

2 201

# ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON



U. N. A. M.  
INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE EQUIPOS DE MEDICION ESPECIALES PARA UN LABORATORIO CON PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICO  
P R E S E N T A :  
RAFAEL ALVAREZ TORRES

**FALLA DE ORIGEN**



SAN JUAN DE ARAGON, EDO. MEX. 1990



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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

## I.- INTRODUCCION

## II.- REQUERIMIENTOS ESPECIALES DE MEDICION EN LAS PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO

2.1	DESCRIPCION Y OBJETIVOS DEL LABORATORIO . . . . .	6
2.1.1	Objetivos del laboratorio . . . . .	6
2.1.2	Descripción del laboratorio . . . . .	6
2.1.2.1	Método de prueba directo . . . . .	7
2.1.2.2	Método de prueba sintético . . . . .	8
2.1.3	Capacidades de prueba del laboratorio . . . . .	11
2.2	CONSIDERACIONES TEORICAS Y DESCRIPCION DEL SISTEMA DE MEDICION . . . . .	15
2.2.1	Consideraciones teóricas del sistema de medición . . . . .	15
2.2.2	Elementos transductores de tensión . . . . .	22
2.2.2.1	Divisores de tensión . . . . .	22
2.2.3	Elementos de transmisión de señales . . . . .	31
2.2.4	Elementos de registro de señales . . . . .	34
2.2.4.1	Oscilógrafo galvanométrico . . . . .	34
2.2.4.2	Osciloscopio digital . . . . .	36
2.3	REQUERIMIENTOS ESPECIALES DE MEDICION . . . . .	37
2.3.1	Corriente de prueba . . . . .	37
2.3.2	Tensión de prueba . . . . .	37
2.3.3	Corriente de inyección . . . . .	38
2.3.4	TIR . . . . .	38
2.3.5	Tensión de arco . . . . .	38

### III.- DISEÑO DE TRANSDUCTORES ESPECIALES

3.1	DIVISOR DE TENSION MIXTO (DTCR) . . . . .	40
3.1.1	Características actuales del DTC . . . . .	40
3.1.2	Requerimientos y limitaciones del DTC . . . . .	44
3.1.3	Modificación del DTC (DTCR) . . . . .	47
3.2	ATENUADOR DE TENSION (A.T.) . . . . .	49
3.2.1	Requerimientos y limitaciones del A.T. . . . .	50
3.2.2	Diseño del A.T. . . . .	56
3.3	ATENUADOR DE CORRIENTE (A.C.) . . . . .	58
3.3.1	Requerimientos y limitaciones de A.C. . . . .	58
3.3.2	Diseño del A.C. . . . .	60

### IV.- CONSTRUCCION DE LOS TRANSDUCTORES ESPECIALES

4.1	CONSTRUCCION DEL DTCR (MODIFICACION AL DTC) . . . . .	62
4.1.1	Características físicas de la resistencia en el primario . . . . .	64
4.1.2	Características del material para la resistencia . . . . .	65
4.1.3	Especificación técnica de la fabricación . . . . .	69
4.1.4	Resultados de la construcción . . . . .	69
4.1.5	Implementación de la resistencia en el secundario del DTCR . . . . .	76
4.2	CONSTRUCCION DEL ATENUADOR DE TENSION . . . . .	77
4.2.1	Representación física del A.T. . . . .	77
4.2.2	Construcción del A.T. . . . .	80

4.3	CONSTRUCCION DEL ATENUADOR DE CORRIENTE . . . . .	83
4.3.1	Representación física del A.C. . . . .	83
4.3.2	Características del material de construcción . . .	85
4.3.3	Especificación del material de construcción . . .	85
4.3.4	Resultado en la construcción del A.C. . . . .	88

**V.- PRUEBAS A LOS TRANSDUCTORES ESPECIALES**

5.1	PRUEBAS AL DTCR . . . . .	89
5.1.1	Prueba de impulso por rayo . . . . .	89
5.1.2	Respuesta a la frecuencia . . . . .	92
5.1.3	Respuesta al escalón . . . . .	94
5.1.4	Mediciones complementarias . . . . .	95
5.2	PRUEBAS AL ATENUADOR DE TENSION . . . . .	96
5.2.1	Respuesta a la frecuencia . . . . .	96
5.3	PRUEBAS AL ATENUADOR DE CORRIENTE . . . . .	98
5.3.1	Respuesta a la frecuencia . . . . .	98
5.3.2	Determinación de la constante del A.C. . . . .	100

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . . . . .	103
--	-----

REFERENCIAS

APENDICE

# C A P I T U L O 1

## INTRODUCCION

Debido al crecimiento en la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, el avance tecnológico ha aumentado, y por tanto ha surgido la necesidad de crear sistemas eléctricos de potencia, con una mayor calidad y eficiencia.

En México no se tiene un desarrollo tecnológico suficiente por el momento, para crear la independencia tecnológica mundial. Por tal motivo es necesario la importación de tecnología, lo cual resulta muy costoso para el país.

Esto ha originado una presión hacia la investigación y desarrollo de la tecnología en México, para así lograr el camino hacia dicha independencia, y para facilitar la adaptación de tecnologías adecuadas a nuestras necesidades.

Los laboratorios de pruebas constituyen un componente fundamental, en el diseño y la construcción de los materiales y equipos eléctricos. En ellos se comprueba el correcto funcionamiento de los equipos, así como la hipótesis de los procesos innovadores que responden a la mayor calidad y economía que exigen los cada vez más complejos sistemas de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Se han realizado considerables esfuerzos, en los últimos años para ampliar la infraestructura de los laboratorios de pruebas de equipos eléctricos. Tal es el caso de los laboratorios de la Comisión Federal de Electricidad ( CFE ) en Irapuato y Guanajuato. Como parte de esos esfuerzos el Instituto de Investigaciones Eléctricas ( IIE ) diseñó y construyó, con el apoyo de diversas instituciones, un laboratorio de pruebas de corto circuito sintético, en Salazar estado de México, que es donde se realizó este trabajo.

El laboratorio de Salazar persigue dos objetivos principales :

- Ofrecer a los fabricantes de equipos, investigación y desarrollo para el diseño y la construcción de nuevos prototipos de equipos de interrupción.
- Servir de punto de partida, para adquirir los conocimientos en torno a la prueba sintética, que permitan apoyar a la CFE en la construcción del laboratorio de corto circuito sintético de gran capacidad, que se construirá en Irapuato.

Una parte importante en el laboratorio de pruebas de corto circuito, lo constituye el equipo de medición, dado que permite observar y controlar el estado de los fenómenos, que ahí se llevan a cabo.

Este trabajo de tesis trata principalmente, el sistema y equipo de medición, así como las variables principales en el sistema de prueba, y su objetivo principal es la orientación hacia la construcción de equipo de medición especial, en el laboratorio de pruebas de cortocircuito sintéticas.

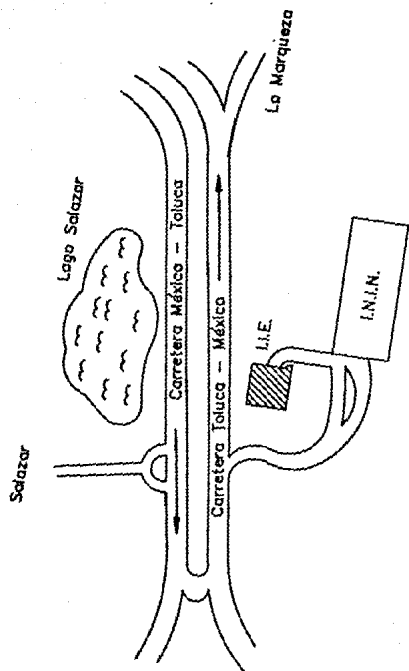
Actualmente el laboratorio Salazar cuenta con un equipo de medición suficiente, para registrar las pruebas hechas a los equipos. Sin embargo se tienen ciertas deficiencias, las cuales serán disminuidas con la implementación de equipos especiales y rediseño de los transductores, desarrollados en esta tesis.

Es importante el desarrollo de estos equipos de medición, dado que resultaría imposible determinar si los equipos probados, cumplen con las normas establecidas, y si estos es posible utilizarlos en las líneas eléctricas sin riesgos de operación.

#### **UBICACION DEL LABORATORIO SALAZAR.**

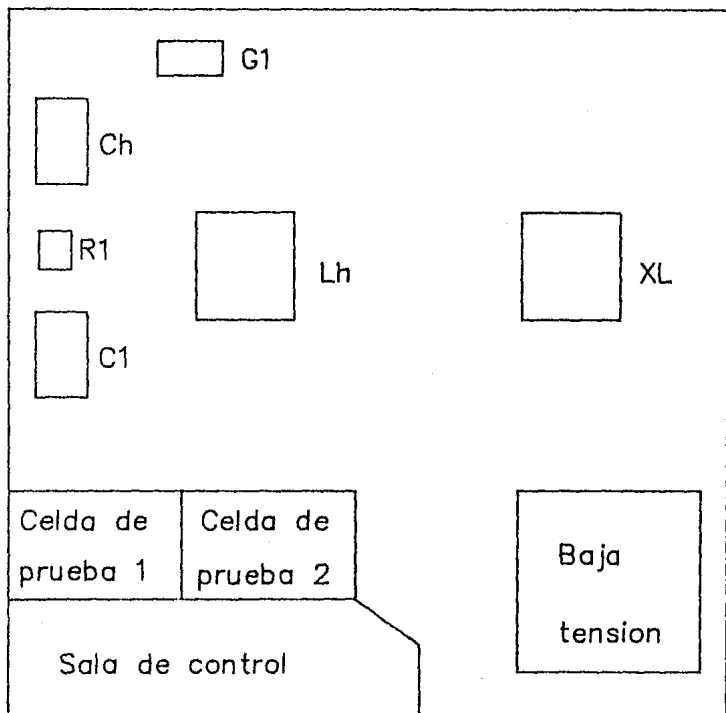
El laboratorio Salazar se ubica en Salazar Estado de México a 3000 msnm, al final de la línea de 115 KV a 50 Km abajo de la subestación de San Mateo.

A continuación se presenta, el croquis correspondiente.



Croquis correspondiente a la ubicación del laboratorio Salazar.





Distribución física y eléctrica del laboratorio Salazar.

El contenido de este trabajo comprende lo siguiente :

En el capítulo 2 se hace una descripción, de los componentes y capacidades del laboratorio Salazar, con el objeto de dar a conocer y definir las pruebas que se realizan, además de establecer los parámetros importantes de la medición así como las ventajas y desventajas del mismo.

En el capítulo 3 se determinan los parámetros correspondientes para el diseño y rediseño del sistema de medición, a partir de la necesidades mencionadas en el capítulo 2.

en el capítulo 4 se presentan las bases necesarias y la construcción de los equipos diseñados en el capítulo 3, describiendose los equipos construidos.

Por último en el capítulo 5 se presentan las pruebas realizadas a los equipos diseñados y algunos comentarios sobre los resultados correspondientes.

La presente tesis resulta de gran importancia para el desarrollo tecnológico del país en el ramo de la interrupción; ya que con el mejor equipamiento de los laboratorios de prueba, principalmente en el área de medición, los equipos utilizados industrialmente por el sector eléctrico podrán ser evaluados de acuerdo a las normas de calidad más exigentes. Por tal motivo es necesario proporcionar impulso a este tipo de especialización.

## C A P I T U L O 2

### REQUERIMIENTOS ESPECIALES DE MEDICION EN LAS PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO

#### 2.1 DESCRIPCION Y OBJETIVOS DEL LABORATORIO.

##### 2.1.1 OBJETIVOS DEL LABORATORIO.

El laboratorio de pruebas de corto-circuito, tiene como objetivos los siguientes puntos [1]:

- Apoyar la investigación y desarrollo de equipos eléctricos.
- Determinar si los equipos a probar, cumplen con las normas establecidas.
- Realizar estudios de arco eléctrico, esenciales para el diseño de interruptores y fusibles.
- Desarrollar equipo que ayude a mejorar el desarrollo de las pruebas de alta potencia.

##### 2.1.2 DESCRIPCION DEL LABORATORIO.

El laboratorio de corto-circuito, está destinado a realizar pruebas sobre todos los equipos que constituyen las redes eléctricas, es decir :

- Interruptores.
- Restauradores.
- Transformadores.
- Fusibles.

-Cortacircuitos.

-Apartarrayos.

-Etc.

dado que estos equipos es necesario probarlos, para garantizar su correcto funcionamiento.

Un laboratorio de corto-circuito, puede operar de dos formas ó mediante dos métodos de prueba :

-Método directo.

-Método sintético.

#### 2.1.2.1 METODO DIRECTO.

Este método consiste en aplicar la potencia eléctrica, a la que se verán sujetos los equipos en su operación normal en las redes eléctricas, directamente al objeto bajo prueba. Si las necesidades del equipo de prueba, sobrepasan la capacidad del laboratorio, no es posible realizar la prueba en óptimas condiciones, y por tanto, es necesario recurrir a otro método de prueba llamado METODO SINTETICO.

El circuito eléctrico que hace posible la prueba directa, es el siguiente :

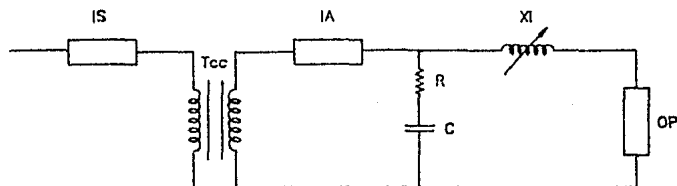


Fig. 2.1 Circuito eléctrico correspondiente al método de prueba directa.

Donde:

Tcc = Transformador de corto-circuito.  
IS = Interruptor de seguridad.  
IA = Interruptor auxiliar.  
XL = Reactores limitadores.  
R,C = Rama controladora de la TTR.  
O.P. = Objeto bajo prueba.

El funcionamiento del circuito es el siguiente :

Se ajustan las reactancias limitadoras de corriente (XL), se cierra el interruptor IA, aplicando la corriente de prueba, a tensión nominal, hacia el objeto bajo prueba, durante un tiempo prestablecido, y se determina el comportamiento del mismo durante la prueba.

#### 2.1.2.2 METODO SINTETICO.

El método sintético [2] consiste en la simulación de la falla real ó de la operación real, de los equipos de interrupción.

Por prueba sintética se entiende, aquella que se realiza por un método, que permite aplicar la corriente y la tensión de prueba, con dos diferentes circuitos adecuadamente sincronizados. Uno de ellos, proporciona la corriente de prueba y el otro proporciona la tensión de prueba a el O.P. ; lo cual permite la reducción bastante considerable de la potencia, con respecto a la que se requeriría, en la prueba por el método directo.

En cualquier equipo de interrupción, en el momento de la interrupción de la corriente, se presenta en sus terminales, una tensión transitoria de restablecimiento ( TTR ), provocada por fenómenos en la carga. Esta TTR puede provocar que el interruptor vuelva a conducir corriente, a través de un arco eléctrico y falle. El circuito de tensión aplica esta TTR a el O.P. en el instante de la interrupción.

El principio del método sintético, para la prueba de apertura de interruptores, se deriva de el hecho, de que la corriente de cortocircuito que el interruptor debe interrumpir, y la TTR, que se genera como producto de la interrupción, se suceden en tiempos diferentes, y uno a continuación de otro.

El circuito utilizado que hace posible la prueba sintética es el siguiente :

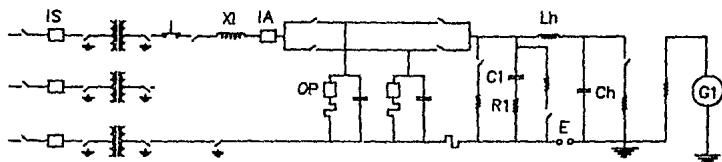


Fig. 2.2 Circuito eléctrico correspondiente al método de prueba sintético.

el cual es posible reducirlo para una mejor comprensión, de la siguiente forma:

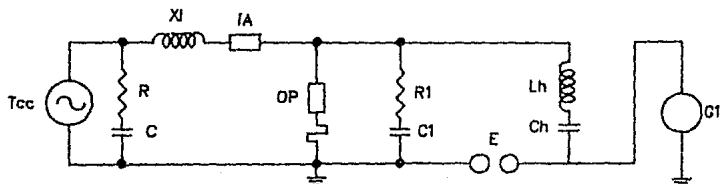


Fig. 2.3 Circuito eléctrico simplificado, correspondiente al método de prueba sintético.

Donde :

Tcc = Transformador de corto-circuito.  
IS = Interruptor de seguridad.  
IA = Interruptor auxiliar.  
XL = Reactores limitadores.  
O.P. = Objeto bajo prueba.  
Lh = Reactores controladores de frecuencia de la TTR.  
Ch = Banco principal de capacitores.  
Cl, R1 = Control de la TTR.  
E = Explosor.  
G1 = Fuente de C.D.

El circuito sintético, llamado circuito Weill [2] ó de inyección de corriente, opera de la siguiente manera [1]:

Se ajustan los parámetros XL, Ch, Lh, R1, Cl, de acuerdo a los valores de la prueba previamente seleccionados; se ajusta el explosor; se carga el banco de capacitores Ch, a un valor Vh, y de esa manera el circuito está listo.

De acuerdo con el programa de secuencias previamente programado, se inicia la prueba al cerrar el interruptor IS, haciendo circular la corriente Ig (vease en la figura 2.4); se ordena abrir al interruptor IA, y al objeto bajo prueba O.P., después de 2 ó 3 ciclos, en los que fluye la corriente de corto-circuito. Se calcula el semiciclo donde se espera que el O.P. interrumpa la corriente de falla; en este último semiciclo se dispara el explosor (E) [3], en el tiempo "a" ( vease fig. 2.4 ), inyectando la corriente de inyección, y originando que la corriente de 60 Hz (Ig), se interrumpa en un tiempo "b". De este modo se separa el circuito de corriente, dejando el O.P. solamente conectado al circuito de tensión. En el tiempo "c", se interrumpe la corriente de inyección (ih), la cual debe tener la misma pendiente que la corriente de 60 Hz al cruzar por cero, y se presenta sin demora la tensión transitoria de restablecimiento ( TTR ), controlada por Cl y R1.

De este método se obtiene la siguiente ventaja :

En caso que el objeto bajo prueba falle, no será destruido, porque solo está conectado a la fuente de tensión, y la energía que se consumirá en la falla, es relativamente baja.

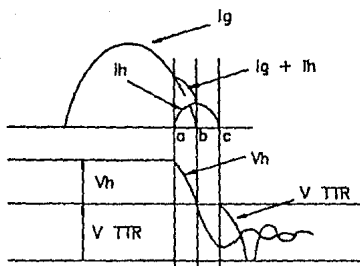


Fig. 2.4 Oscilograma de la interrupción de corriente, por el método sintético.

Lo anterior proporciona un resumen del funcionamiento y operación del circuito sintético.

### 2.1.3 CAPACIDADES DE PRUEBA.

Las capacidades de prueba del laboratorio de corto-circuito, están determinadas por la capacidad de los componentes del circuito [1]. Por tal motivo, es necesario conocer las capacidades de cada componente del laboratorio, para así poder determinar la capacidad del mismo.

#### a) Transformador de corto-circuito ( Tcc ).

Potencia permanente : 15 MVA trifásico.  
 Potencia 5 ciclos : 120 MVA trifásico.  
 Tensión primario : 115 kV.  
 Tensión secundario : 3, 5, 10 y 12 kV.



b) Interruptor de seguridad ( IS ).

Marca : Siemens.  
Tipo : 3AF 6244-4.  
Vm : 24 kV.  
Ib : 2000 A.  
Ik : 25 kA.  
f : 50, 60 Hz.

c) Interruptor auxiliar ( IA ).

- Tiene las mismas características que IS.

d) Generador de C.D.

Marca : Haefely.  
V nom. : 100 kV.  
I nom. : 20 mA de operación continua.  
V prim. : 220 V.

e) Banco de reactancias limitadoras ( XL ).

Este banco de reactancias está constituido por 8 reactancias, las cuales están distribuidas físicamente de la siguiente forma:

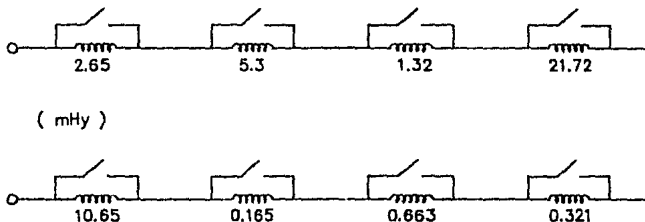


Fig. 2.5 Distribución física del banco de reactancias limitadoras ( XL ).

f) Banco de capacitores ( Ch ).

Este banco consta de 3 pisos de 15 capacitores, lo cual hace un total de 45 capacitores, los cuales pueden ser conectados en serie o en paralelo.

Las características de cada capacitor son :

Vn : 20 kV.  
Cn : 2  $\mu$ f.  
In : 12.3 A.

g) Banco de inductancias ( Lh ).

Este banco está formado por 11 reactancias, conectadas físicamente de la siguiente forma :

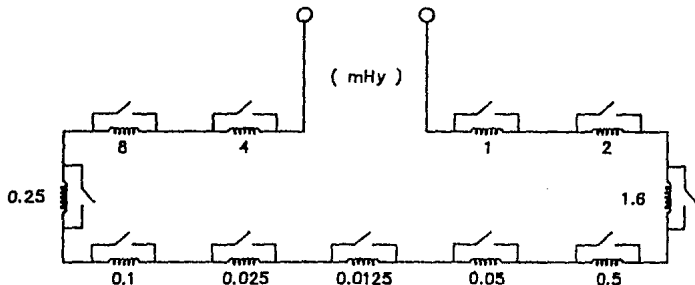


Fig. 2.6 Diagrama físico del banco de reactancias ( Lh ).

h) Banco de resistencias ( R1 ).

Está compuesto por 4 resistencias de agua :

[ ohms ]	Salinidad [ gr/lit ]	Vol. [ lits. ]
R1 = 80.0 - 260.0	3.5	7.69
R2 = 33.5 - 43.6	70.0	7.69
R3 = 51.0 - 95.0	15.0	7.69
R4 = 248 - 1253	0.5	7.69

i) Banco de capacitancias ( C1 ).

Está compuesto por 3 columnas de 7 capacitores, con los siguientes valores nominales :

Vn : 20 KV.  
Cn : 1  $\mu$ f.  
In : 8.7 A

Dadas las características de los componentes, por su forma de conexión, y por las exigencias de las normas de prueba para los interruptores [10], con estos equipos, componentes del circuito sintético en Salazar estado de México, será posible probar, interruptores de hasta 36 KV nominales, ya sea en vacío, aceite, SF6, así como transformadores y reactores de este nivel de tensión.

## 2.2 CONSIDERACIONES TEORICAS Y DESCRIPCION DEL SISTEMA DE MEDICION.

En el area de prueba es dificil establecer un sistema de medición de alta tensión ó alta corriente, dado que en ocasiones por las características de la variable a medir en interacción con los componentes del sistema de medición, generan efectos, que provocan una medición menos confiable.

Dado lo anterior resulta indispensable conocer la influencia de cada uno de los componentes, en el comportamiento de todo el sistema de medición.

### 2.2.1 CONSIDERACIONES TEORICAS DEL SISTEMA DE MEDICION.

El circuito de medición puede ser representado, como una red de 4 terminales, y por lo tanto, es aplicable la teoría general de redes.

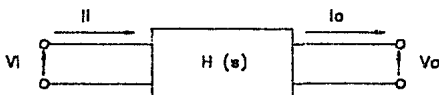


Fig. 2.7 Representación del sistema de medición.

Donde  $H(s)$  es la función de transferencia del sistema [5], la cual conlleva la información necesaria, de la relación entrada-salida del sistema.

El sistema de medición se puede considerar en 3 bloques;

- a) Transductor de la señal.
- b) Trasmisor de la señal.
- c) Registrador de la señal.

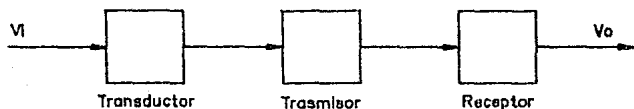


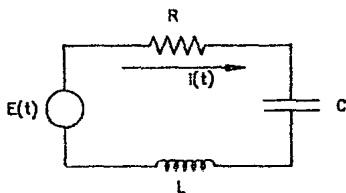
Fig. 2.8 Diagrama de bloques del sistema de medición.

En todo sistema de medición, siempre existen efectos resistivos, inductivos y capacitivos, con lo cual podemos afirmar, que cualquier sistema de medición se comporta como un circuito RCL serie.

Por tanto es indispensable hacer un análisis del circuito RCL.

RESPUESTA EN EL TIEMPO.

Sea el circuito RCL siguiente:



la ecuación que rige al circuito es la siguiente [6] :

$$\frac{d^2V_c(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{V_c(t)}{CL} = \frac{E(t)}{CL} \quad \text{----- (2.1)}$$

Aplicando la transformada de Laplace [7] a la ecuación anterior y tomando condiciones iniciales nulas, se tiene :

$$\frac{V(s)}{E(s)} = \frac{1}{CL \left( s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{CL} \right)} = H(s) \quad \text{--- (2.2)}$$

la cual es la relación entrada-salida del sistema.

si llamamos:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \text{y} \quad \omega_n^2 = \frac{1}{CL}$$

entonces:

$$\frac{V(s)}{E(s)} = \frac{1}{CL \left( s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2 \right)} = H(s) \quad \text{--- (2.3)}$$

de donde  $(s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2)$ , es la ecuación característica del sistema y contiene la información necesaria, para la evaluación de la respuesta.

Las raíces de esta ecuación característica son las siguientes:

$$s_{(1,2)} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_n^2} \quad \text{--- (2.4)}$$

$$s_{(1,2)} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}} \quad \text{--- (2.5)}$$

Haciendo un análisis de estas raíces, se pueden obtener cuatro tipos de respuestas [5].

a) si  $(\frac{R}{2L})^2 > \frac{1}{CL}$

Las raíces son reales y distintas.  
(sobreamortiguado)

b) si  $(\frac{R}{2L})^2 = \frac{1}{CL}$

Las raíces son reales e iguales.  
(Críticamente amortiguado)

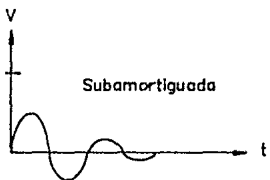
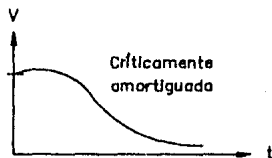
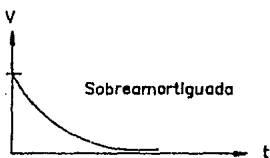
c) si  $(\frac{R}{2L})^2 < \frac{1}{CL}$

Las raíces son complejas y conjugadas.  
(Subamortiguado)

d) si  $(\frac{R}{2L})^2 = 0$

las raíces son puramente complejas y conjugadas.  
(No amortiguado)

Las respuestas en el tiempo para los casos anteriores son las siguientes. siendo la excitación, una función impulso.



Lo anterior corresponde a un análisis del amortiguamiento de la respuesta en el tiempo, y se ve claramente la función que desempeña la resistencia, en dicho amortiguamiento.

Para poder tener un análisis completo, de la respuesta, es necesario también, el análisis con respecto a la frecuencia.

#### RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

Para realizar el análisis de la respuesta a la frecuencia, de cualquier circuito, es posible recurrir a diagramas que nos faciliten dicho análisis. Por tal motivo se recurre a la utilización de los diagramas de Bode [5].

Los diagramas de bode son trazas que representan en forma gráfica, el logaritmo de la función de transferencia  $H(s)$  y el ángulo de  $H(s)$ , contra la frecuencia.

Si se tiene la función de transferencia antes mencionada:

$$CL H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2} \quad \text{--- (2.6)}$$

y decimos que :

- $\alpha = \zeta \omega_n$                        $\alpha$  = Amortiguamiento real.
- $\zeta$  = Amortiguamiento relativo.
- $\omega_n = j\omega_n$                        $\omega_n$  = Frecuencia natural.

$$CL H(j\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) + 1} \quad \text{--- (2.7)}$$



Su magnitud ( M ), y su ángulo de fase (  $\phi$  ) valdrán respectivamente [5]:

$$M(\omega) = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + 4\zeta^2 (\frac{\omega}{\omega_n})^2}} \quad \text{--- (2.8)}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{(\frac{\omega}{\omega_n})^4 - 2(1 - 2\zeta^2)(\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 1}} \quad \text{--- (2.9)}$$

$$\phi(\omega) = \text{Tg}^{-1} \frac{2\zeta(\frac{\omega}{\omega_n})}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2} \quad \text{--- (2.10)}$$

De la expresión de M puede observarse que:

si  $\left| \frac{\omega}{\omega_n} \right| \ll 1$  M es aproximadamente = 1

si  $\left| \frac{\omega}{\omega_n} \right| \gg 1$  M es aproximadamente :  

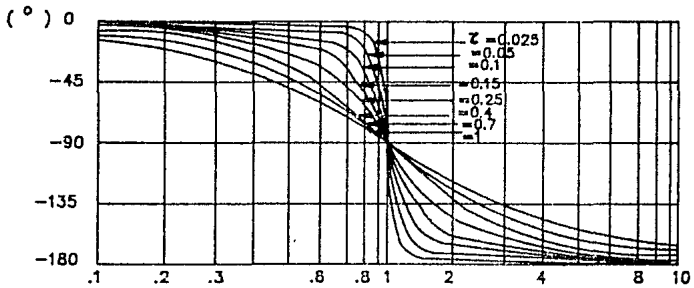
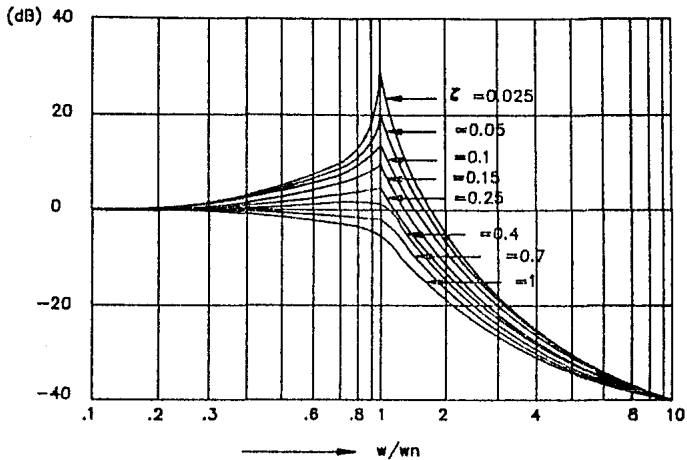
$$M = \frac{1}{(\frac{\omega}{\omega_n})^2}$$

Por tanto en la gráfica de Bode, para ambos casos :

$$1) \quad 20 \text{ Log } M = 20 \text{ Log } 1 = 0$$

$$2) \quad 20 \text{ Log } M = 20 \text{ Log } \left( \frac{1}{(\frac{\omega}{\omega_n})^2} \right) = -40 \text{ Log } \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)$$

y esta última desciende con una pendiente de - 40 dB por década. Las gráficas correspondientes a la magnitud M y Ángulo de fase  $\phi$  son las siguientes [5]:



Diagramas de bode

de esta forma podemos conocer el comportamiento de nuestro sistema, en función de la frecuencia, y obtener características tales como, ancho de banda, tiempo de respuesta etc.

## 2.2.2 ELEMENTOS TRANSDUCTORES DE TENSION.

Como se ha visto anteriormente, la primera parte del sistema de medición, lo componen los elementos transductores. La finalidad de estos elementos transductores, es dividir el voltaje ó la corriente a magnitudes medibles por los aparatos de registro.

Los transductores de tensión normalmente utilizados son :

- Transformadores de potencial (Tp's).
- Divisores de tensión (DT).

Debido a las características en ellos, los de mejor aplicación son los DT.

### 2.2.2.1 DIVISORES DE TENSION.

Los divisores de tensión están especificados, de acuerdo a su aplicación, disposición de nivel de voltaje, tipo o forma de voltaje y en ocasiones por la impedancia de entrada.

Existen varios tipos de divisores de tensión :

- Divisores de tensión de tipo resistivo (DTR).
- Divisores de tensión de tipo capacitivo (DTC).
- Divisores de tensión mixtos (DTCR).

Una de las características de los divisores de tensión, es que sus elementos no están blindados, por lo que la distribución del campo eléctrico, es deformado y absorbido por la estructura a su alrededor, esto es representado por capacitancias a tierra, las cuales influyen en la frecuencia, implicando errores en la medición.

#### DIVISORES DE TENSION RESISTIVOS (DTR).

En la siguiente figura, los efectos de campos eléctricos a tierra, se representan por capacitancias  $C_e'$ , mientras que  $C_p'$

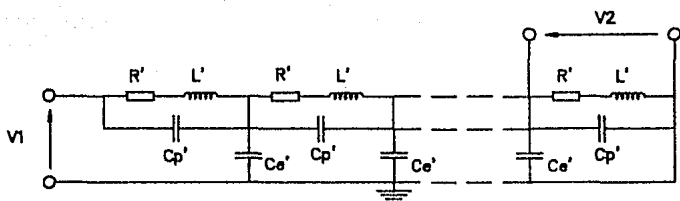


Fig. 2.9 Diagrama equivalente de la red, para un DTR.

corresponde a bajas capacitancias en paralelo con la columna resistiva; L' cuenta solo en DTR de bajo valor ohmico [4].

La aplicación de los DTR es cuidadosa y depende fuertemente del producto  $RCe'$ ; estos son ideales para medición en CD, y a pequeñas frecuencias se tiene una función de transferencia [4]:

$$V_2 = \frac{V_1}{n} = V_1 \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{----- (2.11)}$$

Donde:

- $R_1$  = Resistencia de alto voltaje.
- $R_2$  = Resistencia de bajo voltaje.
- $n$  = Relación del DTR.

si :  $\omega L \ll R$     y     $C_p < C_e$     implica :

$$ht(n) = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{sRCe}}{\sinh \sqrt{sRCe}} \quad \text{----- (2.12)}$$

Además si  $ht(s)$  es constante a bajas frecuencias y decrece continuamente a altas frecuencias, se tiene un ancho de banda :

$$F_b = \frac{1.43}{R C_e} \quad \text{-----} \quad (2.13)$$

con un  $RH = ( 10 \dots 15 ) K \Omega (m)$ . Donde  $H$  es la altura del divisor [4].

Un circuito simplificado del DTR, se muestra en la siguiente figura :

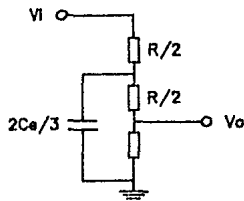


Fig. 2.10 Circuito simplificado de un DTR.

Donde  $2/3 C_e$  representa todas las capacitancias parásitas a tierra distribuidas.

El tiempo de respuesta del divisor está dado por :

$$T^0 = \frac{R C_e}{6} \quad \text{-----} \quad (2.14)$$

Con una respuesta al escalón puramente exponencial :

$$gt(t) = 1 - e^{\left(\frac{-t}{T^0}\right)} \quad \text{-----} \quad (2.15)$$

$$\left. \frac{d gt(t)}{dt} \right|_{T=0} = \frac{1}{T^0} = \frac{6}{RC_e} \quad \text{-----} \quad (2.16)$$

La fig. 2.11 muestra la respuesta al escalón, para diferentes DTR.

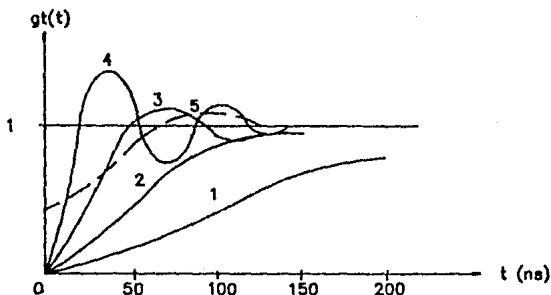


Fig. 2.11 Respuesta al escalón para diferentes DTR.

$$\frac{L}{R} = 10\text{ns} ; \quad C_e = 40\text{pf} ; \quad C_p = 1\text{pf} \quad R \text{ crítica}$$

(1)	→ R = 30 KΩ	L = 300 μHy	15.5 KΩ
(2)	→ R = 10 KΩ	L = 100 μHy	8.9 KΩ
(3)	→ R = 3 KΩ	L = 30 μHy	4.8 KΩ
(4)	→ R = 1 KΩ	L = 10 μHy	2.8 KΩ

En mediciones de voltaje de CA, la aplicación de los DTR es muy restringida, debido al bajo estado estable de tensión aplicada.

#### DIVISORES DE TENSION CAPACITIVOS.

Este tipo de divisores de tensión, son aplicables primordialmente en mediciones de CA, tensiones de impulso y tensiones transitorias [4].

La siguiente figura es la serie de capacitancias nominales del DTC.

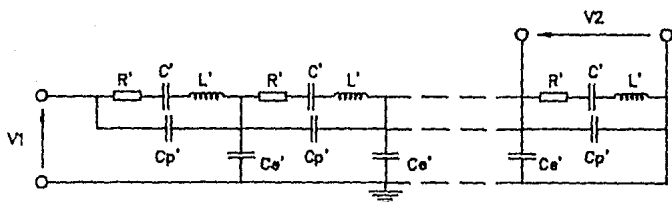
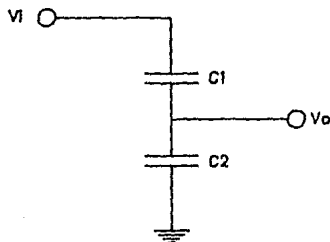


Fig. 2.12 Diagrama equivalente de la red, para un DTC.

Este tipo de divisor de tensión, tiene una mejor respuesta que los DTR, aunque su relación  $n$  es influenciada grandemente para bajas frecuencias y también si existen predescargas a tierra.



$$n = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad \text{--- (2.17)}$$

$$V_o = n V_i \quad \text{--- (2.18)}$$

Fig. 2.13 Diagrama equivalente simplificado de un DTC.

La relación para un DTC es mayor que el factor normalizado  $n$ . El efecto físico que explica este fenómeno, es que no toda la corriente que fluye por la unidad primaria, alcanza la unidad secundaria, debido a las capacitancias a tierra.

La figura siguiente muestra las capacitancias parásitas del DTC.

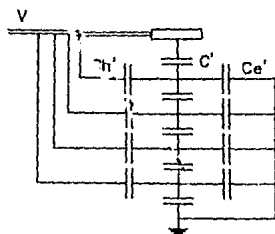


Fig. 2.14 Esquema demostrativo de la distribución de capacitancias, para obtener una capacitancia equivalente  $C_{eq}$ .

Una capacitancia equivalente se define para condiciones de estado estable como [4]:

$$C_{eq} = \frac{1}{V \omega} \quad ; \quad \omega = \text{Frecuencia angular.}$$

haciendo cálculos se obtiene :

$$C_{eq} = C \left( \frac{1 + \frac{C_h}{4C}}{1 + \frac{C_e}{6C} + \frac{C_h}{12C}} \right) \quad \text{----- (2.19)}$$

Donde:  $C = \frac{C'}{n}$  ;  $C_e = nC_e'$  ;  $C_h = nC_h'$  ; para  $n \gg 1$

Y además :  $C_h \ll C_e$  ; implica  $C_{eq} < C$  ; y tenemos :

$$C_{eq} = C \left[ \frac{6C}{6C + C_e} \right] \quad \text{----- (2.20)}$$



La figura siguiente nos muestra la respuesta al escalón, de un DTC con resistencia de amortiguamiento  $R_a$ , en la cual podemos apreciar que las oscilaciones, se amortiguan cada vez más cuando  $R_a$  adquiere un valor representado por [4]:

$$R_a = 4 \sqrt{\frac{L}{C_e}}$$

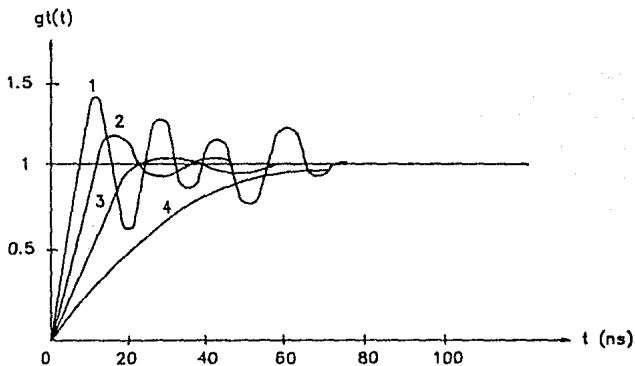


Fig. 2.15 Respuesta al escalón de un DTC con resistencia de amortiguamiento  $R_a$ .

$$C = 150\text{pf} ; \quad L = 2.5\text{Hy} ; \quad C_e = 40\text{pf} ; \quad C_p = 1\text{pf}$$

- 1) -  $R_a = 250$  ohms
- 2) -  $R_a = 750$  ohms
- 3) -  $R_a = 1000$  ohms
- 4) -  $R_a = 2000$  ohms

$$4 \frac{L}{C_e} = 1000$$

**DIVISORES DE TENSIÓN MIXTOS (DTCR).**

Añadiendo a la columna resistiva, una capacitancia  $C_p'$  en paralelo, convertimos el divisor de tensión resistivo (DTR) en un divisor mixto (DTCR).

Su función de transferencia está determinada por [4]:

$$ht(s) = n \left( \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{\frac{sRCe}{1+sRCp}}}{\sinh \sqrt{\frac{sRCe}{1+sRCp}}} \right) \quad \text{--- (2.21)}$$

y su respuesta al escalón es la misma que para el DTR (Curva 5)

$$gt(t) = 1 + 2 \frac{p}{\kappa \pi^2} (-1) \kappa \left( \frac{\exp(-akt)}{1 + \kappa^2 \pi^2 \frac{Cp}{Ce}} \right) \quad \text{--- (2.22)}$$

Donde :

$$ak = \frac{\kappa^2 \pi^2}{RCe \left( 1 + \kappa^2 \pi^2 \frac{Cp}{Ce} \right)} \quad \text{--- (2.23)}$$

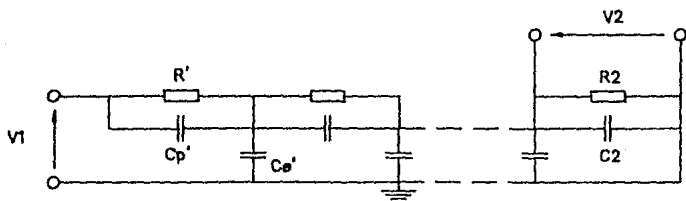


Fig. 2.16 Diagrama equivalente del divisor mixto (DTCR).

Y los efectos que produce respecto a las frecuencias son :

$$\lim_{s \rightarrow 0} ht(s) = 1 \quad \text{-----} \quad (2.24)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} gt(s) = 1 - \frac{Ce}{6Cp} \quad \text{-----} \quad (2.25)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} ht(s) = 1 - \frac{Ce}{6Cp} \quad \text{-----} \quad (2.26)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} gt(t) = 1 \quad \text{-----} \quad (2.27)$$

Estos efectos se representan en las siguientes figuras [4]:

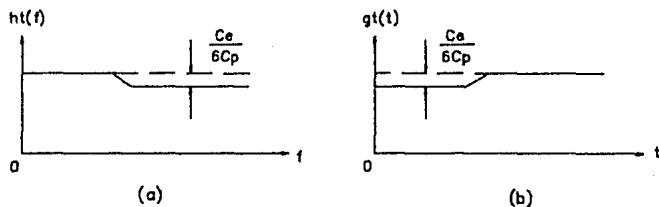


Fig. 2.17 a) Curva de la función de transferencia de DCR.  
b) Curva de la respuesta al escalón unitario de un DCR.

### 2.2.3 ELEMENTOS DE TRANSMISION DE SEÑALES.

Los elementos de transmisión en el sistema de medición, son aquellos que conducen las señales, desde el elemento de detección o transductor, hasta el instrumento de registro. Esta transmisión se realiza con cables triaxiales y coaxiales [9], en tres etapas como se muestra en la siguiente figura :

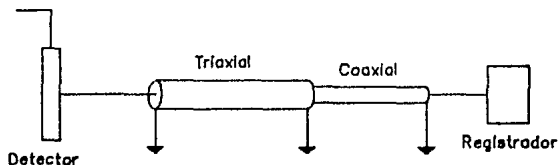


Fig. 2.18 Sistema de transmisión de señales.

En el registro la conexión es como se muestra a continuación :

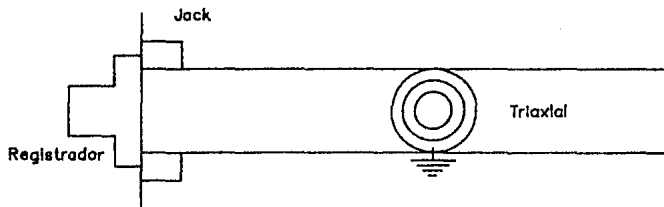


Fig. 2.19 Conexión del plug terminal en el registro de la medición.

GRADO DE ACOPLAMIENTO DEL CABLE (Matching).

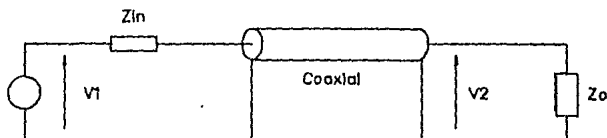


Fig.2.20 Impedancia de acoplamiento de un cable coaxial.

$$V_2 = \frac{Z_o}{Z_1 + Z_{in}} \cdot V_1$$

La adaptación del matching es recomendable, por evitar el fenómeno de reflexión de señales.

La ausencia de una impedancia característica de acoplamiento en el cable, crea efectos de reflexión, apareciendo oscilaciones a una frecuencia  $F_n$ , como se muestra a continuación :

$$F_n = \frac{1}{4tc} \quad \text{--- (2.36)}$$

Donde :  $tc$  = Tiempo de viaje de la onda de tensión en el cable.

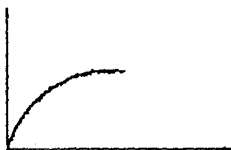
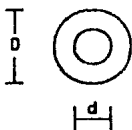


Fig. 2.21 Efectos de la reflexión en un cable coaxial, por la carencia de un matching.

Simplificando el sistema como se observa en la figura 2.25, tenemos que las características del cable, están en función de la magnitud y de la frecuencia de las señales, así como el medio que las rodea (Relación señal a ruido). La impedancia de estos tipos de cables es de 50 y 75 ohms y su blindaje es adecuado a la intensidad de los disturbios [9]. El nivel de transmisión puede ser de algunos volts, hasta cientos, en función de la salida de los sensores y la entrada al instrumento de registro; así tenemos la sig. especificación :

RG58 - 50 $\Omega$	-	5 mm $\phi$	2 KV
RG8 - 50 $\Omega$	-	10 mm $\phi$	5 KV
RG11 - 75 $\Omega$	-	10 mm $\phi$	5 KV

los parámetros del cable coaxial, se obtienen en base a sus dimensiones, es decir :



- Resistencia  $R_{coax} = \frac{\rho_1}{\pi \frac{d^2}{4}} + \frac{\rho_2}{\pi D \delta}$  ;  $[\frac{\Omega}{m}]$  - - - (2.37)

- Capacitancia  $C = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\log \frac{D}{d}}$  ;  $[\frac{pF}{m}]$  - - - - (2.38)

- Inductancia  $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$  ;  $[\frac{mH}{m}]$  - - - - (2.39)

- Impedancia  $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{60}{\epsilon_r} \ln \frac{D}{d}$  ;  $[\Omega]$  - - - - (2.40)

## 2.2.4 ELEMENTOS DE REGISTRO.

### 2.2.4.1 OSCILOGRAFO GALVANOMETRICO.

Para las pruebas que se realizan en un laboratorio de corto-circuito, la aplicación de instrumentos de registro, se refiere con mayor importancia al oscilógrafo galvanométrico y al osciloscopio digital, los cuales cumplen con los requerimientos de la prueba.

El oscilógrafo galvanométrico (OG) nos reproduce en forma gráfica, la forma fiel de la señal a registrar.

El OG empleado en el laboratorio Salazar, es de marca VISICORDER HONEYWELL modelo 150BB. El cual registra simultáneamente señales en 12 canales a frecuencias de 0 a 25 KHz., mediante la acción de la incidencia de un haz luminoso sobre papel fotosensitivo, no requiriendo uso de químicos.

Se alimenta con 120 V de C.A. de 49 a 61 Hz. aunque también puede operar a 120 V de C.A. a 400 Hz ó 240 V C.A. a 49 a 61 Hz.

Este dispositivo es de alta precisión, con un sistema de conducción por servomecanismo, con velocidades desde 2.5 hasta 3000 mm/seg, el ancho del registro es de 20.3 cm. El trazo es mediante deflexión de galvanómetros, además se cuadrícula y numera el papel como referencia de coordenadas y del evento.

Los controles de operación se localizan frente al panel y son los siguientes :

- Control de intensidad para los trazos.
- Control de encendido.
- Control de lámpara de Xe, 75 W.
- Selector de intervalos de tiempo.
- Control de velocidad.
- Control de evento marcado.
- Control de conducción de registro.
- Control automático de longitud de registro.
- Control remoto de alimentación.
- Control de disparo.

Su operación es muy simple y cuidadosa, al alimentarlo su estado inicial debe ser :

TIMER MODE ————> OFF  
RECORD TIME ————>

POWER/LAMP ————> OUT  
DRIVE —————>

CONTROL LOCAL/REMOTO ———— LOCAL

Inicialmente se energiza con POWER y al cabo de un tiempo corto, se puede encender LAMP, con esto se procederá a ver y verificar en una pantalla mediante maniobra, la deflexión del deslizamiento de los galvanómetros correspondientes a los canales a utilizar; ya checando esto, se procede a ubicarlos según se desee en el trazo.

Los galvanómetros se especifican, de acuerdo a la frecuencia a responder, su resistencia interna y los volts y amperes que pueden registrar por pulgada.



#### 2.2.4.2 OSCILOSCOPIO DIGITAL.

El osciloscopio más utilizado en registros de prueba del laboratorio, es de tipo digital marca NICOLET 2090-206 ya que sus características cumplen ampliamente con los requerimientos de prueba.

Las características que lo distinguen de los osciloscopios comunes o analógicos, definen su aplicación e importancia en el laboratorio, estas son :

- Mayor precisión, resolución del orden de 0.025 %, linealidad de 0.05 % para la escala total.
- Sensitividad de  $\pm 10$  mv (5 microvolts de resolución), por  $1 \times 10$  de impedancia de entrada, alta estabilidad, amplificación diferencial.
- Tiempos de elevación, con rapidez de 50 nanoseg.
- Amplio barrido, de nanoseg. hasta un largo tiempo.
- Escala digital con una expansión, X2, X4, X8, X16, X32, X64 en ambos ejes, con trazo de origen en forma automática, variación de voltaje y tiempo mediante el cursor para lecturas, desplegando en forma numérica la tensión y tiempo en cualquier punto de la onda.
- Interfase con computadoras según IEEE - 488 (GPIB) RS-232C.
- Su almacén interno de memoria, guarda fielmente la información de la señal sin debilitarla.
- Cuenta con un registrador de disco magnético, registrando B track en disco y 4 señales por track, tardándose en desplegarse en pantalla, aproximadamente 2 segundos. El disco se puede volver a utilizar, y es portátil.
- Capacidad de dos canales con escalas removibles. Filtro de 100 KHz.

## 2.3 REQUERIMIENTOS ESPECIALES DE MEDICION.

Estos requerimientos se refieren básicamente a el conocimiento de las características en las variables a medir, es decir, los parámetros de diseño de la medición (Magnitud, duración y frecuencia).

### 2.3.1 CORRIENTE DE PRUEBA ( $I_p$ ).

La corriente de prueba en este caso es la que proporciona el Tcc, y tiene las siguientes características :

$I_{cc}$ (Nominal) [ A ]	$I_{cc}$ (Max) (5 ciclos) [ A ]	f [ Hz ]
833.33	5000	60
1443.00	8659	60
1666.60	10000	60
2886.60	17000	60

### 2.3.2 TENSION DE PRUEBA.

La tensión de prueba es la tensión que proporciona el Tcc, sus características son las siguientes :

Vcc (Nominal) [ KV ]	f [ Hz ]
3.0	60
5.1	60
6.0	60
10.3	60
12.0	60

### 2.3.3 CORRIENTE DE INYECCION.

La corriente de inyección está en función de los parámetros  $C_h$ ,  $L_h$ ,  $V_h(0)$ , y sus características extremas de acuerdo a los valores de los parámetros son :

$$I (\text{max}) = 2000 \text{ A}$$

$$f = 10 \text{ KHz}$$

Duración = Medio ciclo.

### 2.3.4 TTR (TENSION TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO).

Con las capacidades de el laboratorio Salazar se pueden proporcionar las TTR's criticas que piden las normas, con los siguientes valores maximos.

$$\text{Voltaje máximo} = 66 \text{ KV}$$

$$\text{Frecuencia máxima} = 60 \text{ KHz}$$

$$\text{Frecuencia mínima} = 4 \text{ KHz}$$

$$\text{Duración mínima (5t3)} = 45 \text{ microseg.}$$

$$\text{Duración máxima (5t3)} = 540 \text{ microseg.}$$

### 2.3.5 TENSION DE ARCO.

La tensión de arco es la existente entre los contactos del interruptor, cuando estos empiezan a separarse como producto de la falla.

La siguiente figura ilustra el proceso de la interrupción y la presencia de la tensión de arco.

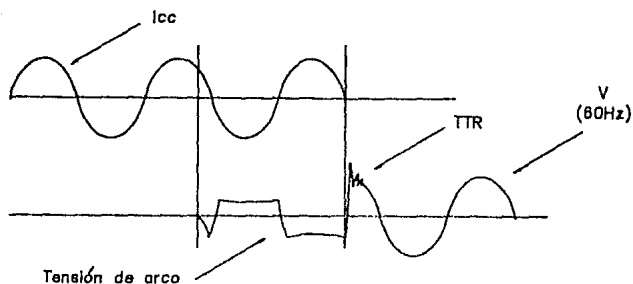


Fig. 2.22 Proceso de la interrupción.

Las características de la tensión de arco varían de interruptor a interruptor, mas sin embargo es posible establecer un rango de valores característicos :

Voltaje = 0 - 2 KV

Frecuencia = 60 Hz ( Con frecuencias en la envolvente de 60 Hz de 100 Kz )

Duración = Algunos ciclos de 60 Hz.

## C A P I T U L O 3

### DISEÑO DE TRANSDUCTORES ESPECIALES

#### 3.1 DIVISOR DE TENSION MIXTO (DTCR).

En el laboratorio de Salazar se cuenta con divisores de tensión capacitivos puros (DTC), los cuales tienen cierta deficiencia en la medición, ya que su respuesta es oscilatoria.

El propósito en esta sección, es rediseñar el DTC y convertirlo en un DTCR (Divisor de tensión capacitivo resistivo), el cual elimina las características oscilatorias en la respuesta, y por tanto se mejora el sistema de medición en este aspecto.

El hecho de incluir resistencias en el DTC, convertirlo en mixto (DTCR), provoca variaciones en el tiempo de respuesta, y en la relación de transformación ó relación de reducción, por lo cual es necesario realizar un estudio de este tipo de divisor.

##### 3.1.1 CARACTERISTICAS ACTUALES DEL DTC.

Con el objeto de conocer las características del DTC actual, se realizaron pruebas de respuesta a la frecuencia y respuesta al impulso, además de la medición de sus capacitancias por medio de un puente universal, obteniéndose los siguientes resultados :

La medición de sus capacitancias, fué la siguiente :

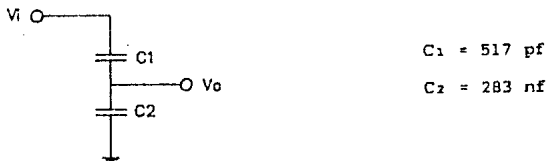


Fig. 3.1 Diagrama eléctrico del DTC del laboratorio Salazar.

### RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

El circuito utilizado para la prueba de respuesta a la frecuencia, fué el siguiente :

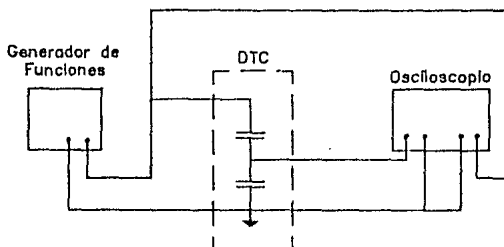
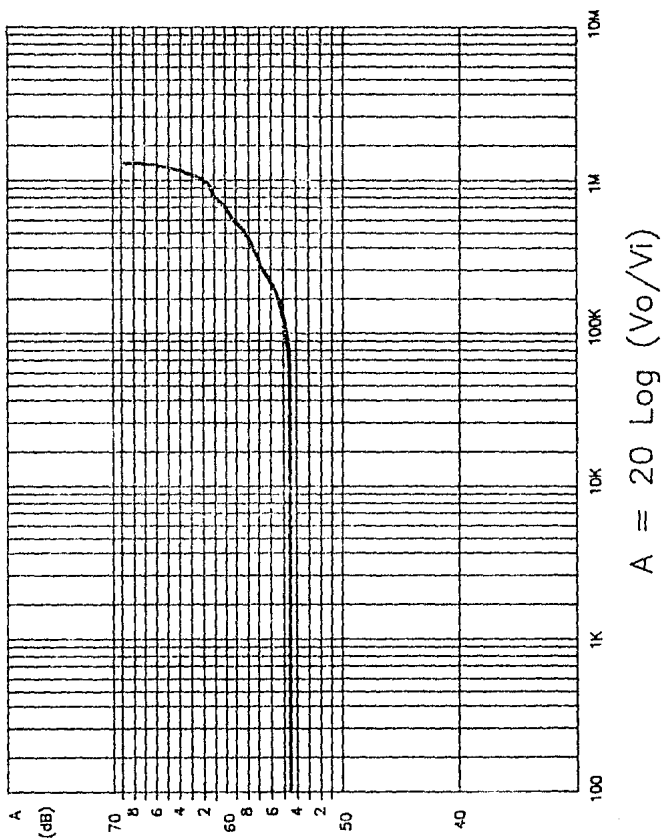


Fig 3.1a Circuito utilizado para la respuesta a la frecuencia.

Donde se procedió a variar la frecuencia, en el generador de funciones, y se observó el comportamiento de su función de transferencia, de tal forma que se obtuvo la siguiente tabla, y su correspondiente diagrama de Bode :

F [ Hz ]	$V_i$ [ V ]	$V_o$ [ mV ]	$V_i/V_o$ [1E-03]	[ grados ]	$(V_i/V_o)$ [ dB ]	T [ ms ]
10	25.0	45	555.5	0	54.8	
20	28.0	51	549.0	0	54.7	48.0
60	30.0	55	545.4	0	54.6	15.0
100	30.0	56	535.7	0	54.5	9.4
1 K	30.0	56	535.7	0	54.5	.9
50 K	30.0	56	535.7	6	54.5	92 m
200 K	30.0	50	600.0	22	55.5	4.7 m
300 K	30.0	42	714.2	34	57.0	2.6 m
500 K	29.5	35	842.8	42	58.5	1.7 m
600 K	29.0	30	966.6	50	59.7	1.5 m
800 K	28.5	25	1140.0	61	61.1	1.1 m
1 M	28.0	20	1400.0	70	62.0	0.9 m
1.5 M	28.0	10	2800.0	65	69.0	0.6 m
1.7 M	28.0	8	"	64	"	0.5 m

DTC



$$A = 20 \text{ Log } (V_o/V_i)$$

Del anterior diagrama de bode, correspondiente al DTC, se observa que su ancho de banda es aproximadamente a 400 KHz a 3 dB.

El circuito utilizado para la prueba de respuesta al impulso, fué el siguiente :

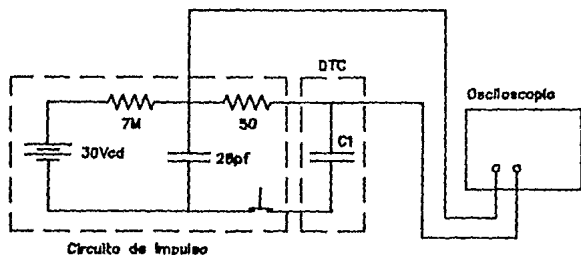


Fig 3.1b Circuito utilizado para la respuesta al impulso.

El cual corresponde a un impulso de 30 volts.

Su respuesta en el tiempo fué la siguiente :

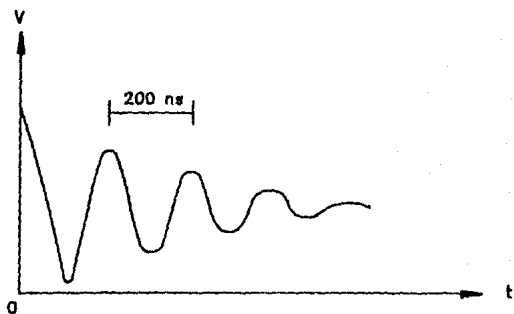


Fig. 3.2 respuesta al impulso del DTC del laboratorio Salazar.



Con las pruebas anteriores, podemos determinar las características del DTC.

$$C_1 = 517 \text{ pf}$$

$$\omega_n = 2 \text{ MHz}$$

$$C_2 = 283 \text{ nf}$$

$$n = 1.83 \times 10^{-3}$$

$$F_c = 450 \text{ KHz}$$

de las especificaciones del DTC [11], se obtuvieron los siguientes datos :

Tensión máxima de operación al impulso : 200 KVpico.

Tensión máxima de operación a 60 Hz : 30 KV rms.

### 3.1.2 REQUERIMIENTOS Y LIMITACIONES.

La modificación del DTC, debe cumplir ciertos requerimientos de tal forma que el rediseño, satisfaga las deficiencias del DTC, es decir :

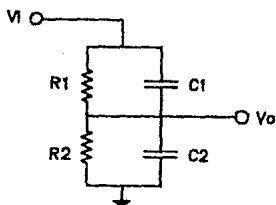
- Lograr que su tiempo de respuesta sea lo bastante pequeño, para poder registrar la señal más rápida.
- Lograr que su relación de reducción se conserve para las frecuencias establecidas anteriormente.
- Lograr que el ancho de banda, sea el suficiente para poder registrar la señal, en una medición confiable.

Todos los requerimientos anteriores conllevan a ciertas limitaciones en la medición, tal es el caso que al aumentar la resistencia en el DTGR, se aumenta el tiempo de respuesta y se reduce el ancho de banda, además puede ser posible que a bajas frecuencias, la relación de reducción se altere, dado que en este caso las resistencias determinan la relación.

Debido a los requerimientos y limitaciones anteriores, es necesario realizar un análisis del comportamiento del DTGR.

### ANÁLISIS DEL DTGR.

De acuerdo al Circuito simplificado del DTGR, se obtienen las ecuaciones correspondientes:



$$IR_2 = IC_1 + IC_2 + IR_1 \quad - - \quad (3.1)$$

$$VC_1 = V_i - VC_2 \quad - - - \quad (3.2)$$

Fig. 3.3 Circuito simplificado del DTGR.

$$IR_2 = \frac{VR_2}{R_2} = \frac{VC_2}{R_2} \quad - - - - \quad (3.3)$$

$$IC_1 = C_1 \frac{dVC_1}{dt} = C_1 \frac{d(V_i - VC_2)}{dt} \quad - - - - \quad (3.4)$$

$$IC_2 = C_2 \frac{dVC_2}{dt} \quad - - - - - \quad (3.5)$$

$$IR_1 = \frac{VR_1}{R_1} = \frac{VC_1}{R_1} = \frac{V_i - VC_2}{R} \quad - - - - - \quad (3.6)$$

sustituyendo las ecuaciones (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) y (3.6) en (3.1), tenemos :

$$\frac{dVC_2}{dt} + VC_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \left( -\frac{1}{C_1 + C_2} \right) =$$

$$= \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \frac{dV_i}{dt} + V_i \left( \frac{1}{R_1 (C_1 + C_2)} \right) \quad \dots \quad (3.7)$$

con :

$$V(0) = 0 \quad ; \quad R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad ; \quad C_e = C_1 + C_2$$

tenemos la siguiente función de transferencia H(s) :

$$\frac{V_o}{V_i} = H(s) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} + \left( \frac{1}{s R_e C_e + 1} \right) \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

. . . . . (3.8)

La cual para una excitación senoidal, se tiene la siguiente respuesta en el tiempo :

$$\frac{V_o(t)}{V_i} = \text{sen} \omega t \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) - \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \left[ \right.$$

$$\left. \left( \frac{1}{R_e C_e} + \omega^2 R_e C_e \right) \left( \text{cos} \omega t - \frac{\text{sen} \omega t}{R_e C_e \omega} - \exp\left(\frac{-t}{R_e C_e}\right) \right) \right]$$

. . . . . (3.9)

En la ecuación anterior, se observa que :

Para cuando  $\omega \rightarrow 0$

$$V_o(t) = V_i \operatorname{sen} \omega t \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{--- (3.10)}$$

Para cuando  $\omega \rightarrow \infty$

$$V_o(t) = V_i \operatorname{sen} \omega t \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \quad \text{--- (3.11)}$$

A partir de lo anterior, es posible afirmar que para frecuencias bajas, la relación de transformación está determinada por las resistencias, mientras que para frecuencias altas, las capacitancias son las que la determinan.

### 3.1.3 MODIFICACION DEL DTC.

La modificación ó rediseño del DTC, consiste en encontrar, los valores correctos de las resistencias, para lograr el funcionamiento adecuado del DTCR.

Para que el DTCR, bajo cualquier frecuencia conserve la misma relación de reducción, es necesario que las relaciones tanto capacitivas como resistivas, sean las mismas. De la ecuación (3.9) se obtiene :

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1.823 \times 10^{-3} \quad \text{--- (3.12)}$$

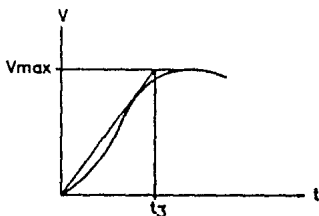
$$R_2 = 1.826 \times 10^{-3} (R_1) \quad \text{--- (3.13)}$$

De la ecuación (3.9) se observa que la constante de tiempo de la respuesta, está dada por :

$$\tau = ReCe \quad \text{--- (3.14)}$$

$$Ce = C_1 + C_2 = 517\text{pf} + 282\text{nf} = 283.5\text{nf}$$

y dado que por norma, el tiempo de crecimiento de la TTR mas rápida es de :



$$t_3 = 9\mu\text{s} \quad (\text{La mas rápida})$$

Fig. 3.4 Representación de la TTR.

entonces nuestro tiempo de respuesta debe ser no mayor a 2 microsegundos aproximadamente.

$$Re = \frac{\tau}{Ce} = \frac{2\mu\text{s}}{283\text{nf}} = 7\Omega$$

Es decir la resistencia Re debe ser de un valor aproximado a 7 ohms. Para el caso se puede tomar de 10 ohms (2.8 microseg.).

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = Re = 10\Omega$$

$$R_2 = \frac{Re R_1}{R_1 - Re} \quad \text{--- (3.15)}$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones (3.13) y (3.15) se obtienen los valores correctos de resistencias.

$$R_1 = 5.463 \text{ K}\Omega \quad ; \quad R_2 = 9.98 \text{ }\Omega$$

Por lo tanto podemos determinar las características del divisor de tensión mixto (DTCR).

$$\tau = 2.83\mu\text{s} \quad ; \quad \omega c = 353350 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \quad ; \quad f_c = 56 \text{ KHz}$$

y su relación de reducción queda determinada por :

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1.823 \times 10^{-3} \quad \text{--- (3.16)}$$

### 3.2 ATENUADOR DE TENSION.

El voltaje a la salida de los transductores de tensión, normalmente se encuentra en un nivel de 120 V, esto debido a que el elemento transductor, generalmente se encuentra en el área de prueba, y la señal de ruido en este nivel, no es significativo como para considerarlo error en la medición.

Esta señal de 120 volts, limita a algunos equipos de registro, los cuales no aceptan este nivel de voltaje, por tanto se requiere utilizar un atenuador de tensión que reduzca esta señal a un nivel medible, no altere las características del transductor de tensión, y además no se vea alterado por las características del equipo de registro.

### 3.2.1 REQUERIMIENTOS Y LIMITACIONES DEL ATENUADOR DE TENSION.

Para poder utilizar un atenuador de tensión en un sistema de medición, es necesario que cumpla con ciertos requerimientos de diseño, para lo cual es indispensable conocer las características de los equipos de registro, la impedancia de carga al circuito además de sus características de respuesta, para así poder determinar los factores suficientes para su diseño.

#### I - EQUIPOS DE REGISTRO (OSCILOGRAFOS Y OSCIOSCOPIOS).

Las características que es necesario conocer de los equipos de registro, para fines de diseño son :

- Rango de amplitud.
- Rango de frecuencia ( Ancho de banda ).
- Impedancia de entrada.

Las características de los equipos utilizados en la medición por el laboratorio Salazar son [12]:

##### a) OSCIOSCOPIO DIGITAL (NICOLET).

- Rango de amplitud : 200 mVpp a 80 Vpp.
- Rango de frecuencia : 500 ns a 200 s por punto.
- Impedancia de entrada :  $R_i = 2 \text{ M}\Omega$ .  
 $C_i = 20 \text{ pf}$ .

##### b) OSCIOSCOPIO DIGITAL (TEKTRONICS).

- Rango de amplitud : 2 mVpp a 50 Vpp.
- Rango de frecuencia : 0.05 microseg. a 5 seg. por punto.
- Ancho de banda : 80 a 100 MHz.
- Impedancia de entrada :  $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ .

c) OSCILOGRAFO GALVANOMETRICO.

Las características del oscilógrafo galvanométrico, dependen de las características del galvanómetro empleado. Las características de algunos galvanómetros más empleados son :

GALVANOMETRO	FB [Hz]	Rg [ohms]	Fn [Hz]	Vi max. [Vpp]	Deflexión max. [cm]
M - 1000	660	39.0	1000	0.82	20.0
M - 3300	2178	32.0	3300	3.65	14.5
M - 5000	3300	39.5	5000	4.30	8.9
M - 8000	5280	35.0	8000	3.20	5.8
M - 10000	6600	35.0	10000	3.20	5.8
M - 13000	8580	71.6	13000	6.40	2.8
M - 25000	16500	49.0	25000	6.70	2.8

Con la tabla anterior podemos definir los rangos siguientes :

- Rango de voltaje : 0.82 Vpp a 6.7 Vpp.
- Ancho de banda : 660 HZ A 16500 HZ.
- Resistencia de entrada : 39 ohms a 72 ohms.



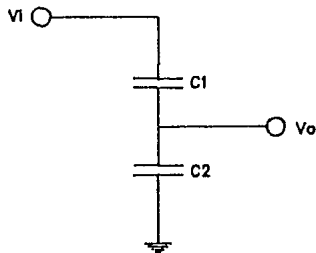
## II - IMPEDANCIA DE CARGA AL CIRCUITO.

Todo circuito que se conecta a una red o a otro circuito, presenta una impedancia de carga hacia la red; por tal motivo, se entiende que el sistema de medición no debe variar significativamente, el comportamiento del circuito de prueba. A partir de esto, se tiene que hacer un análisis, para determinar la impedancia de carga correcta o adecuada.

si se requiere atenuar la tensión de salida de un DTC, es necesario conocer el comportamiento del mismo, respecto a la frecuencia, dado que varían sus impedancias, y podría darse el caso en que la impedancia del atenuador afecte en forma significativa la relación del DTC.

Por otro lado la impedancia de carga del equipo de registro hacia el atenuador, también debe ser considerada.

El DTC que se encuentra en el laboratorio Salazar, es de las siguientes características :



$$C_1 = 517 \text{ pf}$$

$$C_2 = 283 \text{ nf}$$

$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad \text{--- (3.17)}$$

$$n = 1.83 \times 10^{-3}$$

Este divisor es utilizado normalmente para medir : TTR's, Voltajes de arco, y voltajes de prueba.

Las tensiones transitorias de restablecimiento (TTR's), tienen unas frecuencias comprendidas en un rango de 4KHz a 100 KHz aproximadamente, determinado por las normas de interruptores [10] dentro de la capacidad del laboratorio (36 KV). Y para la tensión de arco y la tensión de prueba, la frecuencia es de 60 Hz.

El DTC para la medición a 60 Hz presenta las siguientes impedancias :

$$X C_1 = 5.1 M\Omega$$

$$X C_2 = 9.3 K\Omega$$

Y para la medición de 4 a 100 KHz, las impedancias son :

$$X C_1 = 3 K\Omega \quad \text{a} \quad 76 K\Omega$$

$$X C_2 = 5.6 \Omega \quad \text{a} \quad 140 \Omega$$

La impedancia de carga hacia el atenuador de tensión (En el secundario), por parte del equipo de registro es de :

$$R \approx 1 M\Omega \quad \text{a} \quad 2 M\Omega$$

$$X_c \approx 79 K\Omega \quad \text{a} \quad M\Omega$$

$$R \approx 39 \Omega \quad \text{a} \quad 71 \Omega$$

El sistema de transmisión, el cual lo constituye los cables de conexión (Coaxiales, Triaxiales), podrian presentar efectos, los cuales provocarian una medición menos confiable, y es necesario determinar el rango de impedancias de los mismos. La representación de un cable coaxial es la siguiente :

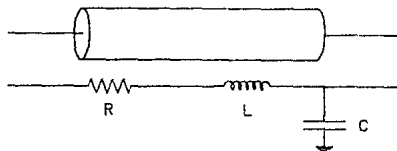


Fig. 3.5 Representación eléctrica de un cable de transmisión.

Donde los valores de los parámetros R, L y C , representan los efectos del cable.

En el laboratorio Salazar se utilizan cables coaxiales, de las siguientes características [9]:

$$\begin{aligned} Z_{C1} &= 75 \Omega \\ Z_{C2} &= 50 \Omega \end{aligned} \quad Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{--- (3.18)}$$

Para el caso del primer coaxial:

$$C_1 = 20.5 \frac{\text{pf}}{\text{m}} \quad ; \quad L_1 = 0.112 \frac{\mu\text{Hy}}{\text{m}}$$

Y para el segundo tipo :

$$C_2 = 30.0 \frac{\text{pf}}{\text{m}} \quad ; \quad L_2 = 75 \frac{\mu\text{Hy}}{\text{m}}$$

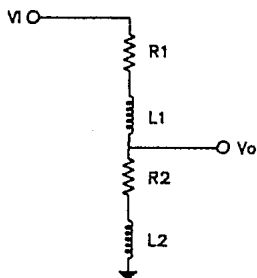
Las resistencias son del orden de algunos miliohms por metro. Haciendo un análisis con los valores anteriores y las frecuencias anteriormente señaladas, resulta que la impedancia de el coaxial varía de miliohms a microhms. Y por tanto resulta despreciable este parámetro en un sistema de medición de alta potencia.

### III - CARACTERISTICAS DE RESPUESTA DEL ATENUADOR DE TENSION.

Las características de respuesta del atenuador de tensión, es una de las partes más considerables en el sistema de medición, dado que además de su relación de reducción adecuada y su impedancia de carga correcta, debe cumplir con un ancho de banda y un tiempo de respuesta, que cubran la gama de frecuencias y de duración de la variable a medir.

Debido a las características de la variable a medir (60 Hz y de 4 KHz a 100 KHz, Duraciones de 9 microsegundos ( $t_3$ ) a 5 ciclos de 60 Hz), el ancho de banda no debe ser menor a 100 KHz y tiempo de respuesta no debe exceder a 9 microsegundos, el cual es el tiempo  $t_3$ , correspondiente a la TTR más rápida.

El tiempo de respuesta del atenuador de tensión está determinado por :



$$\tau = \left( \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{--- (3.19)}$$

$$\omega_n = \left( \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} \right) \quad \text{--- (3.20)}$$

Fig. 3.6 Circuito eléctrico del atenuador de tensión.

### 3.2.2 DISEÑO DE ATENUADORES DE TENSION.

Con los requerimientos y limitaciones anteriormente vistos, podemos definir las características de diseño, del atenuador de tensión requerido.

La salida del transductor de tensión es aproximadamente de 120 V rms la cual corresponde a la entrada mas alta al atenuador de tensión, y por otro lado la señal de entrada al equipo de registro no debe exceder de 2.3 V rms ( Para el oscilógrafo galvanométrico ). Por tanto la reducción debe ser de 120 a 2.3 Volts.

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{120}{2.3} = 52.1 \quad V_o = V_i \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad - - - (3.21)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{51.1} \quad ; \text{ Primera relación de diseño.}$$

Por otro lado la impedancia del atenuador de tensión, debe ser mayor que la impedancia del secundario del transductor de tensión, para no alterar la relación del transductor.

La mayor impedancia que presenta el secundario del transductor de tensión es de 9 K $\Omega$  a 60 Hz.

También resulta importante recalcar que la impedancia en el secundario del atenuador de tensión debe ser lo más pequeña posible para no ser afectada por la impedancia de los equipos de registro.

Es posible observar que no se puede obtener una valor de resistencias que satisfaga las condiciones de carga para ambos casos de voltaje (TTR y Tensión de prueba). Por tal motivo, este atenuador de tensión, solo será adecuado para la medición de la TTR, dado que su rango de impedancias es bastante pequeña, y el atenuador de tensión no afectará su relación de reducción.

Dada la condición anterior, se procede a encontrar los valores correctos de resistencias, que presenten las impedancias de carga correctas.

Dos valores que satisfacen aproximadamente, la condición anterior son :

$$R_1 = 6.6 \text{ K}\Omega \quad \text{y} \quad R_2 = 100 \Omega$$

y la relación de reducción será :

$$n = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Siendo  $R_2$  el paralelo de  $100\Omega$  con la resistencia del galvanómetro.

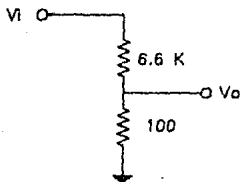
El ancho de banda estará determinado por :

$$\omega n = \left( \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} \right) \quad - - - (3.22)$$

Para un ancho de banda mayor a 100 KHz, las inductancias deben tener un valor como máximo de :

$$L_1 + L_2 = \frac{R_1 + R_2}{100E03(2\pi)} = \frac{6700}{100E03(2\pi)} = 10 \text{ mHy}$$

Con lo anterior se tienen ya los valores de diseño del atenuador de tensión.



$$\omega c \gg 100 \text{ KHz}(2\pi)$$

$$\tau < \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} < 1.5 \mu\text{s}$$

El anterior diseño, se puede construir para 3 señales simultaneas ( Trifásico ).

### 3.3 ATENUADORES DE CORRIENTE.

Los niveles de salida de los transductores de corriente, normalmente se encuentran en un valor de 5 A, debido a que se encuentran en el área de prueba y la señal ruido podría provocar errores en la medición si el nivel de salida fuera menor a este valor de corriente.

#### 3.3.1 REQUERIMIENTOS Y LIMITACIONES.

Tanto los atenuadores de corriente como los atenuadores de tensión, deben de cumplir con ciertos requerimientos, para lo cual es necesario conocer: Características de los equipos de registro, características de la respuesta e impedancia de carga al circuito. Las características de los equipos de registro ya fueron presentadas en la parte correspondiente a atenuadores de tensión.

#### IMPEDANCIA DE CARGA AL CIRCUITO.

Debido a que los transductores de corriente, se conectan en serie con el circuito de prueba, es necesario que su impedancia sea muy pequeña, para no alterar el comportamiento del circuito.

La impedancia del atenuador debe ser mucho mayor, que la propia del transductor, para que la relación de transformación en el transductor no se vea modificada.

Normalmente el valor de la resistencia del transductor es del orden de microohms y la del atenuador es de algunos ohms.

De acuerdo al diseño del transductor de corriente, la resistencia del mismo es de 400 micro-ohms. Para el caso máximo de corriente de cortocircuito en el laboratorio Salazar, la tensión entre sus terminales será de 6 ó 7 volts rms.

La impedancia de carga de los equipos de registro, no debe alterar el secundario del atenuador, es decir, tiene que tener una impedancia bastante más grande, que la del secundario del atenuador de corriente, ya que con el paralelo de ambas predomina la de menor valor.

Dicho lo anterior, podemos determinar las características de impedancia que debe cumplir el atenuador :

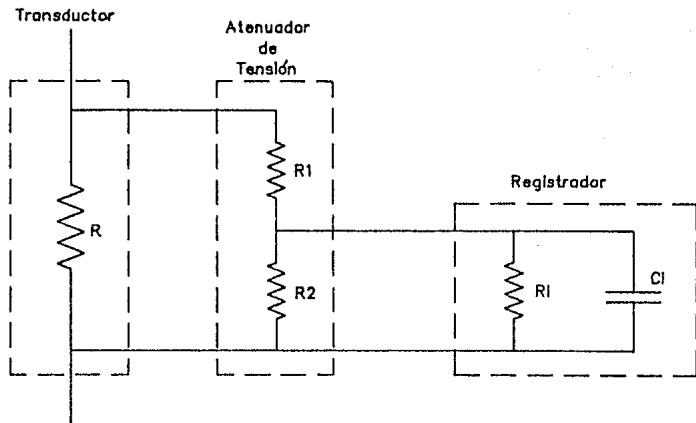


Fig. 3.7 Circuito representativo de la impedancia de carga del atenuador de corriente.

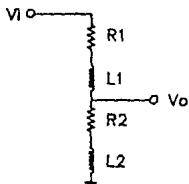
Donde se observan las condiciones siguientes :

$$R_1 + R_2 \gg R \quad \text{y} \quad R_1 \gg R_2 \quad \text{-----} \quad (3.23)$$



## CARACTERISTICAS DE LA RESPUESTA.

El tiempo de respuesta y el ancho de banda del atenuador de corriente, están determinados por :



$$\tau = \left( \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$\omega_{\text{m}} = \left( \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} \right)$$

Con lo cual se establecen las condiciones de diseño, de los atenuadores de corriente.

### 3.3.2 DISEÑO DE ATENUADORES DE CORRIENTE.

Los atenuadores de corriente, dado que conforman el secundario del transductor, conducen corriente del orden de 5 A rms. Esta corriente puede alterar las condiciones del atenuador debido a calentamientos, por tanto el material de construcción del mismo debe ser capaz de soportar temperaturas grandes y conservar su relación de transformación.

Un material con las características apropiadas, para ser utilizado en la fabricación de un atenuador de corriente, es el Nicromel (Níquel y Cromo).

Dado que la salida del transductor de corriente, puede alcanzar un valor aproximado de 6 V rms y el atenuador va a soportar una corriente aproximada de 5 A rms, la resistencia del atenuador estará determinada por :

$$\frac{V}{I} = R$$

$$\frac{6}{5} = 1.2 \Omega$$

como se maneja una tensión de entrada al atenuador de 6 V rms, y como la tensión máxima de salida del atenuador no debe exceder de 2 V rms debido a las características del equipo de registro, (Oscilógrafo galvanométrico) una relación de reducción que cubre ampliamente este margen es de 1:10, es decir :

$$R_1 = 1 \Omega \quad ; \quad R_2 = 0.1 \Omega$$

$$V_1 = 5 \text{ V} \quad ; \quad V_2 = 0.5 \text{ V}$$

De las características de los equipos de registro, se puede observar que la impedancia más pequeña es del orden de 39 ohms (Oscilógrafo galvanométrico), la cual no altera la relación de reducción del atenuador de corriente.

Tomando en cuenta que el ancho de banda está determinado por :

$$\omega_n = 2 \pi F_c = \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2}$$

y se quiere que sea cuando menos de 2 MHz, entonces :

$$L_1 + L_2 = \frac{1 + 0.1}{2 \pi (2 \times 10^6)} = 90 \text{ nHy}$$

que es el valor máximo de inductancia que debe tener para lograr un ancho de banda superior a 2 MHz.

y su tiempo de respuesta será del orden de :

$$\tau = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} = \frac{90 \text{ nHy}}{1.1 \Omega} = 80 \text{ ns}$$

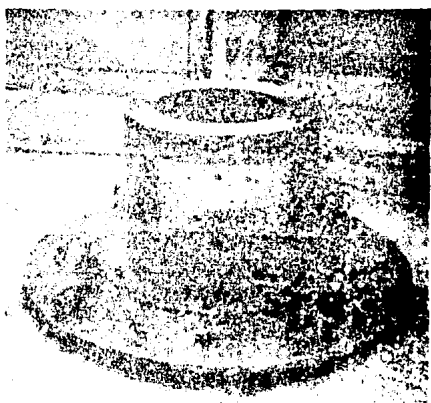
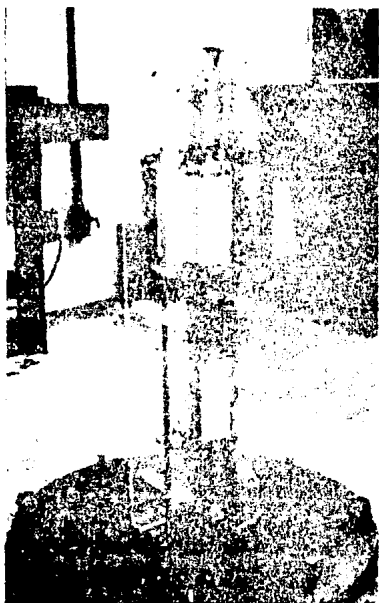
## C A P I T U L O 4

### CONSTRUCCION DE LOS TRANSDUCTORES ESPECIALES

#### 4.1 CONSTRUCCION DEL DTCR (MODIFICACION AL DTC).

La construcción del DTCR, consiste en la implementación y acoplamiento de resistencias especiales al DTC actual, que se encuentra en el laboratorio Salazar ( Vease fotografías ...).





Fotografias correspondientes al DTC del laboratorio Salazar (primario y secundario).

De acuerdo con el diseño realizado en el capítulo anterior, las resistencias en el primario y en el secundario del DTCR, no deben exceder el valor de 5400 ohms y 10 ohms respectivamente, para así no aumentar el tiempo de respuesta mas allá de 2 microsegundos.

La resistencia en el secundario (10 ohms), no requiere una construcción especial, debido a que maneja baja potencia y por tanto es posible encontrarla en el mercado. En base a lo anterior, esta sección se enfocará a la construcción de la resistencia primaria, ya que el factor (VI) es muy elevado.

#### 4.1.1 CARACTERISTICAS FISICAS DE LA RESISTENCIA EN EL PRIMARIO.

Se requiere que la resistencia se encuentre sumergida en el aceite del DTC, para que el medio aislante (Aceite), del DTCR sea el mismo.

Dicho lo anterior es necesario conocer los espacios disponibles dentro del DTC, para poder determinar la forma que debe tener dicha resistencia.

La siguiente figura, muestra los espacios disponibles dentro del DTC.

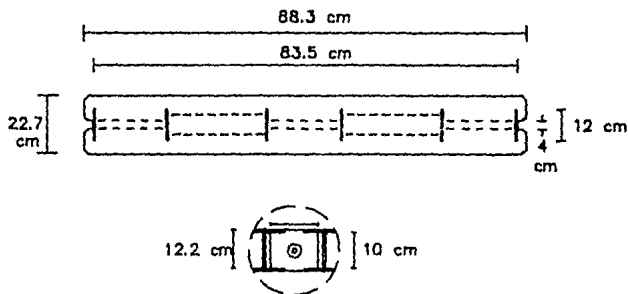


Fig. 4.1 Espacios disponibles dentro del DTC actual.

De la figura 4.1 observamos que es posible introducir resistencias en paralelo, a lo largo de la columna capacitiva, como se observa en la figura 4.2.

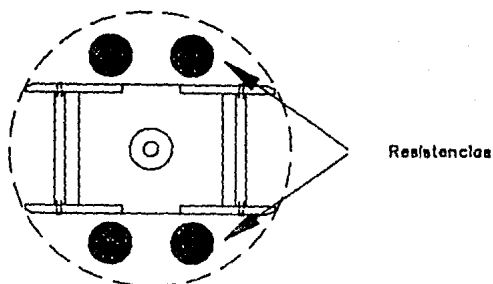


Fig. 4.2 Esquema demostrativo de la posible ubicación de las resistencias dentro del DTCR.

Estas resistencias serán de alambre tipo resistivo, enrollado en un tubo aislante, colocadas en paralelo para anular al máximo los efectos inductivos.

#### 4.1.2 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL PARA LA RESISTENCIA.

De acuerdo con la ecuación (4), se determina el calibre mínimo de alambre, para soportar las condiciones más severas de la prueba, para la medición de la TTR principalmente [8].

Es necesario hacer notar que cuando en fenómeno de TTR haya transcurrido, los capacitores  $C_h$  y  $C_l$ , se descargarán a través de la resistencia del DTCR. Por lo tanto es indispensable determinar el tiempo de descarga y verificar el calibre del alambre necesario.

De acuerdo con la tabla A del apéndice, donde se muestran los valores necesarios en las pruebas de TTR, se verifican los valores de los capacitores, para determinar la constante de tiempo en la descarga.

Para la prueba de máximo voltaje al 100% de la capacidad interruptiva, se tiene :

$$\begin{aligned}V \text{ max.} &= 62 \text{ KV} \\t_3 &= 108 \mu\text{s} \\C_1 &= 598 \mu\text{s} \\C_h &= 5.9 \mu\text{s} \\V_f &= 38 \text{ KV}\end{aligned}$$

El valor final es aproximadamente el 60% del valor máximo.

El tiempo de respuesta estará determinado básicamente por  $C_h$ , ya que es el capacitor con mayor capacidad.

$$\tau = CR = 5.9 \times 10^{-6} (3550) = 20.6 \text{ ms}$$

Se hace notar que el tiempo de descarga, es mucho mayor que  $t_3$ , por tanto en el cálculo del calibre, el tiempo que se tomará será básicamente el de respuesta en la descarga. La descarga a través de la resistencia, está determinada por la ecuación :

$$V = V_f \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

por lo que para el tiempo de respuesta mencionado :

$$V = 40 \exp(-1) = 14.7 \text{ KV}$$

Por lo tanto la corriente que circulará por la resistencia será:

$$I = \frac{14.7 \text{ KV}}{3.5 \text{ K}\Omega} = 4.2 \text{ A}$$

$$s = \sqrt{\frac{\rho I^2 (t)}{4187 c \delta \Delta \theta}} \dots \dots \dots (4)$$

$$\Delta \theta = \sqrt{\frac{T_0 (6\rho)}{\mu_0}} \dots \dots \dots (4a)$$

- Resistividad  $\rho = 1.12 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
- Calor específico  $c = 0.114 \frac{\text{K cal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$
- Peso específico  $\delta = 8412 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

sustituyendo valores en la ecuación (4) :

$$s = \sqrt{\frac{1.12 \times 10^{-3} (4.2)^2 (20.6 \times 10^{-3})}{4187 (0.114) (8412 \times 10^{-9}) (80^\circ\text{C})}} = 0.0355 \text{mm}^2$$

La cual es la area mínima del conductor, para soportar las condiciones anteriores.

Por anular efectos inductivos, se colocarán 4 resistencias en paralelo, utilizando alambre nicromel calibre 37, cuyas características son :

- $\phi = 0.114 \text{ mm.}$
- $r = 0.057 \text{ mm.}$
- $s = 0.0102 \text{ mm}^2$

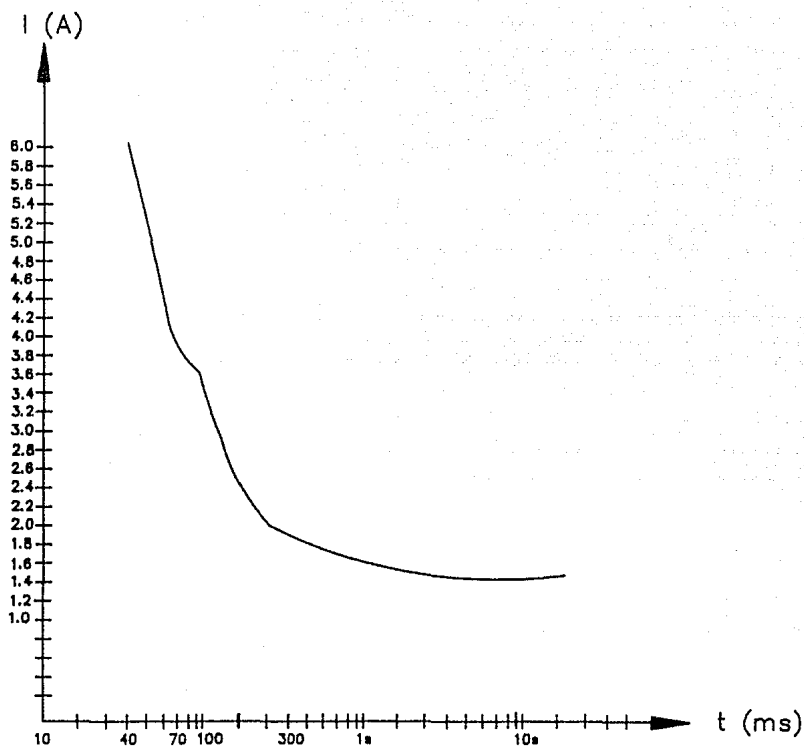
las cuales nos proporcionan una area total ( $s_t$ ) de :

$$s_t = s(4) = 0.0102 \text{mm}^2 (4) = 0.0408 \text{mm}^2$$

y así lograr un buen margen de holgura.

Para corroborar las características eléctricas del nicromel, se le realizaron pruebas de corriente contra tiempo del calibre 37, y se obtuvo la siguiente gráfica:





En la anterior gráfica se observa la curva de tiempo inverso del micromel (calibre 37), y se deduce que la corriente para cada resistencia ( $4.2/4 = 1.05$  A), la soporta indefinidamente.

#### 4.1.3 ESPECIFICACION TECNICA DE LA FABRICACION.

Para la fabricación de la resistencia, es necesario determinar la técnica a seguir para su construcción. La técnica apropiada para este tipo de resistencias, es la que se muestra en la siguiente figura:



Fig. 4.3 Técnica de esbobinado en la construcción de la resistencia primaria.

La cual consiste en embobinar el alambre resistivo en un sentido, y continuar en sentido inverso, de tal forma que los efectos inductivos son contrarios y se ven fuertemente anulados. La deficiencia de esta técnica, consiste en que la punta de entrada queda muy cerca de la punta de salida, entre las cuales puede surgir un arco eléctrico, dependiendo del voltaje aplicado, del medio aislante y de la distancia entre puntas.

El medio aislante exterior a la resistencia, es el aceite del DTC, el cual tiene una rigidez dieléctrica de de 30 KV/cm [13], y por su parte el medio aislante interior en la resistencia (entre vuelta y vuelta), será barniz aislante cuya rigidez dieléctrica es de aproximadamente 8 KV/mm [14].

De acuerdo con la figura 4.4, se determinan las ecuaciones correspondientes a la fabricación.

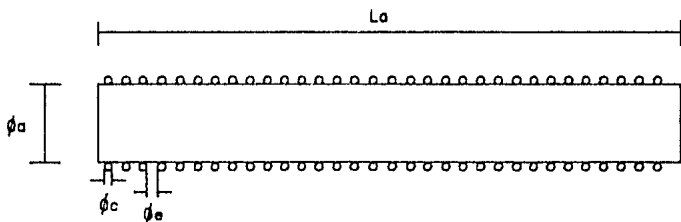


Fig. 4.4 Corte longitudinal de la resistencia primaria.

Se observa que el número de vueltas en el tubo aislante está determinado por:

$$n = \frac{2(La)}{\phi_c + \phi_e} \dots \dots \dots (4.1)$$

Donde :

- La = Longitud del aislante.
- φa = Diámetro del aislante.
- φc = Diámetro del alambre.
- φe = Espacio entre vuelta y vuelta.
- n = Número de vueltas.
- Lc = Longitud del alambre.
- Rn = Resistencia nominal del alambre.

La longitud del conductor, estará determinada por :

$$Lc = n(\pi)(\phi_a) \dots \dots \dots (4.2)$$

entonces :

$$n = \frac{Lc}{\pi (\phi_a)} \dots \dots \dots (4.3)$$

La longitud del alambre ( $L_c$ ), está en función de la resistencia deseada y de la resistencia nominal del alambre, es decir :

$$L_c = \frac{R}{R_n} \left[ \frac{\Omega}{m} \right] \quad [ m ] \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

entonces

$$n = \frac{R}{R_n(\pi)\phi_a} \quad \dots \dots \dots (4.5)$$

igualando las ecuaciones (4.1) y (4.5), tomando en cuenta el espacio entre vueltas ( $\phi_e$ ), en función del diámetro del alambre ( $\phi_c$ ), como :

$$\phi_e = K_1(\phi_c)$$

se tiene :

$$\frac{2 R_n L_a}{\phi_c(1 + K_1)} = \frac{R}{\pi(\phi_a)} \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

Existe relación entre la resistencia nominal del alambre ( $R_n$ ), con respecto del diámetro del mismo :

$$\frac{R_n}{\phi_c} = \frac{K_2}{\phi_c^3} \quad \text{siendo } K_2 = 1.3984 \times 10^{-3} \quad \frac{\Omega \cdot m}{rad}$$

para lo cual finalmente se obtiene la ecuación siguiente :

$$\frac{2(K_2)L_a}{\phi_c^3(1 + K_1)} = \frac{R}{\pi(\phi_a)} \quad \dots \dots \dots (4.7)$$

con ella es posible determinar las variables determinantes en la fabricación de la resistencia.

De acuerdo con las figuras 4.1 y 4.2, se determina que la longitud del aislante ( $L_a$ ), debe ser aproximadamente de 78cm., con un diámetro exterior de una pulgada, y de acuerdo con el calibre de alambre prestablecido (37) y un valor resistivo por cada resistencia de 16000 ohms (paralelo de las 4 = 4000 ohms), suficientes para las condiciones previstas, se tiene que el espacio entre vuelta y vuelta será de :

$$\frac{2(K_2)(L_a)(\pi)(\phi_a)}{\phi_c^3 (R)} - 1 = K_1 \quad \dots \dots \dots (4.8)$$

$$\frac{2(1.3984 \times 10^{-6})(0.78) \pi (0.0254)}{(0.1 \times 10^{-3})^3 (16000)} - 1 = 9.8$$

entonces :

$$\phi_e = 9.8(0.1 \times 10^{-3}) = 0.9 \text{mm}$$

se observa que el espacio entre vuelta y vuelta será de 1mm. aproximadamente, lo cual es bastante difícil de lograr.

Por otro lado la técnica mostrada en la figura 4.6 no es totalmente apropiada, debido a que las puntas de entrada y salida están muy juntas, por lo tanto es necesario realizar la construcción por secciones, como se muestra a continuación :

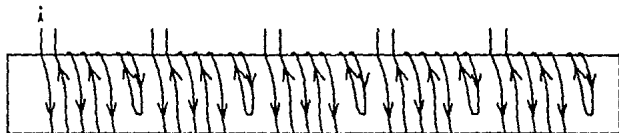


Fig. 4.5 Técnica apropiada en la construcción de la resistencia primaria.

El número de secciones dependerá de la tensión aplicada, en este caso la máxima es de 66 kV en t3, por lo que 8 secciones son adecuadas para que cada sección maneje 8 kV, eliminando así el posible arco eléctrico.

Finalmente se presenta un bosquejo final de lo que será el DTGR en la figura 4.6 .

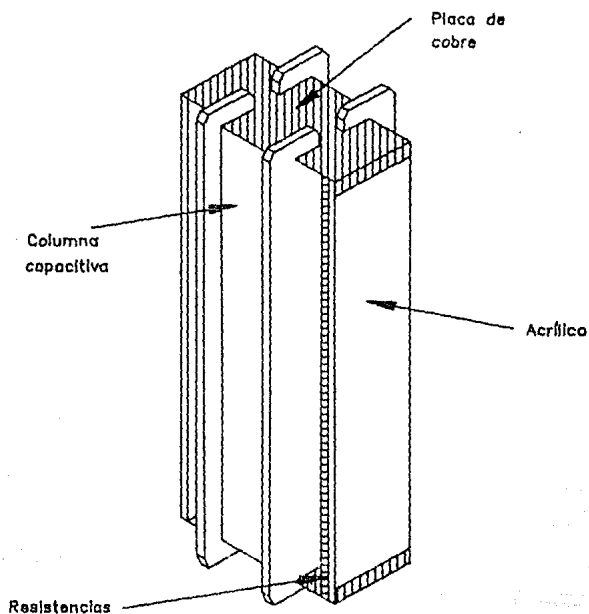


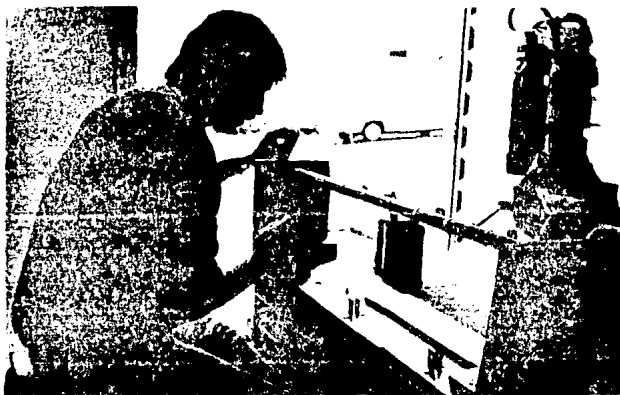
Fig. 4.6 Bosquejo final del DTGR.

#### 4.1.4 RESULTADOS DE LA CONSTRUCCION.

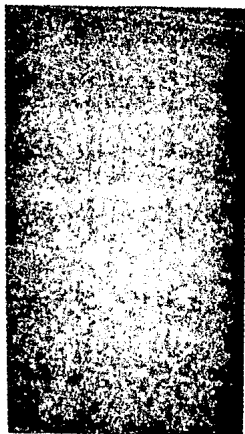
Con las especificaciones anteriores se procedió a comprar los siguientes materiales :

- 1000 m de alambre nicromel, calibre 37.
- 4 tubos de bakelita de 19mm x 25mm.
- 1 litro de barniz aislante.
- 1 placa de cobre.
- Acrílico.

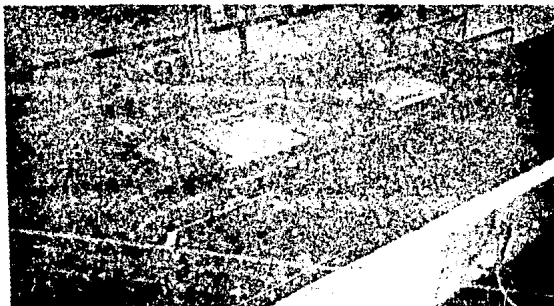
A continuación se muestran algunas fotografías, que muestran el desarrollo en la construcción, así como los elementos de apoyo que se emplearon en la misma. Siendo el valor final medido de las cuatro resistencias en paralelo de 3550 ohms.



Fotografía 2 Montaje para el esbobinado de las resistencias.



Fotografía 3 Ensamble de las cuatro resistencias.



fotografías 4a y 4b Ensamble final en el DTCR construido.



#### 4.1.5 IMPLEMENTACION DE LA RESISTENCIA SECUNDARIA DEL DTOR.

El propósito principal en la implementación de esta resistencia, es dar a conocer los valores característicos de la resistencia secundaria.

El valor ohmico de esta resistencia se restringe por la relación de reducción del DTOR y el valor ohmico de la resistencia primaria, la cual es de 3550 ohms, dado que fué el valor final medido de la misma.

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1.823 \times 10^{-3}$$

$$R_2 = 1.826 \times 10^{-3} R_1 \quad \dots \dots (4.9)$$

$$R_2 = 1.826 \times 10^{-3} (3550) = 6.48 \Omega$$

El anterior valor, es el valor correcto de la resistencia en el secundario del DTOR.

La potencia que debe disipar esta resistencia, está determinada por :

$$P = I^2 R$$

De acuerdo con la corriente establecida para la resistencia primaria (4.2 A), se tiene :

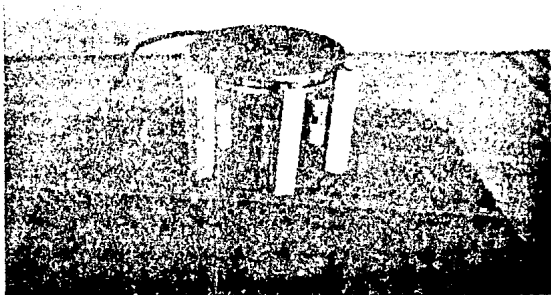
$$P = (4.2)^2 (6.48) = 114.3 \text{ w}$$

La anterior corriente, es producto de un fenómeno transitorio, y por tanto solamente circulará durante el tiempo de respuesta en la descarga de Ch a través de la resistencia del DTOR (20.6 miliseq.).

$$P = 114.3 (0.0206) = 2.35 \text{ w}$$

Con los datos anteriores, se procedió a comprar 5 resistencias de 33 ohms y 17 watts cada una (por medida de seguridad), esperando obtener un valor de 6.6 ohms finalmente.

La implementación de la parte secundaria del DTCR, se presenta en la siguiente fotografía, como resultado en la construcción del secundario del DTCR.



#### 4.2 ATENUADORES DE TENSION.

Partiendo de la representación física del atenuador de tensión, en una combinación con las características eléctricas, se realiza la especificación del material para su construcción.

##### 4.2.1 REPRESENTACION FISICA DEL ATENUADOR DE TENSION.

Dado que las corrientes a través del atenuador de tensión son muy pequeñas (miliamperes), no es necesaria la fabricación de resistencias especiales para su construcción.

La parte más importante de la distribución física del atenuador de tensión, es que se pueden anular al máximo los efectos inductivos, dependiendo de la distribución de los campos magnéticos generados por las corrientes en las resistencias, y de esta forma poder aumentar el ancho de banda y disminuir el tiempo de respuesta.

El arreglo adecuado para disminuir los efectos inductivos, se muestra en la figura 4.7.

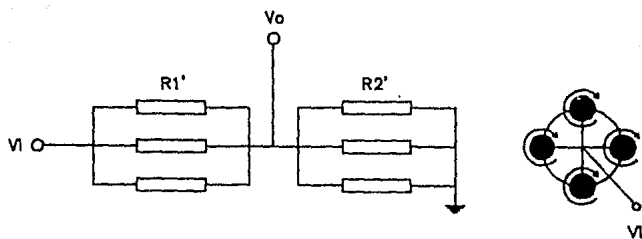


Fig 4.7 Arreglo para la disminución de efectos inductivos en el A.I.

En la figura anterior se observa que los efectos inductivos se ven anulados de una resistencia a otra, dependiendo de la distancia entre ellas.

El valor de las resistencia en el primario y secundario del atenuador esta determinado por :

$$R_{sec} = \frac{R_2}{n_2^2}$$

$$R_{prim} = \frac{R_1}{n_1^2}$$

y de acuerdo con las parámetros de diseño del capítulo anterior, se tiene :

$$R_2 = 100(n_2)$$

$$R_1 = 6600(n_1)$$

De donde  $n$  es seleccionada de acuerdo al espacio de construcción del atenuador y de la potencia de disipación de calor, que se requiere en cada resistencia. Se pretende que el valor de las resistencias en cada sección sean iguales.

El atenuador de tensión será trifásico y tendrá un blindaje o una caja protectora. La forma de la caja, por su manejo y conexión será de la siguiente forma :

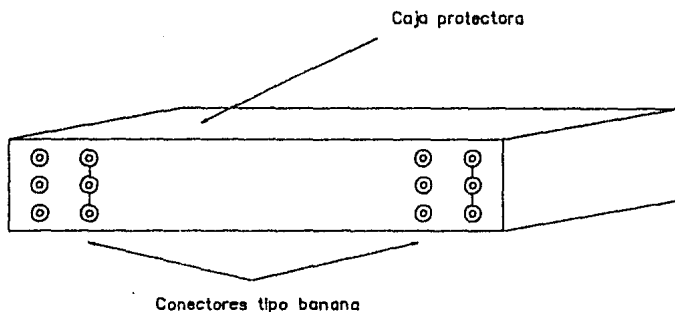


Fig. 4.8 B bosquejo de la caja protectora del A.I.

#### 4.2.2 CONSTRUCCION DEL ATENUADOR DE TENSION.

En el capitulo anterior se analizó el voltaje máximo de salida del DTC (120 V para TTR de 66 KV), el cual provoca una corriente máxima a través del atenuador de tensión de aproximadamente 18 mA.

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} = \frac{120 \text{ V}}{6700\Omega} \approx 18 \text{ mA}$$

Esta corriente es correspondiente a cada fase y provoca una disipación de calor en el primario y secundario de la siguiente magnitud :

$$P_1 = I^2 R_1 = (18 \times 10^{-3})^2 (6.6 \times 10^{-3}) = 2.2 \text{ W}$$

$$P_2 = I^2 R_2 = (18 \times 10^{-3})^2 (100) = 0.0324 \text{ W}$$

Dicho lo anterior, se pueden manejar resistencias a medio watt de potencia si seleccionamos un número de resistencias igual a 5 ( $n = 5$ ), además el efecto inductivo se ve fuertemente anulado.

Por tanto el valor de cada resistencia será :

$$R_1' = R_p (n) = 6600(5) = 33000 \Omega$$

$$R_2' = R_s (n) = 100(5) = 500 \Omega$$

Tomando valores comerciales, serán utilizadas las siguientes resistencias :

$$R_1' = 33 \text{ K}\Omega \quad \text{a medio Watt}$$

$$R_2' = 470 \Omega \quad \text{a medio Watt}$$

Las dimensiones de la caja protectora y el tubo aislante serán :

CAJA PROTECTORA

Longitud = 20 cm.

Latitud = 10 cm.

Altitud = 6 cm.

TUBO AISLANTE ( Para cada fase )

Diam. ext. = media pulgada.

Longitud = 10 cm.

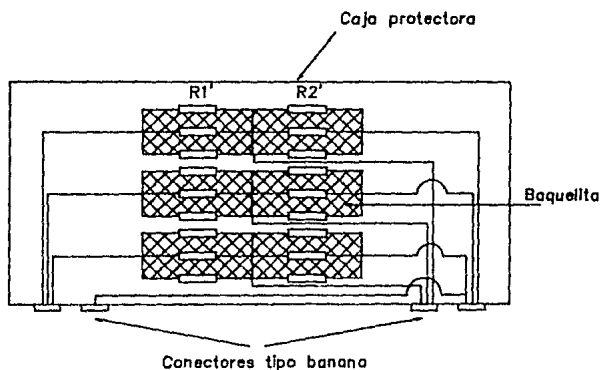
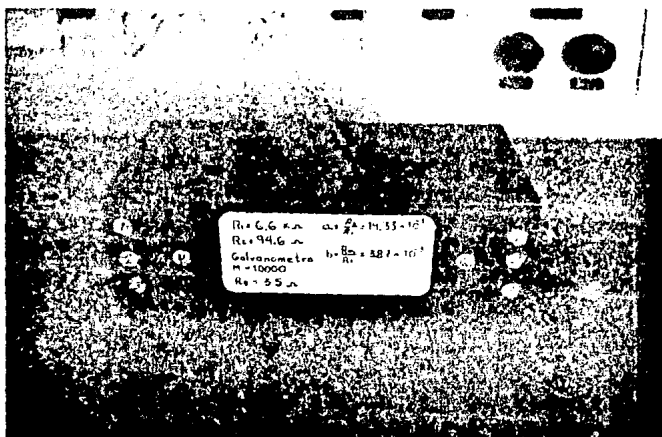


fig. 4.9 Representación final del A.I.

En la siguiente fotografía, se muestra la construcción final del atenuador de tensión.



Fotografía 5 Construcción final del atenuador de tensión.

#### 4.3 ATENUADORES DE CORRIENTE.

Los atenuadores de corriente a diferencia de los atenuadores de tensión, varían en las características del material resistivo empleado, debido a las condiciones propias de trabajo a que se somete, es decir corrientes altas.

##### 4.3.1 REPRESENTACION FISICA DEL ATENUADOR DE CORRIENTE.

En este caso las resistencias primaria y secundaria del atenuador de corriente, deben ser fabricadas con materiales especiales, dado que su disipación de calor debe ser elevada, debido a el factor :

$$P = I^2 R$$

Generalmente este tipo de material se encuentra en el mercado en forma de alambre, por lo que debe ser distribuido en un elemento aislante, a travez de su sección longitudinal, y a la vez anular al máximo los efectos inductivos.

La forma adecuada de su construcción, se muestra en la figura 4.10. ; Se observa que las corrientes que circulan en el primer embobinado, se encuentran en sentido contrario a las corrientes que circulan en el embobinado de retorno, por tal motivo los campos magnéticos que generan estas corrientes, se encuentran también en sentido opuesto, y por tanto se ve fuertemente anulado el campo magnético total, disminuyendo de esta forma al máximo los efectos inductivos.

Esta es una de las técnicas de fabricación de resistencias no inductivas, que para este caso resulta adecuada.



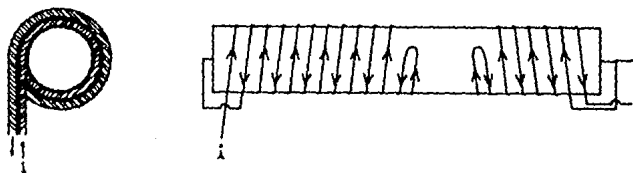


Fig. 4.10 Técnica apropiada en la construcción del A.C.

El diseño arriba ilustrado, puede ser incluido en un cilindro metálico de cobre, el cual hará la función de blindaje y retorno de corriente, tal y como se muestra en la siguiente figura:

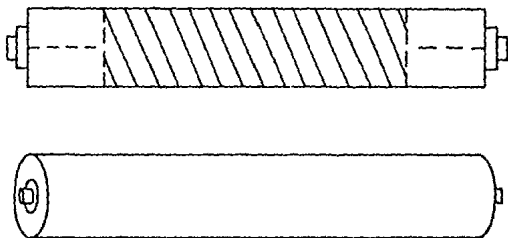


Fig. 4.11 Representación del blindaje del A.C.

#### 4.3.2 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DE CONSTRUCCION.

Las características del material de construcción se obtienen a partir de las ecuaciones (4) y (4a), de las cuales se obtiene el diámetro del alambre, así como su tiempo de respuesta, para que con esto se tengan las bases para la especificación del material.

#### 4.3.3 ESPECIFICACION DEL MATERIAL DE CONSTRUCCION.

Los tipos de alambre para la fabricación de resistencias en un atenuador de corriente, son los siguientes, entre otros:

- Nicromel ( Niquel y cromo ).
- DCD ( Aluminio-fierro-acero ).

Para este caso será utilizado el nicromel, dado que es un material no muy costoso y se consigue con cierta facilidad en el mercado, además sus características resistivas y caloríficas cumplen con los requerimientos establecidos.

El aislante utilizado para las vueltas de alambre, será simple cinta aislante, la cual soporta hasta 60 oC.

El aislante puede ser de diferentes tipos : Bakelita, isomica, mica etc.

Se selecciona tubo de bakelita de media pulgada de diámetro exterior, dado que es un material no muy costoso y es capaz de soportar hasta 150 oC.

Para el cálculo del calibre del alambre, suficientes para soportar 5 A, durante 1 seg. y una elevación de temperatura hasta de 60 grados ( condicionada por la cinta aislante ), se procede al cálculo del area del conductor, por medio de la ecuación (4) :

$$s = \sqrt{\frac{1.12 \times 10^{-3} (5)^2 (1)}{4187(0.114)(8417 \times 10^{-9})(40)}} = 0.047 \text{mm}^2$$

$$\phi = 2r = 2 \sqrt{\frac{s}{\pi}} = 0.729 \text{mm}$$

El anterior diámetro equivale al calibre 21, por lo que, por medida de seguridad se tomará el calibre 17, el cual tiene las siguientes características :

$$R = 1.05 \frac{\Omega}{m}$$

$$\phi = 1.151 \text{ mm}$$

$$T^* = \frac{\mu^o(\phi)^2}{6(\rho)} = \frac{1.256 \times 10^{-9} (1.151)^2}{6(1.12 \times 10^{-3})} = 247 \text{ ns}$$

el cual es un tiempo de respuesta bastante aceptable. Por tanto dadas las características de diseño del capítulo anterior :

$$R_p = 1 \Omega$$

$$R_s = 0.1 \Omega$$

se requiere de 1m y 10cm de alambre para el primario y secundario respectivamente.

Las dimensiones del tubo aislante y el tubo de cobre, son dependientes, de las dimensiones de las resistencias, luego entonces :

#### TUBO DE COBRE

Diam. interior = 1 pulgada.

Longitud = 12 cm.

#### TUBO DE BAKELITA

Diam. exterior = media pulgada.

Longitud = 10 cm.

La representación final del atenuador de corriente es la siguiente :

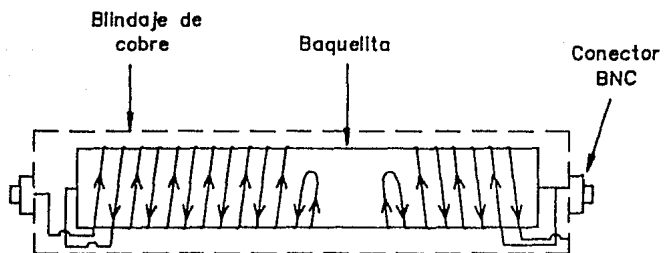
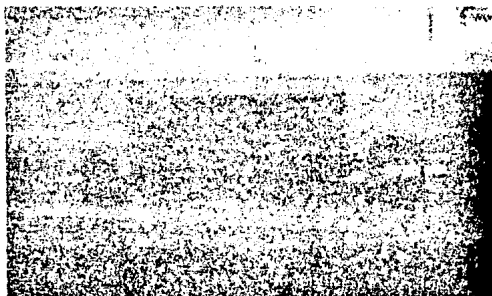


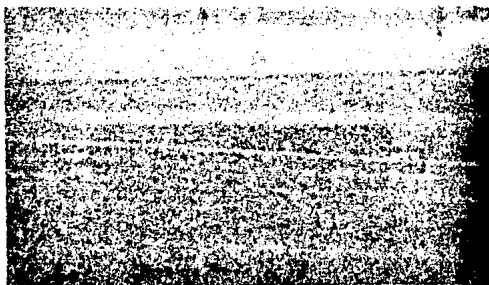
Fig. 4.12 Representación final del A.C.

#### 4.3.4 RESULTADO EN LA CONSTRUCCION DEL ATENUADOR DE CORRIENTE.

A continuación se muestran la fotografías correspondientes al atenuador de corriente.



Fotografía 6 Ensamble interior del A.C.



Fotografía 7 Ensamble final del A.C.

## C A P I T U L O 5

### PRUEBAS A LOS TRANSDUCTORES ESPECIALES

#### 5.1 PRUEBAS AL DIVISOR DE TENSION MIXTO ( DTCR ).

Para corroborar el correcto funcionamiento del DTCR (Modificación al DTC), se le realizaron algunas pruebas de importancia, como los son : La prueba de impulso por rayo, respuesta a la frecuencia, respuesta al escalón etc.

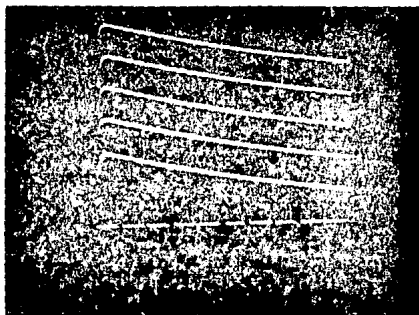
A continuación se presentan los resultados obtenidos en las mismas.

##### 5.1.1 PRUEBA DE IMPULSO POR RAYO.

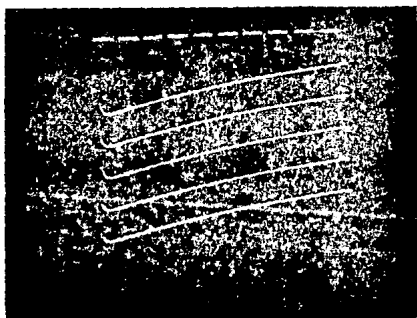
Se le aplicaron al DTCR, señales normalizadas de impulso con un valor de  $1.2 \times 50$  microsegundos, a una tensión pico de 95 KV, que es la tensión impulso normalizada, para equipos de distribución clase 15 kV.



La prueba se realizó con 5 señales de impulso positivas y 5 negativas, obteniéndose los resultados siguientes.



Fotografía 5.1 Resultados correspondientes a la prueba de impulso (positivas) al DICR.



Fotografía 5.2 Resultados correspondientes a la prueba de impulso (Negativas) al DICR.

Se observa que la señal aplicada no sufre distorsión alguna, por tal motivo la prueba resulta totalmente válida.



### 5.1.2 RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

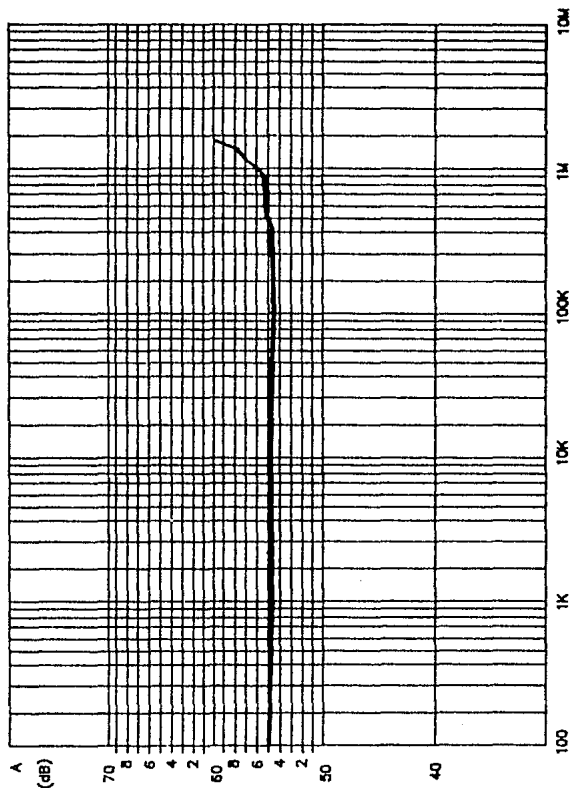
El circuito utilizado para la realización de esta prueba, es el que se muestra en la figura 3.1a.

Se procedió a variar la frecuencia y se obtuvieron los valores característicos de la prueba, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

F [ Hz ]	V <sub>i</sub> [ V ]	V <sub>o</sub> [ mV ]	t [microseg]	1/t [ Hz ]	A [ dB ]
100	30.0	53.0	9000.00	111	- 55.0
1 K	30.0	53.9	900.00	1.1 K	- 54.9
10 K	30.0	53.8	91.00	10.9K	- 54.9
100 K	30.0	55.0	9.00	111 K	- 54.7
200 K	30.0	54.8	3.10	322 K	- 54.7
300 K	30.0	54.0	2.50	400 K	- 54.8
400 K	29.8	52.0	1.90	526 K	- 55.1
500 K	29.5	52.0	1.60	625 K	- 55.0
600 K	29.1	50.5	1.40	714 K	- 55.2
700 K	29.0	50.0	1.20	833 K	- 55.2
800 K	28.8	47.5	1.10	900 K	- 55.6
900 K	28.5	44.0	1.00	1 M	- 56.2
1 M	28.0	40.0	0.88	1.13M	- 56.9
1.1 M	27.6	38.0	0.82	1.25M	- 57.2
1.2 M	27.0	34.5	0.75	1.33M	- 57.9
1.3 M	26.7	32.0	0.70	1.42M	- 58.4
1.4 M	26.0	27.0	0.64	1.56M	- 59.6
1.5 M	25.0	24.0	0.61	1.63M	- 60.3

El diagrama de Bode correspondiente a la tabla anterior se presenta a continuación.

# DTCR



$$A = 20 \text{ Log } (V_o/V_i)$$

Del anterior diagrama de Bode se observa que el ancho de banda obtenido de este divisor de tensión es de 1 MHz a 3 dB, que comparado con el DTC puro (400 KHz), resulta más eficiente.

### 5.1.3 RESPUESTA AL ESCALON.

El circuito utilizado para la respuesta al escalón fué el siguiente :

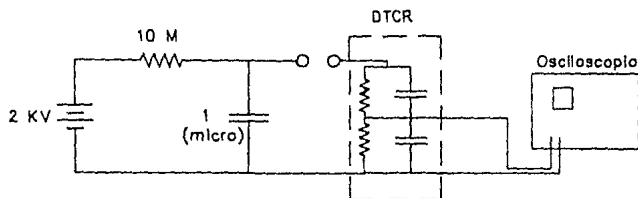
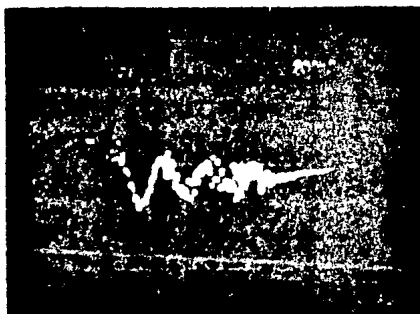


Fig 5.1 Circuito utilizado para la respuesta al escalón del DTCR.

Obteniéndose el siguiente oscilograma :



Fotografía 5.3 Oscilograma correspondiente a la respuesta al escalón del DTCR.

En la fotografía 5.3 las variaciones mostradas, corresponden a la tensión de arco existente entre los gaps en el momento de la aplicación del escalón.

Se observa también, que existen oscilaciones durante el tiempo de respuesta, las cuales corresponden a la baja inductancia del DTCR.

La tensión aplicada fue de 2000 Volts, por lo que para la reducción del DTCR (54B.5), se espera la tensión en el secundario de 3.6 V aproximadamente, con lo cual podemos decir que se alcanza este nivel de voltaje a los 2 microsegundos, observándose que el tiempo de respuesta se encuentra dentro del margen esperado.

#### 5.1.4 MEDICIONES COMPLEMENTARIAS.

Con un puente universal se procedió a obtener los valores de capacitancias, resistencias e inductancias en el DTCR, obteniéndose los siguientes valores :

$C1 = 517 \text{ pf}$

$C2 = 282 \text{ nf}$

$R1 = 3550 \text{ ohms}$

$R2 = 6.48 \text{ ohms}$

$L1 \text{ y } L2 \text{ aproximadamente cero.}$

## 5.2 PRUEBAS AL ATENUADOR DE TENSION.

Para el atenuador de tensión solo fue necesario realizar la prueba de respuesta a la frecuencia, dado que no es inductivo y sus niveles de tensión son bajos.

### 5.2.1 RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

Se realizó la prueba de respuesta a la frecuencia, de acuerdo al circuito de la figura 3.1a, obteniéndose la siguiente tabla y su correspondiente diagrama de Bode.

F [ Hz ]	Vi [ V ]	Vo [ mV ]	A (Vo/Vi) [ x 10 <sup>(-03)</sup> ]	A [ dB ]
10	20	285	14.3	- 36.8
100	20	285	14.3	- 36.8
1 K	20	285	14.3	- 36.8
10 K	20	285	14.3	- 36.8
100 K	20	275	13.8	- 37.2
500 K	20	260	13.0	- 37.7
800 K	20	270	13.5	- 37.3
1 M	20	275	13.8	- 37.2
2 M	20	290	14.5	- 36.7
3 M	20	320	15.0	- 36.4
4 M	20	335	15.2	- 35.0

La anterior tabla arroja resultados correspondientes a las 3 señales del atenuador de tensión, ya que son mucho muy parecidas.

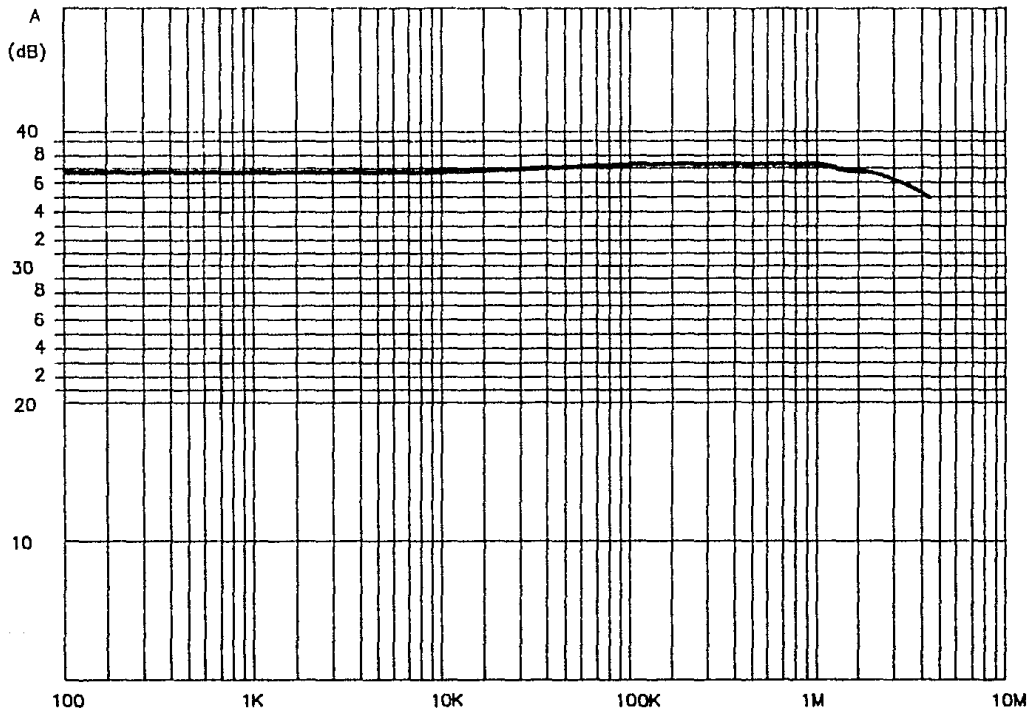
De acuerdo al diagrama de bode correspondiente, se observa que el ancho de banda es superior a los 2 MHz, por lo tanto su tiempo de respuesta es mucho muy pequeño ( nanoseg. ).

Las mediciones de sus resistencias por medio de un puente universal fueron las siguientes :

$$R_p = 6.6 \text{ K ohms}$$

$$R_s = 94.6 \text{ ohms} \quad \text{por fase.}$$

# ATENUADOR DE TENSION



$$A = 20 \text{ Log } (V_o/V_i)$$

### 5.3 PRUEBAS AL ATENUADOR DE CORRIENTE.

Al atenuador de corriente se le realizó la prueba de respuesta a la frecuencia, la medición de sus resistencias e inductancias y se determinó la curva de la relación de reducción con respecto a la corriente aplicada.

#### 5.3.1 RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

Se realizó la prueba de respuesta a la frecuencia al atenuador de corriente de acuerdo al siguiente circuito :

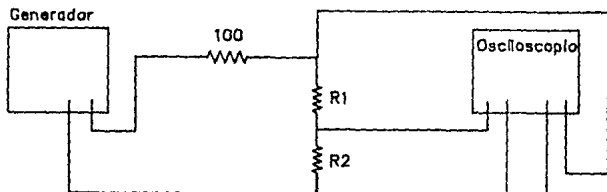
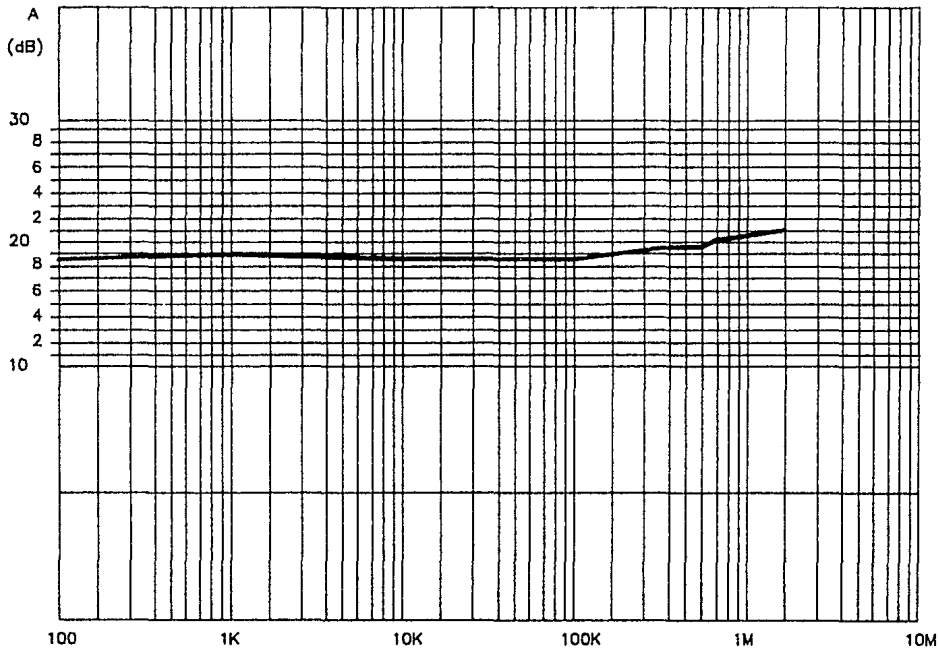


Fig 5.2 Circuito utilizado para la respuesta a la frecuencia del A.I.

Y se obtuvo la tabla correspondiente :

F [ Hz ]	V <sub>i</sub> [ mV ]	V <sub>o</sub> [ mV ]	A [ V <sub>o</sub> /V <sub>i</sub> ]	A [ dB ]
100	200	23.0	0.115	- 18.7
1 K	200	22.2	0.111	- 19.0
10 K	200	22.0	0.115	- 18.7
100 K	200	22.5	0.112	- 18.9
200 K	215	24.0	0.111	- 19.0
400 K	290	29.5	0.100	- 19.8
600 K	350	35.0	0.100	- 19.8
800 K	430	41.0	0.095	- 20.4
1 M	500	47.0	0.094	- 20.5
1.2 M	550	52.5	0.095	- 20.4
1.4 M	640	59.5	0.092	- 20.6
1.6 M	695	64.5	0.092	- 20.6
1.8 M	740	68.0	0.091	- 20.7
2 M	750	70.0	0.093	- 20.7

# ATENUADOR DE CORRIENTE



$$A = 20 \text{ Log } (V_o/V_i)$$



Del diagrama de Bode, se observa que el ancho de banda del atenuador de corriente, va mas allá de 2 MHz.

### 5.3.2 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DEL ATENUADOR DE CORRIENTE.

La prueba consiste en determinar la relación de reducción del atenuador, variando la corriente, es decir verificar su comportamiento con respecto a los incrementos de temperatura debidos a los incrementos de corriente.

El circuito utilizado fue el siguiente :

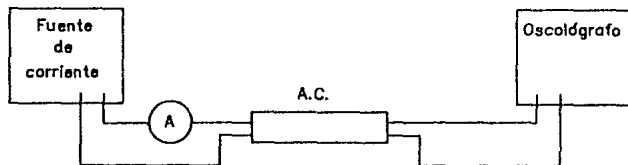


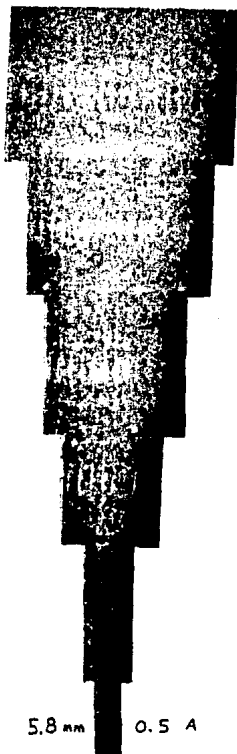
Fig 5.3 Circuito utilizado en la determinación de la constante del atenuador de corriente.

De acuerdo a los resultados obtenidos del oscilógrafo galvanométrico (Papel fotosensitivo), que se presentan en la siguiente página, se obtiene la siguiente tabla y su gráfica correspondiente.

$I_p$ [ A ]	$I_s$ (Deflexión del galvanómetro) [ mm ]
0.5	5.8
1.0	11.1
2.0	21.8
3.0	31.0
4.0	41.0
5.0	51.0

51 mm.

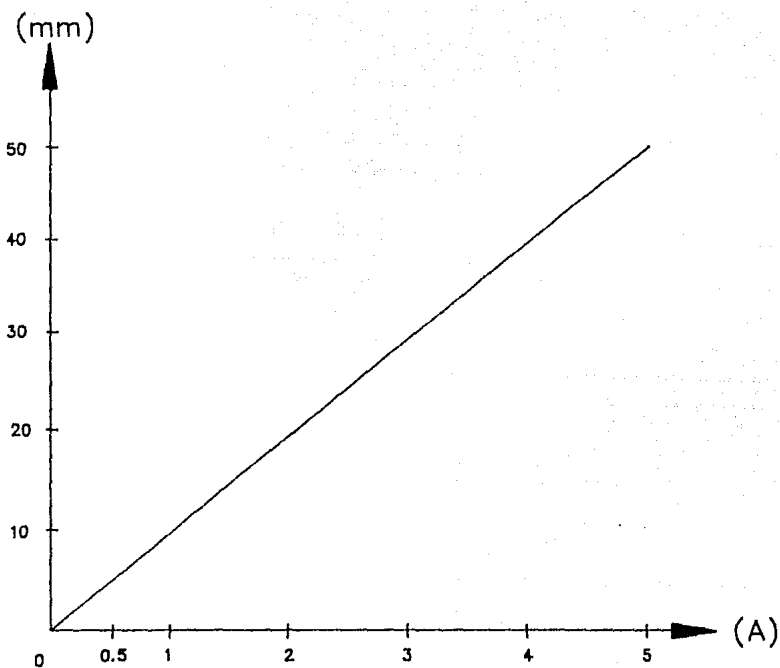
5 A



5.8 mm

0.5 A

El resultado de la prueba mostrado arriba, nos muestra la deflexión luminosa en el galvanómetro del OSCILOGRAFO GALVANOMETRICO, producida por la corriente en el secundario del A.C.. La deflexión es proporcional a la corriente que la produce, obteniéndose una respuesta completamente lineal, como se muestra en la siguiente gráfica



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al Término de la presente tesis, en base al trabajo desarrollado, y de las experiencias obtenidas en el diseño y la construcción del mismo, así como de las pruebas realizadas, se obtienen conclusiones y se pueden determinar recomendaciones de carácter importante y por demás interesante.

El trabajo principal de esta tesis, se enfocó prácticamente al rediseño del DTC, que se encontraba en el laboratorio Salazar, el cual en el término de esta tesis, se ha convertido en forma satisfactoria en un divisor mixto (DTCR). El porqué el enfoque a este elemento, lo determina el hecho de que en el país existen pocos especialistas en este ramo y por tanto resulta demasiado costosa su fabricación.

Los otros elementos temas de esta tesis, solo son elementos complementarios, del sistema de medición, por lo que no es muy difícil su realización.

A continuación se presentan las conclusiones y las recomendaciones pertinentes de la presente tesis.

- El DTC que se encontraba en el laboratorio Salazar, tenía características deficientes en su respuesta, tales como respuesta de tipo oscilatoria permanente, debido a la inductancia propia de los capacitores y de los elementos de conexión, que nos hacía la medición menos confiable. Dentro de sus ventajas, el tiempo de respuesta era muy bajo (nanosegundos), y sus niveles de voltaje sobrepasaban los 100 KV. Sin embargo esta última característica de nada sirve si su respuesta es de tipo oscilatoria y la medición es incierta.

- Al realizar el divisor mixto (DTCR), se elimina la respuesta oscilatoria debido a su resistencia, sin embargo el tiempo de respuesta aumenta a 1.7 microsegundos, el cual para las condiciones de prueba del lab. Salazar, cubre óptimamente su funcionamiento.

La deficiencia de este DTCR, es que su nivel de tensión está fuertemente restringido (solamente para la capacidad del lab. Salazar), y de ser utilizado para niveles de tensión mas elevados, posiblemente existirían descargas entre vueltas de alambre en el elemento resistivo y destruirían el aislante en el mismo, orillando a la instalación de una nueva resistencia.

Aumentar el nivel de voltaje en le DTCR, hubiera implicado aumentar el valor de la resistencia y consecuentemente mayor longitud en el elemento resistivo, lo que para fines prácticos resulta casi imposible debido a los espacios existentes y disponibles en el DTC.

Si se requiere aumentar un poco mas el nivel de tensión, se recomienda aumentar el número de secciones a lo largo de la columna resistiva, para disminuir el riesgo del posible arco eléctrico entre vuelta y vuelta. Sin embargo el aumento de voltaje proporcionaría mayor corriente y se tendría que aumentar el valor resistivo, dado que la resistencia está diseñada para una corriente máxima determinada.

Partiendo de el hecho de una modificación. es obvio pensar que se restringe el rediseño por lo ya establecido. Por tanto para realizar el DTCR óptimo, es necesario realizar el estudio completo del mismo.

Sin embargo esta construcción, significa un punto de partida hacia la optimización en el sistema de medición del Lab. Salazar.

- Los elementos complementarios tales como el atenuador de corriente y el atenuador de tensión, cumplen satisfactoriamente con los requerimientos especificados, dejando así las bases necesarias para el diseño de trabajos futuros.

En las pruebas en el laboratorio realizadas a estos elementos, se observó que su ancho de banda es mayor a 2 Mhz, y que su respuesta es lineal en toda la gama de la variable a medir.

El método de construcción de los elementos resistivos, puede ser utilizado cuando se requieran resistencias con un valor bajo de inductancias.

Cualquier equipo eléctrico desarrollado, necesita de la verificación de su funcionamiento, es decir, las pruebas necesarias para su aprobación. Este tipo de pruebas se llevan a cabo en los laboratorios de cortocircuito, como tal es el caso del Lab. Salazar. Dicho lo anterior se observa la importancia futura que pueda tomar este trabajo de investigación y desarrollo

Finalmente y de manera personal, este trabajo ha dejado una gran enseñanza en mi vida profesional y personal, comprobando por primera vez, que el estudio y el razonamiento es posible comprobarlo de manera práctica. Esperando ser punto de apoyo para todos aquellos compañeros que quieran desarrollar una vida profesional en el ramo de la investigación, que tanta falta hace al país.

## R E F E R E N C I A S

- [1] Rubén D. Ochoa V. "Construcción del laboratorio de corto circuito por el método sintético del IIE en Salazar ", IEEE sección México. Mexico 86, artículo 115 Guadalajara Jal., Octubre 1986.
- [2] Jaime carrillo, Rubén D. Ochoa V. ; "Descripción del sintético en media tensión" ; Estudio interno IIE; México, D.F. , Agosto 1983.
- [3] Romeo I. Rodríguez R.; "Dispositivo y control de disparo del circuito de tensión de un laboratorio de pruebas de corto circuito por el método sintético"; México 1985.
- [4] Walter Zaengl, "Different types of divider-determination of response time and radio", Revue generale de L'electricité, number special, may 1988.
- [5] R. Canales y R. Barrera; "Análisis de sistemas dinámicos y control automático" , Limusa, mayo 1976.
- [6] Katsuhiko Ogata ; " Ingeniería de control moderna " PHH , julio 1987.
- [7] Prospero García M. " Ecuaciones diferenciales y en diferencia" UNAM 1984.
- [8] Estudio interno IIE. " Prototipo de un shunt coaxial " Joaquin Ruiz N. Ramón de la Rosa.
- [9] R. dela Rosa, A. García; " Recomendaciones sobre el tipo de sistema de transmisión a emplear y blindajes requeridos en los laboratorios de alta potencia", Estudio interno IIE, México D.F. Enero 1979

- [10] IEC Publications 56 " High Voltage AC Circuit Breakers "  
Rating and type test and routine test.
- [11] Estudio interno IIE " Pruebas al DTC de lab. Salazar "  
M.I. Andrés Lopez Ochoa.
- [12] Manual del osciloscopio digital marca NICOLET 2090-206  
Manual del oscilógrafo galvanométrico VISICORDER  
HONEYWELL 1508 B.
- [13] NOM-J-123-1982 Aceite aislante para transformadores.
- [14] ANSI/IEEE " Standard general requeriments for  
liquid-immersed "



- [10] IEC Publications 56 " High Voltage AC Circuit Breakers " Rating and type test and routine test.
- [11] Estudio interno IIE " Pruebas al DTC de lab. Salazar " M.I. Andrés Lopez Ochoa.
- [12] Manual del osciloscopio digital marca NICOLET 2090-206 Manual del oscilógrafo galvanométrico VISICORDER HONEYWELL 1508 B.
- [13] NOM-J-123-1982 Aceite aislante para transformadores.
- [14] ANSI/IEEE " Standard general requeriments for liquid-immersed "

# APENDICE

Capacidad Interrup- tiva.	V Nominal kV	t <sub>3</sub> micro- seg.	F kHz	V TTR kV	C1 nf	Ch microfaradlos	R1 ohms	Lh mHy
30%	3.6	9	56	6.6	4.4 a 11.4	5.8 a 14.8	493 a 194	4.3 a 1.7
	7.2	11	45	13	3.7 a 9.42	2.9 a 7.5	799 a 314	8.7 a 3.4
	12	13	38	22	3.1 a 8	1.75 a 4.45	1070 a 421	14.5 a 5.7
	17.5	15	33	32	2.6 a 6.8	1.2 a 3	1409 a 555	21.2 a 8.37
	24	19	26	44	2.9 a 7.4	1.03 a 2.6	1576 a 620	29.1 a 11.4
	36	23	22	66	3 a 7.8	0.7 a 1.9	1887 a 743	43.7 a 17.2
60%	3.6	17	29	6.6	30.5 a 77.5	15.2 a 38.7	128 a 50	2.1 a 0.86
	7.2	22	22	13	26.3 a 67	13.1 a 33.5	195 a 77	4.3 a 1.7
	12	26	19	22	22.1 a 56.3	4.6 a 11.8	287 a 113	7.2 a 2.8
	17.5	31	16	32	21.6 a 54.9	2.5 a 6.5	338 a 133	10.6 a 4.1
	24	38	13	44	24.4 a 62	2 a 5.27	365 a 143	14.5 a 5.7
	36	46	11	66	21.9 a 55.7	1.5 a 3.9	482 a 189	21.8 a 8.6
100%	3.6	40	12	6.2	329 a 836	23 a 58	30 a 12	1.3 a 0.5
	7.2	52	9	12.3	273 a 694	16 a 41	46 a 18	2.6 a 1.3
	12	60	8	20.6	214 a 554	11.7 a 29.9	67.7 a 26	4.3 a 1.7
	17.5	72	7	20	248 a 631	6.2 a 15	80 a 31	6.3 a 2.5
	24	88	6	41	221 a 562	4.4 a 11.2	91 a 36	8.7 a 3.4
	36	108	5	62	235 a 598	2.3 a 5.9	98.9 a 38	13 a 5