velocidad de la luz con el consiguiente cambio del campo eléctrico cuya amplitud máxima en la cresta de la onda ( $U_{STR}$ ) está dada por la siguiente relación:

$$U_{STR} = \frac{1}{2} Z_0 I_R \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1)$$

donde:  $U_{STR}$ : Sobretensión máxima producida

$Z_0$ : Impedancia característica del conductor (entre 100 y 1000 ohmios).

$I_R$ : Valor pico de la corriente de rayo que impacta en el conductor

El acoplamiento electrostático y electromagnético entre conductores, permite la inducción de sobretensiones en los demás conductores, cuya forma es idéntica pero de menor amplitud.

El contorneo de la cadena de aisladores puede o no producirse según que la sobretensión sobrepase o no a la Tensión de Sostenimiento a impulsos de rayo ( $U_{SI}$ ) o el nivel de sostenimiento del aislamiento, de manera que:

– Si  $U_{STR} < U_{SI} \Rightarrow$  la onda plena de la sobretensión continuará su viaje

- Si  $U_{STR} \geq U_{SI} \Rightarrow$  Existirá una falla por contorneo, originándose una onda cortada que sigue viajando a través de la Línea de Transmisión. Figura 2.4.

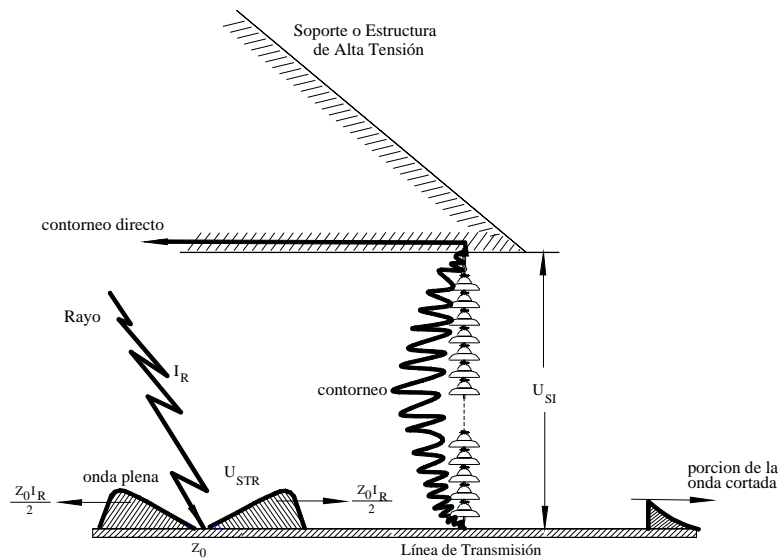


Fig. 2.4. Falla de una cadena de aisladores y formación de sobretensiones debido a impacto directo de rayo sobre un conductor

### 2.5.3 Mecanismo de Disrupción Inversa

Frecuentemente las descargas que caen sobre la estructura o sobre el cable de guarda, permiten que la corriente de rayo  $I_R(t)$  se derive hacia tierra a través del cable de guarda ( $Z_G$ ), a través de la impedancia de la estructura ( $Z_T$ ) y a través de la resistencia de puesta a tierra ( $R$ ) de la estructura; Significando una modificación súbita del campo eléctrico entre el cable de guarda y los conductores de la línea.

La disrupción se produce debido a que la onda de sobretensión de rayo al propagarse por la estructura, encuentra un valor elevado de la resistencia de puesta a tierra y al no poder dispersarse se refleja, superponiéndose sobre si misma y formando una sobretensión  $U(t)$  entre la torre y los conductores de fase, superior a la magnitud de la onda incidente que ocasiona el contorneo inverso de la cadena de aisladores. Figura 2.5.

La ecuación que expresa esta sobretensión es:

$$U(t) = k \left[ R I_R(t) + L \frac{dI_R(t)}{dt} \right] \quad (2.2)$$

Donde:  $U(t)$  = Sobretensión resultante  $k$  = Factor de aproximación

$I_R(t)$  = Corriente de Rayo;  $L$  = Coeficiente de autoinducción de la estructura

La diferencia de potencial entre los conductores de fase y el cable de guarda tiende a incrementarse en función inversa al acoplamiento entre ellos. La auto inductancia propia de la estructura, representa un acoplamiento electromagnético y electrostático entre el circuito de la corriente de rayo y los conductores suspendidos de las cadenas de aisladores.

En consecuencia la diferencia de potencial entre el conductor de fase más distante y el cable de guarda, puede ser tal que provoque la pérdida de aislamiento de la cadena y ocasiona disrupciones inversas.

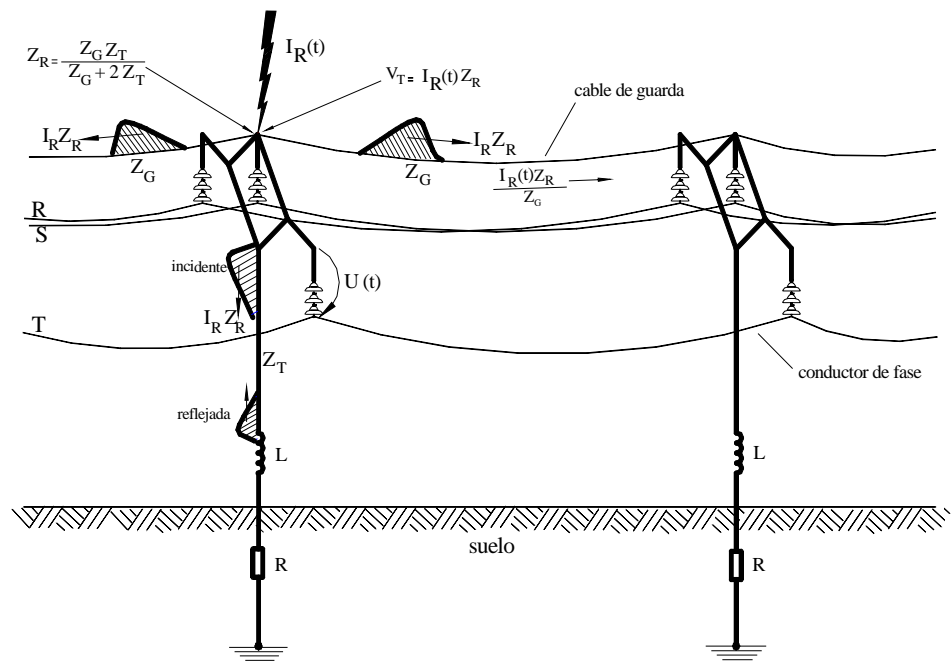


Fig. 2.5. Proceso de propagación de la descarga que origina la falla de una cadena de aisladores por contorneo inverso debido al impacto del rayo en el cable de guarda.

Los elementos básicos de la teoría de ondas viajeras están ilustrados en la figura 2.5, la cual muestra una descarga de rayo con una corriente  $I_R(t)$  que impacta en la cima

de la torre. En este diagrama,  $Z_G$  representa la impedancia del cable de guarda en cada dirección, mientras que  $Z_T$  representa la impedancia de la torre. La corriente de rayo es dividida en forma inversamente proporcional según la impedancia sobre el cual se propaga la corriente es decir sobre el cable de guarda y la estructura de la torre.

La tensión en la cima de la torre  $V_T$  es calculada multiplicando la corriente total  $I_R(t)$  por la impedancia resultante  $Z_R$  que se obtiene considerando que las impedancias de las tres trayectorias de corrientes son conectadas en paralelo. Esta tensión  $I_R Z_R$  originará así tres ondas de tensión de igual amplitud que se propaga alejándose desde la cima de la torre hacia tierra y hacia ambos lados del cable de Guarda tal como se muestra en la figura 2.5

## 2.6 Sobretensión de Maniobra

Se originan por una operación de interrupción o por la falla que ocurre en el sistema durante una operación de recierre del interruptor, la interrupción de una falla y la conexión o desconexión de circuitos capacitivos o inductivos. Dichas maniobras producen oscilaciones de tensión altamente amortiguadas, generalmente de corta duración y tienen amplitudes de magnitud impredecible.

Dichos esfuerzos eléctricos son sustancialmente de mayor duración que las producidas por descargas atmosféricas, sus valores de cresta pueden alcanzar dependiendo del sistema de Alta Tensión hasta 4 veces la tensión nominal y desde el punto de vista del sostenimiento del aislamiento, son más peligrosos por su mayor duración y forma de onda.

La máxima sobretensión de maniobra ( $U_{sm}$ ), está dada por<sup>7</sup> :

$$U_{sm} = \left( \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \right) F_{sv} F_{sm} \quad (2.3)$$

donde:  $U_{sm}$  : máxima sobretensión de maniobra en kV.

$U_n$  : Tensión nominal entre fases en kV.

$F_{sv}$  : Factor de sobretensión permitido en operación normal entre 1.0 y 1.1



normalmente se acepta 1.05

$F_{sm}$  : Factor de sobretensión por maniobra en p.u.

Para el estudio de los efectos producidos sobre el aislamiento se simulan en Laboratorio impulsos de tensión de maniobra, estandarizado por el Comité Técnico Nro. 36 de la IEC (IEC public. 60 High Tensión Test Technique<sup>10</sup>), una forma de onda con parámetros 250/2500  $\mu$ s, que viene a ser el impulso por maniobra normalizado para las pruebas cuyo tiempo de frente ( $t_f$ ) es de 250  $\mu$ s, y el tiempo de valor medio o cola ( $t_c$ ) es de 2500  $\mu$ s, definiéndose también el tiempo de cresta al 90% de la amplitud  $t_d \approx t_f$ , Figura 2.6.

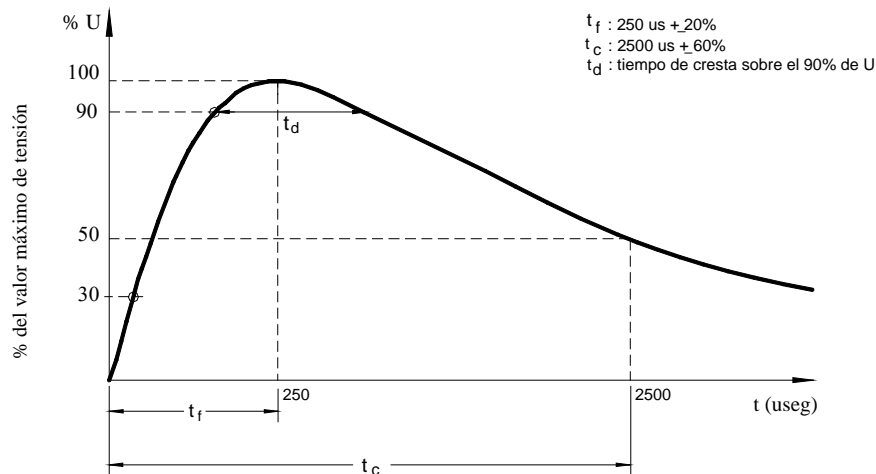


Fig. 2.6. Impulso de maniobra IEC: 60 - 2 : 250/2500 useg.  
Característica normalizada para pruebas de laboratorio

Para una sobretensión de maniobra, el tiempo de frente ( $t_f$ ) está entre 100 a 500  $\mu$ s y el tiempo de cola ( $t_c$ ) está en el orden de 1000 a 4000  $\mu$ s, la frecuencia de estas oscilaciones se extiende entre 100 a 500 Hz, y la elevación de la tensión (frente de onda) durante los 200 a 300  $\mu$ s, es la más peligrosa para el aislamiento.

En sistemas eléctricos con tensiones de servicio menores a 300 kV, la probabilidad de una falla debida a una sobretensión de maniobra es mínima ya que el aislamiento

es suficiente para sostener dicho transitorio, por tanto el diseño del aislamiento externo se orienta a las solicitaciones eléctricas provocadas por impactos de Rayo.

Por encima de 300 kV, gracias a mejoras en la tecnología de puesta a tierra, diseño de torres y métodos de protección de guarda, los niveles de sobretensión de maniobra son los que determinan las distancias de los aislamientos; las cuales se incrementan en forma proporcional con la tensión del sistema, en tanto que las debidas a rayos permanecen constantes<sup>9</sup>.

La Tabla 2.2 lista los valores típicos de sobretensiones de maniobra tomados del Libro de Referencia para Líneas de Transmisión<sup>24</sup>.

**Tabla 2.2. Valores Típicos de Sobretensiones de Maniobra**

Causas de la Sobretensión de Maniobra	Máxima Sobretensión por unidad (p.u.)
Energización de línea de 200 millas (322 km), sin resistencia de cierre.	3.5
Iniciación de falla en fase sin falla previa.	2.1
Interrupción de falla	1.7 - 1.9
Energización de línea y transformador	1.2 - 1.8
Primer recierre en banco de capacitores	3

## **CAPÍTULO III**

### **GENERACIÓN Y MEDIDA DE IMPULSOS DE TENSION**

Existen dos tipos de pruebas en Alta Tensión que son aplicadas a los aparatos de potencia, estas son las pruebas a la Frecuencia Industrial (60 Hz) y las pruebas con Impulsos de Tensión.

Las tensiones de prueba a la frecuencia de la red son producidas normalmente por un transformador o por transformadores conectados en cascada a fin de obtener potenciales de mayor magnitud; y las Tensiones Impulsionales son obtenidas a través de los Generadores de Ondas tipo “Marx” o Generadores de Impulsos de Tensión, que son indispensables para el desarrollo de nuevos equipos, el diseño y la técnica de verificación del aislamiento eléctrico interno y externo de aparatos y equipos, entre los más importantes se tienen principalmente los Transformadores de potencia y las máquinas con bobinados, asegurando así un elevado grado de confiabilidad de servicio y calidad del producto.

En el presente capítulo se consagra al estudio de la generación y medida de los Impulsos de Tensión.

#### **3.1 Perfiles Normalizados de Ondas de Impulsos de Tensión y Corriente**

En esta sección se definen los conceptos más importantes que se aplican a la generación y uso de los impulsos de Tensión y Corriente para pruebas de equipos eléctricos en Alta Tensión, de acuerdo a la norma IEC publicación 60, 1962.

##### **3.1.1. Perfiles Normalizados de Impulsos de Tensión tipo Rayo**

###### **a) Impulso de Tensión.**

Es una onda de tensión transitoria aperiódica de corto tiempo con polaridad única obtenida de una disrupción en el aire, cuya característica sin tener en cuenta las oscilaciones del rizado crece rápidamente hasta un valor máximo y luego decrece a cero. Esta curva está definida por su valor pico, polaridad y parámetros característicos de tiempo, Figura 3.1.

### 1. Impulso de Tensión Plena – Onda Completa

Es un impulso de tensión que después de alcanzar el valor pico decrece lentamente y exponencialmente casi a cero, Figura 3.1

### 2. Impulso de Tensión Cortado - Onda Cortada en la Cola

Es un impulso de tensión que es cortado luego de 2 ó 3  $\mu\text{s}$  súbitamente por una descarga disruptiva, produciéndose una caída de tensión brusca hasta cero. Figura 3.2.1

### 3. Impulso de Tensión tipo Cuña – Onda Cortada en el Frente

Es un impulso de tensión cuya característica crece con una pendiente aproximadamente constante hasta que es cortado sobre el frente por la aparición de una descarga disruptiva, Figura 3.2.2

#### b) Polaridad.

Las pruebas de impulso de tensión por convención se realizan con polaridad negativa con respecto a tierra, muy frecuente en las descargas atmosféricas. En cambio las sobretensiones que se presentan según el mecanismo de tensión inducida son de polaridad opuesta a la carga de la nube.

#### c) Frente de un Impulso de Tensión.

Es la parte creciente de la onda, Figura 3.1

#### d) Tiempo de Frente $t_f$ del Impulso de Tensión Pleno o Cortado en la Cola

Es definido como 1.67 veces el intervalo de tiempo  $T$  ( $T = t_{90} - t_{30}$ ), durante el cual el impulso de tensión se incrementa desde 30% hasta 90% del valor pico (puntos A y B de la figura 3.1 y 3.2.1). Si las oscilaciones son superpuestas sobre el frente, los puntos A y B serán determinados mediante una curva media trazada a través de dichas oscilaciones.  $t_f = 1.67 (t_{90} - t_{30})$

#### e) El origen convencional $0_1$ de un Impulso de Tensión

Es el punto sobre el eje del tiempo que dista en  $0.5T$  a partir del tiempo que pertenece el punto A (ver figura 3.1 y 3.2.1). Para nuestro caso la intersección de la línea trazada a través de los puntos A y B con el eje del tiempo es considerada a ser el origen  $O_1$  verificándose que  $0.3 t_f = 0.5 T$

**f) Cola de un Impulso de Tensión**

Es la parte decreciente después de alcanzar el valor máximo, Figura 3.1

**g) Tiempo de Cola o de Valor Medio  $t_c$  del Impulso de Tensión Pleno.**

Es el intervalo de tiempo entre el origen  $O_1$  y el instante sobre la cola de la onda en el cual la tensión decrece hasta la mitad ó 50% del valor pico.

**h) Impulso de tensión de descarga disruptiva  $U_d$**

Es el máximo valor de un impulso de tensión que ocurre en el objeto de prueba durante el ensayo originando una descarga disruptiva.

**i) Tiempo  $T_d$  de la descarga disruptiva de un Impulso de tensión**

Es el intervalo de tiempo entre el origen  $O_1$  y el instante de la descarga disruptiva.

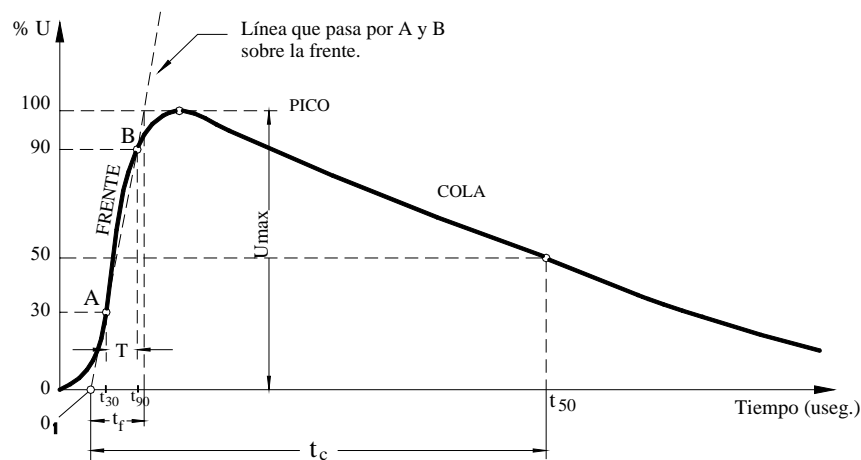


Fig. 3.1 Valores Característicos del Impulso de Tensión completo sin oscilaciones.

$O_1$  = Origen convencional de la Onda de Impulso.       $t_f$  = Tiempo de frente  
 $U_{max}$  = Valor pico real de la tensión                       $t_c$  = Tiempo de valor medio o de cola.  
 (El tiempo es medido a partir de  $O_1$ )

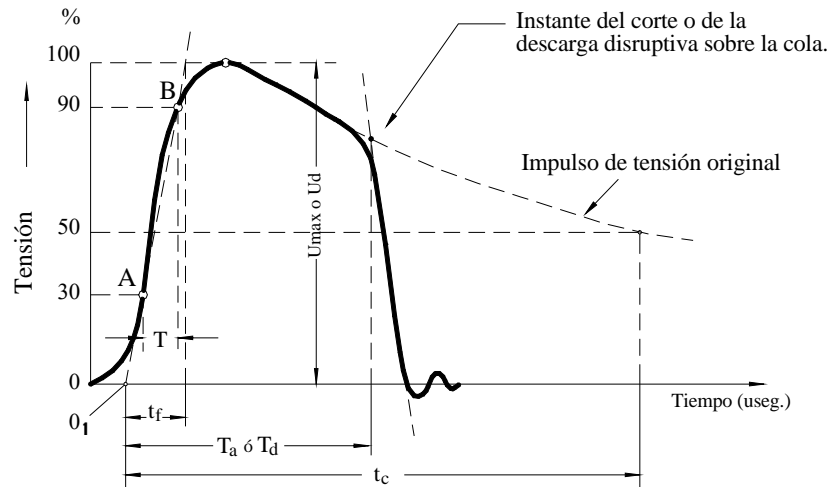


Fig. 3.2.1 Impulso de tensión cortado en la cola.

$T_a$  = Tiempo del corte en que se produce la discontinuidad inicial o la ocurrencia de la descarga disruptiva

$T_d$  = Instante en que ocurre la descarga disruptiva en el objeto de prueba.

$U_d$  = Tensión disruptiva. sobre el Impulso de Tensión.

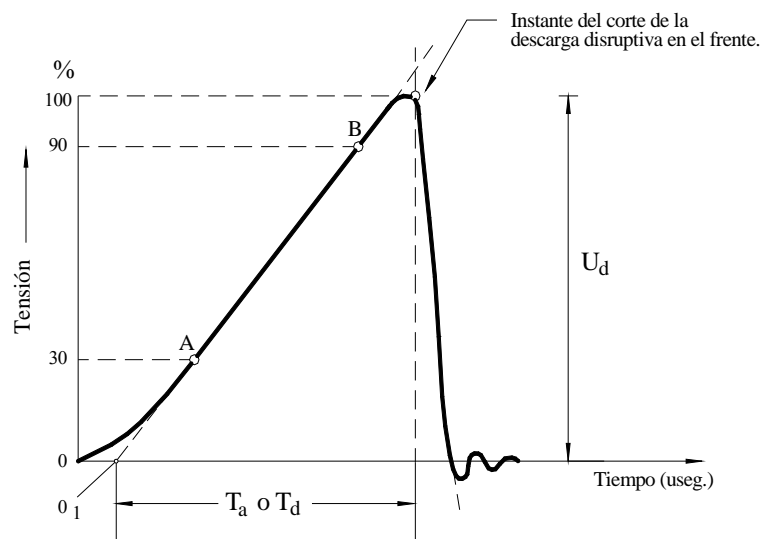


Fig. 3.2.2 Impulso de tensión cortado en el frente.

#### j) Instante de Corte de un Impulso de Tensión

1. En el caso de un impulso de tensión cortado sobre la cola, el instante de corte es la intersección del impulso de tensión original con una línea C–D trazada a través de las intersecciones del impulso cortado con 2 curvas que representan

el 70% y 10% del impulso de tensión original (ver puntos F y E de la Fig. 3.2.3).

Determinación del instante del corte y la duración de la caída de tensión de una onda impulsional cortada.

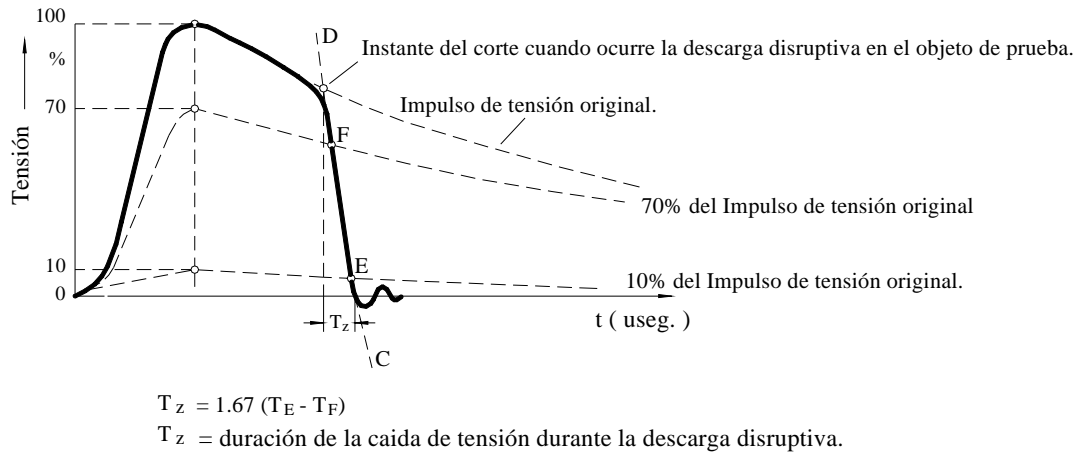
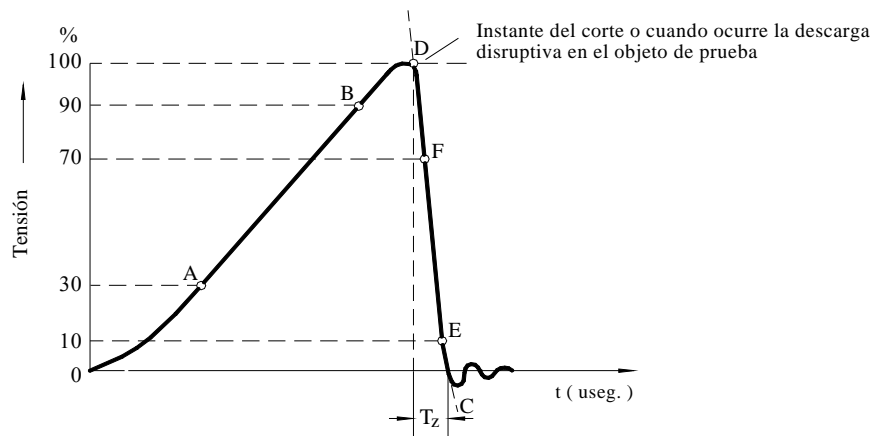


Fig. 3.2.3 Descarga disruptiva sobre la cola.

2. Cuando el impulso de tensión es cortado sobre el frente, el instante de corte es la intersección de una línea en paralelo al eje del tiempo que pasa a través de la máxima tensión con la línea C-D trazada mediante los puntos F y E los cuales están ubicados en la parte cortada de la curva de tensión al 70 % y 10 % del valor máximo, Figura 3.2.4.



$T_z = \text{Duración de la caída de tensión colapsada.}$

Fig. 3.2.4 Descarga disruptiva sobre el frente.

- k) El valor  $U_{\max}$  de un impulso de tensión completa tipo rayo cortado sobre la cola es el máximo valor de tensión de ensayo. Si las oscilaciones son superpuestas alrededor del pico con una frecuencia no menor de  $0.5 \text{ Mhz}$  o si la duración del sobreimpulso es inferior a  $1 \mu\text{s}$ , entonces podemos determinar el valor pico convencional ( $U_{ms}$ ) del impulso trazando una curva media de referencia como se representa en la figura 3.3 y la amplitud de esta característica libre de oscilaciones define el valor de la tensión de ensayo.

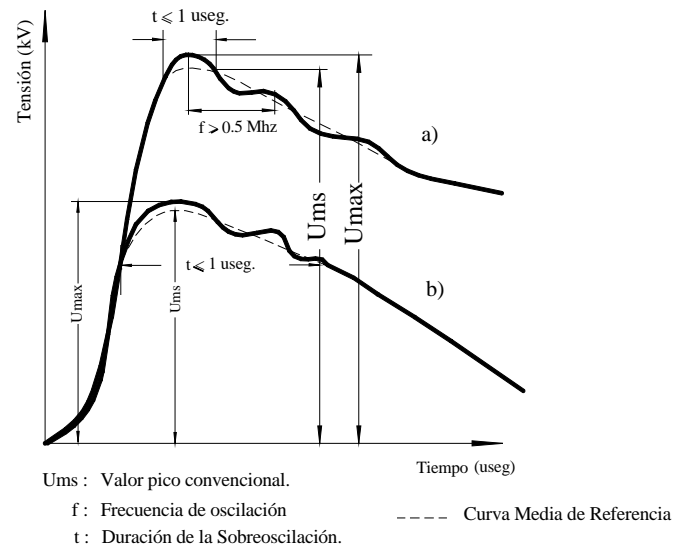


Fig. 3.3 a) Impulso con oscilaciones el cual la frecuencia es no menor que  $0.5 \text{ MHz}$ .  
 b) Impulso con un sobreimpulso el cual la duración es no mayor que  $1 \mu\text{s}$ .

### l) Tolerancias Normalizadas del Impulso de Tensión tipo Rayo

Cuando se prueba el aislamiento del objeto de acuerdo a la tensión de sostenimiento al impulso, aplicaremos las siguientes tolerancias para valores y forma de impulso de tensión plena especificado por la norma IEC publicación 60-2, 1962, Figura 3.4

Valor pico ( $U_{\max}$ ):	$\pm 3 \%$	=	$U_{\max} \pm 3 \%$ kV
Tiempo de frente ( $t_f$ ):	$1.2 \pm 30 \%$	=	$1.2 \pm 0.36 \mu\text{s}$ .
Tiempo de valor medio de la cola ( $t_c$ ):	$50 \mu\text{s} \pm 20 \%$	=	$50 \pm 10 \mu\text{s}$ .
Sobreoscilaciones		=	menor del $5 \%$



Las oscilaciones que están superpuestas alrededor del pico deben ser tales que la amplitud del pico de la primera alternancia sea menor de 5 % del valor pico, esto es:

$$\delta < 5 \% U_{\max}$$

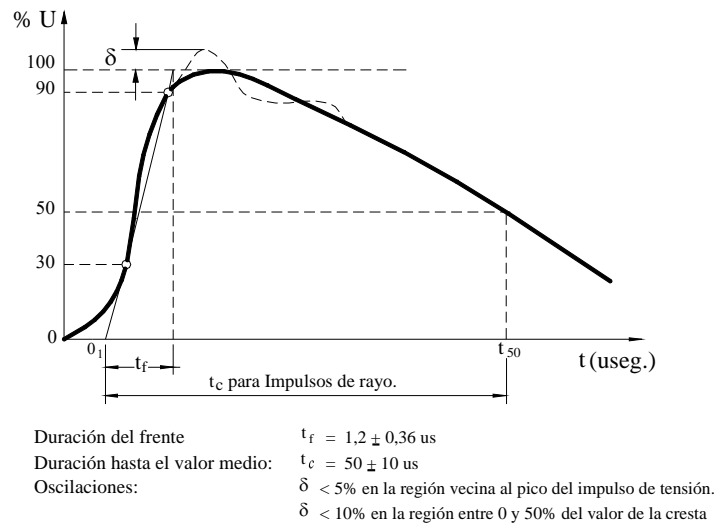


Fig. 3.4. Onda de Impulso IEC:60-2, tipo rayo 1.2/50  $\mu\text{seg.}$   
 Característica normalizada para pruebas de laboratorio

### 3.1.2. Perfiles Normalizados de Impulsos de Tensión de Maniobra <sup>39</sup>

#### a) Tiempo de cresta $t_{Cr}$ o tiempo de frente

Es el intervalo de tiempo que separa el origen real de la onda y el instante en que la tensión alcanza el valor máximo, Figura 3.5

#### b) Tiempo de valor medio $t_c$

Es el intervalo de tiempo entre el origen real y el instante sobre la cola de la onda en el cual la tensión decrece hasta la mitad ó 50% del valor cresta, Figura 3.5

#### c) Tiempo de cresta al 90% de la amplitud $t_d$

Es el intervalo de tiempo durante el cual la tensión es superior al 90% del valor cresta.

#### d) Impulso de Maniobra normalizado

Es un impulso que presenta un tiempo de cresta de 250  $\mu\text{s}$  y un tiempo de valor medio de 2500  $\mu\text{s}$ . Se denomina impulso 250/2500  $\mu\text{s}$ . Figura 3.5

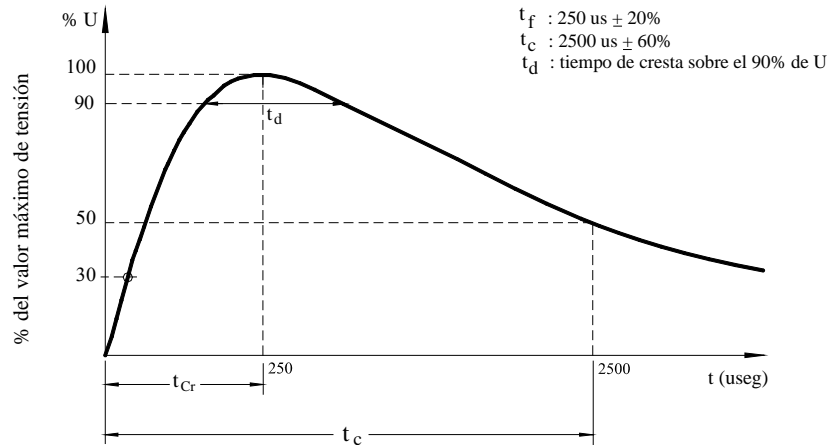


Fig. 3.5 Impulso de maniobra IEC: 60 - 2: 250/2500 useg.  
Característica normalizada para pruebas de laboratorio

#### e) Tolerancias Normalizadas del Impulso de Maniobra

De acuerdo a la norma IEEE Standard 4-1978, IEEE Standard Technique for High Voltage Testing o UNE 21 308 (III), especifica las siguientes tolerancias para tensiones de ensayo:

$$\text{Valor cresta } (V_{\max}): \quad \pm 3 \% \quad = \quad V_{\max} \pm 3 \% \text{ kV}$$

$$\text{Tiempo de cresta } (t_{Cr}): \quad 250 \mu\text{s} \pm 20 \% \quad = \quad 250 \pm 50 \mu\text{s}.$$

$$\text{Tiempo de valor medio de la cola } (t_c): \quad 2500 \mu\text{s} \pm 60 \% = \quad 2500 \pm 1500 \mu\text{s}.$$

Actualmente la necesidad de normalizar sobretensiones de maniobra es un gran problema debido a las variaciones en el tiempo de cresta<sup>28</sup> en 13.4 %. Los métodos existentes para normalizar ondas cortas, tales como 1.2/50, 1.5/40 y 1/50  $\mu\text{s}$ , no son aplicables para sobretensiones de tiempos de cola largas y es necesario efectuar un nuevo análisis.

### 3.1.3 Perfiles Normalizados de Impulso de Corriente

#### a) Impulso de Corriente

Es un transitorio de corriente aperiódico, unidireccional de corto tiempo, el cual crece rápidamente libre de oscilaciones hasta un valor máximo y después decrece a cero. Se considera 2 tipos de impulso de corriente: exponencial y rectangular, Figura 3.6.

#### 1. Impulso de Corriente Exponencial

Es un impulso de corriente el cual después de alcanzar el valor pico decrece a cero de manera casi exponencial, Figura 3.6.1

Se utilizan dos impulsos de corriente normalizados, uno tiene un tiempo de frente de  $8 \mu\text{s}$  y un tiempo de valor medio o de cola de  $20 \mu\text{s}$ . El otro tiene un tiempo de frente de  $4 \mu\text{s}$  y un tiempo de valor medio de  $10 \mu\text{s}$ . Estos son designados como “impulso de corriente  $8/20 \mu\text{s}$ ” e “impulso de corriente  $4/10 \mu\text{s}$ ”.

#### 2. Impulso de Corriente Rectangular

Es un impulso de corriente el cual después de alcanzar el valor pico permanece esencialmente casi constante para un especificado tiempo y luego decrece súbitamente a cero, Figura 3.6.2

Las más usuales tienen duraciones de 300, 500, 1000 ó 2000  $\mu\text{s}$ .

#### b) Valor pico $I_{\max}$ de un Impulso de Corriente

Es el máximo valor de corriente. Si alrededor del pico presenta oscilaciones entonces podemos determinar un valor pico convencional  $I_{ms}$  trazando una curva media de referencia a través de dichas oscilaciones. Por tanto este será el máximo valor de corriente de la onda el cual representará la característica original libre de oscilaciones.

#### c) Tiempo de Frente $T_f$ de un Impulso de Corriente

Es definida como 1.25 veces el intervalo de tiempo  $T$  que separa los instantes en que la corriente alcanza el 10% y el 90% de su valor pico ( ver puntos A y B en la figura 3.6). Si las oscilaciones están presentes sobre el frente, entonces los puntos A y B serán determinados por una curva media trazada a través de ellas.

**d) El origen convencional  $0_1$  de un Impulso de Corriente**

Es el punto sobre el eje del tiempo que dista en  $0.125T$  a partir del instante perteneciente al punto A (figura 3.6). Para nuestro caso, la intersección de la línea trazada a través los puntos A y B que están sobre el frente, con el eje del tiempo es considerada ser el origen  $0_1$

**e) Tiempo del Valor Medio  $T_c$  de un Impulso de Corriente tipo Exponencial**

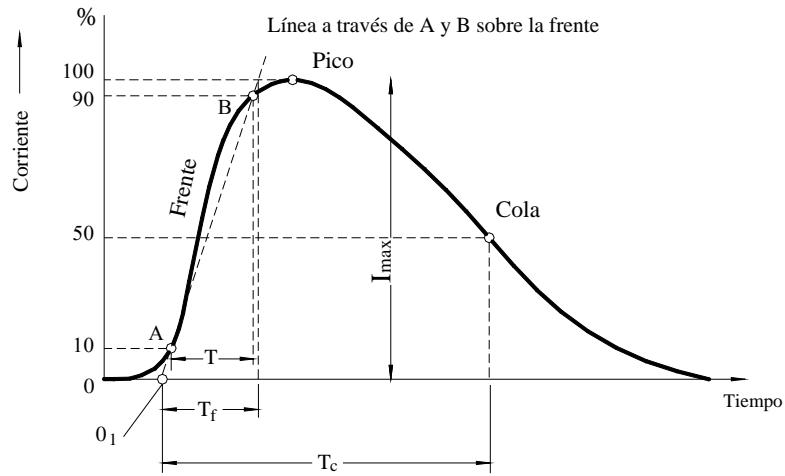
Es el intervalo de tiempo entre el origen  $0_1$  y el instante cuando la corriente sobre la cola ha decrecido hasta la mitad del valor pico, Figura 3.6.1

**f) Duración  $t_D$  de un Impulso de Corriente tipo Rectangular**

Es el intervalo de tiempo durante el cual la corriente es mayor del 90% de su valor pico.

**g) Tiempo de interrupción  $T_{ab}$  de un Impulso de Corriente Rectangular**

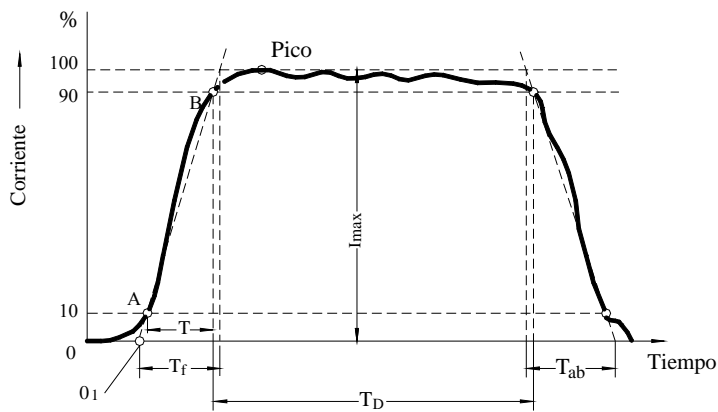
Es el intervalo de tiempo el cual la corriente decrece entre 0.9 hasta 0.1 veces del valor pico multiplicado por 1.25, Figura 3.6.2



$0_1$  = Origen convencional del impulso de corriente     $T_f$  = Tiempo de frente

$I_{max}$  = Valor pico real

$T_c$  = Tiempo del valor medio o de cola



$T_D$  Tiempo de duración     $T_f < 15\% T_D$

$T_{ab}$  Tiempo de interrupción     $T_{ab} < 25\% T_D$

Figura 3.6. Valores característicos de impulsos de corrientes

3.6.1 Impulso de corriente exponencial de 8/20 us ó 4/10 us

3.6.2 Impulso de corriente rectangular

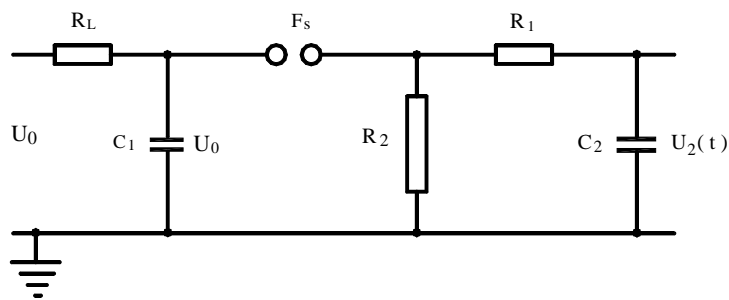
### 3.2 Generación de Impulsos de Tensión para propósitos de Prueba

Los impulsos de tensión son reproducidos en Laboratorio por los Generadores de Ondas de Tensión tipo “Marx”, con el objetivo de investigar y comprobar el sostenimiento de los aislamientos eléctricos frente a los impactos de Tensión de corta duración, de acuerdo a las tolerancias prescritas por la norma IEC 60-2, permitiendo

establecer que tan buena será la operación esperada de un equipo y manteniendo de esta manera el interés de la Ingeniería hacia la creación de productos más eficientes, de mejor calidad y desempeño.

### 3.3 Análisis del Circuito Marx

El circuito elemental de una etapa ideado por el Dr. Emil Marx en Alemania y usado comúnmente para generar Impulsos de Tensión, consiste en un Condensador de impulso  $C_1$  el cual es cargado inicialmente hasta su capacidad de tensión  $U_0$  por una fuente de tensión continua de entrada  $U_0$  a través de una resistencia de carga,  $R_L$  ver Figura 3.7.



- |  |   |
|--|---|
| $R_L$ : Resistencia de carga.                                | $C_1$ : Capacitancia serie o de impulso del Generador.  |
| $R_1$ : Resistencia de frente de la onda o de amortiguación. | $C_2$ : Capacitancia de carga (incluye la capacitancia del objeto de prueba, divisor de tensión, etc) |
| $R_2$ : Resistencia de cola de la onda o de descarga.        | $U_2(t)$ : Impulso de tensión generada  |
| $F_S$ : Explosor encargado de iniciar la descarga.           |   |

Fig. 3.7 Circuito básico tipo Marx que forma el Generador de Impulsos de una etapa

En el instante  $t = 0$ , el explosor  $F_S$  se ceba o se acciona (se considera al explosor como un interruptor), ya sea por acercamiento de las esferas a una distancia tal que se produzca la ruptura dieléctrica del aire, el cual es regulado a la tensión de prueba, de tal forma que el Condensador  $C_1$  va a descargarse sobre el circuito conformado por dos resistencias en paralelo ( $R_1, R_2$ ) y una capacitancia de carga  $C_2$  representativa del objeto bajo prueba, cuya carga está limitada por la resistencia del frente de onda o de amortiguación  $R_1$

Finalmente,  $C_2$  se descarga hacia tierra a través de  $R_1$  y de la resistencia de cola o de descarga  $R_2$ , resultando que la tensión en bornes de  $C_2$  crece inicialmente, pasa por un máximo y luego decrece lentamente hasta llegar a cero, obteniendo así a la salida una onda de impulso de tensión  $U_2(t)$  de forma doble exponencial expresada

por:

$$U_2(t) = \eta \left( e^{\frac{t}{t_1}} - e^{\frac{t}{t_2}} \right) n U_0 \quad (3.1)$$

donde:

$\eta$ : eficiencia o rendimiento del generador       $t_1$ : Constante de tiempo de cola

$n$ : número de etapas (para nuestro caso  $n=1$ )       $t_2$ : Constante del tiempo de frente

Durante el tiempo de carga del capacitor  $C_2$ , la constante de tiempo de frente ( $t_2$ ) es el tiempo que tarda en cargarse el capacitor  $C_2$  quedando sometido como máximo a la tensión  $U_0$  y la constante de tiempo de cola ( $t_1$ ) es el tiempo de descarga.

La capacitancia del objeto bajo prueba ( $C_2$ ) puede ser representada por ejemplo: Una cadena de aisladores o bushing del transformador o un interruptor más una capacitancia adicional compuesta por los cables y los dispositivos de medición (divisor de tensión, osciloscopio).

Las inductancias propias del conexionado y de los componentes del Generador de Impulso son despreciadas con la finalidad de evitar oscilaciones en la onda de impulso si es que se cumple la siguiente condición<sup>18</sup>:

$$R_1 > 2 \sqrt{L \left( \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right)}; \quad (3.2)$$

$L$  ( $\mu\text{H}$ ): inductancia equivalente del sistema;       $C_1, C_2$ :  $\mu\text{F}$ ;       $R_1$ : ohmios

Debido a que la tensión aumenta a razón de millones de voltios/ $\mu\text{s}$ , entonces la corriente que se forma en el circuito de impulso crece a razón de kA/ $\mu\text{s}$ .

Sin embargo, para mantener la mínima influencia de la inductancia y minimizar los errores de medición, el circuito de impulso de tensión deberá ser dispuesto tan compacto como sea posible.

### Cálculo de la tensión de salida $U_2(t)$ entregada en bornes del objeto de prueba

Busquemos la expresión de la tensión en función del tiempo en bornes de  $C_2$ , ignorando las inductancias de las conexiones a fin de simplificar los cálculos y suponiendo que la resistencia del arco a través del explosor es pequeña comparada con la resistencia de frente  $R_1$

El circuito denominado Marx o el equivalente de un generador de impulso de tensión de una etapa que se va a analizar será entonces:

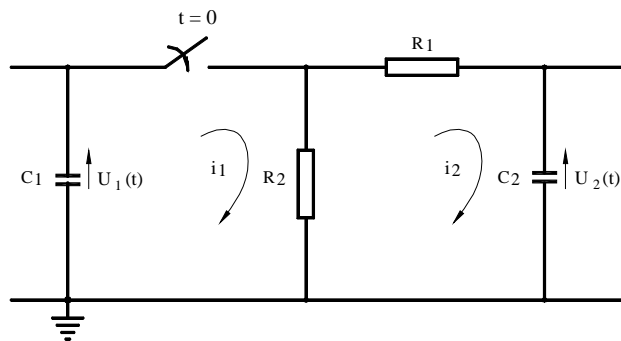


Figura 3.8  $U_1(t)$ : Tensión de entrada en escalón o tensión de carga.  
 $U_2(t)$ : Tensión de salida en forma de impulso.

Observamos que:

$$U_1(t) = \frac{1}{C_1} \int_{-\infty}^t i_1(t) dt = \frac{1}{C_1} \int_{-\infty}^0 i_1(t) dt + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = U_0 + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt \quad (3.3)$$

Donde  $U_0$  es la tensión inicial a través del capacitor  $C_1$  que puede representarse por una fuente de tensión continua.

Las ecuaciones de malla del circuito son las siguientes:

$$U_0 + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = R_1 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + U_2(t) = R_2 i_1(t) - R_2 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} \quad (3.4)$$

En donde se deduce que:

$$i_1(t) = \frac{U_2(t)}{R_2} + \frac{R_1 C_2}{R_2} \frac{dU_2(t)}{dt} + C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} \quad (\text{las 2 últimas})$$

$$-i_1(t) = R_1 C_1 C_2 \frac{d^2 U_2(t)}{dt^2} + C_1 \frac{dU_2(t)}{dt} \quad (\text{las 2 primeras por derivación})$$

Obteniendo así la ecuación diferencial para  $U_2(t)$  :



$$\frac{d^2 U_2(t)}{dt^2} + \left[ \frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] \frac{dU_2(t)}{dt} + \frac{U_2(t)}{R_1 R_2 C_1 C_2} = 0 \quad (3.5)$$

$$\text{Que es de la forma: } a_0 U_2^{(2)} + a_1 U_2^{(1)} + a_2 U_2 = 0 \quad (3.6)$$

Que es una ecuación lineal homogénea de 2do. orden con coeficientes constantes, ya que el circuito está constituido sólo de resistencias y Condensadores (se dice que es homogénea si el miembro derecho es igual a cero).

Consideremos la ecuación característica:

$$\lambda^2 + \left[ \frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] \lambda + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = 0 \quad (3.7)$$

Suponiendo que  $\lambda_1, \lambda_2$  son las raíces de la ecuación (3.7), los cuales son reales negativos y distintas. En este caso, el sistema fundamental de soluciones de la ecuación (3.6) tiene la forma doble exponencial:  $U_2(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}$ , en donde:

$$\lambda_{1,2} = \frac{- [R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2] \pm \sqrt{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2 - 4R_1 R_2 C_1 C_2}}{2R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$\text{Haciendo: } \lambda_{1,2} = -\frac{1}{t_{1,2}} \quad \text{y} \quad t_{1,2} = -\frac{1}{\lambda_{1,2}}$$

Se tiene que:

$$t_{1,2} = \frac{2R_1 R_2 C_1 C_2}{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2 \mp \sqrt{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2 - 4R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.8)$$

$$\text{De modo que: } \lambda_1 + \lambda_2 = -\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{R_2 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.9)$$

$$\lambda_1 \lambda_2 = \left( -\frac{1}{t_1} \right) \left( -\frac{1}{t_2} \right) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.10)$$

Por tanto la solución general puede ser escrita según la ecuación:

$$U_2(t) = Ae^{-\frac{t}{t_1}} + Be^{-\frac{t}{t_2}} \quad (3.11)$$

Donde  $U_2(t)$  es la caída de tensión en bornes de  $C_2$  y su característica es una onda de impulso unidireccional que se somete al objeto bajo prueba, siendo A, B las constantes arbitrarias y  $t_1, t_2$  son las constantes características que dependen de la forma de onda mencionadas anteriormente.

**Condición Inicial:**

Notemos que la tensión en los bornes del Condensador  $C_2$  no puede variar bruscamente, es decir cuando el explosor se acciona en  $t = 0^+$ , el Condensador  $C_2$  se comporta como un cortocircuito [ $U_2(0^+) = 0$ ] fluyendo el máximo de corriente de carga  $i_{C_2}(0^+)$  que disminuirá gradualmente hasta que el capacitor  $C_2$  haya alcanzado su carga completa es decir  $U_2(t = t_{\max}) = U_{\max}$

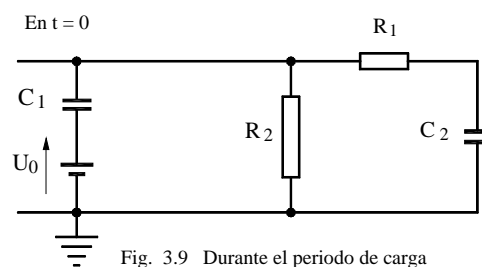


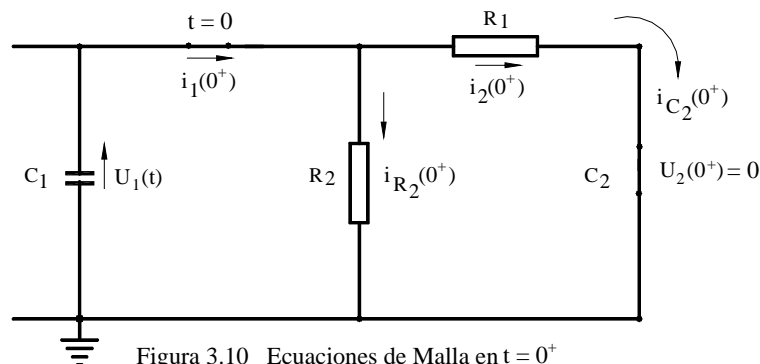
Fig. 3.9 Durante el periodo de carga

De las ecuaciones de malla sabemos que:

$$U_0 + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = R_2 i_1(t) - R_2 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} = R_2 i_1(t) - R_2 i_{C_2}(t)$$

$$\text{En } t = 0^+ : U_0 = R_2 i_1(0^+) - R_2 i_{C_2}(0^+) = R_2 [i_1(0^+) - i_{C_2}(0^+)] \Rightarrow \boxed{i_{R_2}(0^+) = \frac{U_0}{R_2}}$$

En  $t = 0^+$

Figura 3.10 Ecuaciones de Malla en  $t = 0^+$ 

$$\text{Por otro lado: } U_0 + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = R_1 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + U_2(t) = R_1 i_{C_2}(t) + U_2(t)$$

En  $t = 0^+$ :  $U_0 = R_1 i_{C_2}(0^+) + 0$  ;  $U_2(0^+) = 0$  ; La tensión es inicialmente cero a

través del capacitor  $C_2$ :  $\Rightarrow \boxed{i_{C_2}(0^+) = i_2(0^+) = \frac{U_0}{R_1}}$

Por tanto, si:  $U_2(0^+) = 0$ , entonces la ecuación (3.11) se establece que:  $B = -A$

Simplificando la expresión (3.11):  $U_2(t) = A \left[ e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right]$  (3.12)

Por otro lado:  $U_1(t) = R_1 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + U_2(t)$  (3.13)

Que expresa que la resistencia del explosor es nula.

Derivando (3.12) y reemplazando en (3.13) obtendremos:

$$R_1 C_2 A \left[ -\frac{1}{t_1} e^{-\frac{t}{t_1}} + \frac{1}{t_2} e^{-\frac{t}{t_2}} \right] + A \left[ e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right] - U_1 = 0$$

En el instante  $t = 0^+$ , obtenemos  $U_1 = U_0$  que es la tensión de encebamiento o disrupción del explosor  $F_s$ , lo cual hace que:

$$-U_0 + R_1 C_2 A \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad A = \frac{U_0}{R_1 C_2} \left( \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} \right)$$

Usando (3.10), resulta que:  $A = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1 - t_2}$  (3.14)

Finalmente, la expresión de la tensión en función del tiempo en bornes de  $C_2$  es:

En (3.12)  $U_2(t) = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left[ e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right]$  (3.15)

### **Cálculo de las Constantes de tiempo de Cola $t_1$ y de frente $t_2$**

A fin de determinar la forma del impulso el cual queremos reproducir, expresaremos las constantes de tiempo de frente ( $t_1$ ) y de cola ( $t_2$ ) en función de los elementos constitutivos del circuito, o sea de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  y  $C_2$

De la expresión (3.8), se tiene:

$$t_{1,2} = \frac{2R_1 R_2 C_1 C_2}{R_2 (C_1 + C_2) + R_1 C_2 \mp \sqrt{[R_2 (C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2 - 4R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$= \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{2R_1 R_2 C_1 C_2} \mp \sqrt{\frac{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2 - 4R_1 R_2 C_1 C_2}{4(R_1 R_2 C_1 C_2)^2}}}$$

$$t_{1,2} = \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{2R_1 R_2 C_1 C_2} \left[ 1 \mp \sqrt{1 - \frac{4R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2}} \right]}$$

Puesto que la onda de impulso de tensión presenta un frente de onda muy escarpado con respecto a la cola, es decir una de las constantes de tiempo debe ser pequeña en comparación con la otra, lo que implica que:

$$4R_1 R_2 C_1 C_2 \ll [R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2$$

$$\Rightarrow 0 < \frac{4R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2} \ll 1$$

Por aproximación al binomio de Newton, se cumple que:

$$\sqrt{1-x} \approx 1 - \frac{x}{2}, \quad \text{para} \quad 0 < x \ll 1$$

Entonces,

$$t_{1,2} = \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{2R_1 R_2 C_1 C_2} \left[ 1 \mp \left( 1 - \frac{2R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2} \right) \right]}$$

de donde:

$$t_1 = \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{2R_1 R_2 C_1 C_2} \left[ \frac{2R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2} \right]} = \frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{2R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$t_2 = \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{2R_1 R_2 C_1 C_2} \left[ 2 - \frac{2R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2]^2} \right]}$$

$$t_2 = \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} - \frac{1}{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}} \approx \frac{1}{\frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$t_2 \approx \frac{R_1 R_2 C_1 C_2}{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2}$$

En resumen las constantes de tiempo de cola  $t_1$  y de frente  $t_2$  son:

$$t_1 = R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2 \quad (3.16)$$

$$t_2 = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2}{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2} \quad (3.17)$$

Si admitimos que:  $C_2 \ll C_1$  y  $R_1 < R_2$ , con el fin de obtener una elevada eficiencia de tensión, se cumple que:

$$R_1 C_2 < R_2 C_2 \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \text{Como: } C_2 \ll C_1 &\Rightarrow 2C_2 \ll C_1 + C_2 \\ &\Rightarrow 2R_2 C_2 \ll R_2(C_1 + C_2) \end{aligned}$$

$$R_2 C_2 < 2R_2 C_2 \ll R_2(C_1 + C_2) \quad (3.19)$$

de (3.18) y (3.19) se deduce que:  $R_1 C_2 \ll R_2 C_1 < R_2(C_1 + C_2)$

Las expresiones (3.16) y (3.17) se simplifican y se convierten en:

$$t_1 \approx R_2 (C_1 + C_2) \quad (3.20)$$

$$t_2 \approx R_1 \left( \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right) \quad (3.21)$$

Observamos que la constante de tiempo de cola ( $t_1$ ) depende de la descarga de  $C_1$  y  $C_2$

Como  $C_1 \gg C_2$ , entonces  $t_1$  y  $t_2$  se pueden simplificar en:

$$t_1 \approx R_2 C_1 \quad (3.22)$$

$$t_2 \approx R_1 C_2 \quad (3.23)$$

Por tanto:  $t_1 \gg t_2$ , donde  $t_2$  es el tiempo que tarda en cargarse  $C_2$

Reemplazamos (3.20) y (3.21) en (3.15) y sabiendo que  $t_1 > t_2$  obtenemos:

$$U_2(t) \approx U_o \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \left[ e^{-\frac{t}{R_2(C_1+C_2)}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_1 C_2}} \right] \quad (3.24)$$

Simplificando la expresión  $U_2(t)$  cuando  $C_1 \gg C_2$ , resulta que:

$$U_2(t) = U_o \left[ e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right]$$

Que es la característica instantánea del impulso de tensión.

### **Cálculo de la expresión del Tiempo de frente $t_f$**

Nuestro análisis va enfocado durante el período de carga de  $C_2$ , según la norma IEC 60-2, la pendiente del frente de onda está caracterizada por la tangente trazada entre los puntos 0.3 y 0.9 de la magnitud unitaria de la cresta, Figura 3.11

De la expresión (3.24):

$$U_2(t) = U_0 \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \left[ e^{\frac{-t}{R_2(C_1 + C_2)}} - e^{-t \frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2}} \right] = v_1(t) - v_2(t)$$

$$= U_{\max} \left[ e^{\frac{-t}{t_1}} - e^{\frac{-t}{t_2}} \right] \quad (3.25)$$

Del gráfico:  $\text{tag} \alpha = \frac{0.9U_{\max} - 0.3U_{\max}}{t_{0.9} - t_{0.3}} = \frac{U_{\max}}{t_f}$  (3.26)

Simplificando:  $t_f = \frac{t_{0.9} - t_{0.3}}{0.9 - 0.3}$

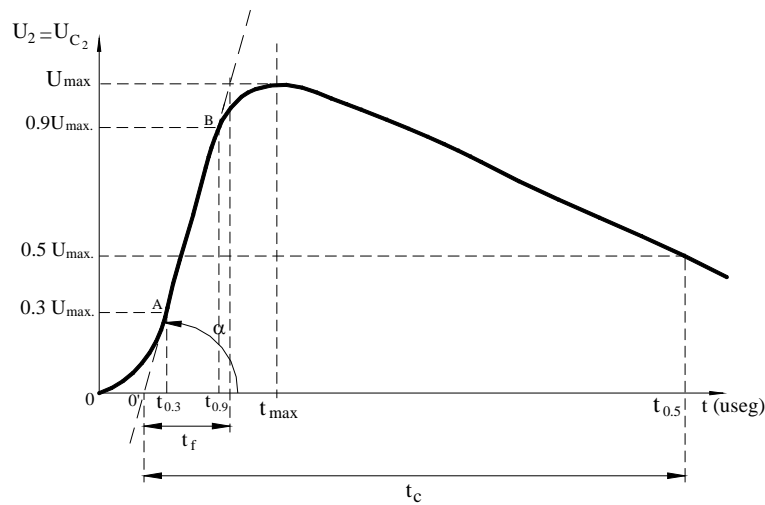


Figura 3.11 Onda de impulso normalizada 1.2 / 50 useg.

Para tiempos menores a  $t_f$ , esto es  $t \leq t_f$ , se tiene:

$$0 \leq t \leq t_f \ll t_1 \quad \Rightarrow \quad 0 \leq \frac{t}{t_1} \leq \frac{t_f}{t_1} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad -1 \ll -\frac{t_f}{t_1} \leq -\frac{t}{t_1} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad 0 < e^{-\frac{t}{t_1}} \leq 1$$

$$\Rightarrow \quad 0 < U_{\max} e^{-\frac{t}{t_1}} \leq U_{\max} \quad \Rightarrow \quad 0 < v_1(t) \leq U_{\max}$$

Siempre refiriéndonos a la onda normalizada, sabemos que los valores de  $\frac{1}{t_1}$  y  $t_f$

son relativamente muy pequeños con respecto a  $\frac{1}{t_2}$  y  $t_c$

Luego:  $v_1(t) = U_{\max} e^{-\frac{t}{t_1}} \approx U_{\max}$ , para  $0 \leq t \leq t_f \ll t_1$

$$v_2(t) = U_{\max} e^{-\frac{t}{t_2}}$$

Reemplazando las expresiones  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$  en (3.25), obtenemos:

$$U_2(t) = U_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{t_2}}) \quad (3.27)$$

Determinaremos los puntos de intersección de la recta  $\overline{AB}$  con la curva de la onda de impulso de tensión de la figura 3.11:

a) Para el punto A: Si,  $t = t_{0.3} = 0.3t_f \Rightarrow U_2(t_{0.3}) = 0.3U_{\max}$

En (3.27):  $0.3U_{\max} = U_{\max} (1 - e^{-\frac{t_{0.3}}{t_2}}) \Rightarrow e^{-\frac{t_{0.3}}{t_2}} = 0.7 \Rightarrow -\frac{t_{0.3}}{t_2} = \ln(0.7) \quad (3.28)$

b) Para el punto B: Si,  $t = t_{0.9} = 0.9t_f \Rightarrow U_2(t_{0.9}) = 0.9U_{\max}$

En (3.27):  $0.9U_{\max} = U_{\max} (1 - e^{-\frac{t_{0.9}}{t_2}}) \Rightarrow e^{-\frac{t_{0.9}}{t_2}} = 0.1 \Rightarrow -\frac{t_{0.9}}{t_2} = \ln(0.1) \quad (3.29)$

Reemplazando (3.28) y (3.29) en (3.26), obtenemos:  $t_f = \left( \frac{\ln 0.7 - \ln 0.1}{0.9 - 0.3} \right) t_2$

$$t_f = 3.2431 t_2 = \frac{2}{b} t_2 \quad (3.30)$$

Si  $t_f = 1.2 \mu\text{s}$ , entonces  $t_2 = 0.405 \mu\text{s}$ .

También podemos calcular el tiempo de frente  $t_f$  usando el método simplificado que considera la descomposición del circuito básico de impulso, de acuerdo a la figura 3.12

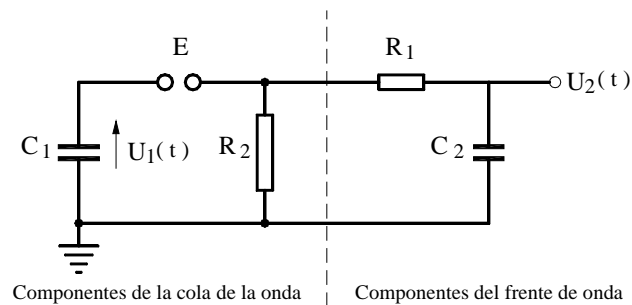


Figura 3.12

Para hallar el tiempo de frente consideramos que  $R_2$  tiene un pequeño efecto durante el periodo inicial del desarrollo de la onda o en el periodo de carga de  $C_2$ , debido que  $R_1 < R_2$  resultando el siguiente circuito:

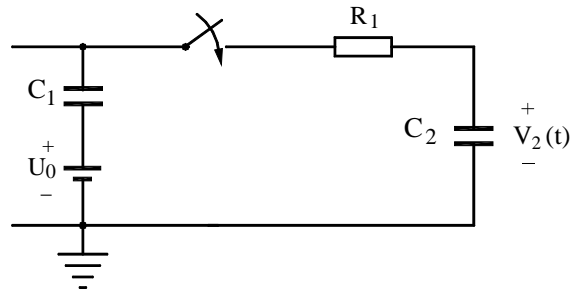


Figura 3.13 Circuito que gobierna el frente de la onda

Para determinar la tensión desarrollada en  $U_{C_2}$ , consideremos que  $C_2$  es inicialmente descargado, entonces al cerrar el interruptor la corriente  $i$  que fluye a través de  $C_2$ , así como de  $R_1$  es  $i(t) = C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt}$ , que es la corriente producida por la rapidez de cambio de la tensión a través del capacitor.

$$\text{Luego, } R_1 C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} + U_{C_2} = U_0 \Rightarrow \frac{dU_{C_2}(t)}{dt} + \frac{1}{R_1 C_2} U_{C_2}(t) = \frac{U_0}{R_1 C_2}$$

Que es la ecuación diferencial para la tensión a través del capacitor  $C_2$ .

Nos encontramos prácticamente en presencia de un circuito de primer orden, caracterizado por la constante del tiempo de frente  $t_2$ , dado en (3.21) y (3.23):

$$t_2 = \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx R_1 C_2 \quad ; \quad C_1 \gg C_2$$

Resolvamos la ecuación diferencial lineal no homogénea de primer orden con coeficientes constantes con las siguientes condiciones iniciales:  $U_{C_2}(0) = 0$ ;

$$i_{C_2}(0) = C_2 \frac{dU_{C_2}(0)}{dt} = 0$$

Aplicando Laplace:

$$L\left[U'_{C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} U_{C_2}\right] = L\left[\frac{U_0}{R_1 C_2}\right] \Rightarrow L[U_{C_2}] = U_0 \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_2}} \right]$$

aplicando transformada inversa de Laplace, resulta:

$$U_{C_2}(t) = U_0 \left[ 1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right]; \quad C_1 \gg C_2$$



Mientras más grande sea el valor de  $R_1 C_2$ , la tensión disminuirá lentamente, ya que una  $R_1$  mayor reduce la corriente y de esta manera disminuye la variación de la tensión en el capacitor  $C_2$ . Por otro lado un  $C_2$  grande puede contener más carga y en consecuencia la corriente de carga fluye durante más tiempo para lograr un cambio dado en la tensión.

### Cálculo de la expresión del Tiempo de Cola $t_c$

Para nuestro análisis la componente  $v_1(t) = U_o e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$  representa la tensión que acompañará a la onda en toda su extensión, de tal forma que su expresión durante el tiempo de cola es  $U_2(t)$

Para el tiempo de cola  $t_c$  se determinará suponiendo que  $t \gg t_{\max}$

Se tiene  $v_2(t) = U_{\max} e^{-\frac{t}{t_2}} = U_{\max} e^{-t \frac{C_1 + C_2}{R_1 \cdot C_1 \cdot C_2}} = U_{\max} e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}$ ; asumiendo que  $C_1 \gg C_2$

El tiempo  $t$  ( $\mu\text{s}$ ) es de valor relativamente grande respecto al valor de  $t_2 = R_1 C_2$ , asumiendo que la cola de la onda tiene una duración de  $t \geq 50 \mu\text{s}$ , entonces:

$$e^{-\frac{t}{t_2}} = e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \approx 0, t \gg t_2$$

ejemplo:  $e^{-10} \approx 4.5 \cdot 10^{-5} \approx 0$

Luego en (3.25):  $U_2(t) = v_1(t) - v_2(t) = U_{\max} \left[ e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right] = U_{\max} \left[ e^{-\frac{t}{t_1}} - 0 \right]$

Por tanto:  $U_2(t) = U_{\max} e^{-\frac{t}{t_1}}$ ;  $t > t_{\max}$

Por definición de la norma, se debe cumplir para el tiempo de cola  $t_c$ :

$$\frac{U_2(t_c)}{U_{\max}} = 0.5, t = t_c$$

de modo que:  $\frac{U_2(t_c)}{U_{\max}} = 0.5 = e^{-\frac{t_c}{t_1}}$ , para  $t = t_{0.5} = t_c$

Tomando logaritmo neperiano a ambos miembros:  $t_c = t_1 \text{Ln } 2$

Obtenemos finalmente la expresión del tiempo de cola:  $t_c \approx 0.693 t_1 = \frac{1}{a} t_1$  (3.31)

Si  $t_c = 50 \mu\text{s}$ , entonces  $t_1 = 72.13 \mu\text{s}$ .

También podemos calcular el tiempo de cola de acuerdo al método simplificado:

La ley de la tensión en los bornes de  $R_2$  para el circuito de primer orden siguiente, se caracteriza por la constante de tiempo de cola  $t_1 = R_2(C_1 + C_2) \approx R_2C_1$ ;  $C_1 \gg C_2$

Si el condensador  $C_1$  está inicialmente cargado, al cerrar el interruptor se descargará

mediante la ecuación siguiente:  $v_1(t) = U_{\max} e^{-\frac{t}{t_1}}$ , que representa la tensión que acompañará a la onda en toda su extensión.

El valor de la tensión de descarga cuando el tiempo de cola es  $t_c$  es:  $v_1(t_c) = 0.5U_{\max}$

Entonces: 
$$\frac{v_1(t_c)}{U_{\max}} = 0.5 = e^{-\frac{t_c}{t_1}} = e^{-\frac{t_c}{R_2C_1}}$$

Tomando logaritmo neperiano a ambos miembros, obtenemos:

$$t_c = R_2C_1 \ln 2 = 0.693 R_2C_1$$

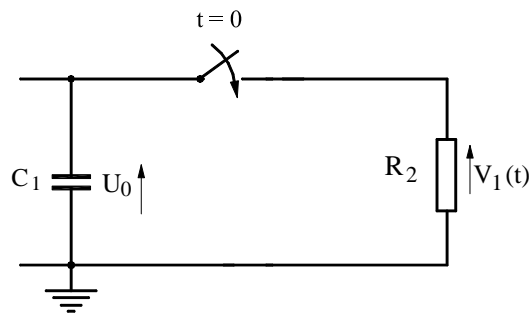


Figura 3.14 Circuito que gobierna la cola de la onda

Deducimos que a medida se descarga el capacitor  $C_1$ , la energía disipada en la resistencia  $R_2$  es igual a la energía que se tenía almacenada inicialmente la capacitancia.

En resumen, luego de producirse la descarga de  $C_1$  a través de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , la tensión  $U_0$  va disminuyendo en forma exponencial a través de dos trayectorias ( $v_1(t), v_2(t)$ ), mostradas en la figura 3.15

Al comparar la descarga a través de  $R_2$  es más lenta que a través de  $R_1$  (puesto que  $R_1 < R_2$ ), por tanto la constante de tiempo del circuito  $R_2$  es siempre mayor que  $R_1$  es decir  $t_1 \gg t_2$ , la caída de tensión a través de  $R_2$  está dado por:  $v_1(t) = U_0 e^{-\frac{t}{R_2C_1}}$  y a

través de  $R_1$  está dado por  $v_2(t) = U_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}$ , donde  $t_1 = R_2 C_1$  y  $t_2 = R_1 C_2$  son las constantes de tiempo de cola y frente respectivamente.

La descarga de  $U_0$  a través de  $R_1$  carga al capacitor del objeto de prueba ( $C_2$ ) y por lo tanto  $t_2$  será la constante de tiempo de carga de  $C_2$ .

El fenómeno transitorio obtenido es, observando que la tensión a través de la carga no es hecha en la misma forma como  $v_2(t) = U_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}$  como se podía esperar sino es retardada debido a la caída de tensión a través de  $R_2$  y por lo tanto la tensión  $U_2(t)$  desarrollada a través de la carga en cualquier instante estará dada por:

$$U_2(t) = U_0 \left[ e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right]$$

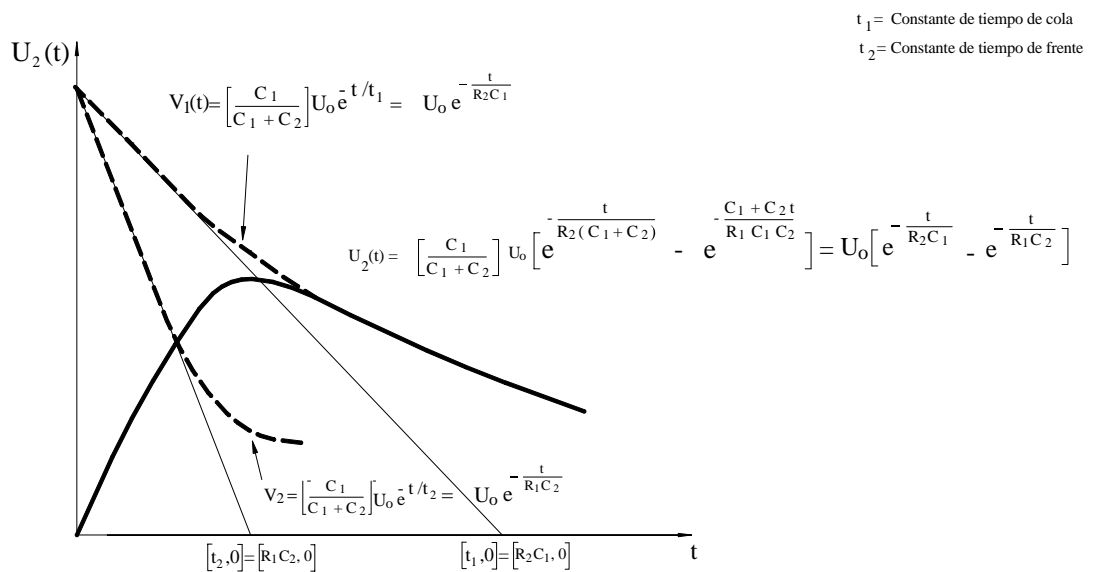
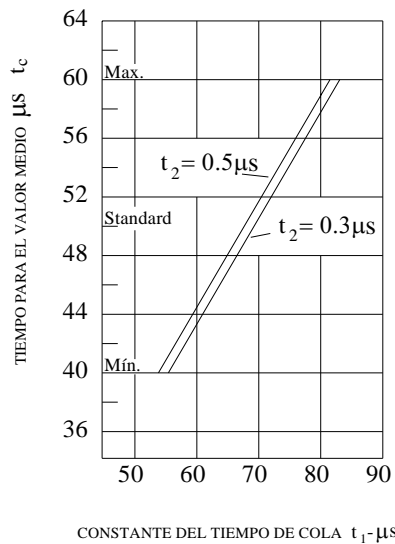


Fig. 3.15 Construcción gráfica de la Onda de Impulso de Tensión deducido matemáticamente.

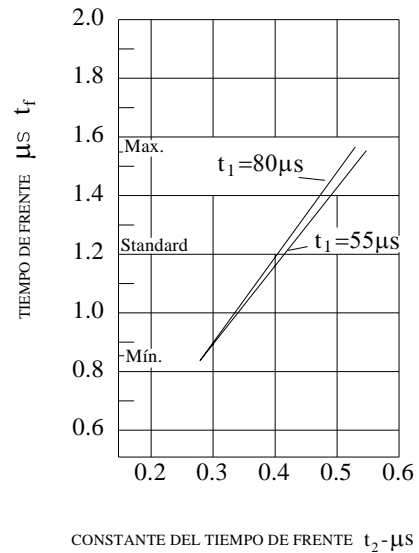
Según la norma IEC 60-2, para el impulso normalizado 1.2/50  $\mu\text{s}$  se tiene que  $t_1 = 68.5 \mu\text{s}$  y  $t_2 = 0.405 \mu\text{s}$ . Las tolerancias normalizadas de este impulso es  $\pm 20 \%$  para el tiempo del valor medio y  $\pm 30 \%$  para el tiempo de frente.

Esto da un rango aproximado para:  $55 \leq t_1 \leq 80 \mu\text{s}$ ,  $0.3 \leq t_2 \leq 0.5 \mu\text{s}$

En la figura 3.16.1 se muestra el tiempo del valor medio para un  $t_1$  dado y la figura 3.16.2 muestran los tiempos de frente para un  $t_2$  dado. En resumen, la variación del tiempo para el valor medio para un rango utilizable de  $t_2$  es mostrado en el gráfico, así como la variación del tiempo de frente para el rango utilizable de  $t_1$



(3.16.1)



(3.16.2)

Fig. 3.16 Relación entre las Constantes de tiempo de cola y de frente  $t_1$  ,  $t_2$

Podemos calcular los valores característicos de las constantes del tiempo de frente y cola basado en ecuaciones aproximadas usando los elementos del circuito de impulso.

**Cálculo del tiempo  $t_{max}$  en que la onda de impulso de Tensión alcanza el valor máximo**

Busquemos la expresión de  $t_{max}$  para el cual  $U_2(t)$  es máximo, valor que satisface pues a:

$$\frac{dU_2(t)}{dt} = 0$$

Derivando la expresión (3.15),

$$\left[ \frac{dU_2(t)}{dt} \right]_{t=t_{max}} = \frac{U_o R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left( - \frac{1}{t_1} e^{-\frac{t_{max}}{t_1}} + \frac{1}{t_2} e^{-\frac{t_{max}}{t_2}} \right) = 0$$

$$\frac{1}{t_1} e^{-\frac{t_{\max}}{t_1}} = \frac{1}{t_2} e^{-\frac{t_{\max}}{t_2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{t_{\max}}{t_2} - \frac{t_{\max}}{t_1}}$$

$$\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) = t_{\max} \left( \frac{t_1 - t_2}{t_1 t_2} \right)$$

De donde, 
$$t_{\max} = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \quad (3.32)$$

Reemplazamos (3.20) y (3.21) en (3.25), obtenemos en función de los parámetros del circuito:

$$t_{\max} \approx R_1 \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \ln \left[ \frac{R_2}{R_1} \frac{(C_1 + C_2)^2}{C_1 C_2} \right] \quad (3.33)$$

### Cálculo del máximo valor de la Onda de Impulso de Tensión

Una vez que el capacitor  $C_2$  a sido cargado al máximo potencial es decir:

$U_2(t_{\max}) = U_{\max}$ , la energía almacenada será descargada a través de  $R_1$  y  $R_2$ .

Busquemos dicha expresión  $U_{\max}$

El valor máximo de  $U_2(t)$  será cuando  $t = t_{\max}$ , reemplazando este valor en (3.15) se tiene.

$$\begin{aligned} U_{\max} = U_2(t_{\max}) &= \frac{U_o R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left[ e^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} - e^{-\frac{t_1}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \right] \\ &= \frac{U_o R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left[ \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-\frac{t_1}{t_1 - t_2}} \right] \\ &= \frac{U_o R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} \left[ 1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-\frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_2}} \right] \\ &= \frac{U_o R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} \left[ 1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-1} \right] \end{aligned}$$

$$U_{\max} = \frac{U_o R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} \quad (3.34)$$

Puesto que  $t_1 \gg t_2$ , entonces:  $\frac{t_1}{t_2} \gg 1 \Rightarrow \frac{t_1}{t_2} - 1 \gg 0$ .

Por tanto: 
$$\left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{1}{\frac{t_1}{t_2} - 1}} \approx 1$$

Para una relación  $\frac{t_1}{t_2} = 200$  el error es 3 %.

Considerando que  $t_1 \gg t_2$ , reemplazamos (3.20) y (3.21) en (3.34), obtenemos:

$$U_{\max} = U_o \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \quad (3.35)$$

El material dieléctrico utilizado en el capacitor  $C_2$  solo puede resistir cierta tensión si se sobrepasa se producirá calentamiento y arco.

### Cálculo de la Eficiencia de Tensión $\eta$ o Coeficiente de Utilización

Una vez que las constantes de tiempo han sido determinadas el siguiente paso es calcular la eficiencia de tensión del Generador.

La eficiencia del circuito está definida como la razón entre el máximo valor del impulso de tensión que recibe el objeto bajo prueba  $C_2$  y la tensión de entrada  $U_o$  en DC del Condensador  $C_1$  por el número de etapas “ $n$ ” (para nuestro análisis  $n=1$ ):

Esto es: 
$$\eta = \frac{U_{\max}}{U_o}$$

$$\eta = R_2 C_1 f(t_1, t_2)$$

$$\eta = \frac{R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left[ e^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} - e^{-\frac{t_1}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \right] = R_2 C_1 \left[ \left( \frac{1}{t_1 - t_2} \right) \left( e^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} - e^{-\frac{t_1}{t_1 - t_2} \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \right) \right]$$

El primer factor de la eficiencia depende del circuito generador y el segundo factor da la forma de la eficiencia y depende de  $t_1/t_2$  y es independiente del circuito generador.

$$\eta = \frac{R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left[ \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} - \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_1}{t_1 - t_2}} \right] = \frac{R_2 C_1}{t_1 - t_2} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} \left[ 1 - \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_2}} \right]$$

$$\eta = \frac{R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} \quad (3.36)$$

Puesto que  $t_1 \gg t_2$ , entonces:  $\frac{t_1}{t_2} \gg 1 \Rightarrow \frac{t_1}{t_2} - 1 \gg 0$ .

Entonces: 
$$\left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{1}{\frac{t_1}{t_2} - 1}} \approx 1$$

Por tanto: 
$$\eta = \frac{R_2 C_1}{t_1}$$

Como  $t_1 \approx R_2(C_1 + C_2)$  cuando  $C_1 \gg C_2$ , a fin de obtener una óptima eficiencia la

expresión se simplifica en: 
$$\eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3.37)$$

Con estas aproximaciones, la eficiencia es independiente de  $R_1$  y  $R_2$ , lo cual es necesario mantener tan pequeño como sea posible, el mismo es alcanzado cuando  $C_2$  es la capacidad del objeto a probar.

Esta eficiencia de tensión debería ser alto para obtener el máximo impulso de tensión con un banco de Condensadores  $C_1$ . Incrementando la energía del Generador de Impulso se estará aumentando su eficiencia.

La eficiencia es siempre menor que 1 y su forma depende de la máxima diferencia entre los 2 exponenciales y su expresión está relacionado con  $t_1 / t_2$  tal como se muestra en la figura 3.17

Puesto que:  $t_1 = R_2(C_1 + C_2)$  y  $C_2 \ll C_1 \Rightarrow t_1 = R_2 C_1$

Luego la ecuación (3.36), se convierte en: 
$$\eta = \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} \quad (3.38)$$

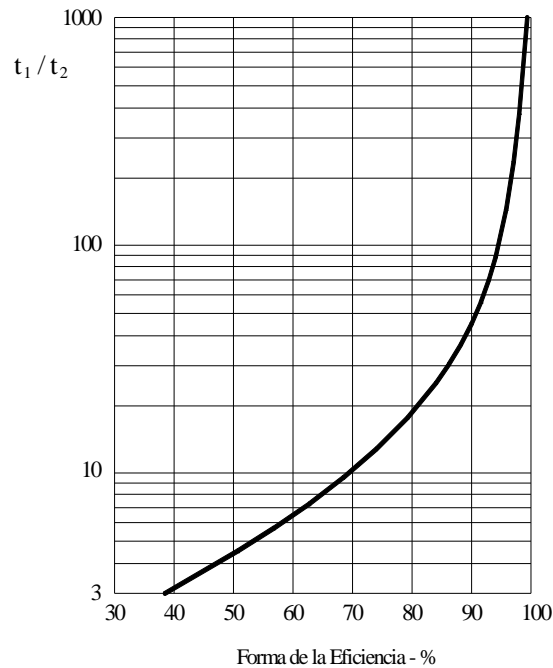


Fig. 3.17 Forma de la Eficiencia para una doble exponencial.

### 3.4 Sistema de Generación de Impulso de Tensión

El propósito es intentar describir en detalle todos los aspectos de un sistema de generación de Impulso de Tensión. Cada componente de la instalación de pruebas ha sido separado a fin de explicar totalmente sus funciones de trabajo.

#### 3.4.1 Fuente de Alimentación del Generador de Impulso de Tensión

La fuente de alimentación de la instalación de impulso consiste principalmente de una unidad de carga con tensión ajustable.

La potencia de salida de la unidad de carga (transformador de aislamiento) es baja y se conecta al equipo rectificador por medio de un transformador de regulación de tensión, figura 3.18

Los rectificadores de Alta Tensión requieren regulación de tensión por medio de un transformador alimentado desde el suministro de baja tensión.

#### a) Transformador 1 $\phi$ de Aislamiento



Se dispone como un acoplamiento de la instalación de pruebas de impulso con la red de alimentación exterior de 220 ó 440 voltios, 3 $\phi$  y su potencia puede variar de 1 a 25 kVA.

Su función principal es impedir el tránsito de los impulsos transitorios generados en la instalación de pruebas hacia la red exterior, Figura 3.18

#### **b) Transformador 1 $\phi$ de Regulación**

Su función es permitir la selección ya sea manualmente o automáticamente al operador del valor de la tensión a suministrar al equipo rectificador. La tensión de salida del transformador debe ser ajustable entre cero y su tensión nominal, Figura 3.18

Los diseños más usuales tienen potencias nominales de 50, 100, 150, 200, 250, 300 y 400 kVA.

#### **c) Equipo Rectificador de carga**

Se alimenta a través del transformador 1 $\phi$  de aislamiento y una unidad de regulación con tensión ajustable al valor deseado (por ejemplo hasta 200 kV) y su función es cargar a los condensadores de impulso ( $C_1$ ) del Generador con una tensión continua de valor  $U_0$ .

El equipo rectificador consiste de un transformador 1 $\phi$  de Alta Tensión, diodos de Silicio y una resistencia de medición, Figura 3.18

Todos los componentes son calibrados para soportar duras condiciones transitorias encontradas durante las descargas por impulso.

- **Transformador 1 $\phi$  elevador para el rectificador**

Su función es permitir la obtención de la tensión necesaria para alimentar de manera conveniente a los diodos rectificadores, Figura 3.18

- **Diodos de Silicio**

Puede estar conectado como un circuito de media u onda completa.

- **Resistencia para la medición de la tensión de carga**

Se dispone a la salida de los diodos rectificadores y su función es evaluar la magnitud de la tensión continua de salida del bloque rectificador, reduciéndolo fielmente a baja tensión, que permite ser leído por un instrumento instalado en el pupitre de mando y control, Figura 3.18

#### SISTEMA DE CARGA DEL GENERADOR DE IMPULSO DE TENSIÓN

1. Transformador de aislamiento.
2. Transformador regulador de tensión
3. Transformador para el rectificador.
4. Diodos de Silicio.
5. Resistencia de medida para la tensión de carga.
17. Mesa de Control.

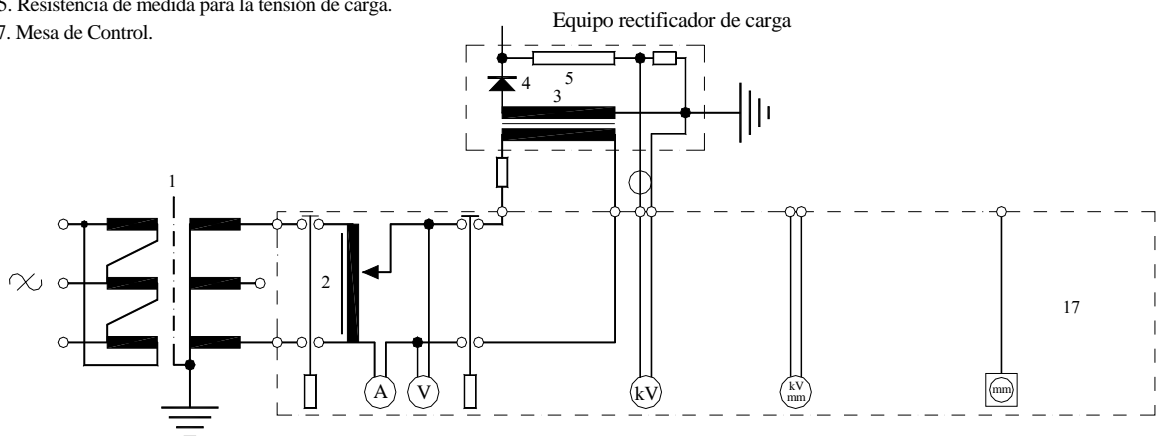


Figura 3.18 Sistema de alimentación del generador de impulso de tensión

#### 3.4.2 Generador de Impulsos de Tensión tipo Marx

Es un circuito múltiple ordenado y se compone de un conjunto de resistencias ( $R_1, R_2$ ) que controlan la forma del frente y la cola de la onda, explosores ( $F_S$ ) (son esferas acopladas con espaciado ajustable  $S$  y se considera al explosor como un interruptor) y condensadores de impulsos ( $C_1$ ).

El circuito de la figura 3.19 se compone de 4 etapas, cada etapa soporta un condensador de impulso y se conecta en paralelo con el explosor  $F_S$  y las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ .

Los condensadores  $C_1$  de cada etapa son cargados en paralelo a través de las resistencias de carga ( $R_L$ ) de manera que al final del período de carga los puntos indicados A, B, C, D estarán al potencial  $(+U_0)$  respecto a E, F, G, H que están al potencial de Tierra, ( $U = 0$ ); La separación de los explosores se ajusta según la norma IEC-52 de acuerdo a las necesidades de la tensión de salida.

6. Unidad de disparo, capacitor de acoplamiento y esfera activada para el disparo electrónico del Generador de impulso.
7. Motor para el control del espaciamiento de los explosores acoplados
8. Generador de impulso.
  - $R_L$ = resistores de carga.
  - $R_1$ = resistores de frente.
  - $R_2$ = resistores de cola.
  - $R_e$ = resistores de descarga.
  - $C_1$ = capacitores de impulso.
  - $F_s$ = esferas acopladas con ajuste de distancia.
9. Dispositivo aterrado con cierre por resorte en caso de falla

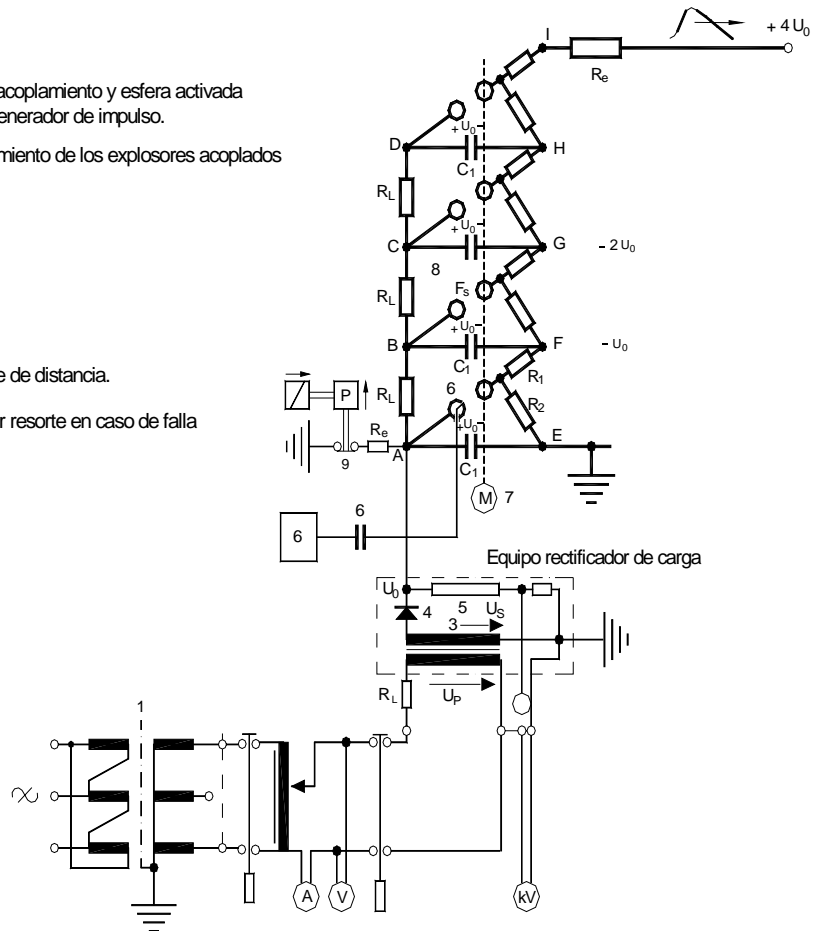


Fig. 3.19 Sistema de Generación de impulsos de Tensión de 4 etapas.

Cuando el nivel de carga apropiado ha sido alcanzado (al llegar la tensión al valor de la tensión disruptiva de los explosores para la cual se ha ajustado el espacio disruptivo (S), se produce la conmutación serie de los condensadores ( $C_1$ ), se activa la unidad del disparo de la primera etapa mediante un “pulso” disparado hacia el primer juego de explosores ( $F_s$ ) de tal forma que al ionizar el aire de la brecha se produce la descarga entre esferas, siendo la carga del primer condensador  $C_1$

transferida a la siguiente etapa a través de la resistencia  $R_1$ . (para nuestro caso  $R_1 < R_2$ ).

La descarga iniciada entre los explosores A-F, hace que los puntos F, G, H, I se cargen al potencial  $(-U_0)$  siendo sostenidas por las Resistencias  $R_2$  y  $R_1$ .

En ese instante el punto B que continúa en  $(+U_0)$  sostenida por resistencia de carga ( $R_L$ ), produce en el Explosor B-G un potencial  $(+U_0) - (-U_0) = 2U_0$  que inmediatamente produce la descarga entre sus esferas del explosor poniendo en serie los dos  $C_1$  (de la primera y de la segunda etapa), transfiriendo la carga a la tercera etapa; en dicho instante el punto C continúa al potencial  $(+U_0)$  sostenido por  $R_L$ , mientras que los puntos G, H, I estarán cargados al potencial  $(-2U_0)$ , estableciéndose entre los Explosores C-H un potencial  $(+U_0) - (-2U_0) = 3U_0$  produciéndose de ese modo, en las etapas siguientes la suma de las tensiones a las cuales los condensadores  $C_1$  fueron cargados, con lo que se consigue multiplicar (por el número de etapas) la tensión de carga, obteniendo a la salida del Generador de Impulsos en este caso, una Tensión “4” veces la Tensión de Carga, Figura 3.20

Los módulos del generador de impulso que se fabrican son de 20 o más etapas y las tensiones alcanzan hasta 200 kV dispuestas en etapas. Las dimensiones de un generador de impulso para 300 kV y 64 kJ son de aproximadamente 3x3 m de base por 11 m de altura, las dimensiones (mínimas) del local de prueba es aproximadamente 14 x 16 m de base y 17 m de altura.

Se requiere mucho espacio para tener las distancias de aislamiento en el aire. Constructivamente el local debe tener una buena Red de Puesta a tierra en el piso, paredes y techo con jaula de Faraday para evitar que las interferencias externas perturben las mediciones, así como para evitar descargas en las instalaciones adyacentes.

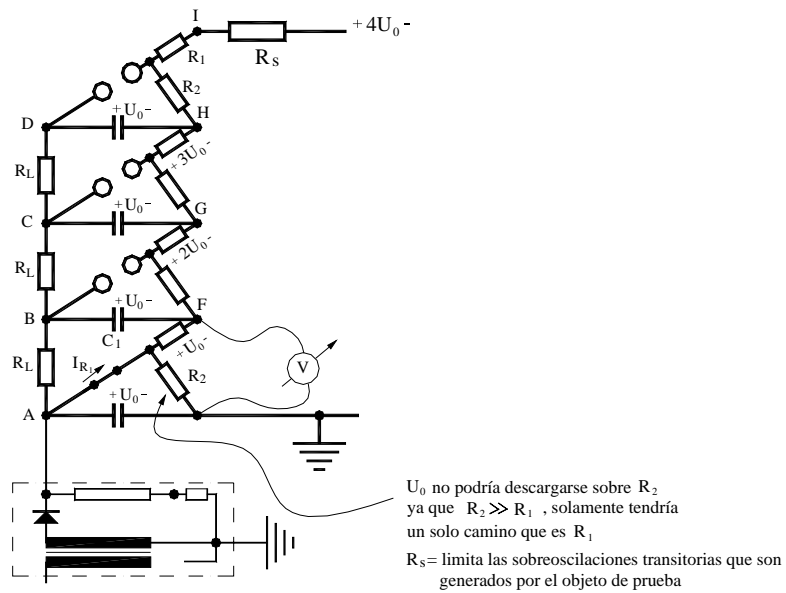


Figura 3.20 El proceso de carga y descarga de los condensadores de impulso

Este tipo de sistema de conexionado del Generador de Impulso se caracteriza primordialmente de que:

- a) El tiempo de carga del condensador de Impulso depende de la constante  $\tau = R_L C_1$
- b) La tensión final resultante de descarga en el objeto de prueba que se obtiene es de la misma polaridad que de la fuente de alimentación del generador de impulso..
- c) El circuito equivalente del Generador de impulso de n etapas se muestra en la Figura 3.21

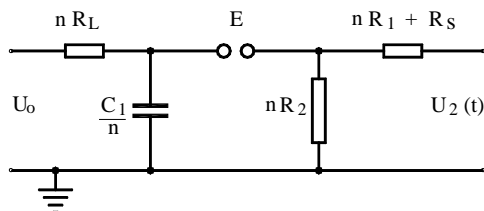


Fig. 3.21 Circuito Equivalente del generador de impulso de n etapas

• Resistencia de Carga

Las resistencias de carga  $R_L$  que limitan la corriente inicial de carga, son de valor suficientemente alto como para asegurar que ningún flujo de corriente circule por ellas durante la descarga.

Una corriente típica de carga deberá estar entre 50 y 100 mA. Los resistores de carga también proporcionan una corriente que mantiene el arco vivo en el espacio del explosor, entre 5-10 amperios a través de la brecha (S).

- **Capacitores de Impulso  $C_1$**

Es la capacitancia serie del circuito multiplicador Marx, constituye el componente más refinado y más costoso del equipo, la capacidad de estos condensadores y su tensión de servicio definen la energía (en kilojoule) de una instalación de impulsos.

- **Capacitancia de carga  $C_2$**

Es la capacitancia del objeto de prueba más un capacitor adicional, compuesto por la capacitancia de los cables de A.T. y dispositivos de medida.

- **Inductancia (L) del circuito de Impulso**

Es esencialmente producido por el lazo de corriente formado por el circuito de impulso (incluyendo la autoinductancia propia del generador). Frecuentemente no podemos despreciarlo debido a las grandes dimensiones que tiene los circuitos de impulso de tensión.

- **Resistencia de Cola**

Para ondas normalizadas 1.2/50  $\mu$ s, son hechos de conductores de NiCr de baja inductancia enrollados en tubos de resina con fibras de vidrio, de temperatura clase H y su valor está entre 2 a 10 k $\Omega$ .

- **Explosores o descargadores de conexión ( $F_S$ )**

Los Explosores son esferas de cobre montadas estructuralmente y eléctricamente aisladas sobre dos columnas una fija y otra móvil. Con la parte móvil podemos

ajustar la distancia de separación del conjunto de Explosores por medio de un motor de acuerdo a las condiciones atmosféricas.

El diámetro de las esferas debe ser tal que la distancia entre las mismas nunca exceda de 0.75 el valor de dicho diámetro, ya que de otro modo la exactitud de la medida será insuficiente y la diferencia entre los resultados de las pruebas con ondas de polaridades (+) y (-) diferirán en gran magnitud.

### **3.4.3 Sistema de Disparo “Trigatron”.**

Es un dispositivo que hace posible disparar correctamente al generador a una tensión de carga preseleccionada en el momento deseado, permitiendo producir a voluntad la descarga en el primer Explosor arrastrando sucesivamente las descargas en todos los demás Explosores de las Etapas siguientes, provocando de esta manera la descarga del generador de impulso sobre el objeto de prueba.

Es decir después que los condensadores  $C_1$  del Generador han sido cargados a una Tensión ( $U_0$ ) y el espacio entre Explosores ajustado de acuerdo a la Tensión requerida, se pulsa el botón de disparo del circuito de control de pulsos que es un dispositivo de precisión electrónico que genera la señal de disparo (descarga de un capacitor de disparo hacia el transformador de pulso, elevando la tensión el cual transmite el impulso de disparo hacia el electrodo de disparo del explosor de la primera etapa produciendo entonces la ionización parcial del espacio en el primer explosor, provocando el disparo y el de todas las etapas<sup>21</sup>), con lo cual el Generador de Ondas de Impulsos habrá funcionado entregando a la salida la Tensión “ $nU_0$ ”,

Figura 3.22

El rango que opera el mecanismo de disparo está entre (5 -100 %) de la tensión de carga y es independientemente de ella.

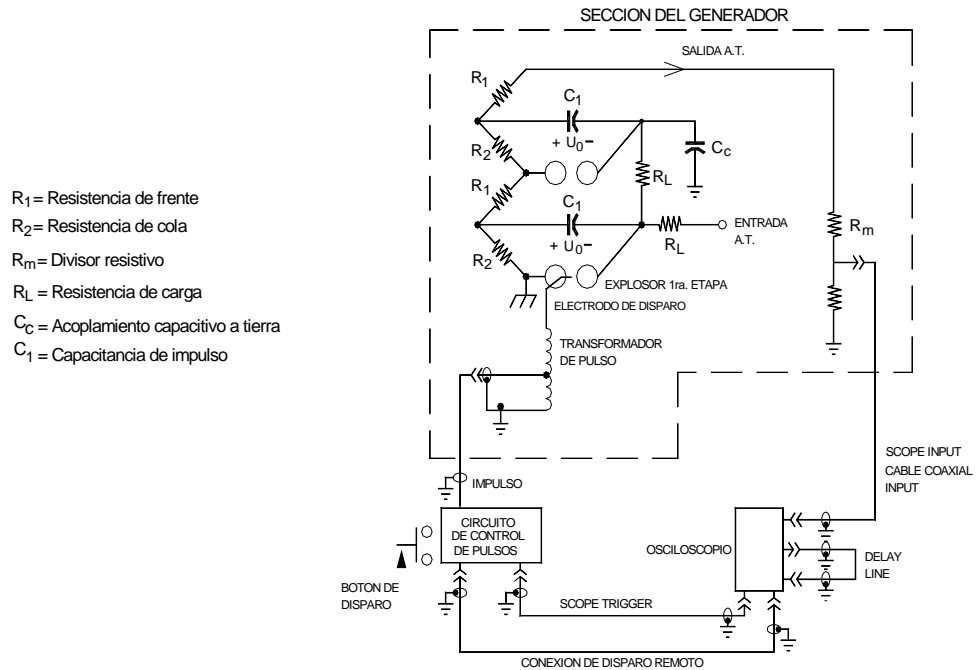


Fig. 3.22 SISTEMA DE DISPARO PARA UN GENERADOR DE 2 ETAPAS.

### 3.4.4 Cable Coaxial

Los instrumentos de medida, registradores que se encuentran localizados a una distancia alejada respecto a los terminales de baja tensión del divisor, se deben conectar mediante un cable coaxial de alta frecuencia y baja pérdidas dieléctricas (cables con aislamiento de aire, polietileno) con el fin de evitar la distorsión de la señal debido a las reflexiones en sus terminales que son superpuestas en la medición.

### 3.4.5 Mesa de Control

El control del generador de impulso es instalado en una cabina o mesa de control.

Consiste de:

1. Una unidad de control de la fuente SCR que opera durante la carga de los capacitores  $C_1$  para una corriente constante hasta una tensión fija ( $U_0$ ).
2. Una unidad de control del cambio de polaridad de la tensión de carga.
3. Un Regulador de la carga, aquella que regula la carga controlando los tiristores, también incluye la fuente de alimentación, un sistema de regulación de distancia



(S) de la esfera móvil del explosor, un sistema de medición de tensión de los capacitores de impulso  $C_1$  y un contador de impulsos efectuados.

4. Dispositivo de disparo.
5. Control de servicio de iluminación, control de la distancia del explosor (en m.m)
6. Medida de corriente DC (mA) en la unidad de carga y tensión de carga por módulo.
7. Panel de alarmas del generador.

#### **3.4.6 Dispositivo de Protección**

Se dispone en paralelo con todos los condensadores  $C_1$  y  $C_2$  del generador a través de un interruptor denominado de descarga en serie con una resistencia que tiene la finalidad de conectarse automáticamente a tierra en ausencia de tensión que a su vez se enclava con lámpara intermitente de señalización en lugares visibles, dándole la seguridad ante cualquier accidente. El circuito de tierra debe tener como máximo una resistencia de  $10 \Omega$ .

### **3.5 Sistema de Medición de Impulsos de Tensión**

Durante las pruebas de rigidez o esfuerzo dieléctrico para aparatos eléctricos además de la generación del impulso de tensión, es necesario también medir el mismo con un apropiado dispositivo a fin de averiguar que el aislamiento sostiene o resiste al esfuerzo eléctrico sin dañarse.

Dicho dispositivo reproduce a escala real el fenómeno transitorio de Alta Tensión en el lado de baja tensión.

Existen 2 métodos utilizados más importantes en la medición de Altas Tensiones Impulsionales. Ellos son los Divisores de Tensión y el Espinterómetro de esferas.

#### **3.5.1 El Divisor de Tensión**

Es un dispositivo de medida que reproduce a escala real el transitorio de alta tensión a niveles de baja tensión.

El Divisor de Tensión, se conecta en paralelo con el objeto bajo prueba y consiste en impedancias elementales conectadas en serie, generalmente desiguales, a cuyo conjunto se le aplica una tensión obteniéndose una o más tensiones intermedias proporcionales a las impedancias en serie, pudiendo ser indicados por un instrumento.

Esta baja tensión es una imagen de la alta tensión, la que se traduce mediante un factor constante (relación) que debe ser por lo tanto independiente de la amplitud de la tensión aplicada, de la temperatura y de la frecuencia.

Los divisores de tensión con relaciones de medida que se pueden adoptar son desde 1/200 hasta 1/1000 con el propósito de limitar la tensión de medida a los 1500 V.

Los divisores de acuerdo al tipo de tensión a medir se clasifican en:

#### **A. Divisor de Tensión Resistivo**

Se emplea para la medición de tensión durante las pruebas de impulso con generadores menores de 1 MV y consiste de dos devanados resistivos de carbón conectados en serie ( $R_A, R_B$ ), frecuentemente sumergidos en aceite permitiendo así la disipación del calor.

Un voltímetro es conectado a través del devanado resistivo en el lado de baja tensión ( $R_B$ ) y el valor real de la tensión se calcula multiplicando la lectura medida por la relación del divisor de tensión.

La desventaja que presenta este divisor, cuando se miden ondas de impulso 1.2/50  $\mu$ s, es la distorsión de la señal que es producida por la presencia de capacidades parásitas a tierra<sup>12</sup>  $C_t$ . Esto hace que no pueda medir fenómenos tan rápidos, Figura 3.23

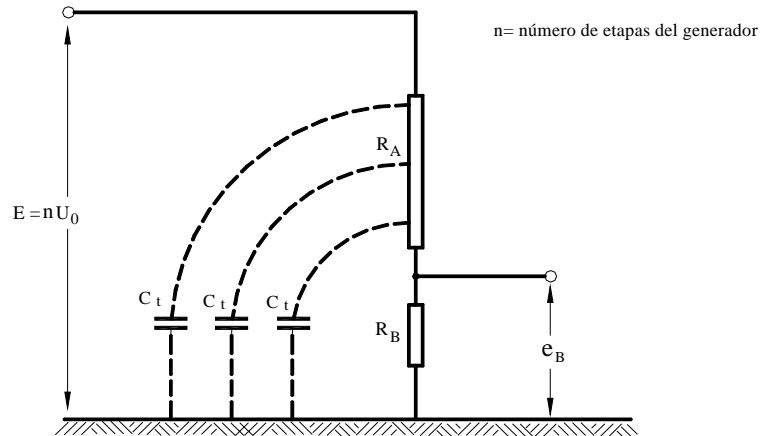


Fig. 3.23 Esquema simplificado del divisor de tensión tipo resistivo

Para nuestro análisis, la figura 3.24 muestra el circuito equivalente del divisor de tensión resistivo con la condición de que el máximo rango de la sobretensión aplicada  $E$  con respecto al tiempo no debe exceder del límite dado.

En la figura 3.24, el Divisor de Tensión resistivo está conectado en el lado de baja tensión a través de una resistencia  $R_C$  y un cable coaxial de corta longitud, de baja pérdidas y de alta frecuencia, además las placas del osciloscopio se conecta a través de una resistencia  $R_T$  cuyo valor debe ser igual a la impedancia del cable coaxial ( $Z$ ) con el fin de evitar perturbaciones debido a las reflexiones en sus terminales que son superpuestas en la medición.

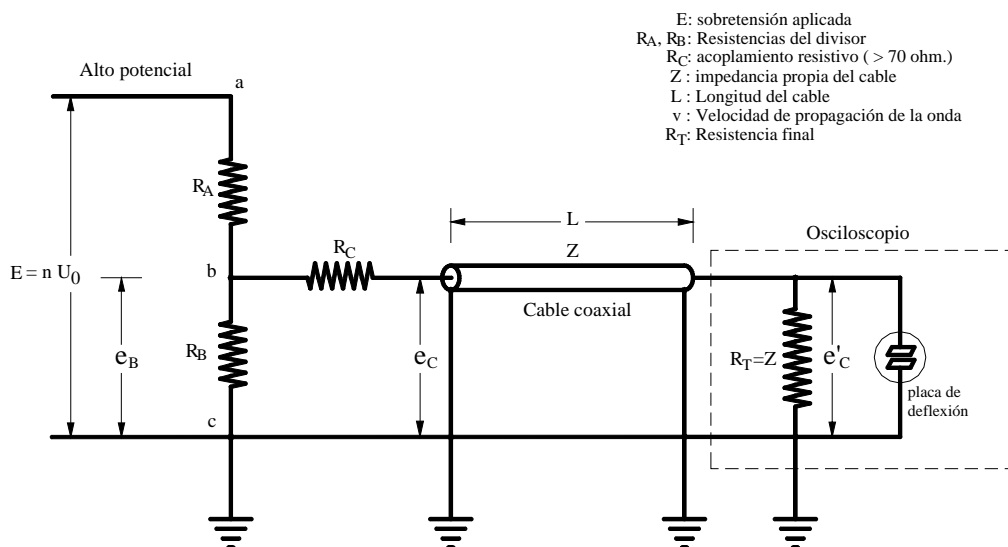


Fig. 3.24 Divisor de Tensión Resistivo conectado al equipo de medida

Para encontrar la resistencia equivalente Thevenin tendremos que la resistencia de alta y baja tensión estén en paralelo, por lo que:  $R_{th} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$

Para la máxima transferencia de energía y fidelidad de la onda, se debe cumplir que:

$$Z_{cable} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} + R_C$$

Pero, usualmente:  $R_A \gg R_B$ , entonces:  $Z_{cable} = R_C + R_B$  (3.39)

Por otro lado, se puede deducir que la tensión en bornes de baja tensión es:

$$e_B = \frac{Z_1}{Z_1 + R_A} E \quad (3.40)$$

Donde  $Z_1$  es la impedancia equivalente vista desde los puntos b y c, es decir:

$$Z_1 = \frac{R_B(R_C + Z)}{R_B + R_C + Z} = \frac{R_B(R_C + Z)}{2Z} \quad (3.41)$$

Reemplazando en (3.40):  $e_B = \left[ \frac{R_B(R_C + Z)}{R_B(R_C + Z) + R_A(2Z)} \right] E$

Además se tiene que:  $e_B = iR_C + e_C = \left( \frac{e_B}{R_C + Z} \right) R_C + e_C$ ;

$$e_C = \left( \frac{Z}{R_C + Z} \right) e_B; \quad (3.42)$$

Reemplazando (3.40) y (3.41) en (3.42):  $e_C = \left[ \frac{Z}{R_C + Z} \right] \left[ \frac{(R_C + Z)R_B}{Z(R_A + R_B) + R_B R_C + R_A Z} \right] E$

Como:  $R_A + R_B \gg R_B R_C + R_A Z$ , simplificando obtenemos:  $e_C = \left( \frac{R_B}{R_A + R_B} \right) E$  (3.43)

## B. Divisor de Tensión Capacitivo

Se aplica en la medición de altas tensiones de corriente alterna y es recomendado para generadores de impulso de más de 1.5 MV; su construcción puede ser de dos formas: La primera conectando en serie 2 condensadores, una en alta tensión y la otra en baja tensión; la segunda forma es una cadena de condensadores de baja tensión conectadas en serie.

Debido al elevado costo de los condensadores en Alta Tensión, se usa frecuentemente el segundo tipo de divisor capacitivo y consiste de un conexionado de varios condensadores ( $C_A$ ) de baja tensión en serie con  $C_B$  y un voltímetro u

osciloscopio que está conectado en el extremo inferior de  $C_B$  a través de un cable coaxial y protegido contra posibles sobretensiones por medio de un fusible S y una inductancia de choque L.

Un error que puede introducirse en las mediciones del divisor capacitivo es debido a la carga que puede permanecer en los condensadores de una prueba anterior, es decir cuando la tensión a través de los capacitores no es cero en el momento que el circuito es abierto.

Por lo tanto, es necesario cortocircuitar eficazmente los condensadores antes de cada prueba para asegurar mediciones correctas, Figura 3.25

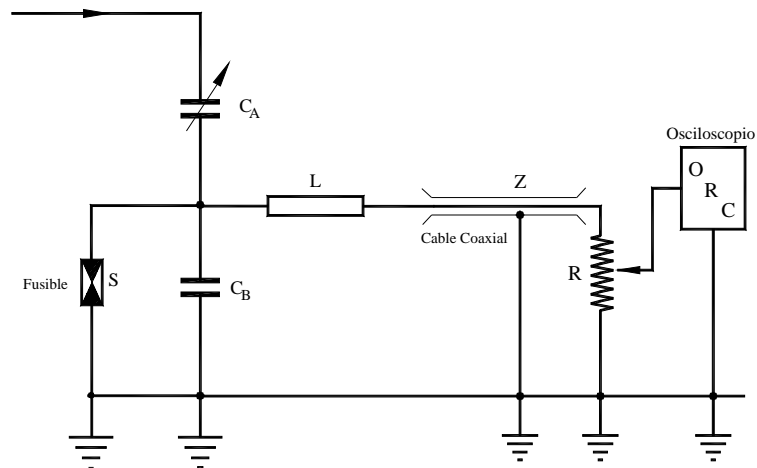


Fig. 3.25 Divisor de Tensión Capacitivo y su unidad de medición

Del circuito la relación del divisor real es:  $n_d = \frac{C_A}{C_A + C_B + C_K}$ , siendo  $C_K$  la capacidad parásita del cable de retardo y su valor debe ser aproximadamente 10 veces mayor que  $C_B$ .

### C. Divisor de Tensión Resistivo - Capacitivo

Es usado para la medida de impulsos de tensión. Para este tipo de mediciones, los resistores series ( $R_A$ ) son conectados en paralelo con los capacitores series ( $C_A$ ), reproduciendo así la onda de impulso de tensión con una pequeña o sin distorsión y

son terminados en una resistencia  $R_B$  a través el cual conectamos un voltímetro de impulsos. Este tipo de divisor actúa como un divisor resistivo para transitorios lentos y como un divisor capacitivo para sobretensiones rápidas, figura 3.26.

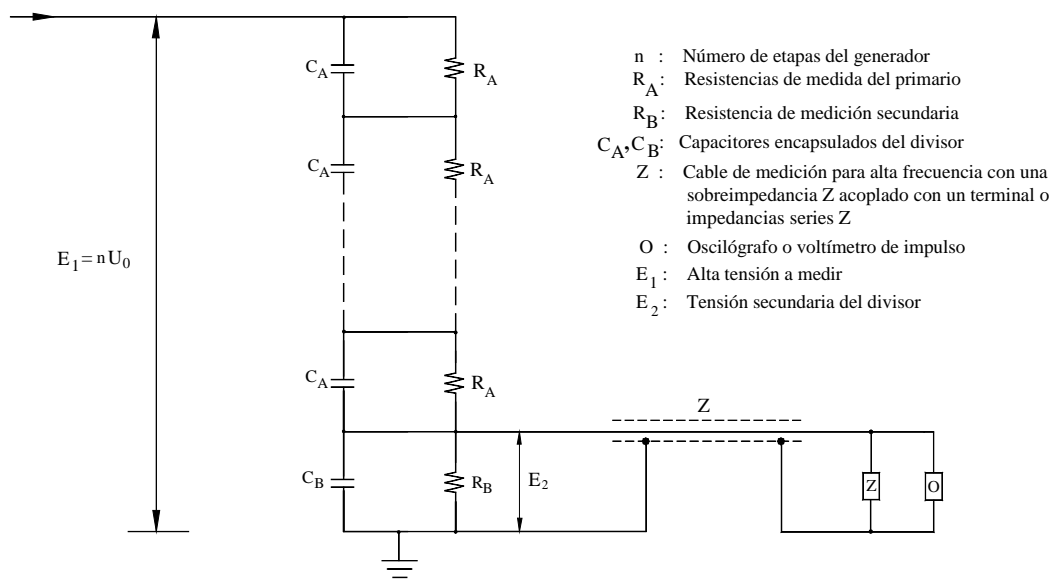


Fig. 3.26 Divisor de Tensión Resistivo - Capacitivo o de impulsos

### 3.5.2 El Espinterómetro de Esferas

El segundo método usado en la medición de Altas Tensiones está basado en la tensión de descarga entre 2 esferas de cobre, denominado método de espinterómetros de esferas.

Su empleo tiene por finalidad establecer la relación entre el valor de la alta tensión a medir mediante la descarga entre esferas y la indicación del voltímetro pico o de un osciloscopio en el instante de la descarga.

Las relaciones entre la tensión de descarga y la distancia entre las esferas está dada según recomendaciones IEC-52, en términos de valores pico de tensión<sup>41</sup>.

Cuando las esferas son conectadas según la figura 3.27 incrementamos la tensión gradualmente hasta que ocurra la descarga. El valor promedio es obtenido a partir de la tabla 3.1 que muestra los valores de tensiones de descargas para condiciones normales para un diámetro de la esfera y el espaciamiento ( $S$ ) del espinterómetro.

## I. Perfiles Normalizados de Espinterómetros de Esferas.

En esta sección se definen las reglas y recomendaciones más importantes para la construcción y el uso de espinterómetros de esferas en la medición de tensiones cuando una esfera es aterrada.

Las reglas se aplican para la medición de valores pico de:

- a) tensión alterna
- b) tensión continua
- c) impulso de tensión normalizada.

- **Espinterómetros de esferas para propósitos de medición:**

El Espinterómetro de esferas normalizado (una esfera aterrada) es un dispositivo de medida para valores pico de tensión alterna, continua e impulsos de tensión completo o recortado construida y dispuesta de acuerdo a la norma VDE 0433 Part 2/8.61.

Consiste de 2 esferas de metal del mismo diámetro nominal (D) hecho de bronce sulfuroso con sus respectivas espigas, mecanismo de operación, aisladores y estructuras de soporte y cables para la conexión en los puntos entre los cuales va a ser medido la tensión. Los valores normalizados de D, se muestran de acuerdo al siguiente cuadro:

D (cm)	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
--------	---	---	------	----	------	----	----	----	----	-----	-----	-----

En las estaciones diseñadas para la producción de ondas de impulsos de tensión recortadas generalmente el espinterómetro además de las funciones comunes de medir y proteger, tiene la misión de cortar las ondas a voluntad del operador mediante la introducción de un tercer electrodo que iniciará la disrupción deseada (TRIGATRON).

- **Tensión de Descarga Disruptiva ( $U_D$ ) del espinterómetro de esferas**

Es el valor de la tensión entre las esferas cuando ocurre la disrupción.

- **Punto de Descarga de un espinterómetro de esferas**

Son aquellos puntos sobre la superficie de las esferas entre la cual existe entre ellas la distancia más corta.

- **El espaciamiento (S) de un espinterómetro de esferas**

Es la distancia entre los puntos de descarga.

## **II. Bases para la Medida de Tensión**

La medida de tensión por medio de espinterómetro de esferas está basada en la relación entre la tensión de descarga disruptiva en el aire ( $U_D$ ) y el espaciamiento (S) y es usado como una medida para valores pico de tensión. La disrupción del espinterómetro de esferas se obtiene ya sea aumentando la tensión para un espaciamiento (S) dado o disminuyendo el espacio para una tensión dada.

La calibración se ejecuta ajustando la tensión de carga para algunos valores debajo del valor esperado de la tensión de descarga. Se efectúan 3 impulsos consecutivos y los resultados son registrados (x para una descarga y 0 para un sostenimiento). Si ocurre una descarga, entonces se hace 3 impulsos adicionales en ese nivel de tensión. El nivel de tensión es ligeramente elevado y las series se repiten. Este es continuado hasta obtener 5 descargas de los 6 intentos y se registran las condiciones atmosféricas. El porcentaje de descargas para cada nivel de tensión versus la tensión probable es ploteado en un papel. Una vez que todos los puntos están ploteados, una línea recta es trazada a través de los puntos como sea posible simulando un ajuste de mínimo cuadrado. El punto el cual esta línea cruza la línea del 50% de probabilidad es la tensión crítica disruptiva.

Esta tensión es luego corregida de acuerdo a la norma por la densidad relativa del aire y la humedad, obteniendo un nuevo valor que luego es comparado con el valor normal para determinar el error porcentual del instrumento.

## **III. Tabla de Tensiones de Descarga Disruptiva**

La variación de la tensión de descarga disruptiva en el aire ( $U_D$ ) con el espaciamiento S, cuando una esfera es aterrada, a condiciones atmosféricas normales ( $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=1013\text{ mbar} = 760\text{ mm Hg}$ ), para tensiones alternas, continuas e



impulsos de tensión es dada según la tabla 3.1. Las tensiones de descarga disruptivas en el aire dadas para diversos espaciamentos entre esferas son valores picos.

La tabla 3.1 muestra las tensiones de descargas disruptivas para diversos diámetros de esferas y no puede ser usada para mediciones de impulso menores de 10 kV.

#### IV. Disposición General

Las disposiciones típicas de espinterómetros de esferas son dos: vertical y horizontal, y sus dimensiones de las partes esenciales se cumplirán de acuerdo a la norma VDE 0433 Part 2, tal como se muestra en la figura 3.27 y 3.28 respectivamente.

- a) **Disposición vertical:** Cuando las esferas son montadas verticalmente, la espiga de la esfera de alta tensión deberá estar libre de bordes cortantes o ángulos y sus diámetros no serán mayor de  $0.2 D$  con el fin de reducir la influencia de la espiga del lado de alta tensión sobre la tensión de descarga, figura 3.27

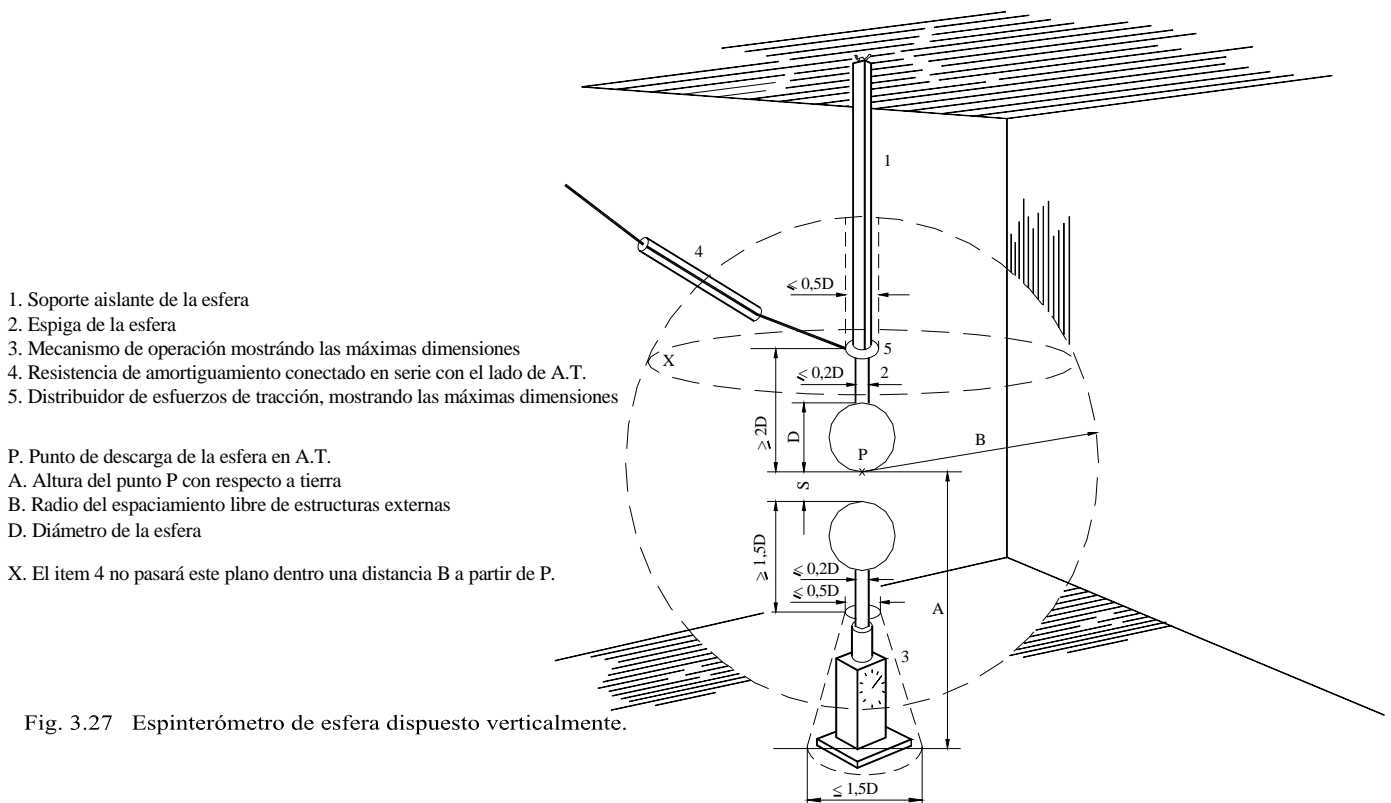


Fig. 3.27 Espinterómetro de esfera dispuesto verticalmente.

- b) **Disposición Horizontal:** Las dimensiones limitantes de un espinterómetro típico para esferas montadas horizontalmente son las mismas para ambos lados de la brecha.

1. Soporte aislante de la esfera
2. Espiga de la esfera
3. Mecanismo de operación mostrándo las máximas dimensiones
4. Conexión del cable de A.T. en serie con la resistencia de amortiguamiento

P. Punto de descarga de la esfera en A.T.

A. Altura del punto P con respecto a tierra

B. Radio del espaciamento libre de estructuras externas

X. El ítem 4 no pasará este plano dentro una distancia B. a partir de P.

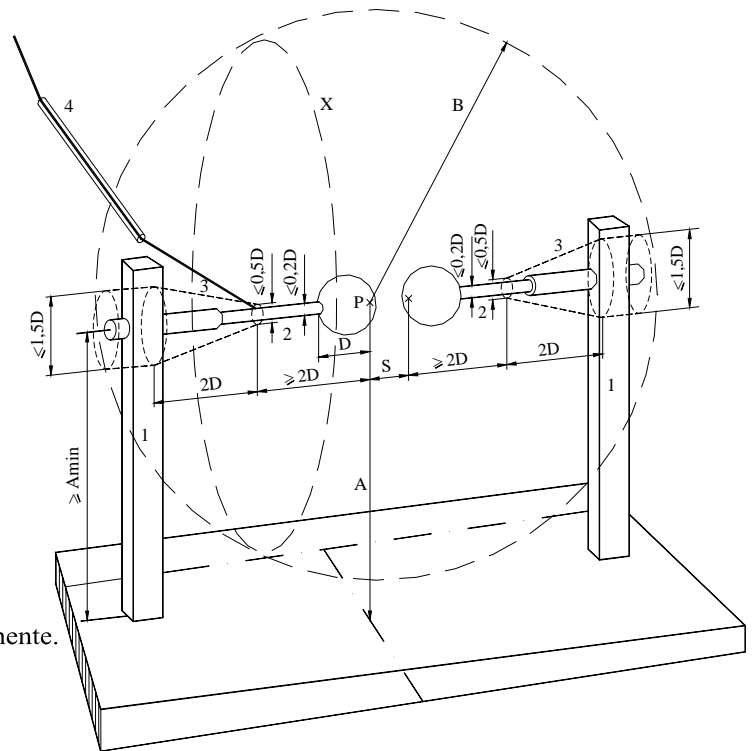


Fig. 3.28 Espinterómetro de esfera dispuesto horizontalmente.

El espinterómetro de esferas deberá operar con el punto de descarga conectado al lado de la alta tensión a una altura  $A$  con respecto al plano horizontal, o respecto del conductor tendido en el suelo del laboratorio; la distancia  $A$  estará dentro de los límites dados en la tabla 3.2. Estos requerimientos se aplican para ambas configuraciones.

La distancia  $B$  es a partir del punto de descarga de la esfera de alta tensión hacia cualquier objeto extraño alrededor (por ejemplo, pared, techo, tanque del transformador, bushings, generadores de impulso, etc.) y también hacia la estructura de soporte de las esferas si es que este es hecho de material conductor.

## V. Conexiones Eléctricas

- a) Conexión a tierra.

Como una regla, la esfera aterrada no será conectada a tierra a través de resistencia. Si las resistencias se emplean para mediciones de corriente, los valores de las resistencias serán lo mínimo posible de tal forma que la caída de tensión en la resistencia no afecte la exactitud de las medidas de tensión y que las personas no sean dañadas durante las descargas disruptivas.

b) Conexión en Alta Tensión

La tensión será aplicada en la esfera de alta tensión en un punto sobre la espiga o en el distribuidor de esfuerzos. La distancia entre este punto y el punto de descarga no será menor que 2 D.

## **VI. Resistores series de Protección o de amortiguamiento**

a) Para medidas de tensión alterna y continua.

A fin de evitar sobreoscilaciones de tensión (entre la capacitancia del espinterómetro de esferas y la inductancia de la línea) que pueden producir errores en la medida y que pueden en casos excepcionales dañar al objeto de prueba o a las instalaciones debido a prematuras descargas disruptivas, es necesario conectar un resistor en serie con la esfera superior del espinterómetro de esferas. De esta forma la corriente de descarga será reducida y la superficie de la esfera protegida.

Para tensiones alternas con frecuencias hasta 100 Hz y para tensiones continuas, son recomendadas resistencias de 10 K $\Omega$  hasta 1 M $\Omega$ .

Cuando se presenta descargas bruscas en el circuito de prueba, la resistencia serie reduce el efecto de sobretensiones transitorias en la operación del espinterómetro de esferas.

b) Para medidas de impulsos de tensión.

El propósito del resistor serie cuando medimos impulsos de tensión es reducir el grado del colapso de tensión durante la descarga disruptiva del espinterómetro de esferas el cual puede introducir esfuerzo indeseable en el objeto de prueba debido a las tensiones impulsionales cortadas que se originan. Otro propósito, especialmente para esferas de grandes diámetros (elevada capacitancia) es amortiguar y eliminar oscilaciones en el circuito de medida del espinterómetro de

esferas debido a tensiones elevadas que pueden ocurrir entre las esferas sobre el objeto bajo prueba. La resistencia del resistor serie no será mayor de  $500 \Omega$ .

Tabla 3.2 Margen de seguridad alrededor de las esferas

Diámetro de la esfera D (cm)	Mínimo valor de A	Máximo valor de A	Mínimo valor de B
hasta 6.25	7 D	9 D	14 S
desde 10 hasta 15	6 D	8 D	12 S
25	5 D	7 D	10 S
50	4 D	6 D	8 S
75	4 D	6 D	8 S
100	3.5 D	5 D	7 S
150	3 D	4 D	6 S
200	3 D	4 D	6 S
250	Los valores no han sido especificado para estos diámetros		
300			

## VII. Uso del Espinterómetro de Esferas para propósito de Medidas

### Métodos Fundamentales

Las tensiones pueden ser medidos por medio de espinterómetros de esferas de acuerdo a los siguientes métodos:

1. Aplicando una tensión constante al espinterómetro de esferas y su espaciamiento (S) es disminuido a partir de un valor relativamente grande hasta que ocurra la descarga disruptiva;
2. Manteniendo constante el espaciamiento (S) y la tensión es incrementada desde un valor relativamente bajo hasta que ocurra la descarga disruptiva.

El procedimiento en la medición de tensiones usualmente consiste en establecer una relación entre la alta tensión a medir por el espinterómetro de esferas y la indicación de un voltímetro, conectado en el circuito de control del equipo y luego usar este voltímetro a fin de simplificar la medición de tensiones durante la prueba.

La tensión medida por el espinterómetro de esferas es derivada a partir de la distancia de descarga. El procedimiento en establecer la relación varía con el tipo de tensión que va a medirse, según lo siguiente:

### **Mediciones de Tensiones Alternas**

Las tensiones alternas pueden ser medidos por medio de espinterómetro de esferas y junto con otros dispositivos de medición de acuerdo a los métodos fundamentales especificados arriba:

- a) medida con tensión constante: podemos aplicar una tensión de valor constante a través de la brecha y reducimos el espaciamiento de las esferas hasta que ocurra la descarga;
- b) medida con espaciamiento constante: inicialmente cuando conectamos la tensión deberá ser suficientemente pequeña a fin de prevenir una descarga disruptiva que pueda ocurrir alrededor durante la conexión. Luego aumentamos ligeramente la tensión hasta que el indicador de baja tensión mida exactamente en el instante que ocurrió la descarga en la brecha.

El espaciamiento será disminuido o la tensión incrementado respectivamente, a tal grado que sea por lo menos leerlo con precisión el espaciamiento o leerlo con el voltímetro usado cerca del espacio entre las esferas cuando la descarga disruptiva ocurra dentro del espacio entre esferas.

Las mediciones serán repetitivas hasta 3 sucesivas espaciamientos o que las tensiones registradas no difieran del uno a otro por más del 3 %. El valor promedio de estas lecturas será tomado como el resultado de las mediciones.

### **Mediciones de Tensiones Continuas**

La diferencia con respecto a las medida con tensión alterna, es que las medidas serán repetitivas hasta 3 lecturas sucesivas y que no difieran del uno al otro más del 5 %.

### **Mediciones de Impulsos de Tensión**

Los impulsos de tensión pueden ser medidos de acuerdo a los 2 métodos fundamentales especificados anteriormente.

- a) Medida manteniendo la tensión constante:

El impulso de tensión se mantiene constante y es monitoreada por medio de un dispositivo especial de medida de tensión de carga del generador de impulso.

Se varía gradualmente el espaciamiento de la esfera estableciendo inicialmente una brecha grande de tal forma que no ocurra la descarga disruptiva y además cubra el rango del espaciamiento para el cual se obtiene el 50 % de probabilidad de descarga disruptiva. Se aplican varios impulsos de tensión hacia el espinterómetro de esferas para cada espaciamiento ajustado hasta que ocurra la descarga disruptiva del objeto de prueba aproximadamente 50 % de todos los impulsos de tensión.

b) Medida manteniendo el espaciamiento constante:

Se varía el impulso de tensión gradualmente de modo que cubra un rango de tensión suficientemente amplio que incluya el 50% de la tensión de descarga disruptiva del espinterómetro de esferas. Se aplican varios impulsos hacia el espacio de las esferas para cada impulso de tensión ajustada.

A fin de obtener la tensión de descarga disruptiva al 50% en el espinterómetro de esferas, el espaciamiento del espinterómetro o la tensión de carga del generador de impulso será ajustado gradualmente no más del 2% del valor esperado de la descarga disruptiva.

En cada ajuste se realizaran 6 aplicaciones del impulso de tensión. El intervalo entre las aplicaciones no serán menores de 5 segundos.

El ajuste para obtener el 50 % de probabilidad de descarga disruptiva es por interpolación estableciendo 2 límites de ajuste, para cada ajuste se tienen que aplicar 6 impulsos de tensión, diferenciándose en no más del 2% (del valor esperado de la descarga disruptiva) de las 6 aplicaciones. Luego, se puede efectuar pruebas de descargas preliminares antes de tomar lecturas.

Tomando en cuenta la densidad relativa del aire en el instante de la medición y la polaridad del impulso de tensión, la tensión de descarga disruptiva al 50 % puede ser tomado en cuenta de la tabla 3.1 para dicho espaciamiento para lo cual ocurre el 50 % de probabilidad de descarga disruptiva.

### **3.5.3 Voltímetro de pico para impulsos**

Registra los valores pico de tensión obtenido durante las pruebas de impulso de tensión, ofrece la ventaja de una lectura directa por medio de un punto luminoso

separado del instrumento de elevada precisión y es considerado como un complemento indispensable del osciloscopio.

El voltímetro pico de impulsos es conectado por medio de un cable coaxial al divisor de tensión sobre el cual se aplica la onda de impulso de tensión a ser medido. Un terminal resistivo no inductivo es conectado en el voltímetro a fin de prevenir alguna reflexión al final del cable de medición. Pueden medir tensión de polaridad positiva o negativa.

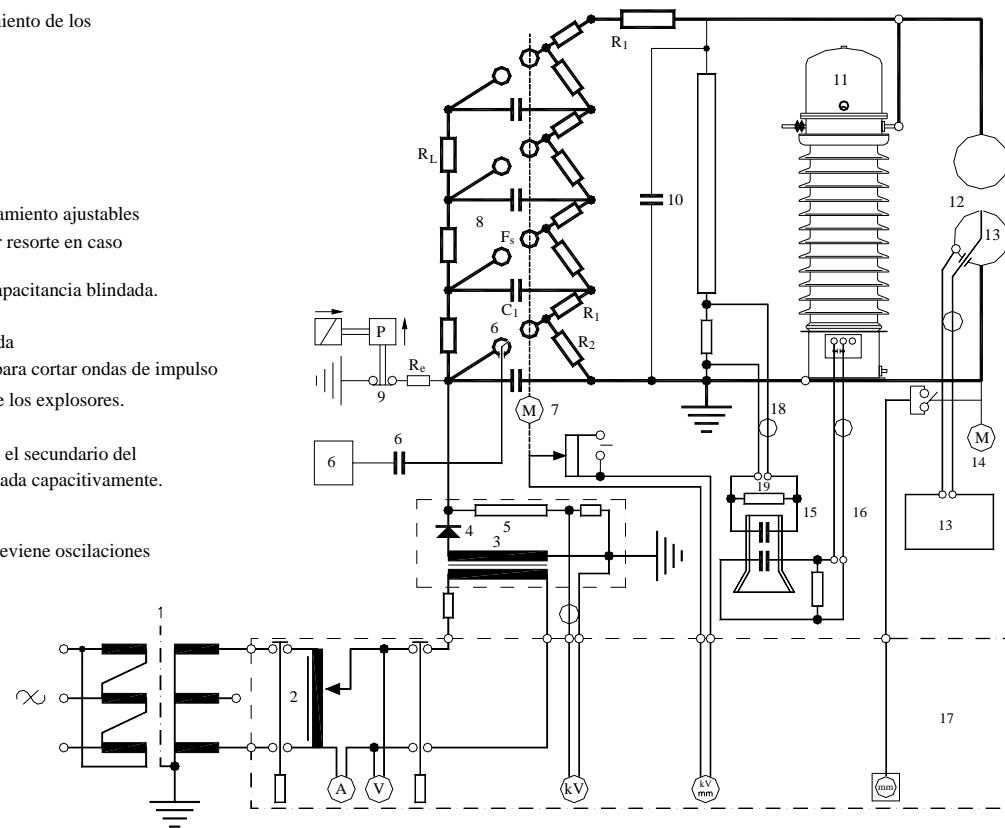
#### **3.5.4 Oscilógrafo de dos canales**

Es conectado a través de un cable coaxial al terminal de baja tensión del divisor de tensión y registra la amplitud y la forma de onda del impulso de tensión y está diseñada para monitorear la rapidez del fenómeno transitorio, registrando fielmente la forma de onda del impulsos de tensión.

El diagrama de la instalación de impulso lo vemos en la figura 3.29

FIGURA 3.29 INSTALACION PARA PRUEBAS CON IMPULSOS DE TENSION.

1. Transformador de aislamiento.
2. Transformador regulador de tensión
3. Transformador para el rectificador.
4. Diodos de Silicio
5. Resistencia de medida para la tensión de carga.
6. Unidad de disparo, capacitor de acoplamiento y esfera activada para el disparo electrónico del generador de impulso.
7. Motor para el control del espaciamiento de los explosores acoplados.
8. Generador de impulso.  
 $R_L$  = resistores de carga.  
 $R_e$  = resistor de descarga.  
 $R_1$  = resistores de frente.  
 $R_2$  = resistores de cola.  
 $C_1$  = capacitores de impulso.  
 $F_s$  = esferas acopladas con espaciamiento ajustables
9. Dispositivo aterrado con cierre por resorte en caso de falla por tensión.
10. Divisor de tensión resistivo con capacitancia blindada.
11. Objeto de prueba.
12. Espinterómetro de esfera de medida
13. Unidad de disparo y el electrodo para cortar ondas de impulso
14. Motor para el ajuste del espacio de los explosores.
15. Osciloscopio de rayos catódicos.
16. Registro de oscilación de ondas en el secundario del transformador de tensión (11) cargada capacitivamente.
17. Mesa de control.
18. Cable coaxial.
19. Resistencia para el osciloscopio previene oscilaciones





## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO ELÉCTRICO A ESCALA DEL GENERADOR DE IMPULSO DE TENSIÓN**

El propósito del presente capítulo es desarrollar el diseño eléctrico de un modelo a escala del Generador de Impulso de Tensión para su posterior implementación.

Primero procederemos a la determinación de los elementos del Circuito equivalente del Generador tipo Marx de 10 etapas usando capacitores de Impulso de Alta Tensión, segundo obtener la forma de onda en función del tiempo con los parámetros a escala del modelo definida según las recomendaciones IEC-60 mediante el uso del programa Matlab.

Finalmente comparar el circuito de impulso diseñado basado en las ecuaciones aproximadas para el tiempo de frente y de cola con los cálculos teóricos estudiados en el capítulo III.

#### **4.1 Modelo a escala del Generador de Impulso de Tensión**

La principal cualidad de un modelo que utilice el Ingeniero Electricista no consiste en que éste sea lo mas completo posible; sino más bien se debe adaptar al problema propuesto y en nuestro caso el modelo a escala del generador de impulsos de tensión que proponemos simular con el ATP, está basado en el circuito tipo Marx que servirá para determinar en laboratorio, la reproducción de la onda de tensión aplicado a un objeto de prueba y explicar los efectos de las sobretensiones en equipos eléctricos.

#### **4.2 Utilización del Modelo a Escala**

Principalmente para la reproducción artificial de rayos.

### 4.3 Métodos para la determinación de los Elementos del Circuito de Impulso de Tensión<sup>18</sup>

Los elementos del circuito de impulso de tensión que se usan para la reproducción artificial de sobretensiones tipo rayo son determinados despreciando para ello la inductancia del objeto de prueba  $L$  cuya influencia no es importante si es que usamos el circuito Marx simplificado.

#### 4.3.1 Cálculo de componentes del circuito dado los valores característicos de tiempo<sup>18</sup>

En el caso del circuito de impulso representado en la figura 3.7 en donde las constantes de tiempo de cola  $t_1 = R_2 C_1$  y de frente  $t_2 = R_1 C_2$  así como la eficiencia  $\eta$  dependen solo de la forma del impulso de tensión normalizado  $1.2/50 \mu\text{s}$  y de la relación,  $C_2 / C_1$  según se muestra en la figura 4.1

Cuando  $C_1$  y  $C_2$  son conocidos, las resistencias serie  $R_1$  y la descarga  $R_2$  pueden ser determinados a partir de la curva  $t_2 = R_1 C_2$  y  $t_1 = R_2 C_1$  con suficiente exactitud para este propósito<sup>18</sup>.

En el caso de una combinación de los circuitos a) y b) como se muestra en la parte superior de la figura 4.1 los elementos de dicho circuito de impulso son determinados por interpolación usando las curvas para los circuitos a) y b).

Aparte de las curvas calculadas para  $t_1 = R_2 C_1$ ,  $t_2 = R_1 C_2$  y  $\eta$  también ha sido incluido el caso en que se dispone la resistencia serie antes y después de la resistencia de descarga.

Si usamos este método y considerando los valores de  $C_1$  y  $C_2$  en  $\mu\text{F}$  y  $t_1 = R_2 C_1$ ,  $t_2 = R_1 C_2$  en  $\mu\text{s}$ , las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  son obtenidas en ohmios.

#### 4.3.2 Cálculo de los valores característicos de tiempo a partir de los elementos del circuito de impulso<sup>18</sup>

Otro método para determinar los componentes del circuito del generador está basado en las ecuaciones aproximadas para el tiempo de frente y de cola que dependen de los elementos del circuito de impulso. Este método tiende a ser más exacto cuando la relación  $t_f / t_c$  es pequeña.

Para el circuito a), aplicamos lo siguiente:

$$t_f \approx \frac{2}{b} \left[ \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \left( \frac{C_2 C_1}{C_2 + C_1} \right) \right]; \quad t_c \approx \frac{1}{a} (R_1 + R_2) (C_1 + C_2); \quad \eta \approx \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

$$\text{Para el circuito b), } t_f \approx \frac{2}{b} R_1 \left( \frac{C_2 C_1}{C_2 + C_1} \right) = \frac{2}{b} t_2; \quad t_c \approx \frac{1}{a} R_2 (C_1 + C_2) = \frac{1}{a} t_1; \quad \eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Según la norma VDE parte 3 / 4.66 los factores  $\frac{1}{a}$  y  $\frac{2}{b}$  son tomados de acuerdo a la tabla 4.1 para las diversas ondas de impulso tipo rayo considerados habitualmente y es la misma para los circuitos a) y b) y depende solamente de la relación  $t_f / t_c$ .

**Tabla 4.1**  
Variación de  $1/a$  y  $2/b$  con  $t_f / t_c$

	1.2/5	1.2/50	1.2/200
1/a	1.44	0.73	0.7
2/b	1.49	2.96	3.15
t1	3.472	68.493	285.714
t2	0.805	0.405	0.3809
$\eta_{\max}$	2.014	1.037	1.01

Si  $R_1$  y  $R_2$  está dado en ohmios y  $C_1$ ,  $C_2$  en  $\mu\text{F}$  entonces los tiempos  $t_f$  y  $t_c$  se obtienen respectivamente en  $\mu\text{s}$ . La aproximación tomada en este método es para entender básicamente el comportamiento del circuito y el desarrollo de técnicas sencillas para predecir la forma del impulso generado.

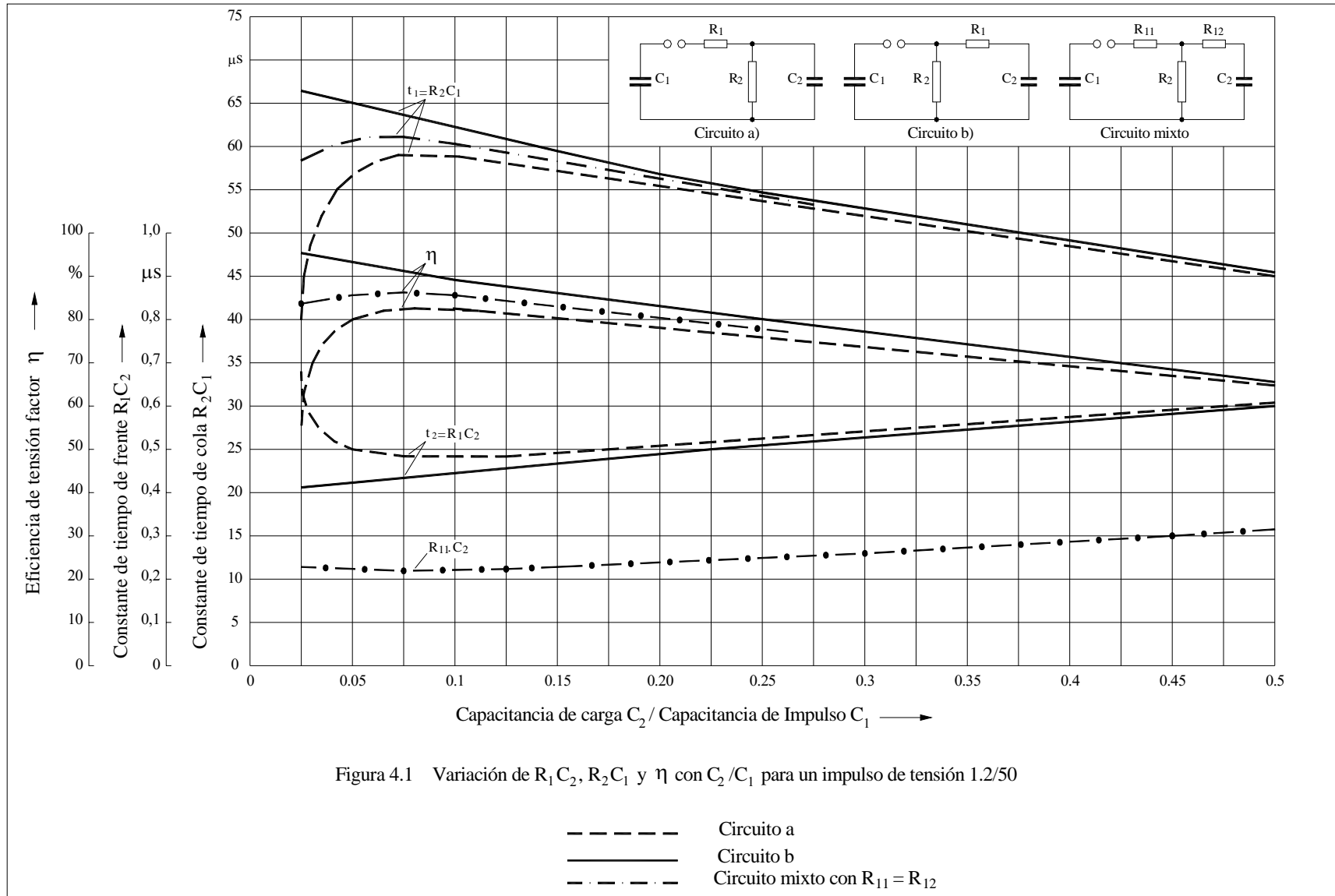


Figura 4.1 Variación de  $R_1 C_2$ ,  $R_2 C_1$  y  $\eta$  con  $C_2/C_1$  para un impulso de tensión 1.2/50

#### 4.4 Diseño Eléctrico aplicado del Generador de Impulso de Tensión

El problema de establecer los parámetros del circuito equivalente de un generador de impulso está orientado a predecir y verificar las forma de onda resultante que normalmente son conseguidos a través de un modelo.

Primero seleccionaremos el esquema equivalente del generador de impulso, segundo determinaremos los valores de los parámetros a escala del circuito equivalente a través de cálculos sin tener en cuenta los acoplamientos electromagnéticos, asumiendo que la inductancia es muy pequeña.

La tensión de carga de  $C_1$  seleccionada será de tal forma que podamos medir directamente las ondas impulsionales en el osciloscopio durante la prueba y la facilidad de encontrar en el mercado nacional condensadores de baja tensión nominal

$U_{nom.}$

##### 4.4.1 Selección de la Capacitancia del objeto de prueba $C_2$

La energía acumulada del generador de impulso depende de la capacitancia, de la inductancia y resistencia de los objetos a probar. El siguiente cuadro 4.1 muestra los valores aproximados de  $C_2$  para diferentes equipamientos<sup>33</sup>:

<b>Cuadro 4.1</b>	<b><math>C_2</math></b>	
Aisladores de línea, aisladores Pin	10 a 70	pF
Bushings	150 a 400	pF
Transformadores de corriente	200 a 600	pF
Transformadores de potencia hasta 1000 kVA.	700 a 1000	pF
Cables subterráneo (por 10 mt. de longitud)	1500 a 3000	pF
Transformadores de potencia mayor de 1000 kVA	1000 a 8000	pF

La determinación de la tensión de carga o de servicio de  $C_1$  y su valor capacitivo que definen la energía máxima disponible de un generador de impulso va a depender de

las tensiones normalizadas y el valor capacitivo de los objetos a probar ( $C_2$ ) y del número de etapas.

Cuando la carga  $C_2$  es capacitiva usamos la siguiente regla:  $C_1 = 5C_2$ .

donde  $C_1$ : mínima capacitancia del generador y  $C_2$ : carga total del generador.

Con cargas inductivas, el valor de  $C_1$  debe ser lo suficiente grande para prevenir oscilaciones en la cola de la onda de impulso. La mínima capacitancia de impulso

permisible estará dada por:  $C_1 = \frac{8t_c^2}{L}$  (pF). donde:  $t_c$ : tiempo de cola, en  $\mu\text{s}$ .

$L$ : inductancia del objeto de prueba, en H.

Cuando la carga es un transformador  $3\phi$ , conexión en estrella, el impulso de tensión es aplicado en una fase; las otras dos fases son aterradas y los terminales secundarios

son cortocircuitados, la capacitancia mínima está dado por:  $C_1 = \frac{P_n 10^8}{U_n^2 \varepsilon_c}$  (pF).

donde:  $P_n$  : potencia nominal del transformador a ser medido, en MVA.

$U_n$  : tensión nominal del transformador, en kV.

$\varepsilon_c$  : impedancia de cortocircuito del transformador, en %.

Por tanto asumimos que para probar todos los valores capacitivos de  $C_2$ , seleccionaremos el de mayor rango, es decir:  $C_2 = 10000 \text{ pF} = 0.01 \mu\text{F}$ .

#### 4.4.2 Selección de la Capacidad y tensión del Condensador de Impulso $C_1$

A fin de obtener el máximo impulso de tensión y aumentar la eficiencia, deberemos incrementar la energía del generador.

Para un impulso de tensión tipo rayo, podemos usar un valor de eficiencia del 97.5%.

Osea:  $\eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 0.975 \Rightarrow C_1 = 40 C_2$  Por tanto:  $C_1 = 40 C_2 = 0.4 \mu\text{F}$ .

Consideremos que la tensión total de generación está entre 4500 - 7000 V, dispuesta en 10 etapas. Elegimos por cada etapa una  $U_{nom.} = 640 \text{ V}$ , según norma VDE 0450 que es el mínimo valor que se ha ajustado para dar un impulso de tensión deseada.

Si el condensador del generador de impulso equivalente de 10 etapas es  $C_1 = 0.4 \mu\text{F}$  entonces por cada etapa será  $C_1 = 4 \mu\text{F}$ .

#### 4.4.3 Cálculo de la resistencia de Carga $R_L$

Se encarga de limitar la corriente que carga a los condensadores de impulso,  $C_1$  protegiendo de esta forma a la fuente de alimentación, su selección será de tal forma que nos asegure que ningún flujo de corriente circule por ellas durante la descarga.

Asumimos que la corriente de carga es de 1 A para una tensión de carga de  $U_0 = 6400$

voltios, luego:  $R_L = \frac{6400}{1} = 6400 \Omega$ , por tanto si son 10 etapas a cada módulo le

corresponderá  $640 \Omega$ .

El tiempo de carga de  $C_1$  experimental es:

$$t_{CARGA} = 12.6 R_L C_1 = 12.6 * 6400 * 0.4 * 10^{-6} = 32.25 \text{ ms.}$$

La potencia de cada resistencia es de 1000 watts.

#### 4.4.4 Cálculo de la resistencia de cola $R_2$

Para la determinación de  $R_2$ , se sabe que el tiempo de cola es

$$t_c \approx \ln 2 \quad t_1 \approx R_2(C_1 + C_2) \ln 2 .$$



Si  $t_c = 50 \mu\text{s}$ ,  $C_1 = 0.4 \mu\text{F}$  y  $C_2 = 0.01 \mu\text{F}$ , deducimos que  $R_2 = 175.93 \Omega$ , generalmente este valor es fijo.

#### 4.4.5 Cálculo del valor máximo y mínimo de la resistencia de frente $R_1$

Como  $C_2$  es completamente distinto para todos los casos particulares, podemos determinar  $R_1$ , y su valor debe ser limitado por razones prácticas y económicas usando el diagrama 4.1 (Catálogo de High Voltage Laboratory Equipment, Haefely, USA)<sup>22</sup>:

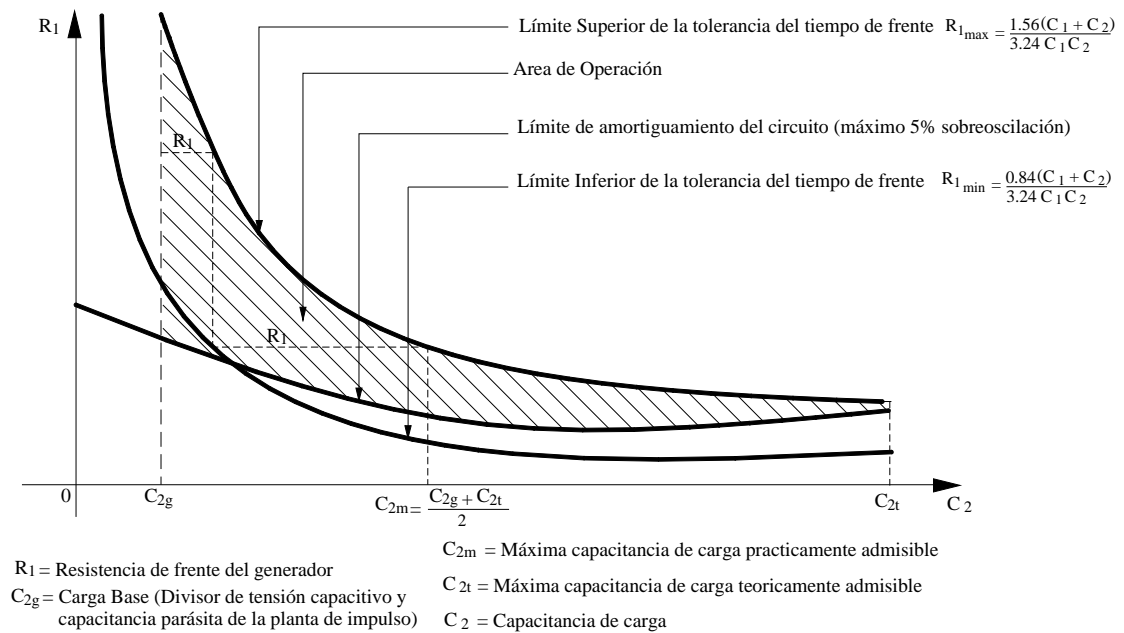


Diagrama 4.1

El rango de operación de un generador de impulsos está dentro de la parte sombreada (zona de trabajo del diagrama 4.1. El límite de la zona de amortiguamiento es determinado por la inductancia del circuito de impulso. Para el esquema, se tiene que dos resistencias de frente  $R_1$  con diferentes valores son suficientes para cubrir el rango entre  $C_{2g}$  y  $C_{2m}$ .

La máxima carga capacitiva  $C_{2m}$  experimentalmente admisible es aproximadamente igual a la semisuma de la carga capacitiva  $C_{2g}$  y la máxima carga capacitiva teóricamente admisible  $C_{2t}$ .

Si mantenemos fijo el valor de la resistencia de cola lo cual ocurre frecuentemente, entonces los valores que serán determinados será la resistencia de frente  $R_1$ .

Determinemos el valor mínimo y máximo de  $R_1$ , sabiendo que la tolerancia del tiempo de frente para una onda de impulso de tensión tipo rayo es  $\pm 30\%$ , es decir  $t_f = 1.2 \pm 0.36 \mu\text{s}$  y el rango de valores de  $C_2$  está entre  $[10-10000]$  pF.

Entonces si:

$$t_f = 3.2431t_2 = 3.2431 \left( \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \Rightarrow R_1 = \frac{t_f (C_1 + C_2)}{3.2431 C_1 C_2}$$

Los límites de  $R_1$  son presentados para diversos valores de  $C_2$  en la tabla 4.2 sabiendo que  $C_1 = 0.4 \mu\text{F}$ ,  $t_{f_{\min}} = 1.2 - 0.36 = 0.84 \mu\text{s}$ ,  $t_{f_{\max}} = 1.2 + 0.36 = 1.56 \mu\text{s}$ .

Tabla 4.2 Valores Mínimos y máximos de  $R_1$

$C_2$ (pF)	$R_{1 \min}$	$R_{1 \max}$
10	25901.8	48103.3
50	5180.9	9621.6
100	2590.8	4811.4
200	1295.7	2406.3
300	864.0	1604.6
400	648.2	1203.8
500	518.7	963.2
600	432.3	802.9
700	370.7	688.4
800	324.4	602.5
900	288.4	535.7
1000	259.7	482.2
2000	130.2	241.7
3000	87.0	161.5
4000	65.4	121.5
5000	52.4	97.4
6000	43.8	81.4
7000	37.6	69.9
8000	33.0	61.3
9000	29.4	54.6
10000	26.5	49.3

Con la finalidad de no producir oscilaciones, se debe cumplir que

$R_1 > 2\sqrt{L\left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}\right)}$ . El límite de la zona de amortiguamiento lo da

$$R_{1\min}(L) = 2\sqrt{\frac{L(C_1 + C_2)}{C_1 C_2}}.$$

Con los datos obtenidos, graficaremos las características de  $R_1$  en función de  $C_2$  para cada valor de la inductancia (1 a 100  $\mu\text{H}$ ) presente en el circuito, Observar la tabla 4.3 y la gráfica 4.2

**Gráfica 4.2**

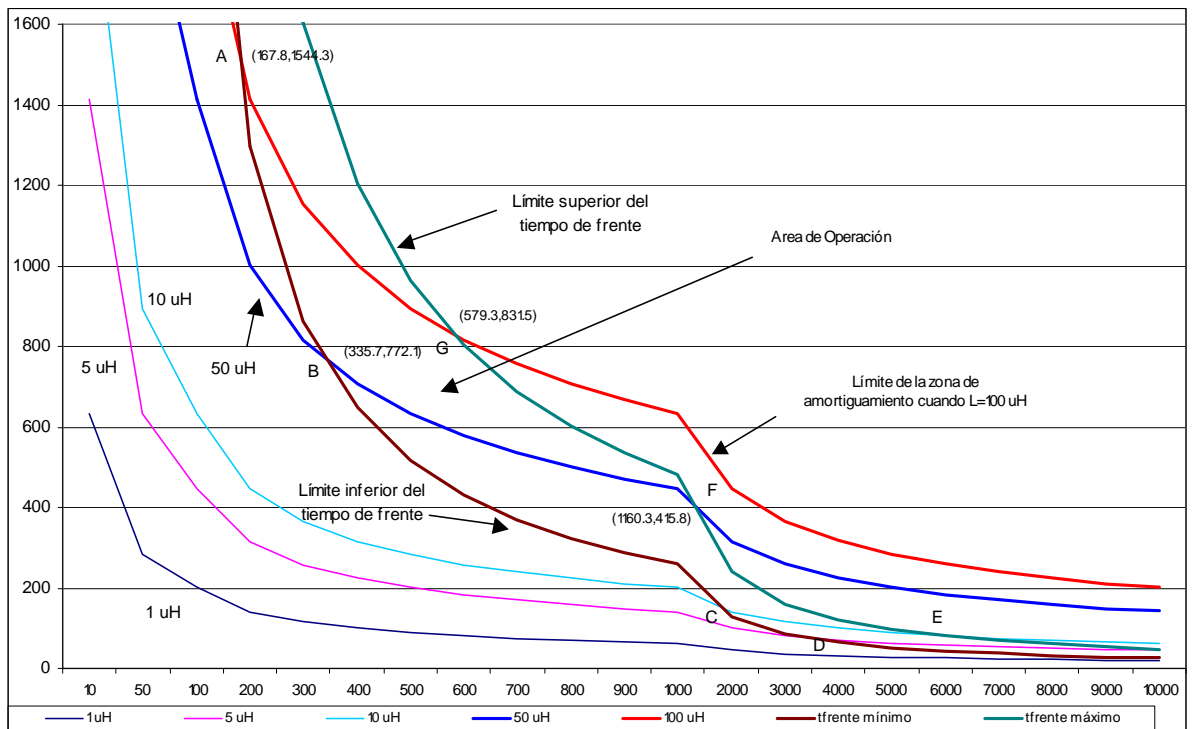


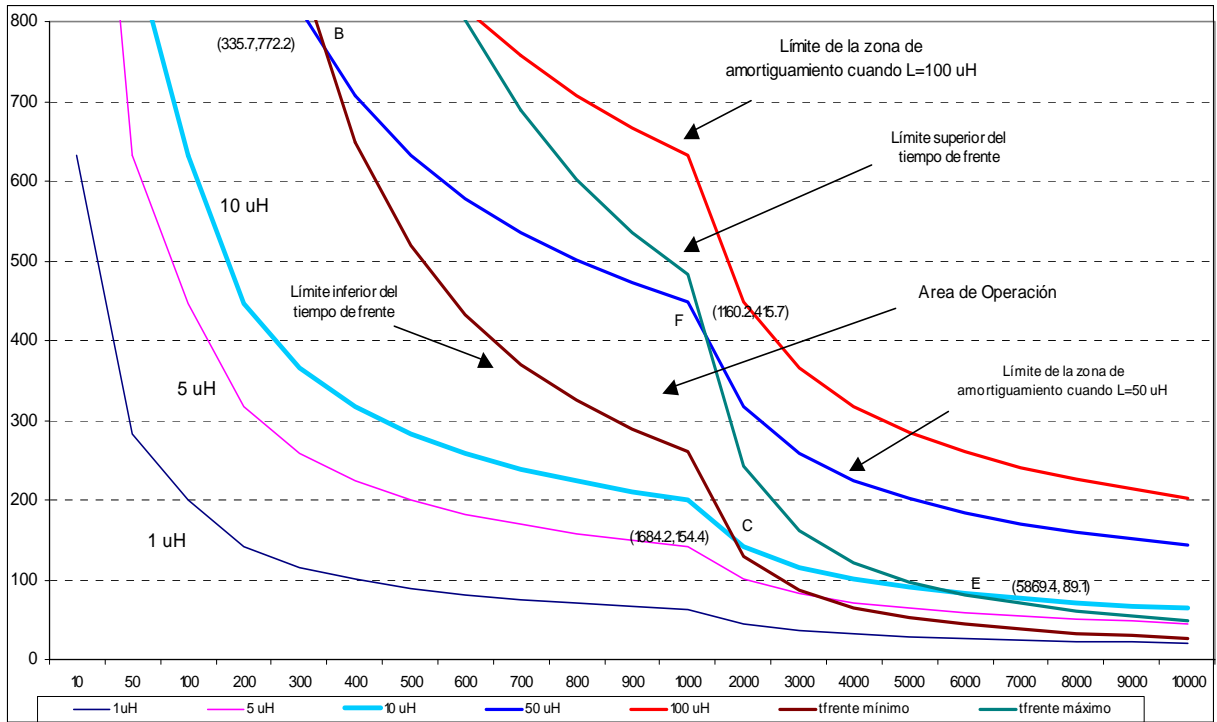
Tabla 4.3 Valores mínimos de  $R_1$  en función de la inductancia del circuito

$C_2$ (pF)	1 uH	5 uH	10 uH	50 uH	100 uH
10	632.5	1414.2	2000.0	4472.2	6324.6
50	282.9	632.5	894.5	2000.1	2828.6
100	200.0	447.3	632.5	1414.4	2000.2
200	141.5	316.3	447.3	1000.2	1414.6
300	115.5	258.3	365.3	816.8	1155.1
400	100.0	223.7	316.4	707.5	1000.5
500	89.5	200.1	283.0	632.9	895.0
600	81.7	182.7	258.4	577.8	817.1
700	75.7	169.2	239.3	535.0	756.6
800	70.8	158.3	223.8	500.5	707.8
900	66.7	149.2	211.1	471.9	667.4
1000	63.3	141.6	200.2	447.8	633.2
2000	44.8	100.2	141.8	317.0	448.3
3000	36.7	82.0	115.9	259.2	366.5
4000	31.8	71.1	100.5	224.7	317.8
5000	28.5	63.6	90.0	201.2	284.6
6000	26.0	58.2	82.3	183.9	260.1
7000	24.1	53.9	76.3	170.5	241.1
8000	22.6	50.5	71.4	159.7	225.8
9000	21.3	47.7	67.4	150.7	213.2
10000	20.2	45.3	64.0	143.2	202.5

De la gráfica 4.2 observamos que si  $t_f$  es máximo los puntos de intercepción con las curvas que dan la zona de amortiguamiento para 100, 50 y 10  $\mu\text{H}$  (apenas con 5  $\mu\text{H}$ ) son los puntos G, F y E que determinan las máximas cargas teóricamente admisibles de  $R_1$ .

Análogamente cuando el tiempo  $t_f$  es mínimo la curva que corresponde al límite inferior de  $R_1$  se intercepta con las inductancias 100, 50, 10 y 5  $\mu\text{H}$  (apenas con 1  $\mu\text{H}$ ) serán los puntos A, B, C y D.

Ampliemos la gráfica 4.2 para observar los rangos de valores de la resistencia de frente, de tal forma que cumplan que  $R_1 < R_2$ , con el fin de obtener una elevada eficiencia de tensión y el resultado es la gráfica 4.3



**Gráfica 4.3**

La tabla 4.4 muestra los valores máximos y mínimos de carga capacitiva teóricamente admisible  $C_{2t}$  para cada valor inductivo y con ello definimos la resistencia de frente respectivo.

Tabla 4.4. Resistencias de frente máxima y mínima admisibles obtenidos a partir de las curvas que corresponde al límite superior e inferior de  $R_1$  con el límite de la zona de amortiguamiento.

$L(\mu H)$	$C_{2t}(pF)$	$R_{1m\max}$	$L(\mu H)$	$C_{2t}(pF)$	$R_{1m\min}$
1	67624.8	8.3	1	17505.7	15.4
5	11913.6	41.6	5	3382.7	77.2
<b>10</b>	<b>5869.4</b>	<b>83.2</b>	<b>10</b>	<b>1684.2</b>	<b>154.4</b>
<b>50</b>	<b>1160.3</b>	<b>415.8</b>	<b>50</b>	<b>335.7</b>	<b>772.2</b>
100	579.3	831.6	100	167.8	1544.3

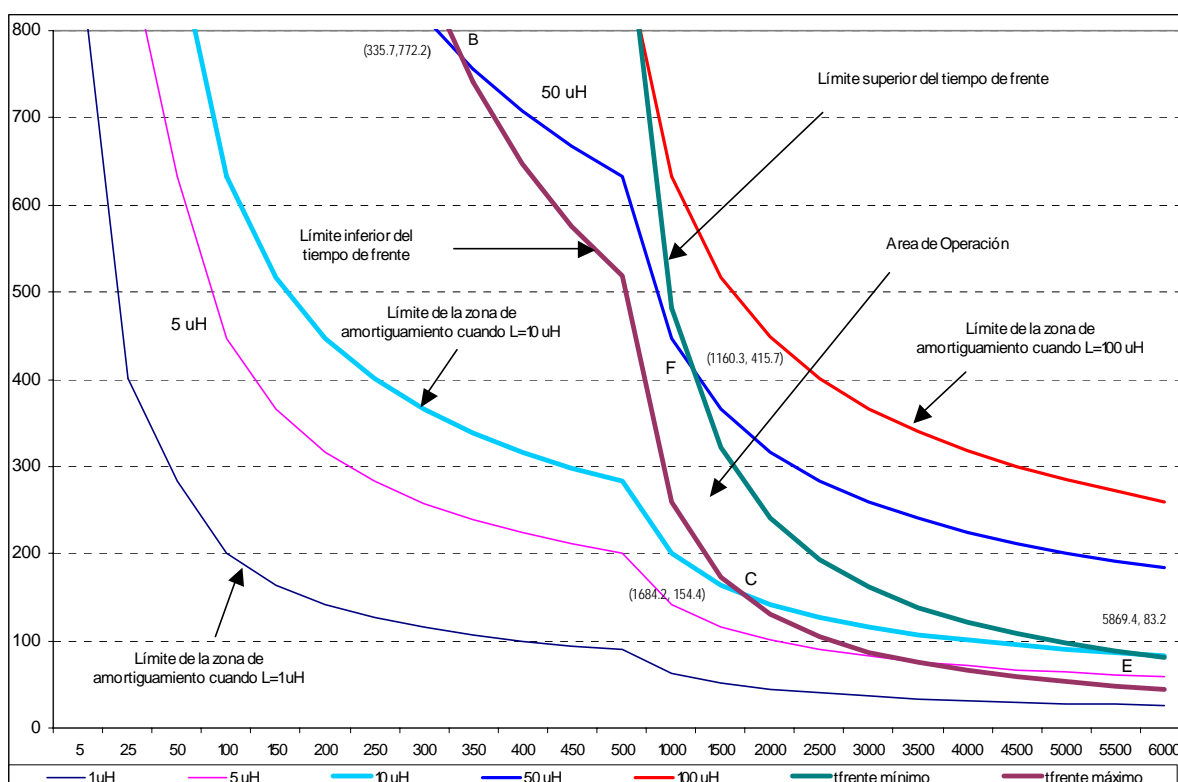
Para hallar la máxima carga capacitiva experimentalmente admisible  $C_{2m}$ ; es preciso conocer la capacidad básica del circuito  $C_{2g}$  o sea la capacitancia equivalente sin incluir el objeto bajo prueba. Si no consideramos la capacitancia del divisor de

tensión y despreciando la capacitancia parásita del circuito ( $C_{2g}$  igual a cero),

entonces  $C_{2m}$  será igual a  $\frac{C_{2t}}{2}$ .

Es decir si  $C_{2t} = 10000$  pF obtenemos  $C_{2m} = 5000$  pF.

La gráfica 4.4 presenta una mejor presentación para  $C_{2m}$  de 0 a 5000 pF.



Gráfica 4.4

#### 4.4.6 Cálculo de los parámetros del circuito Marx, constantes de tiempo y eficiencia.

Finalmente con la ayuda de las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 y la gráfica 4.4 obtenemos la resistencia de frente equivalente del generador para cada valor  $C_2$  y las constantes de tiempo de cola y frente respectivamente, usando las siguientes ecuaciones:

Para las constantes del tiempo de frente y cola:

$$t_2 = R_1 \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \mu s, \quad t_1 = R_2 (C_1 + C_2) \mu s,$$

y sus respectivas tiempos:  $t_f = 3.2431 t_2 \mu s,$   $t_c = 0.693 t_1 \mu s.$

Los cuadros 4.2 y 4.3 muestran los valores de la resistencia de frente  $R_f$  para el generador y para cada etapa.

Cuadro 4.2

Resistencia de frente equivalente del Generador de Impulso					
$C_1 (\mu F)$	$R_1$	$r_1$	$r_2$	$t_f$	$t_c$
1486	175	70.6	0.3	0.8	48.9
1529	170	70.6	0.3	0.8	49.0
1576	165	70.6	0.3	0.8	49.0
1625	160	70.7	0.3	0.8	49.0
1678	155	70.7	0.3	0.8	49.0
1786	150	70.7	0.3	0.9	49.0
1912	145	70.7	0.3	0.9	49.0
2051	140	70.7	0.3	0.9	49.0
2207	135	70.8	0.3	1.0	49.0
2381	130	70.8	0.3	1.0	49.1
2576	125	70.8	0.3	1.0	49.1
2797	120	70.9	0.3	1.1	49.1
3048	115	70.9	0.3	1.1	49.1
3333	110	71.0	0.4	1.2	49.2
3661	105	71.0	0.4	1.2	49.2
4040	100	71.1	0.4	1.3	49.3
4482	95	71.2	0.4	1.4	49.3
5000	90	71.3	0.4	1.4	49.4
5614	85	71.4	0.5	1.5	49.5
5869	83.2	71.4	0.5	1.6	49.5

Cuadro 4.3

Resistencia de frente por etapa	
$C_2 (\mu F)$	$R_2$
1486	17.5
1529	17
1576	16.5
1625	16
1678	15.5
1786	15
1912	14.5
2051	14
2207	13.5
2381	13
2576	12.5
2797	12
3048	11.5
3333	11
3661	10.5
4040	10
4482	9.5
5000	9
5614	8.5
5869	8.3

#### 4.5 Característica de diseño del Generador de Impulso

Los valores de los parámetros del modelo a escala del generador de impulso definen las características técnicas de acuerdo al cuadro 4.4:

Cuadro 4.4

Parámetros del generador de impulso		por etapa	10 etapas
Tensión de carga (V)	$U_0$	640	6400
Capacidad de Impulso	$C_1 (\mu F)$	4	0.4
Energía Disponible	E (J)	8.192	81.92
Resistencia de Carga	$R_f (\Omega)$	640	6400
Resistencia de frente	$R_f (\Omega)$	9 - 17.5	90 - 175
Resistencia de Cola	$R_c (\Omega)$	17.59	175.93

Hallemos la ecuación de onda de impulso que gobernará la tensión generada resultante en función del tiempo usando los parámetros determinados en el cuadro 4.4

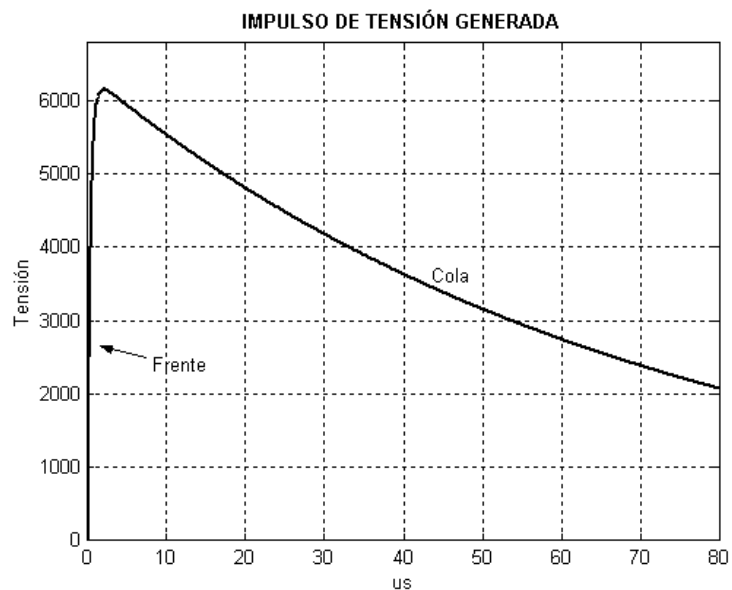
Escogemos que el valor de  $R_1$  es  $110 \Omega$ ,  $C_2 = 3333 \text{ pF}$ ,  $t_1 = 71.0 \mu\text{s}$  y  $t_2 = 0.4 \mu\text{s}$ .

La tensión del generador es  $U_0 = 6400 \text{ V}$ .

Además  $R_2 = 175.93 \Omega$  y  $C_1 = 0.4 \mu\text{F}$ .

$$\text{Resultando: } U_2(t) = \frac{6400 * 175.93 * 0.4 * 10^{-6}}{(71 - 0.4) * 10^{-6}} \left[ e^{-\frac{t}{71}} - e^{-\frac{t}{0.4}} \right] = 6379.33 \left[ e^{-\frac{t}{71}} - e^{-\frac{t}{0.4}} \right] \text{ V.}$$

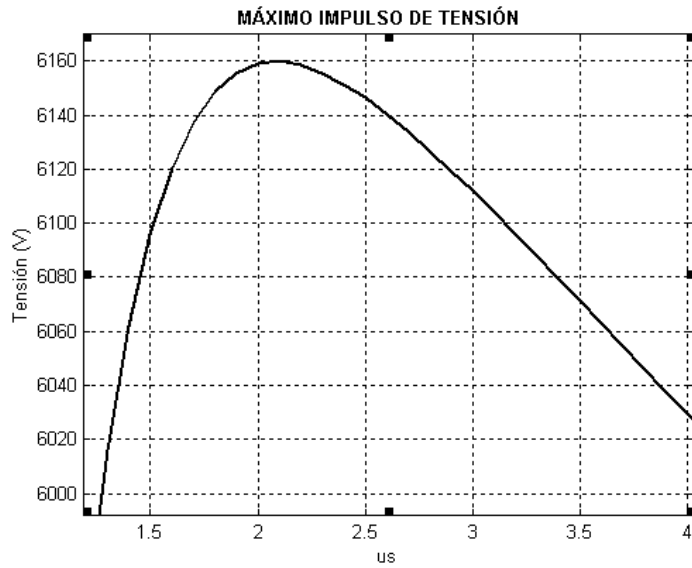
Simulando en Matlab obtenemos el impulso de tensión generada:



Amplíemos la onda generada en Matlab y observamos que la tensión máxima es:

$$U_{\max} = 6159.93 \text{ V.}$$



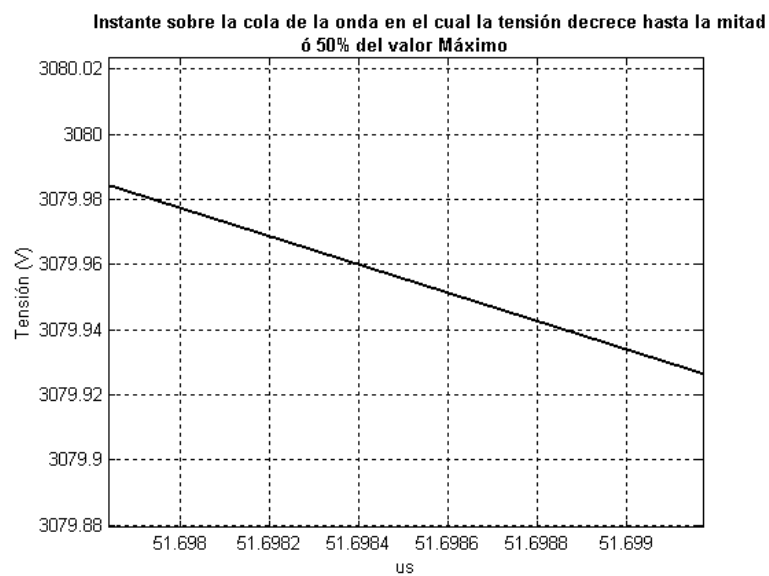


Comparemos con los cálculos teóricos:

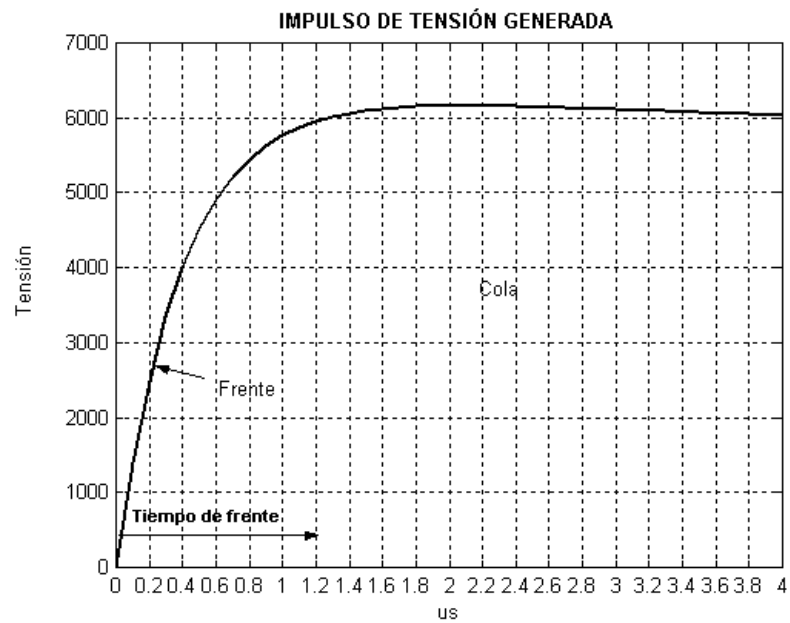
La tensión máxima de acuerdo a la ecuación 3.32 es:  $U_2(t_{\max}) = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}}$

Entonces:  $U_{\max} = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = \frac{6400 * 175.93 * 0.4}{71} \left( \frac{71}{0.4} \right)^{\frac{0.4}{71 - 0.4}} = 6159.6 \text{ V}.$

El tiempo de cola teóricamente es  $t_c = 0.693 t_1 = 49.17 \mu\text{s}$ .



Ampliamos la gráfica a fin de observar el tiempo de frente y comparemos con el valor teórico del tiempo de frente  $t_f = 3.2431 t_2 = 1.18 \mu\text{s}$ .



Observamos es casi igual a lo obtenido por cálculos.

## CAPÍTULO V SIMULACIÓN APLICADO DEL DISEÑO ELÉCTRICO A ESCALA

En este capítulo se desarrolla la simulación de nuestro modelo de circuito tipo Marx usando el Software ATP (Alternative Transients Program) para reproducir la onda de impulso.

El programa ATP es usado para la simulación de fenómenos transitorios y electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia mediante la resolución de ecuaciones algebraicas y diferenciales ordinarias, que están asociadas a la interconexión de componentes en redes, permitiendo editar nuestro modelo usando componentes predefinidos.

La investigación a sido orientada para el modelamiento del circuito y la explicación de su funcionamiento y comportamiento mediante el programa ATP.

El circuito simulador se sujetó a diversas iteraciones, ajustando los valores de la capacitancia de carga para lograr una salida aproximadamente igual al de un generador real.

### 5.1 Formato para los datos misceláneos

DELTAT: paso de tiempo empleado para la integración numérica, en segundos.

TMAX: tiempo total de simulación, en segundos.

Sí TMAX>0  $\Rightarrow$  simulación del estado transitorio y estacionario.

Sí TMAX<0  $\Rightarrow$  simulación del estado estacionario.

XOPT: parámetro que indica la forma que deben introducirse los valores inductivos

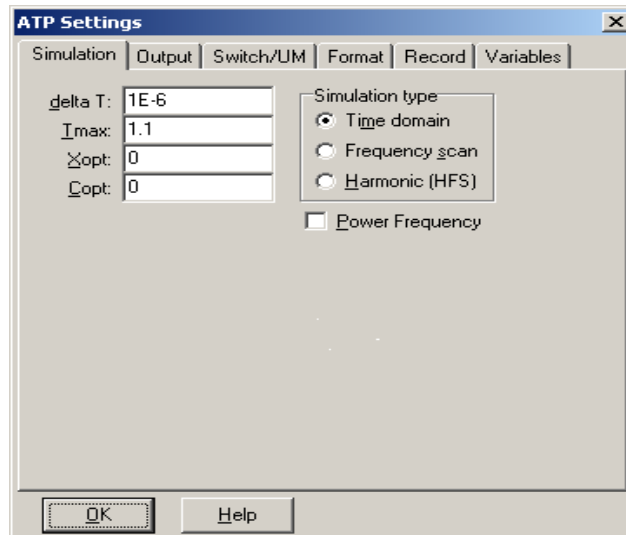
del circuito: Sí XOPT=0 ó blanco  $\Rightarrow$  L (en mH).

Sí XOPT=f (>0)  $\Rightarrow$   $wL = 2 \pi fL$  (en  $\Omega$ ).

$\underline{C}OPT$ : parámetro que indica la forma en que deben introducirse los valores

capacitivos del circuito:      Si  $\underline{C}OPT = 0 \Rightarrow C$  (en  $\mu F$ ),

Si  $\underline{C}OPT = f (>0) \Rightarrow \omega C = 2 \pi f C$  (en  $\mu mhos$ ).



## 5.2 Modelo de Interruptores usados en el programa ATP

Los tipos de interruptores que se ha empleado para modelar nuestro circuito son los interruptores controlados por tiempo y por tensión.

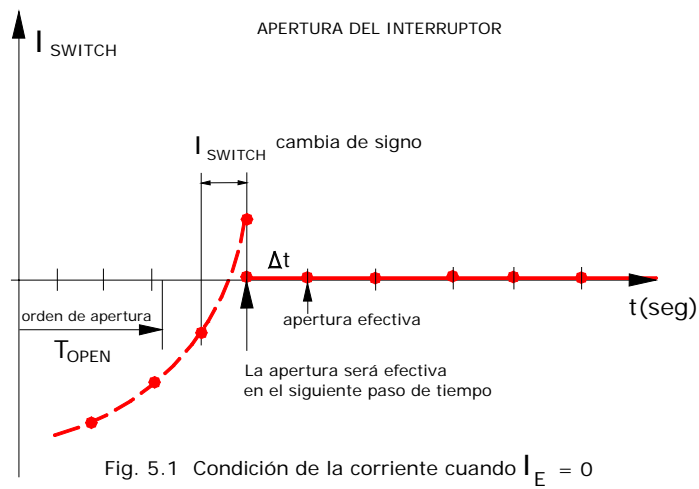
### 5.2.1 Interruptor controlado por tiempo (El cierre y la apertura son controlados por el tiempo y la corriente respectivamente)

Inicialmente el interruptor es abierto a menos que  $T_{CLOSE} < 0$ . El interruptor cierra en  $t = T_{CLOSE}$  y luego intenta abrir de nuevo en  $t > T_{OPEN}$  cada vez que la condición de la corriente es satisfecha.

Esta condición adicional de apertura depende del valor  $I_E$  (margen de corriente), figura 5.1

a) Sí  $I_E = 0$  (margen de corriente nula)

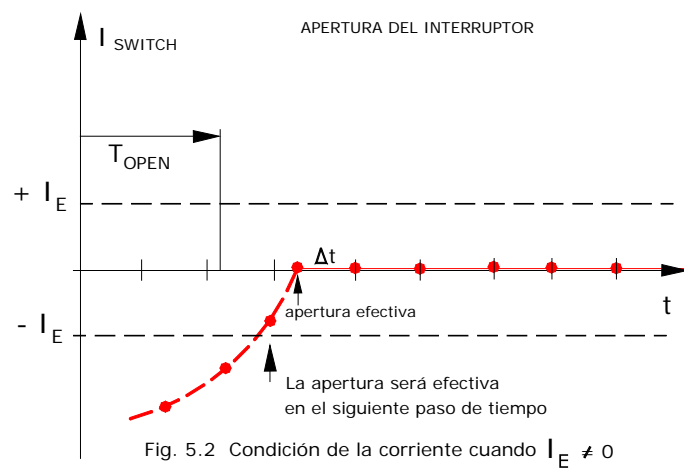
El interruptor abre luego del primer paso por cero de la corriente. El interruptor abrirá en  $t > T_{OPEN}$  cuando la corriente por el interruptor  $i_{SWITCH}$  tienda a cero o cambie de signo. El interruptor abrirá en el siguiente paso de tiempo (o sea que habrá un retardo por lo menos un DELTAT entre el real paso por cero y la apertura efectiva del interruptor), Figura 5.1



Después de una apertura exitosa, el interruptor quedará abierto permanentemente.

b) Si  $I_E \neq 0$  (margen de corriente establecida)

El interruptor abrirá en  $t > T_{OPEN}$  tan pronto cuando la  $|i_{SWITCH}| < I_E$ , figura 5.2



Después de una apertura exitosa, el interruptor quedará abierto permanentemente.

**Parámetros:**

$T_{CLOSE} = T-cl$ : Tiempo de cierre del interruptor en segundos. Si queremos cerrar el interruptor durante el estado estacionario o desde el comienzo de la simulación poner  $T_{CLOSE} < 0$ .

$T_{OPEN} = T-op$ : Tiempo de apertura del interruptor en segundos que depende de la condición adicional de la corriente.

$I_E = I_{mar}$ : Margen de corriente  $I_E$  en [A].

### 5.2.2 Interruptor controlado por Tensión (el cierre y la apertura es controlado por la tensión y la corriente respectivamente)

Inicialmente el interruptor es abierto y conducirá cuando  $t > T_{CLOSE}$ , siempre que la tensión a través del interruptor supere al valor especificado por el usuario  $V_{FLASH}$ .

Después que el interruptor ha sido cerrado, transcurre un tiempo de retardo  $T_{DELAY}$  y luego abre otra vez de acuerdo a la siguiente regla:

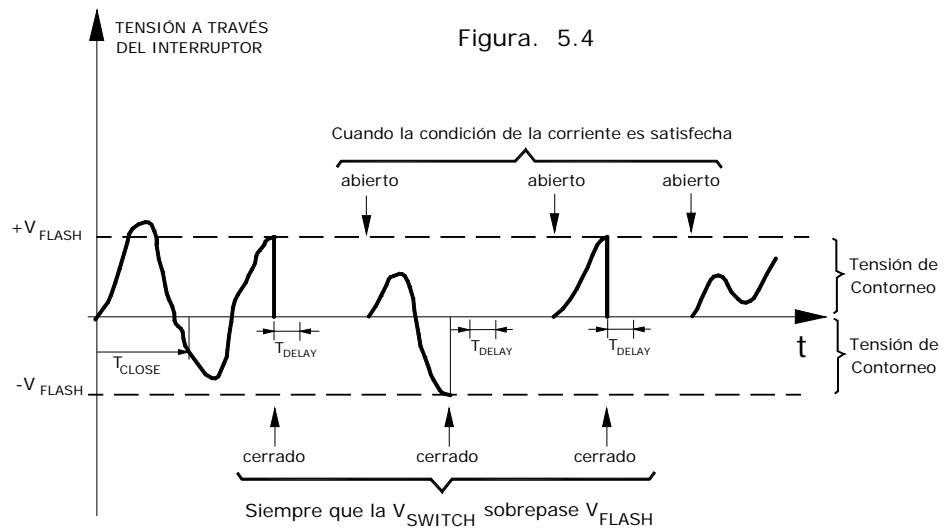
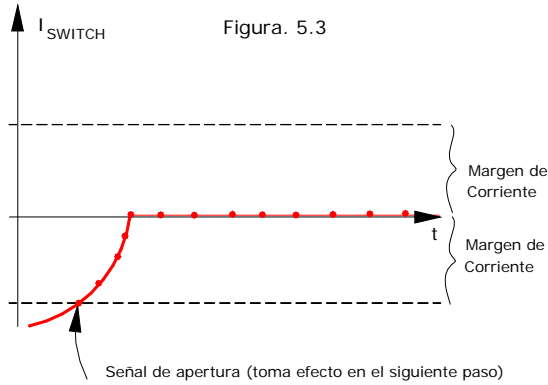
El interruptor abre cuando  $T_{CLOSE} > T_{DELAY}$ , si  $I_{SWITCH} < I_E$ . Si  $I_E = 0$ , el interruptor abrirá tan pronto cuando la  $I_{SWITCH}$  cambie de signo o tienda a cero.

Una aplicación inmediata de este tipo de interruptor es en el modelo de un explosor.

**Lógica de Operación**

El interruptor cierra cuando  $t > T_{CLOSE}$  siempre que la  $|V_{SWITCH}| > V_{FLASH}$ .

El interruptor abre sí  $T_{CLOSE} > T_{DELAY}$  sí  $|I_{SWITCH}| < I_E$



$T_{CLOSE} = T_{cl}$ : Tiempo de cierre del interruptor en segundos y dependerá de  $V_{FLASH}$ . Los interruptores controlados por flashover siempre abrirán durante el estado estacionario. Si el usuario pone  $T_{CLOSE} < 0$ , el programa lo cambiará automáticamente a  $T_{CLOSE} = 0$ .

$T_{DELAY} = T_{-de}$ : Tiempo mínimo en segundos que debe permanecer cerrado el interruptor después del flashover.

$I_E = I_{mar}$ : Margen de corriente en Amperios.

$V_{FLASH} = V_{-fl}$ : Tensión de contorneo en voltios.

### 5.3 Simulación del Circuito equivalente del Generador de Impulso de 10 etapas mediante el Programa Computacional ATP.

Para la evaluación Circuito equivalente del Generador de Impulso de 10 etapas usamos el siguiente circuito simplificado:

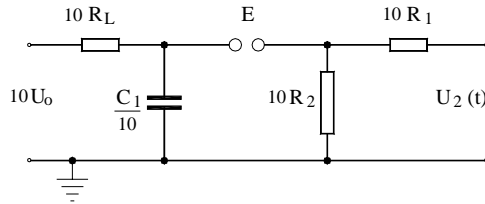


Fig. 5.5. Circuito Equivalente del generador de impulso analizado de 10 etapas.

Si la capacidad del condensador de impulso  $C_1$  por etapa es  $4 \mu\text{F}$  y de  $640 \text{ V}$  cada uno, entonces la capacitancia de impulso equivalente del generador será de

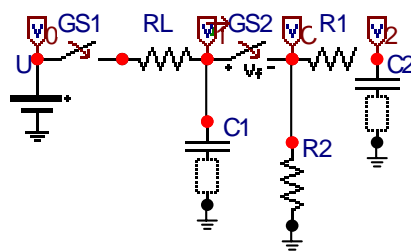
$$C_{1eq} = \frac{C_1}{10} = 0.4 \mu\text{F} \text{ y de } 6400 \text{ V; la tensión total de carga del generador es}$$

$$U = 10U_0 = 10 * 640 = 6400 \text{ V; donde } U_0 \text{ es la tensión de la fuente de alimentación.}$$

La resistencia de carga equivalente es  $R_{Ltotal} = 10 * R_L = 10 * 640 = 6400 \Omega$ ;  $R_L$  es por etapa.

Si la resistencia de frente y cola por etapa son  $R_1 = 11 \Omega$ ,  $R_2 = 17.593 \Omega$  respectivamente, entonces las resistencias  $R_{frente}$  y  $R_{cola}$  para el circuito equivalente serán:  $R_{frente} = 10R_1 = 10 * 11 = 110 \Omega$ ,  $R_{cola} = 10R_2 = 10 * 17.593 = 175.93 \Omega$ .

Simulemos con el programa ATP para hallar  $i(t)$  y la tensión  $U_2$  a través de la carga  $C_2$  tal como se muestra en el circuito:





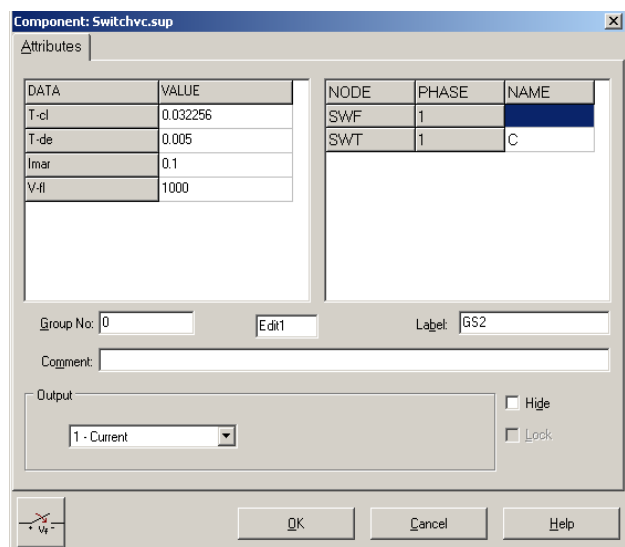
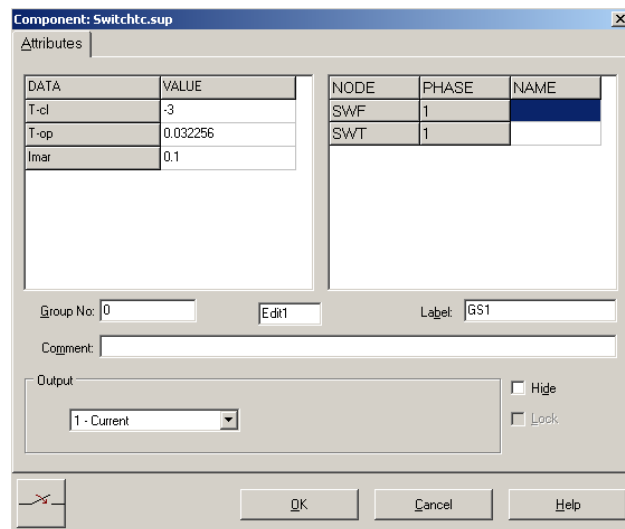
Sea la fuente  $U = 6400\text{ V}$ ,  $R_L = 6400\ \Omega$ ,  $C_1 = 0.4\ \mu\text{F}$ ;  $R_2 = 175.93\ \Omega$ ; Escogemos que el valor de  $R_1$  es  $110\ \Omega$  y que  $C_2 = 3333\ \text{pF}$ . La constante de tiempo de carga de  $C_1$  es:

$$\tau = 12.6R_L C_1 = 12.6 * 6400 * 0.4 * 10^{-6} = 32.256\ \text{ms}.$$

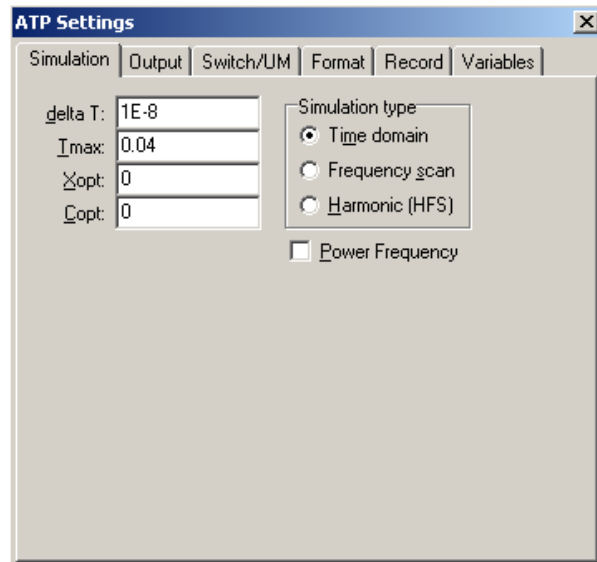
Los parámetros del interruptor GS1 son:  $T_{cl} = -3\ \text{seg}$ ;  $T_{op} = 32.256\ \text{ms}$ ;  $I_{mar} = 0.1\ \text{A}$ .

y del interruptor controlado por tensión GS2 (que es modelado como un explosor de esferas y son iniciadas por  $+v_f -$ ) son:

$$T_{cl} = 32.256\ \text{ms}; T_{-de} = 5\ \text{ms}; I_{mar} = 0.1\ \text{A}; V_{-fl} = 6000\ \text{V}.$$



Los parámetros de la simulación en donde se especifica el paso de tiempo, tiempo final de la simulación, tipo de simulación, etc, se muestra en el siguiente ventana:

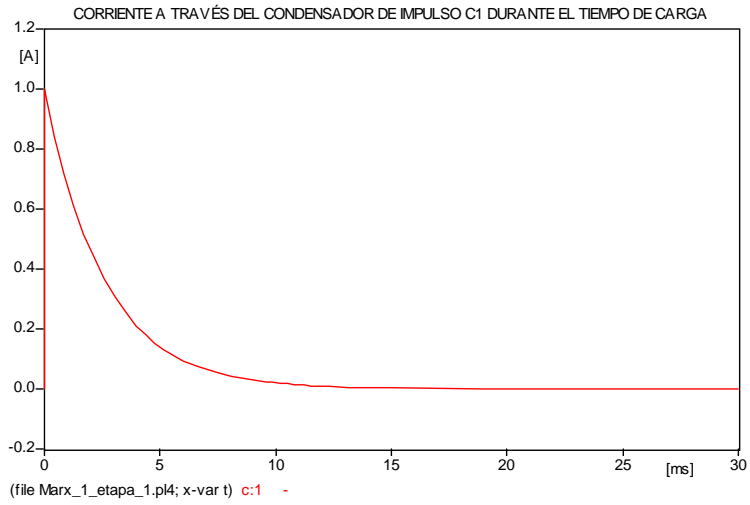


Después que todos de los componentes del modelo hayan sido conectados para representar un generador de impulso, simulemos con ATP y procedemos a explicar su funcionamiento:

Inicialmente el interruptor controlado por tiempo GS1 está normalmente cerrado de modo que el condensador de impulso  $C_1$  es cargado hasta su capacidad de tensión  $U = 6400\text{ V}$  por una fuente de tensión continua de entrada  $U$  a través de una resistencia de carga,  $R_L$  hasta un tiempo:

$$\tau = 12.6R_L C_1 = 12.6 * 6400 * 0.4 * 10^{-6} = 32.256\text{ ms (figura 5.6)}$$

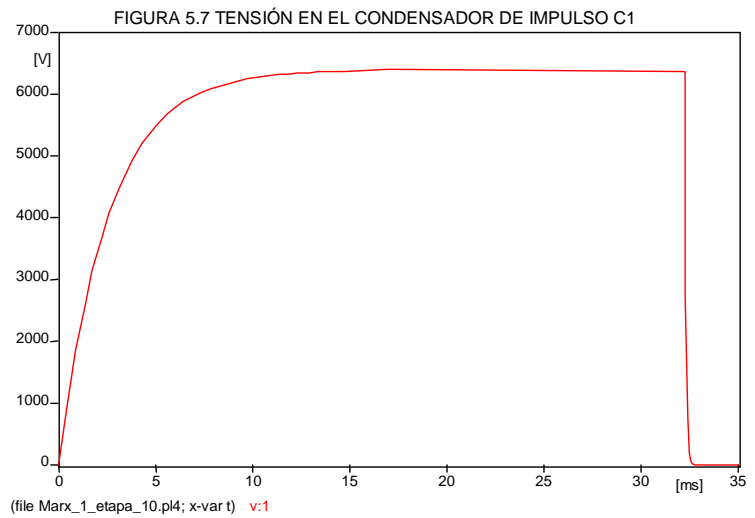
Figura 5.6



Verificándose que el tiempo que demora en cargarse completamente el condensador de impulso  $C_1$  será en  $\tau = 32.256$  ms, tal como se muestra en el cuadro 5.1 y figura 5.7:

Cuadro 5.1

Tiempo de carga del condensador C1	
$\tau$ (ms)	$V_1$ (V)
1	2069.50
3	4417.40
5	5492.30
8	6118.80
10	6271.30
12	6340.83
15	6381.75
20	6397.40
25	6399.72
30	6399.95
31	6399.97
32	6399.98
32.26	6399.98

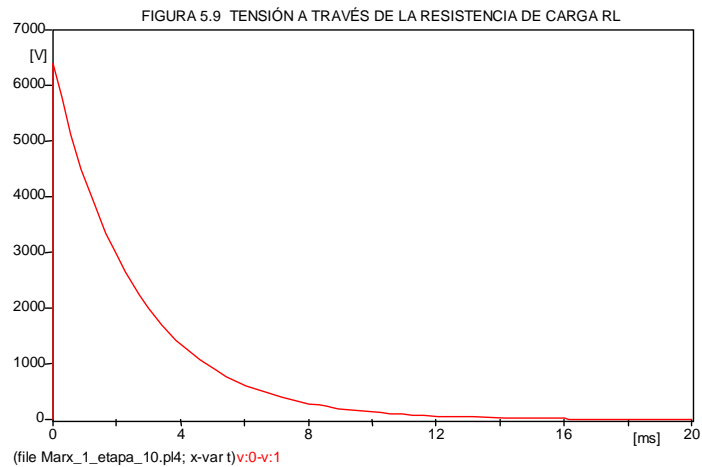
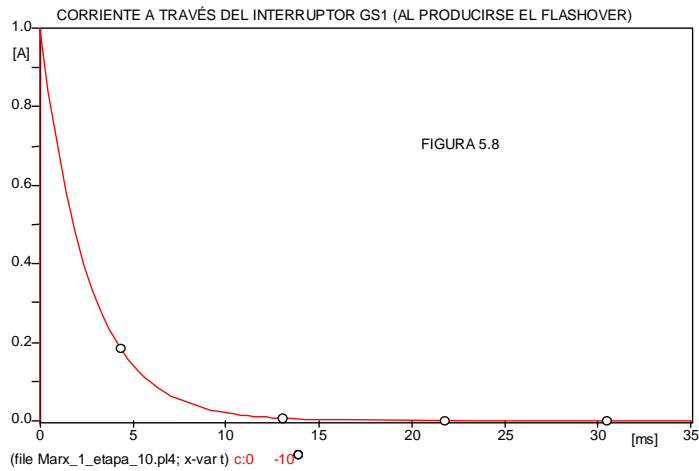


La corriente que pasa por  $R_L$  en el instante de cierre del interruptor GS1 es:

$$\frac{U}{R_L} = \frac{6400}{6400} = 1 \text{ A}$$

y la tensión a través de la resistencia de carga  $R_L$  se muestran en las

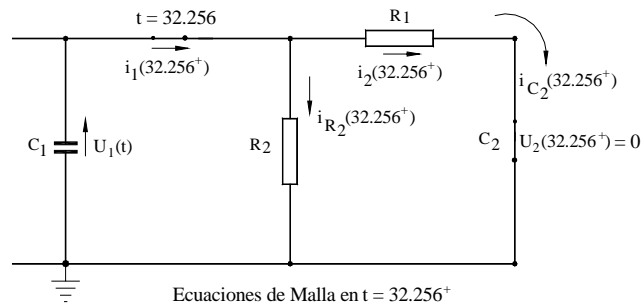
figuras 5.8 y 5.9:



Al finalizar el tiempo de carga, se apertura el interruptor GS1 e inmediatamente se cierra el interruptor GS2 descargando el Condensador  $C_1$  sobre las resistencias de frente ( $R_1$ ), de cola ( $R_2$ ) y sobre el objeto de prueba  $C_2$ .

Sabemos que la tensión en bornes de  $C_2$  no puede variar bruscamente, es decir cuando el interruptor GS2 se cierra en  $T_{cl} = 32.256 \text{ ms}$ ; el Condensador  $C_2$  se comporta como un cortocircuito  $[U_2(32.256^+) = 0]$  fluyendo el máximo de corriente de carga  $i_{C_2}(32.256^+)$  que disminuirá gradualmente hasta que  $C_2$  haya alcanzado su carga completa es decir  $U_2(t = t_{\max}) = U_{\max}$

Demostremos esto con el circuito mostrado abajo:



Del circuito se deduce que:

$$U_0 + \frac{1}{C_1} \int_{32.256}^t i_1(t) dt = R_2 i_1(t) - R_2 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} = R_2 i_1(t) - R_2 i_{C_2}(t) \quad (5.1)$$

En  $t = 32.256^+$  ms:

$$U_0 = R_2 i_1(32.256^+) - R_2 i_{C_2}(32.256^+) = R_2 [i_1(32.256^+) - i_{C_2}(32.256^+)] \quad (5.2)$$

De la ecuación 5.2 se deduce que:

$$i_{R_2}(32.256^+) = \frac{U_0}{R_2} = \frac{6400}{175.93} = 36.38 \text{ A.} \quad (\text{Figuras 5.10 y 5.11})$$

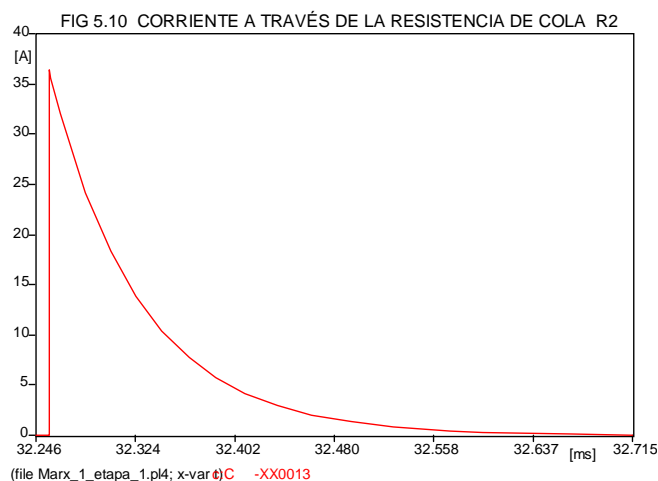
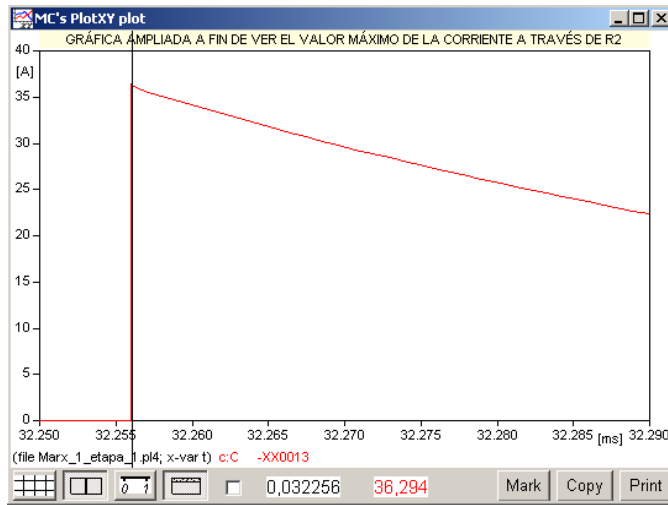


FIG. 5.11

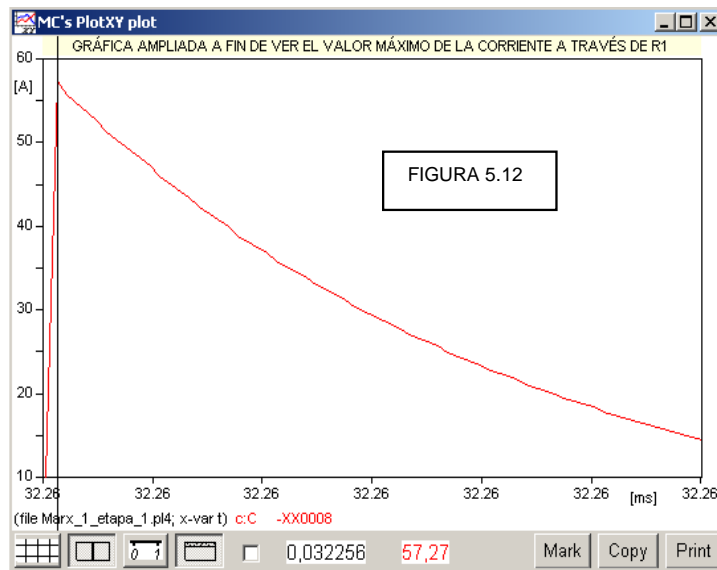


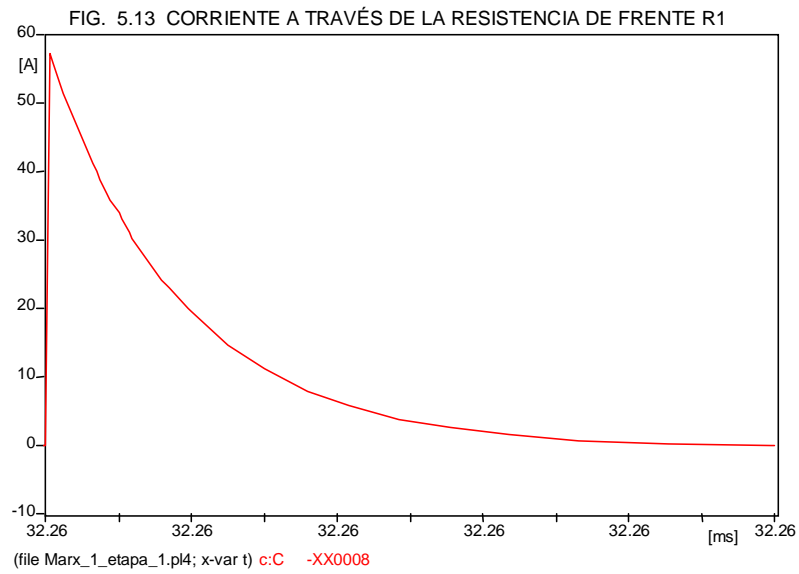
Por otro lado: 
$$U_0 + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1(t) dt = R_1 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + U_2(t) = R_1 i_{C_2}(t) + U_2(t) \quad (5.3)$$

Luego: 
$$U_0 = R_1 i_{C_2}(32.256^+) + 0 \quad ; \quad U_2(32.256^+) = 0$$

La tensión es inicialmente cero a través de  $C_2$  :

$$\Rightarrow i_{C_2}(32.256^+) = i_2(32.256^+) = \frac{U_0}{R_1} = \frac{6400}{110} = 58.18 \text{ A.} \quad (\text{figuras } 5.12 \text{ y } 5.13)$$

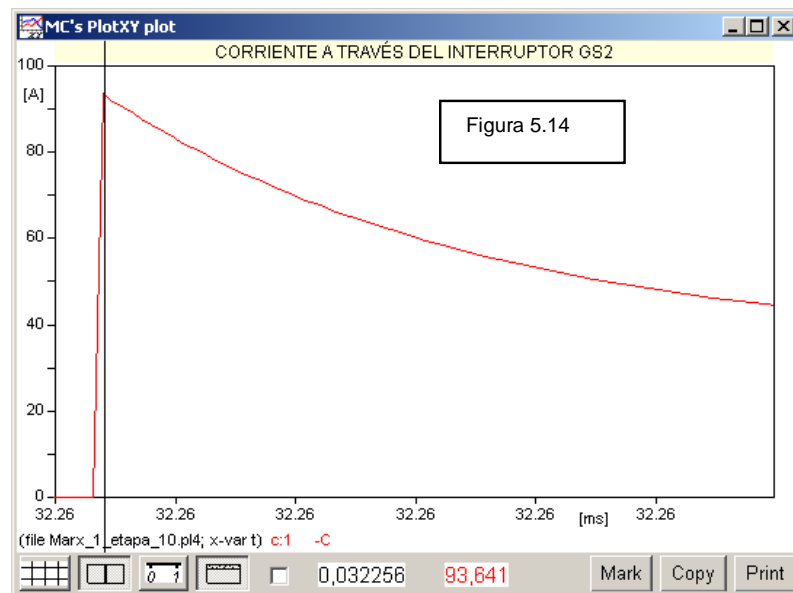


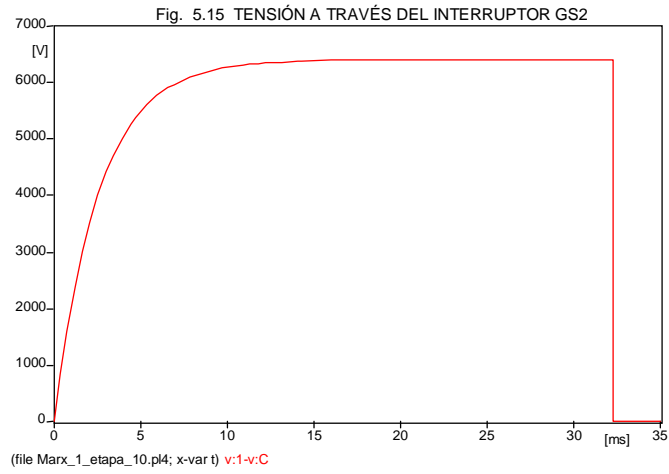


Por tanto la corriente a través del interruptor GS2 es:  $36.38+58.18=94.56$  A.

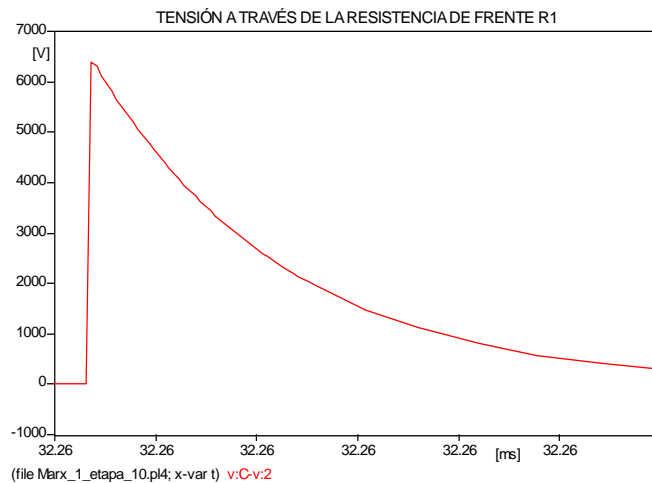
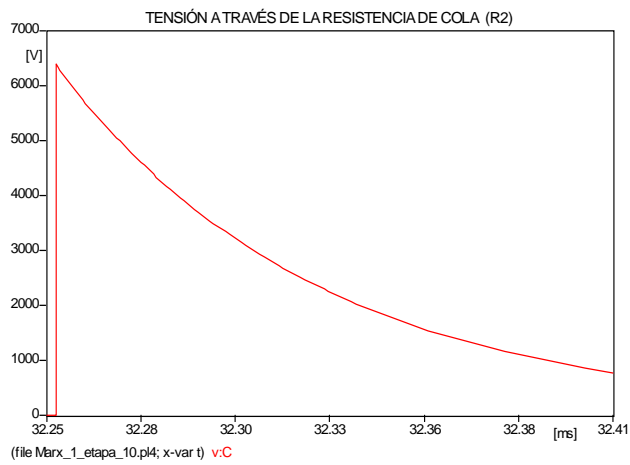
Simulando con el ATP obtenemos que la corriente es : 93.641 A

(figuras 5.14 y 5.15)

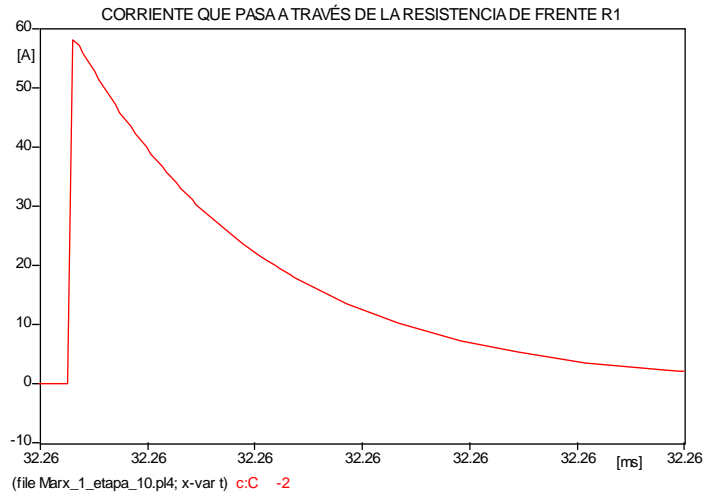




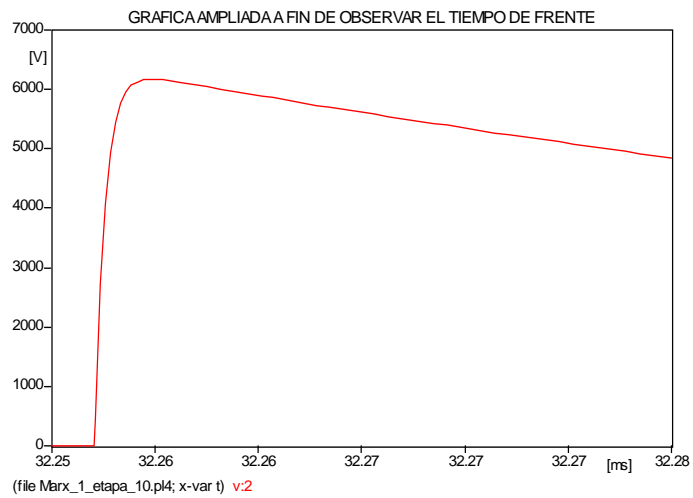
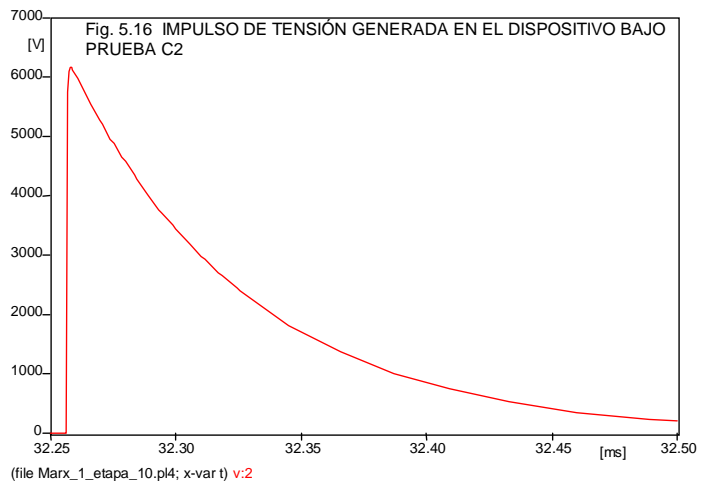
Finalmente,  $C_2$  se descarga hacia tierra a través de  $R_1$  y  $R_2$ , originando que la onda de tensión en bornes de  $C_2$  crece inicialmente, pasa por un máximo y luego decrece lentamente hasta llegar a cero, obteniendo así en la salida una onda de impulso de tensión  $U_2(t)$ . Figura 5.16





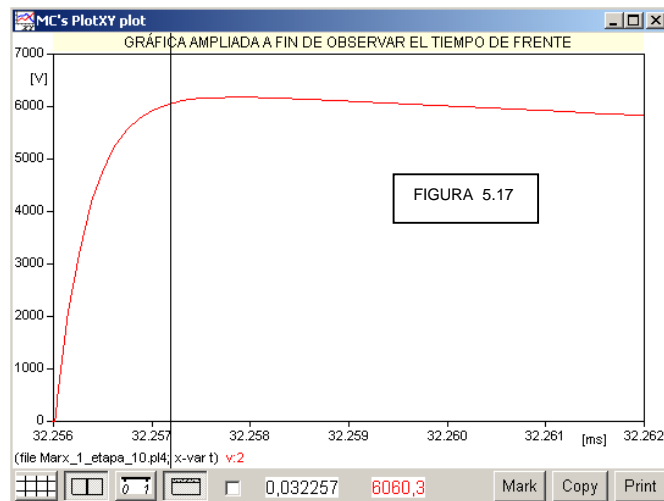


Mostremos gráficamente el impulso de tensión  $U_2(t)$  obtenido (figura 5.16).

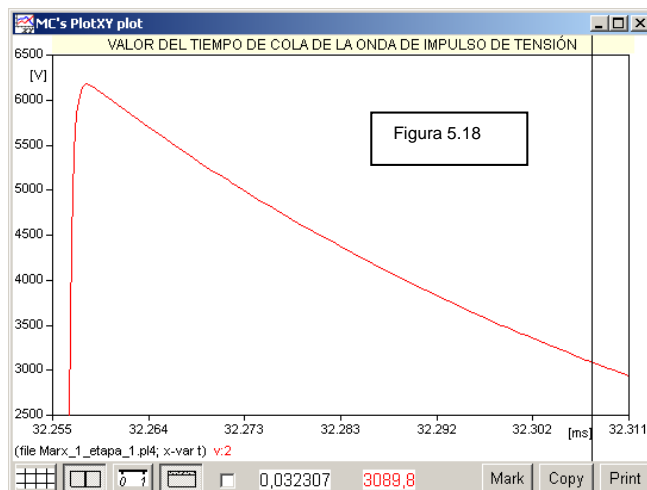


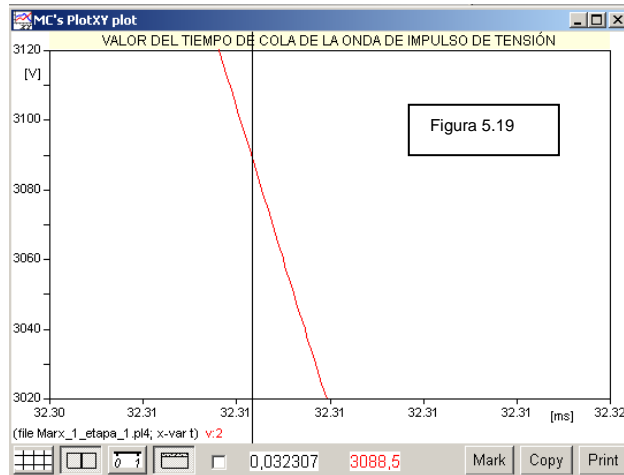
La constante de tiempo de frente o el tiempo que tarda en cargarse el capacitor  $C_2$  es,  $t_2 = \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 0.3636 \mu\text{s}$  (figura 5.17) y quedará sometido como máximo a la tensión  $U_{\text{max}}$

Por tanto el tiempo de frente es  $t_f = 3.2431 t_2 = 1.18 \mu\text{s}$



La constante de tiempo de cola o de descarga de  $C_2$  es  $t_1 = R_2(C_1 + C_2) = 70.958 \mu\text{s}$  y el tiempo de cola que es el intervalo de tiempo entre el origen  $0_1$  ( $t = 32.256^+ \text{ms}$ ) y el instante sobre la cola de la onda en el cual la tensión decrece hasta la mitad ó 50% del valor pico es:  $t_c = t_1 \ln 2 = 49.184 \mu\text{s}$  (figura 5.18 y 5.19)





Comparemos este valor calculado con lo que se obtiene en gráfica; Observamos que el tiempo de cola resulta ser:  $t_c = (32.307 - 32.256) \text{ ms} = 51 \mu\text{s}$

Sabemos que el valor de  $t_{\max}$  para el cual  $U_2(t)$  es máximo, es:

$$t_{\max} = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right) = \frac{70.958 * 0.3636}{70.958 - 0.3636} \ln \left( \frac{70.958}{0.3636} \right) = 1.93 \mu\text{s} \quad (5.4)$$

Una vez que el capacitor  $C_2$  a sido cargado al máximo potencial es decir:

$U_2(t_{\max}) = U_{\max}$  la energía almacenada será descargada a través de  $R_1$  y  $R_2$ .

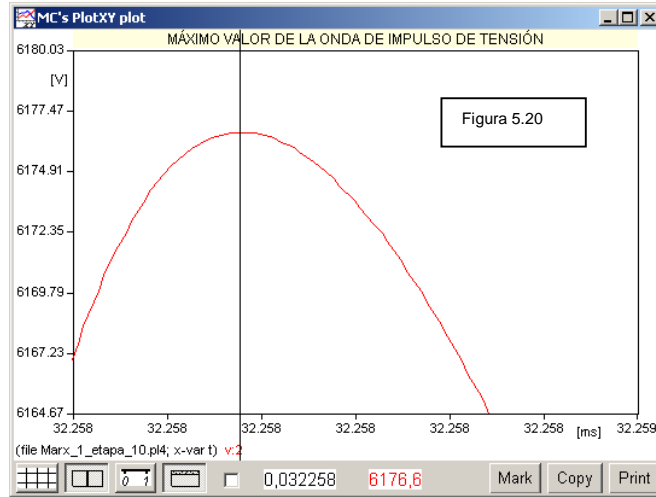
El valor máximo de  $U_2(t)$  será cuando  $t = t_{\max}$ ; reemplacemos este valor de

$$t_{\max} = 1.93 \mu\text{s}.$$

$$\text{Obtenemos: } U_2(t_{\max}) = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = 6177.06 \text{ V}$$

De acuerdo a nuestro resultado gráficamente la máxima tensión es 6176.6 V.

Observar Figura 5.20



Puesto que si la capacitancia almacena carga, la carga produce un campo eléctrico y la energía se almacena en el campo eléctrico.

Entonces la energía almacenada ( $w$ ) en  $C_1$  del Circuito equivalente del Generador de Impulso de 10 etapas cargada a una tensión  $U_0$  es:

$$W = \int_0^t v i dt = C_1 \int_0^{U_0} v dv = \frac{C_1 U_0^2}{2} = \frac{1}{2} C_1 U_0^2 = \frac{1}{2} (0,4 \times 10^{-6}) (6400)^2 = 8.192 \text{ joule.}$$

#### 5.4 Simulación del Generador de Impulso de 10 etapas con el Programa ATP.

A fin de no sobrepasar la tensión de carga de  $C_1$  por economía sabiendo que el material dieléctrico solo puede resistir cierta tensión, nos conduce diseñar el Generador de Impulsos por etapas.

El Generador de impulsos es un circuito múltiple ordenado y se compone de un conjunto de resistencias ( $R_1, R_2$ ) que controlan la forma del frente y cola de la onda, condensadores de impulsos  $C_1$  e interruptores  $GS_i$  que simulan ser explosores ( $F_s$ ).

El modelo que proponemos diseñar se compone de 10 etapas, cada etapa soporta un condensador de impulso y se conecta en paralelo con el interruptor  $GS_i$  y las resistencias  $R_1$  y  $R_2$

Los parámetros del circuito de un generador de 10 etapas son:

La fuente de alimentación de la instalación de impulso es de  $U = 640$  V.

Las resistencias de carga  $R_L$  debe ser de  $640 \Omega$  correspondiente a un arco de

$$\frac{U_2}{R_L} = \frac{6400}{10 * 640} = 1 \text{ A}; \text{ donde } U_2 \text{ es la tensión deseada (es decir 10 etapas).}$$

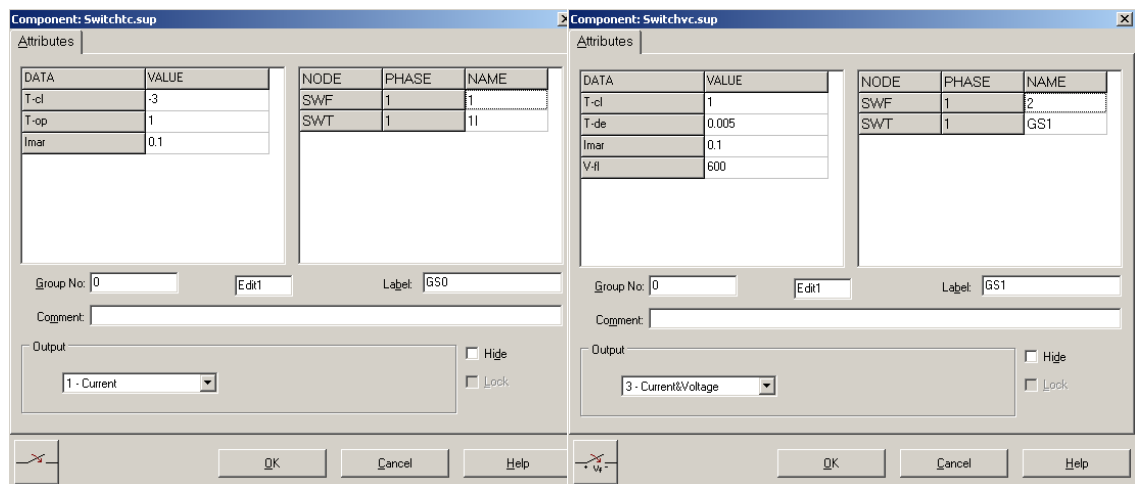
El condensador de impulso es de  $C_1 = 4 \mu\text{F}$  y su capacidad es de 640 V cada uno. El objeto que se someterá bajo prueba es  $C_2 = 3333 \text{ pF}$

Las resistencias de frente y cola por etapa son:  $R_{frente} = 11 \Omega$ ,  $R_{cola} = 17.593 \Omega$ ;

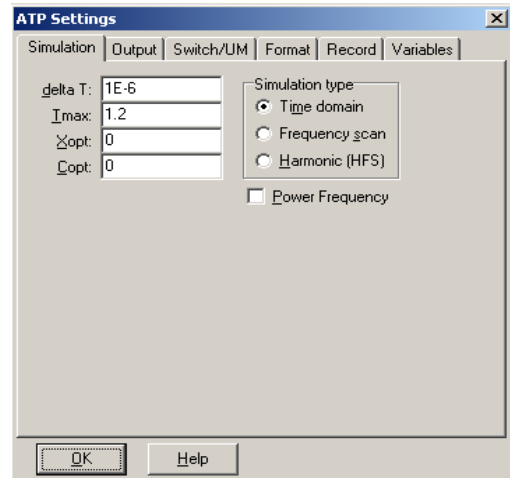
Los parámetros del interruptor GS0 son:  $T_{cl} = -3$  seg;  $T_{op} = 1$  s;  $I_{mar} = 0.1$  A.

y de los interruptores  $GS_i$ ;  $i = 1, \dots, 10$  son:  $T_{cl} = 1$  s;  $T_{-de} = 5$  ms;  $I_{mar} = 0.1$  A;

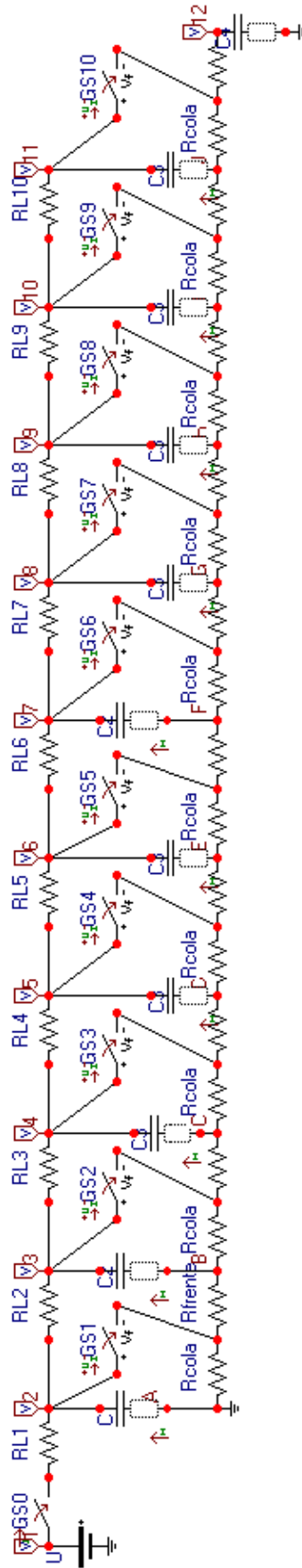
$V_{-fl} = 600$  V.



Los parámetros de la simulación se muestra en el siguiente ventana:



El esquema desarrollado del Generador Marx de 10 etapas se muestra en el circuito siguiente:



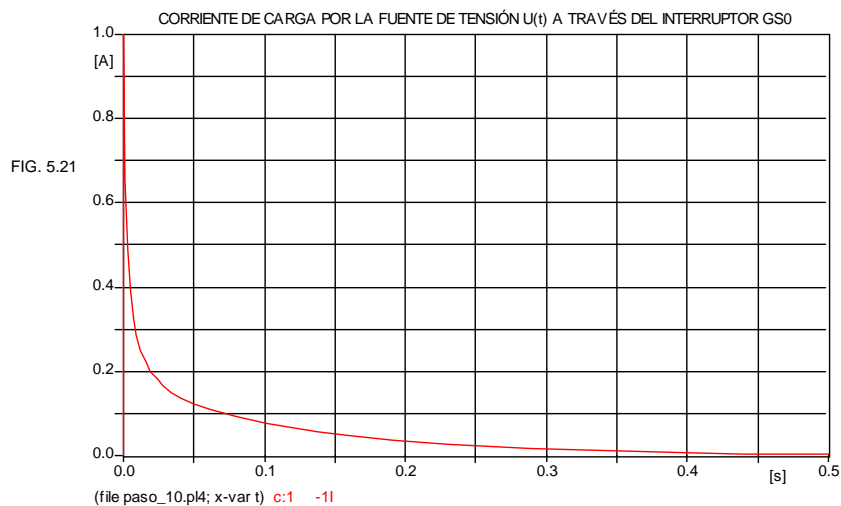
Después que todos de los componentes del modelo hayan sido conectados para representar un generador de impulso, simulemos con ATP y explicaremos su funcionamiento:

Los condensadores de impulso  $C_1$  de cada etapa son cargados en paralelo por una fuente de tensión continua a través de las resistencias de carga,  $R_{Li}$  a una tensión de  $U = 640 \text{ V}$  que es igual a la décima parte de la tensión total de prueba de manera que al final del período de carga los puntos indicados 2, 3, 4, ..., 11 estarán al potencial  $+U = 640 \text{ V}$  respecto a A, B, C, . . . H, I, que están al potencial de Tierra, ( $U = 0$ ).

La corriente que pasa por  $R_{Li}$  en el instante de cierre del interruptor GS0 que es:

$$\frac{U}{\sum_{i=1}^{10} R_L} = \frac{6400}{6400} = 1 \text{ A} \text{ y la tensión de carga de los condensadores } C_1 \text{ a través de las}$$

resistencias de carga  $R_{Li}$ ;  $i = 1, \dots, 10$ , se muestra en las figuras 5.21, 5.22 al 5.27 respectivamente:





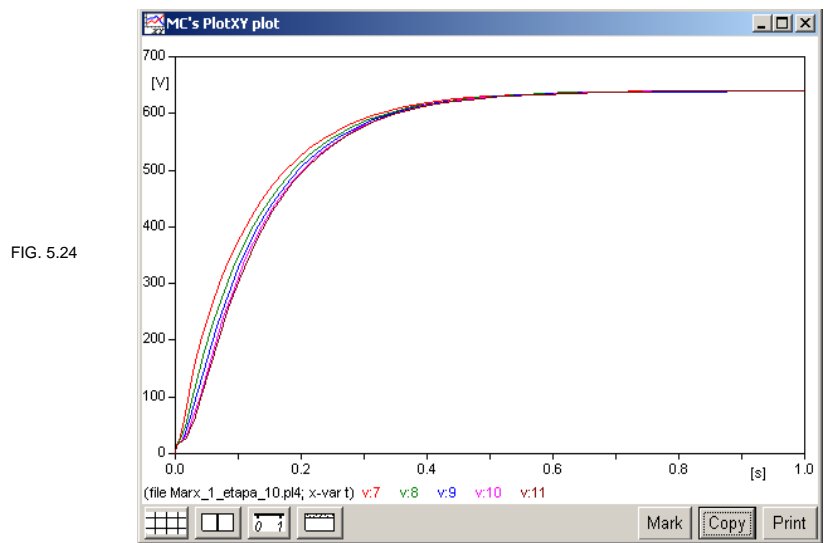
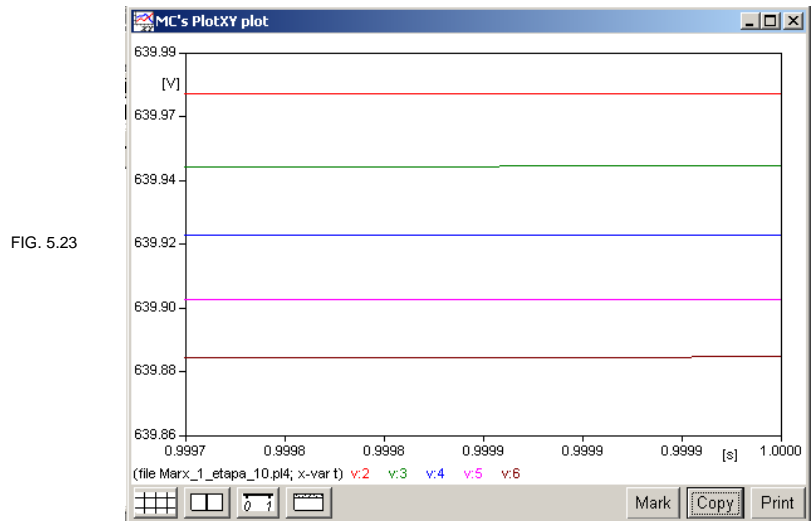
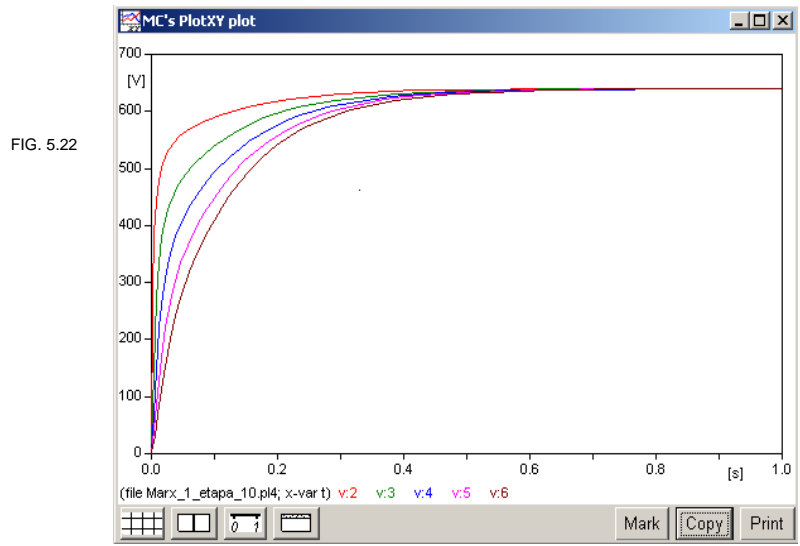


FIG. 5.25

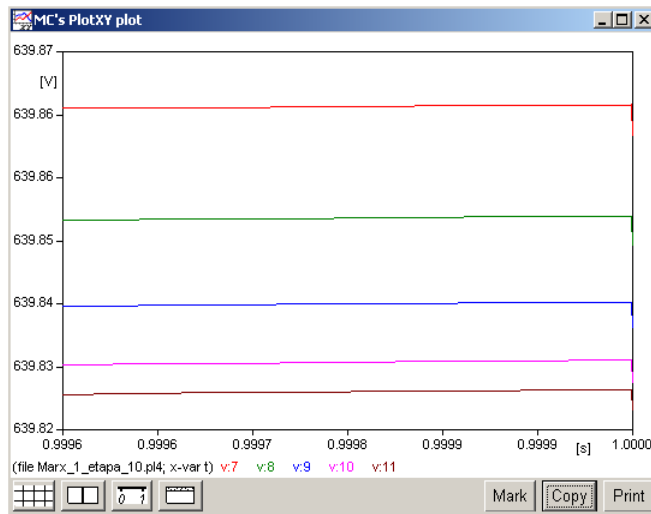


FIG. 5.26

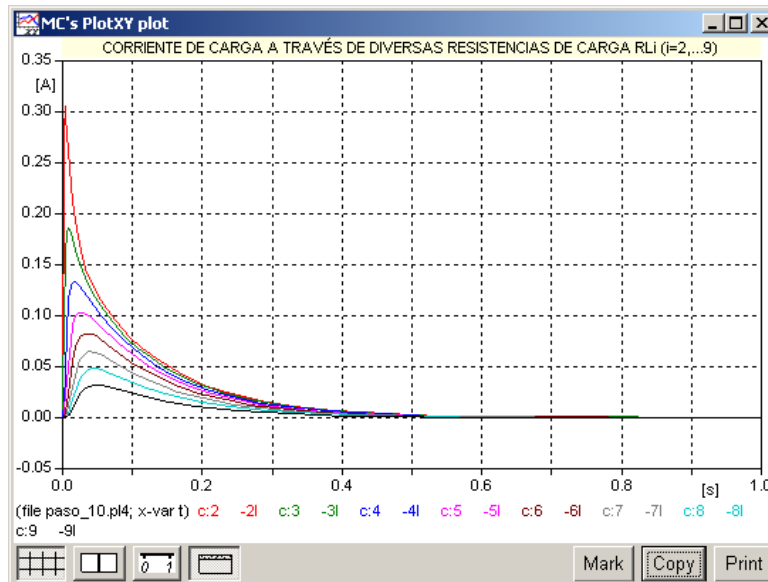
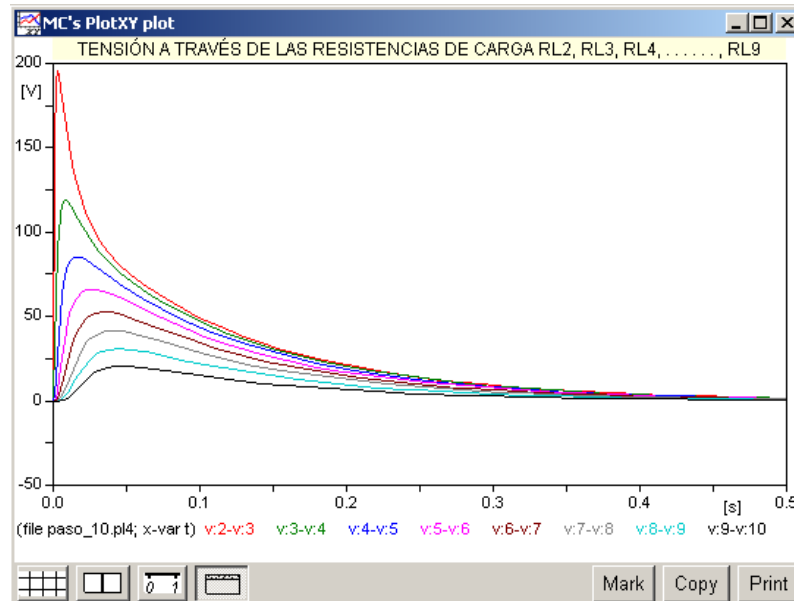


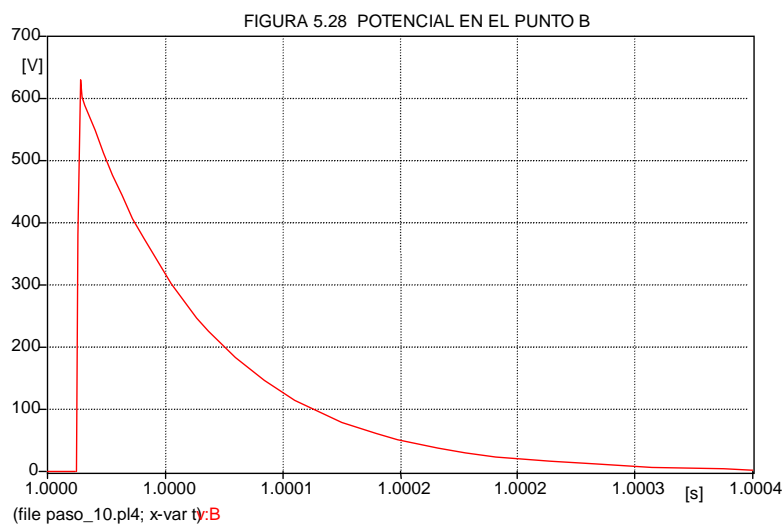
FIG. 5.27

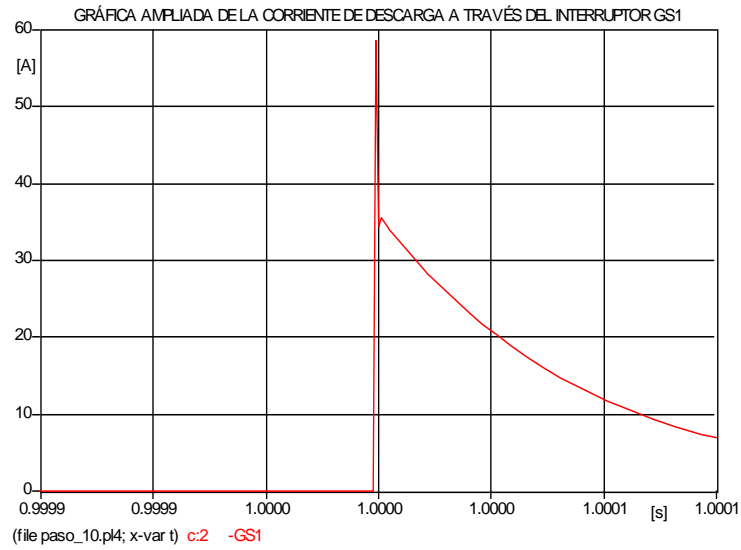


Cuando el nivel de carga apropiado ha sido alcanzado es decir al llegar la tensión al valor de la tensión disruptiva de los interruptores GS1,...,GS10, para la cual se ha ajustado, se produce la conmutación serie de los condensadores,  $C_1$  siendo la carga del primer condensador  $C_1$  transferida a la siguiente etapa a través de la resistencia de frente  $R_1$ .

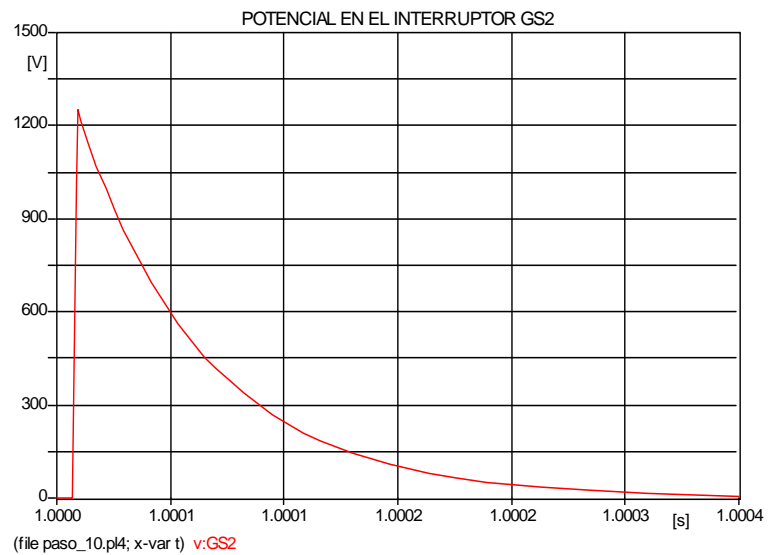
La descarga iniciada por el interruptor GS1, hace que los puntos B, C, D, E, ... , J se cargan al potencial  $-U_0 = -640 V$  siendo sostenidas por las resistencias  $R_2$  y  $R_1$ .

Figura 5.28



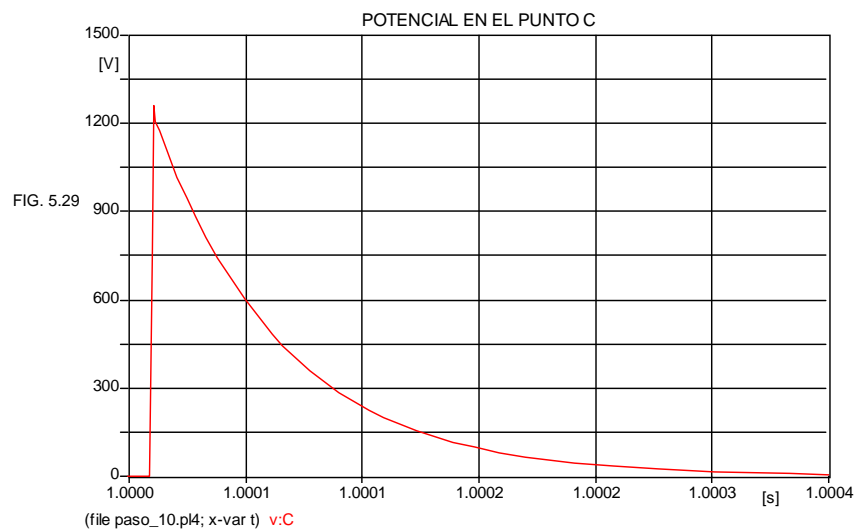


El punto 3 que continuaba en  $+U_0 = 640 \text{ V}$  sostenida por  $R_{L2}$ , produce en el interruptor GS2 un potencial  $(+U_0) - (-U_0) = 2U_0$  que inmediatamente produce su descarga poniendo en serie los dos  $C_1$  (de la primera y segunda etapa); transfiriendo la carga a la tercera etapa;

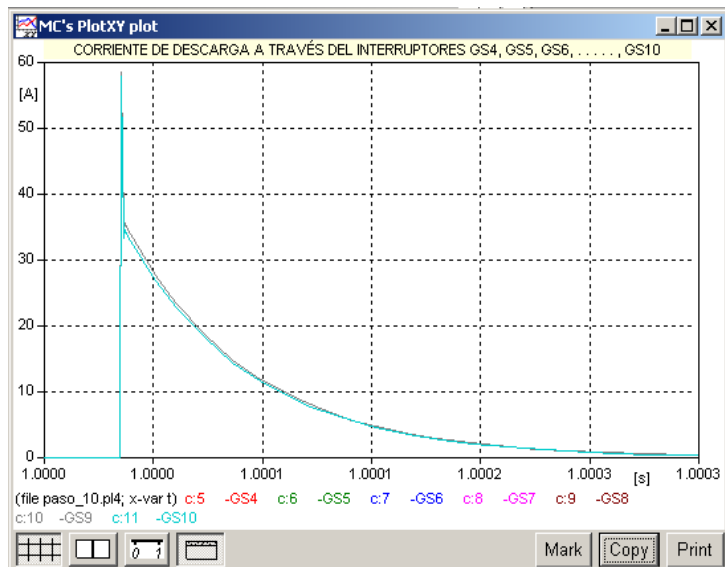
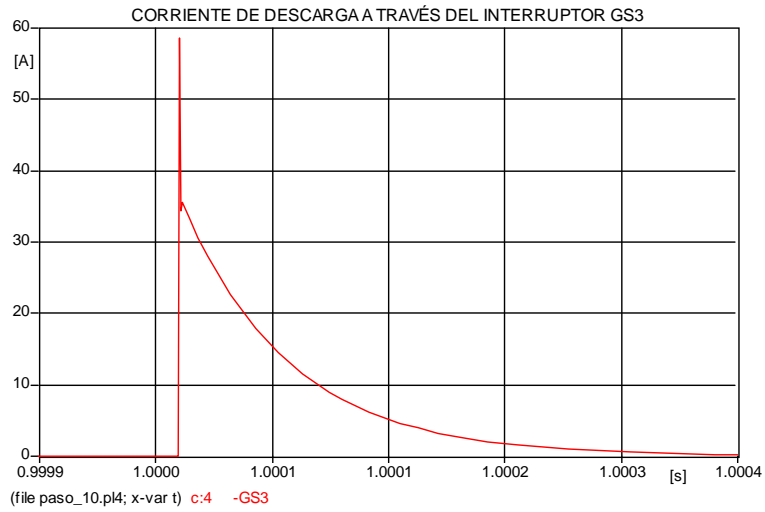
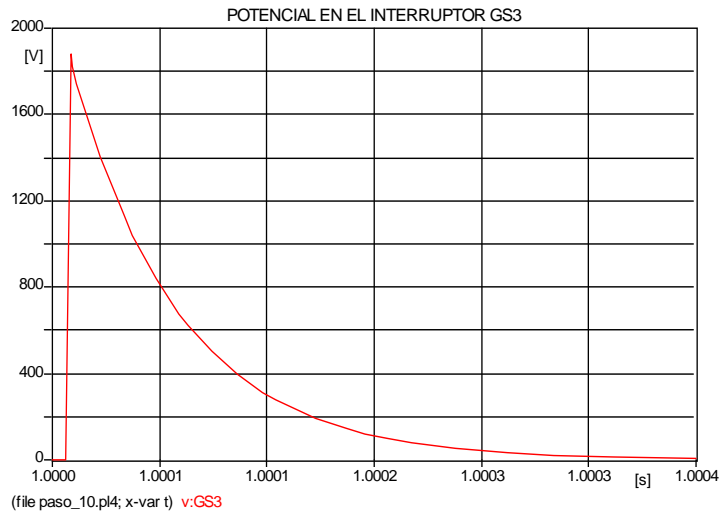


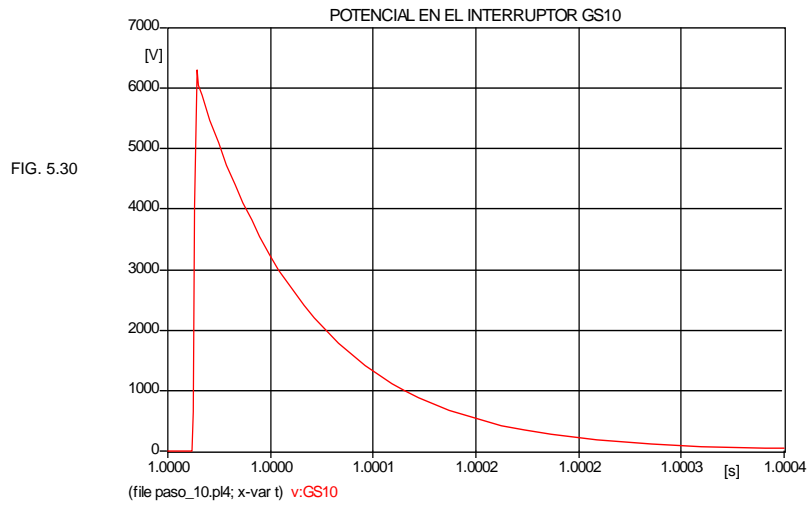


haciendo que los puntos C, D, E, ..., J se carguen al potencial  $-2U_0$ . Figura 5.29

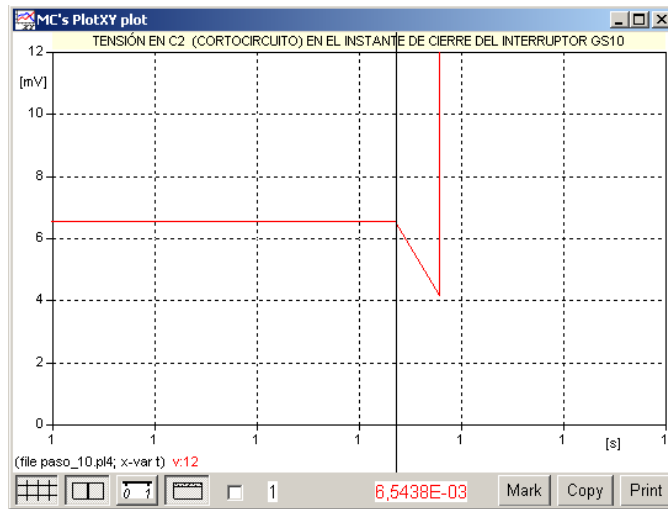


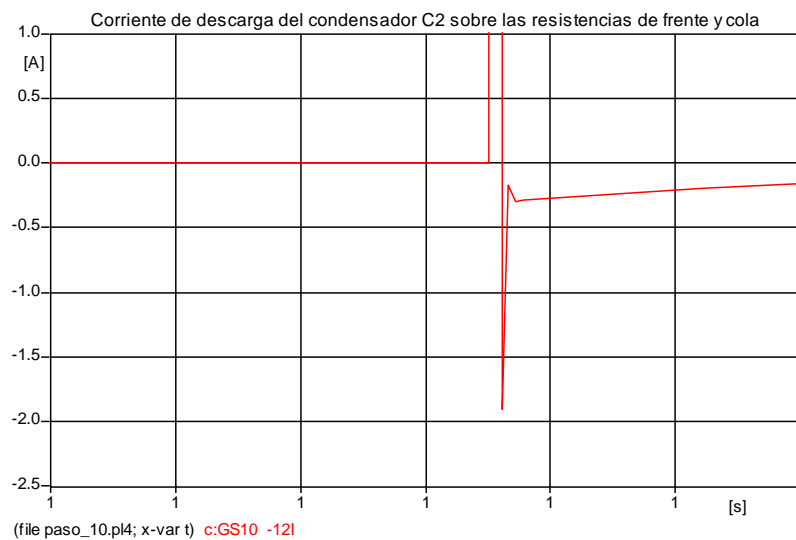
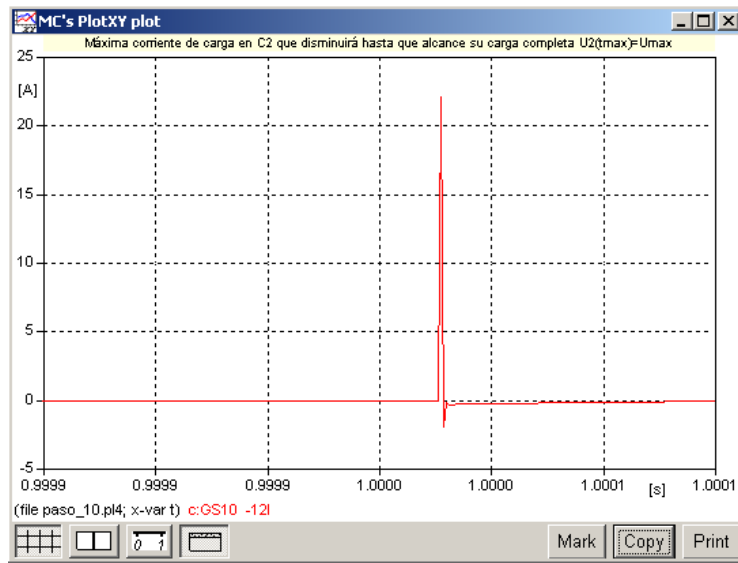
El punto 4 que continuaba con potencial  $+U_0$  y sostenida por  $R_{L3}$  origina en el interruptor GS3 un potencial  $(+U_0) - (-2U_0) = 3U_0$  que inmediatamente produce su descarga poniendo en serie los tres  $C_1$  (primera, segunda y tercera etapa); transfiriendo la carga a la cuarta etapa; produciéndose de ese modo, en las etapas siguientes la suma de las tensiones a los cuales los condensadores  $C_1$  fueron cargados, repitiéndose el mismo proceso con lo que se consigue multiplicar 10 veces la Tensión de Carga. Figura 5.30





Es decir cuando el interruptor GS10 cierra en  $T_{cl} = 1s$ , la tensión en  $C_2$  será  $[U_2(1^+) = 0]$  (cortocircuito) fluyendo la máxima corriente de carga  $i_{C_2}(1^+)$  que disminuirá gradualmente hasta que  $C_2$  haya alcanzado su carga completa es decir  $U_2(t = t_{max}) = U_{max}$

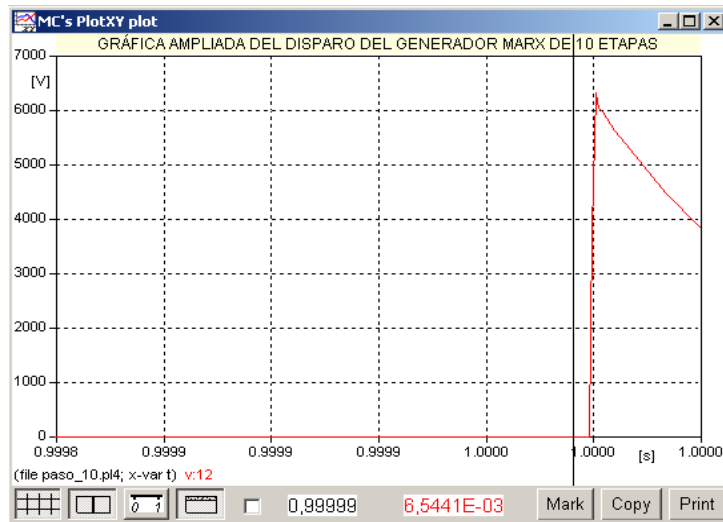
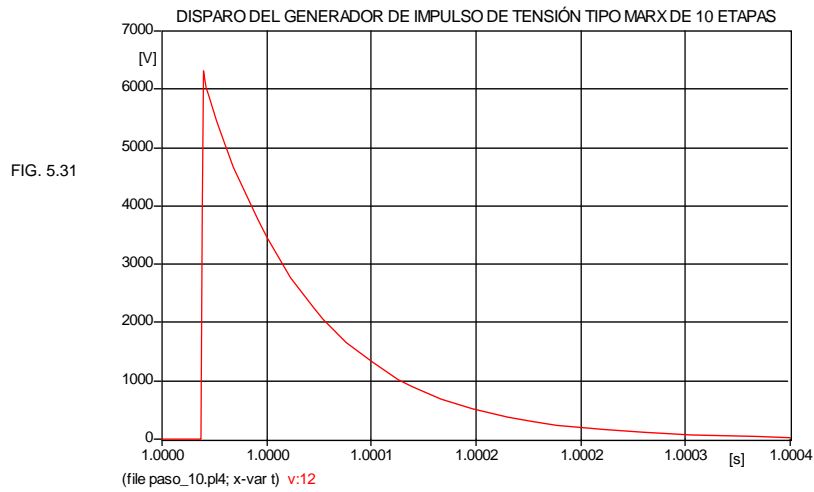




Finalmente,  $C_2$  se descarga hacia tierra a través de  $R_1$  y  $R_2$ , originando que la onda de tensión en bornes de  $C_2$  crece inicialmente, pasa por un máximo y luego decrece lentamente hasta llegar a cero, obteniendo así en la salida una onda de impulso de tensión  $U_2(t)$ . Fig. 5.31

Por tanto la onda de tensión que se produce en el dispositivo bajo prueba  $C_2$  es:





La constante de tiempo de frente o el tiempo que tarda en cargarse el capacitor  $C_2$

$$\text{es, } t_2 = 10 R_1 \left[ \frac{C_1 C_2}{\frac{C_1}{10} + C_2} \right] = 10 * 11 * \left[ \frac{0.4 * 10^{-6} * 3333 * 10^{-12}}{0.4 * 10^{-6} + 3333 * 10^{-12}} \right] = 0.3636 \mu\text{s} \text{ y quedará sometido}$$

como máximo a la tensión  $U_{\max}$

Por tanto consiguiendo el tiempo de frente es  $t_f = 3.2431 t_2 = 1.18 \mu\text{s}$  .

(figura 5.32 y 5.33)

FIG. 5.32

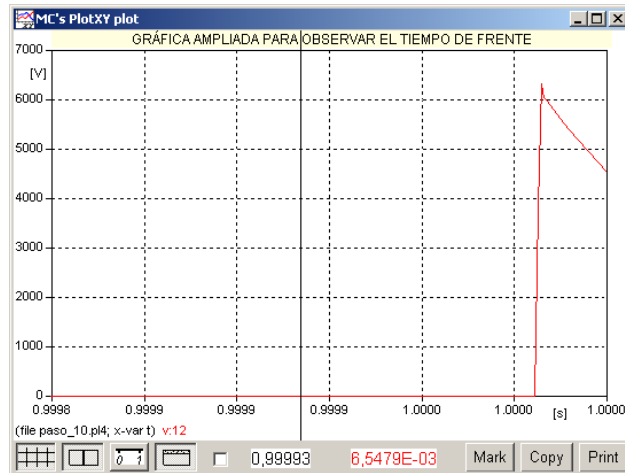


FIG. 5.33



La constante de tiempo de cola o tiempo de descarga es:

$$t_1 = 10 R_2 \left[ \frac{C_1}{10} + C_2 \right] = 10 * 17.593 \left[ \frac{4 * 10^{-6}}{10} + 3333 * 10^{-12} \right] = 70.958 \mu\text{s}$$

y el tiempo de cola

que es el intervalo de tiempo entre el origen  $0_1$  ( $t = 1^+$  s) y el instante sobre la cola de la onda en el cual la tensión decrece hasta la mitad ó 50% del valor pico es:

$$t_c = t_1 \ln 2 = 49.184 \mu\text{s} \quad \text{Fig. 5.34}$$

FIG. 5.34



Sabemos que el valor de  $t_{\max}$  para el cual  $U_2(t)$  es máximo, es:

$$t_{\max} = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right) = \frac{70.958 * 0.3636}{70.958 - 0.3636} \ln \left( \frac{70.958}{0.3636} \right) = 1.93 \mu s$$

Una vez que el capacitor  $C_2$  a sido cargado al máximo potencial es decir:

$U_2(t_{\max}) = U_{\max}$  la energía almacenada será descargada a través de  $R_1$  y  $R_2$ .

La expresión del valor máximo de  $U_2(t)$  será cuando  $t = t_{\max}$  y será:

$$U_2(t_{\max}) = \frac{10U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}}; \quad t_1 = 70.9583, \quad t_2 = 0.3636$$

Puesto que  $t_1 \gg t_2$ , entonces:  $\frac{t_1}{t_2} \gg 1 \Rightarrow \frac{t_1}{t_2} - 1 \gg 0$ , por

$$\text{tanto: } \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{1}{\frac{t_1}{t_2} - 1}} \approx 1$$

Por tanto  $U_2(t_{\max}) = \frac{10U_0R_2C_1}{t_1} = 6347.129 \text{ V}$ . De acuerdo a nuestro resultado

gráficamente la máxima tensión es 6315.8 V.

Figura 5.35 y 5.36

FIG. 5.35

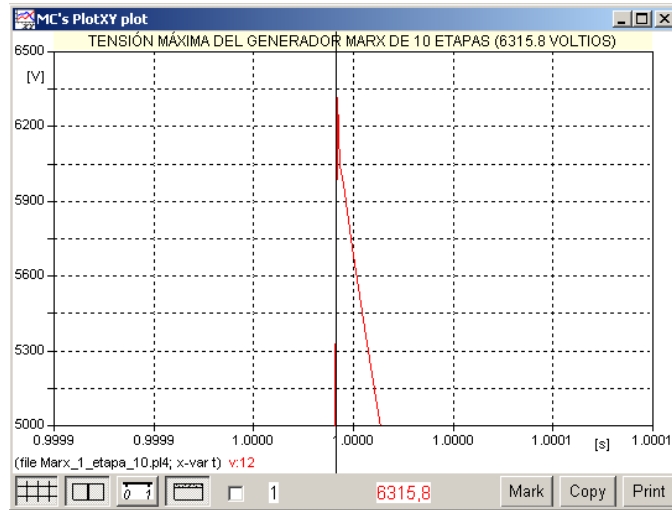
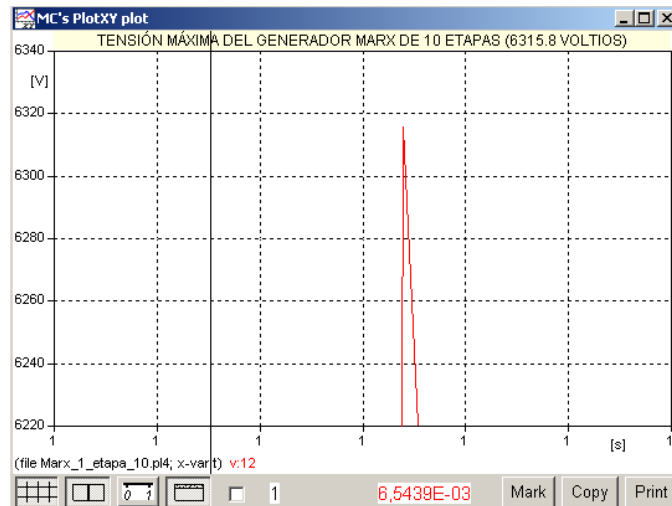


FIG. 5.36



Finalmente la energía acumulada es:  $W_{\max} = 10 \times \frac{1}{2} C_1 U_0^2 = 10 \times \frac{1}{2} (4 \times 10^{-6}) (640)^2 = 8.192$  joule.

### **5.5 Cumplimiento de los Objetivos.**

Por tanto hemos comprobado que las ecuaciones fundamentales que gobierna el comportamiento del Circuito Marx basada en las normas IEC-60 pueden ser simulados usando el programa ATP obteniendo los mismos resultados.

## 5.6 Diseño Eléctrico del Generador de Impulso de Tensión de 10 kV.

Los generadores de impulso de tensión mayores de 10 kV son diseñados para prueba de aislamiento en componentes eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones a partir de Simulaciones de descargas de rayo (fuentes de interferencia) en antenas de radio y televisión, equipos de video y audio, cables de red y en componentes usados en equipos electrodoméstico, a fin de asegurar de que el producto opera confiablemente.

Para el diseño del Generador de Impulso de 1 etapa para producir 10 kV usaremos el circuito de la figura 5.37:

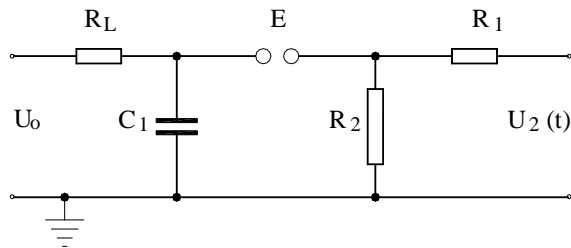


Fig. 5.37 Circuito del generador de impulso analizado de 1 etapa.

Dado que en mercado nacional existen condensadores (económicos), elegimos el capacitor de impulso  $C_1$  de 1 nF ó 1000 pF y su capacidad de carga es 10 kV.

La tensión total de carga del generador es  $U = U_0 = 10 \text{ kV}$ ; donde  $U_0$  es la tensión de la fuente de alimentación.

Para el impulso de tensión tipo rayo, consideremos que la eficiencia sea 97.5%.

$$\text{Osea: } \eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 0.975 \Rightarrow C_1 = 40 C_2$$

$$\text{Por tanto: } C_2 = \frac{C_1}{40} = 25 \text{ pF.}$$

Para determinar la resistencia de carga  $R_L$ , asumimos que la corriente de carga es de 1 A para una tensión de carga de  $U = U_0 = 10 \text{ kV}$ , entonces:

$$R_L = \frac{10000}{1} = 10000 \Omega = 10 \text{ M}\Omega.$$

El tiempo de carga de  $C_1$  experimental:  $t_{\text{CARGA}} = 12.6 R_L C_1 = 12.6 * 10000 * 1 * 10^{-9} = 0.126 \text{ ms.}$

La potencia de la resistencia  $R_L$  es de 1000 watts.

Para la determinación de  $R_2$ , se sabe que el tiempo de cola es  $t_c \approx \ln 2 \ t_1 \approx R_2(C_1 + C_2)\ln 2$ .

Si  $t_c = 50 \mu\text{s}$ ,  $C_1 = 1000 \text{ pF}$  y  $C_2 = 25 \text{ pF}$ , deducimos que  $R_2 = 70.375 \text{ k}\Omega$ , generalmente este valor es fijo.

**Cálculo del valor máximo y mínimo de la resistencia de frente  $R_1$**

Determinemos el valor mínimo y máximo de  $R_1$  mediante las características de  $R_1 - C_2$  para cada valor de la inductancia del circuito.

Sabemos que la tolerancia del tiempo de frente para una onda de impulso de tensión tipo rayo es  $\pm 30\%$ , es decir  $t_f = 1.2 \pm 0.36 \mu\text{s}$  y el rango de valores de  $C_2$  está entre  $[10 - 10000] \text{ pF}$ .

Entonces si: 
$$t_f = 3.2431 t_2 = 3.2431 \left( \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \Rightarrow R_1 = \frac{t_f (C_1 + C_2)}{3.2431 C_1 C_2}$$

Los límites de  $R_1$  son presentados en la tabla 5.1 para diversos valores de  $C_2$ , sabiendo que  $C_1 = 10000 \mu\text{F}$ ,  $t_{f_{\min}} = 1.2 - 0.36 = 0.84 \mu\text{s}$ ,  $t_{f_{\max}} = 1.2 + 0.36 = 1.56 \mu\text{s}$ .

Tabla 5.1 Valores Mínimos y máximos de  $R_1$

$C_2$ (pF)	$R_1$ min	$R_1$ max
10	26160.2	48583.1
25	10619.5	19721.9
50	5439.2	10101.4
75	3712.5	6894.6
100	2849.1	5291.2
125	2331.1	4329.2
150	1985.8	3687.8
175	1739.1	3229.7
200	1554.1	2886.1
250	1295.1	2405.1
300	1122.4	2084.4
400	906.5	1683.6
500	777.0	1443.1
600	690.7	1282.7
700	629.0	1168.2
800	582.8	1082.3
900	546.8	1015.5
1000	518.0	962.0
2000	388.5	721.5
3000	345.3	641.4
4000	323.8	601.3
5000	310.8	577.2
6000	302.2	561.2
7000	296.0	549.7
8000	291.4	541.1
9000	287.8	534.5
10000	284.9	529.1

Con la finalidad de no producir oscilaciones, se debe cumplir que

$$R_1 > 2\sqrt{L\left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}\right)}$$

El límite de la zona de amortiguamiento lo da

$$R_{1\min}(L) = 2\sqrt{\frac{L(C_1 + C_2)}{C_1 C_2}}$$

Con los datos obtenidos, graficaremos las características de

$R_1$  en función de  $C_2$  para cada valor de la inductancia.

Elaboremos las tablas 5.2 y 5.3 en donde podamos observar claramente mediante gráfica 5.38 en que rango se encuentra el valor de la resistencia de frente  $R_1$  de tal forma que cumpla que  $R_1 < R_2$

Tabla 5.2 Valores Mínimos y máximos de R1

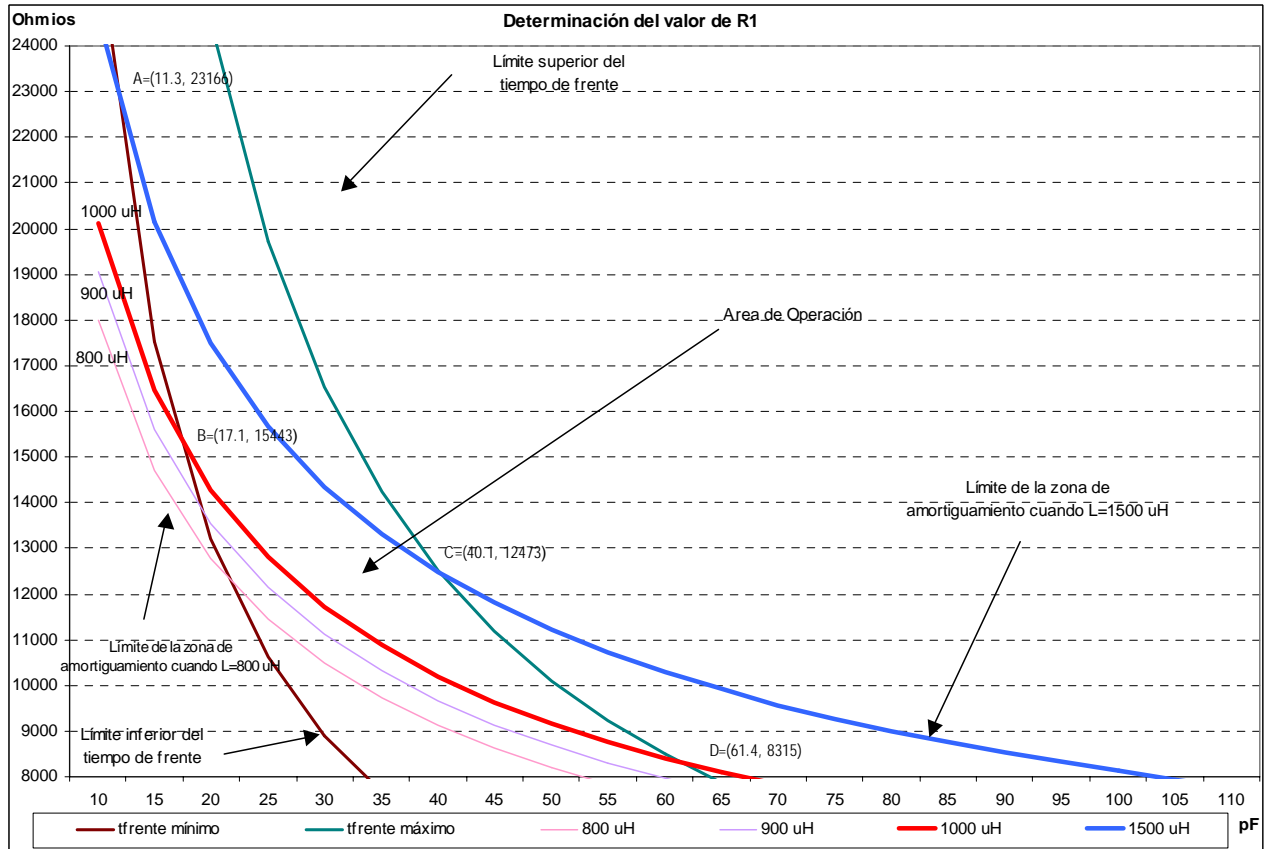
$C_2$ (pF)	$R_{1\min}$	$R_{1\max}$
10	26160.2	48563.1
15	17526.4	32549.1
20	13209.6	24532.1
25	10619.5	19721.9
30	8692.7	16515.1
35	7659.3	14224.5
40	6734.3	12506.6
45	6014.8	11170.4
50	5439.2	10101.4
55	4968.3	9226.9
60	4575.9	8498.0
65	4243.8	7881.3
70	3959.2	7352.8
75	3712.5	6894.6
80	3496.7	6493.8
85	3306.2	6140.1
90	3136.9	5825.7
95	2985.4	5544.4
100	2849.1	5291.2
105	2725.8	5062.2
110	2613.7	4853.9

Tabla 5.3 Valores mínimos de R1 en función de la inductancia del circuito

$C_2$ (pF)	1 uH	5 uH	10 uH	50 uH	100 uH	200 uH	300 uH	400 uH	500 uH	600 uH	700 uH	800 uH	900 uH	1000 uH	1200 uH	1500 uH
10	636	1421	2010	4494	6356	8989	11009	12712	14213	15569	16817	17978	19068	20100	22018	24617
15	520	1163	1645	3679	5203	7358	9011	10405	11633	12744	13765	14715	15608	16452	18022	20149
20	452	1010	1428	3194	4517	6387	7823	9033	10100	11063	11950	12775	13550	14283	15646	17493
25	405	906	1281	2864	4050	5727	7014	8099	9055	9920	10714	11454	12149	12806	14029	15684
30	371	829	1172	2620	3706	5241	6419	7412	8287	9077	9805	10482	11118	11719	12837	14353
35	344	769	1088	2432	3439	4864	5957	6879	7690	8424	9099	9726	10318	10876	11914	13320
40	322	721	1020	2280	3225	4561	5586	6450	7211	7899	8532	9121	9675	10198	11171	12490
45	305	682	964	2155	3048	4310	5279	6096	6815	7465	8064	8620	9143	9638	10558	11804
50	290	648	917	2049	2898	4099	5020	5797	6481	7099	7668	8198	8695	9165	10040	11225
55	277	619	876	1959	2770	3917	4798	5540	6194	6785	7329	7835	8310	8759	9595	10728
60	266	594	841	1880	2658	3759	4604	5317	5944	6512	7033	7519	7975	8406	9209	10296
65	256	572	810	1810	2560	3620	4434	5120	5724	6271	6773	7241	7680	8096	8868	9915
70	247	553	782	1748	2473	3497	4283	4945	5529	6057	6542	6994	7418	7819	8566	9577
75	239	535	757	1693	2394	3386	4147	4789	5354	5865	6335	6772	7183	7572	8295	9274
80	232	520	735	1643	2324	3286	4025	4648	5196	5692	6148	6573	6971	7348	8050	9000
85	226	505	715	1598	2260	3196	3914	4519	5053	5535	5978	6391	6779	7146	7828	8751
90	220	492	696	1556	2201	3113	3812	4402	4922	5391	5823	6225	6603	6960	7625	8524
95	215	480	679	1518	2147	3037	3719	4294	4801	5260	5681	6073	6442	6790	7438	8316
100	210	469	663	1483	2098	2966	3633	4195	4690	5138	5550	5933	6293	6633	7266	8124
105	205	459	649	1451	2052	2902	3554	4103	4588	5026	5428	5803	6155	6488	7107	7946
110	201	449	635	1421	2009	2841	3480	4018	4492	4921	5316	5683	6027	6353	6960	7781



FIG. 5.38



De la gráfica 5.38 los valores de  $C_2$  y de la resistencia de frente  $R_1$  que están dentro del área de operación son entre 11.3 a 61.4 pF y 23165 y 8315 ohmios respectivamente.

Puesto que  $R_1 < R_2 = 70.375 \text{ k}\Omega$ , entonces todos los valores que están dentro del área de operación puede ser el valor de  $R_1$ .

Determinemos la resistencia de frente del generador y las constantes de tiempo de cola y frente respectivamente, usando las siguientes ecuaciones:

Para las constantes del tiempo de frente y cola:

$$t_2 = R_1 \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \mu\text{s}, \quad t_1 = R_2 (C_1 + C_2) \mu\text{s},$$

y sus respectivas tiempos:  $t_f = 3.2431 t_2 \mu\text{s}, \quad t_c = 0.693 t_1 \mu\text{s}.$

Puesto que habíamos determinado la capacitancia de carga  $C_2 = 25 \text{ pF}$ , entonces para este valor se tiene que la resistencia de frente  $R_1$  varía entre 12806 a 15684 ohmios (ver gráfica 5.38).

Seleccionamos un valor conocido de  $R_1 = 15\text{k}\Omega$ ,

Para este valor se tiene que:  $t_1 = R_2(C_1 + C_2) = 72134\ \mu\text{s}$ ;  $t_2 = R_1\left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}\right) = 0.3658\ \mu\text{s}$

$$t_f = 3.2431\ t_2 = 1.186\ \mu\text{s};\ t_c = 0.693\ t_1 = 49.98\ \mu\text{s}$$

Hallemos la ecuación de onda de impulso que gobernará la tensión generada resultante en función del tiempo.

Si el valor de  $R_1$  es  $15\ \text{k}\Omega$ ,  $C_2 = 25\ \text{pF}$ ,  $t_1 = 72.134\ \mu\text{s}$  y  $t_2 = 0.3658\ \mu\text{s}$ .

La tensión del generador es  $U_0 = 10000\ \text{V}$ ; además  $R_2 = 70375\ \Omega$  y  $C_1 = 1000\ \text{pF}$ .

Resultando:

$$U_2(t) = \frac{10000 * 70375 * 1000 * 10^{-12}}{(72.134 - 0.3658) * 10^{-6}} \left[ e^{-\frac{t}{72.134}} - e^{-\frac{t}{0.3658}} \right] = 9805.875 \left[ e^{-\frac{t}{72.134}} - e^{-\frac{t}{0.3658}} \right] \text{ V.}$$

Graficando en Matlab (figura 5.39) obtenemos:

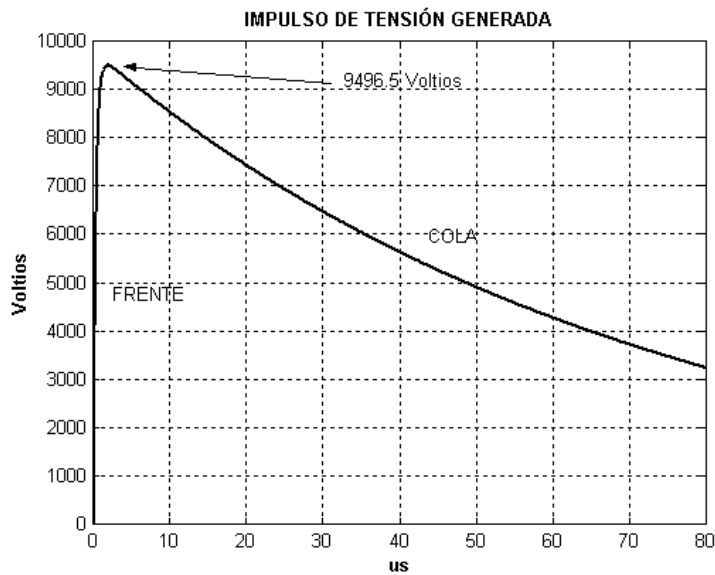
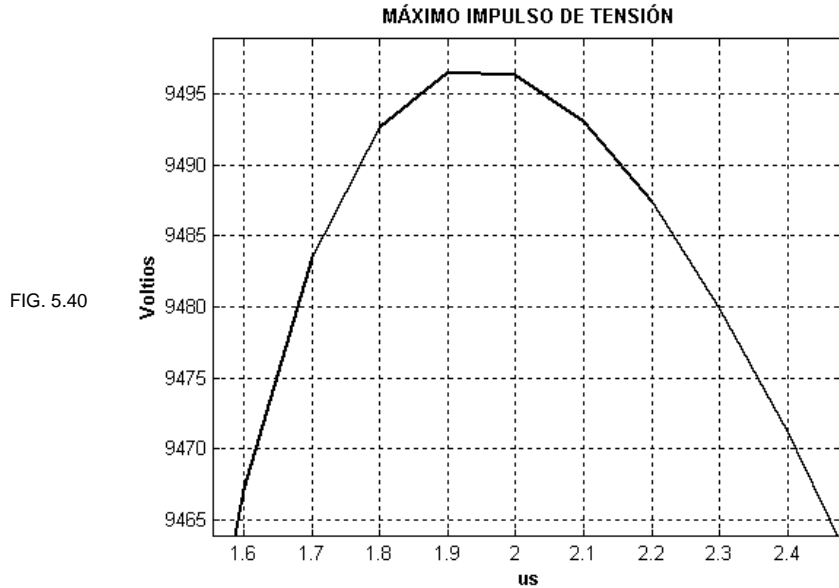


FIG. 5.39

De acuerdo a la simulación en Matlab la tensión máxima es:  $U_{\text{max}} = 9496.5\ \text{V}$ .

Figura 5.40



Comparemos con los cálculos teóricos:

La tensión máxima de acuerdo a la ecuación (3.34) es:  $U_2(t_{\max}) = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{\frac{t_2}{t_1 - t_2}}$

$$\text{Reemplazando: } U_{\max} = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = \frac{10 \text{ kV} * 70.375 \text{ k}\Omega * 10^{-9}}{72.2 \mu\text{s}} \left( \frac{72.2}{0.37} \right)^{\frac{0.37}{72.2 - 0.37}} = 949688 \text{ V}.$$

El tiempo de cola es  $t_c = 0.693 t_1 = 49.98 \mu\text{s}$ .

También podemos usar los métodos para la determinación de los Elementos del Circuito de Impulso de Tensión<sup>18</sup>, explicados en el Capítulo 4, en donde los elementos del circuito de impulso de tensión que se usan para la reproducción artificial de sobretensiones tipo rayo son determinados despreciando para ello la inductancia del objeto de prueba L cuya influencia no es importante en el circuito Marx.

### **Cálculo de componentes del circuito dado los valores característicos de tiempo<sup>18</sup>**

Las constantes de tiempo de cola  $t_1 = R_2 C_1$  y de frente  $t_2 = R_1 C_2$  así como la eficiencia  $\eta$  dependen solo de la forma del impulso de tensión normalizado 1.2/50  $\mu\text{s}$  y de la relación,  $C_2 / C_1$  según se muestra en la figura 4.1

Cuando  $C_1$  y  $C_2$  son conocidos, las resistencias serie  $R_1$  y la descarga  $R_2$  son determinados a partir de la curva  $t_2 = R_1 C_2$  y  $t_1 = R_2 C_1$ .

En este método consideremos que los valores de  $C_1$  y  $C_2$  en  $\mu\text{F}$  y  $t_1 = R_2 C_1$ ,  $t_2 = R_1 C_2$  en  $\mu\text{s}$ , las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  que obtendremos estarán expresadas en ohmios.

Si:  $C_2 = 25 \text{ pF}$  y  $C_1 = 1000 \text{ pF}$  son los datos, entonces:  $\frac{C_2}{C_1} = 0.025$

Por tanto usando la figura 4.1 obtenemos que:  $t_1 = 67 \mu\text{s}$  y  $t_2 = 0.41 \mu\text{s}$  y  $\eta = 0.96$

### **Cálculo de los valores característicos de tiempo a partir de los elementos del circuito de impulso<sup>18</sup>**

Está basado en las ecuaciones aproximadas para el tiempo de frente y de cola que dependen de los elementos del circuito de impulso.

Para el circuito:  $t_f \approx \frac{2}{b} R_1 \left( \frac{C_2 C_1}{C_2 + C_1} \right) = \frac{2}{b} t_2$ ;  $t_c \approx \frac{1}{a} R_2 (C_1 + C_2) = \frac{1}{a} t_1$ ;  $\eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

Según la norma VDE parte 3 / 4.66 los factores  $\frac{1}{a}$  y  $\frac{2}{b}$  son tomados de acuerdo a la tabla 4.1 (del Capítulo 4) para una onda de impulso tipo rayo cuya relación  $t_f / t_c = 1/50$ .

Datos:  $C_1 = 1000 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 25 \text{ pF}$ ,  $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 70.375 \text{ k}\Omega$

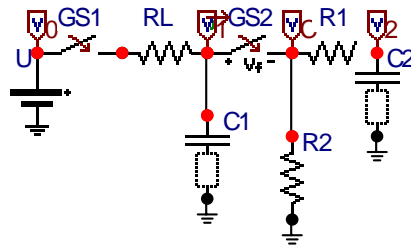
$$\Rightarrow t_1 = 72.13 \mu\text{s}, t_2 = 0.3658 \mu\text{s},$$

Por tanto:  $t_f = \frac{2}{b} t_2 = 2.96 t_2 = 2.96 * 0.3658 \mu\text{s} = 1.082 \approx 1.1 \mu\text{s}$ .

$$t_c = \frac{1}{a} t_1 = 0.73 * 72.13 = 52.65 \mu\text{s}$$

### **5.7 Simulación del Generador de Impulso de 1 etapa de 10 kV con el ATP**

Simulemos con el programa ATP para hallar  $i(t)$  y la tensión  $U_2$  a través de la carga  $C_2$  tal como se muestra en el circuito:



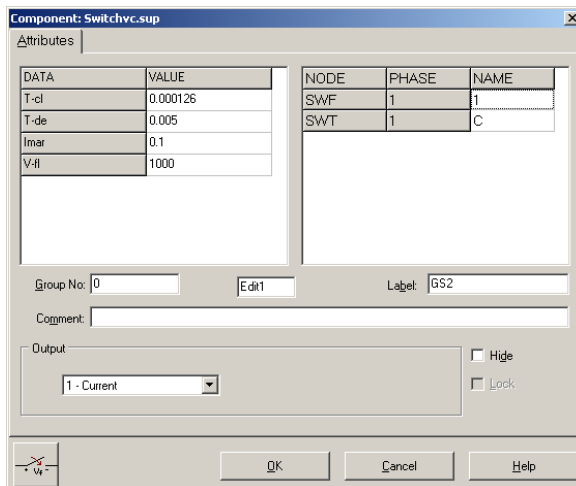
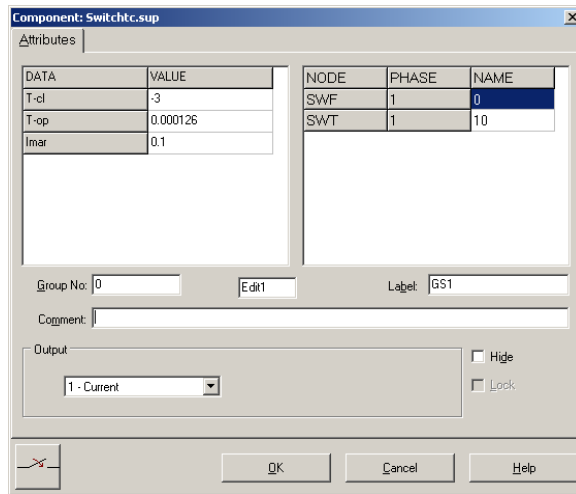
Sea la fuente  $U = 10 \text{ kV}$ ,  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1000 \text{ pF}$ ;  $C_2 = 25 \text{ pF}$   $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 70.375 \text{ k}\Omega$ .

La constante de tiempo de carga de  $C_1$  es,  $\tau = 12.6 R_L C_1 = 12.6 * 10 \text{ k}\Omega * 10^{-9} = 0.126 \text{ ms}$ .

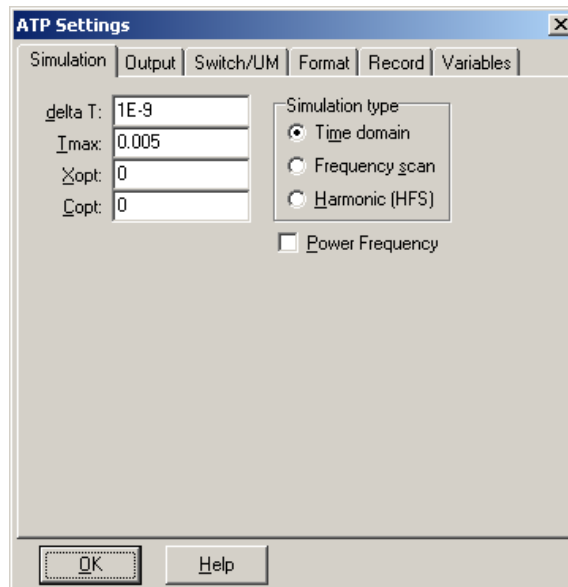
Los parámetros del interruptor GS1 son:  $T_{cl} = -3 \text{ seg}$ ;  $T_{op} = 0.126 \text{ ms}$ ;  $I_{mar} = 0.1 \text{ A}$ .

y del interruptor controlado por tensión GS2 (que es modelado como un explosor de esferas y son iniciadas por  $+v_f -$ ) son:  $T_{cl} = 0.126 \text{ ms}$ ;  $T_{-de} = 5 \text{ ms}$ ;  $I_{mar} = 0.1 \text{ A}$ ;

$V_{-fl} = 10000 \text{ V}$ .



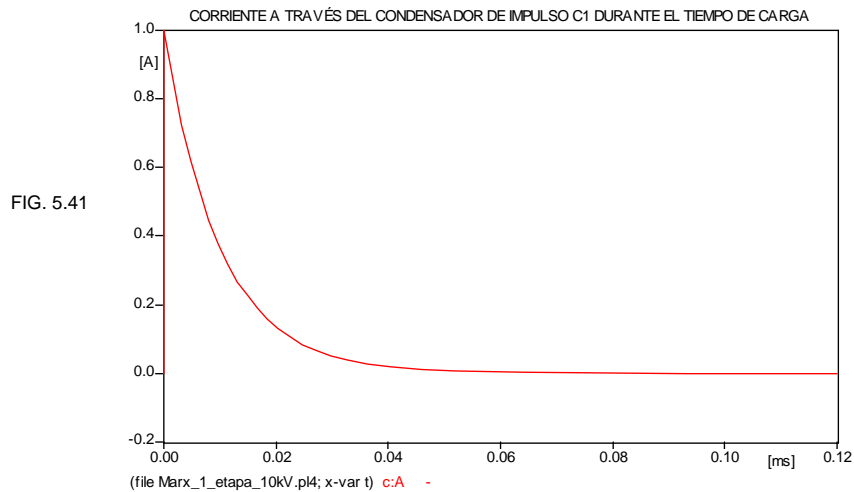
Los parámetros de la simulación en donde se especifica el paso de tiempo, tiempo final de la simulación, tipo de simulación, etc, se muestra en el siguiente ventana:



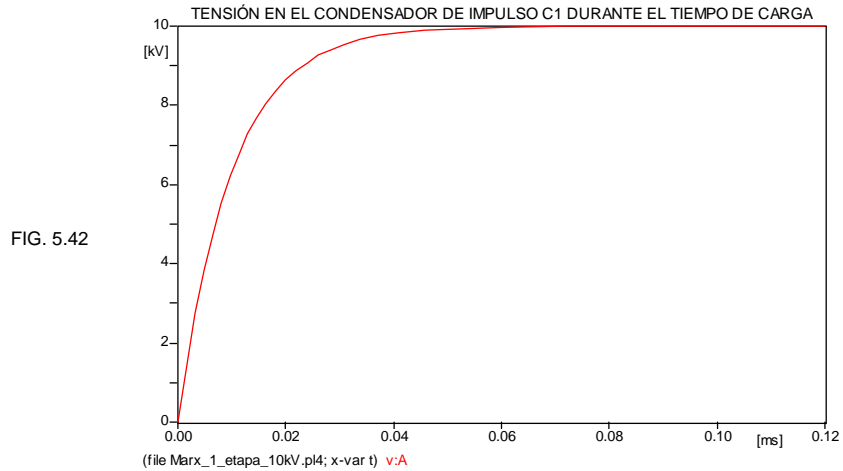
Después que todos de los componentes del modelo hayan sido conectados para representar un generador de impulso, simulemos con ATP y procedemos a explicar su funcionamiento:

Inicialmente el interruptor controlado por tiempo GS1 está normalmente cerrado de modo que el condensador de impulso  $C_1$  es cargado hasta su capacidad de tensión  $U = 10000 \text{ V}$  por una fuente de tensión continua de entrada  $U$  a través de una resistencia de carga,  $R_L$  hasta un tiempo  $\tau = 12.6R_L C_1 = 12.6 * 10 \text{ k}\Omega * 10^{-9} = 0.126 \text{ ms}$ .

Figura 5.41



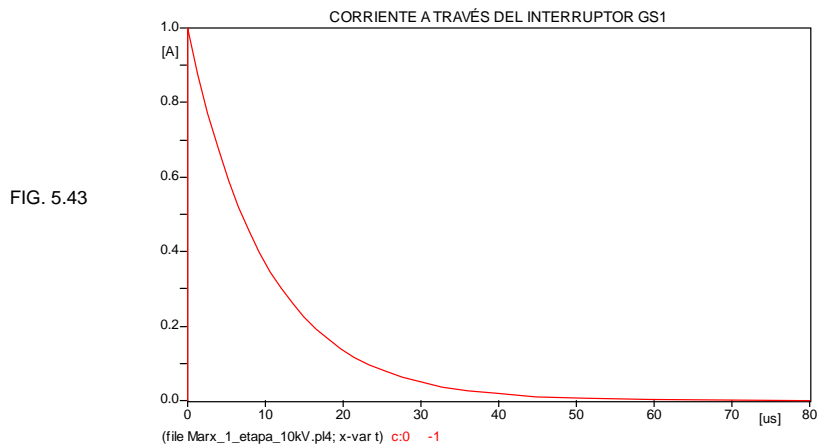
Verificándose que el tiempo que demora en cargarse completamente el condensador de impulso  $C_1$  será en  $\tau = 0.126$  ms, tal como se muestra en la siguiente figura 5.42:

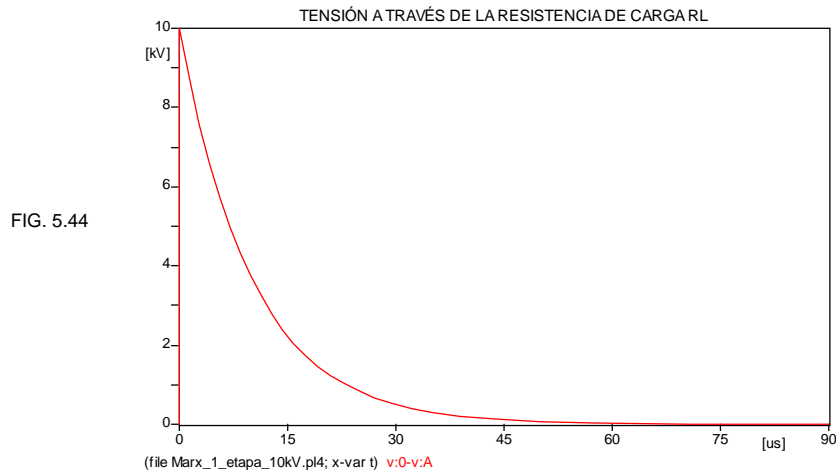


La corriente que pasa por  $R_L$  en el instante de cierre del interruptor GS1 es:

$$\frac{U}{R_L} = \frac{10000}{10000} = 1 \text{ A}$$

y tenderá a cero cuando  $C_1$  se cargue totalmente y la tensión a través de la resistencia de carga  $R_L$  será máximo y cuando  $C_1$  alcance su valor máximo no habrá corriente que pase por  $R_L$  tal como se muestra en las figuras 5.43 y 5.44:





Al finalizar el tiempo de carga, se apertura el interruptor GS1 e inmediatamente se cierra el interruptor GS2 descargando el Condensador  $C_1$  sobre las resistencias de frente ( $R_1$ ), de cola ( $R_2$ ) y sobre el objeto de prueba  $C_2$ .

Sabemos que la tensión en bornes de  $C_2$  no puede variar bruscamente, es decir cuando el interruptor GS2 se cierra en  $T_{cl} = 0.126$  ms; el Condensador  $C_2$  se comporta como un cortocircuito [ $U_2(0.126^+) = 0$ ] fluyendo el máximo de corriente de carga  $i_{C_2}(0.126^+)$  que disminuirá gradualmente hasta que  $C_2$  haya alcanzado su carga completa es decir  $U_2(t = t_{\max}) = U_{\max}$

Finalmente,  $C_2$  se descarga hacia tierra a través de  $R_1$  y  $R_2$ , originando que la onda de tensión en bornes de  $C_2$  crece inicialmente, pasa por un máximo y luego decrece lentamente hasta llegar a cero, obteniendo así en la salida una onda de impulso de tensión  $U_2(t)$ .

Mostremos gráficamente el impulso de tensión  $U_2(t)$  obtenido.

Figuras 5.45, 5.46 y 5.47



FIG. 5.45

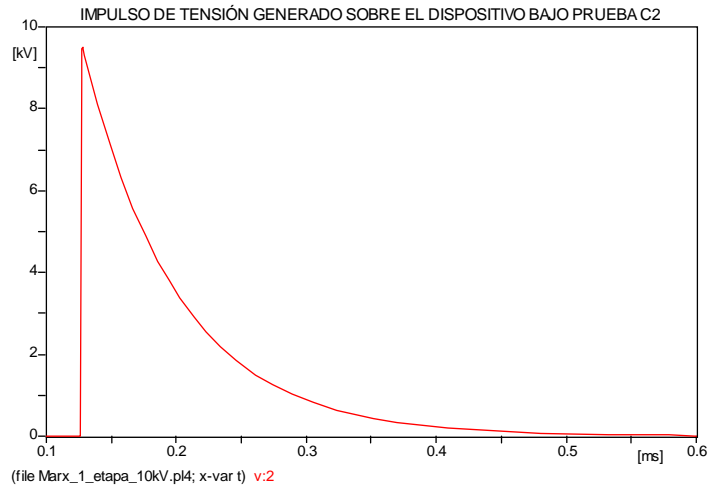


FIG. 5.46

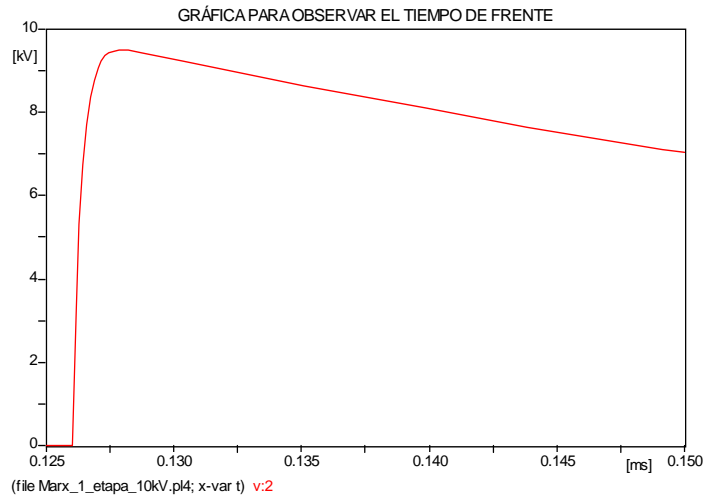
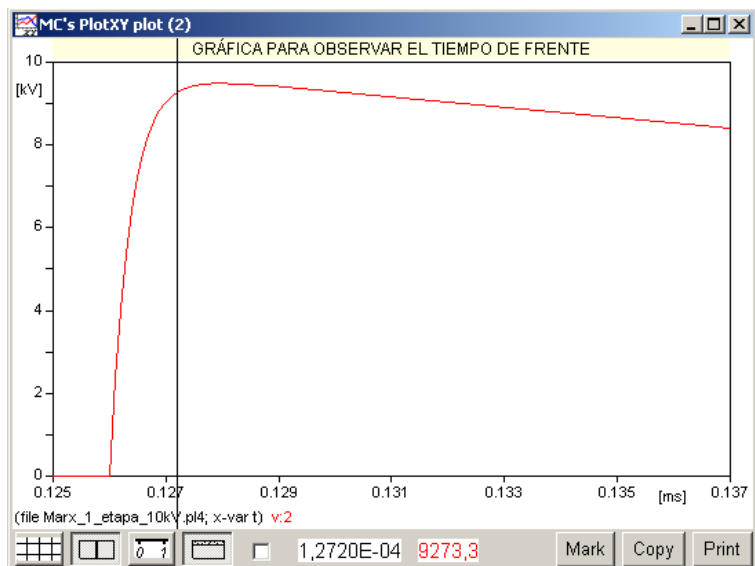


FIG. 5.47



Halleemos el valor máximo de la onda de impulso, para esto determinaremos el valor de  $t_{\max}$  para el cual  $U_2(t)$  es máximo:

$$t_{\max} = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right) = \frac{72.134 * 0.3658}{72.134 - 0.3658} \ln \left( \frac{72.134}{0.3658} \right) = 1.943 \mu s$$

Una vez que el capacitor  $C_2$  a sido cargado al máximo potencial es decir:

$U_2(t_{\max}) = U_{\max}$  la energía almacenada será descargada a través de  $R_1$  y  $R_2$ .

El valor máximo de  $U_2(t)$  será cuando  $t = t_{\max}$ ; reemplacemos este valor de  $t_{\max}$ :

$$\text{Obtenemos: } U_{\max}(t_{\max}) = \frac{U_0 R_2 C_1}{t_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{-\frac{t_2}{t_1 - t_2}} = 9496.88 \text{ V}$$

De acuerdo a nuestro resultado gráficamente la máxima tensión es 9495.4 V.

Figura 5.48

Finalmente la energía almacenada ( $w$ ) en  $C_1$  del Generador de Impulso de 1 etapa cargada a una tensión  $U_0 = 10 \text{ kV}$  es:

$$W = \int_0^t v i dt = C_1 \int_0^{U_0} v dv = \frac{C_1 U_0^2}{2} = \frac{1}{2} C_1 U_0^2 = \frac{1}{2} (1000 \times 10^{-12}) (10000)^2 = 0.05 \text{ Joule}$$

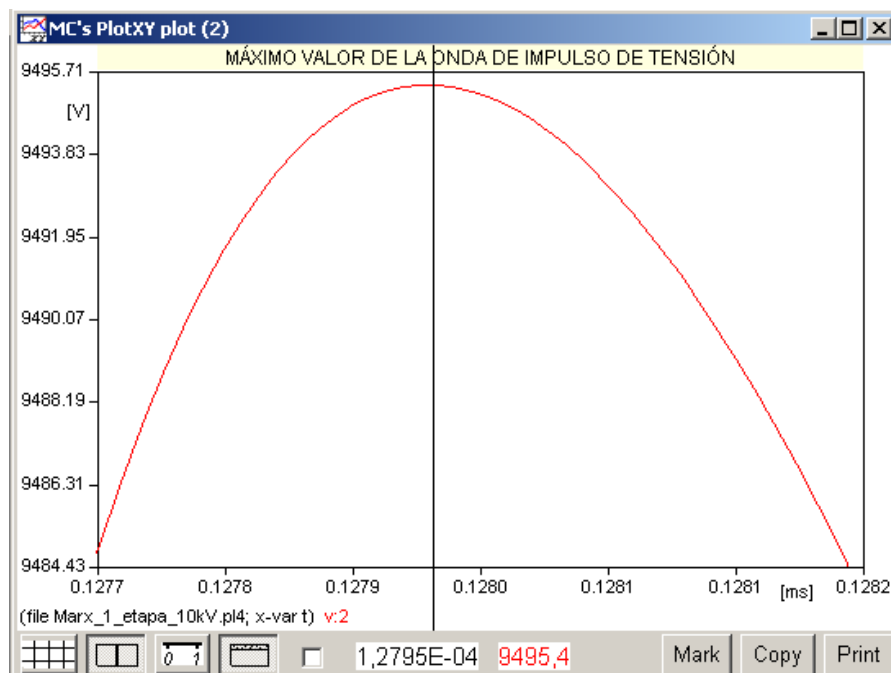


FIG. 5.48

Observando la gráfica 5.48 este valor máximo ocurre a los 0.12795 ms, es decir el tiempo  $t = t_{\max}$  será igual a:  $0.12795 - 0.126 = 0.00195 \text{ ms} = 1.95 \mu\text{s}$

## CONCLUSIONES

- 1) El presente trabajo constituye un aporte adicional para la implementación del Laboratorio de Alta Tensión de la FIEE con un Generador de Impulsos de manufactura propia, cuya factibilidad de funcionamiento se adecua a las disponibilidades de espacio de la actual plataforma de pruebas que se dispone.
- 2) Se ha realizado el cálculo detallado de los parámetros de implementación de un Generador de Impulsos con una tensión de salida de 6400 V y 8.2 J, mediante 10 etapas con módulos de 640 V y 0.82 J, cuyo uso puede aplicarse a ensayos del Nivel Básico de Aislamiento de componentes de Baja Tensión y para fines didácticos.
- 3) Se ha realizado el modelamiento digital con el ATP, del funcionamiento de un Generador de Ondas de Impulso similar al calculado para 6400 V y 8.2 J, habiendo reproducido las características de funcionamiento de todos sus componentes y comprobado que son similares a los valores obtenidos con el cálculo analítico.
- 4) Las ventajas del Generador de impulso por etapas se traduce en las siguientes facilidades técnicas:
  - a) Menores rangos de tensiones de carga para los capacitores, es decir un circuito alimentador con componentes de menor costo.
  - b) Menores rangos de tensiones para el funcionamiento de los explosores (interruptores), dado que a medida que se incrementa la brecha de aire se incrementa la dispersión de la tensión crítica disruptiva.
  - c) Menor capacidad de tensión de carga para la fuente de suministro, que se traduce en menores costos y parámetros más fáciles de cumplir con componentes de venta comercial.
  - d) Menor efecto corona durante la carga, así como menores requerimientos de espacio libre en el Laboratorio, cuando las pruebas se hacen utilizando un número de módulos en serie.
- 5) Se ha verificado que la exactitud de los cálculos para el diseño de un Generador de Impulsos es afectada mínimamente por la presencia de la inductancia del

circuito, aunque la forma de onda puede ser considerablemente influenciada por una componente inductiva que le da un rizado en la cresta.

- 6) Las ondas de impulso de tensión van acompañadas de ondas de impulso de corriente.
- 7) Se ha examinado a nivel de estado del Arte, el modelamiento analítico necesario para la reproducción de Ondas Impulsionales de frente rápido (tipo rayo), que se utilizan para estandarizar las sobretensionales impulsionales que afectan a los aislamientos eléctricos.
- 8) Cuanto más capacidad de carga tiene el condensador de impulso se requerirán grandes resistencias de carga y de baja inductancia
- 9) La onda de impulso de tensión con tiempo de frente muy corto provienen de una configuración de componentes cuyo valor de resistencia de frente  $R_1$  es mucho mayor con respecto al valor de la resistencia de cola  $R_2$ .

## RECOMENDACIONES

- 1) Para la realización de las pruebas se debe determinar la polaridad necesaria, la onda final que sale del Generador de Impulso tiene la misma polaridad que la de la carga del condensador de carga.
- 2) Los aparatos de sub-estaciones, tales como transformadores, deberían ser probados comercialmente para demostrar que las estructuras del aislamiento interno reúnen los niveles de aislamiento especificado.
- 3) Cuando los impulsos de tensión son de tiempos muy cortos, podemos considerar que su eficiencia disminuye, en el caso del Generador de Impulso que se ha modelado tiene que ser de alta eficiencia a fin de obtener el máximo impulso de tensión

## ANEXO

### A.1 GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Coordinación de Aislamiento**

Es el conjunto de disposiciones que se toman para evitar que las sobretensiones de diversos orígenes causen perforaciones y daños al aislamiento eléctrico. La coordinación de los aislamientos se basa en una correlación entre las condiciones de tolerancia del material eléctrico y las características de protección.

- **Tensión Nominal de Servicio (  $U_n$  )**

Es el valor de la tensión eficaz entre fases, el cual se utiliza para denominar la red y determinar las principales características de implementación de la red.

- **Tensión Máxima de Servicio (  $U$  )**

Es el valor más elevado de la tensión eficaz entre fases que puede presentarse en un instante y en un punto cualquiera de la red en condiciones normales de operación.

- **Tensión Máxima de Aislamiento (  $U_m$  )**

Es la tensión más elevada para el cual se especifica el aislamiento de los equipos, la misma que puede aplicarse ocasionalmente durante una corta duración.

- **Esfuerzo Eléctrico**

Es la sollicitación ejercida por el Campo Eléctrico al que se somete un aislamiento, pudiendo llegar hasta la perforación del dieléctrico, por proceso de bombardeo electrónico.

- **Sostenimiento del Aislamiento**

Es el aguante que resiste un aislamiento ante la aplicación de un Esfuerzo Eléctrico.

- **Descarga Disruptiva**

Conjunto de fenómenos que acompañan la perforación de un aislante cuando la tensión entre dos conductores separados por dicho aislante sobrepasa su sostenimiento.

- **Rigidez Dieléctrica**

Propiedad de un aislamiento de oponerse a la descarga disruptiva; se evalúa por la intensidad del campo eléctrico  $E$  (V/m) susceptible de producir la descarga disruptiva.

- **Contorneo**

Descarga disruptiva que se produce a lo largo o en la proximidad de una superficie del aislante sólido o líquido.

- **Arco Eléctrico**

Descarga disruptiva luminosa caracterizada por una gran densidad de corriente y un débil campo eléctrico que provoca a menudo la volatilización parcial de los electrodos.

- **Cebado**

Régimen variable durante el cual se establecen la chispa o el arco eléctrico

- **Impulso**

Es una tensión o corriente transitoria aperiódica que por lo general crece rápidamente hasta un valor de cresta y después decrece lentamente hasta cero.

- **Tensión de Descarga Disruptiva**

Es el valor de la tensión de prueba en la cual se produce la descarga disruptiva, la misma que es afectada por los siguientes factores: humedad, lluvia, densidad relativa del aire.

Se expresará como el valor pico o valor medio según el tipo de prueba.



- **Tensión nominal de Sostenimiento al Impulso (impulso nominal de tensión no disruptiva)**

Es el valor pico del impulso de tensión especificado para el cual el aislamiento del objeto bajo prueba resistirá bajo condiciones especificadas.
- **Tensión de Sostenimiento al Impulso (impulso de tensión no disruptiva)**

Es el valor pico del máximo impulso de tensión que el aislamiento del objeto bajo prueba es capaz de resistir bajo condiciones especificadas.
- **Sostenimiento Normalizado**<sup>17</sup>

Es la tensión correspondiente para un 10 % de probabilidad de contorneo.
- **Tensión de descarga disruptiva al 50 % ( $U_{d50\%}$ )**

Es la tensión que tiene un 50% de probabilidad de producirse una descarga disruptiva en un objeto de prueba bajo condiciones especificadas.
- **Tensión de descarga disruptiva al 100 % ( $U_{d100\%}$ )**

Es el valor de un mínimo impulso de tensión determinado en el cual todos los impulsos conducen a descargas disruptivas en un objeto de prueba bajo condiciones especificadas.
- **Prueba de tensión de descarga disruptiva al 50 % ( $U_{d50\%}$ ) de un objeto de prueba**

La prueba de descarga disruptiva al 50 % corresponde a la tensión que ocasiona  $\frac{n}{2}$  descargas disruptivas de  $n$  pruebas realizadas (probabilidad 0.5).

La tensión de descarga disruptiva  $U_{d50\%}$  se determina aplicando al menos 10 impulsos para cada nivel de tensión de ensayo; el intervalo de tensión  $\Delta U$  entre cada nivel será aproximadamente el 3 % de la tensión de descarga disruptiva al 50 % esperada.

El valor de  $U_{d50\%}$  se obtiene a partir de una curva de probabilidad de descarga disruptiva en función de la tensión de ensayo esperada.

- **Nivel de Aislamiento**

Es la rigidez dieléctrica expresada en términos de tensión no disruptiva.

- **Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (BIL)**

Es una magnitud referida a la rigidez dieléctrica al impulso expresada en términos de valor cresta de una tensión de sostenimiento al impulso.

- **Curva Tensión-Tiempo de un Aislamiento**

Se obtiene con impulsos de tensión de forma y polaridad dada, es representativa para relacionar la tensión de descarga disruptiva de un aislamiento y el tiempo de ocurrencia de la descarga disruptiva, se la utiliza para la coordinación del aislamiento.

## A.2 Forma de la Onda de Impulso

### A.2.1 Onda de Impulso de forma exponencial simple

Consideremos el circuito siguiente, el capacitor  $C$  es cargado gradualmente hasta el valor de la tensión de suministro  $U$  a través de una resistencia en serie  $r$ .

Durante el proceso de carga existirá una pequeña tensión a través de  $r$ , el cual disminuirá a cero hasta que el capacitor haya sido cargado totalmente.

Si cerramos el interruptor  $S$ , la carga del capacitor se descargará a través de la resistencia  $R$  de modo que la tensión a través de  $R$  crece instantáneamente hasta  $U$  y luego disminuirá exponencialmente a cero de acuerdo a la ecuación

$U_R(t) = U e^{-\frac{t}{RC}}$ , donde  $RC$  es la constante de tiempo de descarga del circuito.

Debido a que la corriente  $i(t)$  fluye a través de  $C$ , así como de  $R$  podemos usar

$i(t) = C \frac{dU}{dt}$ , que es la corriente producida por la rapidez de cambio de la tensión a

través del capacitor, luego:  $RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_0 \Rightarrow \frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = \frac{U_0}{RC}$ , que

es la ecuación diferencial para la tensión a través del capacitor  $C$ .

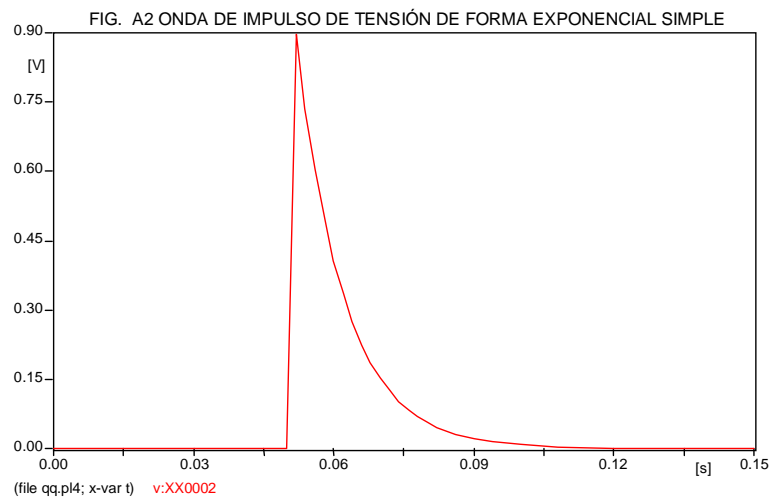
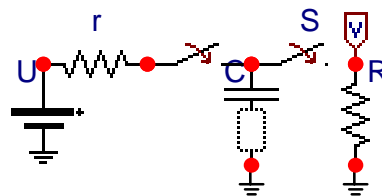
Resolvamos la ecuación diferencial no homogénea de primer orden con coeficientes

constantes con las siguientes condiciones iniciales:  $U_C(0) = 0$ ,  $i_C = C \frac{dU_C(0)}{dt} = 0$ .

Aplicando Laplace y luego su inversa, obtenemos:  $U_C(t) = U_0 \left[ 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right]$ . Figura A.2

Los parámetros del circuito son:  $U = 1 \text{ V}$ ,  $r = 0.01 \Omega$ ,  $R = 100 \Omega$ ,  $C = 100 \mu\text{F}$ .

Interruptor:  $T_{-cl} = 0.05 \text{ s}$ ,  $T_{-op} = 6 \text{ s}$ .  $RC = 100 * 100 * 10^{-6} = 0.01 \text{ s}$ .



### A.2.2 Onda de Impulso de forma exponencial doble

El circuito RC simple para obtener una onda de tensión de forma exponencial simple puede ser modificado para generar una onda de doble exponencial incluyendo un capacitor más en el circuito, por ejemplo el circuito de impulso tipo Marx.

### A.3 Factores de Corrección de la Tensión

El sostenimiento del aislamiento externo frente a las solicitaciones bajo sobretensiones (tensión de sostenimiento) y la tensión de contorneo dependen de las condiciones atmosféricas en el momento del ensayo, de la forma y duración del frente de onda impulsional de tensión, así también de la Altitud que influye en la cohesión molecular del aire atmosférico, el cual está asociado a la reducción del gradiente disruptivo del aire en formas de corona, pérdida de potencia o descargas de diferentes tipos hasta el arco eléctrico.

Si las tensiones mencionadas son diferentes de las condiciones normales, se aplicaran unos factores de corrección  $k_d$  (correspondiente a la densidad del aire) y  $k_h$  (correspondiente a la humedad), en la forma en que se indica en la tabla A.3.3 para obtener la tensión a aplicar en el caso de una tensión sostenida y para obtener la tensión a registrar para el caso de un ensayo de contorneo.

#### A.3.1 Factor de Corrección de la Tensión por la Densidad del Aire <sup>42</sup> ( $k_d$ )

La Densidad Relativa del Aire ( $\delta$ ) es la razón entre la densidad del aire para una presión barométrica P (mm Hg) y temperatura T (°C), con relación a la densidad del aire a condiciones normales, según lo siguiente:

$$\delta = \frac{P}{760} \left[ \frac{273 + 25}{273 + T} \right] = 0.392 \left( \frac{P}{273 + T} \right) \quad ; \quad \text{norma ANSI}$$

$$\delta = \frac{P}{760} \left( \frac{273 + 20}{273 + T} \right) = 0.386 \left( \frac{P}{273 + T} \right) \quad ; \quad \text{norma IEC}$$

$$\delta = \frac{P}{1013} \left( \frac{273 + 20}{273 + T} \right) = 0.289 \left( \frac{P}{273 + T} \right) \quad ; \quad P(\text{mbar}) \quad \text{norma IEC}$$

Las condiciones atmosféricas normales de ensayo son ligeramente distintas entre IEC y ANSI. Cuadro A.3.1

Cuadro A.3.1

Condiciones Atmosféricas Normales	Tipo de Norma		
	IEC 1962	IEC 1962	ANSI 1968
Presión atmosférica ( Po )	760 mm Hg	1013 mbar	760 mm Hg
Temperatura ambiente ( To )	20 °C	20 °C	25 °C
Densidad relativa del aire	1	1	1

La determinación del Coeficiente de Densidad Relativa del Aire (  $\delta$  ) mencionado líneas arriba, nos permite lograr las correcciones necesarias para hallar la capacidad aislante de los aisladores, su dimensionamiento para una cota dada y los espaciamentos mínimos de los explosores de esferas antes de la prueba.

Si conocemos la presión atmosférica P (mbar) y temperatura T (°C) y calculamos  $\delta$ , se aplicarán los siguientes factores de corrección de densidad del aire, según cuadro A.3.2

Cuadro A.3.2

Ensayo de Impulso de Tensión	Polaridad	Factor
Tipo Rayo en seco	Positiva y Negativa	$k_d = \delta$
Tipo Maniobra en seco y bajo lluvia	Positiva	$k_d = \delta^n$
	Negativa	$k_d = 1$
A frecuencia industrial bajo lluvia		$k_d = \delta^n$

Donde  $n$  es un parámetro establecido en función de la disrupción según la distancia del aislamiento o espaciamiento de la brecha. Figura A3.1.

La tensión de descarga disruptiva del espinterómetro de esferas varía con la densidad relativa del aire ( $\delta$ ) en una relación casi lineal.

Las correspondientes tensiones de descargas disruptivas corregidas ( $U_{Dd}$ ) del espinterómetro de esferas son obtenidas multiplicando las tensiones de descargas disruptivas ( $U_D$ ) dadas en la tabla 3.1 por el factor de corrección  $k_d$  el cual varía con  $\delta$  y es dado en la tabla A.3.1

$$U_{Dd} = k_d U_D$$

Si  $\delta$  varía de 0.95 hasta 1.05, entonces  $k_d$  es igual a  $\delta$  y la fórmula dada anteriormente es reemplazada por  $U_{Dd} = \delta U_D$

TABLA A.3.1 Factor de corrección de la Densidad del Aire

densidad relativa del aire	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
factor de corrección (kd)	0.72	0.77	0.81	0.86	0.91	0.95	1.00	1.05	1.09	1.13

Nota: Cuando la densidad relativa del aire es  $\delta \neq 1$ , la tabla 3.1 será usado como sigue:

- a) Si la tensión de descarga disruptiva para un espaciamento S ha sido establecida, entonces la tensión de descarga disruptiva es tomada de la tabla 3.1 y multiplicada por  $k_d$  (cuando  $\delta$  varía de 0.95 hasta 1.05, se multiplica por  $\delta$ ).
- b) Si el espaciamento S ha sido establecido, el cual es requerido de tal modo que la descarga disruptiva ocurra en una tensión dada, entonces la tensión es dividida por  $k_d$  (cuando  $\delta$  varía de 0.95 hasta 1.05, se multiplica por  $\delta$ ). Para esta tensión de descarga disruptiva ya corregida para  $\delta=1$ , el espaciamento es tomado de la tabla 3.1

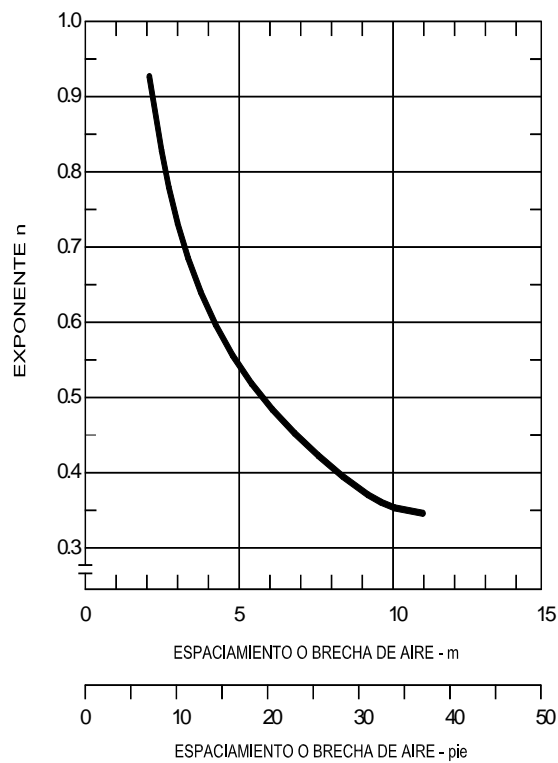


Fig. A.3.1 EXPONENTE  $n$  PARA LA CORRECCION DE LA TENSION POR DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE Y HUMEDAD ABSOLUTA ( según IEEE )

### A.3.2 Factor de Corrección de la Tensión por Altitud

Sobre todo cuando se trata de instalaciones en altitudes mayores a los 1000 m.s.n.m y no conocemos los parámetros característicos de presión y temperatura, se deberá afectar de un factor de corrección de la tensión por altitud, mediante una

característica experimental según Jacottet ( $f$ ) o la que establece la IEC (publicación Nro. 137), usando una expresión lineal, válida hasta un máximo de 3000 m.s.n.m.,

$$\text{que es: } f = 1 + \left( \frac{H - 1000}{100} \right) \left( \frac{1.25}{100} \right)$$

donde:  $f$  : factor de corrección por altitud; H: altitud de la instalación en m.

A mayor altitud la presión barométrica disminuye y la T (°C) baja, entonces la  $\delta$  disminuye; de tal modo que la mínima corrección que se deberá hacer es:

$$V_{cd} = U_0 \times \frac{1}{\delta} = U_0 \times f$$

$V_{cd}$  : Tensión corregida a una cota dada, resulta mayor que ( $U_0$ ), quiere decir que el aislamiento debe ser mejorado para cumplir con el nuevo valor  $V_{cd}$

$U_0$  = Tensión a Condiciones Normales (a nivel del mar) o tensión de descarga C.N.

### A.3.3 Factor de Corrección de la Tensión por Humedad<sup>42</sup> ( $k_h$ )

El sostenimiento del aislamiento con campos uniformes es independiente de la humedad. Pero, cuando el campo eléctrico es fuertemente deformado, entonces la tensión de descarga varía con la humedad absoluta del aire, creciendo aquella a medida que aumenta la humedad.

Si la humedad aumenta, entonces va acompañado por un decrecimiento en la densidad relativa del aire.

La tensión de descarga en un espinterómetro de esferas se incrementa con el aumento de la humedad absoluta del aire. El valor numérico del efecto es incierto solo que esto es improbable que sea más del 2 o 3 % sobre el rango de la humedad encontrada normalmente en laboratorio<sup>40</sup>. Sin embargo para la norma VDE 0433, Part 2<sup>19</sup>, la tensión de descarga de un Espinterómetro de esferas es apenas influenciada por la humedad en el aire. Por lo tanto, no lo toma en cuenta en las reglas para mediciones de tensiones mediante espinterómetro de esferas.

Se aplicaran para los ensayos de impulso de tensión tipo rayo (1.2/50  $\mu$ s) y a frecuencia industrial los factores de corrección de la tensión por humedad del aire ( $k_h$ ), dado en la figura A.3.3

Si la tensión de contorneo o el efluvo es  $U$  bajo las condiciones actuales de prueba (P, T, h), entonces la misma tensión bajo las condiciones atmosféricas normales  $U_0$  estará dada según la siguiente relación:  $U_0 = U \frac{k_h}{k_d}$  y para la tensión de

sostenimiento es:  $U_0 = U \frac{k_d}{k_h}$ .

donde:  $h$  = Factor de corrección de la Tensión por humedad absoluta, el cual depende de la geometría de la brecha obtenida de la figura A.3.3 condiciones normales (ANSI), la humedad absoluta  $h = 15 \frac{gr.H_2O}{m^3}$ .

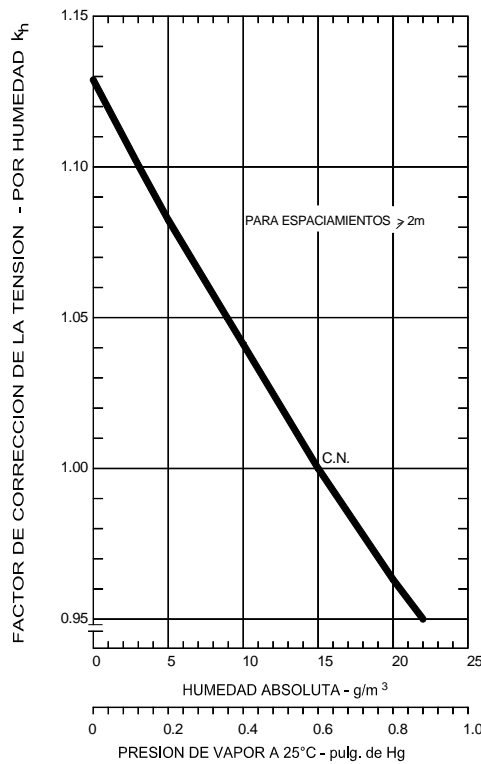


Fig. A.3.3 CARACTERÍSTICA EXPONENCIAL PARA DETERMINAR EL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA TENSION POR HUMEDAD ABSOLUTA PARA PRUEBAS DE IMPULSO DE POLARIDAD NEGATIVA EN AISLADORES DE SUSPENSIÓN Y BRECHAS DE AIRE

Para ensayos de impulso tipo maniobra o a frecuencia industrial no se aplicaran corrección de la humedad. El resumen se muestra en la tabla A.3.3



Ensayo	Tensión (U)	Corrección
Impulso de tensión tipo rayo en seco	Sostenida especificada	$U \frac{k_d}{k_h}$
	De contorno medida	$U \frac{k_h}{k_d}$
Impulso de tensión tipo maniobra bajo lluvia	Sostenida especificada	$U k_d$
	De contorno medida	$\frac{U}{k_d}$
Impulso de tensión a frecuencia industrial bajo lluvia	Sostenida especificada	$U k_d$
	De contorno medida	$\frac{U}{k_d}$

#### A.3.4 Factor de Corrección de la Tensión por Brecha de Aire o del espaciamento (S)

El sostenimiento del aislamiento con cualquier forma del gradiente de potencial es directamente proporcional a la densidad relativa del aire, a la presión atmosférica e inversamente proporcional a la temperatura absoluta para longitudes de brecha de aire o espaciamentos menores que 1 mt.

Para brechas de aire o espaciamento (S) mayores a 1 metro, se completarán las correcciones para la tensión, aplicando el exponente de brecha (n) que no forma parte de las condiciones ambientales, y que depende del espacio entre electrodos (S) y constituye un parámetro deducido experimentalmente mostrado en la figura A.3.1

según lo cual la expresión anterior resulta:  $U_0 = U \left( \frac{h}{\delta} \right)^n$

donde:  $\delta$ : Densidad Relativa del Aire en función de P y T dada en la figura A.3.4

n : Exponente que depende del espaciamento o brecha de aire obtenida de la figura A.3.1

Por encima de los 1000 mt., de altitud, la Presión, el coeficiente de Densidad Relativa del Aire, la rigidez dieléctrica del aire disminuye y la tensión a corregir aumenta debido al enrarecimiento del aire, exigiendo mayores longitudes de intervalos de aislamiento para una misma tensión.

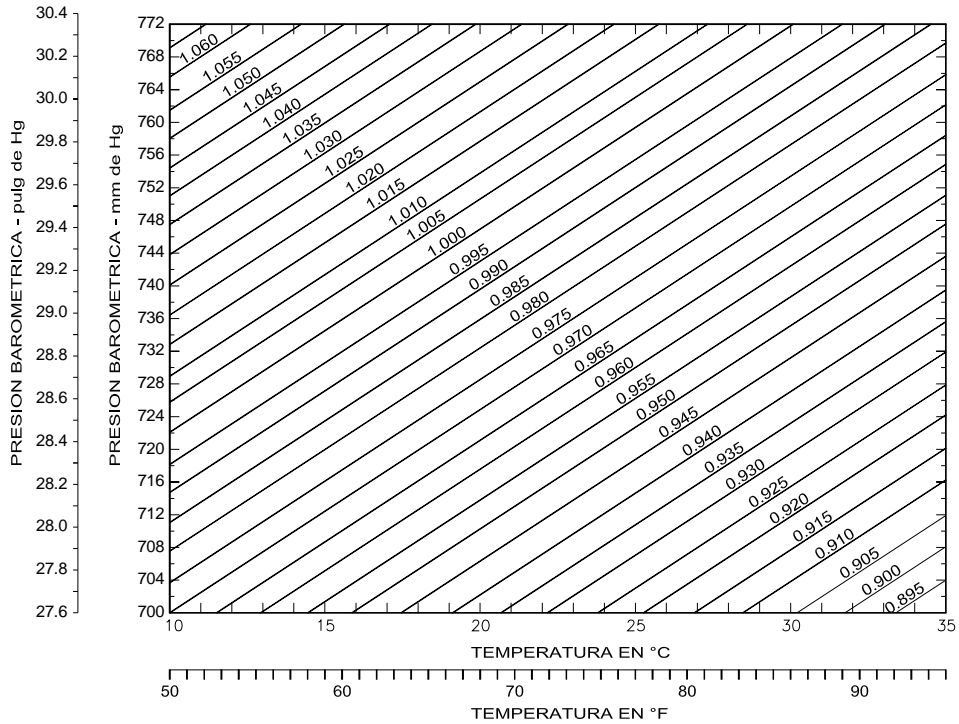


Fig. A.3.4 DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y LA PRESION.

Para los casos en que se deben corregir la longitud de la brecha de aire, se deberá aplicar el factor de corrección por humedad  $h_s$  que es establecida usando la curva presentada en la figura A.3.5

Se tiene: 
$$S_c = \frac{S_0}{h_s}$$

$S_c$  : Brecha de Aire o espaciamiento corregida, metros.

$S_0$  : Brecha de Aire a las condiciones nominales

$h_s$  :Factor de Corrección por humedad obtenida de la figura A.3.5

Luego, la corrección total de la longitud de brecha, se efectuará con los 2 factores asociados a la densidad relativa y la humedad absoluta del aire: 
$$S_c = \frac{S_0}{\delta \times h_s}$$

$S_c$  : Brecha de Aire o Espaciamiento corregido para las nuevas condiciones presentes.

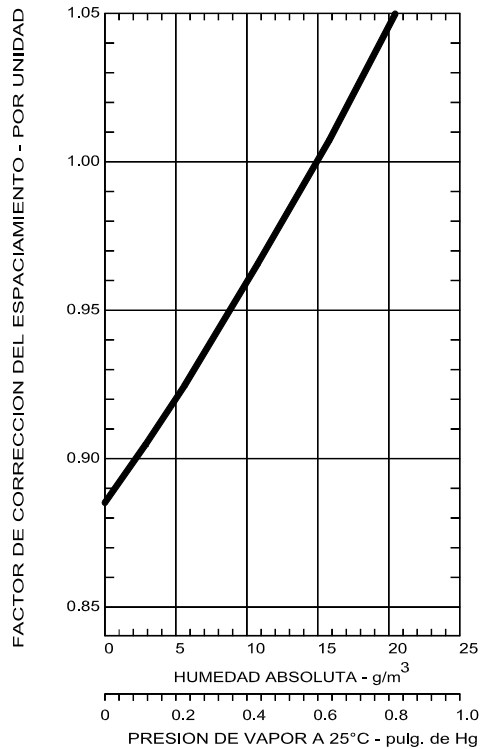


Fig. A.3.5 CARACTERÍSTICA DEL FACTOR DE CORRECCION  $h_s$  DEL ESPACIAMIENTO POR HUMEDAD ABSOLUTA DEL AIRE

Ejemplo:

Se desea dimensionar el aislamiento de un interruptor de potencia para un sistema eléctrico en 220 kV, localizado a una altitud máxima de 2300 metros. Especificar las tensiones de prueba a las que deberán someterse los aisladores (aislamiento externo).

Los parámetros normalizados IEC para  $U_n = 220$  kV (Eficaz) son:

- Tensión más elevada para el material:  $U_m = 245$  kV (Eficaz), según tabla 2.1
- Impulso de Tensión de Prueba 1.2/50  $\mu$ s,  $U_{pi} = 1050$  kV (onda completa)
- Tensión de Prueba a frecuencia industrial (60 Hz)  $U_{pf} = 460$  kV (Eficaz). Tabla A.4.1

A.4.1

Hallemos el Coeficiente de Densidad Relativa del Aire a 2300 metros, usando la

$$\text{ecuación de Jacottet: } f = 1 + \left( \frac{H - 1000}{100} \right) \left( \frac{1.25}{100} \right) = 1 + \left( \frac{2300 - 1000}{100} \right) \left( \frac{1.25}{100} \right) = 1.1625$$

Por tanto el factor de corrección por altitud es  $f = 1.1625$ .

Entonces  $\delta = \frac{1}{f} = \frac{1}{1.1625} = 0.86$

Luego, los parámetros de tensión de prueba corregida en Laboratorio son:

- Prueba Impulsional (1.2/50  $\mu$ s):  $\frac{1050}{0.86} = 1221$  kV (cresta)
- Tensión de Prueba a frecuencia industrial a 60 Hz es:  $U_{pf} = \frac{460}{0.86} = 535$  kV (Eficaz)

El nuevo parámetro para el dimensionamiento del aislamiento del equipo es:

- Tensión más elevada para el material:  $U_m = \frac{245}{0.86} = 285$  kV (Eficaz).

#### **A.4 Pruebas de Laboratorio que se realiza con el Generador de Impulsos de Tensión**

La experiencia ha demostrado que las medidas efectuadas bajo tensiones alternas (60 Hz) o tensiones continuas no permiten por sí solas juzgar el valor de un aislamiento, ya que pueden ocurrir disrupciones cuando se aplican sobretensiones con tiempos muy cortos.

Esto nos ha conducido a crear en Laboratorio tensiones de formas y duración predeterminadas como las que se presentan en las descargas atmosféricas y en las sobretensiones de maniobra.

En el caso de aislantes sólidos, cuando las sollicitaciones impulsionales exceden de un cierto valor cercano a la tensión de perforación, se producen acciones individuales que se suman de modo análogo a lo que sucede con los golpes sucesivos del martillo sobre un clavo.

Por tanto si las sollicitaciones del material aislante son de por sí elevadas no debemos elegir innecesariamente un mayor número de impulsos, ni hacer que aquellas excedan del valor prescrito puesto que perforarán el aislamiento.

Esta onda de impulso de tensión reproduce en su mayoría los efectos más severos por sobretensión originado por descarga atmosférica, con un frente de onda escarpado que da una distribución de tensión no lineal.

Para los ensayos de tensión lo que interesa realmente es la forma de onda que resulta al aplicar al objeto que se prueba y la magnitud de la corriente de impulso que

acompaña eventualmente a la descarga, para conseguirlo deberemos calibrar el Generador de impulso mediante el Espinterómetro de Esferas.

El aislamiento del objeto bajo prueba no deberá ser perforado, ni experimentar contorno bajo la tensión especificada, predeterminando de esta manera su comportamiento, obtener las características de su diseño así como las distancias de seguridad de los aislamientos.

#### **A.4.1 Método de Prueba de Impulso de Tensión**

Se realiza por aplicaciones sucesivas de impulsos de tensión  $1.2/50 \mu s$  para cada nivel de tensión de prueba, de tal forma que la proporción de aplicaciones de tensiones que producen descargas disruptivas en el objeto de prueba son registrados en los oscilogramas.

Se aplica la tensión  $V_K$  (generalmente el 5% de la tensión de prueba) y se escoge el intervalo  $\Delta V$  (3% del valor  $V_K$ ).

Se aplica la primera tensión de prueba con el nivel  $V_K$ , de tal forma que si ocurre la descarga disruptiva, el nuevo nivel de tensión es  $V_K - \Delta V$ , en cambio si acaso no se produce la descarga disruptiva con  $V_K$ , el nuevo nivel de tensión es  $V_K + \Delta V$ .

Este procedimiento se continua hasta alcanzar un número suficiente de observaciones que han sido registradas. Después de tener el número de impulsos  $N_V$  aplicados en los niveles correspondientes  $V_K$ , calculamos la tensión disruptiva al 50 %:

$$U_{50\%} = \sum_1^{N_V} \frac{n_V V_V}{n_V}.$$

#### **A.4.2 Realización de la Prueba de Impulso de Tensión**

El objeto en prueba estará sometido a una onda de tensión completa solamente si no ocurre ninguna descarga disruptiva en el circuito externo del generador de impulso (en el objeto de prueba, en el espinterómetro, hacia puntos de tierra mal distanciados, etc), porque de lo contrario se cortará la onda en el instante de la interrupción.

Teniendo en cuenta esta consideración, se aplica al objeto en prueba los impulsos siguiendo el siguiente orden, después de la calibración del generador en vacío.

- 3 impulsos de tensión reducida (el 50 % de la tensión de prueba  $V_p$  )
- 5 impulsos de tensión al 100% de la tensión de prueba  $V_p$  .

Si no ocurre descarga disruptiva al concluir las aplicaciones mencionadas, los requerimientos de prueba se calificaran de satisfactorias, en cambio si ocurre más de una descarga disruptiva en el objeto entonces se dará por fracasada la prueba; sin embargo si en las 5 aplicaciones de ondas de impulso plenas ocurre una sola falla, se permite incluir 10 pruebas adicionales de ondas de impulso de tensión y se considera haber aprobado la mencionada prueba si durante estas aplicaciones adicionales no se presenta ninguna falla por descarga disruptiva.

#### **A.4.3 Prueba de Impulso de Tensión para aparatos de Subestaciones**

Demostrar que las estructuras del aislamiento reúnan los niveles de aislamiento especificado.

Dicha prueba deberá ser periódica, sencilla y que los parámetros eléctricos de los aislantes sean seleccionados a fin de mantener un balance económico entre el comportamiento del sistema y el costo de sobre-aislamiento.

- **Pruebas de Impulso de Tensión para Aisladores**

Para dicha prueba aplicaremos bruscamente sobre el aislador, una sobretensión importante que reproduzca el impulso que pudiera experimentar el mismo material por impacto directo o indirecto del rayo, con el propósito de evaluar y calificar los materiales que componen el aislador, el diseño del fabricante así como sus aplicaciones y propiedades eléctricas.

El máximo valor de tensión aplicado es el valor que garantiza el fabricante a sus componentes de líneas de transmisión u aparatos ante fenómenos ya mencionados. La indicación de este valor se muestra en la placa característica con la denominación BIL.

En la figura A.4.3 se muestra el circuito para dicho ensayo, conectando una carga T que puede ser representado por una cadena de aisladores, explosores de varillas, u otros dispositivos.

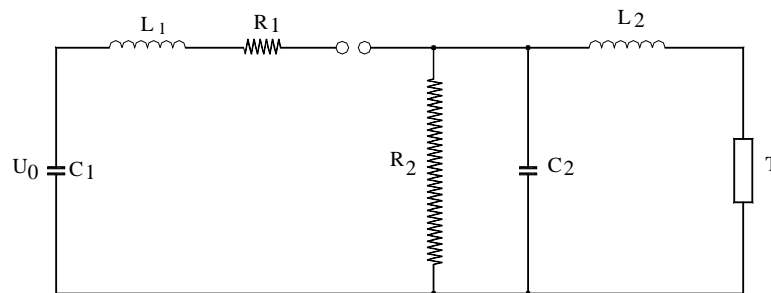


Figura A.4.3 Diagrama del circuito generador de impulso conectado a una cadena de aisladores (T)

### Procedimiento de Prueba

Para el ensayo, el Generador de Impulso sin conexión eléctrica con el aislador, es regulado para entregar una onda positiva, con una duración de frente de onda de  $1.2 \mu\text{s}$  y la cresta igual al impulso de tensión especificado.

Luego conectamos el aislador al circuito del Generador y lo sometemos 20 impulsos de tensión, durante la prueba el aislador no deberá sufrir perforación del aislante durante este ensayo ( IEC-71 ).

Cuando al aislador se le somete a un ensayo de sobretensión, no deberá ceder por la perforación sino por descarga exterior y en estas condiciones, aún si está mojado o sucio resistir por lo menos 2 veces la tensión nominal y si está seco resistir por lo menos 3 veces la tensión nominal<sup>3</sup>

Los valores de la tensión descarga disruptiva al 50 % con polaridad positiva y negativa serán corregidos por factores cuando la humedad, presión y temperatura sean diferentes a los valores normales ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $760 \text{ mm Hg}$ ).

- **Pruebas de Impulso de Tensión a Transformadores**

El interés del ensayo con ondas de impulso de tensión a transformadores de potencia es probar la rigidez dieléctrica a lo largo de los arrollamientos (entre espiras, capas y bobinas) con una distribución de sobretensiones análogas a las que aparecen en servicio, que nos permitirá determinar su intensidad de impulso, la característica tensión-tiempo, el efecto de la polaridad y su característica de falla, demostrando así que el diseño, la mano de obra y la calidad del aislamiento del transformador es tal que satisfagan los límites de prueba de tensión específica normalizada.

Describiremos ahora las diversas pruebas con ondas impulsionales de tensión que pueden ser aplicado a los transformadores de potencia:

- a) Una onda completa es una onda con parámetros 1.2/50  $\mu$ s generalmente de polaridad negativa que se aplica a transformadores sumergidos en aceite, cuyas magnitudes están dadas en la tabla A.4.1
- b) Una onda completa reducida es una onda de 1.2/50  $\mu$ s que tiene un valor de cresta que es el 50 % del valor máximo de una onda completa.
- c) Una onda recortada se obtiene conectando un explosor de varillas para producir una descomposición de la tensión sobre la cola o la frente de la onda aplicada. Esta inclinación abrupta está limitada por la capacitancia de carga total en combinación con la inductancia del Generador, la inductancia del conductor y la resistencia serie.

**Tabla A.4.1 Valores de las Tensiones de Prueba para los que deben tomarse los Niveles de Aislamiento asignados (IEC Publicación Nro. 71)**

Tensión más elevada de la red (entre fases). kV eficaz	Tensión de prueba a frecuencia industrial kV eficaz		Impulso de tensión de prueba 1.2/50 $\mu$ s. kV pico	
	Niveles de Aislamiento		Niveles de Aislamiento	
	pleno	reducido	pleno	reducido
100	185	150	450	380
123	230	185	550	450
145	275	230	650	550
170	325	275	750	650
245	460	395 360 <sup>1</sup>	1050	900 825 <sup>1</sup>
300		510 460 <sup>1</sup>		1175 1050 <sup>1</sup>
362		570 510 <sup>1</sup>		1300 1175 <sup>1</sup>
420		680 630 <sup>1</sup>		1550 1425 <sup>1</sup>
525		740 680 <sup>1</sup>		1675 1550 <sup>1</sup>
765		900 800 <sup>1</sup>		2150 1900 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> aplicable solamente cuando el factor de aterramiento es menor que 80 %.

Cada clase de aislamiento tiene su valor particular de impulso, asociada con el nivel de onda cortada y con el frente del nivel de onda completa.



### **Procedimiento de prueba**

Para dicha prueba el transformador es conectado al circuito del generador de impulso. La prueba con onda de impulso de tensión será sometida por uno de los bornes del lado de alta tensión del transformador y los bornes del lado de baja tensión se cortocircuitan.

Cuando se ensaya en el lado de alta, la señal de avería del devanado es detectado mediante el oscilógrafo k02 que determina la corriente de carga en el devanado de baja tensión que está cortocircuitado y mediante el oscilógrafo k01 registramos simultáneamente la corriente a tierra del terminal en corto circuito correspondiente a la fase no sometida al impulso.

Se empieza por un ensayo previo haciendo descargas con el 50% de la tensión requerida para verificar si la forma está dentro de la prescripción de la norma

Después se hace la descarga al 100% de la tensión; si la forma de la curva de corriente al 100% de tensión es igual al 50% de tensión se considera satisfecha la prueba.

Si no hubo alteración del comportamiento en los dos casos, entonces el aislamiento está intacto. Si por el contrario la curva de corriente en la prueba al 100% de la tensión fuese muy distinta, pondría en evidencia un daño en el aislamiento.

Los ensayos de impulso en su forma actual no solamente prueban el aislamiento longitudinal de los devanados, sino su rigidez dieléctrica respecto a la tierra (núcleo, cuba ) y respecto a los restantes arrollamientos o accesorios.

En la figura A.4.4 se representa el circuito del Generador de Impulso conectado a la carga que es un transformador representado por el circuito equivalente simplificado.

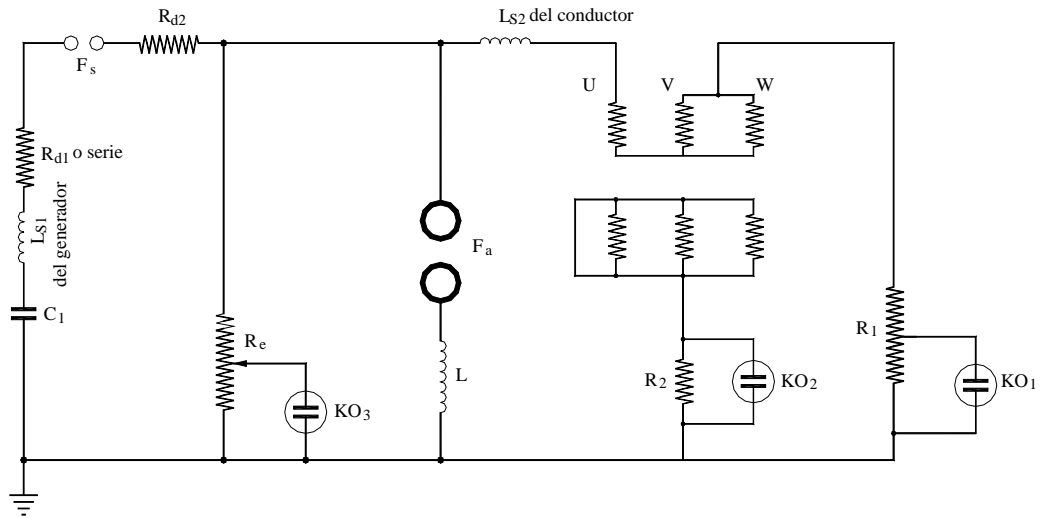


Figura A.4.4 Esquema del circuito de Impulsos y de medida para el ensayo de transformadores con Ondas de Impulso.

- $C_1$  :Capacitores de impulso del generador que descargan en serie.
- $F_a$  :Espinterómetro de esferas (generalmente de varillas)
- $F_s$  :Explosor de Conexión
- $K_0$  :Osciloscopio
- $R_1, R_e$  :Resistencia de toma y aplicación de tensión
- $R_{d1}, R_{d2}$  :Resistencia de Amortiguamiento o serie;  $R_2$  : Resistencia de descarga.
- $U, V, W$  : Bornes del arrollamiento en A.T. del Transformador sometido a los ensayos de Impulso.

#### • Prueba de impulso de Tensión al Autotransformador

En la figura A.4.5 se muestra el montaje para la aplicación del impulso de tensión a un autotransformador de 75 kV de tensión nominal con un impulso de 350 kV. Se aplica la tensión por uno de los bornes (UU en este caso) los bornes restantes se ponen a tierra, sea directamente o a través de resistencias de 500 ohmios que representan las líneas aéreas. Mediante una resistencia conectada entre el neutro y tierra se toma una tensión para el registro de corriente en el oscilógrafo.

Para realizar la prueba primero se hacen descargas con el 50 % de la tensión requerida para verificar si la forma está dentro de la prescripción de la norma. Después se hace la descarga al 100 % de la tensión; si la forma de la curva de intensidad al 100 % de tensión es igual a la del 50 % de tensión (salvo la escala) se considera satisfecha la prueba. Si en los dos casos no ha habido alteración del comportamiento por lo tanto el aislamiento está intacto. Si por el contrario la curva de corriente en la prueba del 100 % de tensión fuese distinta, pondría en evidencia un daño en el aislamiento.

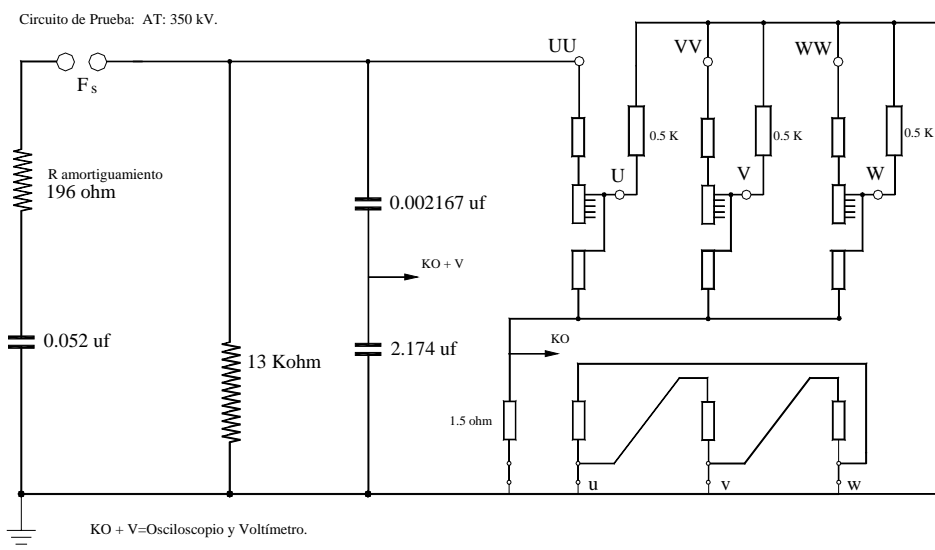
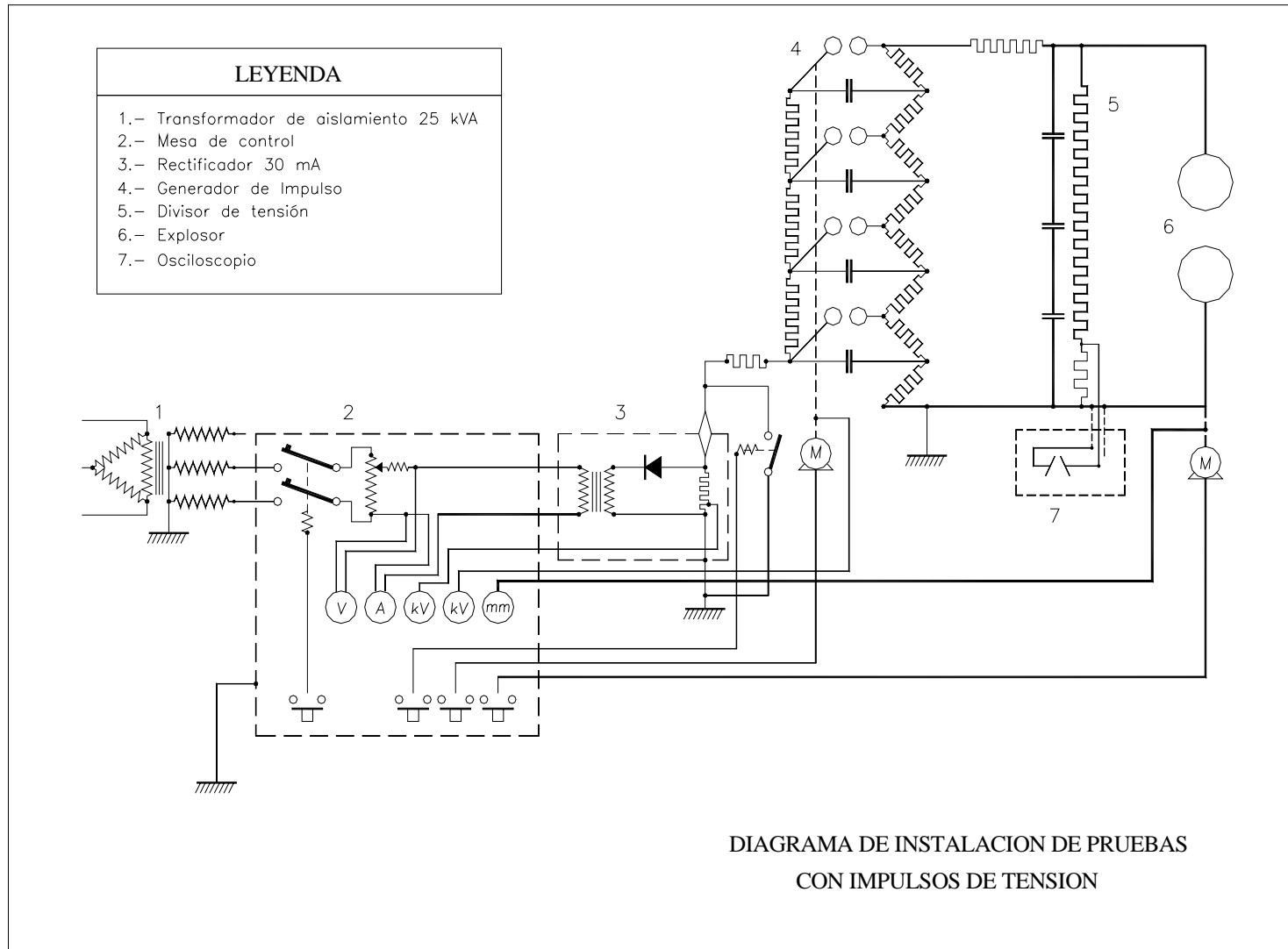
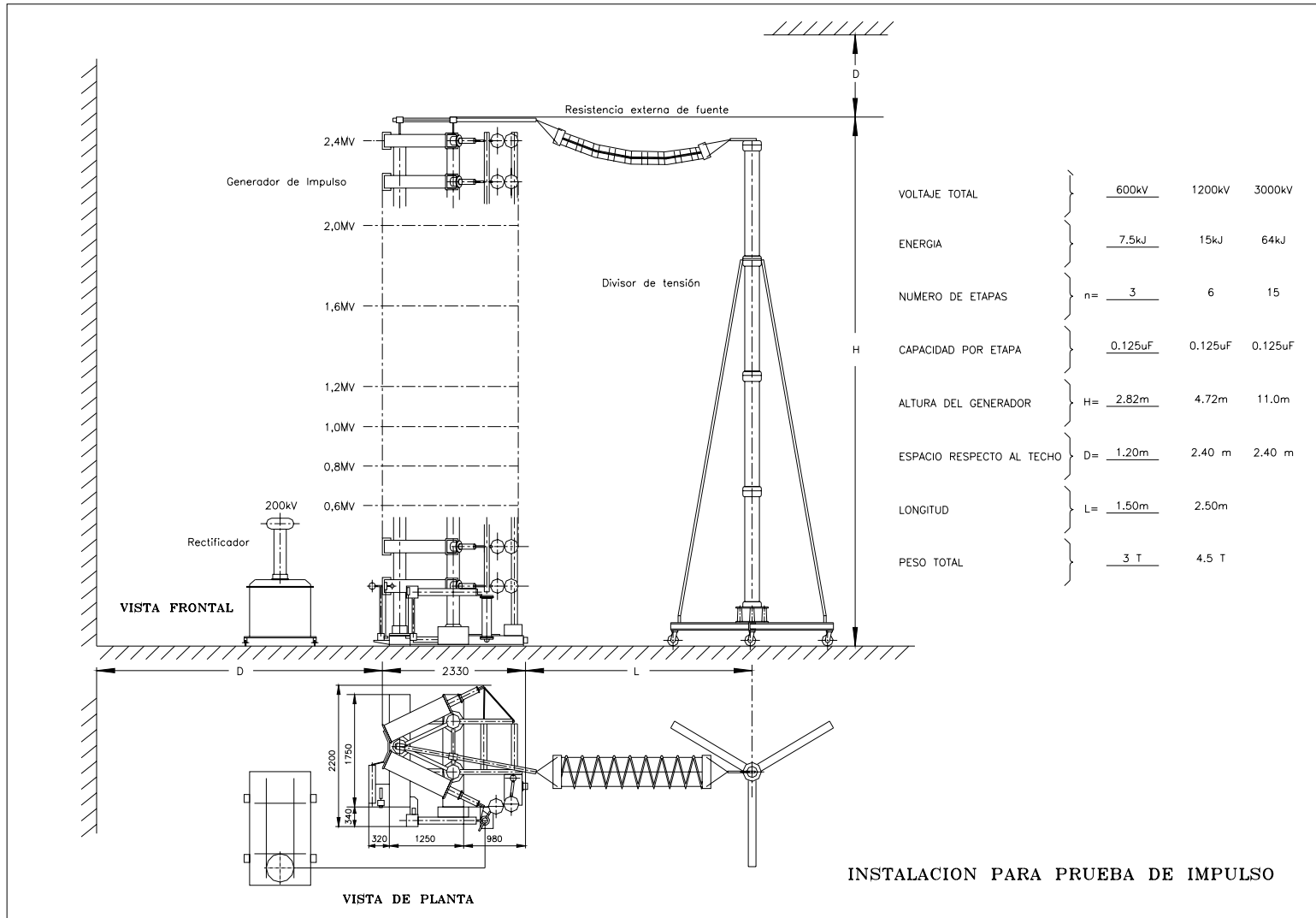
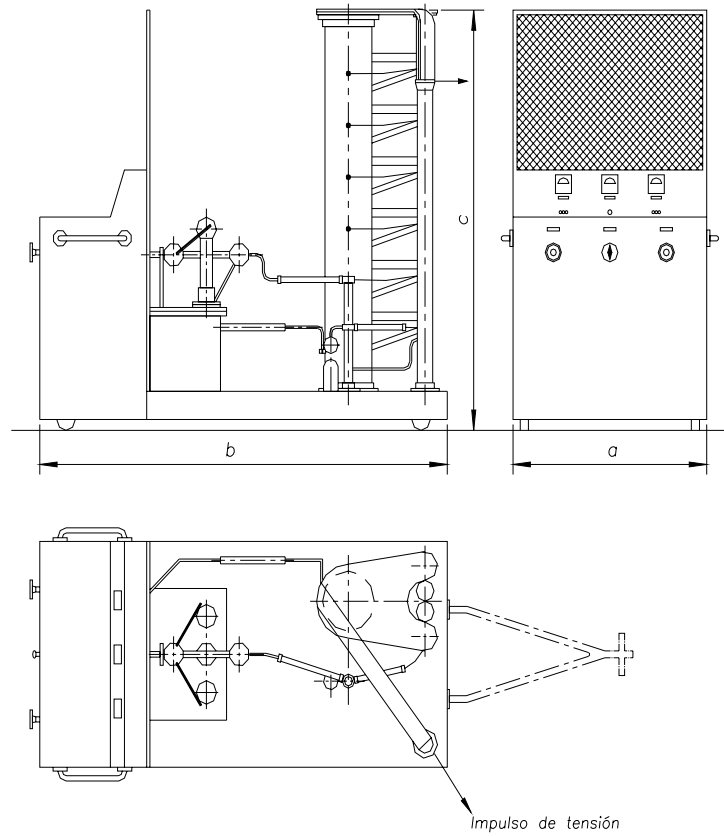


Figura A.4.5. Protocolo de prueba de impulso de Tensión a un Autotransformador





## EL GENERADOR DE IMPULSO



Tensión de carga	Energía	a mm	b mm	c mm	Peso
900 kV	6 kJ	1400	2800	4300	1750 kg

## BIBLIOGRAFIA

1. Enríquez Harper, Gilberto.  
Estudio de los Transitorios en Sistemas Eléctricos y Coordinación de Aislamiento.  
Editorial Limusa. Tomo II. 1987
2. Rubén Constantino Ruelas Flores.  
Métodos de Cálculo de Sobretensiones Transitorias por Operaciones de Maniobra en Sistemas Eléctricos de Potencia.  
Trabajo monográfico, 1977.
3. Enrique Sialer Urpeque  
Distribución de la Tensión a lo largo de la Cadena de Aisladores.  
Trabajo monográfico, 1966
4. Ampuero Rossi, Manuel Demetrio  
Ensayo en Aisladores para Líneas Aéreas.  
Trabajo monográfico, 1966
5. Condori Vargas, Mauro  
Comparación de Métodos de Estudio de Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Potencia.  
Trabajo monográfico, 1976
6. Justo Yanque, Montufar  
Técnicas de Alta Tensión, Notas del Curso en estudio de maestría
7. Bejarano Heredia, Alberto Ismael  
Efecto de la Altitud sobre las Altas Tensiones.  
Tesis, 1986
8. Hernán Ochoa, Luna.  
Sobretensiones debida a apertura de Circuitos  
Trabajo Monográfico, 1962
9. Enríquez Harper Gilberto  
Técnicas de Alta Tensión, Tomo I
10. Alberto Salvador Zegarra Uceda.  
Evaluación del riesgo de falla debido a las Sobretensiones de Maniobra en los Aislamientos de la L.T. aéreas en Alta Tensión.

- Tesis, 1986
11. Jorge Chinchihualpa González.  
Análisis y criterios de diseño de divisores de tensión para Alta Tensión.  
Tesis, 1981
  12. Amilcar Bedoya Castillo.  
Análisis y Prueba de Transformadores de Potencia sometidas a las Tensiones de Impulso. Tesis, 1988
  13. Norma Itintec. N° 370.002.  
Transformadores de Potencia
  14. Ing. Bernardino Rojas Vera; Enrique Collazos Cruzado.  
Transitorios de Maniobras en L.T, de 220 kV Compensadas con reactores de derivación.  
XI Conimera. 1993
  15. Ing. Enrique Collazos Cruzado.  
Criterios generales para Simulación de Transitorios de Maniobra con el EMTP.  
X Conimera. 1991
  16. Ing. Bernardino Rojas Vera.  
Comportamiento de subestaciones de 220 kv. ante descargas atmosféricas.  
X Conimera 1991.
  17. IEC Publication N° 60.  
High Voltage Test Technique, 1962.
  18. Norma VDE Generation and Measurement of high voltages., Part 3  
Regulations for the generation and use of impulse voltages and currents for testing purposes.  
1967, August.
  19. Norma VDE 0433 Part 2/8.61.  
Generation and Measurement of high voltages, Regulations for Voltage Measurement by Means of Sphere-Gaps (one Sphere Earthed)  
April 1967.
  20. Roth.  
Técnica de Alta Tensión
  21. High Voltage Laboratory Equipment Hipotronics



- Impulse Generator.  
Catálogo USA.1979
22. High Voltage Laboratory Equipment Haefely.  
Catálogo, USA
23. Reliable products power.  
Guía de aplicación de aisladores poliméricos de suspensión para líneas aéreas de transmisión y distribución.  
Agosto, 1995.
24. Electric Power Research Institute.  
Transmission Line Reference Book 345 kV and above  
1979
25. Arnold Rodewald and Kurt Feser.  
The Generation of Lightning and Switching Impulse Voltages in the UHV region with an improved Marx Circuit.  
Paper T 73 342-3, IEEE Power System Instrumentation and Measurements.  
May 23, 1973.
26. K. Feser and E. Gockenbach.  
Distortion free Measurement of High Impulse Voltages.  
Paper 87 WM, 177-9, IEEE Transactions on Power Delibery, vol. 3, Nro. 3.  
July 1988
27. F. W. Heilbronner.  
Firing and Voltage Shape of Multistage Impulse Generators'.  
Paper 71 TP 121-PWR, IEEE Power System Instrumentation and Measurements.  
Dec., 1970.
28. H. Anis and R. P. Comsa,  
Identification and Generation of Non-Standard Switching Surges.  
Paper 70-TP-603-PWR, IEEE Power System Instrumentation and Measurements.  
April 28, 1970.
29. F. C. Creed and M.M.C. Collins.  
Shaping Circuits for High Voltage Impulses.  
Paper 71TP 122-PWR, IEEE Power System Instrumentation and Measurements.  
November 25, 1970.

30. M. J. Bishop and M. F. Simon.  
The Impulse Generators at les Renardieres.  
Paper T72 123-3-PWR, IEEE Power System Instrumentation and Measurements.  
November 22, 1971.
31. A. Carrus and L. E. Funes.  
Very Short Tailed Lightning Double Exponential Wave Generation Techniques  
based on Marx Circuit Standard Configurations.  
Paper 83 SM 405-8, IEEE Transactions on Power Apparatus and System. Vol.  
PAS-103, Nro. 4.  
April 1984
32. A. Capasso, C. Mazzeti and U. Ratti,  
HV Impulse Generators Equivalent Circuits.  
Paper T72, 122-S, IEEE Power System Instrumentation and Measurements.  
January 30, 1972.
33. High Voltage Laboratory Equipment Haefely.  
Impulse Voltage Generators, series E  
Printed in Switzerland, 1ra.edición. 1974.
34. Marino Perez Gomez.  
Diseño Eléctrico de un Módulo Generador de Tensiones de Impulso.  
Tesis ENIT. 1977.
35. P.L. Bellaschi.  
The Measurement of High-Surge Voltages.  
AIEE Transactions; New York.  
January 23-27, 1933.
36. P.L. Bellaschi.  
Impulses voltages chopped on front  
AIEE Transactions; New York.  
May 19, 1936
37. J.H. Chiles.  
The Impulse Generator and its Uses  
AIEE Proceedings, Section T2-77, 1952, Vol 71. JR. Vol 71.  
January 1952.

38. United States of America Standards Institute.  
General Requirements for Distribution, Power and Regulating Transformers and Shunt Reactors.  
USA Standard C57.12.00 – 1968.  
Approved March 22, 1968
39. Norma Española UNE. 21-308-76. Parte II.  
Ensayos en Alta Tensión – Modalidades de Ensayo. Concuerda con la norma IEC 60-2 (1973).
40. United States of America Standards Institute.  
USA and IEEE Standard Techniques for Dielectric Test.  
Approved July 12, 1968.
41. I.E.C. Recommendation.  
Recommendation for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed).  
Publication 52, 1960.
42. Norma Española UNE. 21-114-83 (Equivalente a IEC-383 de 1983),  
Ensayo de aisladores de material cerámico o de vidrio para líneas eléctricas aéreas de tensión nominal superior a 1000 V.  
Diciembre 1983.