

01170  
1ej. 2.



# Universidad Nacional Autónoma de México

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

## “GENERADOR Y PRUEBAS DE IMPULSO”

T E S I S

Para obtener el Grado de:  
MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRICA

P r e s e n t a :

ANDRES LOPEZ MENDOZA



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E .		pag
1.	Introducción.	1
1.1	Análisis general.	1
1.2	Objetivo.	2
1.3	Limitaciones.	3
2.	Aspectos generales de construcción.	6
2.1	Componentes mecánicos.	6
2.1.1	Soportes para los capacitores.	6
2.1.2	Elementos de fijación de los soportes para ca- pacitores a la base.	8
2.1.3	Torcide circular.	9
2.1.4	Soportes para colocar las resistencias de fre- nte y de cola de la onda y carga.	11
2.1.5	Soporte para explosores.	13
2.1.6	Explosores.	15
2.1.7	Conectores entre explosores y capacitores.	18
2.1.8	Base metálica.	20
2.2	Componentes eléctricas.	21
2.2.1	Capacitores.	21
2.2.2	Resistencias para el frente de la onda.	24
2.2.3	Resistencias para la cola de la onda.	25

	Pag
2.2.4 Resistencias de carga.	27
2.2.5 Resistencias de protección.	30
2.2.6 Capacitancia de precarga.	31
2.3 Componentes electromecánicos.	32
2.3.1 Fuente de alimentación de corriente directa.	32
2.4 Especificación de los datos técnicos de un generador de impulsos.	33
3. Análisis matemático del generador de impulsos.	35
3.1 Circuitos equivalentes de Marx, Marx modificado, Goodlet y Goodlet modificado.	35
3.2 Circuito básico para análisis.	41
3.3 Obtención de las ecuaciones del circuito.	43
3.4 Ecuación del voltaje en la carga.	50
3.5 Ecuación del voltaje máximo de la onda.	51
3.6 Obtención del tiempo de cola en forma aproximada y práctica.	54
3.7 Obtención aproximada y práctica del tiempo de frente de la onda.	58
3.8 Análisis del generador de impulsos considerando efecto inductivo.	61
3.9 Eficiencia.	68

	pag.
4. Estudio de los parametros del generador.	75
4.1 Voltaje nominal.	75
4.2 Capacitancia.	77
4.3 Energia nominal.	79
4.4 Tiempo de frente de la onda.	83
4.5 Tiempo de cola de la onda.	84
4.6 Resistencia para el control del frente de la onda.	85
4.7 Resistencia para el control de la cola de la onda.	87
4.8 Eficiencia del generador de impulsos.	88
4.9 Energia de disipación.	92
5. Características generales en el diseño.	93
5.1 Cálculos para el diseño de un generador de impulsos.	94
5.2 Planteamiento computacional para obtener los parámetros involucrados en ondas de impulso.	105
6. Consola para el control del generador de impulsos.	117
6.1 Características generales.	117
6.2 Objetivos.	119

	pag.	
6.3	Circuito eléctrico equivalente general.	120
6.4	Operación.	127
7.	Aspectos generales para medición de ondas de impulso.	129
7.1	Divisor de tensión tipo resistivo.	130
7.2	Divisor de tensión resistivos compensados.	144
7.2.1	Ejemplo.	150
7.3	Divisor de tensión tipo mixto (capacitivo amortiguado serie).	153
8.	Pruebas de impulso.	158
8.1	Pruebas de impulso en transformadores.	158
8.1.1	Capacitancia del transformador.	159
8.1.2	Circuito eléctrico utilizado y equipo de medición.	164
8.1.3	Obtención de factores de corrección.	166
8.1.4	Curvas de voltaje entrada-salida.	814
8.1.5	Calibración para obtener ondas de impulso correctas.	183
8.1.6	Circuito final para pruebas.	187
8.1.7	Procedimiento de prueba.	191

	pag.
8.2 Prueba de impulso en aisladores.	195
8.2.1 Obtención del voltaje crítico de flanco.	195
8.2.2 Determinación del voltaje soportado al impulso $U_{10}$ .	206
9. Conclusiones.	218
Referencias.	224

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. ANALISIS GENERAL

El generador de impulsos se le puede considerar como un sistema tal, que ante la aplicación-durante determinado tiempo-de una señal de voltaje de corriente directa, tendremos a la salida una onda de impulso, la cual puede ser utilizada para simular fenómenos transitorios que tiene como receptor principalmente las líneas de transmisión, originando como consecuencia ondas viajeras en éstas de elevado voltaje y corriente que al llegar a subestaciones provocan daños fundamentalmente en transformadores, máquinas rotatorias, etc.

Ante el costo pues de los daños ocasionados por ondas de impulso de alto voltaje (sobretensiones de alta frecuencia) se presenta la necesidad de investigar las posibles soluciones a éste alto costo económico.

Tomemos pues, al generador de impulsos como un sistema capaz de proporcionarnos ondas de impulsos - cuya magnitud en cuanto a tensión estará en función del diseño de éste, así también al tiempo necesario para tener dichos voltajes.



Las ondas de impulso se han normalizado a nivel internacional existiendo;

- a) ondas de impulso de 1.2/50 microsegundos para simulación de sobretensiones por rayo llamado transitorio externo (descargas atmosféricas) fig. 1
- b) ondas de impulso de 250/2500 microsegundos - para simulación de apertura o cierre de interruptores considerado como transitorio interno. fig. 2

## 1.2. OBJETIVO

El objetivo de un generador de impulsos es por lo tanto proporcionar ondas de alta tensión en corto tiempo para probar equipos (transformadores, generadores etc.) conectados a sistemas de potencia - se. n capaces de soportar dichos transitorios.

Utilizaremos al generador de impulso para:

- a) Obtención de voltaje crítico de flameo en aisladores.
- b) Determinación del nivel básico de aislamiento al impulso (B.L.I.) para diferentes - tipos de aisladores.

- c) pruebas para comprobar el diseño y manufactura del equipo eléctrico (transformadores-máquinas rotatorias, cables, cuchillas etc.)

### 1.3. LIMITACIONES

Las limitaciones de un generador de impulso están dadas en cuanto a su diseño, pudiendo existir variaciones en cuanto a voltaje, capacitancia, energía y número de pasos, además de otros parámetros.

En el I.I.E. se tiene experiencia en el diseño y fabricación de los siguientes tipos;

GENERADOR DE IMPULSOS				
Tensión	(KV)	400	720	1440
Energía	(KJ)	6.6	0.863	0.864
Núm. de pasos		4	12	24
Capacitancia	( $\mu$ F)	0.0833	0.00333	0.000833
Capacitancia/paso	(nf)	330.0	40.0	20.0

Los datos anteriores tienen como característica - que los generadores de impulso están diseñados en el nivel de distribución hasta clase 69 KV, lo anterior es pues la limitación en nuestro análisis.

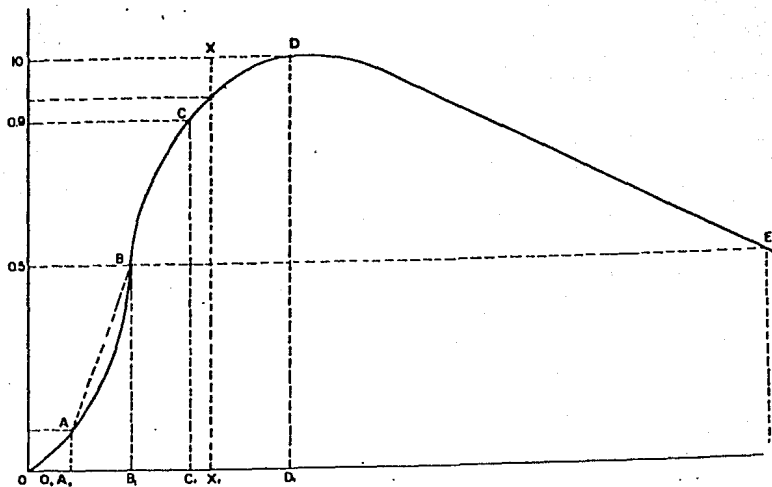


Fig. 1 .Forma de onda para simular  
sobretensiones por descargas atmos-  
féricas ( rayo ) .

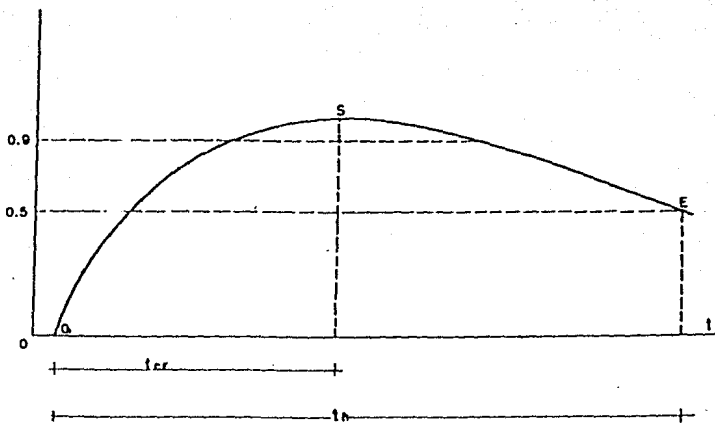


Fig. 2 .Form. de onda originada en  
la operación por maniobra .

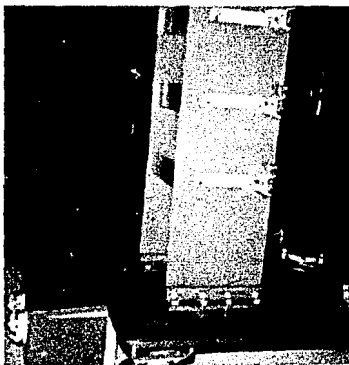
## 2. ASPECTOS GENERALES DE CONSTRUCCION

LOS COMPONENTES QUE FORMAN AL GENERADOR DE IMPULSOS SON

### 2.1.- COMPONENTES MECANICOS

#### 2.1.1. SOPORTES PARA LOS CAPACITORES

Fabricados por lo general de algun material aislante (madera tratada, pressboard, acrílico, fibra de vidrio con resina epoxy, etc.), alta resistencia mecánica y poca capacidad de arrastre de voltaje. fig. n<sup>o</sup>m 2.1



SOPOITE PARA CAPACITORES.

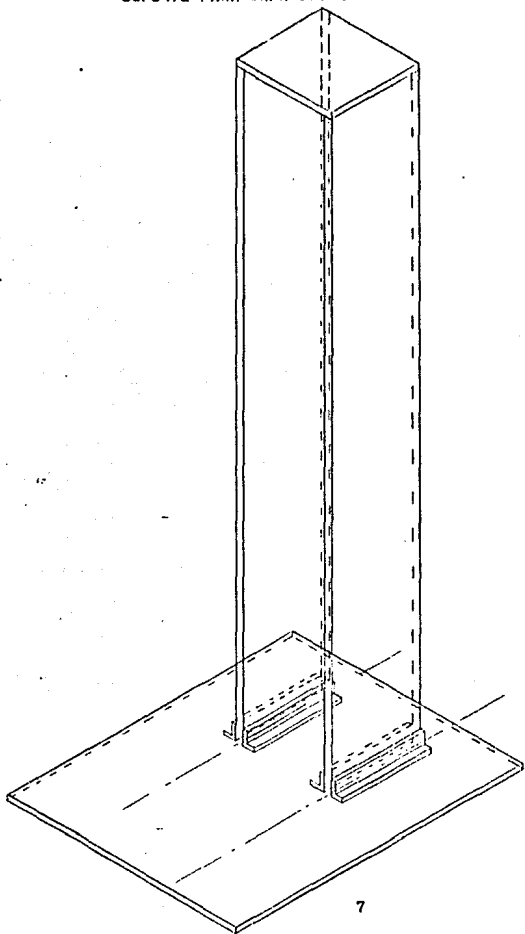
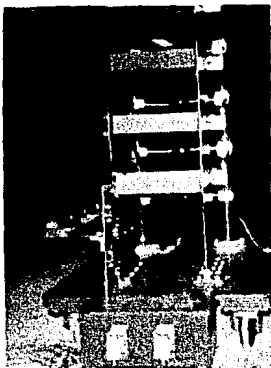


FIGURA 2.1

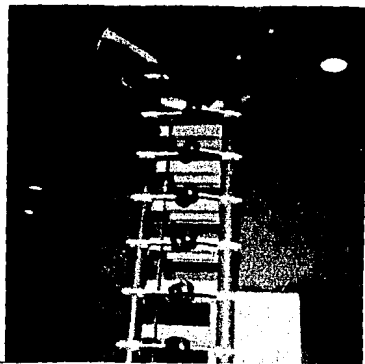
**2.1.2. ELEMENTOS DE FIJACION DE LOS SOPORTES  
PARA CAPACITORES A LA BASE.**

Los cuales deberán ser de material aislante y alta resistencia mecánica fijados a la base y soportes con tornillos de plástico, esto es para evitar disminuir distancias críticas en cuanto a tensión entre base y capacitores, conectores o esferas explosoras, -  
fig. n.ºm. 2.1

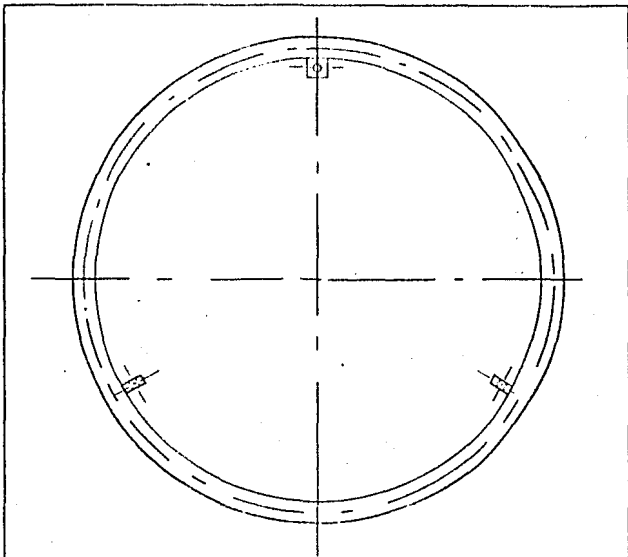


### 2.1.3. TOROIDE CIRCULAR.

Es con el fin de reducir el efecto corona del generador originado en puntos de alto potencial (capacitores puntas, etc.) se coloca en la parte superior del soporte para capacitores e interconecta con el último capacitor usado, con un conector eléctrico y además a través de él se obtiene la onda de impulso de salida hacia el objeto bajo prueba, fig. n.ºm. 2.2



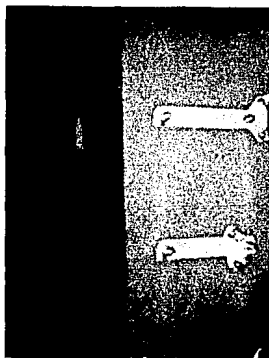
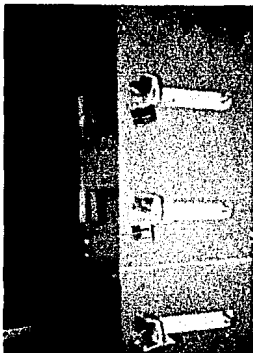




TOROIDE CIRCULAR.  
FIGURA NUM. 2.2

2.1.4. SOPORTES PARA COLOCAR LAS RESISTENCIAS  
DE FRENTE, COLA Y CARGA.

Estos debén ser fabricados de acuerdo al acabado final de las resistencias, además de un buen material conductor (cobre, estaño etc.) así tambien deberan ser versátiles para poder poner o quitar fácilmente dichos elementos, además dependeran de cada diseño. - fig. núm 2.3.



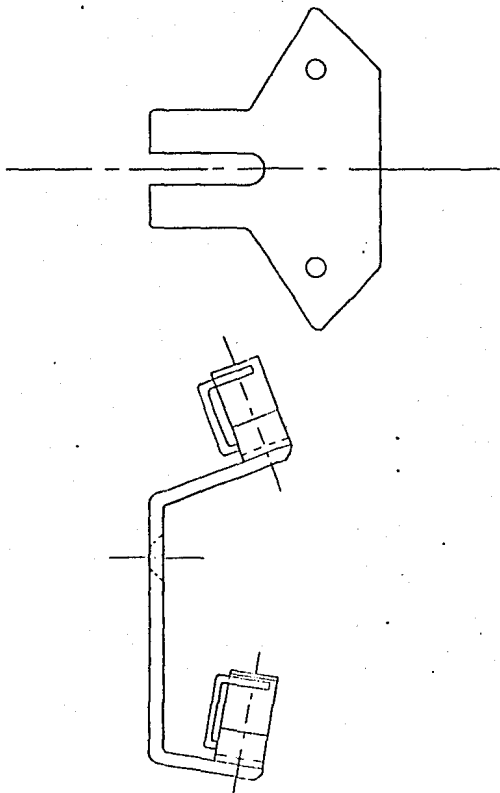
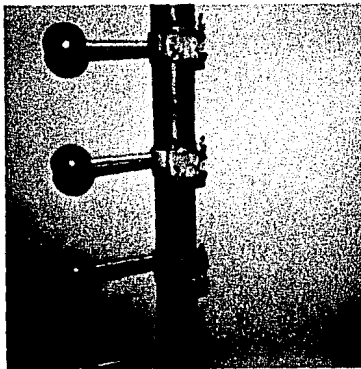
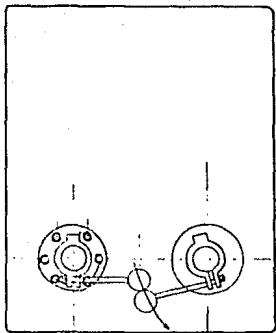


FIGURA NUM. 2.3

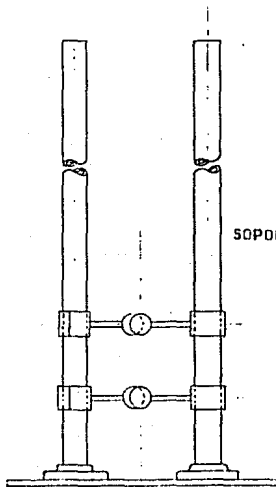
### 2.1.5. SOPORTE PARA EXPLOSORES.

Su fabricación debe ser de un material aislante - tal como tubos de micarta, madera, etc. de alta resistencia mecánica, existiran dos tubos, uno fijo a la base y el otro giratorio a control remoto por medio de - un motor o medio manual (compresores, etc.). El objeto del movimiento es con la finalidad de variar la distancia entre los explosores, fig. n.ºm. 2.4





BASE METALICA.  
FIGURA 2.7



SOPORTE PARA EXPLOSORES

FIGURA NUM.2.4

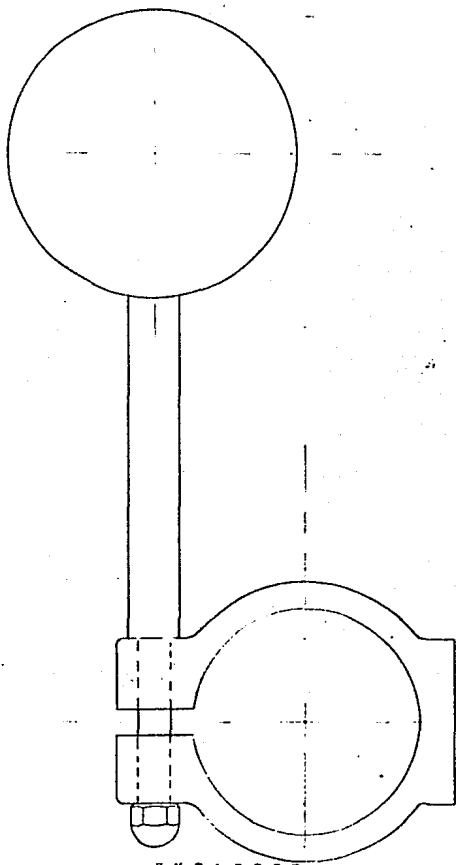
### 2.1.6. Explosores.

Estos serán cilíndricos con diámetro específico para cada generador de impulso, el objeto de estos es que cada par de explosores con determinado diámetro tiene capacidad para crear cierto campo eléctrico en tre ellos al aplicarse una diferencia de potencial el cual produce un arco eléctrico rompiendo el aire como dieléctrico, existen tablas como la siguiente:

DISTANCIA ENTRE	KILOVOLTS PICO A 20° C Y 760 MM DE HG			
ESFERAS	DIAMETRO DE LAS ESFERAS EN CM.			
Cm.	2	5	6.25	etc.
0.05	2.8			
0.10	4.7			
0.15	6.4			
0.20	8.0	8.0		
0.25	9.6	9.6		
0.30	11.2	11.2		
0.40	14.4	14.3	14.2	
0.50	17.4	17.4	17.2	etc.
etc.	etc.	etc.	etc.	

Que de acuerdo a normas C.E.I. nos proporcionen información bajo condiciones estandar del comportamiento de dos esferas separadas una cierta distancia y voltaje de rompimiento del aire como dieléctrico, los explosores se montan en sus soportes correspondientes fijandose por medio de tornillos y abrazaderas a los tubos de micarta y sirven para poder calibrar la distancia entre esferas, lograndose esto al aflojar los tornillos de fijación. fig. núm. 2.5



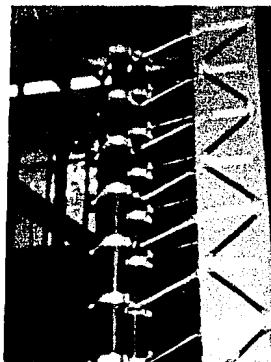
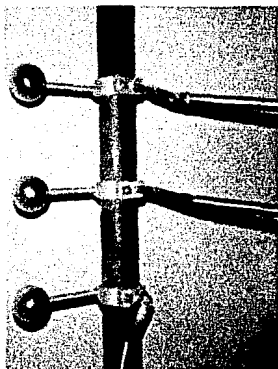


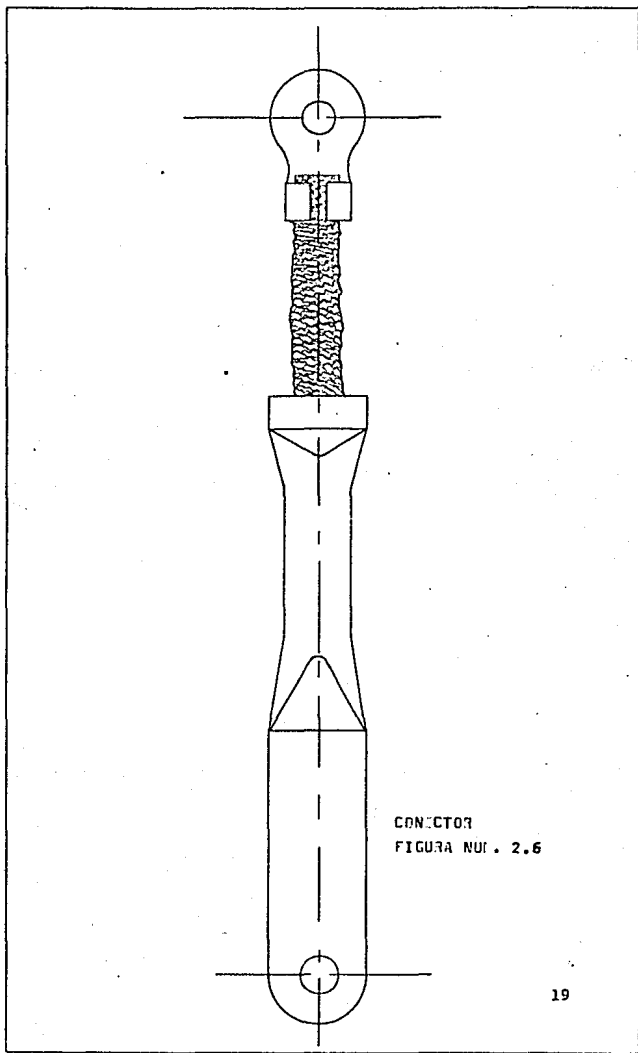
EXPLOSOR  
FIG. A NUM. 2.5



### 2.1.7. CONECTORES ENTRE EXPLOSORES Y CAPACITORES.

Por lo general a través de estas se descarga la onda de impulso, así que se hacen de cobre o aluminio con extremos de malla flexible y evitando toda saliente (picos, puntas, etc.) para evitar potenciales altos, fig. n.ºm. 2.6





CONNECTOR  
FIGURA NUM. 2.6

### 2.1.8. BASE METALIC..

Debe tener capacidad para soportar todo el peso y de dimensiones adecuadas para evitar que el generador se pueda caer hacia algun lado, así tambien con ruedas moviles giratorias y con un conector a tierra el cual aterrizará el sistema, fig. nóm. 2.7

## 2.2.- COMPONENTES ELECTRICOS

### 2.2.1. CAPACITORES.

Los capacitores forman la parte más importante del generador de impulsos, estos trabajan con corriente continua cargándose en paralelo y descargando se en serie a través de los explosores, su capacitación es en cuanto al voltaje nominal y capacitancia dependiendo del voltaje y capacitancia total y por paso, número de pasos y energía del generador -

físicamente pueden ser rectangulares, cuadrados, redondos, etc. la capacitancia del generador se determina en función del objeto bajo prueba siendo recomendable que:

$$C_g \geq 5 C$$

donde  $C_g$  = capacitancia del generador

$C$  = capacitancia del objeto por probarse .

así también deben ser no inductivos.

La separación entre capacitores de un estado a otro en el generador de impulsos esta en función de la curva de rigidez dieléctrica, estableciéndose el criterio de que cuando menos debe ser 300 kv./ metro, para impulso por rayo y 200 kv./ metro, para ondas por maniobra. Tomar en cuenta no linealidad.

Los capacitores son fabricados impregnados en aceite ensamblados dentro de un material aislante - (pocelana, tubo de micarta, papel barnizado, etc.)

NOTA es necesaria una buena calidad de los capacitores por lo cual es recomendable realizarles pruebas previamente de pérdidas ( $\tan. \delta$ ), voltaje aplicado, capacitancia, etc. antes de montarse en el generador. Figura num. 2.10

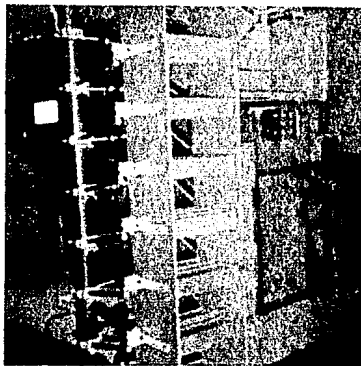


Figura 2.10 . \_ Capacitores  
montados en sus places para  
40 nf y 60 kv por paso .

## 2.2.2. RESISTENCIA EN EL FRENTE DE LA ONDA.

Estas se fabrican evitando que se produzca efecto inductivo, para lo cual un tubo de micarta se ranura longitudinalmente y en forma circular donde se devana el alambre micromel cambiando el sentido de ciertos ohms por metro dependiendo de los ohms por resistencia, esto es:

Un tubo de micarta de 1.3 cm de diametro y 40cm de longitud.

Tiene 200 ranuras circulares de 1.2 cm de diametro.

Entonces tenemos la longitud total del devanado que es:

$$200 \text{ ranuras}(1.2\text{cm}) = 240\text{cm} = 2.4 \text{ metro}$$

Si necesitamos 60 ohms por resistencia se debe usar alambre micromel de por lo menos 25 ohms/metro, puesto que:

$$\left( 25 \frac{\text{ohms}}{\text{metro}} \right) (2.4 \text{ metro}) = 60 \text{ ohms}$$

fig. n<sup>o</sup> 2.11

El valor en ohms de la resistencia de frente se obtiene considerando el tiempo de frente de la onda, así como capacitancia del generador y objeto bajo prueba esto se muestra en el capítulo IV.

### 2.2.3. RESISTENCIA PARA LA COLA DE LA ONDA.

La fabricación es similar a las de frente salvo que son de mayor ohms, esto es:

$$R_c > R_f$$

donde;

$R_f$  = resistencia para el frente  
de la onda.

$R_c$  = resistencia para la cola  
de onda.

Una representación física se muestra en la -  
fig. 2.12

El valor resistivo en ohms esta también en función del tiempo de cola y capacitancias del generador y objeto bajo prueba como se muestra en el capítulo IV

NOTA El tiempo de frente de la cola esta normalizado (CFI) para ondas de impulso por rayo y por maniobra.



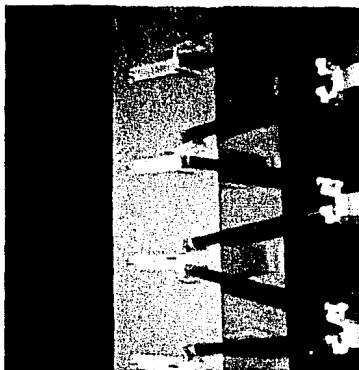


FIGURA 2.11 y 2.12

Se observa el montaje de resistencias para el frente y cola de la onda de impulso (60 y 1200 $\mu$ s cada una).

#### 2.2.4. RESISTENCIA DE CARGA.

Sirven para llevar voltaje a los diferentes estados del generador, se diseñan de tal forma que:

$$R \gg R_c$$

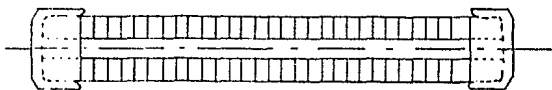
$P$  = Resistencia de carga

$R_c$  = Resistencia de carga

Esta relación es con la finalidad de evitar que la onda de impulso pueda tener más de una trayectoria.

Las resistencias se fabrican conectando resistencias de carbon en serie de 1 a 2 kilohms  $\pm 5\%$  y 2 W colocadas dentro de un tubo de micarta relleno de material epoxy para evitar absorción de humedad, fig. 2.13

**NOTA** Los valores dados aquí de resistencias de carbon no son únicos, existen variantes comercialmente.



FIGURAS 2.11, 2.12  
RESISTENCIAS DE FRENTE Y COLA



FIGURA 2.13  
RESISTENCIA DE CARGA

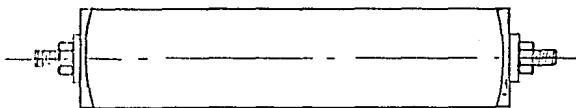


FIGURA 2.10  
CAPACITOR

Existen la fabricación de resistencias a base de alambre, sólidos o líquidos. Así para resistencias hechas con alambre se tiene el efecto inductivo introducido por la inductancia del bobinado, además de que su capacidad de disipación puede ser ineficiente al existir altas energías absorbidas éste caso sucedió en la práctica al generador de 400 kv. del I. I. E.

Lo cual origina muchos problemas procediendo a cambiarlos por resistencias de agua funcionales al principio y después altamente inestables, son de alta capacidad térmica.

Los problemas anteriores se eliminan usando resistencias de CARBÓN.

### 2.2.5. RESISTENCIA DE PROTECCIÓN.

Esto sirve para proteger a la fuente de alimentación de corriente directa, de los transitorios producidos en el generador, debiéndose cumplir que:

$$R_p \gg R$$

$R_p$  = resistencia de protección, esto es si la fuente de c. d. es de:

$$\text{Tensión} = 100 \text{ kv}$$

$$\text{Corriente} = 10 \text{ ma}$$

$$\text{entonces: } R_p = \frac{100 \text{ kv}}{10 \text{ ma}} = \frac{100 \times 10^3 \text{ volts}}{10 \times 10^{-3} \text{ amp.}}$$

$$R_p = 10 \times 10^6 \text{ ohms}$$

$$R_p = 10 \text{ megohms.}$$

Es pues la " $R_p$ " una protección contra corriente de corto circuito.

### 2.2.6. CAPACITANCIA DE PRUEBA.

Este es con la finalidad de colocarla en paralelo con la capacitancia del objeto bajo prueba, pudiendo obtener la forma de onda de impulso apropiada para realizar la prueba, de acuerdo a normas.

Así pues dicha capacitancia se fabrica conectando capacitores individuales en serie y con varias hileras en paralelo además con conectores de salida intermedios para poder obtener diferentes valores de capacitancia, fig. 2.15 .

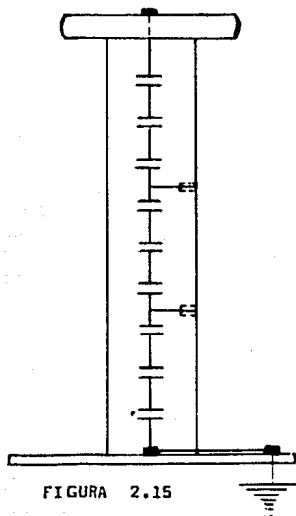


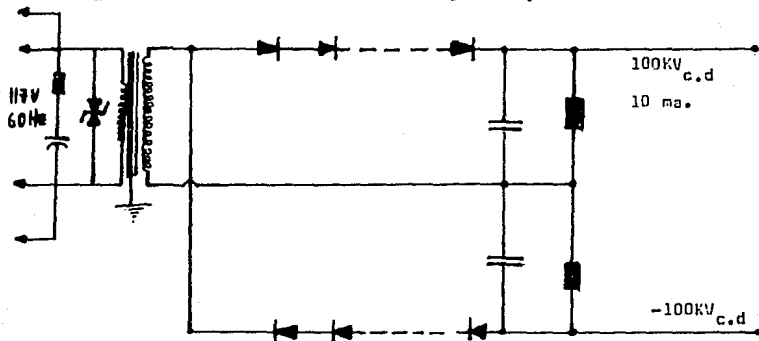
FIGURA 2.15

## 2.3.- COMPONENTES ELECTROMECHANICOS

### 2.3.1 FUENTE DE ALIMENTACION DE CORRIENTE DIRECTA

Con esta, de hecho proporcionamos el voltaje de entrada al generador de impulsos, transformandolo en una onda de impulso de voltaje, a la salida.

El circuito de la fuente es el siguiente;



Obviamente la fuente de alimentación se escoge de tal forma que su tensión de salida sea igual o mayor - al voltaje por paso del generador de impulsos esto es;

Si el generador es de 100 kv por paso entonces la fuente sera de 100 kv o más, fig. núm. 2.16

2.4.- Especificación de los datos técnicos de un generador de impulsos.

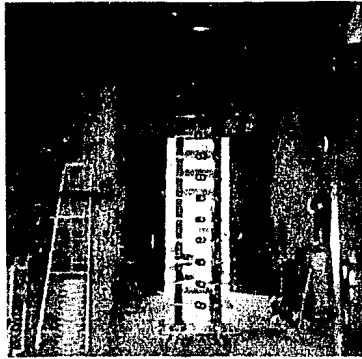
DATOS DEL GENERADOR

Número de pasos	24	
Voltaje de salida	1440	Kv.
Capacitancia	0.83	nf
Energía	864	joules
Resistencia frente	1584	ohms
Resistencia cola	78	ohms
Capacitancia de precarga	40	pf
Altura	2.15	metros

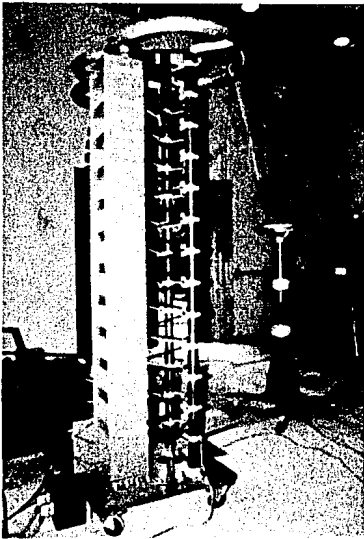
DATOS POR PASO

Voltaje	60	Kv
Capacitancia	0.0346	nf
Energía	36	joules
Resistencia de frente	66	ohms
Resistencia de cola	3	Kilohms





GENERADOR DE IMPULSOS



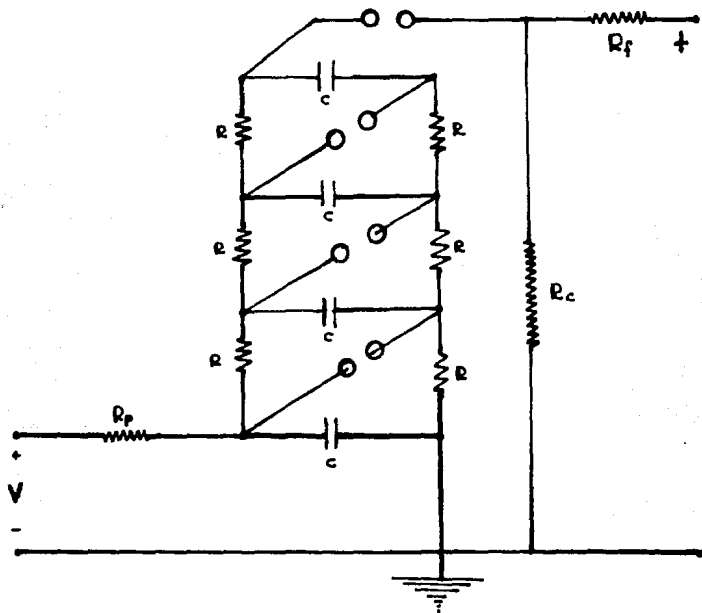
### 3. ANALISIS FENOMENICO DEL GENERADOR.

#### 3.1.-Circuitos eléctricos equivalentes de Marx,

Marxmodificado, Goodlet y Goodlet modificado

La necesidad de proteger los sistemas de potencia originó condiciones para crear algún sistema generador de ondas de impulso de voltaje, cuya fuente externa - con los rayos atmosféricos e interna las maniobras para switcheo para niveles arriba de 250-300 kv.

Así pues MARX diseñó el siguiente circuito.



donde:

$V$  = Voltaje de c.d. suministrado al sistema

$R_p$  = resistencia de protección

$R$  = resistencia de carga

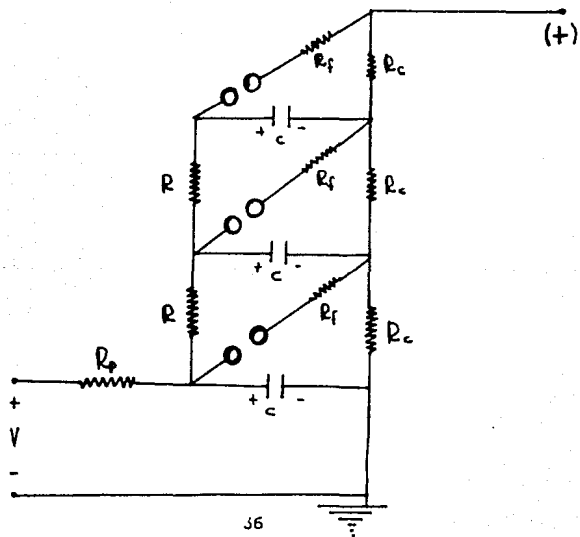
$C$  = Capacitancia por paso del generador

$R_f$  = resistencia para frente de onda

$R_c$  = resistencia para cola de la onda

$E$  = Explosores

un circuito modificado de MAX es el sig.



La diferencia como se puede ver es la integración de  $R_f$  y  $R_c$  al circuito generador de impulsos, así también se observa que el generador de impulsos "A" funciona al cargar los capacitores "C" en paralelo y - descargar éstos en serie al romperse en los explosores el dieléctrico (aire) provocando arco eléctrico.

Así pues al quedar los capacitores en serie el - voltaje de salida es  $NV$  donde:

$N$  = Número de capacitores en serie  
(número de pasos del generador)

$V$  = voltaje de cada capacitor

" $C_1$ " = Capacitancia del generador

$C_1 = C$  un solo paso

$C_1 = \frac{2 \cdot C}{2} = \frac{C}{2}$  dos pasos

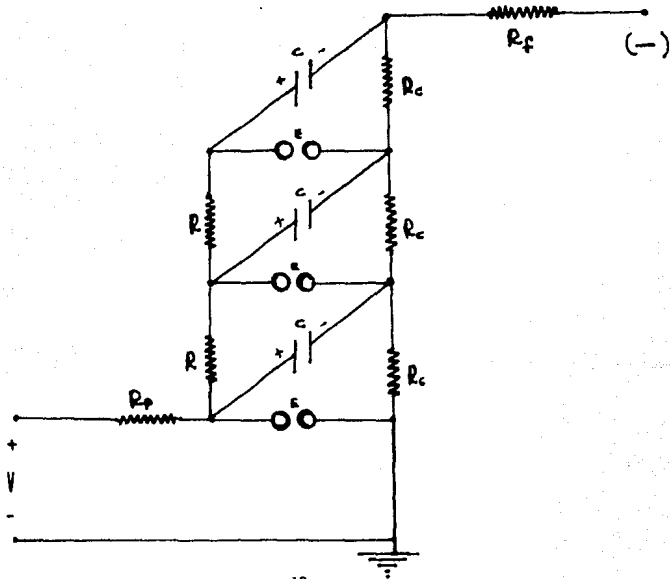
$C_1 = \frac{C \cdot 2}{(2+1)} = \frac{C}{3}$  tres pasos

$\vdots$   $\vdots$   $\vdots$

$C_1 = \frac{C \cdot 2}{[(n-1)+1]} = \frac{C}{n}$  para "n" pasos

La desventaja que presenta este circuito es la protección necesaria del circuito de disparo (TRIG-GER) contra efectos de reflexión de alto voltaje.

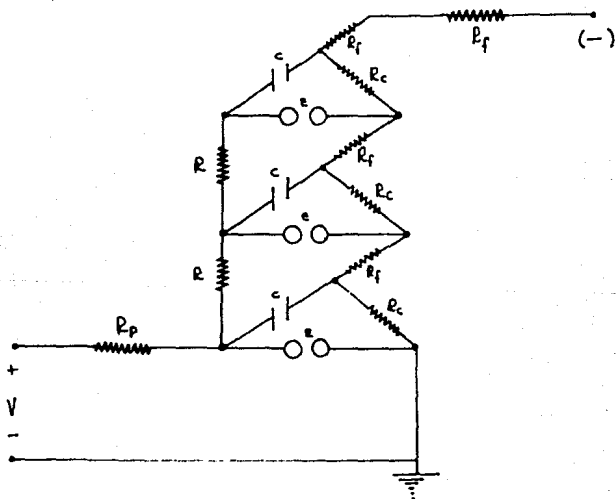
para evitar lo anterior se tiene el circuito -  
**GOODLET** siguiente:



La ventaja del circuito GOODLET respecto al TAPX es el uso de un sistema de disparo llamado Trigraton para provocar un arco eléctrico en el primer explosor y así lograr fácilmente la operación del generador de impulsos.

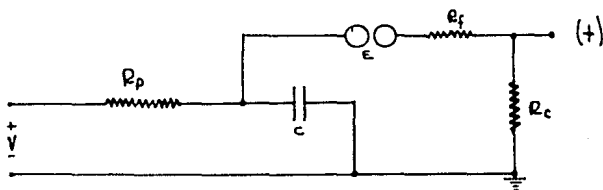
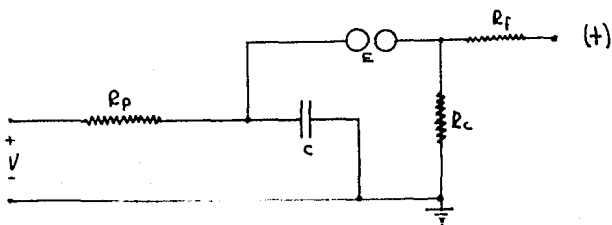
Así también podemos observar el cambio de polaridad de la ond. de salida respecto a la señal de entrada.

Con el fin de integrar la resistencia de frente al circuito se tiene el circuito modificado de -- GOODLET.

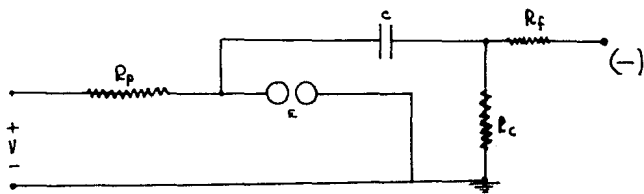
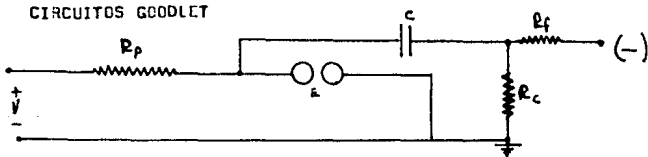


Considerando el circuito para un solo paso tenemos:

CIRCUITOS FAX

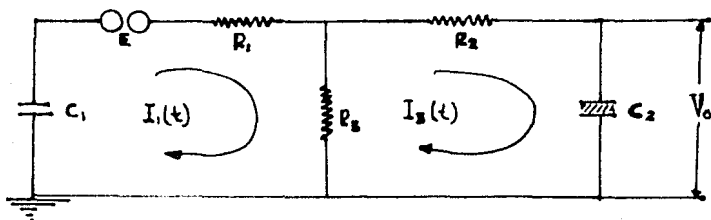


CIRCUITOS GOODLET



### 3.2.-Circuito básico para análisis

De lo anterior se puede obtener un circuito base para efectos de análisis matemático como es:



Donde:

$R_1 \hat{=} R_f$  del lado del generador

$R_2 \hat{=} R_f$  del lado del objeto bajo prueba

$R_3 \hat{=} R_c$

$V_0 \hat{=} \text{ voltaje de salida}$

$C_1 = \text{ capacitancia del generador}$

$C_2 = \text{ capacitancia del objeto bajo prueba}$

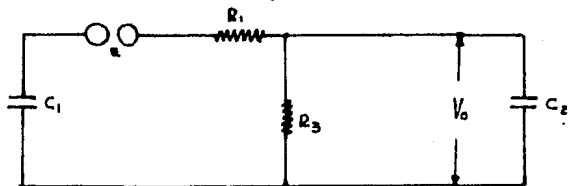
$V = \text{ voltaje de entrada}$



Se observa que existen además dos posibilidades de colocar la resistencia de frente y son:

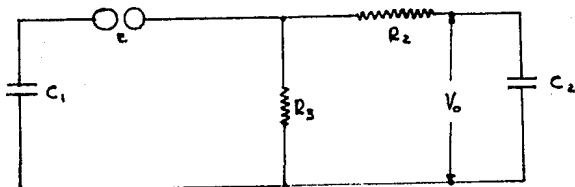
si:

$$R_2 = 0$$



"Rf" del lado del generador

$$\text{si } R_1 = 0$$



"Rf" del lado del objeto bajo prueba

La colocación de  $pf$  tiene cierta influencia en cuanto a la eficiencia fundamentalmente.

3.3 Obtención de las ecuaciones del circuito.

Las ecuaciones de malla son:

$$V = R_1 I_1(t) + \frac{1}{C_1} \int I_1(t) dt + R_3 (I_1(t) - I_3(t))$$

$$0 = R_3 (I_3(t) - I_1(t)) + R_2 I_3(t) + \frac{1}{C_2} \int I_3(t) dt$$

Aplicando la transformada de Laplace.

$$\frac{V}{s} = R_1 I_1(s) + \frac{1}{C_1} \left( \frac{I_1(s)}{s} - I_1(0^+) \right) +$$

$$R_3 (I_1(s) - I_3(s))$$

$$0 = R_3 (I_3(s) - I_1(s)) + R_2 I_3(s) + \frac{1}{C_2} \left( \frac{I_3(s)}{s} \right.$$

$$\left. - I_3(0^+) \right)$$

Considerando condiciones de frontera iniciales cero.

$$\frac{V}{s} = I_1(s) \left( R_1 + \frac{1}{C_1 s} \right) + R_3 I_2(s)$$

$$0 = -R_3 I_2(s) + I_3(s) \left( R_2 + \frac{1}{s C_2} \right)$$

Asimismo podemos describir:

$$\frac{V}{s} = I_2(s) \left( r_1 + r_3 + \frac{1}{sC_1} \right) - I_3(s) \left( r_1 + \frac{1}{sC_1} \right)$$

$$0 = -I_2(s) \left( r_3 \right) + I_3(s) \left( r_2 + \frac{1}{sC_2} \right)$$

Resolviendo para  $I_3(s)$  tenemos:

$$\frac{V}{s} = \left[ \left( \frac{r_2 + \frac{1}{sC_2}}{r_3} \right) \left( r_1 + r_3 + \frac{1}{sC_1} \right) + \left( r_1 + \frac{1}{sC_1} \right) \right] I_3(s)$$

Despejando tenemos  $I_3(s)$ :

$$I_3(s) = \frac{V/s}{\frac{1}{s^2} \left( \frac{1}{r_3 C_1 C_2} \right) + \frac{1}{s} \left( \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} + \frac{2}{r_3 C_1} + \frac{1}{s C_2} \right) + \left( r_1 + r_2 + \frac{r_1^2}{r_3} \right)}$$

los términos :

$$I_1 + I_2 + \frac{R_1 I_2}{3} = \frac{I_3 + 2R_3 + I_1 I_2}{R_3}$$

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} + \frac{2}{3C_1} + \frac{I_1}{3C_2} = \frac{R_3(C_1 + C_2) + R_2 C_2 + C_1 I_1}{C_1 C_2 R_3}$$

La expresión de la corriente es entonces

$$I_3(s) = \frac{sV}{\frac{1}{3C_1 C_2} + s \left[ \frac{R_3(C_1 + C_2) + R_2 C_2 + C_1 R_1}{C_1 C_2 R_3} \right] + s^2 \left[ \frac{I_3 - 2R_3 - I_1 I_2}{3} \right]}$$

Reagrupando términos :

$$I_3(s) = VC_1 C_2 R_3 \left[ \frac{1}{1 - s (R_3(C_1 - C_2) - R_2 C_2 - C_1 I_1)} - \frac{s}{-s^2 C_1 C_2 (I_3 - 2R_3 - I_1 I_2)} \right]$$

Maguros :

$$A = C_3(C_1 + C_2) + C_2^2 + C_1^2 R_1$$

$$B = C_1 C_2 (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2)$$

$$\therefore I_3(s) = V C_1 C_2 R_3 \left[ \frac{s}{1 + A s + B s^2} \right]$$

El voltaje de salida a través del objeto b jo prueba

ser

$$V_o(t) = \frac{1}{C_2} \int I_3(t) dt$$

$$V_o(s) = \frac{1}{s C_2} [I_3(s)]$$

$$V_o(s) = \frac{1}{s C_2} \left[ V C_1 R_3 \left( \frac{s}{1 + A s + B s^2} \right) \right]$$

$$V_o(s) = V C_1 R_3 \left( \frac{1}{1 + A s + B s^2} \right)$$

$$V_o(s) = \frac{V C_1 R_3}{B} \left[ \frac{1}{s^2 + \left(\frac{A}{B}\right)s + \left(\frac{1}{B}\right)} \right]$$

$$\text{Sea: } P = \frac{B}{A} = \frac{3(C_1 + C_2) + 2C_2 + C_1}{C_1 C_2 (1^3 + 2^3 + 1^2)}$$

$$q = \frac{1}{B} = \frac{1}{3 C_1 C_2 (1^3 + 2^3 + 1^2)}$$

$$\therefore V_0(t) = \frac{V C_1 1^3}{B} \left[ \frac{1}{s^2 + p s + q} \right]$$

La ecuación  $s^2 + p s + q = 0$  tiene como

raíces:

$$s_{1,2} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 - 4q}}{2}$$

$$s_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{q \left( \frac{p^2}{4q} - 1 \right)}$$

$$s_{1,2} = \sqrt{q} \left[ -\frac{q}{2q} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4q} - 1} \right]$$

Definiendo lo siguiente

$$\beta = -\frac{p}{2\sqrt{q}}$$

$$\beta^2 = \frac{p^2}{4q}$$

$$\beta = -\frac{1}{2} \left[ \frac{-3(C_1 - C_2) - 2C_2 - C_1 r_1}{\sqrt{C_1 C_2 (r_1^2 r_3 - 2r_3 - r_1^2)}} \right]$$

$$\beta^2 = \frac{1}{4} \left[ \frac{(-3(C_1 - C_2) - 2C_2 - C_1 r_1)^2}{C_1 C_2 (r_1^2 r_3 - 2r_3 - r_1^2)} \right]$$

Así las raíces nos quedarán como :

$$s_{12} = \sqrt{q} (\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1})$$

$$s_1 = \sqrt{q} (\beta - \sqrt{\beta^2 - 1})$$

$$s_2 = \sqrt{q} (\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})$$

Entonces la expresión del voltaje de salida será

$$V_0(s) = \frac{V C_1 r_3}{E} \left[ \frac{1}{(s + s_1)(s + s_2)} \right]$$

$$V_0(s) = \frac{V C_1 r_3}{B} \left[ \frac{G}{s + s_1} + \frac{H}{s + s_2} \right]$$

Donde :  $G(s + s_2) + H(s + s_1) = 1$

Si ;  $s = -s_1$  ;  $G(-s_1 + s_2) = 1$  . . .  $G = \frac{1}{s_2 - s_1}$

Si ;  $s = -s_2$  ;  $H(-s_2 + s_1) = 1$  . . .  $H = \frac{1}{s_1 - s_2}$

$$V_0(s) = \frac{VC_1 R_3}{B} \left[ \frac{\frac{1}{(s_2 - s_1)}}{s + s_1} - \frac{\frac{1}{(s_2 - s_1)}}{s + s_2} \right]$$

$$V_0(s) = \frac{VC_1 R_3}{B(s_2 - s_1)} \left( \frac{1}{s + s_1} - \frac{1}{s + s_2} \right)$$

Aplicando la antitransformada de Laplace .

$$V_0(t) = \frac{VC_1 R_3}{B(s_2 - s_1)} ( e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t} )$$

Tambien puede ser expresada como

$$V_0(t) = \frac{VC_1 R_3}{-2B \sqrt{a(\beta^2 - 1)}} ( e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t} )$$



$$\text{Eso } q = \frac{1}{\theta}$$

$$\therefore \theta = \sqrt{C_1 C_2 (R_1 R_3 - R_2 R_3 - R_1 R_2)}$$

La ecuación de voltaje en la carga puede ser entonces la siguiente .

$$v_0(t) = \frac{v C_1 R_3 \theta}{2B\sqrt{\beta^2 - 1}} \left[ e^{-(\beta - \sqrt{\beta^2 - 1}) \frac{t}{\theta}} - e^{-(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}) \frac{t}{\theta}} \right]$$

### 3.5. VOLTAJE MÁXIMO DE LA CND. DE IMPULSO .

Sabemos que derivando la ecuación del voltaje de salida podemos tener el máximo, esto es ;

$$\frac{d V_0(t_1)}{dt} = 0$$

Donde  $t_1$  es el tiempo para tener el máximo valor del voltaje de salida

$$\frac{V C_1 R_3}{2B} ( -s_2 e^{-s_2 t_1} + s_1 e^{-s_1 t_1} ) = 0$$

$$\therefore s_1 e^{-s_1 t_1} = s_2 e^{-s_2 t_1}$$

$$\frac{s_2}{s_1} = e^{(s_2 - s_1) t_1}$$

$$t_1 = \frac{1}{(s_2 - s_1)} \ln \left( \frac{s_2}{s_1} \right)$$

resolución .

1. la ecuación del circuito es

$$s^2 + s p + q = 0$$

Donde :

$$p = \frac{R_3(C_1 + C_2) + R_2 C_2 + C_1 R_1}{C_1 C_2 (R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2)}$$

$$q = \frac{1}{C_1 C_2 (R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2)}$$

$$p = q (R_3(C_1 + C_2) + R_2 C_2 + C_1 R_1)$$

2. Las raíces son ;

$$s_1 = \sqrt{q} \left( \beta + \sqrt{\beta^2 - 1} \right)$$

$$s_2 = \sqrt{q} \left( \beta - \sqrt{\beta^2 - 1} \right)$$

Donde por definición

$$\beta = -\frac{1}{2} \left[ \frac{r_3(C_1 + C_2) + r_2 C_2 + C_1 r_1}{C_1 C_2 (r_1 r_3 + r_2 r_3 + r_1 r_2)} \right]$$

3. El voltaje de salida sera

$$v_0(t) = \frac{V C_1 r_3}{2B \sqrt{\beta^2 - 1}} [e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t}]$$

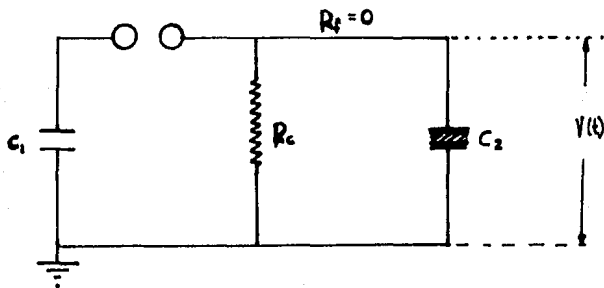
3.6. Obtención del tiempo de cola en forma aproximada y práctica.

CONSID. CIGN.- En ondas de voltaje normalizadas  $1.2 / 50$  microseg., el tiempo de cola de la onda es mayor comparado con el tiempo de frente, entonces se comete poco error al despreciar :

- a ) Resistencia de frente  $R_f$  para calcular el tiempo de cola.
- b ) Resistencia de cola  $R_c$  para determinar el tiempo de frente.

Obtención del tiempo de cola.

El circuito utilizado tomando en cuenta las consideraciones anteriores es el siguiente.



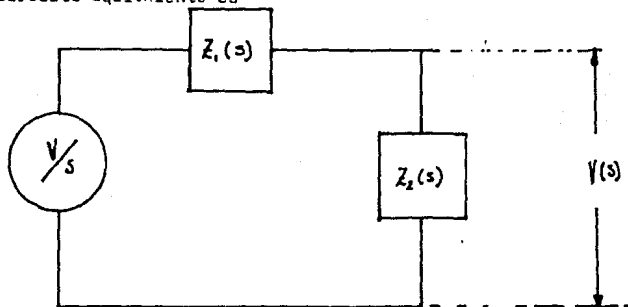
Expresando el circuito anterior en el dominio de

Laplace, tenemos

$$Z_1 = \frac{1}{sC_1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{sR_2C_2 + 1}$$

Circuito equivalente es



Ecuación de malla :

$$\frac{V}{s} = (Z_1 + Z_2) I(s)$$

$$I(s) = \frac{V}{s} \left( \frac{1}{Z_1 + Z_2} \right)$$

El voltaje de salida ;  $V(s) = I(s) Z_2$  ;  $I(s) = \frac{V(s)}{Z_2}$

$$V(s) = \left( \frac{V}{s} \right) \left( \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)$$

$$V(s) = \frac{V}{s} \left( \frac{\frac{V_2}{sC_2 R_2 + 1}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{R_2}{sR_2 C_2 + 1}} \right)$$

$$V(s) = \frac{V}{s} \left( \frac{sR_2 C_1}{sR_2 C_2 + 1 + sR_2 C_1} \right)$$

$$V(s) = V \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \left( \frac{1}{s} \frac{1}{R_2(C_1 + C_2)} \right)$$

Aplicando la anti-transformada de Laplace.

$$V(t) = V \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \left( \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{R_2(C_1 + C_2)} \right] \right)$$

La constante de tiempo del circuito es

$$t_c = H C$$

donde  $C = R_2 (C_1 + C_2)$

$$t_c = H R_2 (C_1 + C_2)$$

sabemos que  $R_2 = R_c$

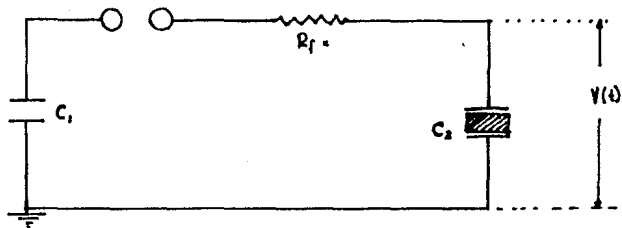
ademas  $H \approx 0.7$

$$t_c \approx 0.7 R_c (C_1 + C_2)$$



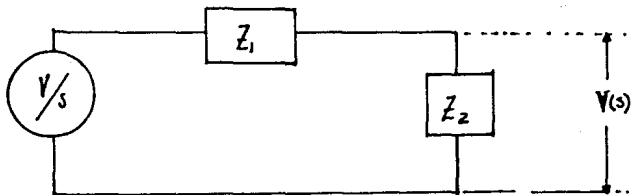
3.7. Obtención aproximada y práctica del tiempo de frente.

El circuito utilizado sera ;



donde  $R_c = R_2 = 0$

El circuito en el dominio de laplace



siendo  $Z_1 = R_1 + \frac{1}{sC_1}$

$$Z_2 = \frac{1}{sC_2}$$

$$\frac{V}{s} = (Z_1 + Z_2) I(s)$$

El voltaje en salida.

$$V(s) = \left( \frac{V}{s} \right) \left( \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)$$

$$V(s) = \frac{V}{s} \left( \frac{\frac{1}{sC_2}}{R_1 + \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2}} \right)$$

Hacemos algunas manipulaciones algebraicas

$$V(s) = \frac{V}{s C_1 C_2} \left( \frac{1}{s \left( s + \frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2} \right)} \right)$$

En el dominio del tiempo :

$$V(t) = -\frac{V}{s C_1 C_2} \left( 1 - e^{-\frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2} t} \right)$$

La constante de tiempo del circuito es

$$t_f = \tau$$

$$\tau = \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$t_f = \eta \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

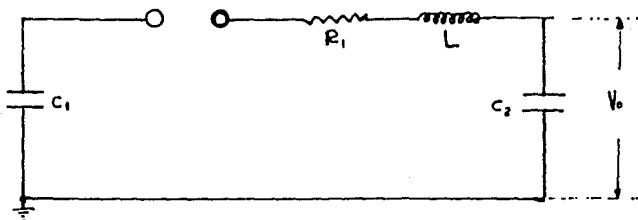
Pero  $R_1 = R_f$

$$\eta \approx 2.5$$

$$t_f = 2.5 \tau_f \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

3.8. Analisis del generador de impulsos  
considerando efecto inductivo.

El circuito considerando efecto inductivo



Donde :

$C_1$  = Capacitancia del generador

$L_1$  = Inductancia interna del generador.

$C_2$  = Capacitancia representativa de la carga

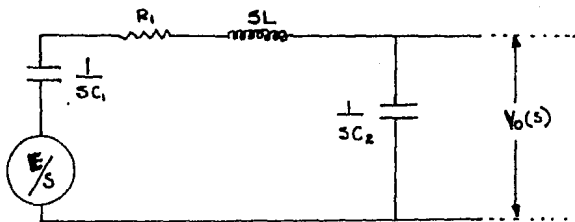
$L_2$  = Inductancia equivalente de la carga y conexiones.

Consideración.-Para efectos de analisis se desprecia la resistencia de cable, puesto que

$$t_c \gg t_r$$

$L = L_1 + L_2$  = Es la inductancia total del circuito

En el dominio de Laplace :



$E$  = voltaje al cual se carga  $C_1$

La ecuación correspondiente será la siguiente

$$\frac{E}{s} = I(s) \left( \frac{1}{sC_1} + R_1 + sL + \frac{1}{sC_2} \right)$$

El voltaje de salida es

$$V_o(s) = I(s) \left( \frac{1}{sC_2} \right)$$

Sustituyendo el valor de  $I(s)$

$$V_o(s) = \left( \frac{1}{sC_2} \right) \left( \frac{E}{s \left( \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2} + R_1 + sL \right)} \right)$$

Realizando manipulaciones algebraicas tenemos

$$V_o(s) = \frac{E}{C_2 L} \left( \frac{1}{s} \right) \left( \frac{1}{s^2 + s \frac{R_1}{L} + \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \frac{1}{L}} \right)$$

La ecuación de segundo grado :

$$s^2 + s \frac{R_1}{L} + \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \left( \frac{1}{L} \right) = 0$$

Tiene como raíces

$$\alpha, \beta = -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{R_1}{L} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{R_1}{L} \right)^2 - 4 \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \left( \frac{1}{L} \right)} \right]$$

$$V_o(s) = \frac{E}{C_2 L} \left( \frac{1}{s} \right) \left( \frac{1}{(s-\alpha)(s-\beta)} \right)$$

Analizando las raíces tenemos los casos siguientes

$$1) \quad \text{Si } \left(\frac{R_1}{L}\right)^2 > \frac{4}{L} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

los raíces son reales lo cual significa el caso sobreamortiguado.

$$2) \quad \text{Si } \left(\frac{R_1}{L}\right)^2 < \frac{4}{L} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

las raíces son imaginarias existiendo el caso oscilatorio.

$$3) \quad \text{Si } \left(\frac{R_1}{L}\right)^2 = \frac{4}{L} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

existen raíces reales e iguales lo cual significa el caso críticamente amortiguado.

En este caso :

$$\frac{R_1^2}{L^2} = \frac{4L}{L^2} \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}\right)$$

$$r_1^2 = 4L \left( \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2} \right)$$

$$r_1 = 2 \sqrt{L \left( \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2} \right)}$$

Entonces las raíces  $\alpha$  y  $\beta$  serán

$$\alpha, \beta = - \frac{r_1}{2L}$$

Sustituyendo el valor de  $r_1$

$$\alpha, \beta = - \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2} \right)}$$



Tenemos que la solución

$$V_0(s) = \frac{E}{C_2 L} \left( \frac{A}{s} + \frac{B}{s+\alpha} + \frac{C}{s+\beta} \right)$$

Donde :

$$A(s+\alpha)(s+\beta) + B(s)(s+\beta) + C(s)(s+\alpha) = 1$$

$$\text{cuando } s=0; A\alpha\beta = 1 \quad \rightarrow \quad A = \frac{1}{\alpha\beta}$$

$$s = -\alpha; B(-\alpha)(-\alpha+\beta) = 1; B = \frac{1}{\alpha(\alpha-\beta)}$$

$$s = -\beta; C(-\beta)(-\beta+\alpha) = 1; C = \frac{1}{\beta(\beta-\alpha)}$$

$$V_0(s) = \frac{E}{C_2 L} \left( \frac{1/\alpha\beta}{s} + \frac{1/\alpha(\alpha-\beta)}{s+\alpha} + \frac{1/\beta(\beta-\alpha)}{s+\beta} \right)$$

$$V_0(s) = \frac{E}{C_2 L \alpha \beta (\alpha - \beta)} \left( \frac{\alpha - \beta}{s} + \frac{\beta}{s + \alpha} - \frac{\alpha}{s + \beta} \right)$$

Usando la antitransformada

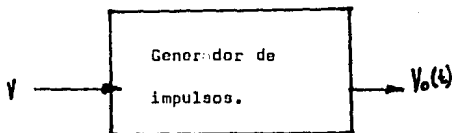
$$V_o(t) = \frac{E}{C_2 L(\alpha - \beta)(\alpha + \beta)} \left[ (\alpha - \beta) + \beta e^{-\alpha t} - \alpha e^{-\beta t} \right]$$

El voltaje de salida es :

$$V_o(t) = \frac{E}{C_2 L \alpha \beta} \left[ 1 + \frac{\beta}{\alpha - \beta} e^{-\alpha t} - \frac{\alpha}{\alpha - \beta} e^{-\beta t} \right]$$

### 3.9. Eficiencia.

De un sistema cualquiera como el mostrado a continuación .



Donde

$V$  = voltaje de entrada al sistema.

$V_o(t)$  = Voltaje de salida.

La eficiencia del sistema se define como

$$\eta = \frac{\text{Voltaje de salida}}{\text{Voltaje de entrada}} = \frac{V_o(t)}{V}$$

Para nuestro caso

$$\eta = \frac{1}{C_2 L \alpha \beta} \left[ 1 + \frac{\beta}{\alpha - \beta} e^{-\alpha t} - \frac{\alpha}{\alpha - \beta} e^{-\beta t} \right]$$

### 3.10. Energía de disipación.

Este tipo de energía es disipada en forma de calor en las resistencias de frente y de cola del generador de impulsos.

Podemos decir pues que la energía disipada total producida por el generador es disipada por efecto joule.

Sea  $U$  = Energía de disipación.

$U_c$  = Energía disipada en la resistencia de cola.

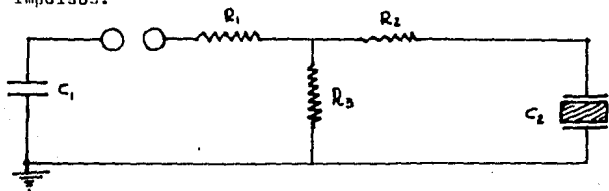
$U_f$  = Energía disipada en la resistencia de frente.

$$U = U_c + U_f$$

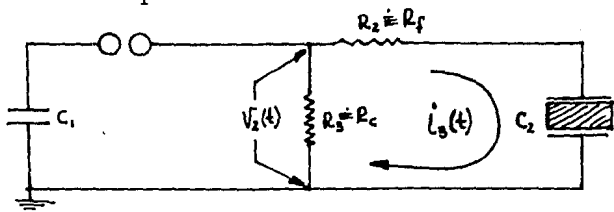
$$U = \int_{t_0}^{t_1} \frac{v^2}{R} dt$$

$R$  puede ser la resistencia de cola o de frente.

Del circuito equivalente para el generador de impulsos.



Haciendo  $\tau_1 = 0$  tenemos:



El voltaje de salida  $V_o(t)$  es

$$V_o(t) = \frac{V C_1 i_3}{B (s_2 - s_1)} (e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t})$$

$$\text{Con } \tau_1 = 0 ; \quad q = \frac{1}{U} = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}$$

$$\therefore B = C_1 C_2 i_3 R_2 R_3$$

Sustituyendo

$$V_0(t) = \frac{V}{C_2 R_2 (s_2 - s_1)} ( e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t} )$$

La corriente a través de la carga  $i_3(t)$  sera :

$$i_3(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt}$$

$$i_3(t) = C_2 \left( \frac{V}{C_2 R_2 (s_2 - s_1)} \right) ( -s_1 e^{-s_1 t} + s_2 e^{-s_2 t} )$$

El voltaje a través de la resistencia de carga

$$V_2(t) = R_2 i_3(t) + V_0(t)$$

Sustituyendo el valor de la corriente  $i_3(t)$  y voltaje  $V_0(t)$

$$V_2(t) = \frac{V}{C_2 R_2 (s_2 - s_1)} \left[ (1 - s_1 R_2 C_2) e^{-s_1 t} + (R_2 C_2 s_2 - 1) e^{-s_2 t} \right]$$

La energía disipada por  $r_3$  (resistencia de cola)

$$\begin{aligned}
 W_{r_3} = & \frac{v^2}{c_2^2 r_2^2 r_3 (s_2 - s_1)^2} \left[ \int_0^{\infty} (1 - s_1^2 c_2) e^{-2s_1 t} dt \right. \\
 & + \int_0^{\infty} (1 - s_1^2 c_2) (c_2^2 s_2 - 1) e^{-(s_1 + s_2)t} dt \\
 & \left. + \int_0^{\infty} (c_2^2 s_2 - 1)^2 e^{-2s_2 t} dt \right]
 \end{aligned}$$

Integrando, sustituyendo límites superior e inferior

y reduciendo términos llegamos a la expresión final :

$$W_{r_3} = \frac{v^2}{2(s_1 + s_2) r_3} \left( \frac{1}{c_2^2 s_1 s_2} + 1 \right)$$

Además sabemos que  $s_1 s_2 = -\frac{1}{\theta} = q = \frac{1}{c_1 c_2 r_2 r_3}$

$$v_1 + v_2 = \frac{v(C_1 + C_2) + v C_2}{C_1 C_2 + 2v}$$

Substituyendo :

$$v_3 = \frac{v^2}{2 \left( \frac{v C_1 + v C_2 + 2v}{C_1 C_2 + 2v} \right)} \left[ \left( \frac{1}{2 C_2 \left( \frac{v C_1 + v C_2 + 2v}{C_1 C_2 + 2v} \right)} + 1 \right) \right]$$

$$v_3 = \frac{v^2}{2} \left[ \left( \frac{2 C_1 C_2}{v C_1 + v C_2 + 2v} \right) \left( \frac{v C_1 + v C_2 + 2v}{2 C_2} \right) \right]$$

Como  $v_3 \equiv v_c$

$$v_c = \frac{v^2}{2} \left[ \frac{C_1 (C_1 v + 2 C_2)}{v C_1 + v C_1 + 2 C_2} \right]$$



En forma similar la energía disipada en la resistencia de frente está dada por :

$$J_f = \left( \frac{v^2}{2} \right) \left( \frac{r_3 C_1 C_2}{r_2 C_2 + r_3 C_1 + r_3 C_2} \right)$$

Además sabemos que la energía del generador de impulsos es :

$$W = \frac{1}{2} C_1 v^2 \quad \text{energía totalmen-}$$

te disipada en las resistencias .

$$\therefore W_f + W_c = \frac{1}{2} C_1 v^2$$

Sustituyendo se cumple dicha igualdad.

#### 4. ESTUDIO DE PARAMETROS

##### 4.1.- VOLTAJE NOMINAL DEL GENERADOR DE IMPULSOS

Un generador de impulsos se caracteriza por:

- a) voltaje nominal total
- b) energía almacenada
- c) número de pasos

Así pues al especificar el voltaje nominal total haremos referencia al más alto voltaje de carga por el número de pasos.

$$V_g = V_{carga} (N)$$

donde:

$V_g$  = voltaje total del generador

$V_c$  = voltaje de carga máximo por paso

$N$  = número de pasos del generador

Así el criterio para seleccionar el voltaje nominal total esta en función del nivel básico de impulso ( BIL ) de los aparatos seleccionados para prueba de impulso por rayo o maniobra. Las normas existentes - (ANSI, CCONNIE, C.E.L., etc.) tienen establecido el B. I.L. en función de la clase de aislamiento. Así - tenemos por ejemplo:

Clase de aislamiento KV	1.2	15	24.5	etc.
Nivel básico de impulso KV	30	95	200	etc.

Además se debe considerar pérdidas y eficiencia - para el voltaje de salida total

Así también se toma en cuenta algún factor de se-

guridad y carga .

#### 4.2.- CAPACITANCIA DEL GENERADOR

Esta se obtiene tomando en consideración la capacitancia del objeto por probarse, así para asegurar una eficiencia mayor del 80 % se debe cumplir que:

$$C_1 \geq 5 C_2$$

La capacitancia del aparato por probarse se tiene como dato del diseño de éste, algunos datos recabados para diferentes objetos son:

Objeto	Capacitancia $C_2$
Cables	1.5-30 nf
Transformadores de potencia ( $\geq 1000$ kva)	1.0 nf
Transformadores de potencia ( $\geq 1000$ kva)	1.0-80 nf
Gushings	1.0- <del>02</del> nf

Teniendo pues el rango de capacitancia bajo prueba se obtiene la capacitancia del generador.

La capacitancia por paso del generador es:

$$C = \frac{C_1}{N}$$

$C$   $\hat{=}$  Capacitancia por paso

$N$   $\hat{=}$  Número de pasos

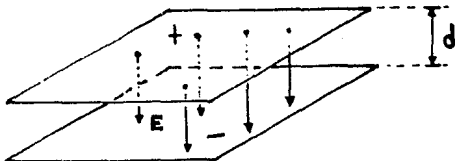
$C_1$   $\hat{=}$  Capacitancia total del generador

#### 4.3.- ENERGIA NOMINAL DEL GENERADOR

Sabemos que la energía almacenada en un elemento capacitivo es;

$$W = \int_{t_0}^t p \, dt$$

Considerando un capacitor como se muestra;



donde;

- A = Área de las placas en  $m^2$
- d = distancia entre placas en m
- E = intensidad de campo eléctrico
- V = Voltaje de carga del capacitor

Despreciando el efecto de los bordes el campo eléctrico puede considerarse constante siendo.

$$E = \frac{V}{d}$$

Considerando el dieléctrico lineal y constante la densidad relativa de energía en el volumen es:

$$\frac{dW_e}{dU} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 \quad \frac{\text{Watts seg.}}{\text{m}^3}$$

Donde :

$\epsilon_0$  = Constante dieléctrica del vacío.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi} \cdot 10^{-9}$$

Sustituyendo el valor de E obtenemos

$$\frac{dW_e}{dU} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \left( \frac{V}{d} \right)^2$$

En nuestro caso la densidad es constante y por lo tanto

$$U = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \left( \frac{V}{d} \right)^2 U \quad \text{Watts, seg.}$$

Ademas  $U = A \cdot d \quad m^3$

Sustituyendo

$$J = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \left( \frac{V^2}{d^2} \right) (A \cdot d) \quad \text{Watts seg.}$$

Pero :  $C_1 = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d}$

$$\therefore U = \frac{1}{2} C V^2 \quad \text{Jouls}$$



C = Capacitancia total del generador

V = Voltaje nominal total

podemos observar que la energía puede variar en cierto rango dependiendo del objeto bajo prueba.

Así pues se tiene que para aisladores, interruptores, etc. la energía del generador será alrededor de 1000 joules por cada 100 kv.

Para pruebas de aparatos de baja impedancia tales como transformadores de alta potencia y bajo voltaje la energía del generador deberá ser alta.

La siguiente tabla nos proporciona información sobre generador de impulso producidos con 200 kv y - combinaciones de 2, 4 y 8 capacitores conectados en paralelo por paso, su energía y voltaje correspondiente

NUMERO DE PASOS	VOLTAJE NOMINAL TOTAL	ENERGIA NOMINAL KILOJOULS		
		Num. de capacitores en paralelo por paso		
		2	4	8
4	800	8.8	17.6	35.2
8	1600	17.6	35.2	70.4
12	2400	26.4	52.8	106
16	3200	35.2	70.4	141
20	4000	44	88	176

#### 4.4.- TIEMPO DE FRENTE

Se llama así al tiempo necesario para que la onda de impulso llegue a su valor máximo.

De acuerdo a normas C.E.I. se define:

tiempo de frente para una onda de impulso, por rayo, es de 1.2 microsegundos  $\pm 30\%$

$$\therefore t_f = 1.2 \mu s \pm 30\%$$

$$0.84 \mu \text{ seg} \leq t_f \leq 1.56 \mu \text{ seg}$$

Desde el punto de vista de medición de la onda - el tiempo de frente de acuerdo a C.E.I. es:

$$t_f = 1.25 (t_{90\%} - t_{10\%})$$

$$\text{o } t_f = 1.667 (t_{90\%} - t_{30\%})$$

Así también para una onda por maniobra de interruptores tenores:

$$t_f = 250 \mu \text{seg} \pm 20\%$$

$$\therefore 200 \mu \text{seg} \leq t_f \leq 300 \mu \text{seg}$$

#### 4.5.- TIEMPO DE COLA

Este tiempo es el requerido para que la onda de impulso decrezca al 50% de su valor máximo.

La Comisión Electrotécnica Internacional (C.E.I.) especifica:

para ondas de impulso por rayo

$$t_c = 50 \mu\text{seg} \pm 20\%$$

$$\therefore 40 \mu\text{seg} \leq t_c \leq 60 \mu\text{seg}$$

para ondas por maniobra de interruptores

$$t_c = 2500 \mu\text{seg} \pm 60\%$$

$$\therefore 1000 \mu\text{seg} \leq t_c \leq 4000 \mu\text{seg}$$

tenemos pues ondas de:

$$1.2 / 50 \mu\text{seg} \text{ por rayo}$$

$$250 / 2500 \mu\text{seg} \text{ por maniobra}$$

#### 4.6.- RESISTENCIA DE FRENTE

El valor de diseño será obtenido de la expresión en el cual la onda alcanza su valor máximo para ondas de impulso por rayo es:

$$t_f \approx A Z$$

donde  $A = \text{constante} = 2.5$

$$Z = R_f \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\therefore t_f \approx 2.5 R_f \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

así pues despejando

$$R_f \approx \frac{t_f (C_1 + C_2)}{2.5 C_1 C_2}$$

$R_f =$  Resistencia de frente total

donde:  $t_f = 1.2 \mu\text{seg} \pm 30\%$

$$C_1 \geq 5 C_2$$

$N =$  Número de pasos

$C_1$  y  $C_2$  conocidos

La resistencia de frente por paso del generador será:

$$\frac{R_f}{N}$$

NOTA: Las normas C.E.I. establecen una tolerancia de  $\pm 30\%$

para ondas de impulso por manobra tenemos:

$$t_f = \lambda R_f C_2$$

donde  $\lambda = 3 = \text{cte}$

$$\therefore R_f = \frac{t_f C_2}{3}$$

siendo  $R_f$  la resistencia total de frente del generador.

$$\text{por paso tenemos: } \frac{R_f}{N}$$

$N = \text{número de pasos}$

#### 4.7.- RESISTENCIA DE COLA

Sabemos que para efectos prácticos tenemos en forma aproximada para ondas de impulso por rayo y maniobra

$$t_c \approx 0.72 R_c (C_1 + C_2)$$

Así pues

$$R_c \approx \frac{t_c}{0.72 (C_1 + C_2)}$$

de acuerdo a normas C.E.I.

$$t_c = 50 \mu\text{seg} \pm 20\%$$

$C_1$  y  $C_2$  conocidas

$R_c$  es obtenido

La resistencia de cola por paso del generador es:

$$\frac{r_c}{N}$$

NOTA De acuerdo a normas C.E.I., existe una tolerancia de  $\pm 20\%$

#### 4.8. EFICIENCIA DEL GENERADOR.

De acuerdo a lo expuesto en pag. n.º. 69 la eficiencia

se define como :

$$\eta = \frac{\text{Voltaje de salida}}{\text{Voltaje de entrada.}}$$

Lo cual significa

$$\eta = \frac{v_o(t)}{V}$$

$$\therefore \eta = \frac{1}{c_2 L \alpha \beta} \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha - \beta} e^{-\alpha t} - \frac{\alpha}{\alpha - \beta} e^{-\beta t} \right)$$

Donde :

$\alpha$  ,  $\beta$  estan en función de todos los parámetros del generador: lo cual significa que la eficiencia tambien lo esta.

Notar lo complejo de la expresión final.

Así para efectos aproximados y prácticos en ondas de impulso por rayo tenemos que la expresión de la eficiencia será :

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Donde :  $C_1 \geq 5C_2$

Obviamente si :  $C_1 = 5C_2 \quad \text{--->} \quad = 83.3\%$

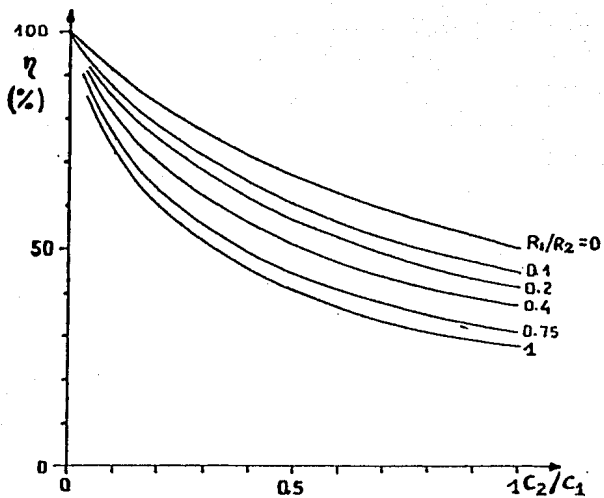
$C_1 = 10C_2 \quad \text{--->} \quad = 90 \%$

⋮

⋮

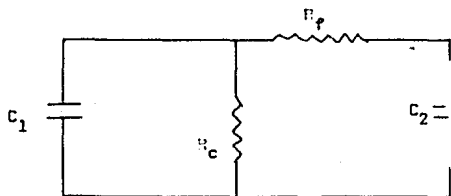
Tomando la relación  $C_c \geq C_f$  se puede tener la siguiente gráfica de la eficiencia .





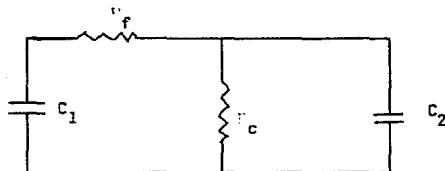
Gráfica que muestra la eficiencia en función de la relación de capacitancias  $C_2/C_1$  y para diferentes valor de  $R_1/R_2$ .

Para el caso de tener ondas de impulso por maniobra, entonces en forma analoga se puede usar :



$$\eta = 0.95 \left( \frac{R_2 C_1}{R_2 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2} \right)$$

La otra posibilidad sera con el circuito :



$$\eta = 0.95 \left( \frac{R_2 C_1}{R_2 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_1} \right)$$

#### 4.9. ENERGIA DE DISIPACION

De lo obtenido en el capítulo 3.10 y haciendo

$$i_2 = R_f \quad , \quad i_3 = i_c$$

La energía disipada en la resistencia de frente de la onda :

$$W_f = \left( \frac{V^2}{2} \right) \left( \frac{R_c C_1 C_2}{R_f C_2 + R_c C_1 + R_c C_2} \right) \quad \text{Jouls}$$

Donde

V es el voltaje total del generador:

$W_f$  la energía disipada en la resistencia de frente.

La energía disipada por paso sera :  $\frac{W_f}{n}$  Jouls

La energía disipada en la resistencia de cola es :

$$W_c = \left( \frac{V^2}{2} \right) \frac{C_1 (R_c C_1 + R_f C_2)}{R_c C_1 + R_f C_2 + R_c C_2}$$

La energía po paso :  $\frac{W_c}{2}$  Jouls.

## **5. Características generales en el diseño.**

### 5.1. Cálculos para el diseño de un generador de impulsos.

OBJETIVO.-Se trata de diseñar un generador de impulsos para ser utilizado en pruebas de impulso por rayo en aisladores hasta clase 69 KV.

#### 1.-Obtención del voltaje nominal.

Subemos que el nivel básico de aislamiento (NBA) de los aisladores, hasta clase 69 KV, lo cubrimos con un voltaje de prueba próximo a los 400 KV.

En pruebas experimentales del voltaje crítico de flameo para aisladores clase 69 KV, posiblemente tengamos que aplicar voltajes arriba de éste valor .

Consideremos un voltaje inicial de 400 KV.

Además debemos considerar una eficiencia del generador mínima del 80%, en cuanto a voltaje se traduce en 80 KV.

Tomando como factor de seguridad, carga, experimental de 1.5, significa un incremento de voltaje de 220 KV.

Así pues, el voltaje nominal estimado será :

$$V_{nom} = 400 \text{ KV} + 80 \text{ KV} + 220 \text{ KV}$$

$$V_{nom} = 700 \text{ KV.}$$

Por conveniencia sea, pues, el voltaje nominal del generador de impulsos de 720 KV. (Esto es :

$$V_{nom} = 720 \text{ KV.}$$

a) Voltaje nominal por paso.

Aquí es necesario definir cuantos pasos debe tener el generador o buscar la combinación más adecuada. Lo anterior significa averiguar los tipos de capacitores que se tiene comercialmente y en caso necesario hacerlos de fabricación especial.

En nuestro caso el análisis se tomara como base 4, 8 y 12 pasos. Se obtiene lo siguiente :

Número de pasos	4	8	12
Voltaje por paso KV.	180	90	60
Voltaje nominal KV.	720	720	720

2.-Determinación de la capacitancia del generador de impulsos.

Para que la eficiencia del generador sea mayor al 80% se debe cumplir la siguiente relación :

$$C_g \geq 5C_2$$

Donde :  $C_g$  es la capacitancia del generador  
 $C_2$  es la capacitancia de la carga o objeto bajo prueba.

Podemos observar que conociendo la capacitancia de los objetos por probarse se determina la capacitancia del generador.

CONSIDERACION.-Sea el rango de capacitancias de los objetos por probarse cubierto con un valor  $C_2 = 2$  nanofaradios.

Generalmente se hace un análisis de los valores capacitivos de los objetos por probarse y seleccionamos el rango correspondiente.

entonces sea pues ;  $C_2 = 2 \text{ nf.}$

La capacitancia total del generador sera :

$$C_g \geq 10 \text{ nf.}$$

Tomemos nosotros :  $C_g = 15 \text{ nf.}$

Asi la capacitancia por paso del generador sera .

Número de pasos .	4	8	12
Capacitancia por paso nf.	60	120	180
Capacitancia del generador: nf.	15	15	15



### 3.- Energía nominal del generador.

Sabemos que la expresión para calcular la energía está dada por :

$$U = (1/2) C_g V^2$$

Son datos conocidos

$$C_g = 15 \text{ nf.} = 15 \cdot 10^{-9} \text{ faradios.}$$

$$V = 720 \text{ KV.} = 720 \cdot 10^3 \text{ volts.}$$

Sustituyendo

$$U = (15 \cdot 10^{-9}) (720 \cdot 10^3)^2 / 2 \quad \text{jouls.}$$

$$U = 3888000 \cdot 10^{-9} \cdot 10^6 \quad \text{jouls.}$$

$$U = 3888 \quad \text{jouls}$$

$$U = 3.888 \text{ Kilojouls.}$$

4.- El generador se diseñará para ondas de impulso por rayo. Así pues los tiempos estipulados en normas son :

Tiempo de frente de la onda

$1.2 \pm 30\%$             microsegundos.

• •             $0.84 \leq t_f \leq 1.56$       microsegundos

Tiempo de colada de la onda

$50 \pm 20\%$             microsegundos

• •             $40 \leq t_c \leq 60$       microsegundos

La onda se especifica como :

1.2 / 50 microsegundos

5.- Obtención de los valores de resistencia para el frente de la onda.

El valor resistivo se tiene de la ecuación :

$$R_f = \left( \frac{t_f}{2.5} \right) \left( \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right)$$

Datos.  $t_f = 1.2 \times 10^{-6}$  segundos

$C_1 = 15 \times 10^{-9}$  faradios

$C_2 = 2 \times 10^{-9}$  faradios

Sustituyendo.

$$R_f = \left( \frac{1.2 \times 10^{-6}}{2.5} \right) \left( \frac{15 \times 10^{-9} + 2 \times 10^{-9}}{(15 \times 10^{-9})(2 \times 10^{-9})} \right)$$

Así la resistencia total del generador

$$R_f = 0.272 \times 10^3 \text{ ohms}$$

$$R_f = 272 \text{ ohms}$$

La resistencia en función del número de pasos.

número de pasos	4	8	12
resistencia de frente	68	34	22.7

6.- Cálculo de los valores de resistencia para la cola de la onda.

De la ecuación :

$$R_c = \left( \frac{t_c}{0.72} \right) \left( \frac{1}{C_1 + C_2} \right)$$

Datos  $t_c = 50 \times 10^{-6}$  segundos

$C_1 = 15 \times 10^{-9}$  faradios

$C_2 = 2 \times 10^{-9}$  faradios

Sustituyendo :

$$R_c = \left( \frac{50 \times 10^{-6}}{0.72} \right) \left( \frac{1}{15 \times 10^{-9} + 2 \times 10^{-9}} \right)$$

$$R_c = 4.0849 \times 10^{-3} \text{ ohms}$$

La resistencia total del generador.

$$R_c = 4085 \text{ ohms.}$$

La resistencia en funcion del número de pasos :

número de pasos	4	8	12
resistencia de cola	1021	510.6	340.4

7.- Determinación en forma aproximada de la eficiencia del generador.

Usando la relación :

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Donde :  $C_1 = 15$  nanofaradios

$C_2 = 2$  nanofaradios

Sustituyendo

$$\eta = \frac{15}{15 + 2}$$

$$\eta = 88 \%$$

B.- Energía de disipación.

a) Para la resistencia de frentes.

$$W_f = \left( \frac{V^2}{2} \right) \left( \frac{R_c C_1 C_2}{R_f C_2 + R_c C_1 + R_c C_2} \right) \text{ Jouls}$$

Donde :  $V = 720 \times 10^3$  volts

$R_c = 4085$  ohms

$R_f = 272$  Ohms

$C_1 = 15 \times 10^{-9}$  faradios

$C_2 = 2 \times 10^{-9}$  faradios.

Sustituyendo.

$$W_f = \frac{(720 \times 10^3)^2 (4085) (15 \times 10^{-9}) (2 \times 10^{-9})}{2(272 \cdot 2 \times 10^{-9} + 4085 \cdot 15 \times 10^{-9} + 4085 \cdot 2 \times 10^{-9})}$$

Así la energía total disipada por la resistencia de frentes :

$W_f = 453.8$  Jouls

La energía disipada en función del número de pasos

número de pasos	4	8	12
energía disipada: Jouls	113.5	56.7	37.8

b) Para la resistencia de cola .

$$W_c = \left( \frac{V^2}{2} \right) \left( \frac{C_1 ( R_c C_1 + R_f C_2 )}{R_c C_1 + R_f C_2 + R_c C_2} \right)$$

Sustituyendo datos y simplificando.

$$W_c = 3434.1 \quad \text{Jouls.}$$

Que es la energía total disipada por las resistencias de cola.

Podemos calcular la energía disipada en cada paso por la resistencia de cola.

número de pasos		4	8	12
energía disipada	Joule	858.5	429.5	286.2
energía total	Jouls.	3434.1	3434.1	3434.1

5.2. Planteamiento computacional para obtener los parámetros involucrados en ondas de impulso.

El siguiente análisis tiene como objetivo poder resolver la expresión matemática representativa de una onda de impulso mediante un programa de computadora digital.

La ecuación que representa una onda de impulso es la siguiente.

$$V_0(t) = \frac{V C_1 R_3}{B(r-s)} \left[ e^{-(\beta - \sqrt{\beta^2 - 1}) \frac{t}{\theta}} - e^{-(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}) \frac{t}{\theta}} \right]$$

La cual se puede expresar de la forma.

$$V_0(t) = V' ( e^{-st} - e^{-rt} )$$

Donde :  $V' = \frac{V C_1 R_3}{B(r-s)}$  ----- (A)

$$B = C_1 C_2 ( R_1^2 R_3 + R_2^2 R_3 + R_1 R_2 )$$

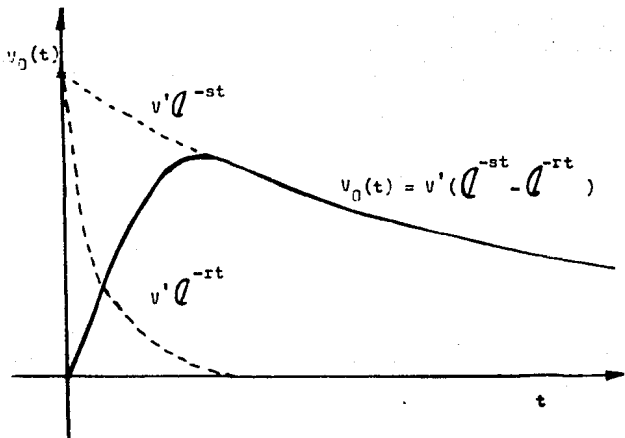
Si  $R_2 = 0$ ;  $B = C_1 C_2 ( R_1^2 R_3 )$

Si  $R_1 = 0$ ;  $B = C_1 C_2 ( R_2^2 R_3 )$



La representación gráfica de la ecuación de impulso

$$v_G(t) = v' ( e^{-st} - e^{-rt} ) \quad \text{se muestra.}$$



Podemos observar lo siguiente :

- 1.- La onda de impulso resultante (trazo continuo) es obtenida sumando punto a punto las exponenciales  $Q^{-st}$  y  $Q^{-t}$  (trazo discontinuo).
- 2.- Los parámetros involucrados en la onda de impulso son  $s, r, V'$ , calculándolos, la onda de impulso estará bien definida.
- 3.- El procedimiento para calcular  $s, r$  y  $V'$  dependerá fundamentalmente de los tiempos necesarios para tener el valor máximo de la onda y su valor medio, esto es, tiempo de frente  $t_1$  y tiempo de cola  $t_2$ .

4.- Usaremos la relación de tiempos  $t_1 / t_2$ , especificados en normas esto es, 1.2 / 50 microseg. para a impulso por rayo. Además la relación de parámetros  $r / s$  por determinar.

5.- Así, con base en los tiempos de frente y cola de la onda de impulso procederemos a encontrar una ecuación representativa de ésta que sea fácil de resolver con algún método incremental.

Obtengamos dicha ecuación.

El valor máximo de la onda será para  $t = t_1$

$$\therefore V_0(t_1) = V' ( e^{-st_1} - e^{-rt_1} ) \quad \text{--- (1)}$$

$$\frac{d V_0(t_1)}{d t_1} = 0$$

$$\text{Derivando ; } -s e^{-st_1} + r e^{-rt_1} = 0$$

$$r e^{-rt_1} = s e^{-st_1}$$

$$r / s = e^{-(s-r)t_1}$$

$$\frac{r}{s} = e^{-\left(1 - \frac{r}{s}\right)st_1}$$

Hagamos por conveniencia :

$$k = \frac{r}{s} ; r = s \cdot k$$

$$\therefore k = e^{-(1-k)st_1}$$

$$k = \left( e^{-st_1} \right)^{-(k-1)}$$

Algebraicamente los exponentes podemos afectarlos

$$\text{por } -\left(\frac{1}{k-1}\right)$$

Tenemos entonces

$$k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} = e^{-st_1} \text{-----} \textcircled{2}$$

Elevando a la k toda la expresión.

$$k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} = e^{-skt_1} = e^{-rt_1} \text{-----} \textcircled{3}$$

Sustituyendo ec. (2) y (3) en (1)

$$V_0(t_1) = V' \left( k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} \right) \text{--}$$

La cual puede escribirse como :

$$V_0(t_1) = V' k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} (1 - k^{-1}) \text{-----} \textcircled{4}$$

Para el valor medio de la onda se tiene el tiempo de cola de :

$$t = t_2 \text{ pudiendo expresarse la ec. 1}$$

$$V_0(t_2) = V' \left[ e^{-st_1 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)} - e^{-rt_1 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \right] \text{-----} \textcircled{5}$$

Sustituyendo ec. (2) y (3) en (5)

$$V_0(t_2) = V' \cdot k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \dots$$

Esto es :

$$V_0(t_2) = V' \cdot k^{-\left(\frac{t_2/t_1}{k-1}\right)} \left(1 - k^{-\frac{t_2}{t_1}}\right) \dots \textcircled{6}$$

Además ;  $2 V_0(t_2) = V(t_1)$

$$\frac{V_0(t_2)}{V_0(t_1)} = 1/2 \dots \textcircled{7}$$

Sustituyendo ec. (6) y (4) en (7)

$$\frac{V' \cdot k^{-\left(\frac{t_2/t_1}{k-1}\right)} \left(1 - k^{-\frac{t_2}{t_1}}\right)}{V' \cdot k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} \left(1 - k^{-1}\right)} = 1/2$$

Siendo igual a lo siguiente :

$$2 \left( k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \right) = k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)}$$

Definiendo  $a = \frac{t_2}{t_1}$

$$a = 50/1.2 = 500/12 = 125/3 = 41.7$$

Asi pues haciendo manipulaciones algebraicas tenemos :

$$2 k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} a - 2 k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} a = k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)}$$

Multiplicando toda la expresión por  $k^{\left(\frac{1}{k-1}\right)}$

$$2 k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} a \cdot k^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} - 2 k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} a \cdot k^{\frac{1}{k-1}} =$$

$$k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} \cdot \frac{1}{k-1} - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} \cdot \frac{1}{k-1}$$

$$2 k^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} \left[ k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} a - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} a \right] = k^0 - k^{-\left(\frac{k-1}{k-1}\right)}$$

$$2 k^{\frac{1}{k-1}} \left[ k^{-\left(\frac{1}{k-1}\right)} a - k^{-\left(\frac{k}{k-1}\right)} a \right] = 1 - k^{-1}$$

Multiplicando toda la expresión por  $k$ .

$$2 k k^{\frac{1}{k-1}} \left[ \frac{-\left(\frac{1}{k-1}\right) a}{k} - k^{\frac{-\left(\frac{k}{k-1}\right) a}{k}} \right] = k - 1$$

$$k^{\frac{k}{k-1}} \left[ \frac{-\left(\frac{1}{k-1}\right) a}{k} - k^{\frac{-\left(\frac{k}{k-1}\right) a}{k}} \right] = \frac{k-1}{2}$$

Refactorizando :

$$k^{\frac{-\left(\frac{1}{k-1}\right) a}{k}} \left[ k k^{\frac{1}{k-1}} - k k^{\frac{1}{k-1}} k^{-a} \right] = \frac{k-1}{2}$$

$$k^{\frac{-\left(\frac{1}{k-1}\right) a}{k}} \left[ k^{\frac{k}{k-1}} (1 - k^{-a}) \right] = \frac{k-1}{2}$$

Puesto que  $k^a \gg 1$

$$\therefore k^{-a} = \frac{1}{k^a} \ll 1$$

Así pues despreciamos el término  $k^{-a}$



Haciendo lo anterior tenemos :

$$k \cdot \left(-\frac{1}{k-1}\right) + \frac{k}{k-1} = \frac{k-1}{2}$$

$$k \cdot k \cdot \frac{1}{k-1} + k \cdot \left(-\frac{1}{k-1}\right) = \frac{k-1}{2}$$

$$k \left(\frac{k}{k-1} - \frac{1}{k-1}\right) = \frac{k-1}{2}$$

Así la ecuación por resolver computacionalmente es la siguiente :

$$k \left(\frac{k-125/3}{k-1}\right) - \frac{k}{2} + \frac{1}{2} = 0$$

Uno de los métodos incrementales más útil para resolver la ecuación final es el de Newton-Raphson.

La exposición detallada del método de Newton-Raphson y su aplicación para nuestro caso no es el objetivo de éste breve análisis, se deja pues, pendiente .

Teniendo la ecuación final se obtiene la solución al encontrar el valor de  $k$ .

Si  $k$  es conocido podemos calcular 's' de la relación

$$k = e^{-(1-k)st_1}$$

Despejando

$$s = \frac{1}{(k-1)t_1} \ln(k)$$

Asimismo sabemos  $k = \frac{r}{s}$

$$\therefore r = s k$$

Tenemos pues, calculados  $s$  y  $r$  .

El valor de  $V'$  se obtiene de la ec. (A)

Como un dato interesante, para ondas normalizadas,  
se obtiene los siguientes valores de "s", "r" y  $V'$ .

a) En ondas de impulso por rayo

$$t_1 / t_2 = 1.2 / 50 \text{ microsegundos.}$$

$$V' = 1.03720$$

$$s = 0.01467$$

$$r = 2.47539$$

b) En ondas de impulso por maniobra

$$t_1 / t_2 = 250 / 2500 \text{ microsegundos.}$$

$$V' = 1.11336$$

$$s = 0.00032$$

$$r = 0.01487$$

6. CONSOLA PARA EL CONTROL DEL GENERADOR  
DE IMPULSOS

6.1 Características generales.

Los sistemas de generación de ondas de impulso para alto voltaje requieren un cuidado especial en cuanto su operación, habiendo tomar en cuenta entre otras lo siguientes:

Seguridad física del operador.

Facilidad de la operación.

Buen estado del equipo de generación.

Los aspectos anteriores implican que el equipo de generación reúna los requisitos mínimos para una operación adecuada. El equipo de operación deberá contener unidad de carga, medidor del tiempo de carga, unidad para leer voltaje de carga, sistema de disparo, perilla selectora del modo de operación, etc.

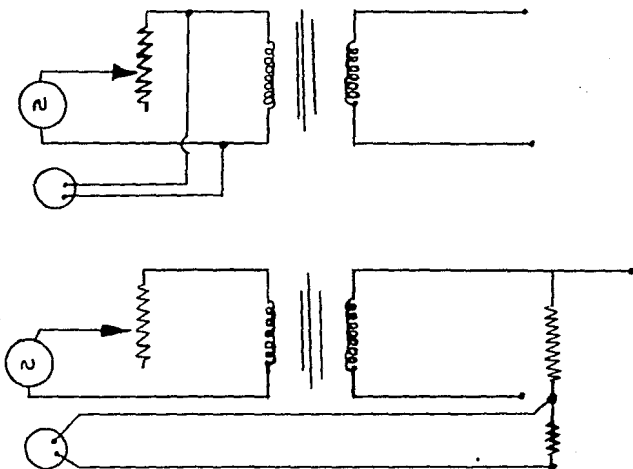
La unidad de carga es a través de un reostato, el cual nos proporciona voltaje variable (0-120) directamente aplicado a una fuente de tensión directa.

El tiempo de carga se especifica por medio de un relevador de tiempo .Generalmente es de 40 seg.

La unidad de lectura del voltaje de carga es a través de un voltmetro de corriente alterna donde se observa la tensión aplicada al lado de baja tensión del transformador de la fuente de C.D.

Otro método de medición del voltaje de carga, es por el lado de alta tensión de la fuente de C.D. a través de un divisor de tensión.

Los circuitos usados para cada opción son:



Una vez que el tiempo de carga finaliza el generador esta listo para ser disparado, pudiendo hacerlo de dos formas.

1. Cerrando las esferas lentamente
2. Por medio de un trigatron.

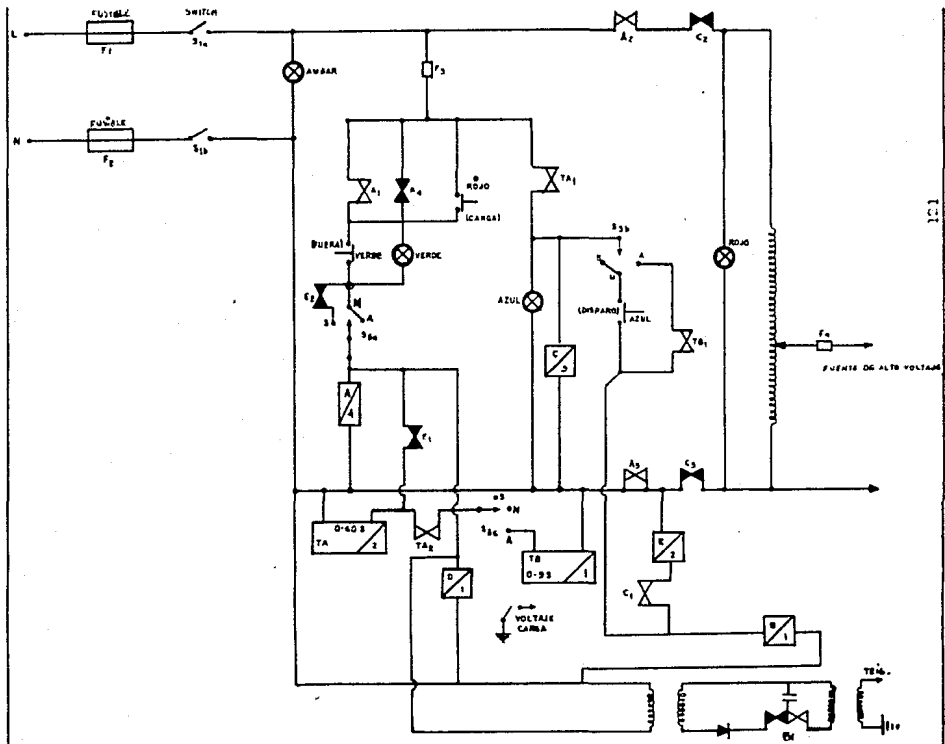
#### 6.2 Objetivos.

El objetivo de la consola de control consiste fundamentalmente en operar el generador de impulsos, por lo cual es necesario que contenga los siguientes aspectos.

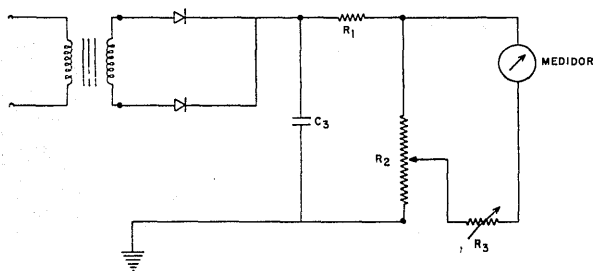
- a) Apertura o cierre de las esferas del generador de impulsos.
- b) Suministro de tensión de carga a los capacitores del generador.
- c) Sistema de disparo del generador.
- d) Equipo de medición.

Para lograr los objetivos anteriores se propone el circuito eléctrico mostrado a continuación.

### 6.3. Circuito eléctrico equivalente general.

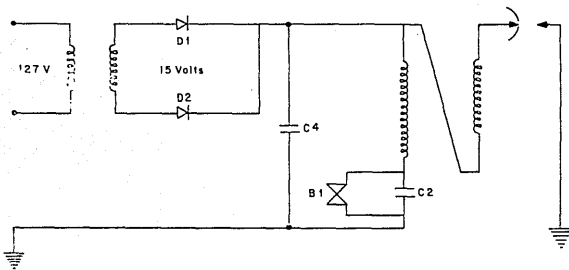





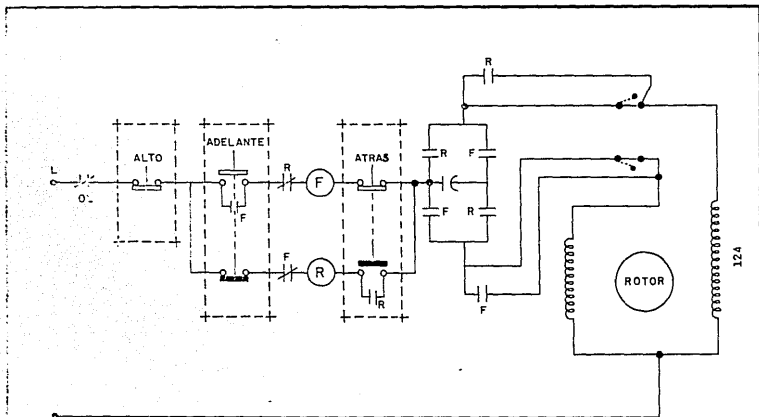


122

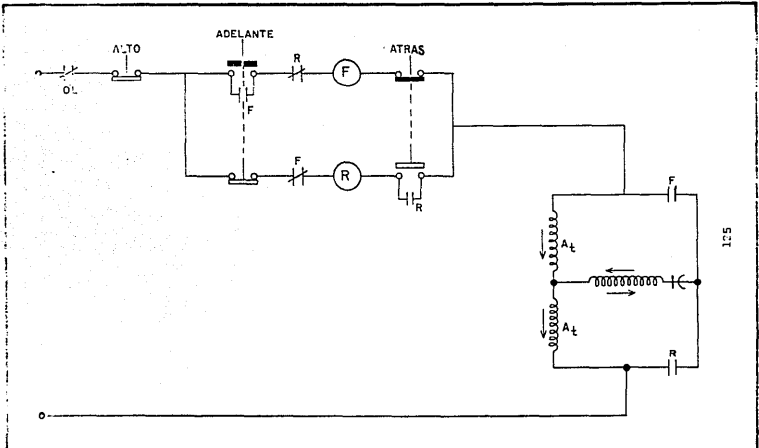
DIVISION DE EQUIPOS	 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS	DEPARTAMENTO DE DISEÑO	
TITULO		PARA EL DPTO. LABORATORIO DE MODELOS	
MEDIDOR DE ESFERAS	HOJA No. 4	FECHA	DIBUJO. J. CAMANASA
	DE 5	28 / ENERO / 82	REVISO. ANDRES LOPEZ
		APROBO:	Fig.



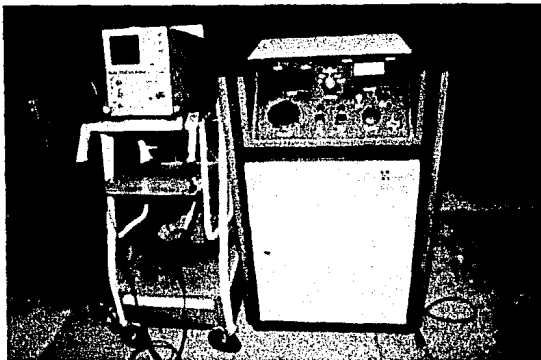
DIVISION DE EQUIPOS	 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS	DEPARTAMENTO DE DISEÑO	
SISTEMA DE DISPARO		HOJA No 3 DE 5	FECHA 28/ENERO/82



DIVISION DE EQUIPOS		DEPARTAMENTO DE DISEÑO	
TITULO		PARA EL DPTO. LABORATORIO DE MODELOS	
CONTROL DEL MOTOR		DIBUJO:	REVISO:
HOJA No 2		J. CAMARASA	ANDRES LOPEZ
DE 5	FECHA	APROBO:	Fig.
	27-ENERO-82		



DIVISION DE EQUIPOS		 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS		DEPARTAMENTO DE DISEÑO	
TITULO				PARA EL DPTO. LABORATORIO DE MODELOS	
CONTROL DEL MOTOR		HOJA N° 1	FECHA	DIBUJO: J. CAMARASA	REVISO: ANDRES LOPEZ
		DE 5	27-ENERO-82	APROBO:	Fig.



Se muestra una consola de control para el generador de impulsos. Exteriormente se observa el selector de modo de operación, el reostato variable para tensión de carga, los botones de carga y disparo, los medidores de tensión de carga y apertura o cierre de esferas, etc.

#### 6.4 Operación.

Analizando el circuito eléctrico se puede pensar en la siguiente secuencia en la operación del generador de impulsos.

- a) Encendido a través del interruptor  $S_{xy}$ , iluminándose la lámpara  $L_1$ , existe además energía disponible para el control del motor.
- b) Antes de comenzar el proceso de carga al generador se hace la apertura o cierre de las esferas mediante el circuito de control.
- c) Se selecciona el modo de operación, existiendo las siguientes opciones:  
F = fuera                      R = repetitivo  
M = manual                     A = automático
- d) Especificamos en los relays el tiempo de carga (  $T_C$ : 0-60 seg.), así como el tiempo requerido entre disparo y disparo (  $T_D$ : 0-6 seg.), para modo de operación R y A .

- e) Al energizar la bobina TA se inicia el tiempo de carga al generador.
- f) Terminado el tiempo de carga, mediante la apertura del contacto correspondiente, se procede a disparar el generador por medio del Trigger o cerrando las esferas.
- g) En terminos generales se repiten los pasos e), f), para nuevos disparos.

NOTAS:

1. El circuito de la consola anterior contiene unicamente componentes electromecánicas.
2. Existen consolas de control de tipo y forma diferentes ,dependiendo del fabricante.
3. El circuito anterior es parte de una consola de control fabricada en I.E.E ,con algunas modificaciones.

**7.- ASPECTOS GENERALES DE MEDICION EN ONDAS  
DE IMPULSO.**



## 7.1 DIVISOR DE TENSION TIPO RESISTIVO.

Los divisores de tensión tipo resistivo, son contruidos en formas y estilos distintos, dependiendo del fabricante y necesidades específicas para ser utilizadas por los laboratorios de pruebas.

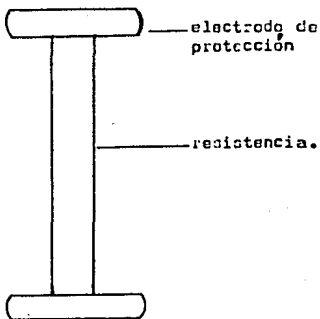
Se puede decir que existen divisores fabricados con resistencias de carbón, no inductivas, las cuales son conectadas en serie, formando la unidad de alto voltaje.

Otra forma de construir estos divisores es devanando alambre en un tubo de micarta o material aislante, tomando en cuenta el efecto no inductivo hasta tener la cantidad de ohms necesaria, sumergido en aceite.

NOTA.-El alambre es generalmente compuesto de níquel, cromo, aluminio, etc.

Tenemos pues, que un divisor de tensión esta formado por dos unidades, una de alta tensión y otra de baja.

Los divisores llevan en la parte superior un electrodo, anillo-plano, llamado toroide como protección para alta tensión.



#### Unidad de alto voltaje.

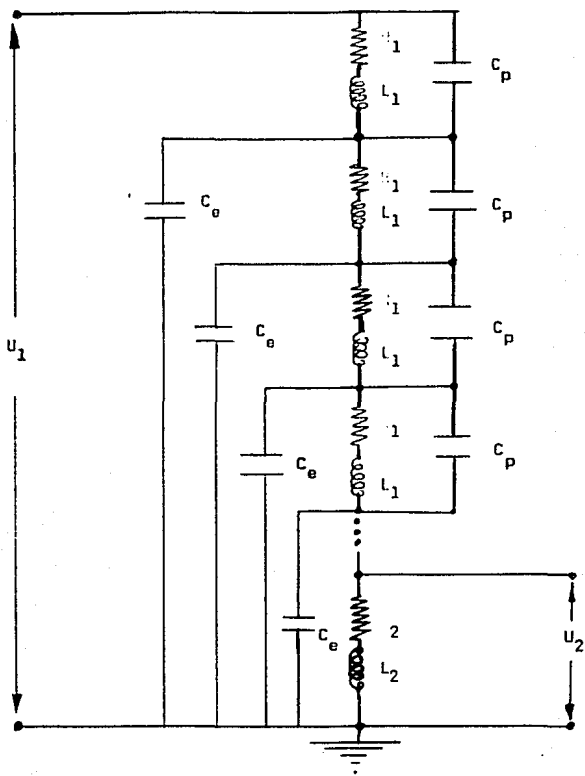
El objetivo fundamental del divisor de tensión, es poder realizar mediciones de altos voltajes de C.D , impulso, C.A., ect. La aplicación ideal de éste tipo de divisor es en corriente directa (c.d.).

La medición se realiza tomando una pequeña parte de éste, llamada unidad secundaria.

Existen otros factores que deben tomarse en cuenta al diseñar un divisor de tensión, algunos de éstos son los siguientes:

- a) La variación de temperatura de la resistencia en la unidad de alto voltaje.
- b) Distribución de campo eléctrico de los electrodos de alta tensión.
- c) Las capacitancias parásitas.
- d) El efecto del aceite o aire como dieléctricos en los cuales esta sumergido.
- e.) la altura .
- f) Aplicación en cuanto a medición.
- g) Envejecimiento de los elementos.
- h) Efectos inductivos propios de los elementos resistivos.
- i) Tiempo de respuesta del divisor.
- j) La alta capacidad térmica necesaria en los elementos resistivos.

El circuito eléctrico más general de un divisor de tensión tipo resistivo es el mostrado.



Donde :

$U_1$  es el voltaje en la unidad de alto voltaje.

$U_2$  es el voltaje en la unidad de bajo voltaje.

$C_0$  son capacitancias parásitas a tierra.

$C_p$  pequeñas capacitancias parásitas entre secciones.

$L_1$  inductancias de las unidades resistivas.

$L_2$  inductancia de la unidad de baja.

$r_1$  resistencia de las secciones de alta tensión del divisor.

$r_2$  resistencia del lado de baja tensión.

$r_t$  resistencia total de la unidad de alta tensión.

La relación del divisor despreciando capacitancias parásitas y efecto inductivo es

$$U_1 = I \left( R_1 + r_2 \right) \text{ ----- } \textcircled{1}$$

$$I = \frac{U_2}{r_2} \text{ ----- } \textcircled{2}$$

Sustituyendo  $\textcircled{2}$  en  $\textcircled{1}$

$$U_1 = \frac{U_2}{r_2} \left( R_1 + r_2 \right)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Así el voltaje de salida sera :

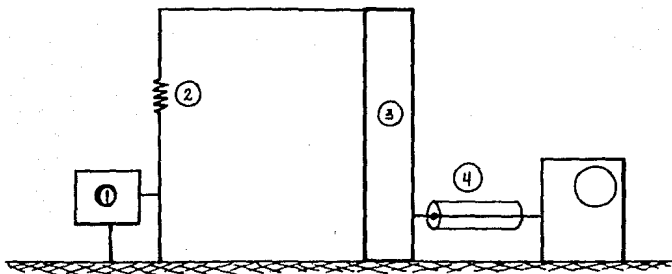
$$U_2 = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) U_1$$

Hasta aquí , los efectos inductivos y capacitivos, debido a las altas frecuencias de los voltajes de salida, no se han tomado en cuenta , en un analisis mas detallado deben considerarse.

Los voltajes pues, aplicados al divisor, son ondas de alta frecuencia lo cual significa que la relacion del divisor dependera de la frecuencia, lo cual provoca que la onda de impulso se distorsione. Un analisis en el dominio de la frecuencia, se puede realizar mediante la transformada de Fourier.

Para el análisis de la respuesta en el dominio del tiempo, el escalón unitario se puede obtener por medio de un generador de pulsos.

El circuito usado se ía :



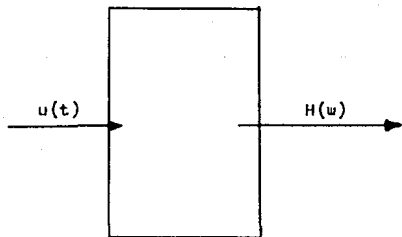
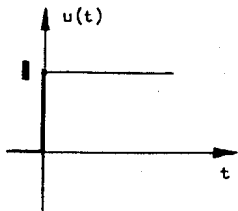
1. Generador de pulsos de escalón unitario .
2. Resistencia amortiguadora.
3. Divisor de tensión.
4. Cable coaxial y osciloscopio.

Sea  $U_1(t)$  ; la señal de entrada .

$U_2(t)$  ; la señal de salida .

$$u(t) = \begin{cases} 1 ; & \text{para } t > 0 \\ 0 ; & \text{para } t < 0 \end{cases} \quad \text{un escalon unitario.}$$

$H(\omega)$  ; respuesta al escalon unitario.





Así pues, el procedimiento es el siguiente:

La señal de entrada  $U_1(t)$  mediante la transformada de Fourier pasa al dominio de la frecuencia, esto es :

$$U_1(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(T) e^{-j\omega T} dT$$

La señal de salida será

$$U_2(\omega) = H(\omega) U_1(\omega)$$

Al pasar al dominio del tiempo

$$U_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_2(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Expresión que puede ser evaluada mediante el uso de tablas de Fourier.

Una vez evaluado se obtuvo la siguiente expresión

$$U_2(t) = |U_1| \left( \frac{R_2}{R_t + R_2} \right) \left[ 1 + \frac{R_t C_t - R_2 C_2}{R_2 (C_t + C_2)} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_2 (C_t + C_2)}} \right) \right]$$

Donde  $|U_1|$  es la magnitud de la señal de entrada.

Haciendo un breve analisis de  $U_2(t)$ , tenemos

1. Si  $t \rightarrow \infty$

$$U_2(\infty) = |U_1| \frac{R_2}{R_t + R_2} (1 - 0)$$

$$\therefore U_2(\infty) = |U_1| \left( \frac{R_2}{R_t + R_2} \right)$$

Lo que significa la estabilización de la señal de salida debido al efecto resistivo.

2. Si  $t \rightarrow 0$ , entonces está presente el efecto capacitivo.

$$U_2(0) = U_1 \left( \frac{R_2}{R_t + R_2} \right) \left( 1 + \frac{R_t C_t - R_2 C_2}{R_2 (C_t + C_2)} \right)$$

simplificando obtenemos :

$$U_2(0) = U_1 \frac{C_t}{C_t + C_2}$$

El proceso de obtener la diferencia entre los dos estados muestra algo interesante.

$$U_2(\infty) - U_2(0) = U_1 \left[ \frac{R_2}{R_t + R_2} - \frac{C_t}{C_t + C_2} \right]$$

Reduciendo

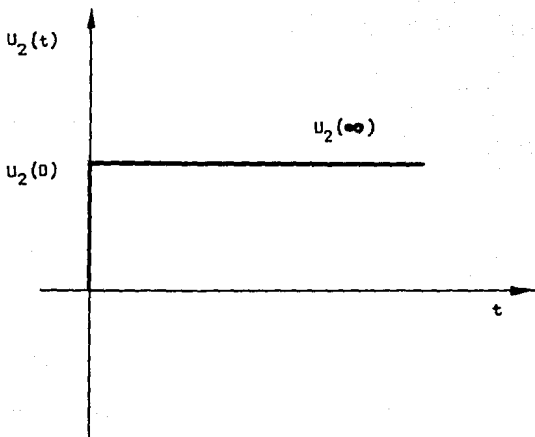
$$U_2(\infty) - U_2(0) = U_1 \left[ \frac{R_2 C_2 - C_t R_t}{(R_t + R_2)(C_t + C_2)} \right]$$

Analizando la expresión anterior tenemos

Si :  $U_2 C_2 = R_t C_t$  , entonces

$$U_2(\infty) = U_2(0)$$

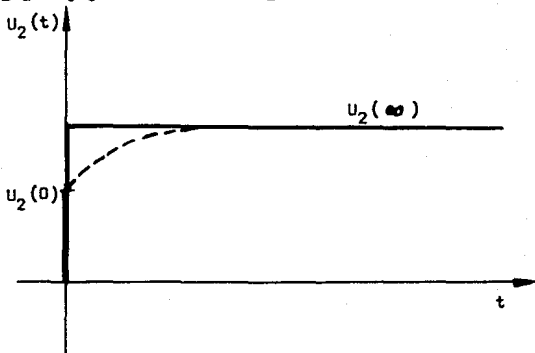
Graficamente significa



Se observa de la figura que la relación del divisor es completamente independiente de la frecuencia.

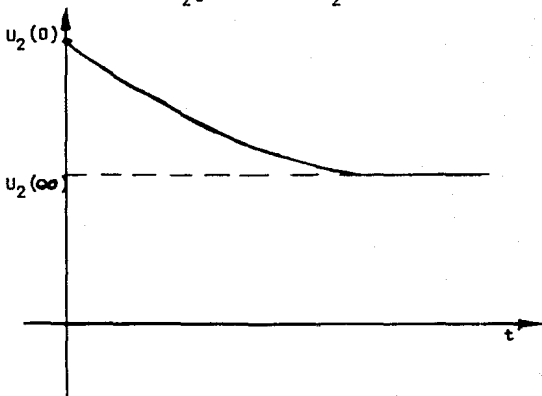
Otro caso es cuando :

$$R_2 C_2 > R_t C_t \quad \longrightarrow \quad U_2(\infty) > U_2(0)$$



Por último si :  $R_2 C_2 < R_t C_t$

$$\text{entonces : } U_2(\infty) < U_2(0)$$



Estudios realizados por diferentes autores muestran que el tiempo de respuesta del circuito equivalente del divisor de tensión está dado por la expresión

$$T = \frac{L}{R_1} + \frac{C_0}{6}$$

Considerando  $L = 0$

$$T = \frac{C_0}{6}$$

Así también la expresión para determinar la capacitancia parásita, es la siguiente.

$$C_0 = \frac{55.4}{\ln(1.15 H / d)} \quad \text{Picofaradios/metro}$$

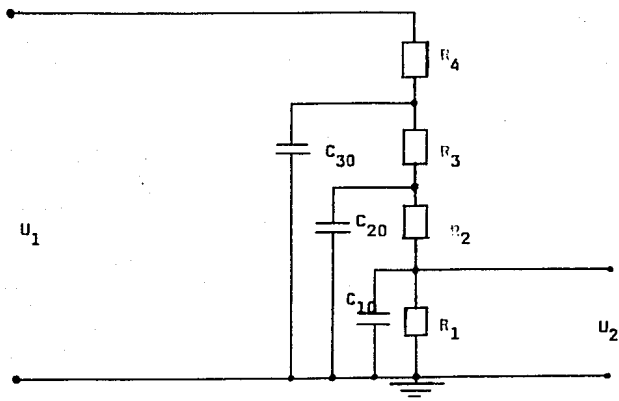
$H$  es la altura requerida por el divisor en Cm.

$d$  es el diametro del divisor en Cm.

## 7.2. DIVISOR DE TENSION RESISTIVO COMPENSADO.

El objetivo es tratar de tener un divisor cuya relación sea independiente de la frecuencia en un rango determinado.

Sea el circuito del divisor de tensión siguiente :



Donde las capacitancias parásitas a tierra  $C_{10}, C_{20}, \dots$  afectan al circuito .

El efecto inductivo se considera despreciable.

Del circuito anterior se puede observar que el efecto de la capacitancia parásita a tierra es importante, puesto que existiran cargas no uniformes con corrientes de carga diferentes en los puntos de union de los resistores.

Así también debido a la capacitancia parásita a tierra las constantes de tiempo de las secciones individuales seran diferentes. La relación del divisor es dependiente de la frecuencia.

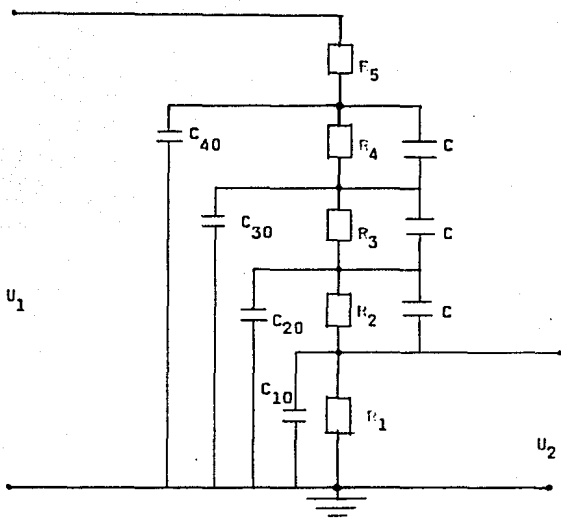
Asimismo el efecto de la corriente de carga, es tal, que en las resistencias superiores existiran diferentes voltajes respecto a las resistencias inferiores, esto es, en la parte de arriba la corriente sera considerablemente mayor.

Existe pues diferentes tensiones para identicas resistencias por sección.

Un posible método para resolver los flujos de corriente de carga es proporcionandole trayectorias paralelas compensadores.



Lo anterior se muestra en la siguiente figura :



Donde :

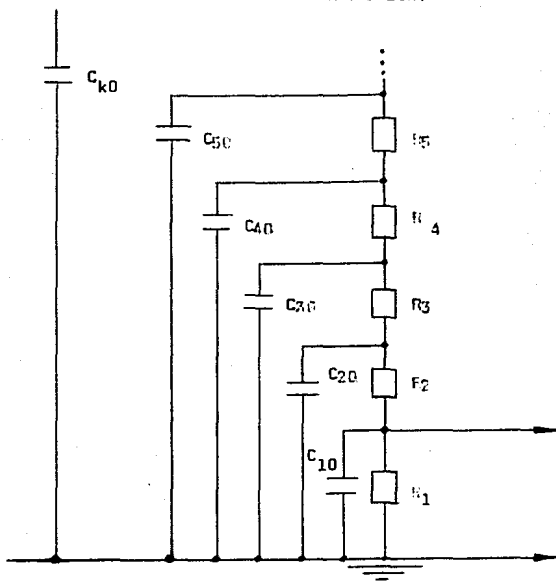
$C$  son las capacitancias compensadoras.

$C \gg C_{n0}$

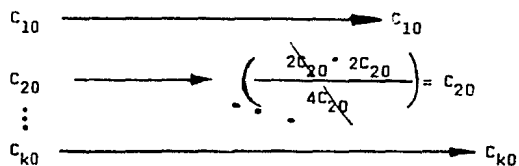
Sea un divisor con  $K$  elementos resistivos iguales por sección, de tal forma que :

$C_{k0}$  es la capacitancia parásita a tierra de la sección  $K$ .

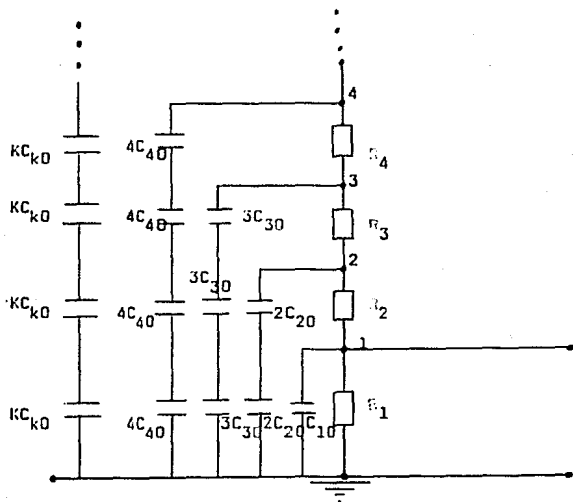
Dicho divisor se muestra a continuación.



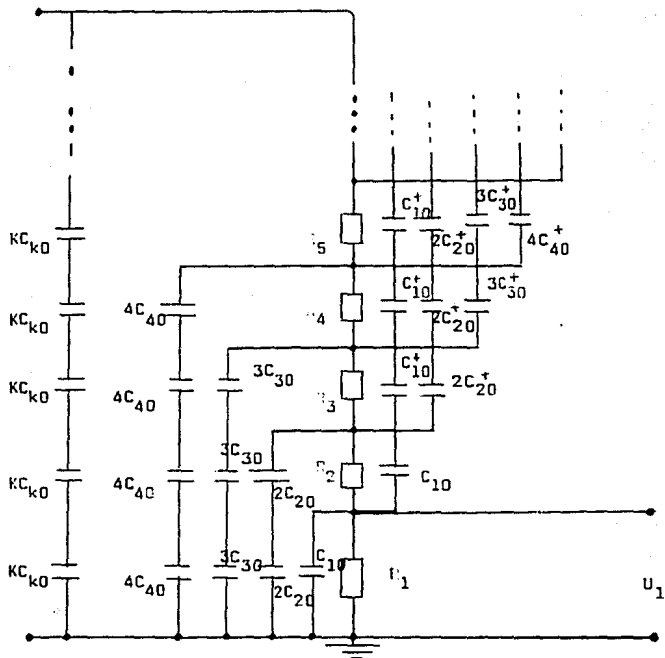
La capacitancia por sección  $C_{k0}$  puede distribuirse como una columna de capacitores conectados en serie con igual valor por sección. Esto se logra haciendo



En el circuito significa lo siguiente :

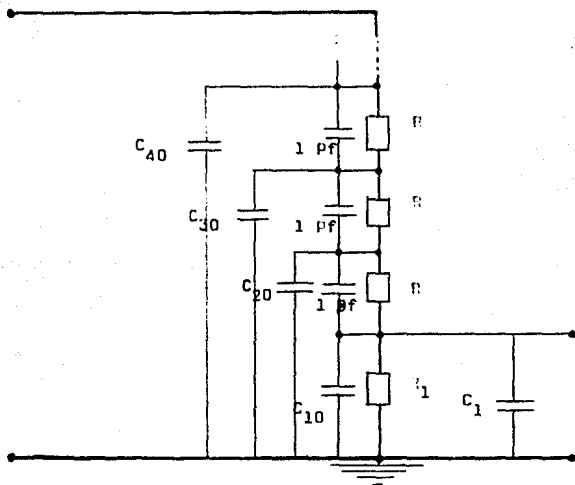


Podemos observar que el divisor se compensaría agregando capacitores adicionales de valor  $KC_{k0}^+$  como se muestra en seguida.



7.2.1. EJEMPLO.

Sea el divisor resistivo ( ZINKE ) siguiente.



Existen capacitancias parasitas entre secciones individuales, resistivas del divisor de  $1 \text{ Pf}$ .

Las capacitancias parasitas a tierra  $C_{k0}$  son

$C_{10}, C_{20}, \dots$ , iguales a  $10 \text{ Pf}$

Todas las secciones individuales del divisor son iguales para  $J \geq 2$ , esto es :

$$R_2 = R_3 = R_4 = \dots = R_j = R$$

Así pues, el problema consiste en encontrar el valor de las capacitancias compensadoras, tales que contrarresten el efecto parásito.

Los datos del problema son :

$$R_1 = 12.5 \text{ ohms}$$

$$R = 1125 \text{ ohms.}$$

$$C_1 = 890 \text{ Pf.}$$

$$C_{10} = C_{20} = \dots = 10 \text{ Pf.}$$

Los valores de capacitancias compensadoras son  
obtenidos como sigue.

$$C_{10} = 10 \text{ Pf.}$$

$$C_{10} + 2C_{20} = 30 \text{ Pf.}$$

$$C_{10} + 2C_{20} + C_{30} = 60 \text{ Pf.}$$

$$\begin{array}{ccc} \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{array}$$

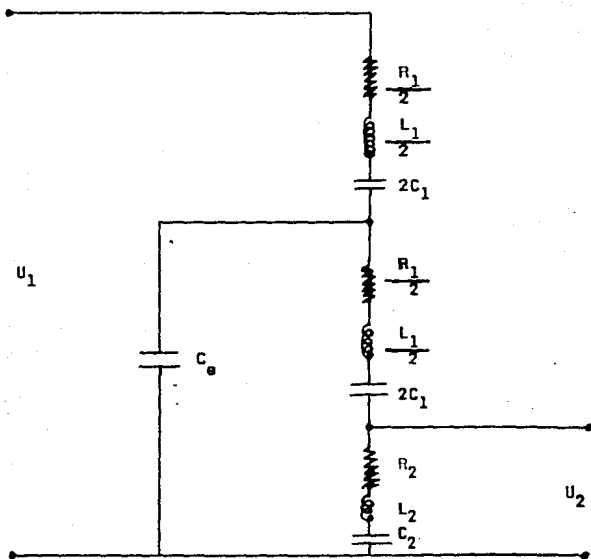
$$C_{10} + 2C_{20} + C_{30} + \dots + KC_{k0} = (1 + 2 + 3 + \dots + K) 10 \text{ Pf.}$$

Lo anterior es la compensación por sección del divisor.

### 7.3. DIVISOR DE TENSION FIJTO SERIE.

Los divisores de este tipo son llamados tambien capacitivos amortiguados, nombre adquirido al efecto de los elementos resistivos, los cuales van conectados en serie con los capacitivos.

El circuito equivalente es el siguiente.





Donde :

$C_1$  es la componente total de la unidad de alta tensión.

$C_2$  es la componente total de la unidad de baja tensión.

$R_1$  resistencia total del lado de alta.

$R_2$  resistencia total del lado de baja.

$L_1$  efecto inductivo del lado de alta.

$L_2$  inductancia del lado de baja tensión.

$C_e$  capacitancia parásita a tierra.

$N$  relación del divisor.

$n$  número de elementos resistivos y capacitivos.

La relación del divisor sin considerar el efecto de la capacitancia parásita a tierra esta dada como :

$$N = \frac{U_1}{U_2}$$
$$N = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Considerando todos los efectos debido a capacitancia parásita, cable y terminación la relación del divisor es la siguiente.

$$N = \frac{C_2 + C + C_k + (C_1 - C_e / 6)}{(C_1 - C_e / 6)}$$

Donde :

$C_k$  es la capacitancia por efecto del cable hacia el osciloscopio.

$C$  es la capacitancia de la terminación en el osciloscopio.

$$\text{Si : } C_e = 0$$

$$C_2 \gg C_k, C$$

$$N = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Una de las expresiones para obtener la capacitancia parásita a tierra es :

$$C_o = \frac{2\pi \epsilon_o H}{L_n \left( H/\sqrt{3r} \right)} \text{ picofaradios.}$$

H es la altura del divisor en m .

d es el diametro del divisor en m .

El tiempo de respuesta de este divisor es el siguiente

$$T_o = \frac{R_1 C_o}{4} + (R_1 C_1 - R_2 C_2)$$

$$\text{Si : } R_1 C_1 = R_2 C_2$$

$$T_o = \frac{R_1 C_o}{4}$$

Lo cual significa independencia del efecto inductivo  $L_1, L_2$

Para evitar el efecto oscilatorio debido al fenomeno de las ondas viajeras a lo largo del divisor hacemos

$$r_1 = 4 \sqrt{\frac{L_1}{C_0}}$$
$$\therefore T_0 = \sqrt{C_0 L_1}$$

## 8.- PRUEBAS DE IMPULSO

### 8. 1. pruebas de impulso en transformadores.

Generalmente las normas existentes I. E. C., CCONNIE, etc. muestran los requisitos necesarios para realizar la prueba. Así pues, el procedimiento expuesto a continuación está sujeto a técnicas y medios muchas veces propias de cada laboratorio.

Así, tenemos que considerar el equipo para generación de ondas de impulso, existente en cada laboratorio. Además el equipo necesario para realizar mediciones correctas tanto de las ondas de impulso como de condiciones ambientales, consola de control, etc.

Otro factor importante es la seguridad del operador y el personal ajeno al área de prueba

### 5.1.1.-CAPACITANCIA DEL TRANSFORMADOR

Para poder realizar la prueba de impulso en transformadores, significa tener disponible el equipo necesario, - esto es, los parámetros del generador deben ser los adecuados.

Considerando lo anterior, la carga de tipo capacitivo representada por el transformador bajo prueba, debe calcularse o medirse.

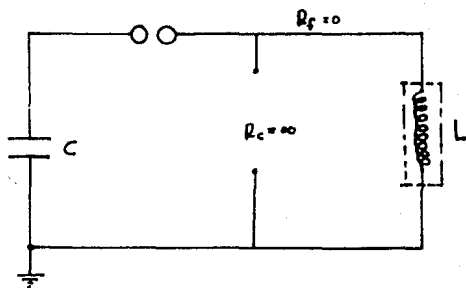
Una forma de medirse es con el puente correspondiente - ( TETTEX ).

El procedimiento para calcularla, es considerando un circuito resonante, en nuestro caso el circuito del generador tendrá esta condición si la resistencia de frente es ce ro y la de cola es infinita, tomando además el transformador como una carga inductiva.

$$R_f = 0$$

$$R_c = \infty$$

El circuito resonante sera el siguiente



Obviamente

$$V_C = Z_C I \quad V_L = Z_L I$$

$$V_C = V_L$$

$$\text{Ademas } Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad Z_L = j\omega L$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad ; \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\text{Ademas } \omega = 2\pi f \quad ; \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

El periodo de oscilacion natural

$$T = \frac{1}{f} \quad ; \quad T = 2\pi\sqrt{LC}$$

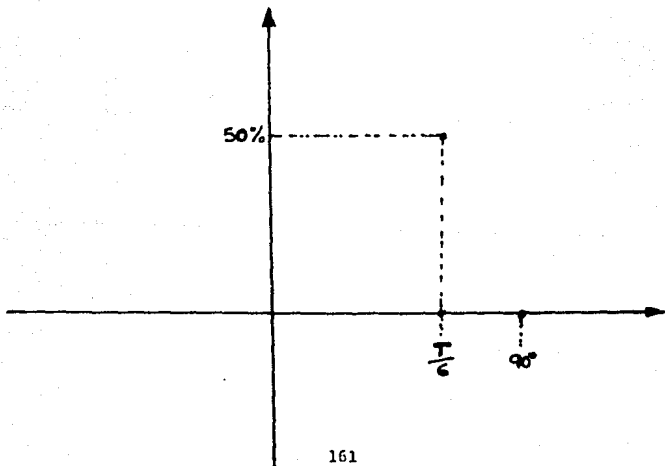
para nuestro problema el tiempo del valor medio de la onda ( tiempo de cola ) es 1 / 6 del periodo natural de oscilación.

$$t_c = \frac{1}{6} T$$

$$t_c = \frac{2\pi}{6} \sqrt{LC} \approx \frac{\pi}{3} \sqrt{LC}$$

Para ondas normalizadas de 1.2 / 50 microseg.

$$t_c = 50 \times 10^{-6} \text{ seg.} = \frac{\pi}{3} \sqrt{LC}$$





DESPEJANDO:

$$C = \frac{(3 \times 50 \times 10^{-6})^2}{n^2 L}$$

$$C = 2.25 \times 10^{-9} \left( \frac{1}{L} \right)$$

probar un transformador consiste en aplicar a un debanado los impulsos requeridos, con los otros corto circuitados, entonces la inductancia estará referida al debanado - bajo prueba, lo cual significa.

$$\frac{V}{A} = Z = \omega L$$

Referendolo al debanado bajo prueba

$$\frac{V}{A} = \frac{\omega L}{\omega} = 100$$

$$L = \frac{100 \times V}{\omega A}$$

Multiplicando y dividiendo por V

$$L = \left( \frac{100 \times V}{\omega (2\pi f) A} \right) \left( \frac{V}{V} \right)$$

$$L = \frac{\mu X V^2}{12000 (\pi) VA}$$

puesto que  $f = 60 \text{ Hz}$ .

V es voltaje del debanado bajo prueba

VA volts - amper

x reactancia

C capacitancia

L inductancia.

En transformadores trifásicos conectados en delta

la inductancia efectiva sera:

$$L = \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{\mu X V^2}{12000 \pi VA} \right)$$

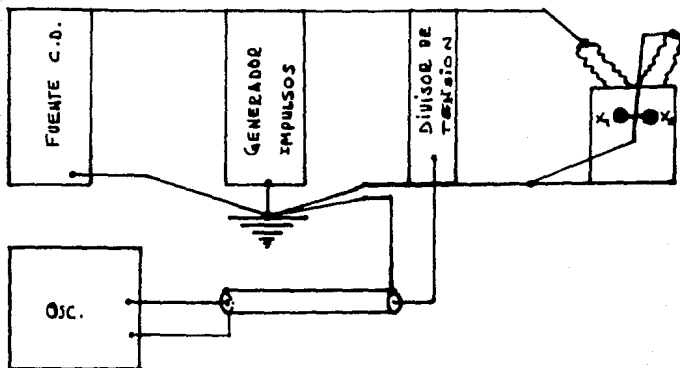
puesto que dos debanados son probados en paralelo.

### 8.1.2.- CIRCUITO ELECTRICO UTILIZADO Y EQUIPO DE MEDICION.

El circuito por utilizar involucra generalmente:

- a) Fuente de alimentación de alta tensión
- b) Generador de impulsos
- c) Equipo de medición

Tomando en cuenta lo anterior el circuito de conexión es el siguiente:



Notar que existe un solo punto para conectar a tierra todo lo involucrado en el circuito de prueba.

Una vez implementado el circuito de prueba, éste -  
debera verificarse operando cuidadosamente equipo de medición ( osciloscopio, voltmetro de pico ), consola de control del generador de impulsos, cierre y apertura de -  
esferas, sistemas de carga, sistema de disparo (trigatron o manualmente), etc. Hacer disparos de prueba con el transformador desconectado o conectado a bajo voltaje.

### 8.1.3.- OBTENCIÓN DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN.

El objetivo de los factores de corrección es actualizar las tensiones de ruptura tabuladas bajo condiciones estandar al lugar de prueba.

Así pues en pruebas de impulso tomaremos factor de corrección por humedad  $K_h$  y factor de corrección por densidad relativa del aire ( $K_d$ )

De acuerdo a normas el factor por densidad relativa del aire  $K_d$  está dado por,

$$K_d = \left( \frac{p_B}{760} \right) \left( \frac{273 + a}{273 + T_S} \right)$$

donde:

$p_B$  = presión barométrica (m m de Hg )

$a$  = temperatura que de acuerdo a normas es 20°C ó 25°C ( ANSI e IEC )

$T_S$  = temperatura de bulbo seco (°C )

$T_H$  = temperatura de bulbo húmedo (°C)

El laboratorio deberá tener equipo de medición para

presión barométrica

temperatura de bulbo seco.

temperatura de bulbo húmedo

Una vez medidos los datos necesarios se determina  $K_d$ .

El factor de corrección por humedad se obtiene de la siguiente forma.

Supongamos que tenemos los datos

$P_B = 650$  mm de Hg

$T_S = 22^\circ\text{C}$

$T_H = 19^\circ\text{C}$

De la gráfica 3.1.3.1 se muestra

con trazo discontinuo el valor correspondiente de la humedad relativa del aire HR.

$$H R = 15 \text{ gramos} / r^3$$

entrando con  $H R = 15 \text{ g}/r^3$  en la grafica 3.1.3:2 para factor de corrección por humedad, encontramos que:

$$K_h = 0.957$$

asi el factor de corrección para tensiones de ruptura por densidad relativa del aire y humedad sera:

$$K = K_d / K_h$$

en nuestro ejemplo

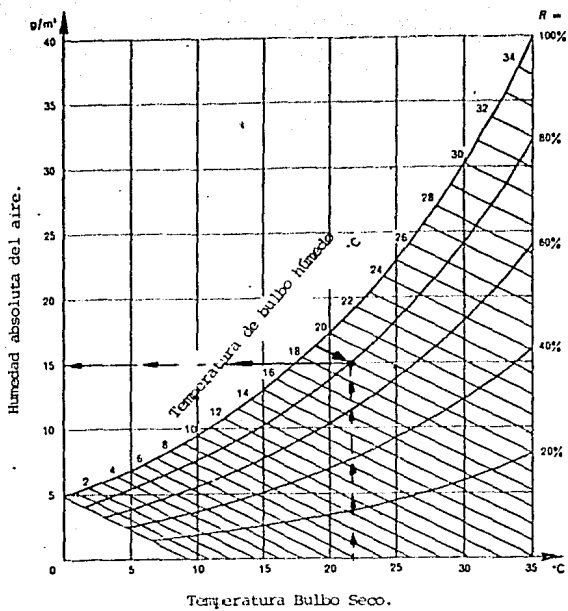
$$K_d = 0.84946$$

$$K_h = 0.957$$

$$\therefore K = 0.887$$

sea 100 kv en condiciones estandar significa tener en condiciones actuales:

$$(100) (0.887) = 88.7 \text{ kv.}$$



Grafica 3.1.3.1



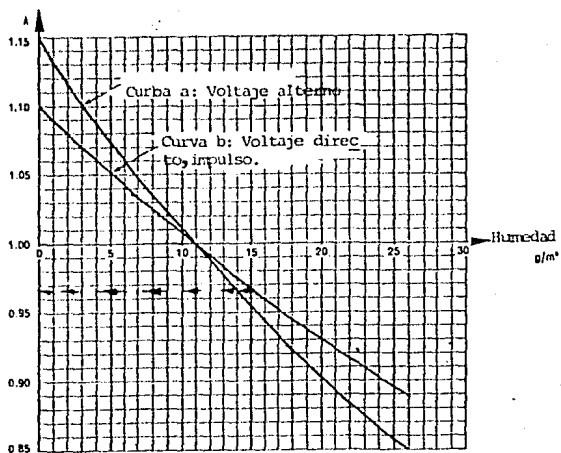


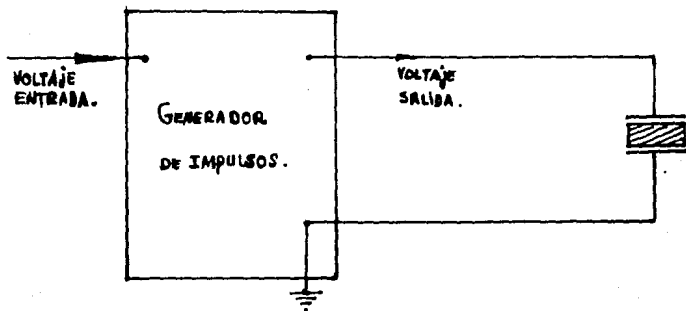
Gráfico 3.1.3.2

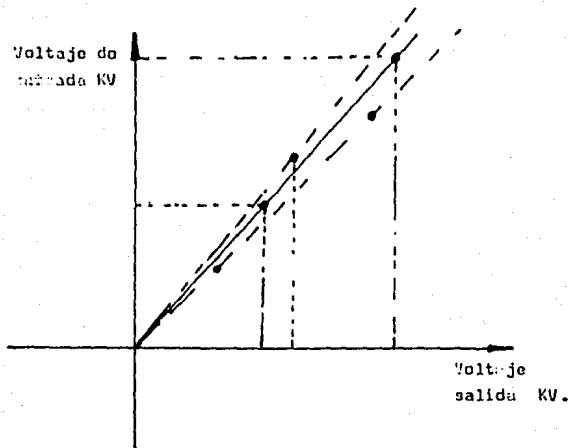
#### 8.1.4.- CURVA DE VOLTAJE ENTRADA - SALIDA.

El objetivo de é ta curva es poder tener un indicador para conocer el voltaje de salida del generador, respecto al voltaje de carga, suministrado a él.

Asimismo en base a la curva conoceremos el voltaje de prueba aplicado al transformador o cualquier otro objeto bajo prueba.

En pruebas a cables, aisladores, bushings, transformadores, etc, el procedimiento para obtener la curva de voltaje de entrada respecto al de salida es el mismo.





El voltaje de salida resulta más conveniente expresar lo en condiciones existentes en el lugar de prueba.

Las condiciones existentes influyen en el voltaje, así tenemos que:

$$\left( \begin{array}{c} \text{voltaje en} \\ \text{condiciones} \\ \text{actuales} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{factor} \\ \text{de} \\ \text{corrección} \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{c} \text{voltaje en} \\ \text{condiciones} \\ \text{estandar} \end{array} \right)$$

$$K_{VA} = (K) (KVE)$$

donde:

KVA = voltaje en condiciones existentes en el laboratorio de prueba

K = factor de corrección

KVF = voltaje en condiciones estándar cuyos valores característicos son:

760 r. f. de Hg

20 °C

0 r. s. r. r.

etc.

La curva de tensiones entrada - salida se obtiene aplicando un método de tipo probabilístico.

El método consiste en lo siguiente:

a) Usando un voltmetro de esferas, calibrar éste a determinada distancia (60% del voltaje de prueba) para determinar un punto de curva. La separación de esferas implica un voltaje específico de su tura.

ejemplo.

de tabla B.1.4.1. con esferas de 10 cm de diámetro para 3,5 cm → 95 kV

∴  $KVA = k(95)$

Tabl. B.1.4.1.  
 Voltaje de flameo (50% en pruebas de impulso)

Para voltajes alternos, directos ambas polaridades  
 y para impulsos estandar negativos completos: Una esferas  
 aterrizada.

Sphere esp. Distancia, ft.	Kilovolts Pico para 20 °C: 1013 milibars											
	Diámetro de las esferas, cm.											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						

Esta tabla no es valida para medición de voltajes de -  
 impulsos abajo de 10 KV.

1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2	(35.1)	37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4	(38.5)	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.5	(40.0)	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.6		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.8		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.0		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.2		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8		(72.5)	76.0	79.5	79.5	80.0	81.0	81.0	81.0			
3.0		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0			(95.0)	105	108	110	112	112	112	112		
4.5		(88.5)	(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5.0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	138
5.5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	151
6.0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	164
6.5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	177
7.0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	190
7.5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	203

b) aplicamos un nivel de voltaje próximo a los KVA determinados. Si existe flanco disminuimos la tensión aplicada en caso contrario aumentamos.

Los resultados se pueden tabular como sigue :

VOLTAJE DE CARGA KV	NUMERO DE APLICACIONES																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V - ΔV					0						0								
V	0	*	*		0	0	*	0	*										
V + ΔV		*					*	*				*							

Donde :

V es el nivel del voltaje aplicado

0 indica no flanco entre esferas

\* indica flanco entre esferas

Con los datos tabulados anteriormente se determina el

50 % de probabilidad de flanco.

TABLA DE DATOS PROBABILISTICOS						
VOLTAJE APLICADO KV			AISLADOR TIPO:		CLIENTE:	
			MATERIAL:		CLASE:	
POLARIDAD ( - )	ENTRADA	SALIDA	FLAMEOS	NO FLAMEOS	TOTAL	PROBABILIDAD DE FLAMEO
	V - ΔV		0	3	3	0 %
	V		4	4	8	50 %
	V + ΔV		4	0	4	100 %

Así pues, podemos concluir que por "V" volts de carga corresponde KV<sub>1</sub> kilovolts de salida.

V volts → KV<sub>1</sub> kilovolts.

En el nivel de tensión "V" existe aproximadamente la probabilidad del 50 % de fallo.

Tenemos pues, el punto de la curva :

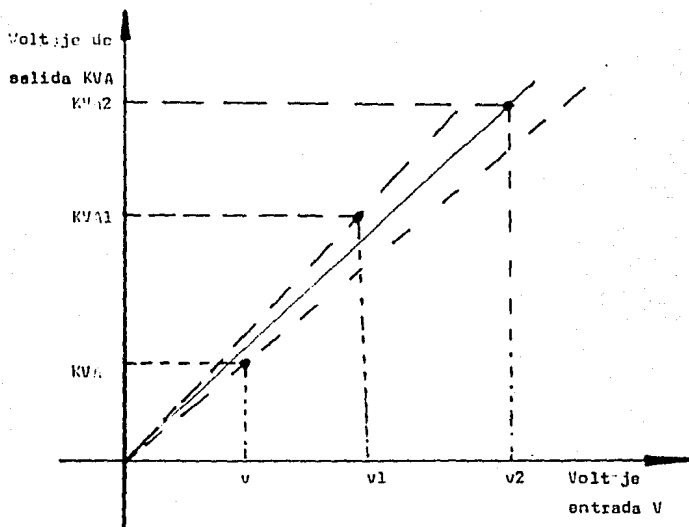
( V, KVA )

En forma analoga se determinan los otros puntos dos o tres más.

Puntos obtenidos	Abscisa	Ordenada
( V, KVA )	V	KVA <sub>1</sub>
( V <sub>1</sub> , KVA <sub>1</sub> )	V <sub>1</sub>	KVA <sub>1</sub>
( V <sub>2</sub> , KVA <sub>2</sub> )	V <sub>2</sub>	KVA <sub>2</sub>



Graficando los puntos anteriores tenemos;



La curva voltaje de entrada respecto a la tensión de salida en condiciones del laboratorio de prueba.

Notar que la curva resultante (trazo continuo) es un promedio de otras probables.

Ejemplo práctico:

Obtención de la curva de voltaje entrada - salida.

Condiciones ambientales.

PB = 650 mm de Hg

TS = 22 °C

TH = 19 °C

Factores de corrección.

K d = 0.04945

K h = 0.957

K = 0.087

Usando voltmetro de esferas de 10 cm de diametro.

De tablas con 3.5 cm → 95 KVF

En condiciones actuales: (95) (0.887) = 84.0 KVA

Se obtienen los siguientes resultados

Voltaje carga	N U M E R O D E D I S P A R O S																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
15 volts	0																
17 volts		0			0		0						0				
18 volts				x			x		0		0		x		0		x
19 volts				x							x		x				x

TABLA DE DATOS PROBABILISTICOS

VOLTAJE APLICADO KV		AISLADOR TIPO:		CLIENTE:		
		MATERIAL:		CLASE:		
POLARIDAD ( )	ENTRADA	SALIDA	FLAMEOS	NO FLAMEOS	TOTAL	PROBABILIDAD DE FLAMEO
	15		0	1	1	0 %
	17		0	4	4	0 %
	18		4	3	7	57 %
	19		4	0	4	100 %

Podemos observar que para :

18 volts existe el 50% de probabilidad  
de flameo.

Tenemos el punto ( 19 , 84 )

EN FORMA ANALOGA OBTENEMOS LOS PUNTOS :

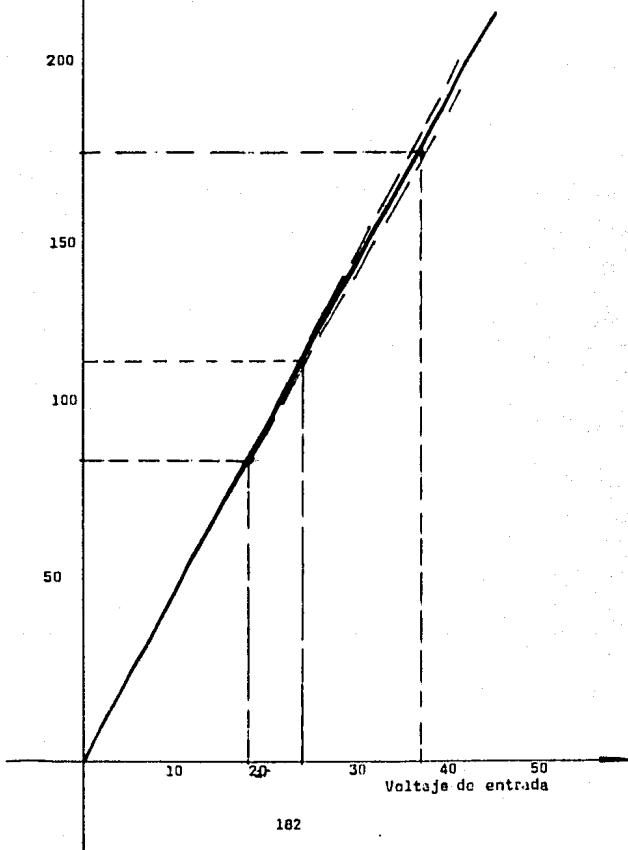
( 24 , 112 )

( 37 , 175 )

Graficando los puntos anteriormente obtenidos  
en forma experimental, podemos obtener la si-  
guiente curva de voltaje entrada - salida :

Voltaje de salida KVA.

CURVA DE VOLTAGE ENTADA → SALIDA.

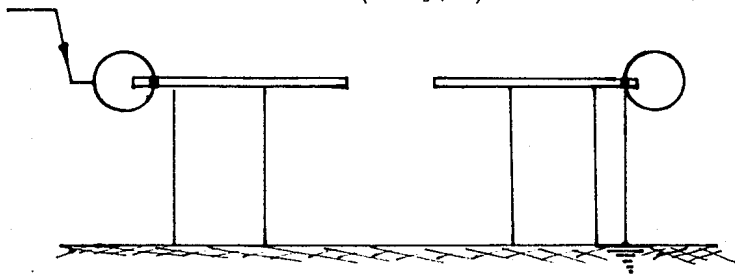


### 8.1.5.- CALIBRACION PARA OBTENER ONDAS DE IMPULSO CORTADAS:

El objetivo en este punto es poder obtener ondas de impulso cortadas.

El tiempo de corte esta especificado en normas.

El sistema utilizado para cortar ondas de impulso es con dos electrodos de barra (rod gaps)



Existen diferentes formas de montar los electrodos, horizontalmente, inclinados, verticales, etc. dependiendo del personal de prueba.

El procedimiento para obtener el tiempo de corte es el siguiente:

- a) Determinar el nivel de voltaje para la onda cortada que vaya aplicarse al transformador, este voltaje esta especificado en normas como función de nivel básico de aislamiento.

Ejemplo:

De tabla 3.1.5.1.

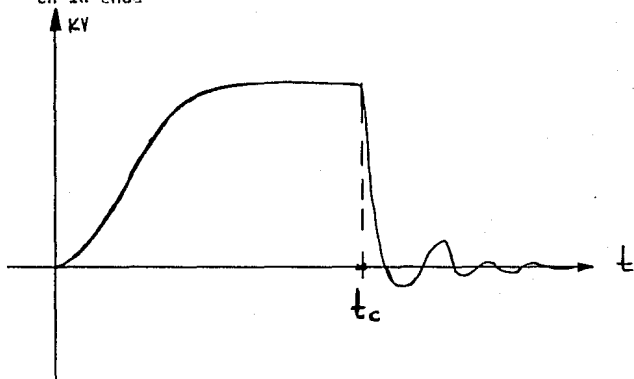
para clase 15kV existe una onda de impulso cortada de 110 KV.

TABLA 3.1..5.1.- Clases de Aislamiento y Valores para Pruebas Dieléctricas en Transformadores Sumergidos en Líquido Aislante

Clase de aislamiento	Prueba a baja frecuencia	Nivel básico de aislamiento al impulso (NBI), y onda completa	Onda Cortada	
			kV Cresta	Tiempo Mínimo de arco en micro segundos
kV	kV	kV Cresta	kV Cresta	
1.2	10	30	36	1.0
2.5	15	45	54	1.5
5.0	19	60	69	1.5
8.7	26	75	88	1.6
15.0	34	95	110	1.8
18.0	40	125	145	2.25
25.0	50	150	175	3.0
34.5	70	200	<del>220</del>	3.0
46.0	95	250	290	3.0
69.0	140	350	410	3.0



- b ) Empezamos abriendo los electrodos una cierta distancia, de tal forma que al aplicar consecutivamente el nivel de voltaje requerido para prueba, lleguen los electrodos a romper la onda de impulso
- c ) teniendo los electrodos calibrados al punto rupturase observa en el osciloscopio el tiempo del corte de en la onda



$t_c$  tiempo de corte en  $\mu$ seg.

En caso necesario debe sacarse fotografía para mayor seguridad.

- d ) ajustar la distancia de los electrodos para tener el tiempo de corte necesario.

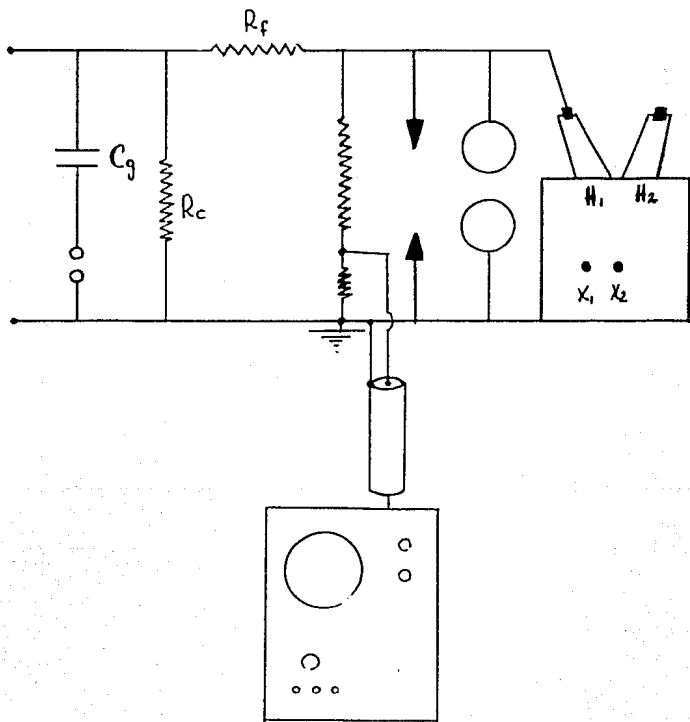
#### 8.1.6. CIRCUITO FINAL PARA PRUEBA.

El circuito final deberá tener todos los elementos usados para efectos de calibración. Estos son voltmetro de esferas, electrodos de barra y divisor de tensión

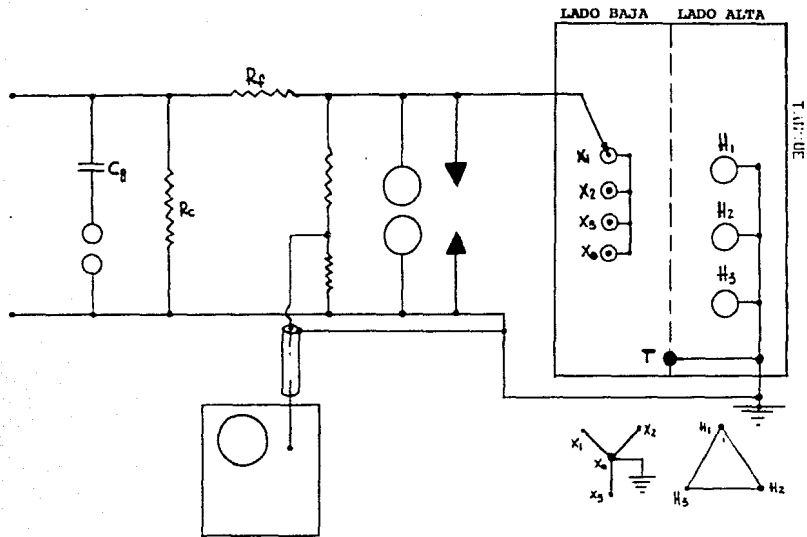
El voltmetro de esferas deberá tener una separación entre esferas mucho mayor a la usada en calibración para evitar rorpicientos de ondas de impulso.

Los electrodos de barra tambien necesitan estar separados una distancia mayor y usarlos unicamente cuando se aplique las ondas cortadas al transformador.

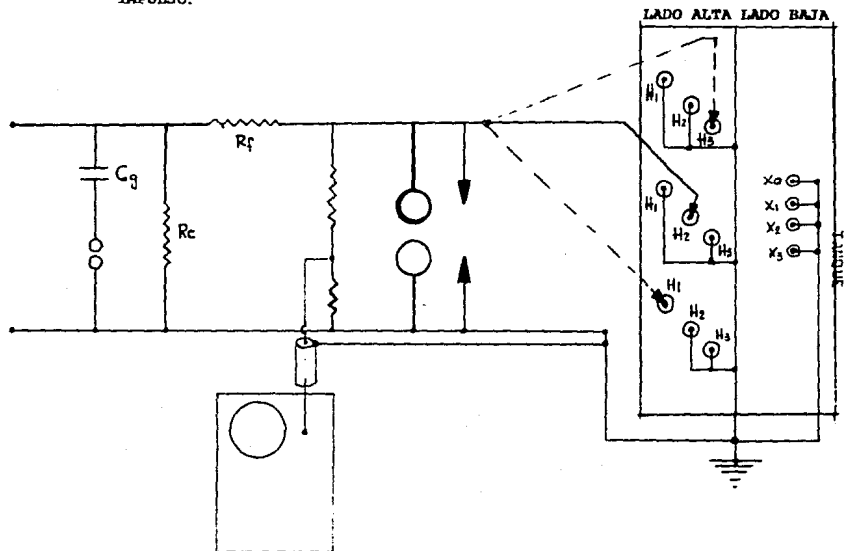
CONSIDERANDO LO ANTERIOR EL CIRCUITO FINAL SERIA



CIRCUITO DE CONEXIONES PARA PROBAR LOS DEVANADOS DE BAJA TENSION EN IMPULSO.



CIRCUITO DE CONEXIONES PARA PROBAR LOS DEVANADOS DE ALTA TENSION EN IMPULSO.



### 8.1.7.- PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Generalmente el procedimiento de la prueba esta de terminado por las normas utilizadas.

En el caso de pruebas de impulso a transformadores son útiles las siguientes observaciones;

- a ) La onda de impulso debe ser de polaridad negativa para transformadores sumergidos en aceite y positiva en tipo seco.
- b ) Debe registrarse en el osciloscopio la onda de impulso aplicada. Así tambien obtener oscilograma correspondiente especificando el tiempo de barrido.
- c ) En ondas completas se recomienda un tiempo de barrido de 5 ó 10  $\mu$ s/ división
- d ) En ondas cortadas el tiempo de barrido del osciloscopio más util es de 1 ó 2  $\mu$ s/ división.

e ) previamente a la prueba se debe obtener oscilogramas para determinar el tiempo de frente y el tiempo de cola de la onda de impulso.

f ) El cliente puede establecer las normas por utilizar durante la prueba.

g ) En caso necesario se pueden obtener mediciones de corriente durante la prueba.

Para realizar esta medición, es necesario conectar un CMMT en serie, con los otros devanados cortocircuitados, conectados a tierra.

Una secuencia usada para la prueba es la siguiente.

- 1.- Una onda de impulso completa reducida entre el 50 y 75 % del valor correspondiente a la onda de tensión plena.
- 2.- Aplicar al transformador dos ondas de impulso cortadas con el correspondiente nivel de voltaje especificado en normas.
- 3.- Aplicar una onda de impulsos completa a tensión plena.
- 4.- Repetir los pasos 1, 2 y 3 para cada una de las terminales del transformador, conectando todas las terminales restantes a tierra.

NCTA.- Existen algunas diferencias para diferentes normas referentes a esta prueba.



5.- El criterio utilizado, para determinar si el transformador ha pasado la prueba, consiste en analizar los oscilogramas obtenidos, comparando el de tensión plena con el de tensión reducida así como los correspondientes a ondas cortadas entre si.

Una vez hecha la comparación se debe observar posibles diferencias, si no existen, el transformador tiene pasada la prueba, en caso contrario no pasa.

Durante la prueba es necesario estar al pendiente para detectar humo, ruido extraño, burbujas, etc. en el transformador.

NOTA.- Para poder comparar la onda completa con la reducida, deberá tener el osciloscopio su factor de atenuación correspondiente.

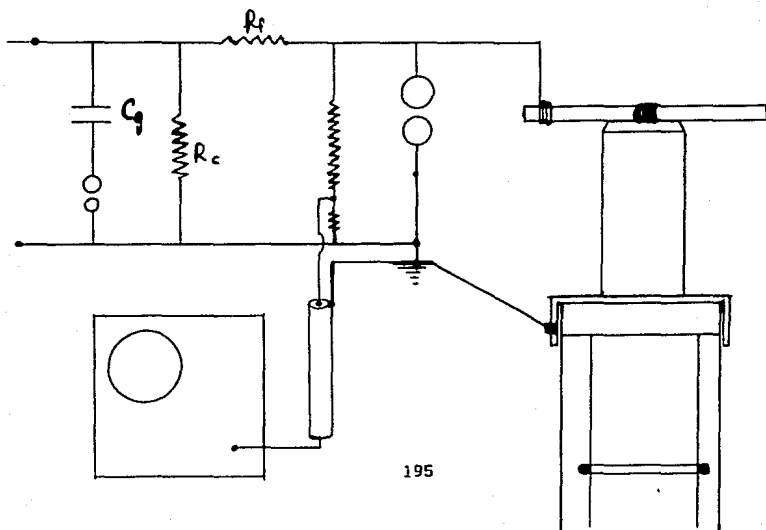
## 8.2.- PRUEBAS DE IMPULSO EN AISLADORES

### 8.2.1. Obtención del voltaje crítico de flameo

El procedimiento se mostrará con un caso práctico.

Se realizará la prueba de impulso en aisladores tipo columna clase 69 KV, para determinar el voltaje crítico de flameo.

1.- Realizar conexiones al circuito utilizado.



2.- obtención de la curva de voltaje entrada, voltaje salida.

a ) medir condiciones ambientales.

$$P b = 6475 \text{ mm de Hg}$$

$$T s = 25^{\circ} \text{C}$$

$$T h = 19.5^{\circ} \text{C}$$

b ) Calcular factores de corrección por densidad -  
relativa del aire.

$$K d = \frac{647.5}{760} \frac{273 + 20^{\circ} \text{C}}{273 + 25^{\circ} \text{C}}$$

$$K d = 0.837$$

por humedad

$$K h = 0.975$$

factor de corrección

$$K = K d / K h$$

$$K = 0.858$$

c ) CALIBRACION Y VERIFICACION EXPERIMENTAL.

Usando un voltmetro de esferas de 25 cm. de diametro calibrados para

6.0 cm → 161 KVE

∴ KVA = (161) (0.858)

KVA = 138

VERIFICACION EXPERIMENTAL

VOLTAJE DE CARGA KV	NUMERO DE APLICACIONES													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	*													
13	*			*		*		*		*				
11				0		0		0		0				
10			0											

Notación : 0 indica no flameo

\* indica si flameo

Conclusión : para 12 KV de carga existen 138 KV de salida

Tenemos el punto de la curva

( 12, 138 )

para obtener otros puntos de la curva se repite

el procedimiento

para 12 cm → 275 KVE

$$\therefore KVA = ( 275 ) ( 0.858 )$$

$$KVA = 236$$

VERIFICACION EXPERIMENTAL

VOLTAJE DE CARGA KV	NUMERO DE APLICACIONES													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
22.5	*										*			
21.0		*		*		*		*		0		*		
19.5			0		0		0		0		0			

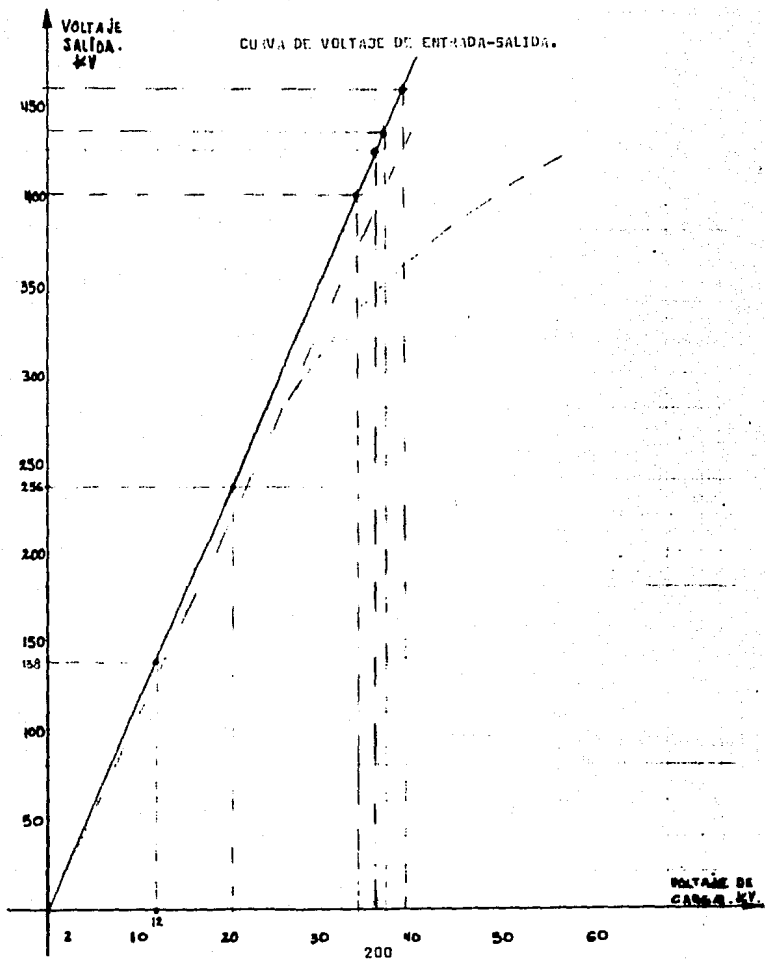
conclusión: para 20.25 KV de carga existen  
236 KV de salida

Ahora tenemos los puntos

( 12,138 )

(20.25,236)

Grificando los puntos anteriores tenemos la curva  
de voltaje de entrada-salida en condiciones del -  
laboratorio de prueba.

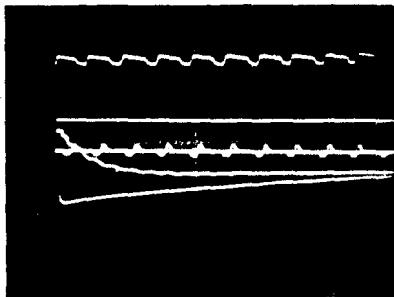


3.- determinación del tiempo de cola y frente.

Lo anterior se logra obteniendo los oscilogramas correspondientes para dos tiempos de barrido diferentes del osciloscopio.

a ) para el tiempo de frente.

Escala; 0.5 microsegundos/división

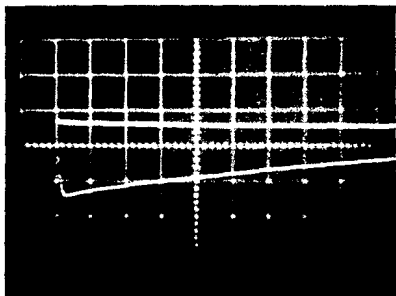


tiempo de frente; 1.33 microsegundos



b ) para el tiempo de cola

Escala; 5 microsegundos/división



tiempo de cola: 55 microsegundos

- 4.- OBTENCION DEL VOLTAGE CRITICO DE FIAREO  
 procedemos aplicando el método de subir voltaje cuando  
 no exista flareo y en caso contrario reducirlo.  
 obtenemos los siguientes datos

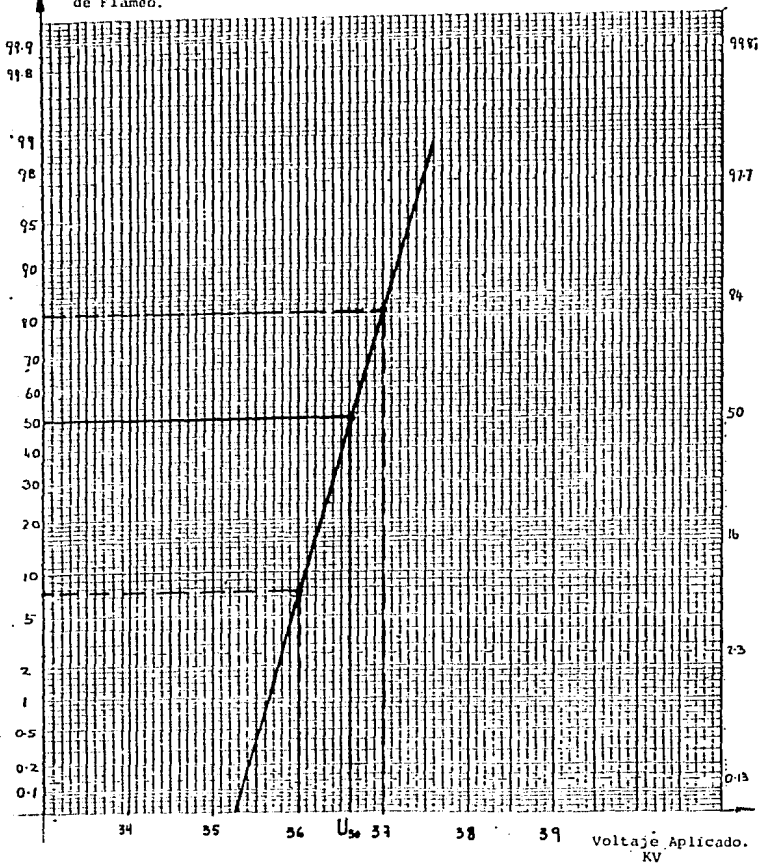
VOLTAJE APLICADO KV		NUMERO DE APLICACIONES																				
POLARIDAD ( - )		ENTRADA	SALIDA																			
	34	400																				
	36	425																				
	37	436	*																			
	39	460																				

Teniendo lo anterior podemos calcular las probabilidades de flanco como se muestra a continuación

TABLA DE DATOS PROBABILÍSTICOS						
VOLTAJE APLICADO KV			AISLADOR TIPO: <u>COLUMNA</u>		CLIENTE:	
			MATERIAL:		CLASE: <u>69 KV</u>	
POLARIDAD ( - )	ENTRADA	SALIDA	FLAMEOS	NO FLAMEOS	TOTAL	PROBABILIDAD DE FLANCO
	34	400	0	1	1	0 %
	36	425	1	12	13	7.7 %
	37	436	13	3	16	81.2 %
	39	460	2	0	2	100.0 %

Gracias por su atención.

Probabilidad  
de Flameo.



Conclusión;

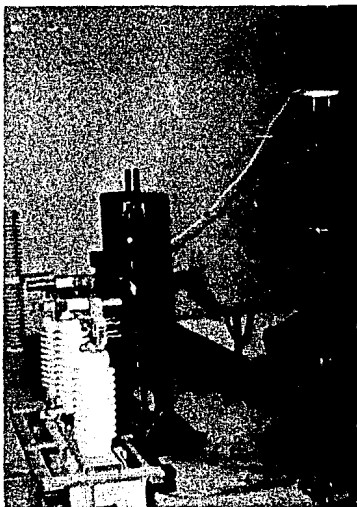
el 50 % de flameos existe para

36.6 KV de carga significa 433

KV actuales

$$\therefore U_{50} = 433 \text{ KV}$$

$U_{50}$   $\hat{=}$  voltaje crítico de flameo



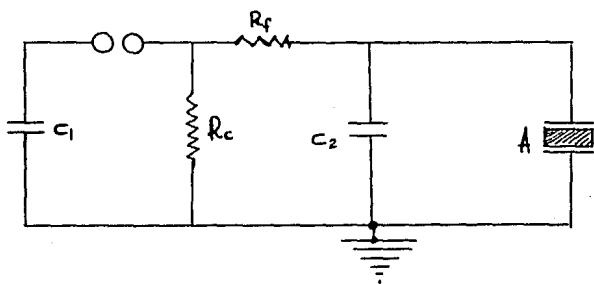
La figura muestra una parte del circuito utilizado al probar en impulso una cuchilla, clase 69Kv. , monofasica. Se observa el voltmetro de esferas, divisor de tension y conexiones.

### 8.2.2.- DETERMINACION DEL VOLTAJE SOPORTADO AL IMPULSO ( $U_{10}$ ).

El procedimiento se mostrará con un caso práctico.

Se desea conocer el voltaje soportado al impulso - de un aislador soporte, tipo interior, clase 69 KV se usa un generador de impulsos de 400 KV 6.6 KJ.

El circuito y parámetros usados son.



- $C = 82 \text{ nf}$
- $R = 140 \text{ ohms}$
- $R_2 = 800 \text{ ohms}$
- $C_2 = 2 \text{ nf}$
- $A \hat{=} \text{ Aislador en prueba}$

Después de obtener los oscilogramas para tiempo de frente y cola se obtuvo.

$$t_f = 1.02 \text{ microsegundos}$$

$$t_c = 43.5 \text{ mic osegundos}$$

Asi tambien se miden condiciones ambientales y se obtiene la curva de calibración.

condiciones ambientales.

$$P_b = 647.5 \text{ m m de Hg.}$$

$$T_S = 24 \text{ C}$$

$$T_h = 19 \text{ C}$$

Factor de corrección.

$$K = 0.864$$

NOTA.- El procedimiento detallado es similar al realizado para determinar voltaje crítico de flameo del inciso 3.2.1.



Para determinar el  $U_{10}$  es necesario primero obtener el voltaje crítica de flanco  $U_{50}$ , este es:

VOLTAJE APLICADO KV			POLARIDAD ( + )	NUMERO DE APLICACIONES																															
ENTRADA	SALIDA			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
	178		1																																
	185		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	192		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	200																																		

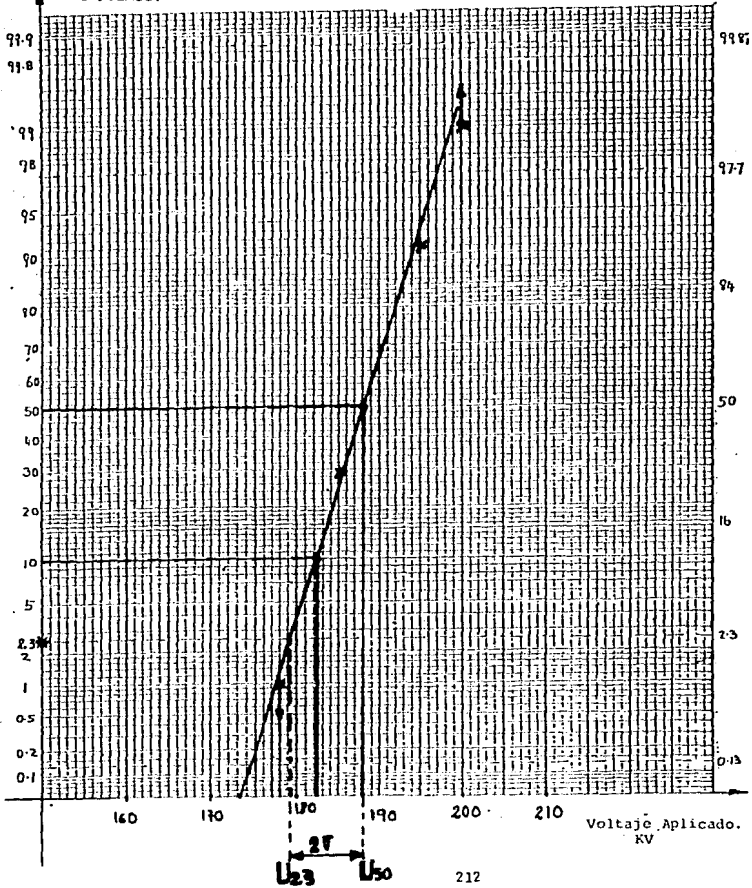
Los datos anteriores determinan los siguientes  
datos probabilísticos :

TABLA DE DATOS PROBABILISTICOS						
VOLTAJE APLICADO KV			MATERIAL:		CLASE:	
			AISLADOR TIPO:		CLIENTE:	
POLARIDAD ( + )						
ENTRADA	SALIDA	FLAMEOS	NO FLAMEOS	TOTAL	PROBABILIDAD DE FLAMEO	
	178	0	4	4	0 %	
	185	4	10	14	28.5 %	
	192	10	1	11	91.0 %	
	200	1	0	1	100.0 %	

Graficando los datos en papel probabilístico

(con base a una distribución gaussiana) , tenemos

Probabilidad de Flameo.



Analizando la grafica se observa:

- 1) El voltaje crítico de flanco corresponde el valor.

$$U_{50} = 188 \text{ KV}$$

- 2) El voltaje soportado al impulso de la grafica sera

$$U_{10} = 182.2 \text{ KV}$$

- 3) La desviación estandar, para efectos estimativos es

$$U_{50} - U_{2.3} = 2 \sigma$$

$$U_{50} - U_{2.3} = 188 \text{KV} - 179.2 \text{KV}$$

$$\therefore 2 \sigma = 8.8 \text{ KV}$$

$$\sigma = 4.4 \text{ KV}$$

$$\sigma = 2.3 \% \text{ del } U_{50}$$

De acuerdo a normas IEC, la desviación estandar para ondas de impulso por rayo es del 3 %.

- 4) Otra forma estimativa del voltaje soportado al impulso es utilizando la siguiente formula.

$$U_{10} = (1.0 - 1.36 \sigma) U_{50}$$

sustituyendo los datos

$$\sigma = 2.3 \mu = 0.023$$

$$U_{50} = 188 \text{ Kv.}$$

$$U_{10} = (1.0 - (1.36)(0.023))188$$

$$U_{10} = 182.12 \text{ Kv.}$$

$$\therefore Bil = U_{10}$$

$$Bil = 182.12$$

## VERIFICACION EXPERIMENTAL DEL VOLTAJE

### SOBRESADO AL IMPULSO $U_{10}$ .

El valor sobret de el impulso obtenido de la grafica , en forma estimativa se debe verificar aplicando 100 ondas de impulso normalizadas al aislamiento bajo prueba.

Los resultados del experimento anterior mostraran que existen pequeñas variaciones las cuales pueden considerarse implícitas del método aleatorio. Existiran aproximadamente 10 flaneos de los 100 aplicados.

NOTA.-Es importante tener en cuenta que las condiciones ambientales sean las mismas, en caso contrario obtener nuevamente el factor de corrección.

Los resultados de la prueba se muestran a continuación.

Voltaje Aplicado KV	NUMERO DE APLICACIONES																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
178																																								
180																																								
182																																								
184																																								

Voltaje Aplicado KV	NUMERO DE APLICACIONES																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0										
178																																								
180																																								
182																																								
184																																								

Los resultados contenidos en la tabla anterior muestran claramente que hasta el nivel de voltaje 102 existen 11 flancos lo cual significa aproximadamente el 10 % del total de las aplicaciones.

La tabulación anterior se basó en el método modificado de subir y bajar voltaje.



## 9.- CONCLUSIONES

Actualmente México tiene una fuerte dependencia tecnológica hacia los países desarrollados, lo anterior se refleja en la fabricación de equipo eléctrico, así como en los medios necesarios para realizar las pruebas correspondientes a éstos.

En la actualidad la gran mayoría de las empresas en el país, ante la exigencia de los compradores, comienzan a implementar en sus laboratorios el equipo necesario para realizar pruebas que tienen cierto rango de complejidad, tal es el caso del equipo y pruebas de impulso.

Este trabajo de tesis tiene como objetivo principal desarrollar en forma explícita el diseño y fabricación de los generadores de impulso utilizando medios tecnológicos propios.

Los costos económicos originados por la falla de equipo eléctrico - transformadores, generadores, aisladores, terminales de cables, etc.-conectado a las líneas de transmisión

y distribución presenta la necesidad de investigar las causas, una de éstas son las sobretensiones creadas en las líneas por descarga atmosférica (rayo) de origen externo o por maniobra de origen interno.

Así, pues, debemos construir un equipo capaz de proporcionar ondas de impulso, similares a las sobretensiones, para poder probar los aislamientos internos y externos, de los diferentes equipos eléctricos.

Con base en lo anterior el diseño y construcción del generador de impulsos es necesario.

Podemos decir entonces que ante la variedad de equipo eléctrico fabricado, se presentan diferencias importantes entre un diseño y otro a los generadores de impulso.

Se puede diseñar y fabricar un generador de impulsos para probar aisladores y cables o transformadores etc, lo cual significa tomar en cuenta los siguientes parámetros del generador: Tensión nominal, Capacitancia, Energía, Resistencias de frente, cola, carga y protección, eficiente y energía disipada en resistencias de frente y cola.

Asimismo el diseño, del generador, puede ser para probar transformadores lo cual implica variar los parámetros del generador, esto es, el efecto capacitivo del objeto bajo prueba.

El método, en cuanto al diseño del generador y su construcción, esta sujeto a la experiencia acumulada a través del I.I.E. en forma experimental y práctica. Los generadores fabricados son a nivel de prototipo y para pruebas de aisladores y transformadores.

El procedimiento para el diseño del generador parte de considerar el valor capacitivo de los objetos que se vayan a probar, sea éste valor  $C_2$ , y así el valor de la capacitancia del generador queda determinado puesto que  $C_g \geq 5C_2$  debe cumplirse.

El voltaje nominal del generador queda determinado al considerar la tensión correspondiente a la clase de aislamiento, más alta, de los objetos por probarse, esto es, para transformadores clase 69 Kv la tensión de prueba - nivel básico al impulso (BIL) - es de 350 Kv, más un factor por la eficiencia y sobrecarga de alrededor del 150% del BIL.

El número de pasos proporciona versatilidad en cuanto a posibles variaciones en la capacitancia, resistencia de frente y cola, tensión, energía, etc., siendo importante una adecuada selección.

Otros parámetros como la energía del generador se calcula al conocer la capacitancia y tensión nominal de éste, la expresión  $\frac{1}{2} C_g V$  significa energía.

La eficiencia de los valores capacitivos del generador  $C_g$  y objeto bajo prueba  $C_2$ , si  $C_g \geq 5C_2$  la eficiencia sera mayor del 80%, también influye la posición de la resistencia de frente respecto de la de cola.

Los resultados han sido satisfactorios en cuanto al sistema de generación (generador de ondas de impulso) presentando problemas todavia el sistema de medición (divisores de tensión).

Se tiene en el I.I.E. dos generadores, fabricados con tecnología propia, uno de 400 Kv, 6.6 Kj y el otro de 720 Kv, 866 Jouls, para probar transformadores y aisladores respectivamente.

En componentes del generador de tipo resistivo, los mejores resultados se tienen usando material como la micarta, alambre nicromel, carbón y agua.

En soportes dieléctricos se tiene a la micarta fundamentalmente.

En cuanto a conectores el aluminio y la malla flexible de cobre son los más indicados.

Otro aspecto contenido en el trabajo es lo relacionado con el sistema de medición (divisores de tensión) planteándose las relaciones básicas de éste con el sistema de generación. La última parte incluye los aspectos generales para la realización de pruebas de impulso a cualquier tipo de equipo eléctrico. En particular se expone las pruebas a transformadores y la obtención del voltaje crítico de flameo ( $U_{50}$ ) y tensión soportado al impulso (BIL) en aisladores.

Un buen diseño del equipo eléctrico implica que éste pase las pruebas a las cuales sea sometido, con fines experimentales o de uso normalizado.

Así, pues, el diseño y fabricación de los generadores de ondas de impulso son un paso inicial para poder mejorar la calidad de los equipos eléctricos, transformadores, aisladores terminales, etc, fabricados en nuestro país.

El nivel de avance esta en función del país al cual nos comparamos, sin embargo, el inicio, en cuanto al diseño y fabricación de los generadores de impulso esta dandose con sus respectivas limitaciones.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- A.S. Husbands, April 1974, "General characteristics and - - Dispersions of the Breakdown Voltages of Power System Insulation". Switchagar Testing company LTD.
- 2.- Dieter kind, 1978, "High - Voltage Experimental Technique". Friedr. Vieweg and Sohn.
- 3.- E. Kuffel, M. Abdullah, 1970, "High - Voltage Engineering". Pergamon Press.
- 4.- E. Brasca, L. Dellera, S. Rovelli, "Statistical Approach to the Power testing of high Voltages circuit Breakers". CESI.
- 5.- Frank C. creed, Tatsuo Kawamura, Geral Newi, 1976, "Step - Response of measuring Systems for high Impulse Voltages". - IEEE Trans. Power, App. and Syst., Vol. Pas 86.
- 6.- F.C. Creed, M.M.C. Conins, 1963, "the measurement of short - Duration Impulse Voltages". IEEE Trans. on Communications - and Electronics, Vol. 82, pp. 621 - 629.
- 7.- G. Camara, January 1968, "Switching surge Insulation - - - Coordination: Lightning Arresters". IEEE transactions on - Power apparatus and systems.
- 8.- G. Camara - CESI (Italy), M. Ouyang - era (UK), 1970, - - - "Evaluation and Application of impulse test results". ELECTRA.
- 9.- G. Camara, L. Dellera, "Accuracy of an extended up - and - Down Method in statistical testing of insulation".

- 10.- Hwri P. Hsu, Ph. D., 1970, "Fourier analysis". Simon and - - Schuster, inc.
- 11.- I.A. Couper, "Transformers". U.M.I.S.T. S.T., P.O. Box 88.
- 12.- IRR - IMS Group, "Facing UHV Measuring Problems". ELECTRA.
- 13.- M. Ouyang, B. Eng., ph D.C. Eng, A.M.I.E.E, "New Method for the Assessment of Switching - Impulse Insulation Strenght".
- 14.- T. Horada, T. Kawamura, Y. Akatsu, K. Kimura, T. Aizawa, - 1971, "Developmet of a nigh quality resistance divider for impulse voltage Measurements". Transactions paper IEEE 71 - tp - 123 - Pwr.
- 15.- Thomas J. Blalock, Donald F. Bullock, walfer S. Zaengl, - - Tseng - wu. Liao, 1970, "A capacitire voltage divider for - UHV outdoor testing". IEEE Transactions on Power apparatus and systems, vol. pas - 89, no. 7
- 16.- W.S. Zaeng, "Impulse voltage dividing systems for negavolts". Swis Federal Institute of Tchnology, Zurich.
- 17.- "Protection of transmission lines", 1971, surge protection of Power systems. Westinghouse Electric corporation Power - systems.
- 18.- R.G.E. 1978 "Hig voltage measurements present state and - - future deveopment" G. Leroy, J. Jovaire et A. Sabot, W. - Zaengl, Aa. Pedersen, L. Thione.
- 19.- Manual HAEFELY. "Impulse voltage generators 900 KV, 45 KJ,"- Seric E 1978.



## N O R M A S

- 1.- "Guide for transformer impulse tests", 1968. IEEE.
- 2.- "General Requirements for distribution Power and regulating transformers", ANSI.
- 3.- "High voltage test techniques", publicaciones 60-1, 60-2, - 60-3, 60-4. IEC.
- 4.- "Method for the measurement of voltage with Sphere - Gaps - (one = sphere Earthed)".  
B.S. 358 1960.
- 5.- "Power transformers", 76.1, 1976. IEC.