

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEGOHMETRO ELECTRONICO
PARA MEDICIONES DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN
CABLES DE HASTA 600 VOLTIOS

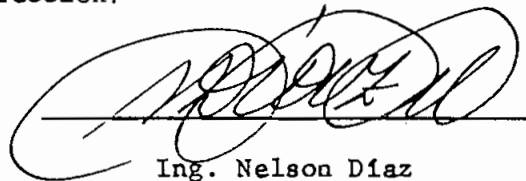
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL
TITULO DE "INGENIERO ELECTRONICO"
DE LA ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEGOHMETRO ELECTRONICO
PARA MEDICIONES DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN
CABLES DE HASTA 600 VOLTIOS

A. Patricio Rodríguez R.

Octubre de 1975

Certifico, que la presente tesis fue elaborada por el Sr. A. Patricio Rodríguez R., bajo mi dirección:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Nelson Díaz', is written over a horizontal line. The signature is highly stylized and cursive.

Ing. Nelson Díaz

Director de Tesis

A MIS PADRES Y ESPOSA

P R O L O G O

La importancia que actualmente tiene la energía eléctrica en nuestra vida, es muy evidente. No existe hoy, ciudad alguna que no necesite energía eléctrica para su alumbrado, transportes, industria, comunicaciones, etc.

La energía eléctrica, es de rápida y eficaz conversión a diferentes clases de energía, tales como la lumínica, mecánica, térmica y química; puede producirse en los lugares más convenientes y puede ser transportada económicamente a largas distancias para ser utilizada donde fuere más conveniente.

La energía eléctrica también está libre de toda clase de residuos de combustión como los humos, ceniza y emanaciones, además de que puede ser manejada con rapidez y facilidad.

En el proceso de utilización de la energía eléctrica, es imprescindible el uso de conductores eléctricos. Estos, son fabricados a base de cobre y aluminio, ya sean sólidos o multifilares y con recubrimiento aislante o sin él.

En la fabricación de un cable eléctrico, desempeña un papel muy importante el "control de calidad", ya que éste es el único medio de garantizar la utilización del mismo.

El control de calidad de un cable eléctrico, se realiza durante todo el proceso de elaboración del mismo y, de acuerdo a la clase o tipo de cable, es necesario someterlo a las diferentes pruebas especificadas por las normas de fabricación.

En relación a los cables con aislamiento de hasta 600 V., la resistencia de aislamiento es una de las pruebas que tienen por objeto evaluar las bondades del aislamiento y, por lo tanto, el tiempo de vida útil del cable. Se debe anotar, sin embargo, que la sola medición de la resistencia de aislamiento, no ofrece una garantía contra una futura falla de operación del cable.

Existen en la actualidad, diferentes métodos de medición de la resistencia de aislamiento, cada uno con sus características propias pero, que comparados con el método del megóhmetro electrónico, es decir con las posibilidades que ofrece la electrónica, no presentan las mismas ventajas que hacen del megóhmetro electrónico, un auxiliar muy útil y de fácil operación.

El presente trabajo, se ha dividido en tres capítulos principales. En el primero, se describen los diferentes métodos de medición junto con el estudio del efecto de la temperatura sobre la resistencia de aislamiento. En el segundo, se anotan las cualidades del megóhmetro electrónico, sus especificaciones, el diseño propiamente dicho y, la construcción del equipo.

Por último, en el tercer capítulo, se tiene la forma de calibración, operación y los resultados obtenidos en la medición de diferentes muestras, además de ciertas precauciones que son necesarias para su correcta operación.

Para finalizar, deseo hacer extensivo mi agradecimiento al Ing. Nelson Díaz, Ing. Alfonso Rodríguez C., a CABLEC (Cables Eléctricos Ecuatorianos C.A.) y, a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron en la realización del presente trabajo.

A. Patricio Rodríguez R.

Quito, Octubre de 1975

INDICE GENERAL

	Página
PROLOGO	VI
1.- GENERALIDADES	1
1.1.- Métodos de Medición de Resistencia de Aislamiento ..	4
1.1.1.- Método de Desviación para Bajas Resistencias	4
1.1.1.1.- Medición de la Resistencia de Aislamiento a Tie- rra	6
1.1.2.- Método de Desviación para Altas Resistencias	8
1.1.3.- Método de Pérdida de Carga	18
1.1.4.- Método de Aumento de Carga	23
1.2.- Efectos de la Temperatura sobre el Aislamiento	25
2.- DISEÑO Y CONSTRUCCION	31
2.1.- Especificaciones	33
2.1.1.- Magnitud del Voltaje de Prueba, Tiempo de Electri- ficación y Descarga de la Muestra	34
2.1.2.- Rango de Medida	37
2.1.3.- Sistema de Guarda	37
2.1.4.- Especificaciones Generales	38
2.2.- Estructura Circuitual del Megóhmetro	40
2.3.- Fuente de Poder	42
2.3.1.- Fuente de Voltaje de Prueba	42
2.3.2.- Fuente de Voltaje de Polarización	53
2.3.3.- Fuente de Voltaje de Filamento	60
2.4.- Circuito Electrónico de Medida	61
2.4.1.- Amplificador de Corriente Continua	62
2.4.2.- Sistema Multiplicador	74

	Página
2.4.3.- Conmutadores de Electrificación y Sistema de Terminales para la Muestra	78
2.5.- Construcción del Equipo	81
3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	86
3.1.- Calibración del Instrumento	87
3.2.- Procedimiento de Medida	88
3.2.1.- Calibración de los Puntos Extremos	88
3.2.2.- Operación de Medida	89
3.2.3.- Precauciones	90
3.3.- Resultados Experimentales	91
3.4.- Conclusiones	92
APENDICE N°1	
El Sistema de Guarda	93
APENDICE N°2	
Resistencia de Aislamiento y Características del Polietileno.....	96
INDICE DE REFERENCIAS	101
BIBLIOGRAFIA	102

INDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama	Página
2.1.- Diagrama de Bloques del Megóhmetro Electrónico	41
2.2.- Fuente de Voltaje de Prueba	50
2.3.- Fuente de Voltaje de Polarización	58
2.4.- Fuente de Voltaje de Filamento	60
2.5.- Amplificador de Corriente Continua	73
2.6.- Sistema Multiplicador	78
2.7.- Conmutadores de Electrificación y Sistema de Terminales para la Carga	79
2.8.- Megóhmetro Electrónico	98
2.9.- Circuitos Impresos del Megóhmetro Electrónico	99
2.10.- Panel Frontal del Megóhmetro Electrónico	100
2.11.- Fotografía del Megóhmetro Electrónico	85
3.1.- Escala del Megóhmetro Electrónico	87

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1.1.- Factores de Corrección de la Resistencia de Aislamiento a la Temperatura de 15,6°C.	30
2.1.- Características de los Métodos de Medición de la Resistencia de Aislamiento	32
2.2.- Especificaciones	39
2.3.- Características del Diodo Zener 1N3044B	45
2.4.- Requisitos para los Diodos Rectificadores de la Figura 2.2	46
2.5.- Características del Diodo 1N1566A	46
2.6.- Características de la Fuente de Voltaje de Prueba	53
2.7.- Requisitos para el Diodo Rectificador de la Figura 2.8	56
2.8.- Características del Diodo 1N5406	56
2.9.- Características de la Fuente de Voltaje de Polarización	60
2.10.- Valores de ϵ_e , ϵ_o , l_b para diferentes Valores de ϵ_g	70
2.11.- Rangos de Medida del Megóhmetro Electrónico	77
3.1.- Resultados Experimentales	91

1.- GENERALIDADES

La medición de la resistencia de aislamiento, es una de las más antiguas técnicas de prueba no destructivas que sirven para evaluar el tiempo de vida útil del aislamiento de los conductores.

La resistencia de aislamiento, es aceptada generalmente como una buena indicación de la presencia o ausencia de cualquier contaminación peligrosa o una degradación del material aislante. Sin embargo, es muy susceptible a variaciones aún por pequeños cambios de las condiciones de medición, lo cual hace que se deba tener especial atención en las variables que la afecten.

Tales variables incluyen el efecto de la temperatura, la humedad atmosférica, fugas debido a aislantes polvorientos o sucios, la duración de la medición y la selección del instrumento y de los métodos de prueba.

La temperatura tiene una gran influencia en el resultado de las mediciones. La resistencia de aislamiento decrece cuando aumenta la temperatura, por lo que todas las medidas deberán ser hechas a una misma y conveniente temperatura.

Esta temperatura, deberá ser ligeramente más alta que la temperatura ambiente. Si es imposible obtener siempre una temperatura igual para todas las mediciones, es necesario corregir las lecturas hechas con respecto a la relación temperatura-resistencia que se establecerá para cada equipo.

Estos factores de corrección en realidad no son muy verdaderos por efectos de la contaminación y envejecimiento de los aislantes, pero, si las mediciones se hacen con cuidado y se realizan inspecciones periódicas, estos errores no invalidarán las conclusiones generales con relación a la utilidad del equipo.

La humedad atmosférica puede tener un efecto muy determinante sobre la resistencia de aislamiento, debido a la condensación de la humedad sobre las superficies de aislamiento y a la absorción por parte de las mismas.

Las mediciones de la resistencia de aislamiento en atmósfera

ras de alta humedad, deben evitarse.

Un buen mantenimiento preventivo, reconocerá siempre el peligro que representa una superficie de fuga, en terminales sucios.

Antes de realizar cualquier medición de la resistencia de aislamiento, con el objeto de evaluar el aislamiento de un equipo, se deben eliminar los errores introducidos por la suciedad o por alguna superficie contaminada en los terminales o cualquier otra fuente de fuga aunque no tenga relación con el aislamiento mismo. Frecuentemente, es posible eliminar las causas de error, mediante el uso de un apropiado circuito de guarda, que generalmente está incluido en el equipo de prueba.

Un período estandarizado y definido de electrificación, se deberá establecer para la medición de la resistencia de aislamiento. El hecho de que el tiempo de aplicación del voltaje de prueba tiene una marcada influencia en los resultados, se ha utilizado en el fenómeno de la absorción dieléctrica con el objeto de evaluar la condición de equipos comerciales.

Las mediciones de la resistencia de aislamiento, son valiosas también en consideraciones con respecto a la corriente que circula por las diferentes partes de un aparato eléctrico. Uniones y contactos defectuosos; ensambles mal hechos y similares, pueden contribuir a fallas de servicio.

Los valores de la resistencia de aislamiento de tales circuitos, reúnen la información que sirve como guía acerca de su condición y además, sirven para la eliminación de futuros problemas de aislamiento.

1.1.- Métodos de Medición de Resistencia de Aislamiento.

La medición de la resistencia de aislamiento con ayuda de voltajes continuos, es de una importancia práctica muy grande ya que sirve como medio para separar los cables con aislamiento bueno de aquellos con aislamiento defectuoso.

Se sobreentiende que los valores obtenidos como resultado de las mediciones no son valores de resistencias en el mismo sentido que los valores que se pueden obtener para conductores metálicos. Las condiciones bajo las cuales generalmente se realizan las pruebas, no permiten un medio seguro para calcular qué corriente circulará finalmente a través del aislamiento, bajo la aplicación prolongada de una fuerza electromotriz constante. Además, la corriente que circulará por el dieléctrico cuando la fuerza electromotriz aplicada es periódica, especialmente en el rango de audio y radio-frecuencias, implica una resistencia que es diferente a la determinada mediante estos métodos.

En todos los métodos, la resistencia de aislamiento se determina de la medición de corriente o de una caída de voltaje bajo ciertas condiciones específicas, sin embargo, los valores obtenidos de varias muestras de un mismo material, pueden diferir mucho entre sí.

Esta diferencia se debe a la variabilidad que presenta la resistencia de una determinada muestra aún bajo condiciones similares de prueba y a la no uniformidad del material.

1.1.1.- Método de Desviación para Bajas Resistencias.

Cuando la resistencia de aislamiento es del orden de uno a diez megohmios, se pueden obtener resultados satisfactorios con ayuda de un voltímetro de corriente continua de resistencia interna conocida. El circuito de medida es el siguiente:

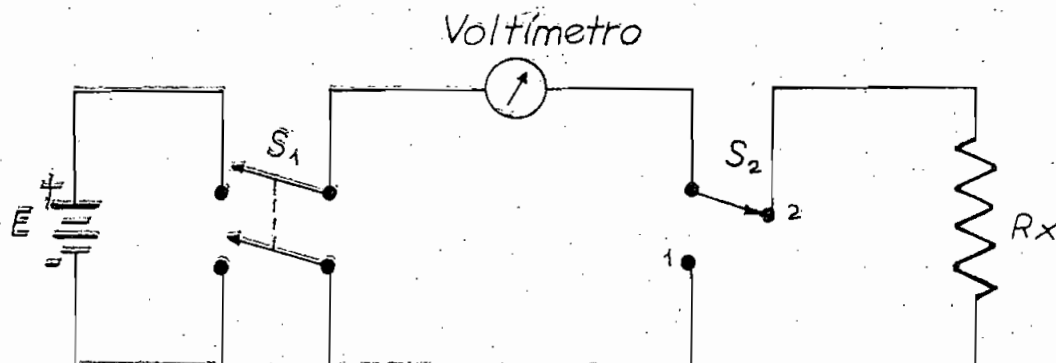


Fig. 1.1

Se hacen dos lecturas, la primera cuando el voltímetro está conectado directamente a la batería o generador de corriente continua, es decir con S_1 cerrado y S_2 en la posición 1, y la segunda cuando el voltaje se aplica al instrumento y a la resistencia desconocida en serie; S_1 cerrado y S_2 en la posición 2, permaneciendo el voltaje de medición, constante.

Si llamamos I_1 , a la lectura cuando el voltímetro está conectado directamente a la fuente e I_2 , a la lectura cuando está conectado en serie con la resistencia desconocida R_x . Si la resistencia del voltímetro es R_V , se tiene que:

$$\frac{E}{R_V} = I_1 \quad \text{y} \quad \frac{E}{R_V + R_x} = I_2$$

Dividiendo estas dos ecuaciones y despejando R_x :

$$R_x = R_V \cdot \frac{I_1 - I_2}{I_2}$$

De donde se deduce que cuanto mayor resistencia tenga el

instrumento, mayor será la resistencia que podrá medirse.

El error que se introduce en este método depende de las características del instrumento usado antes que del método en sí.

Si la fuerza electromotriz de un circuito cualquiera puede desconectarse, este método también puede ser usado para medir la resistencia de aislamiento entre los conductores de un circuito de distribución de energía eléctrica y tierra. Estas pruebas son necesarias cuando se desea investigar el estado del circuito eléctrico por ejemplo en edificios.

1.1.1.1.- Medición de la Resistencia de Aislamiento a Tierra.

El circuito de distribución puede desconectarse mediante los fusibles principales y la fuerza electromotriz necesaria se puede obtener de baterías o pilas secas.

Tres mediciones de voltaje son suficientes para determinar las resistencias R_{x_1} y R_{x_2} .

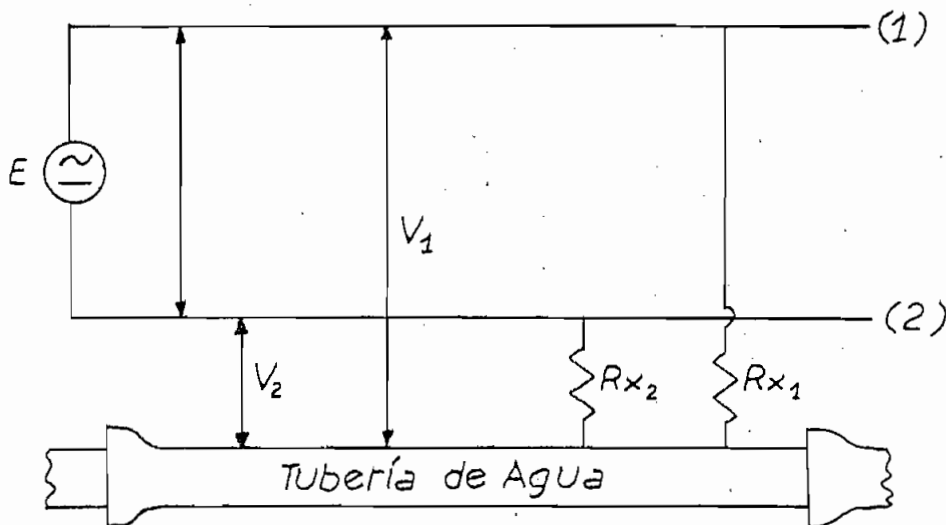
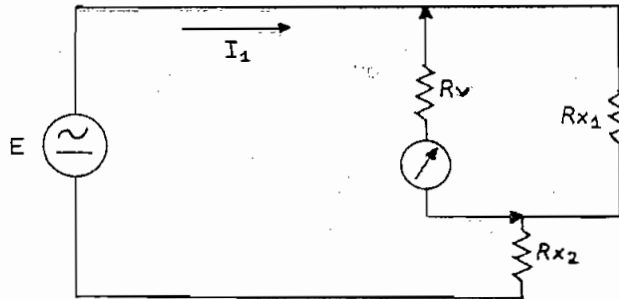


Fig. 1.2

Cuando el voltímetro se conecta entre la línea (1) y tierra su resistencia interna R_v se conecta en paralelo con R_{x_1} y la combinación de éstas, en serie con R_{x_2} , resultando el circuito equivalente:



y la corriente I_1 :

$$I_1 = \frac{E}{R_{x_2} + \frac{R_{x_1} \cdot R_v}{R_{x_1} + R_v}}$$

El voltaje V_1 , que se lee en el voltímetro es:

$$V_1 = E - I_1 \cdot R_{x_2}$$

o también:

$$V_1 = I_1 \cdot \frac{R_{x_1} \cdot R_v}{R_{x_1} + R_v}$$

entonces:

$$\frac{E}{V_1} = \frac{R_{x_2} \cdot R_{x_1} + R_v (R_{x_1} + R_{x_2})}{R_{x_1} \cdot R_v} \quad (1.1)$$

De igual manera cuando el voltímetro está conectado entre la línea (2) y tierra, podemos deducir que:

$$\frac{E}{V_2} = \frac{R_{x_2} \cdot R_{x_1} + R_v (R_{x_1} + R_{x_2})}{R_{x_2} \cdot R_{x_1}} \quad (1.2)$$

por lo tanto, de las expresiones 1.1 y 1.2 podemos escribir:

$$Rx_2 = Rx_1 \cdot \frac{V_2}{V_1}$$

Este valor puede ser sustituido en la expresión 1.1 y despejando de ella Rx_1 , tenemos:

$$Rx_1 = Rv \cdot \frac{E - (V_1 + V_2)}{V_2}$$

y de una manera similar:

$$Rx_2 = Rv \cdot \frac{E - (V_1 + V_2)}{V_1}$$

De estas dos últimas ecuaciones, podemos calcular las respectivas resistencias de aislamiento de las líneas (1) y (2).

Es evidente que como son una relación de voltajes, cualquier galvanómetro puede ser usado en lugar del voltímetro con la correspondiente resistencia en serie.

En este caso, las lecturas en la escala se usan en lugar de los voltajes. Este método no es aplicable si una de las dos líneas está conectada a tierra.

1.1.2.- Método de Desviación para Altas Resistencias.

Este método es en realidad un método de sustitución, en el cual se comparan las desviaciones del galvanómetro cuando la corriente que lo atraviesa, circula primero por una resistencia conocida y luego por la muestra.

El circuito básico de medición es el siguiente:

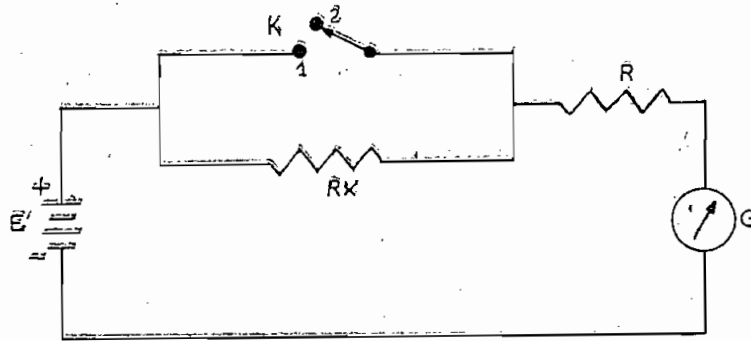


Fig. 1.3

en donde R es una resistencia conocida y R_x es la resistencia del aislamiento que se desea calcular. G es un galvanómetro de alta sensibilidad y E , es la fuente de voltaje continuo, conocido y no variable.

Con K_1 en la posición 1, la corriente que medirá G , es:
 $I_1 = E/R$, y en la posición 2, $I_2 = E/(R_x + R)$. Dividiendo estas dos ecuaciones y despejando R_x , obtenemos:

$$R_x = R \cdot \frac{I_1}{I_2} \quad \text{suponiendo que } R_x \gg R.$$

Cuando R_x es del orden de cientos de megohmios, la fuente de voltaje E y la sensibilidad del galvanómetro G , deben ser altos.

A continuación se presenta un circuito de este tipo en el cual la muestra (R_x), es un cable aislado, sumergido en un tanque de agua conductora al cual va conectado el terminal positivo de la batería y el terminal negativo se conecta al conductor del cable.

De esta forma se ha logrado un electrodo que recubre totalmente al aislamiento del cual se requiere determinar la resistencia.

La línea segmentada, representa al circuito de guarda y en realidad es solo un conductor o una placa metálica que sirve de soporte a los elementos del circuito.

También se incluye el objetivo de cada una de las partes del circuito:

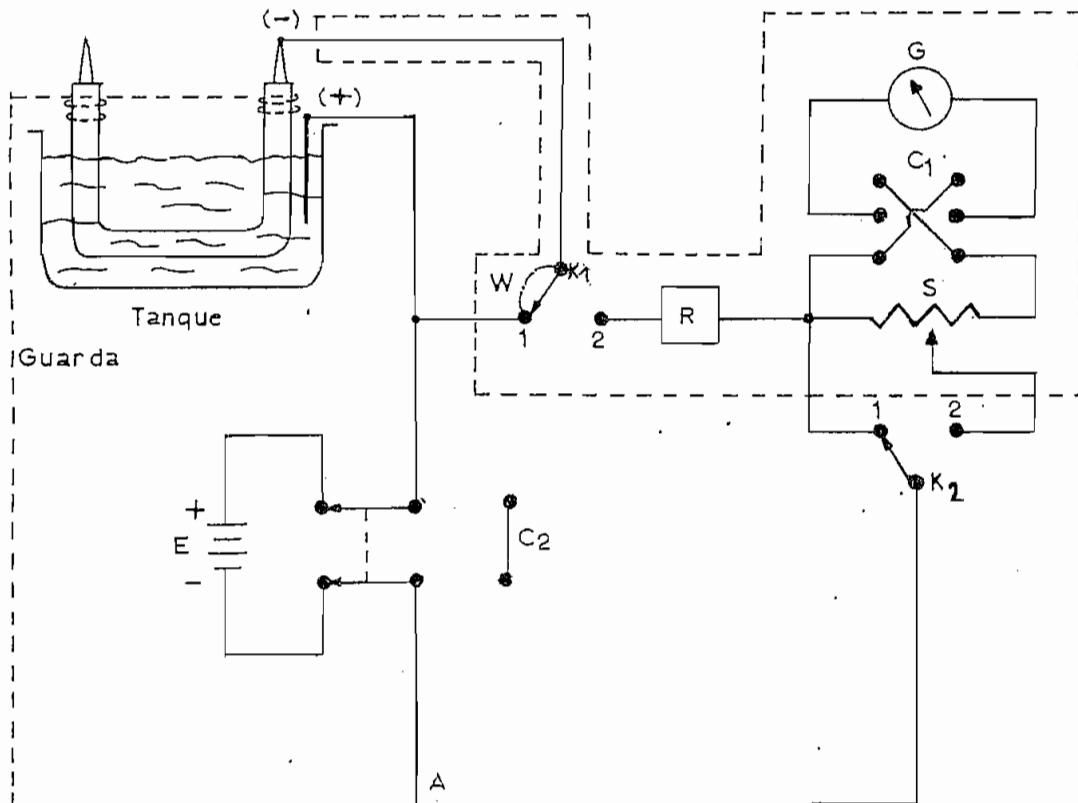


Fig. 1.4

C_1 , es un interruptor de doble polo y doble posición para invertir el sentido de la corriente del galvanómetro y mantener así las desviaciones en el mismo sentido y prevenir cualquier posible irregularidad en la lectura del cero debido a una eventual magnetización de la bobina. El shunt S, debe ser del tipo Ayrton universal.

Seleccionando la resistencia adecuada, el galvanómetro puede ser críticamente amortiguado lográndose de esta manera tomar las lecturas en el menor tiempo posible.

En este circuito pueden aparecer ciertas fuerzas electromotrices térmicas, debido a las diferencias de temperatura en el circuito del galvanómetro, C_1 y S que no presentan dificultades ya que es un circuito de resistencia constante. El único efecto que pueden

causar es que la lectura empezará desde un punto cero que es diferente del cero mecánico del instrumento.

R, es la resistencia fija conocida conectada al shunt. El interruptor K_2 , conectado como en la figura, posición 1, no permite la circulación de la corriente por el galvanómetro con el cual se logra protegerlo. Cuando se lo pasa a la posición 2, el galvanómetro entra en servicio.

El interruptor K_1 , sirve para conectar el cable a medirse al circuito y cuando está en la posición 1, cortocircuita la muestra asegurando su descarga. La batería E, se conecta a un terminal de C_2 de doble polo y doble posición que tiene cortocircuitado el otro lado, lo que permite tomar lecturas de la descarga. Uno de los terminales centrales de C_2 , está conectado al tanque en la placa positiva y el otro al terminal central de K_2 .

La batería debe ser capaz, en general, de proporcionar 500 voltios. Es usual conectar el polo negativo de ésta al conductor del cable aislado con el objeto de que el efecto causado por la electrólisis descubra cualquier falla del aislamiento.

Para la medición de R_x , se determina la constante del aparato que corresponde a $R \cdot I_1$ para lo cual con K_1 en la posición 2 cortocircuitamos R_x por medio de un alambre W, con lo cual la resistencia del circuito será $R + Pr$, siendo Pr la resistencia del galvanómetro shuntado, los terminales y la batería, pasando K_2 a la posición 2, se obtiene una lectura que es:

$$I_R = \frac{E}{R + Pr} \quad (1.3)$$

y quitando el alambre W, o sea colocando R_x en el circuito de medida:

$$I_X = \frac{E}{R + R_x + Pr} \quad (1.4)$$

Dividiendo estas dos ecuaciones y considerando que $R + Pr$ es despreciable en comparación a Rx y Pr lo es en comparación con R , se obtiene:

$$Rx = R \cdot \frac{I_R}{I_X}$$

Se debe anotar que R permanece siempre en el circuito protegiéndose de esta manera al galvanómetro.

Si el valor de Rx es del orden de 10^{10} ohmios, se necesitaría un galvanómetro de 10^{-8} A. para medir I_X con una fuente de por ej. 500 V. lo cual es muy difícil de conseguir.

Para salvar esta dificultad, se usan amplificadores de corriente continua (C-C) cuyo instrumento indicador puede estar ya en el orden de algunas decenas de microamperios.

En este caso, se calcula Rx con la siguiente ecuación:

$$Rx = R \cdot \frac{M_R \cdot D_R}{M_X \cdot D_X}$$

siendo M_R y M_X el factor de multiplicación del amplificador y D_R y D_X , las desviaciones del instrumento indicador.

Como un ejemplo de los límites a los que se puede llegar por este método, se debe indicar que el máximo error porcentual está dado por la suma de los errores porcentuales en R , las desviaciones del galvanómetro o lecturas en el amplificador y por la suposición de que las sensibilidades de ambos son independientes de las desviaciones, suposición que puede ser correcta en $\pm 2\%$ dentro del rango útil. El error en R , depende del tipo de resistencia usada, pero se pueden disponer de resistencias de 1 M Ω con un error de $\pm 0,5\%$. Con un galvanómetro o amplificador C-C que tengan una sensibilidad de 10^{-8} A. para una desviación a plena escala, 500 V., aplicados a una resistencia de $5 \cdot 10^{12} \Omega$ producirá una desviación correspondiente a 10^{-10} A. o al 1%.

Si D_{X_s} es alrededor de un cuarto de la plena escala, el error de lectura no es mayor que $\pm 4\%$, y una resistencia del orden de $2 \cdot 10^{11} \Omega$ puede medirse con un error máximo de $\pm 5,5\%$, tomando en cuenta que el error en el Ayrton shunt es despreciable. (1)

Esta forma de medir puede extenderse a rangos más altos con ayuda de un amplificador C-C o electrómetro, el cual aumenta la sensibilidad del instrumento que mide la corriente. Generalmente esto se logra a costa de la precisión, dependiendo en todo caso del aparato usado.

El voltímetro C-C y amplificador C-C o electrómetro, se conectan como se ilustra a continuación:

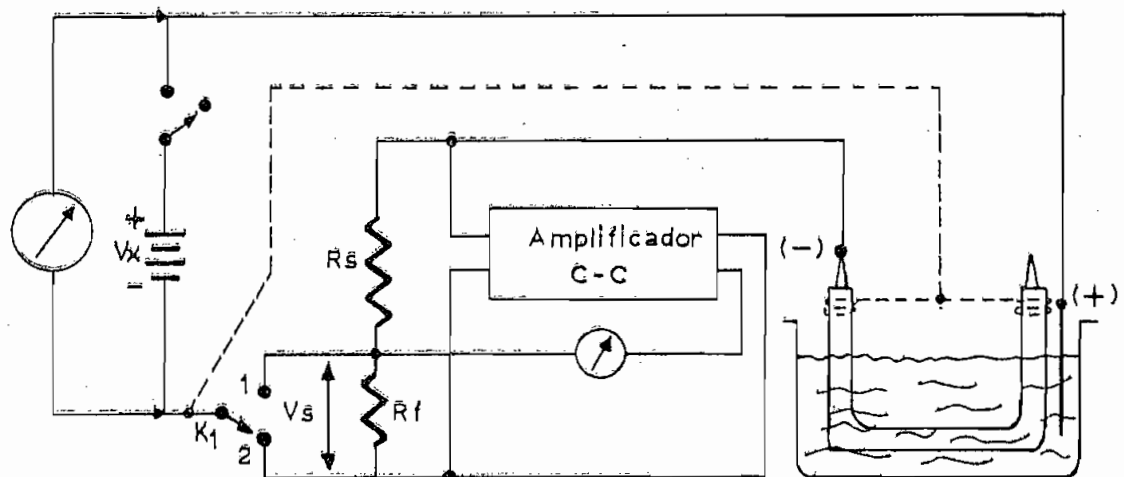


Fig. 1.5

El voltaje aplicado se mide con el voltímetro C-C, que deberá poseer tal rango y exactitud de manera que se tenga un mínimo error en la lectura de V_x . En el circuito anterior, la corriente I_x , que circula por la muestra, produce en la resistencia conocida R_s , una caída de voltaje que es amplificada y leída en el galvanómetro del amplificador. La ganancia del amplificador puede estabilizarse por medio de la resistencia de realimentación R_f , conectada a la salida del

amplificador. El galvanómetro se calibra directamente en términos del voltaje de realimentación que se determina del valor de la resistencia R_f y de la corriente de realimentación que pasa a través de ella.

Quando el amplificador es de ganancia intrínseca alta, el voltaje de realimentación V_S , difiere de $I_X \cdot R_S$ en una cantidad despreciable. Como se muestra en la Fig. 1.5, el retorno de la fuente de voltaje V_X puede conectarse a cualquiera de los terminales de R_f .

Con la conexión hecha a la unión de R_S y R_f (K_1 en la posición 1), la resistencia R_S , se conecta al circuito de medida y cualquier voltaje que se presente en la muestra es amplificado de igual manera que el voltaje continuo $I_X \cdot R_S$ a través de R_S , mientras que con la conexión hecha al otro terminal de R_f (K_1 en la posición 2), la resistencia aparente conectada al circuito de medida es R_S por la relación de la ganancia con realimentación a la ganancia intrínseca del amplificador, entonces cualquier voltaje que se presente en la muestra es amplificado por la ganancia intrínseca del amplificador.

En el circuito de la Fig. 1.6, la corriente I_X produce una caída de voltaje a través de la resistencia R_S que puede o no ser balanceado con respecto al voltaje V_S del potenciómetro de calibración.

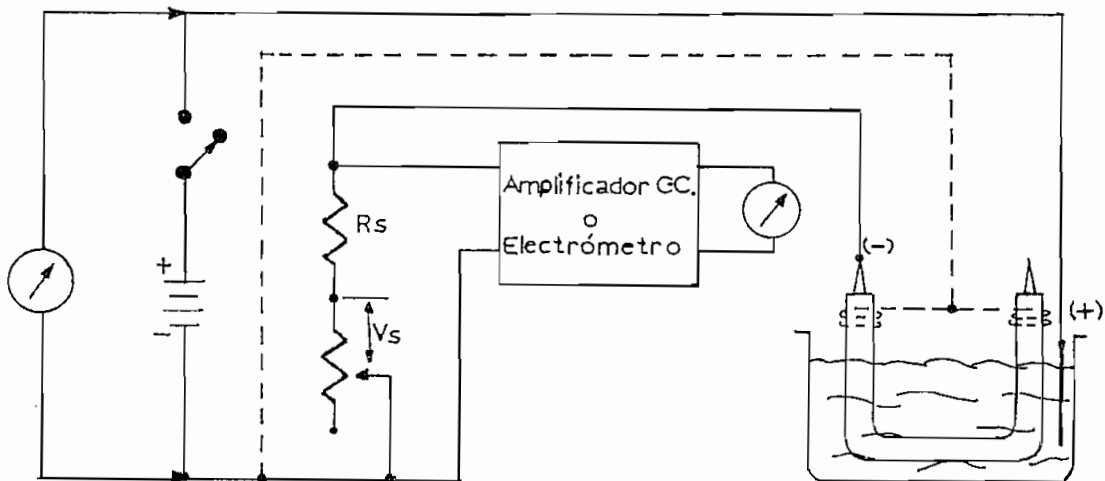


Fig. 1.6

Si no se utiliza el voltaje de referencia V_S , la caída de voltaje en la resistencia R_S es amplificada y puede leerse en el indicador del amplificador. Esto produce una caída de voltaje entre el electrodo conectado al conductor del cable y el terminal de guarda, lo cual puede ocasionar un error en la medición de la corriente, a menos que la resistencia entre el electrodo conectado al conductor y el terminal de guarda sea por lo menos de 10 a 100 veces el valor de la resistencia R_S .

Si utilizamos un voltaje de referencia, el amplificador C-C o electrómetro actúa como un detector de cero de gran sensibilidad y alta resistencia. El terminal de retorno de la fuente V_x se conecta como en la Fig. 1.6 de manera que se incluye al potenciómetro en el circuito de medida. De esta forma, cuando se logra el balance, ninguna resistencia se coloca en el circuito de medida y por lo tanto no hay una caída de voltaje entre el electrodo conectado al conductor y el de guarda.

Si ocurre un pequeño desbalance del potenciómetro, una fracción creciente de R_S , se incluye en el circuito de medida. Cualquiera voltaje que aparezca a través de la muestra, es entonces amplificado por la ganancia del amplificador.

Con los circuitos de las Figs. 1.5 y 1.6, la resistencia de aislamiento R_x , se calcula como sigue:

$$R_x = \frac{V_x}{I_x} = R_S \cdot \frac{V_x}{V_S}$$

V_x , es el voltaje aplicado, I_x , la corriente que circula por la muestra, R_S , es la resistencia estándar y V_S , la caída de voltaje en R_S indicada por el medidor colocado a la salida del amplificador C-C, electrómetro o potenciómetro de calibración.

En cuanto al error máximo en el que se puede incurrir con este método está dado por la suma de los errores porcentuales en los

voltajes V_x y V_S y la resistencia R_S . Los errores en V_x y V_S en general dependen de las características del instrumento usado.

El error en R_S es dependiente de la sensibilidad del amplificador. Para medir una corriente pequeña, mientras más alta es la sensibilidad del amplificador se necesita una resistencia estándar lo más precisa posible. Actualmente se pueden obtener resistencias del orden de $10^{11} \Omega$ y $\pm 2\%$.

Si 10 mV. a la entrada de un amplificador o electrómetro producen una desviación a plena escala con un error no mayor que el 2%, con 500 V., una resistencia de $5 \cdot 10^{15} \Omega$ puede ser medida con un error máximo de 6%, cuando el voltímetro se lee a plena escala y un 10% cuando se lee a 1/3 de la plena escala. ⁽²⁾

Podemos medir también la resistencia de aislamiento con ayuda de un puente de Wheatstone, en el cual el detector es un amplificador C-C y las resistencias de los brazos son del mayor valor posible, limitadas en general por el error inherente en cada una de ellas. El circuito de medida se muestra a continuación:

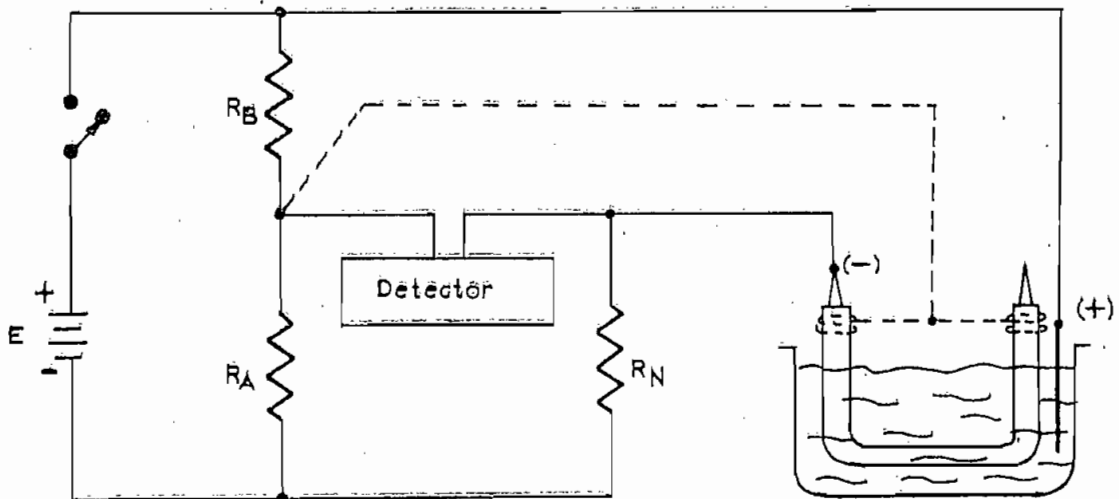


Fig. 1.7

La resistencia R_A , es una resistencia en década, que se usa para lograr el balance del puente y, el amplificador debe ser de muy alta resistencia de entrada comparada con cualquiera de las resistencias de los brazos.

En la Fig. 1.7, el electrodo conectado al conductor del cable, está a igual potencial que el de guarda, por medio de la conexión al terminal opuesto del detector, por lo tanto, la corriente de fuga del aislamiento no pasa por él y no afecta a la medición.

La resistencia desconocida R_x , se calcula de:

$$R_x = \frac{R_B \cdot R_N}{R_A}$$

en donde R_A , R_B y R_N son las resistencias de los brazos del puente.

Cuando el detector tiene la sensibilidad adecuada, el máximo error porcentual está dado por la suma de los errores porcentuales en los brazos A, B y N. Con un detector que tenga la sensibilidad de 1 mV por división, con 500V aplicados al puente y $R_N = 10^9 \Omega$, una resistencia de $10^{12} \Omega$, producirá una desviación de una división en la escala.

Asumiendo errores despreciables en R_A y R_B , y, $R_N = 10^9 \Omega \pm 2\%$ y el puente balanceado a una división de la escala del detector, una resistencia de $10^{14} \Omega$ puede ser medida con un error de $\pm 6\%$.

En todas las formas de medición descritas anteriormente, debe asegurarse que la corriente que atraviesa el instrumento de medida, es la que fluye a través de la muestra, por lo tanto, éste debe conectarse al conductor del cable y no a la placa del tanque. Si no se hace de ésta manera y se lo conecta a la placa del tanque, como éste está conectado a tierra, cualquier corriente de fuga debido a un mal aislamiento de la batería, será medida. Además, cualquier corriente que fugue desde la superficie aislante al tanque, causará errores por lo que deberá ser reducida a cero.

Para esto se atan alrededor del aislamiento unas pocas vuel-

tas de alambre flexible a pocos centímetros de los terminales, asegurándose que hagan buen contacto y se lleva el alambre al lado en que el instrumento está conectado a la batería. De esta forma la diferencia de potencial entre el conductor del cable y el alambre de guarda es prácticamente cero, de tal manera que no habrá corriente de fuga entre éste y el tanque. Consecuentemente, no se introducirán errores en la medición.

1.1.3.- Método de Pérdida de Carga.

Para medir mayores valores de resistencia de aislamiento de los que son posibles con los métodos anteriores, puede ser más conveniente este método y consiste en medir la pérdida de carga que experimenta un condensador a través de la resistencia desconocida.

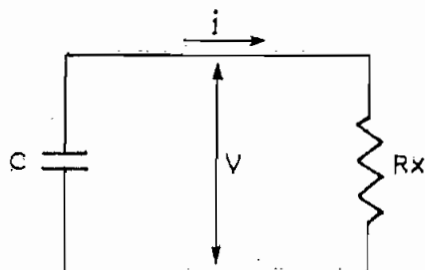


Fig. 1.8

En este circuito se asume conocido el valor del condensador C y Rx es la resistencia de la muestra. La corriente en cualquier instante es:

$$\dot{i} = \frac{dQ}{dt} = -C \frac{dV}{dt}$$

pero de acuerdo con la ley de Ohm: $\dot{i} = V/R_x$, en donde V, es la diferencia de potencial entre las placas del condensador y también entre

Los terminales de la resistencia Rx, entonces:

$$\frac{V}{R_x} = -C \frac{dV}{dt} \quad \text{o} \quad \frac{V}{R_x} + C \frac{dV}{dt} = 0$$

La solución de esta ecuación es:

$$V = V_0 \cdot e^{-t/R_x \cdot C}$$

en donde V_0 , es el voltaje inicial al cual el condensador fue carga - do. Despejando Rx se tiene que:

$$R_x = \frac{t}{C \ln(V_0/V)} \quad (1.5)$$

en donde t, es el tiempo de descarga en segundos. Si C fuera un condensador perfecto, Rx sería entonces la resistencia externa conectada entre sus terminales, pero en general, el condensador también presenta una resistencia de fuga, la cual actúa en paralelo con cualquier otra resistencia de prueba, por esto, la resistencia de fuga del condensador debe ser determinada anteriormente. Como consecuencia este método se usa para determinar la resistencia de fuga de condensadores.

A continuación se presenta un circuito que aplica este principio de medición:

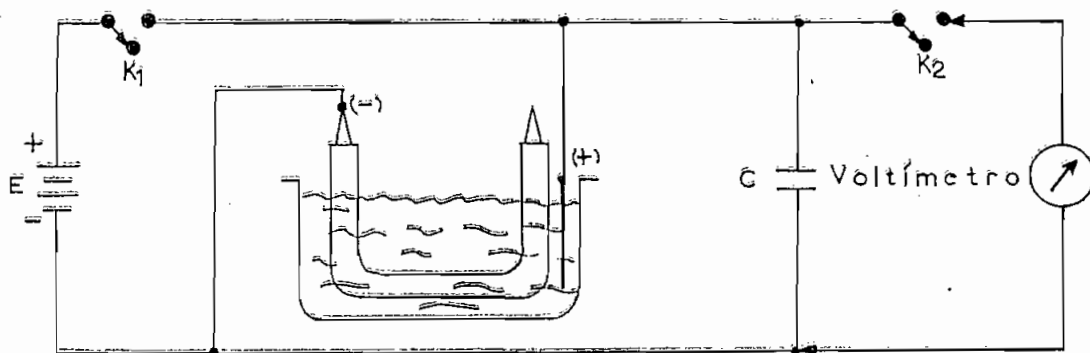


Fig. 1.9

Para calcular R_x se necesita determinar los voltajes V y V_0 , entonces se cierra K_1 y se lo abre inmediatamente, cargándose de esta forma el condensador C . El interruptor K_2 se cierra inmediatamente después de abrir K_1 y se observa la desviación que corresponde a V_0 , luego se repite la operación dejando pasar un tiempo t (segs.) entre el momento en que se carga al condensador y el instante en el cual se cierra K_2 obteniéndose una nueva desviación que corresponde a V . Con estos dos valores, por medio de la ecuación 1.5, se puede calcular el valor de R_x .

Como la resistencia del condensador no es infinita, se debe efectuar una corrección midiéndola de la misma forma pero habiendo desconectado la muestra del circuito.

Si R_{x_2} es la resistencia de pérdidas del condensador, R_{x_1} la resistencia obtenida con la ecuación 1.5, la resistencia de aislamiento de la muestra será entonces:

$$R_x = \frac{R_{x_1} \cdot R_{x_2}}{R_{x_2} - R_{x_1}} \quad (1.6)$$

El principio de medición en sí mismo es sencillo, pero la dificultad aparece en la medición de V y V_0 . Una forma conveniente de medir el cambio de voltaje, es usando un voltímetro electrostático debido a su alta impedancia de entrada o si se desea mayor sensibilidad y también alta impedancia de entrada, se puede utilizar un electrómetro de cuadrantes.

En el circuito de la figura 1.10 se aplica el método de detección de cero, en el cual la deflexión del instrumento detector, electrómetro de cuadrantes, es mantenida en cero balanceando la carga que se acumula en sus cuadrantes debido a la corriente que circula por la muestra, R_x , con una corriente producida por la variación continua de un condensador C , a través del cual se ha aplicado el voltaje.

La corriente I_R , que va del cuadrante del electrómetro no co

nectado a tierra, es el resultado de las corrientes I_X que circula a

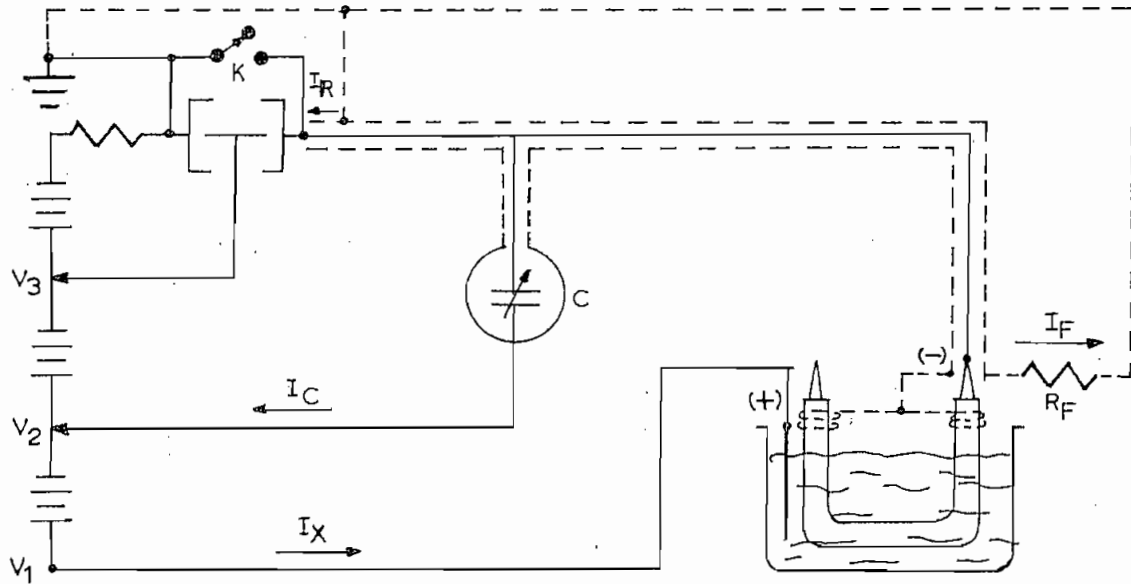


Fig. 1.10

través de la muestra, I_C la corriente de carga del condensador y de la corriente de fuga I_F a través del aislamiento del cuadrante no conectado a tierra, el terminal de menor voltaje del condensador C y del conductor apantallado que va a R_x .

Se tiene entonces que: $I_R = I_X - I_F - I_C$, y si V , es el potencial del cuadrante no conectado a tierra, se puede escribir que:

$$I_R = \frac{V_1 - V}{R_x} - \frac{V}{R_F} - (V_2 - V) \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (1.7)$$

En esta ecuación $\Delta C/\Delta t$, es la variación de la capacitancia de C en el tiempo.

Para realizar la medición se cierra el interruptor K, con lo cual los dos cuadrantes se conectan a tierra produciéndose una desvia-

ción correspondiente a ésta situación. Cuando K se abre, se aumenta C a un promedio tal que es suficiente para mantener la desviación del electrómetro en cero.

Con éste procedimiento se logra que $I_R = 0$ y por lo tanto $\mathcal{V} = 0$, entonces:

$$\frac{V_1}{R_x} = V_2 \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}, \quad y$$

$$R_x = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta C} \quad (1.8)$$

En la práctica es difícil mantener la desviación del electrómetro en cero por medio de una variación del condensador. Generalmente se tiene una mayor precisión si se permite que haya una pequeña desviación y luego se la regresa a cero variando C, ya que es por un cambio en la desviación que el observador puede enterarse si la variación de C es o no correcta.

Si suponemos que en lugar de mantener el cuadrante aislado en cero voltios, se lo mantiene a un pequeño voltaje \mathcal{V} positivo, pero el promedio de la corriente de carga I_R es cero durante la prueba, se tiene que aproximadamente:

$$\frac{V_1}{R_x} - \frac{\mathcal{V}}{R_F} - V_2 \cdot \left(\frac{\Delta C}{\Delta t} \right) = 0 \quad (1.9)$$

Si el error en el valor de R_x como resultado de despreciar el término \mathcal{V}/R_F es δ , se puede escribir que:

$$\frac{V_1}{R_x} - \frac{\mathcal{V}}{R_F} = \frac{V_1}{R_x} (1 - \delta) \quad o \quad \delta = \frac{\mathcal{V} \cdot R_x}{V_1 \cdot R_F}$$

Expresando en forma porcentual, el error sería:

$$\eta = 100 \frac{V \cdot R_x}{V_1 \cdot R_F}$$

De esta ecuación se puede observar que el error depende de los valores de R_x y R_F . Es por lo tanto muy importante mantener la desviación en cero lo más precisa posible cuando la resistencia de la muestra es en magnitud similar a la resistencia de aislamiento del cuadrante no conectado a tierra del electrómetro.

Con éste método se puede obtener una considerable precisión ya que la relación V_1/V_2 y el cambio de la capacitancia de C pueden ser exactamente determinados. Se puede observar también que la determinación de R_x no depende de una calibración precisa del voltaje del electrómetro.

1.1.4.- Método de Aumento de Carga.

Si la resistencia es extremadamente alta, la diferencia de potencial decrecerá muy lentamente, de tal manera que en cualquier tiempo razonable V no será muy diferente de V_0 y consecuentemente la relación V_0/V , estará seriamente afectada por errores de observación.

En este caso, la muestra cuya resistencia se desea medir, se coloca en serie con un condensador de buen aislamiento, de preferencia de aire, y se aplica una diferencia de potencial C-C conocida durante un tiempo t (segs.). De esta forma, la corriente que atraviesa el aislamiento de la muestra carga al condensador C a un voltaje V durante ése tiempo.

En el circuito de la Fig. 1.11, presentado a continuación, la resistencia R_x se conecta en serie con C y se tiene :

$$V = i \cdot R_x + 1/C \int i dt$$

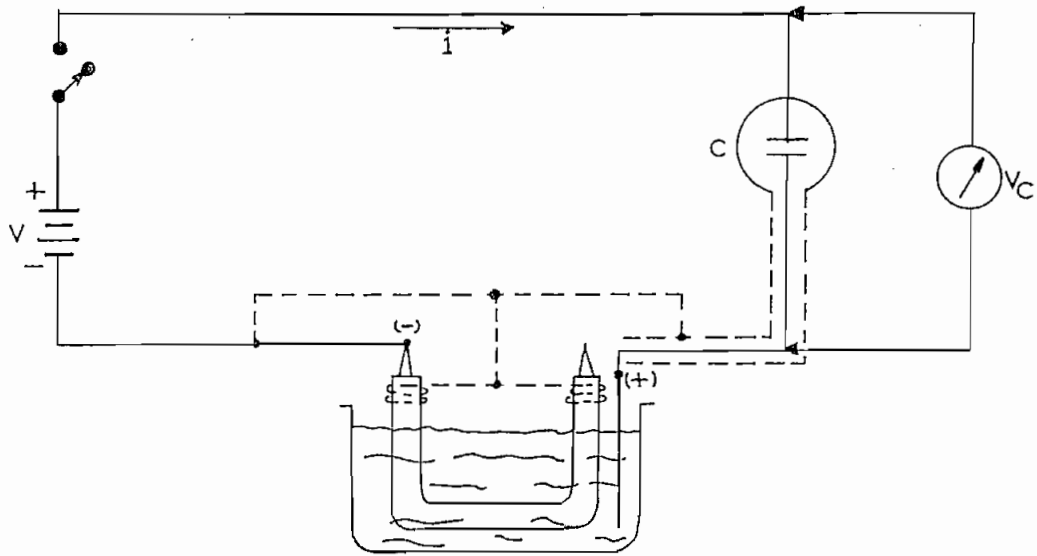


Fig. 1.11

cuya solución es:

$$i = i_0 e^{-t/C \cdot R_x}$$

siendo i_0 la corriente inicial, es decir la corriente después que se cierra el interruptor K y cuyo valor es: $i_0 = V/R_x$.

El voltaje a medirse es el del condensador, cuyo valor es:

$$V_c = 1/C \int_0^t i \, dt$$

de donde se obtiene:

$$V_c = V (1 - e^{-t/C \cdot R_x})$$

y despejando R_x :

$$R_x = \frac{t}{C \ln \frac{V}{V - V_c}} \tag{1.10}$$

El voltaje V_c acumulado luego del tiempo t , puede medirse con un voltímetro electrostático. En éste método el error es directamente proporcional a las lecturas del voltaje en el condensador y del tiempo en el cual se carga el mismo, es decir de la misma manera que en el método anterior.

Los errores y límites de sensibilidad que se han mencionado para cada uno de los diferentes métodos, no implican que éstos sean los límites de cada método por sí mismo, sino que indican las limitaciones posibles de alcanzar con los instrumentos actuales.

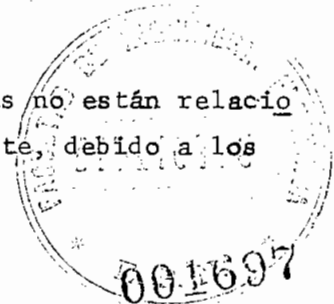
En general, en todos éstos métodos de prueba de la resistencia de aislamiento de cables, se ha asumido que la corriente que atraviesa la cubierta aislante, obedece en todo momento a la ley de Ohm.

En caso de que no se cumpla ésta y las demás condiciones que impone cada método, los resultados estarán sujetos a errores, pero en la mayoría de las situaciones de prueba que se realizan en la industria, los resultados obtenidos con un procedimiento definido de medida son suficientes ya que ésta prueba es solo una de un conjunto, necesarias para determinar la calidad y el tiempo de vida útil de un cable con cubierta aislante.

1.2.- Efectos de la Temperatura sobre el Aislamiento.

Muchos cambios en las propiedades tanto eléctricas como mecánicas de los materiales aislantes, pueden ocurrir como resultado de una prolongada exposición a altas temperaturas. Los materiales pueden volverse más blandos, pierden peso o se hacen quebradizos y tanto su composición como su estructura química se alteran. Los efectos de una alta temperatura, pueden variar muy grandemente dependiendo de la condición ambiental.

Las propiedades eléctricas de los aislantes no están relacionadas directamente con su rigidez mecánica. Usualmente, debido a los



cambios químicos y a la ausencia de humedad inicial, la rigidez dieléctrica aumenta con el tiempo y luego decrece hasta un valor que nunca llega a ser menor que el inicial hasta que el aislamiento ha perdido prácticamente toda su rigidez mecánica. Esta desintegración física da como resultado la rotura dieléctrica del aislamiento.

La deterioración física bajo la influencia de la temperatura y el tiempo, se incrementa rápidamente con un aumento de la temperatura tanto de operación como ambiental.

En cuanto a la resistencia de aislamiento de los dieléctricos sólidos, decrece cuando aumenta la temperatura, es decir que los aislantes poseen un coeficiente negativo de temperatura.

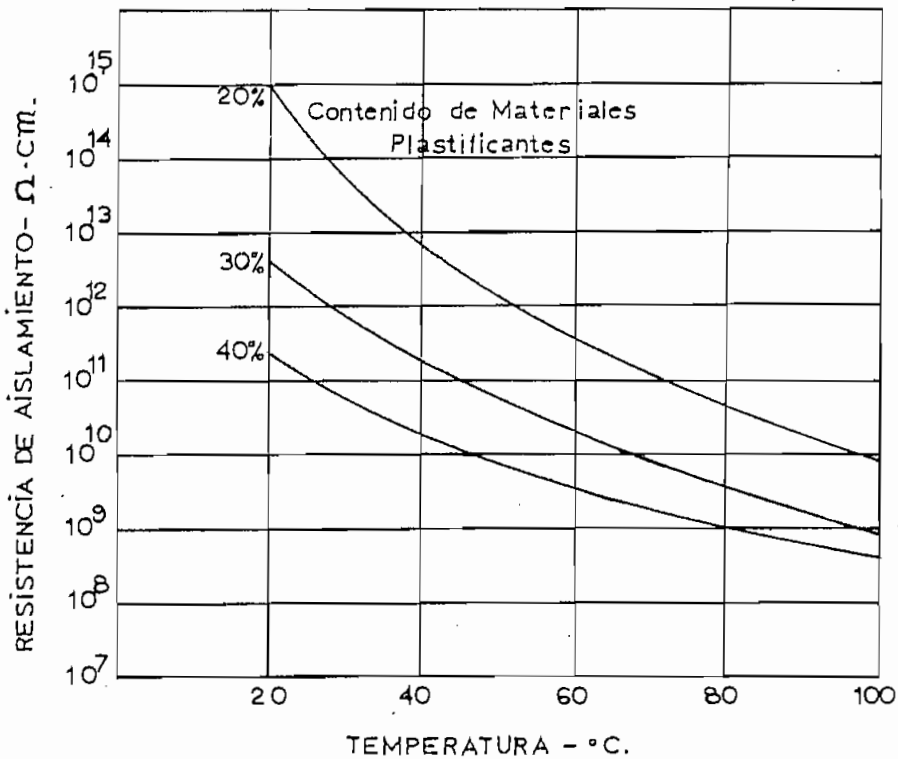


Fig. 1.12

Para algunos materiales, un cambio en la temperatura de 25 a 100°C, puede ocasionar un cambio en la resistencia de aislamiento por un factor de 10^5 , por lo tanto, cuando se hacen las mediciones, es un requisito mantener la temperatura dentro de ciertos límites, los cuales se han fijado entre 10 a 30°C. (3)

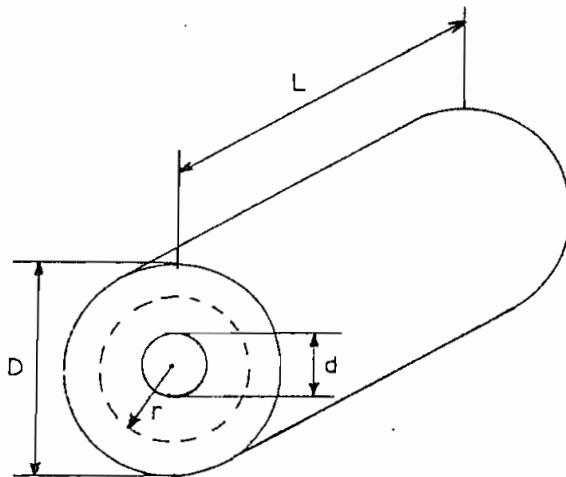
En la Fig. 1.12, se tienen los resultados obtenidos con muestras de cloruro de polivinilo (P.V.C.), al medirlo a diferentes temperaturas y con diferentes contenidos de sustancias plasificantes. (4)

La ecuación que corresponde a éstas curvas es:

$$R_{x_0} = R_{x_t} \cdot e^{\alpha(t-t_0)}$$

en donde R_{x_t} es el valor de la resistencia de aislamiento a una temperatura t (°C), R_{x_0} la resistencia a la temperatura inicial t_0 (°C). En general, el valor de la resistencia de aislamiento se expresa en $\Omega \cdot \text{cm}$, y α es el coeficiente de temperatura que depende de cada material.

Para propósitos de comparación se ha hecho necesario reducir los resultados de las mediciones a una temperatura estándar, que se ha fijado en 15,6°C y compararlos con el resultado teórico que para conductores sólidos se calcula de la siguiente manera:



$$dR = \rho \cdot \frac{dl}{A}$$

$$R \cdot L = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$$

Fig. 1.13

R se expresa en $M\Omega$, L en Km. y si $K = \rho/2\pi$, en donde ρ es la resistividad del material a la temperatura de $15,6^\circ\text{C}$. Se puede expresar la resistencia de aislamiento de la siguiente forma:

$$M\Omega \cdot \text{Km} = K \ln(D/d)$$

En esta ecuación K, es una constante para los diferentes materiales aislantes, por ejemplo, para el P.V.C. -60°C es 500, P.V.C. -75°C , $K = 5.000$ y para el polietileno, $K = 50.000$.

Para reducir los valores de las resistencias medidas a una determinada temperatura a la temperatura estándar, se los multiplica por un factor de corrección determinado experimentalmente de la siguiente manera: se escogen tres muestras de alambre 14 AWG, sólido y forrado con el material aislante del cual se desea determinar el factor de corrección. La longitud de las tres muestras deberá ser tal que con el método de medición escogido, la resistencia de aislamiento no sea mayor que $25.000 M\Omega$ y la pared aislante deberá tener un espesor de 1,14 mm.

Se sumergen las tres muestras en un baño de agua, equipado con calentador y recirculador de aire, con los terminales de los cables sobresaliendo 50 a 60 cms. de la superficie del agua y con el adecuado sistema de guarda para evitar cualquier fuga. Luego se dejan las muestras en el baño por un tiempo de 16 horas a la temperatura ambiental, antes de ajustar la temperatura del baño a 10°C .

Se mide la resistencia del conductor metálico a intervalos regulares hasta que permanezca invariable durante por lo menos 5 minutos. El aislamiento estará entonces a la temperatura del baño, la cual se lee con un termómetro y se procede a medir la resistencia del aislamiento.

Las tres muestras se expondrán sucesivamente a baños de agua a temperaturas de $10, 16, 22, 28$ y 35°C , retornando luego a baños de

28,22,16. y 10°C, tomándose las lecturas de la resistencia de aislamiento correspondiente a cada temperatura.

El promedio de las lecturas obtenidas a la misma temperatura y la lectura a 35°C, se grafican en papel semilogarítmico del cual se puede leer la resistencia a 15,6°C y determinar el factor de corrección para cada 0,55°C. Para obtener este factor se divide la resistencia a 15,6°C con otra, por ejemplo aquella a 16,1°C.⁽⁵⁾

En la tabla siguiente se presentan los factores de corrección, encolumnados de acuerdo a un coeficiente que es propio de cada material aislante y proporcionado por el fabricante del mismo.

Tabla 1.1.- Factores de Corrección de la Resistencia de Aislamiento a la Temperatura de 15,6°C.

Temp.	Coeficiente o Grado de Aislamiento									
	° C	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11
10.0	0.75	0.68	0.62	0.56	0.51	0.46	0.42	0.38	0.35	0.32
10.6	0.77	0.70	0.65	0.59	0.54	0.50	0.46	0.42	0.39	0.36
11.1	0.79	0.73	0.68	0.63	0.58	0.54	0.50	0.47	0.43	0.40
11.7	0.82	0.76	0.71	0.67	0.62	0.58	0.55	0.51	0.48	0.45
12.2	0.84	0.79	0.75	0.70	0.67	0.63	0.60	0.56	0.54	0.51
12.8	0.87	0.82	0.78	0.75	0.71	0.68	0.65	0.62	0.60	0.57
13.3	0.89	0.86	0.82	0.76	0.76	0.74	0.71	0.69	0.66	0.64
13.9	0.92	0.89	0.87	0.84	0.82	0.80	0.78	0.76	0.73	0.71
14.4	0.94	0.93	0.91	0.90	0.88	0.86	0.85	0.83	0.82	0.80
15.0	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89
15.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16.1	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12
16.7	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.21	1.24	1.27
17.2	1.09	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42
17.8	1.13	1.17	1.22	1.26	1.31	1.36	1.41	1.47	1.53	1.58
18.3	1.16	1.22	1.28	1.34	1.40	1.47	1.54	1.62	1.70	1.78
18.9	1.20	1.27	1.35	1.42	1.50	1.59	1.69	1.78	1.88	1.98
19.4	1.23	1.32	1.41	1.51	1.62	1.72	1.84	1.96	2.09	2.21
20.0	1.27	1.37	1.48	1.60	1.72	1.85	1.99	2.15	2.31	2.48
20.6	1.31	1.43	1.55	1.69	1.84	2.00	2.18	2.36	2.57	2.77
21.1	1.35	1.48	1.63	1.79	1.97	2.17	2.38	2.60	2.85	3.10
21.7	1.39	1.54	1.72	1.90	2.11	2.34	2.59	2.87	3.17	3.46
22.2	1.43	1.60	1.80	2.02	2.26	2.53	2.82	3.15	3.52	3.90
22.8	1.47	1.67	1.89	2.14	2.42	2.72	3.08	3.46	3.90	4.37
23.3	1.52	1.74	1.98	2.27	2.58	2.94	3.35	3.81	4.31	4.88
23.9	1.56	1.80	2.08	2.40	2.76	3.18	3.65	4.19	4.78	5.47
24.4	1.61	1.87	2.19	2.54	2.96	3.43	3.98	4.61	5.30	6.12
25.0	1.66	1.95	2.30	2.70	3.17	3.70	4.34	5.08	5.88	6.85
25.6	1.71	2.02	2.41	2.86	3.39	4.00	4.73	5.59	6.51	7.68
26.1	1.76	2.11	2.53	3.03	3.62	4.33	5.16	6.14	7.27	8.59
26.7	1.81	2.19	2.66	3.21	3.87	4.67	5.61	6.72	8.07	9.65
27.2	1.87	2.28	2.80	3.40	4.15	5.04	6.12	7.43	8.98	10.80
27.8	1.92	2.37	2.94	3.60	4.43	5.45	6.69	8.18	9.92	12.10
28.3	1.98	2.47	3.08	3.82	4.72	5.89	7.28	9.00	11.00	13.60
28.9	2.04	2.57	3.23	4.05	5.04	6.35	7.92	9.90	12.2	15.2
29.4	2.10	2.67	3.40	4.30	5.42	6.84	8.67	10.8	13.5	17.0

2.- DISEÑO Y CONSTRUCCION

En todos los métodos anteriormente descritos, la determinación de la resistencia de aislamiento se basa en la medición de una corriente o de una caída de voltaje bajo ciertas condiciones. En realidad no importa mucho qué método es el aconsejado para lograr una mayor precisión, sino que se debe tomar en cuenta que ésta se logra solamente con una evaluación cuidadosa de todas las fuentes de error.

En la tabla siguiente, se presenta una guía del alcance y limitaciones de cada método.

Tabla 2.1.- Características de los Métodos de Medición de la Resistencia de Aislamiento.

Método	Referencia Sección-Fig.		Máx. Ohmios detectables a 500V.	Máx. Ohmios medibles con $\pm 6\%$ a 500V.	Tipo de medida
Desviación altas resistencias:					
Galvanómetro.	1.1.2	1.4	10^{12}	10^{11}	desviación
Amplificador C-C o Electrómetro	1.1.2	1.5	10^{15}	10^{13}	desviación
	1.1.2	1.5 pos.1	10^{15}	10^{13}	desviación
	1.1.2	1.6 pos.2	10^{17}	10^{15}	ajuste de cero
Puente de Wheatstone.	1.12	1.7	10^{15}	10^{14}	ajuste de cero
Pérdida de Carga.	1.1.3	1.9	10^{15}		desviación
Megóhmetro típico	Instrumentos Comerciales		10^{15}	10^{14}	lectura directa

En esta tabla no se indican los límites y sensibilidad de cada método por sí mismo, antes bien indica los límites que son posibles alcanzar con aparatos modernos.

Los errores asumidos en ésta guía son aquellos de instrumentación solamente, y no los que pueden ocurrir por otras causas tales como variaciones de temperatura, humedad, tiempo de electrificación, deficiencias en el circuito de medida, etc.

Además, es posible acoplar cada una de las partes de cada método en el momento mismo de la medición o adquirir todo el conjunto integrado en un solo aparato.

En general, los métodos que utilizan galvanómetros de gran sensibilidad requieren más de una instalación permanente que aquellos que usan medidores de lectura directa o impresores.

Los métodos que utilizan medidores de lectura directa, requieren un mínimo de ajuste manual y son fáciles de leer, pero el operador debe hacer la lectura usualmente en un momento particular. El puente de Wheatstone de la Fig. 1.7 y el método de la Fig. 1.6, requieren toda la atención del operador para lograr el ajuste de cero, pero éste, se puede hacer en cualquier momento

2.1.- Especificaciones.

El megóhmetro electrónico es un aparato compacto en el cual se lee directamente la resistencia de aislamiento. Está provisto de una fuente regulada de tensión continua que puede ser aplicada a la muestra durante el tiempo establecido por las normas, el rango de medida es lo suficientemente amplio como para cumplir los requisitos de medición, se ha logrado una impedancia de entrada muy alta por medio de una válvula electrónica además de que su operación y calibración son muy sencillas.

También posee un sistema de guarda que es de gran utilidad para mediciones de muy altas resistencias y un sistema de descarga de la muestra que actúa cuando se ha terminado de realizar la medición.

2.1.1.- Magnitud del Voltaje de Prueba, Tiempo de Electrificación y Descarga de la Muestra.

Como la determinación de la resistencia de aislamiento se basa en la medición de una caída de voltaje continua, es necesario que el mismo potencial sea usado en la realización de las pruebas, por lo tanto, se acepta una variación del voltaje especificado en $\pm 1\%$.

Generalmente los voltajes especificados son de 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 y 15000 V., de los cuales los más usados son 100 y 500 V.

En algunos materiales, la resistencia depende del contenido de humedad y ésta puede ser afectada por la polaridad del voltaje de prueba. Este efecto causado por la electrolisis o la migración iónica o ambos, especialmente bajo la presencia de campos no uniformes, puede ser de importancia en ciertas configuraciones aislantes tales como las que se encuentran en cables donde la gradiente del potencial de prueba es mayor en el conductor central que en la superficie externa.

Cuando la electrolisis o la migración iónica existen en un espécimen, la resistencia eléctrica disminuye cuando el más corto de los electrodos de prueba es hecho negativo con respecto al más largo. En éstos casos, la polaridad del voltaje de prueba se debe especificar.

En la medición de la resistencia de aislamiento, interviene un parámetro adicional que es el tiempo de electrificación, es de

cir, es el tiempo durante el cual se aplica el voltaje de prueba antes de realizar la medición.

En los métodos en los que se utiliza una resistencia en serie con la muestra, la resistencia debe tener un valor bajo, de tal manera que casi todo el voltaje se aplique a la muestra.

Cuando se aplica una diferencia de potencial continuo, la corriente que circula a través de ella, decrece asintóticamente hasta un límite cuyo valor puede ser menor que el 1% de la corriente observada luego de un minuto de electrificación.

Este decrecimiento de la corriente con el tiempo, se debe a la absorción dieléctrica, polarización, al movimiento de iones libres hacia los electrodos y a la capacitancia de la muestra. Generalmente, la relación entre el tiempo y la corriente que atraviesa la muestra, es de la forma $I = A \cdot t^{-k}$, hasta que la corriente de fuga llega a ser un factor significativo.

Dependiendo de las características de los materiales aislantes, el tiempo que requiere la corriente para decrecer hasta el 1% anteriormente citado, puede variar desde unos pocos segundos, hasta algunas horas, por lo tanto, para asegurarnos que las mediciones puedan ser comparadas, se hace necesario especificar un tiempo de electrificación. Este tiempo se ha tomado arbitrariamente como un minuto y el aparato de medición, debe poseer un sistema que permita cumplir con éste requisito. (6)

En algunos materiales, se puede llegar a conclusiones erróneas con los resultados obtenidos de ésta forma, en consecuencia, una curva de resistencia-tiempo, se debe obtener bajo las mismas condiciones de prueba, de tal manera que en base a ella, se pueda elegir el apropiado tiempo de electrificación, que luego debe ser especificado en el método de prueba pertinente a cada material.

Ocasionalmente puede ocurrir, que en determinado material la corriente aumenta con el tiempo. En éste caso, la curva resistencia-tiempo, deberá ser usada para tomar una decisión respecto al tiem

po de electrificación.

En la Fig. 2.1, presentada a continuación, se ilustra la dependencia entre la corriente y el tiempo.

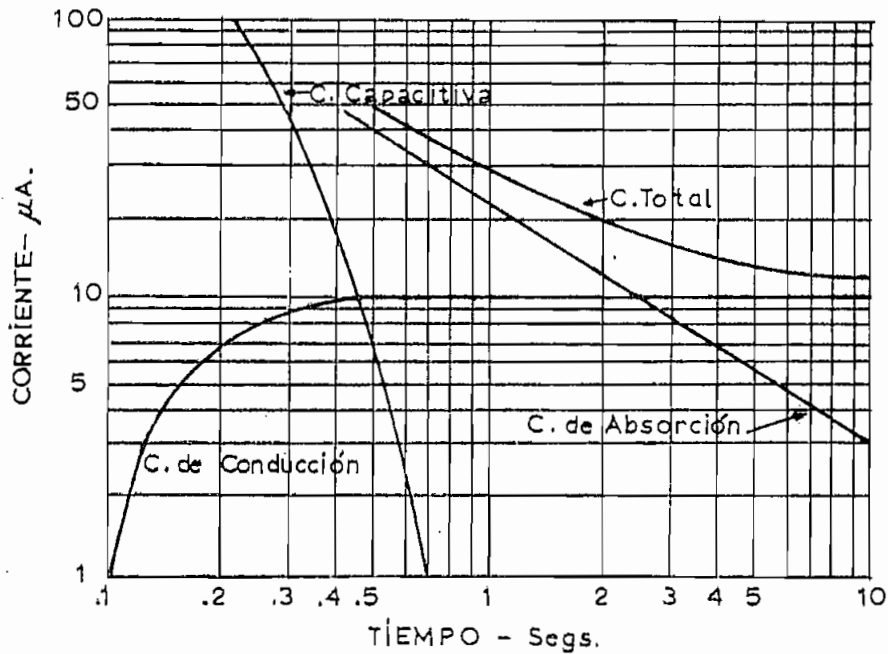


Fig. 2.1

La curva que muestra la corriente de carga de capacitancia, se refiere a la capacitancia del aislamiento sometido a prueba y es una función de tiempo, exponencial.

La corriente de absorción, es causada por varias polarizaciones que tienen lugar en la corriente continua. Esta corriente representa una fuente de energía almacenada, reversible, que puede descargarse luego de la remoción del voltaje aplicado, por lo cual es necesario que la muestra sea completamente descargada antes de la primera medición y más aún si se hacen repeticiones sucesivas o una medición posterior con el voltaje invertido. Debido a esto, el aparato necesita de un sistema de descarga que sea apropiado y seguro para el operador.

El tiempo de descarga deberá ser por lo menos cuatro veces el tiempo de electrificación además de que los electrodos que van conectados a la muestra se deben colocar en corto-circuito hasta el momento de la medición para evitar cualquier inducción de carga de los alrededores. (7)

Luego tenemos la corriente de fuga o conducción que es una corriente de pérdida, irreversible y es la parte de la corriente total que nos interesa medir.

2.1.2.- Rango de Medida.

El megóhmetro electrónico se basa en el principio del voltímetro electrónico a excepción de que debe poseer una mayor sensibilidad e impedancia de entrada mucho más alta.

En general, el rango de medida debe extenderse hasta aproximadamente $10^{15} \Omega$ y un amplificador de C-C debe poseer estas dos cualidades para ser utilizado. Al llegar a éstos rangos, aparecen ciertas dificultades tales como la corriente de rejilla, debido al vacío imperfecto de las válvulas electrónicas y el corrimiento de cero que es inherente a los amplificadores de C-C.

Por la parte inferior de la escala, el megóhmetro generalmente comienza por los cientos de kilo-ohmios, rango en el cual un óhmetro normal no es muy preciso.

2.1.3.- Sistema de Guarda.

El principio del sistema de guarda se basa en interponer en las partes críticas del aislamiento, conductores que intercepten cualquier corriente adicional a la que se quiere medir, que de otra forma causaría errores en la medición.

Los conductores de guarda se conectan unos a otros cons-

ma general. en que se suministra la energía eléctrica para uso no industrial. Desde luego, es necesario limitar la corriente de la fuente de poder hasta un valor no mayor que 10mA que es capaz de producir un choque doloroso y hasta severo.

En cuanto a la exactitud de las mediciones, se ha dado una guía en la tabla 2.1, que es posible alcanzar con éstos métodos sobre todo para los rangos más altos en los cuales se debe tener mucho cuidado con el aislamiento del circuito de medida ya que de lo contrario los valores obtenidos son más una medida de las limitaciones del aparato que de la resistencia del material a prueba.

Estos errores pueden producirse por cualquier corriente indeseada que circule por el aparato de medida debido a cualquier otro camino resistivo.

A continuación se resumen las principales especificaciones.

Tabla 2.2.- Especificaciones.

Alimentación:	110V \pm 15% aprox., 60 ciclos
Rango:	mínimo 0,2 M Ω a 100V. máximo 5 \cdot 10 ⁶ M Ω a 500V.
Terminales:	positivo y negativo para la muestra; guarda para el sistema de guarda y tierra con puente.
Exactitud:	\pm 6 a \pm 10% en el rango más alto.
Voltaje de Prueba:	100 y 500V. C-C \pm 1%, limitada la corriente.
Controles:	para calibración de los puntos de máxima y mínima resistencia de la escala, para aplicación del voltaje de prueba y medición luego del tiempo de electrificación y para descarga de la muestra.

2.2.- Estructura Circuital del Megóhmetro.

El megóhmetro electrónico, es básicamente un óhmetro electrónico que está diseñado para medir resistencias de mayor magnitud, por lo tanto su estructura es más o menos similar.

Las partes principales que componen éste equipo se enumeran a continuación:

- 1.- Fuente de poder
- 2.- Medidor
- 3.- Amplificador de C-C
- 4.- Multiplicador
- 5.- Sistema de terminales para la muestra
- 6.- Conmutadores de medición, electrificación y descarga de la muestra.

La fuente de poder se utiliza para fijar el punto de operación de la válvula del amplificador C-C y proporciona también los voltajes de prueba.

El medidor está constituido por un galvanómetro del tipo de bobina móvil, que para una desviación a plena escala necesita de $50\mu\text{A}$ y una resistencia de $3.000\ \Omega$ aproximadamente. Está calibrado en megohmios.

El amplificador C-C es un seguidor catódico colocado en puente, es decir, es un seguidor catódico diferencial, utilizándose un doble tríodo que trabaja a un relativamente bajo potencial de placa y filamento para reducir los efectos de la corriente de rejilla producida por el vacío imperfecto de la válvula. Este amplificador tiene una respuesta lineal además de que protege al instrumento medidor de sobrecargas.

El sistema multiplicador está compuesto por una red de resistencias de $\pm 1\%$ de tolerancia asegurándose con ésto la veracidad de las medidas. Este circuito permite multiplicar la lectura del me

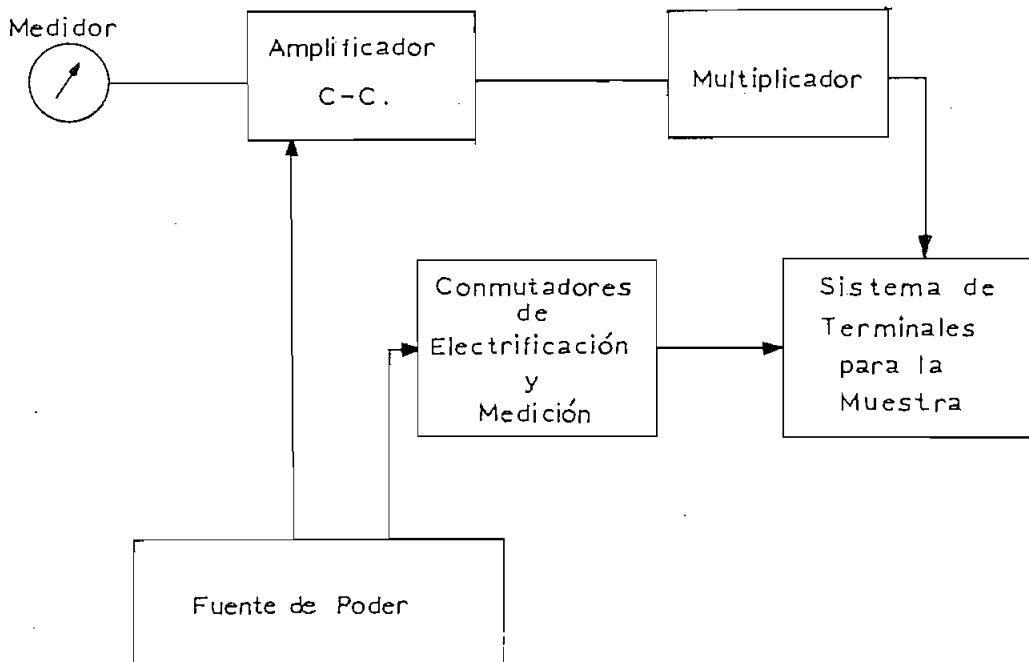
didor desde por 0,1 hasta por 10^4 para cuando se realiza la medición con 100V y desde por 1 hasta 10^5 con 500 V, en pasos de multiplicación de 10.

El sistema de terminales consta de positivo y negativo para la muestra, el de guarda y el de tierra con puente. Todos éstos terminales son especiales para alto voltaje, de alta resistencia, a más de que el terminal negativo está aún más aislado del resto del e quipo.

En último lugar tenemos los conmutadores manuales de medición, electrificación y descarga de la muestra cuyos contactos están muy bien aislados.

Asociando estas partes, el diagrama de bloques es:

Diagrama 2.1.- Diagrama de Bloques del Megóhmetro Electrónico.



2.3.- Fuente de Poder.

Debido a que casi toda la energía eléctrica se suministra en corriente alterna y nuestras necesidades son en C-C, la fuente de poder a diseñarse constará de un transformador de elevación, rectificador, filtro y regulador de tensión.

Comenzando por el transformador, tenemos que el escogido corresponde al siguiente código: Tr-284-7986146

Primario: 110-120V., 60 ciclos
 110V., amarillo y negro con rojo
 120V., amarillo y negro con amarillo

Secundario: 280-T.C.-280V., 70mA, rojo-amarillo y rojo-verde, la
 toma central(T.C.) es roja.
 6,3V., 2A, con T.C., amarillo-verde y negro-café, T.C.
 es café.
 12V., 25mA, entre verde y amarillo
 225V., 25mA, entre verde y azul

2.3.1.- Fuente de Voltaje de Prueba.

Para el voltaje de prueba o medición, tenemos las siguientes especificaciones:

Voltaje de línea: 110V., 60 ciclos \pm 15% aproximadamente, es decir
 que podemos aceptar que el voltaje de línea varíe
 desde 90 a 130V.

Voltaje de prueba: 500V. \pm 1%, C-C.
 100V. \pm 1%, C-C.

En cuanto a corriente, como éste voltaje se aplica a las

muestras del aislamiento, está en el orden de los pico-amperios. El circuito a utilizarse es el siguiente:

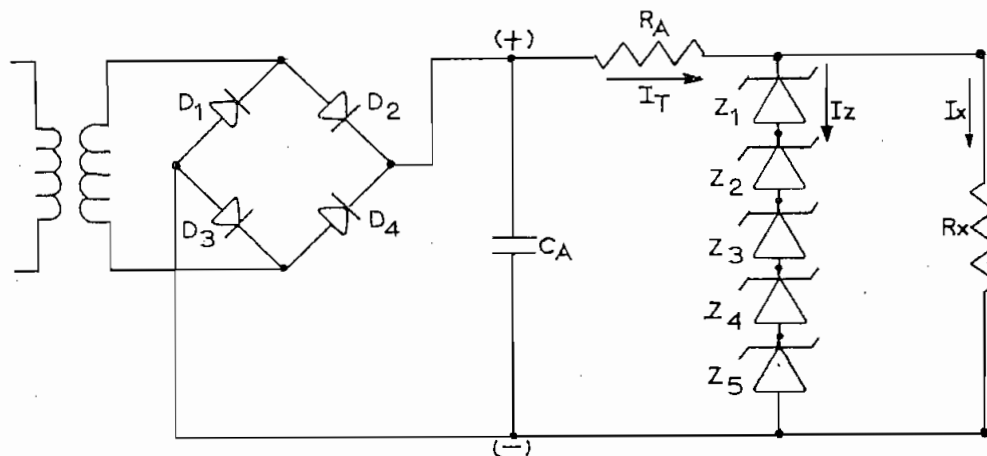


Fig. 2.2

Es decir que tomando en cuenta que la salida del secundario entre rojo-amarillo y rojo-verde son 560V. C-A, se los rectifica en onda completa y utilizando un filtro con condensador en paralelo (C_A) "puenteamos" los armónicos de C-A, en los terminales de la carga. La regulación de voltaje la hacemos con 5 diodos Zener (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5) de 100V. cada uno (V_z).

El análisis es el siguiente:

Voltaje de línea.	Voltaje ef. del secundario(V)	Voltaje pico del secundario(Vp).
110	560	792
90	458	648
130	661	936

De ésta tabla de variación del voltaje de línea, tenemos que los voltajes máximo y mínimo que aparecen en el secundario son:

$$V_{\text{máx.}} = 936V. \quad V_{\text{mín.}} = 648V.$$

También podemos asumir que $I_x = 0$ puesto que la corriente

que atravesará el aislanté, es mucho menor y por lo tanto es despreciable en comparación a la que atravesará por los diodos zener.

De la relación entre voltaje y corriente representada en la Fig. 2.3, escogemos las corrientes I_1 e I_2 , que son las que circularán por los diodos zener debido a las variaciones del voltaje de línea.

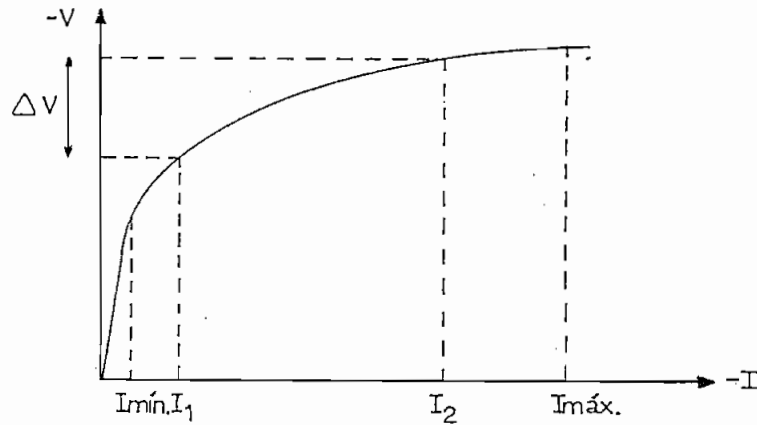


Fig. 2.3

Escogemos I_1 e I_2 , de la siguiente forma:

$$I_1 > I_{mín.} \quad \text{e} \quad I_2 < I_{máx.}$$

siendo $I_{máx.}$ e $I_{mín.}$, las corrientes máxima y mínima de trabajo del diodo zener.

Analizando el circuito de la Fig. 2.2 y tomando en cuenta que $I_x = 0$, se puede deducir que:

$$I_1 = \frac{V_{mín.} - V_z}{R_A} \quad I_2 = \frac{V_{máx.} - V_z}{R_A}$$

de donde despejando R_A , obtenemos:

$$R_A = \frac{V_{\min} - V_z}{I_1} = \frac{V_{\max} - V_z}{I_2} \quad (2.1)$$

y por lo tanto:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_{\max} - V_z}{V_{\min} - V_z} = 2,94 \quad (2.2)$$

Se ha escogido el diodo zener 1N3044B, cuyas características son:

Tabla 2.3.- Características del Diodo Zener 1N3044B⁽⁹⁾

Voltaje zener nominal, V_z . (V.)	=	$100 \pm 5\%$
Corriente de prueba, I_{ZT} . (mA)	=	2,5
Máxima corriente continua, I_{ZM} . (mA)	=	9
Máxima impedancia zener, Z_{ZM} . (Ω)	=	350
Máxima potencia de disipación, Pd. (W)	=	1
Temperatura de trabajo y de la juntura, Tj. ($^{\circ}\text{C}$)	=	-65 a + 175

Si tomamos $I_2 = 4,5\text{mA}$, es decir la mitad de la corriente máxima, resulta que de la ecuación 2.2, $I_1 = 1,53\text{mA}$.

La variación máxima del voltaje que se tendría debido al cambio del voltaje de línea es:

$$\Delta V_z = Z_{ZM} \cdot \Delta I \quad (2.3)$$

$$\Delta I = I_2 - I_1$$

$$\Delta V_z = 1,04\text{V.}$$

es decir que ésta variación corresponde al 1% en 100V., o sea $\pm 0,5\%$ de variación en V_z .

Con ayuda de la ecuación 2.1, se calcula R_A :

$$R_A = 96,8K\Omega \text{ o } 100 K\Omega , \text{ y:}$$

$$P_{R_A} = (I_2)^2 \cdot R_A = 2W.$$

En cuanto a los diodos rectificadores $D_{1,2,3,4}$, deben cumplir con los siguientes requisitos:

Tabla 2.4.- Requisitos para los Diodos Rectificadores de la Fig. 2.2

Voltaje pico inverso máximo, VPI. (Vp) = 936

Corriente rectificada máxima, I_M . (mA) = 9,67

Estos requisitos se obtienen del circuito rectificador de onda completa en puente, e I_M suponiendo un cortocircuito en la muestra, es decir $R_x = 0$.

$$I_M = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R_A}$$

Comparando la tabla 2.4 con la tabla 2.5 que se presenta a continuación y que contiene las características del diodo 1N1566A, se puede observar que cumple con las condiciones requeridas.

Tabla 2.5.-Características del Diodo 1N1566A. (10)

Voltaje de pico inverso, VPI. (Vp) = 1.000

Voltaje eficaz inverso, VI. (V.) = 700

Corriente rectificada promedio, I_o . (A) = 2,5

Corriente repetitiva pico, I_{RP} . (A) = 12

Temperatura de trabajo y de la juntura, T_j . ($^{\circ}C$) = - 65 a + 175

(Se ha utilizado éste diodo por ser el de valores más altos que se ha conseguido y no se justifica poner dos en serie).

Como se había dicho anteriormente, el filtro de condensador en paralelo, desvía los armónicos de C-A, es decir, es necesario que $X_{CA} \ll (R_A + R_x)$.

Considerando el peor caso, es decir $R_x = 0$, el circuito se transforma al de la Fig. 2.4

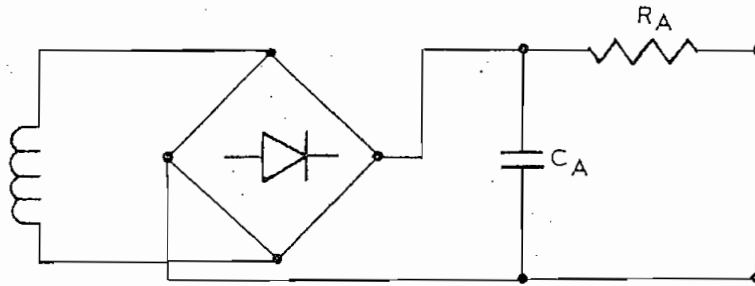


Fig. 2.4

En éste caso: $X_{CA} \ll R_A$, a la frecuencia más baja.

Si hacemos: $X_{CA} = R_A/150$ y $R_A = 150 \text{ K}\Omega$ y $f = 120 \text{ c/seg}$, que es la frecuencia de la onda rectificada resulta que:

$$C_A = 2 \mu\text{F}$$

además de que deberá soportar el voltaje $V_{\text{máx.}} = 968\text{V.}$, que puede aparecer en sus terminales.

En ésta clase de filtros, las condiciones de funcionamiento de los diodos, se afectan considerablemente. Puede considerarse que cuando la tensión de entrada del rectificador está por encima de la del condensador, éste se carga hasta el valor pico de la fuente de alimentación. Cuando la tensión alterna de entrada disminuye lo suficiente, el diodo desconecta la fuente, pues, tendrá el cátodo positivo y la energía almacenada en el condensador C_A mantiene la tensión en la carga, por un tiempo mucho más largo que si no existiese —

el condensador. La corriente en los diodos circula a impulsos cortos en lugar de hacerlo en todo el semiciclo positivo.

Asumiendo que la resistencia de polarización directa es ce ro y despreciando la resistencia de dispersión del transformador, se deduce: (11)

$$\theta_2 = \text{tg}^{-1}(-\omega R_A C_A) \quad (2.4)$$

$$\text{sen } \theta_1 = \text{sen } \theta_2 \cdot e^{-(\pi + \theta_1 - \theta_2)/\omega R_A C_A} \quad (2.5)$$

siendo θ_1 y θ_2 los instantes en que los diodos conducen y dejan de conducir, respectivamente. Estos ángulos pueden calcularse con ayuda de 2.4 y 2.5, pero también pueden resolverse gráficamente.

En la Fig. 2.5, se presentan los resultados de θ_1 y θ_2 para el rectificador de media onda y onda completa en función del parámetro $\omega R_A C_A$.

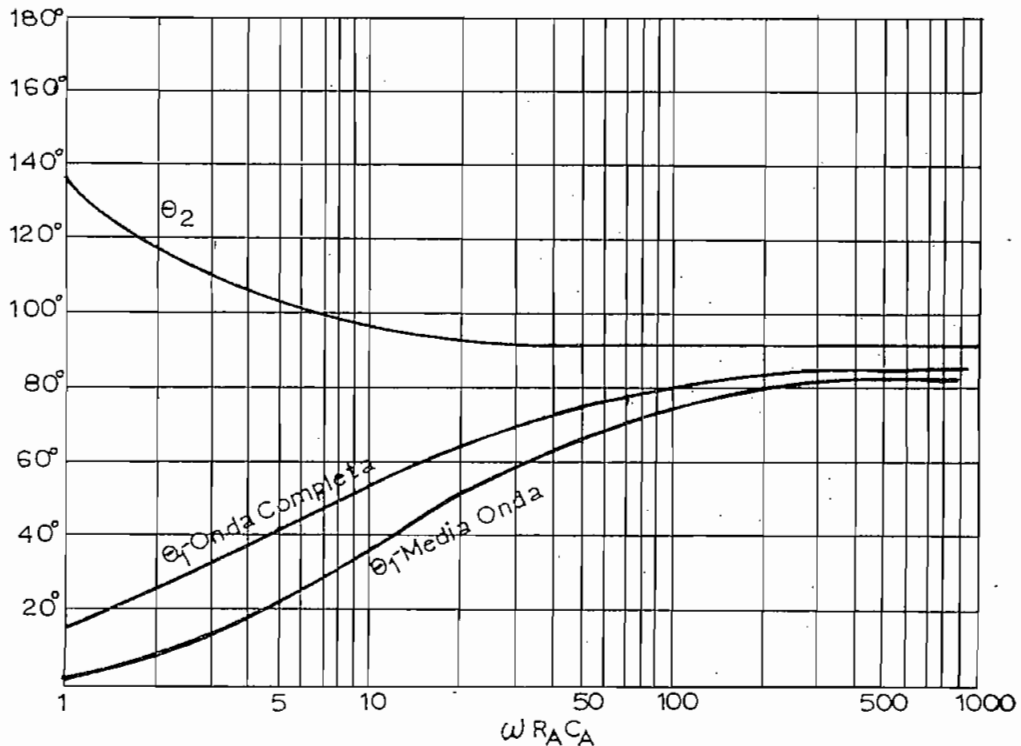


Fig. 2.5

El valor de la tensión continua de salida, puede calcularse con ayuda de los valores de θ_1 y θ_2 obtenidos de la Fig. 2.5 y de: ⁽¹²⁾

$$V_{c-c} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\pi} \left\{ \cos\theta_1 - \cos\theta_2 + \omega R_A C_A \operatorname{sen}\theta_2 (1 - e^{-(\pi + \theta_1 - \theta_2) / \omega R_A C_A}) \right\} \quad (2.6)$$

y, el factor de rizado (Fr):

$$Fr = \frac{\pi + \theta_1 - \theta_2}{2 \sqrt{3} \omega R_A C_A} \quad (2.7)$$

para el rectificador de onda completa y filtro R-C.

En el presente caso, tenemos los siguientes valores:

$$C_A = 2 \mu F$$

$$R_A = 100 \text{ K}\Omega$$

$$f = 120 \text{ c/seg}$$

$$\omega R_A C_A = 150,8$$

Para el voltaje normal de línea (110V. C-A) $V_{m\acute{a}x} = 792V$. y reemplazando éstos valores en la ecuación 2.6, junto con los valores de θ_1 y θ_2 , que se han obtenido de la Fig. 2.5 y que son:

$$\theta_1 = 82^\circ = 1,43 \text{ rd}$$

$$\theta_2 = 91^\circ = 1,59 \text{ rd}$$

resulta que: $V_{c-c} = 784V$.

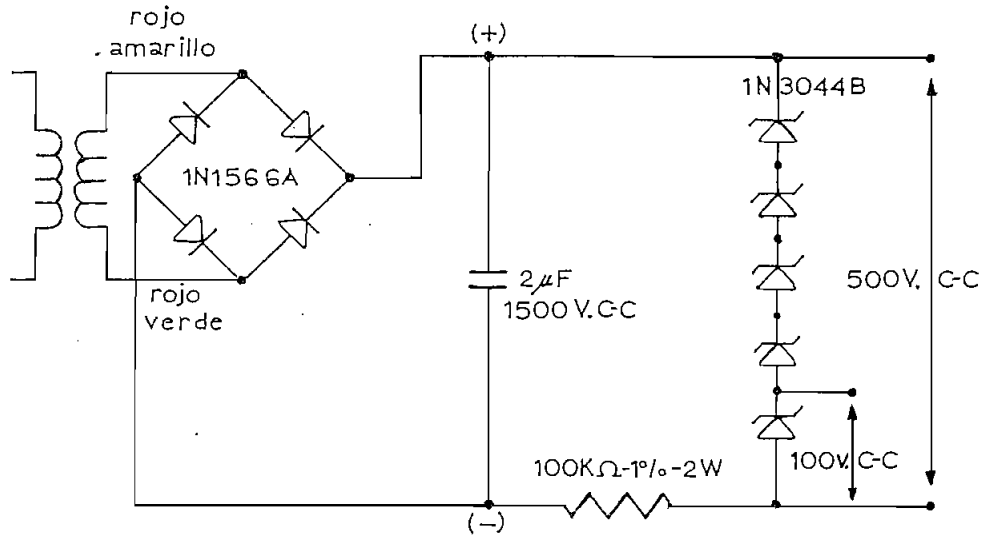
y, de la ecuación 2.7:

$$Fr = 0,0057$$

Es decir, que por cada voltio de tensión continua, hay una variación de casi 6mV., o sea que en 784V. habrán 4,7V., lo que representa el 0,6% de variación, que está de acuerdo a lo especificado.

El circuito construido es el siguiente:

Diagrama 2.2.- Fuente de Voltaje de Prueba.



En cuanto a la variación de V_z en los diodos reguladores debido a la temperatura de la juntura, debemos tomar en cuenta las condiciones de trabajo. Estas son:

$$V_z = 100V, I_z = \frac{V_{c-c} - V_z}{R_A} = 2,8mA$$

$$P_d = 0,28 W$$

Si llamamos T_T a la temperatura de los terminales y T_A , a la temperatura ambiente, tenemos que:

$$T_T = \theta_{TA} \cdot P_d + T_A \quad (2.8)$$

en donde θ_{TA} es la resistencia térmica de los terminales al medio, que se expresa en $^{\circ}C/W$ y que generalmente es de 30 a $40^{\circ}C/W$, para

los usos comunes y circuitos impresos.

Si, $T_A = 15^\circ\text{C}$ y $\theta_{TA} = 40^\circ\text{C/W}$, tenemos que: $T_T = 26^\circ\text{C}$. Con éste valor y con ayuda de la ecuación 2.9, presentada a continuación, se puede determinar la temperatura de la juntura.

$$T_j = T_T + \Delta T_{JT} \quad (2.9)$$

en donde ΔT_{JT} es el aumento de la temperatura de la juntura por encima de la temperatura de los terminales, que puede encontrarse de la Fig. 2.6 con ayuda de la ecuación 2.10.

$$\Delta T_{JT} = \theta_{JT} \cdot Pd \quad (2.10)$$

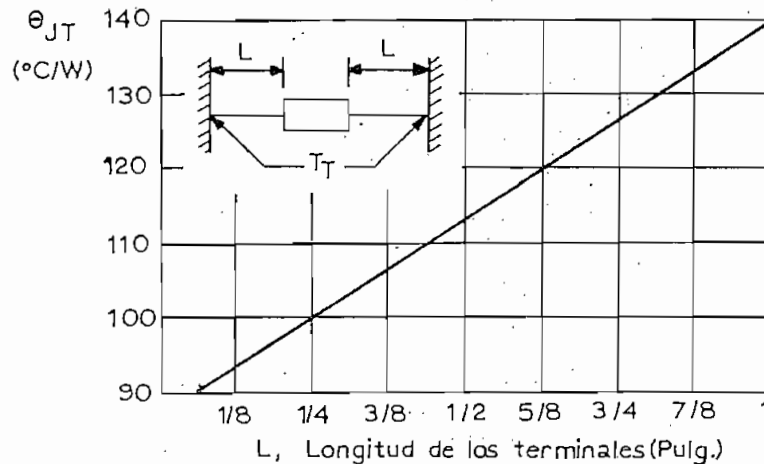


Fig. 2.6

θ_{JT} , es la resistencia térmica de la juntura a los terminales y para $L = 3/8"$, que es aproximadamente lo que se tiene en el circuito real para cada diodo zener, se observa de la Fig. 2.6 que:

$$\theta_{JT} = 107^\circ\text{C/W}, \text{ y de 2.10:}$$

$$\Delta T_{JT} = 29,6^\circ\text{C}$$

Reemplazando los respectivos valores de la ecuación 2.9, se tiene:

$$T_j = 55,8^\circ\text{C}$$

Con ayuda de éste valor se pueden estimar los cambios de V_z que podrían existir, ya que:

$$\Delta V_z = \theta_{V_z} \cdot T_j \quad (2.11)$$

en donde θ_{V_z} , es el coeficiente de temperatura del voltaje zener que se obtiene de la Fig. 2.7

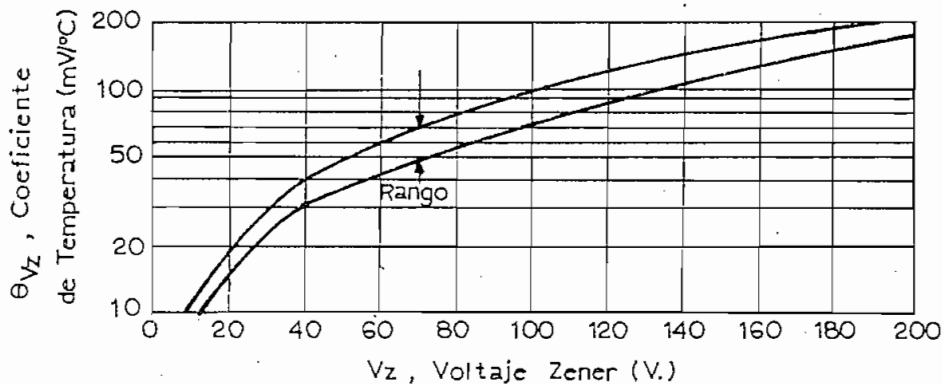


Fig. 2.7

Observando ésta figura, se tiene que $\theta_{V_z} = 73$ a 97 mV/°C y reemplazando en 2.11:

$$\Delta V_z = 1,33\text{V}$$

que es el 1,33% total en 100V, es decir $\pm 0,66\%$ de variación en V_z .

En caso de cortocircuito en los terminales, se tiene que la corriente máxima de cortocircuito es:

$$I_{\text{máx.}}(\text{cc}) = V_{\text{máx.}}/R_A = 9,36\text{mA}$$

que está por debajo del nivel en que el choque puede ser severo.

A continuación se resumen las características del circuito construido:

Tabla 2.6.- Características de la Fuente de Voltaje de Prueba.

Voltaje de salida	=	100 y 500V. C-C
Tolerancia por variaciones del voltaje de línea	=	$\pm 0,5\%$
Tolerancia por variación de Vz debido a Tj	=	$\pm 0,66\%$
Factor de rizado	=	0,6%
Corriente máxima de cortocircuito	=	9,36 mA

2.3.2.- Fuente de Voltaje de Polarización.

Como en el caso anterior, necesitamos de una fuente de poca variación del voltaje de salida pese a la variación que pueda existir en la alimentación.

Las siguientes son las especificaciones:

Voltaje de línea: 110V. $\pm 15\%$ aproximadamente, 60 ciclos/seg.

Voltaje de polarización: 100V. C-C $\pm 5\%$ y la corriente de aproximadamente 2,5 mA.

El circuito es básicamente el mismo en cuanto al sistema de filtro y regulación, sólo que se rectifica en media onda. El análisis también es similar.

Se toma la salida del secundario entre verde y azul, teniendo 225V. C-A, se rectifica en media onda por medio de D_5 y se utiliza el diodo zener Z_6 para regular el voltaje.

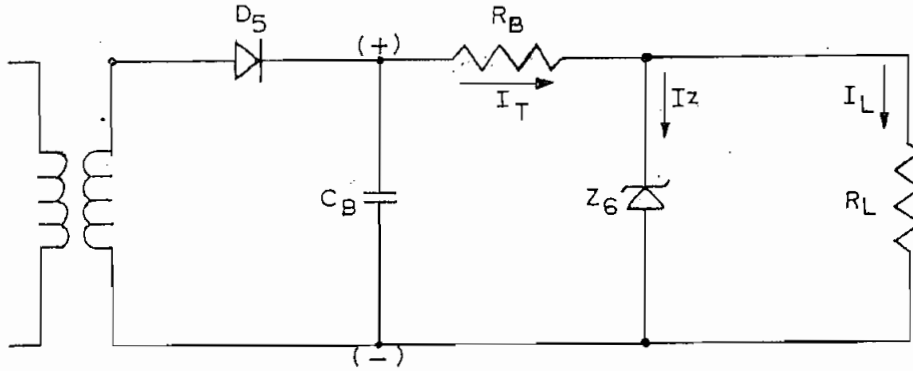


Fig. 2.8

Voltaje de línea.	Voltaje eficaz del secundario(V)	Voltaje pico del secundario.(Vp).
110	225	318
90	184	260
130	266	376

De ésta tabla de variación del voltaje de línea, tenemos que $V_{m\acute{a}x.} = 376V.$, $V_{m\acute{i}n.} = 260V.$, y siendo Z_6 similar a los utilizados en la fuente anterior, resulta que $V_z = 100V.$

De la relación voltaje-corriente de la Fig. 2.3, escogemos las corrientes I_1 e I_2 como:

$$I_1 + I_L > I_{m\acute{i}n.}, \quad \text{y} \quad I_2 + I_L < I_{m\acute{a}x.}$$

siendo $I_L = 2,5 \text{ mA}.$ De la Fig. 2.8, se puede deducir que :

$$I_1 + I_L = \frac{V_{m\acute{i}n.} - V_z}{R_B}, \quad I_2 + I_L = \frac{V_{m\acute{a}x.} - V_z}{R_B}$$

de donde despejando R_B , llegamos a:

$$R_B = \frac{V_{m\acute{i}n.} - V_z}{I_1 + I_L} = \frac{V_{m\acute{a}x.} - V_z}{I_2 + I_L} \quad (2.12)$$

y por lo tanto:

$$\frac{I_2 + I_L}{I_1 + I_L} = \frac{V_{\text{máx}} - V_z}{V_{\text{mín}} - V_z} \quad (2.13)$$

Reemplazando en ésta ecuación los respectivos valores de V_z , $V_{\text{máx}}$. y $V_{\text{mín}}$., resulta:

$$I_2 - 1,725 I_1 = 1,8 \quad (2.14)$$

Utilizando, como anotamos anteriormente, el diodo zener 1N3044B, cuyas características se resumen en la tabla 2.3, asumimos que $I_2 = 3 \text{ mA}$, entonces $I_1 = 0,7 \text{ mA}$.

La variación máxima del voltaje zener, debido a la variación del voltaje de línea desde 90 a 130V., podemos calcular con ayuda de las ecuaciones 2.3 y es:

$$V_z = 0,8V$$

Esta variación corresponde al 1% total en 100V., es decir $\pm 0,5\%$ de variación en V_z .

Para calcular R_B nos servimos de cualquiera de las ecuaciones 2.12.

$$R_B = 50 \text{ K}\Omega \text{ y,}$$

$$P_{R_B} = (I_L + I_2)^2 \cdot R_B = 1,5 \text{ W}$$

Con respecto al diodo rectificador D_5 , debe cumplir éste, con los requisitos de la tabla 2.7. , presentada a continuación, que se deducen del circuito de la Fig. 2.8 y de la corriente máxima suponiendo un cortocircuito en la carga.

$$I_M = V_{\text{máx}}/R_B = 7,52 \text{ mA}$$

Tabla 2.7.- Requisitos para el Diodo Rectificador de la Fig. 2.8

Voltaje de pico inverso, VPI. (Vp) = 531

Corriente rectificadora máxima, I_M . (mA) = 7,52

Si comparamos la tabla 2.7 con la 2.8 que se presenta a continuación y que contiene las características del diodo rectificador 1N5406, concluimos que cumple con los requisitos.

Tabla 2.8.- Características del Diodo 1N5406. (12)

Voltaje pico inverso, VPI. (Vp) = 600

Voltaje eficaz inverso, VI. (V) = 420

Corriente rectificadora (media onda), I_o . (A) = 3

Corriente repetitiva pico. I_{RP} . (A) = 25

Temperatura de trabajo y de la juntura, T_j . ($^{\circ}$ C) = - 65 a + 175

El condensador C_B , realiza la misma función que C_A en el caso de la fuente de voltaje de prueba, es decir, es necesario que $X_{C_B} \ll (R_B + R_L)$. Y si consideramos el peor de los casos, $R_L = 0$, el circuito equivalente es el siguiente:

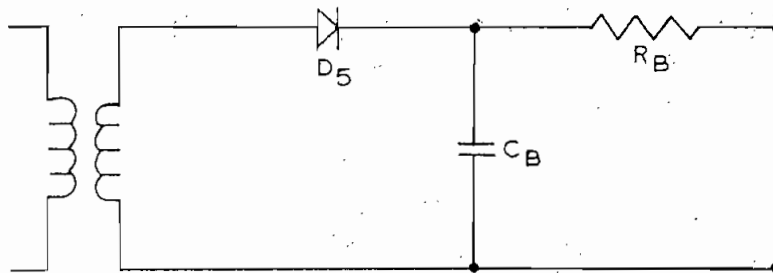


Fig. 2.9

Por lo tanto: $X_{C_B} \ll R_B$, a la frecuencia más baja, que en éste caso es 60 c/seg.

Asumiendo que: $X_{C_B} = R_B/200$, y reemplazando los valores de R_B y la frecuencia, obtenemos:

$$C_B = 10 \mu F.$$

además de que deberá soportar el voltaje $V_{m\acute{a}x} = 376V.$, que en determinado momento puede aparecer en sus terminales.

Como en el caso precedente, la corriente en el diodo circula a impulsos cortos, sólo en el instante en que se carga el condensador.

Las ecuaciones que definen los instantes de conducción y no conducción, θ_1 y θ_2 respectivamente, del diodo rectificador, son: (13)

$$\theta_2 = \text{tg}^{-1} (\omega R_B C_B) \quad (2.15)$$

$$\text{sen } \theta_1 = \text{sen } \theta_2 \cdot e^{-(2\pi + \theta_1 - \theta_2)/\omega R_B C_B} \quad (2.16)$$

que se han resuelto para distintos valores de $\omega R_B C_B$ en la Fig. 2.5.

El valor de la tensión continua de salida y el factor de rizado, pueden calcularse con ayuda de las ecuaciones 2.17 y 2.18, luego de obtener los valores de θ_1 y θ_2 .

$$V_{c-c} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{2\pi} \left[\cos\theta_1 - \cos\theta_2 + \omega R_B C_B \text{sen}\theta_2 (1 - e^{-(2\pi + \theta_1 - \theta_2)/\omega R_B C_B}) \right] \quad (2.17)$$

$$Fr = \frac{2\pi + \theta_1 - \theta_2}{2\sqrt{3} R_B C_B \omega} \quad (2.18)$$

En el presente caso, tenemos los siguientes valores:

$$C_B = 10 \mu F$$

$$R_B = 50 \text{ K}\Omega$$

$$f = 60 \text{ c/seg.}$$

$$\omega R_B C_B = 188,5$$

De la Fig. 2.5, con el valor de $\omega R_B C_B = 188,5$ obtenemos:

$$\theta_1 = 80^\circ = 1,39 \text{ rd}$$

$$\theta_2 = 91^\circ = 1,59 \text{ rd}$$

Reemplazando éstos valores y $V_{\text{máx}} = 318 \text{ V.}$ para el voltaje normal de línea, en las ecuaciones 2.17 y 2.18, resulta:

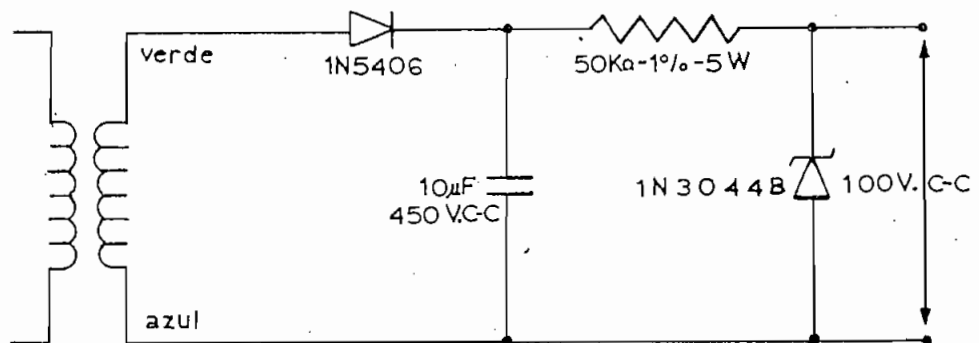
$$V_{c-c} = 311 \text{ V.}$$

$$F_r = 0,0093$$

Esto significa que por cada voltio de tensión continua, existe una variación de 9,3 mV que en 311V. representan a 3V., es decir aproximadamente el 1% de variación.

El circuito construido es el siguiente:

Diagrama 2.3.- Fuente de Voltaje de Polarización.



En cuanto a las variaciones del voltaje zener debido a T_j , tenemos que:

$$V_z = 100V., \quad I_z = \frac{V_{c-c} - V_z}{R_B} = 4,22 \text{ mA}, \quad P_d = 0,42 \text{ W}$$

y de acuerdo a la ecuación 2.8:

$$T_T = 32^\circ\text{C}$$

y de la Fig. 2.6, tenemos: $\theta_{JT} = 107^\circ\text{C/W}$ que reemplazando en la ecuación 2.9, tenemos:

$$T_j = 77^\circ\text{C}$$

Con ayuda de éste valor y de la ecuación 2.11, se pueden calcular los cambios que podrían existir.

$$\theta_{Vz} = 73 \text{ a } 97\text{mV}/^\circ\text{C} \text{ (de la Fig. 2.7)}$$

$$\Delta V_z = 1,85V.$$

que es aproximadamente el 2% total o $\pm 1\%$ en los 100V.

La corriente máxima de cortocircuito es:

$$I_{\text{máx. (cc)}} = V_{\text{máx}}/R_B = 7,52\text{mA}$$

que está por debajo del valor en que el choque puede ser severo.

A continuación se resumen las características del circuito construido.

Tabla 2.9.- Características de la Fuente de Voltaje de Polarización.

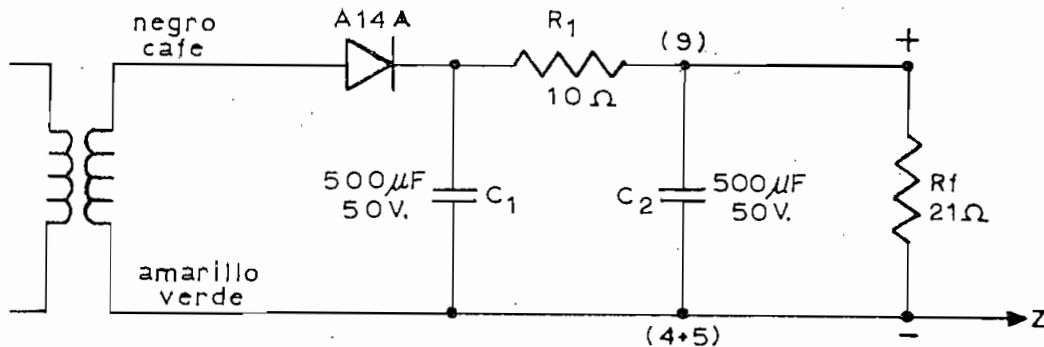
Voltaje de salida	= 100V. C-C
Tolerancia por variaciones del voltaje de línea	= $\pm 0,5\%$
Tolerancia por variación de Vz debido a Tj	= $\pm 1\%$
Factor de rizado	= 1%
Corriente máxima de cortocircuito	= 7,52 mA.

2.3.3.- Fuente de Voltaje de Filamento.

Para reducir al mínimo la corriente de rejilla y los problemas causados por la alimentación con C-A del filamento, tales como señales de ruido, se ha diseñado una fuente de voltaje C-C, cuya salida de voltaje es 2,4V. Este voltaje es el mínimo con el cual todavía se ha logrado que el tubo trabaje.

El circuito construido, es el siguiente:

Diagrama 2.4.- Fuente de Voltaje del Filamento.



Nota: Todas las resistencias son de 10% de tolerancia y 1/2W.

La salida del secundario del transformador se ha tomado entre negro-café y amarillo-verde, es decir 6,3V. C-A, luego se rectifica en media onda por medio del diodo A14A.

El filtro es similar al de las fuentes anteriores, es decir, del tipo de condensador en paralelo o R-C, de dos etapas.

Los condensadores de éstas etapas, C_1 y C_2 , de 500 F/50V., cumplen con las siguientes condiciones:

$$X_{C_2} < R_f \quad (2.19)$$

$$X_{C_1} < R_1 + \frac{X_{C_2} \cdot R_f}{X_{C_2} + R_f} \quad (2.20)$$

La resistencia R_1 de 10Ω , tiene una potencia de disipación de 1 W. R_f es la resistencia del filamento del tubo a emplearse, el doble triodo 12AU7, que es de 21Ω para la conexión a 6,3V.

El terminal de salida negativo de ésta fuente, se conecta al punto de retorno de los cátodos del tubo, para reducir aún más cualquier señal de ruido.

2.4.- Circuito Electrónico de Medida.

Dentro de éste título, está agrupado el diseño del amplificador de corriente continua, el sistema multiplicador y, conmutadores de electrificación y sistema de terminales para la muestra.

2.4.1.- Amplificador de Corriente Continua.

El propósito que se persigue al utilizar el amplificador de C-C, es obtener una alta impedancia de entrada y alta sensibilidad que permitan la medición de la resistencia de aislamiento.

Además, también se persigue convertir con linealidad y ganancia constante, el voltaje derivado de la muestra que es una alta resistencia, en una corriente.

Cuando se trata de lograr una alta impedancia de entrada, alrededor de $10^{15} \Omega$ o más y alta sensibilidad, de tal manera que se obtengan desviaciones a plena escala con corrientes en el orden de los micro-amperios, comienzan a tener importancia dos problemas que requieren especial atención.

Uno de éstos problemas es la corriente de rejilla causada por el vacío imperfecto del tubo y el otro, el corrimiento que es inherente a los amplificadores de C-C.

La precisión en la linealidad y en la ganancia, pueden ser conseguidas, con el uso de la realimentación negativa, además de que el amplificador debe operar independientemente de las variaciones de la fuente de voltaje.

En el caso de la corriente de rejilla, el valor para un tubo normal es de alrededor de 10^{-9} A. Si suponemos que ésta corriente circula por una resistencia de $10^7 \Omega$, que puede ser la impedancia de entrada de un óhmetro electrónico normal, producirá un voltaje de 0,01 V. que puede ser despreciable si consideramos que para una desviación a plena escala el óhmetro necesita de un voltio. Ahora, si la misma corriente circula por una resistencia de entrada extremadamente alta, por ejemplo $10^{12} \Omega$, se puede concluir que el voltaje producido causará un gran error.

Para superar éste problema, se han diseñado tubos especiales llamados electrómetros, los cuales trabajan a un bajo potencial de placa además de que el vacío es más perfecto que en los tubos or-

dinarios, pero también es posible utilizar los tubos ordinarios trabajando con ellos a voltajes de placa razonablemente escogidos. (14)

Otra fuente que aumenta la corriente de rejilla es la emisión de rejilla que se produce si ésta está contaminada o si la potencia de disipación del tubo es alta, aún cuando la disipación de la rejilla sea baja. (15)

Se puede reducir también la corriente de rejilla aislando el tubo de la luz, a lo cual se puede ayudar reduciendo la iluminación producida por el filamento o el mismo cátodo si es de caldeo directo. Para esto se puede reducir el voltaje de filamento. (16)

Como conclusión podemos aceptar que siempre habrá un valor más o menos constante de la corriente de rejilla por lo cual es necesario proveer un medio para compensar la componente de polarización introducida por ésta corriente, ya que circulará por el circuito de polarización de la rejilla.

Este medio o sistema de balance también es necesario por cuanto cualquier cambio del tubo, aún siendo del mismo tipo, puede ocasionar variaciones en la polarización de la rejilla debido a un diferente valor de la corriente de rejilla que puede poseer el nuevo tubo.

El problema del corrimiento en amplificadores de C-C de alta ganancia se produce porque cualquier cambio del punto de trabajo del tubo tiene el mismo efecto que un cambio de voltaje a la entrada del amplificador, por lo tanto, como resultado de esto, la indicación en la salida también cambiará, como si hubiese una señal de entrada, ya que el amplificador no es capaz de distinguir si la variación se debe a un corrimiento del punto de trabajo o a una señal de entrada.

Aún cuando es posible compensar éste efecto en cualquier instante, mediante un nuevo ajuste del punto de operación, el problema permanece cuando las medidas a efectuarse requieren de cierto período de tiempo para realizarlas.

El corrimiento en amplificadores C-C, se debe a tres cau-

sas principales:

a) Variaciones en la fuente de voltaje, debido a variaciones como por ejemplo, del voltaje de línea y poca regulación.

b) Variaciones aparentes en la polarización de la rejilla, debido a cambios de temperatura del filamento.

c) Variaciones de los componentes del amplificador que incluye resistencias y variaciones de las características del tubo debido al envejecimiento del mismo.

En la Fig. 2.10, se ilustran las diferentes causas de corrimiento. A éstas se les ha designado la letra Δ .

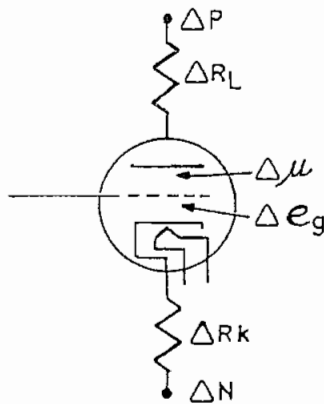


Fig. 2.10

El tipo de amplificador menos afectado por todos éstos problemas, es el seguidor catódico que se presenta a continuación y que está dibujado con un sistema de polarización de la rejilla que reduce las variaciones de la fuente de voltaje. (17)

El circuito de la Fig. 2.11, aprovecha las características de la realimentación negativa y entre sus principales características resaltan una alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida, estabilidad en la amplificación frente a cambios de las características de la válvula, variaciones de tensión, etc. Además la salida está relacionada linealmente con la entrada, especialmente si R_k es del orden

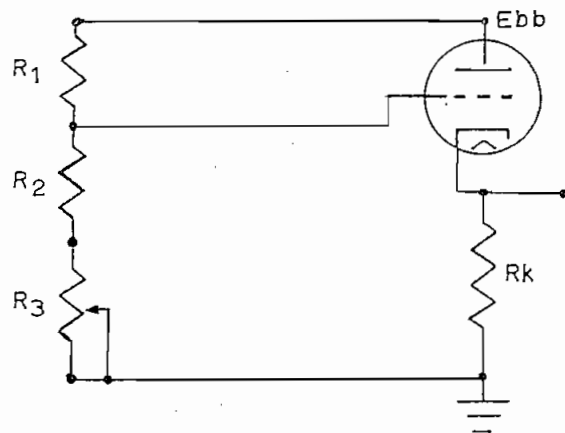


Fig. 2.11

de los cientos de $K\Omega$, la tensión de salida en reposo puede ajustarse fácilmente y las tensiones de rizado presentes en la tensión de polarización aparecen grandemente atenuadas a la salida. (18)

Para reducir los efectos causados por la variación de la temperatura del filamento y de la fuente de polarización, E_{bb} , se puede usar un seguidor catódico diferencial como el que se ilustra en la Fig. 2.12.

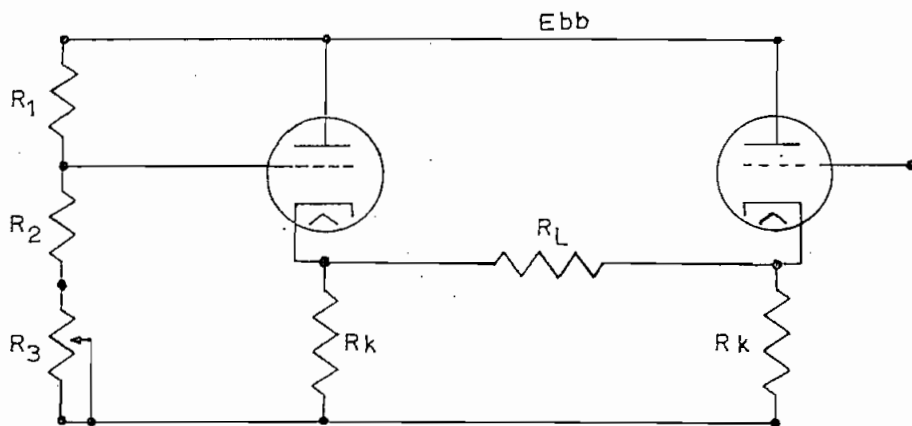


Fig. 2.12

En este circuito los dos tubos deben tener aproximadamente las mismas características, especialmente en lo que respecta a las variaciones de la temperatura del filamento.

En el circuito de la Fig. 2.12, la saturación ocurre cuando uno de los tubos pasa a corte, por lo tanto es conveniente para amperímetros, los cuales tienen poca resistencia y necesitan protección contra sobrecargas. Se consigue también una buena linealidad por la cancelación mutua de las variaciones de r_p . Se puede incrementar ésta linealidad, aunque a expensas de la ganancia, con la adición de una resistencia en serie con la carga.

Los dos terminales de entrada, pueden situarse convenientemente en las dos rejillas.

Tomando en cuenta todas éstas consideraciones, el circuito final para el amplificador C-C, es el siguiente:

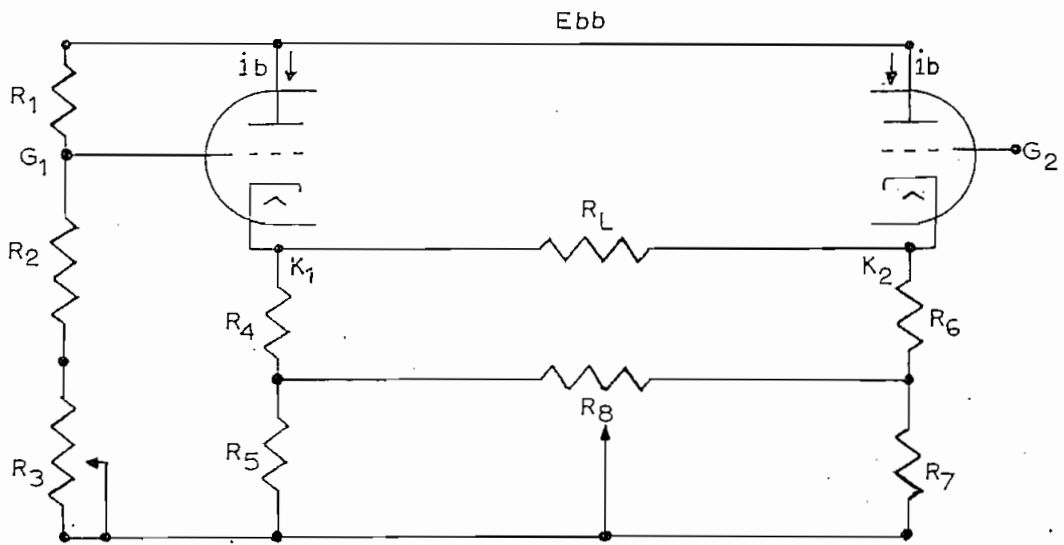


Fig.2.13

El tubo utilizado es el 12AU7A, doble triodo, medium μ , tipo miniatura de 9 patas. Las principales características de éste tubo son las siguientes:

Voltaje de Filamento:	Serie (4-5) = 12,6V. Paralelo 9-(4+5) = 6,3V.
Corriente de Filamento:	Serie = 150 mA. Paralelo = 300 mA.
Voltaje de Placa. (Vp):	100 250V.

Voltaje de Rejilla. (V_g):	0	-8,5V.
Corriente de Placa. (i_p):	11,8	10,5 mA.
Transconductancia. (g_m):	3.100	2.200 mhos
Factor de Amplificación. (μ):	19,5	17
Resistencia de Placa. (r_p)	6,25	7,7 K

En el circuito de la Fig. 2.13, se incluye el potenciómetro R_8 , que sirve para equilibrar el amplificador en ausencia de señal, es decir, en reposo.

Para el análisis del amplificador, nos servimos del circuito de la Fig. 2.14, que es equivalente al de la Fig. 2.13. Se ha escogido $E_{bb} = 100V$. C-C y $V_f = 2,4V$. C-C para la conexión en paralelo, o sea entre las patas (9) y (4+5).

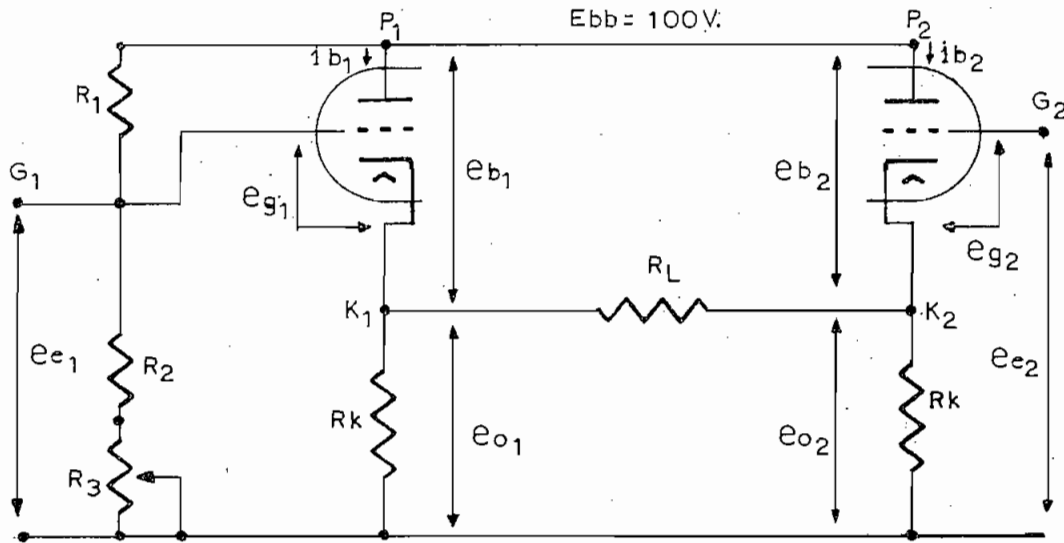


Fig. 2.14

En éste circuito tenemos que:

$$R_k = R_4 + \frac{R_5 \cdot (R_8/2)}{R_5 + (R_8/2)} = R_6 + \frac{R_7 \cdot (R_8/2)}{R_7 + (R_8/2)} \quad (2.21)$$

ya que, ambos seguidores catódicos deben ser iguales teóricamente y por lo tanto también:

$$R_4 = R_6, \quad R_5 = R_7$$

Para cada seguidor catódico, la ganancia de voltaje es:

$$A = \frac{\mu \cdot R_k}{r_p + (1 + \mu) R_k} \quad (2.22)$$

y si $R_k \gg r_p$, tenemos:

$$A = \frac{\mu}{\mu + 1}$$

Si hacemos $R_k = 200 \text{ K}\Omega$, es decir que es mucho mayor que r_p , resulta:

$$A = 0,94$$

Con $R_4 = R_6 = 100 \text{ K}\Omega - 1/2W$, $R_5 = R_7 = 330 \text{ K}\Omega - 1/2W$ y un potenciómetro $R_8 = 250 \text{ K}\Omega - 1/2W$, tenemos que reemplazando en cualquiera de las ecuaciones 2.21:

$$R_k = 190,7 \text{ K}\Omega \approx 200 \text{ K}\Omega$$

En la Fig. 2.14, e_g , e_b , i_b , son los valores totales instantáneos de la tensión rejilla-cátodo, placa-cátodo, la corriente de placa y e_e , y e_o , las tensiones de entrada y salida respectivamente.

La recta de carga para éste circuito es:

$$E_{bb} = e_b + i_b \cdot R_k \quad (2.23)$$

$$100V = e_b + i_b \cdot 200 \text{ K}$$

La recta de carga se halla dibujada en la figura siguiente:

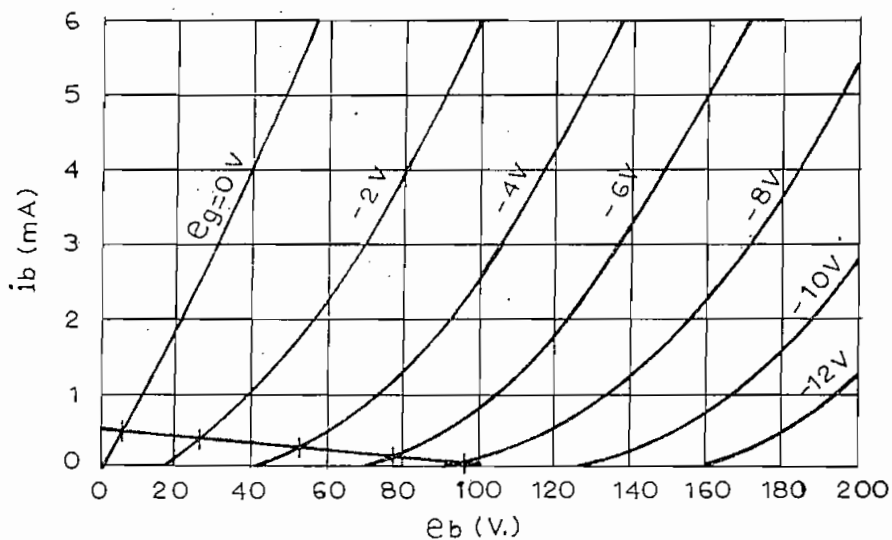


Fig. 2.15

Además del circuito de la Fig. 2.14, tenemos:

$$e_e = e_g + e_o \quad (2.24)$$

$$e_o = i_b \cdot R_k \quad (2.25)$$

Se puede construir una tabla para e_g , i_b , e_o y e_e , tomando para e_g , los valores de la tensión de rejilla de las características de placa y para i_b , las corrientes que resultan de la intersección de la recta de carga con las curvas características correspondientes a cada una de las tensiones de rejilla tomadas.

En ésta tabla (Tabla 2.10), se puede apreciar que la tensión de rejilla puede oscilar de 0 a -8V. y la señal de entrada puede ser de 90V. positivos sin que la rejilla sobrepase los cero voltios, es decir, sin que se haga positiva y, una señal negativa de -8V. pondrá a la rejilla

lla al potencial de corte.

Tabla 2.10.- Valores de e_e , e_o , i_b para diferentes valores de e_g .

e_g (V)	i_b (mA)	$e_o = i_b R_k$ (V)	e_e (V)
0	0,45	90	90
-2	0,40	80	78
-4	0,25	50	46
-6	0,15	30	24
-8	0	0	-8

Graficando e_o en función de e_e con los valores de la tabla 2.10, obtenemos:

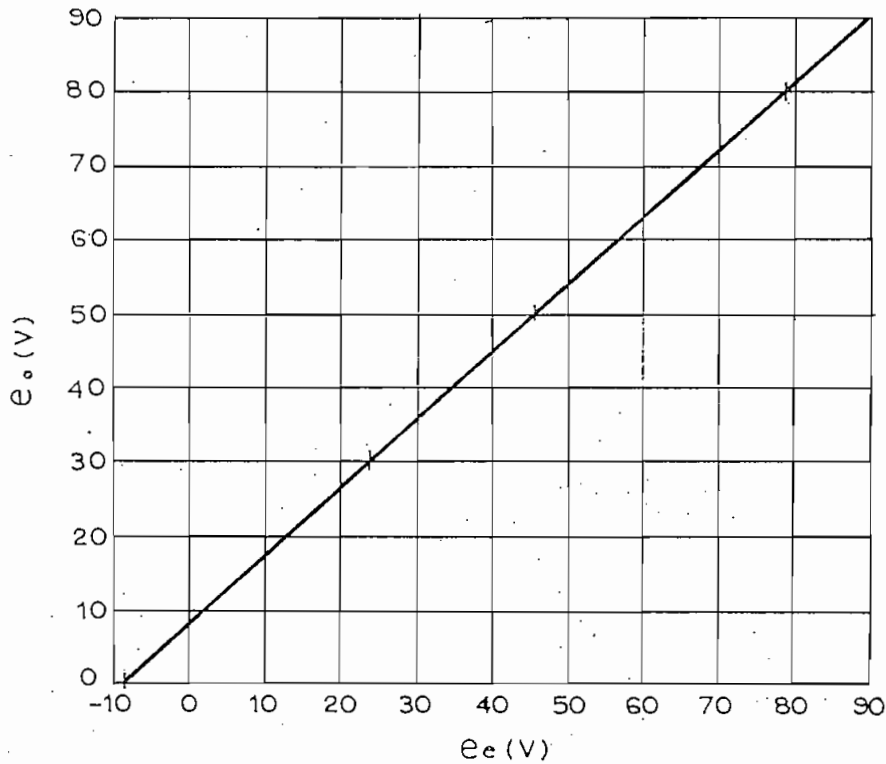


Fig. 2.16

Esta figura es la relación entre la salida y la entrada que

como se observa, es lineal y además sugiere la posibilidad de tener una señal total de entrada de 98V. de variación (Δe_e) para una variación total de salida de 90V. (Δe_o).

Se puede escoger el punto de operación Q, en cualquier sitio de la línea recta de la Fig. 2.16, dependiendo de la variación máxima que se tendrá en la señal de entrada. Si escogemos: $e_e = 70V$. resulta que $e_o = 71V$. y:

$$e_g = e_e - e_o = -1V. \quad (2.26)$$

Esto quiere decir que en ($R_2 + R_3$), deben caer 71V. y los restantes 29V. en R_1 . Escogiendo $R_1 = 27 K\Omega - 1/2W$, resulta que $R_2 + R_3 = 66 K\Omega$.

Podemos elegir $R_2 = 47K\Omega$ y por lo tanto $R_3 = 19 K\Omega$ o un potenciómetro de 50 $K\Omega$.

Para el cálculo de R_L , nos ayudamos del circuito equivalente del seguidor catódico diferencial:

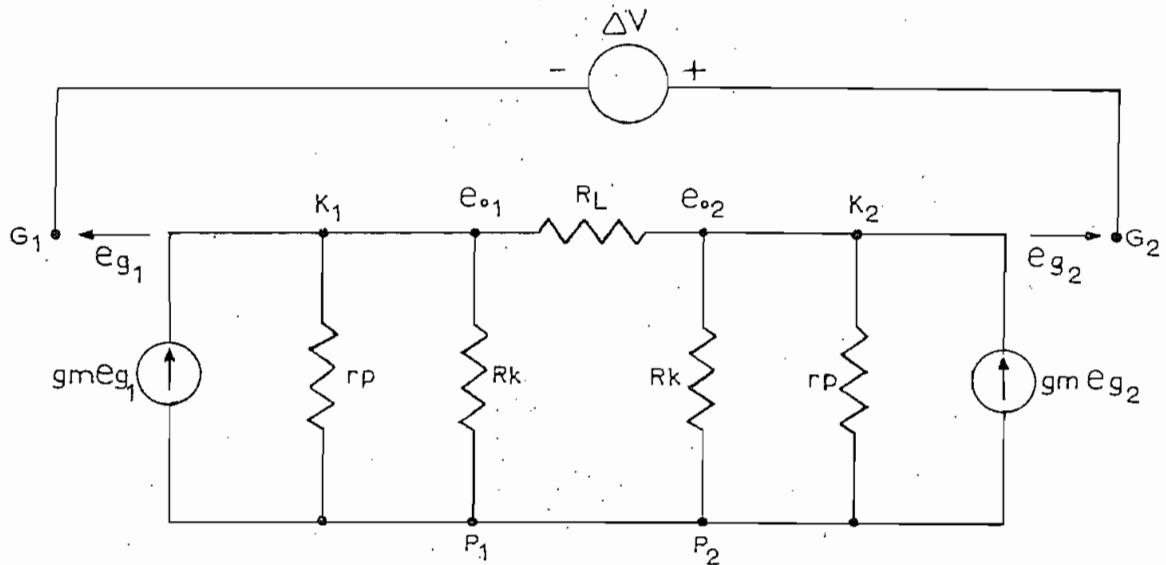


Fig. 2.17

En éste circuito tenemos:

$$- e_{g_1} - \Delta V + e_{g_2} + e_{o_2} - e_{o_1} = 0 \quad (2.27)$$

$$gm e_{g_1} = e_{o_1} \cdot \left(\frac{1}{r_p} + \frac{1}{R_k} \right) - \frac{e_{o_2} - e_{o_1}}{R_L} \quad (2.28)$$

$$gm e_{g_2} = e_{o_2} \cdot \left(\frac{1}{r_p} + \frac{1}{R_k} \right) + \frac{e_{o_2} - e_{o_1}}{R_L} \quad (2.29)$$

Restando la ecuación 2.29 de 2.28 y reemplazando en la ecuación resultante, el valor de $(e_{g_2} - e_{g_1})$, que se puede despejar de 2.27, obtenemos:

$$\frac{e_{o_2} - e_{o_1}}{R_L} = \frac{gm \Delta V}{2 + \frac{R_L}{R_k} + (1 + \mu) \frac{R_L}{r_p}} \quad (2.30)$$

En ésta ecuación, ΔV es el voltaje máximo que se aplica entre G_1 y G_2 que resulta del divisor de voltaje formado por la muestra a medirse y la respectiva resistencia de multiplicación. El valor de ΔV , se ha escogido como 0,5V., es decir, el 0,5% en 100V. lo que está dentro de las especificaciones.

El primer término de la ecuación 2.30, es la corriente máxima que atravesará por el instrumento de medición. Debido a que se utiliza un galvanómetro de 50 μ A para una desviación a plena escala, el valor de éste término será también de 50 μ A.

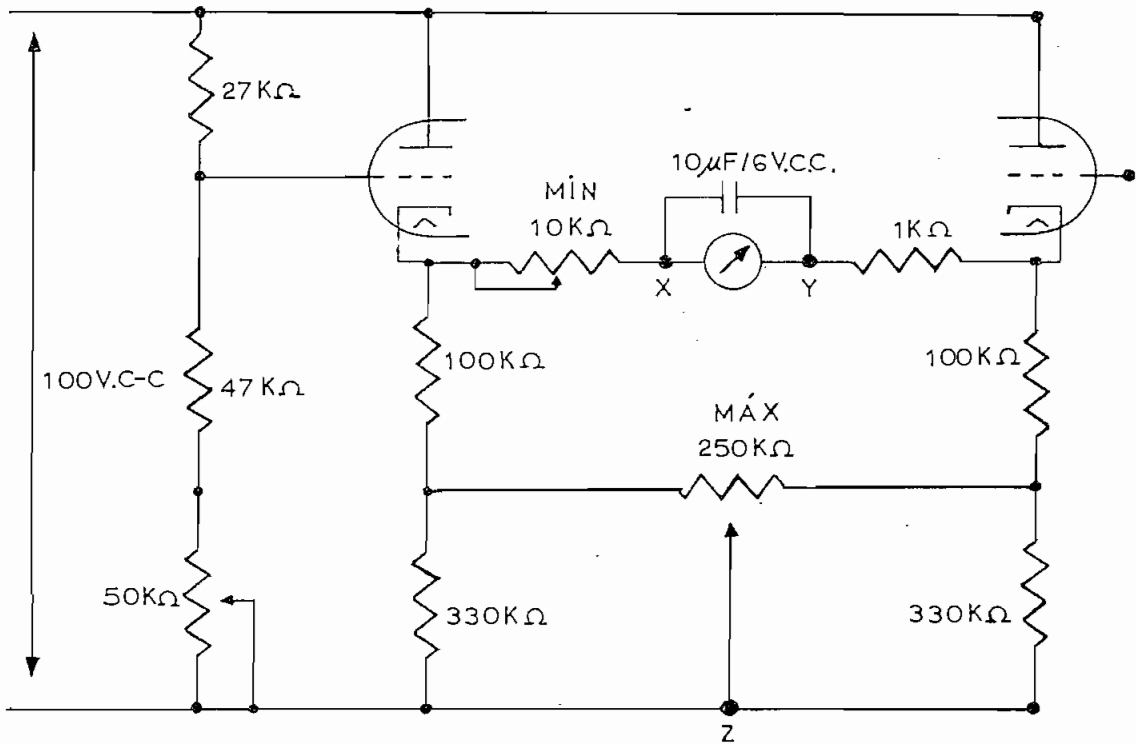
Reemplazando éstos valores y los de R_k , μ , gm y r_p , obtenemos que:

$$R_L = 8,6 \text{ K}\Omega$$

Esto significa que el instrumento de medida que se conecta entre K_1 y K_2 , estará en serie con una resistencia de 8,6 $\text{K}\Omega$ -1/2W. En

el circuito definitivo se lo ha colocado en serie con una resistencia de $1\text{ K}\Omega$ - $1/2\text{W}$ y un potenciómetro de $10\text{ K}\Omega$ - $1/2\text{W}$, que sirve para limitar la corriente que atravesará por el galvanómetro. Se ha colocado además, un condensador de $250\mu\text{F}/6\text{V}$. en paralelo con el instrumento, para evitar que cualquier componente alterna indeseable, atraviese por el galvanómetro, introduciendo errores en la medición.

Diagrama 2.5.- Amplificador de Corriente Continua.



Nota: A excepción de las especificadas, las demás resistencias son de 10% de tolerancia y por lo menos $1/2\text{W}$.

2.4.2.- Sistema Multiplicador.

El sistema multiplicador, es un divisor de tensión en el cual el voltaje ΔV , que sucesivamente se iría aplicando a las rejillas del tubo G_1 y G_2 , se multiplica por un factor de 10.

El circuito es el siguiente:

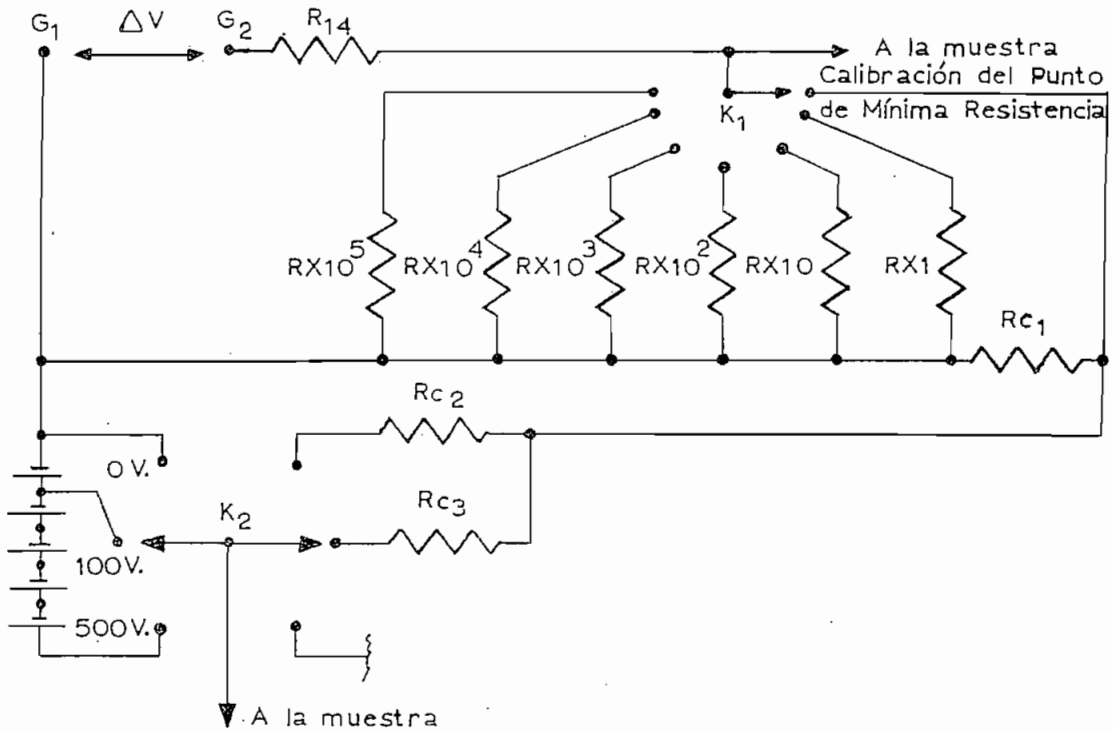


Fig. 2.18

Con los selectores K_1 y K_2 conectados como en la Fig. 2.18, el voltaje ΔV es:

$$\Delta V = \frac{R_{c1}}{R_{c1} + R_{c3}} \cdot 100V. \quad (2.31)$$

Como anotamos anteriormente, el valor máximo de ΔV es 0,5V. y si $R_{c1} = 1 \text{ K}\Omega$ -1%-1/2W, resulta que $R_{c3} = 199 \text{ K}\Omega$ o $200 \text{ K}\Omega$ -1%-1/2W.

El circuito equivalente colocado entre las rejillas del tubo, sería:

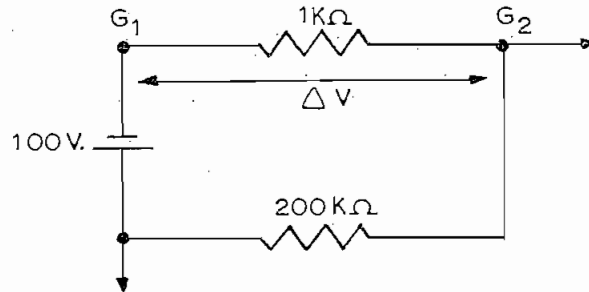


Fig. 2.19

es decir, que estaríamos midiendo una resistencia de aislamiento de 200 KΩ .

Si K₂, conectamos entre el terminal de 500V. y Rc₂, ΔV es:

$$\Delta V = \frac{1 \text{ K}\Omega}{1 \text{ K}\Omega + R_{c_2}} \cdot 500\text{V.} = 0,5\text{V.} \quad (2.32)$$

de donde Rc₂ = 999 KΩ o 1 MΩ -1%-1/2W y el circuito equivalente:

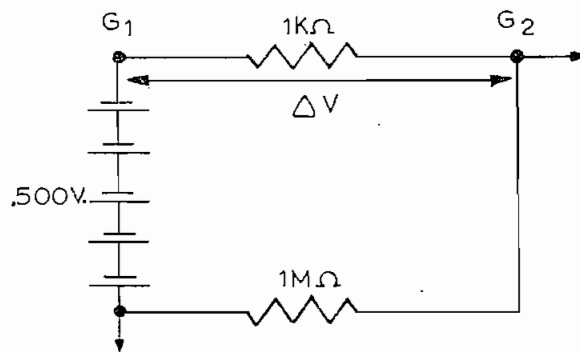


Fig. 2.20

en éste caso, estaríase midiendo una resistencia de 1 MΩ .

Estas dos resistencias de 200 KΩ y 1 MΩ , son las mínimas que se pueden medir con 100V. y 500V. respectivamente. Esto sig-

nifica que, con las posiciones de K_1 y K_2 mostradas en la Fig. 2.18, se calibra el punto de menor resistencia o sea el punto de máxima corriente en el galvanómetro.

Con el selector K_1 en la posición x1 y K_2 en el terminal de 100V., tenemos el siguiente circuito equivalente:

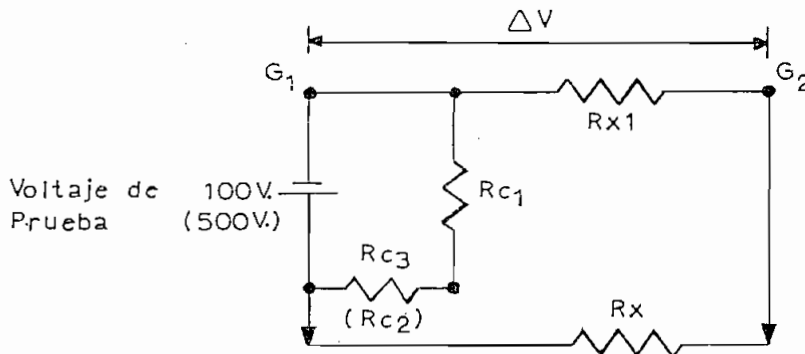


Fig. 2.21

en el que:

$$\Delta V = \frac{R_{x1}}{R_{x1} + R_x} \cdot \text{Voltaje de prueba.} \quad (2.33)$$

Si $R_{x1} = 1 \text{ K}\Omega$ -1%-1/2W y $\Delta V = 0,5\text{V.}$, R_x será igual a $200 \text{ K}\Omega$, es decir medimos una resistencia de aislamiento de éste valor. Si R_x , tuviera un valor de $2 \text{ M}\Omega$, ΔV sería igual a $0,05\text{V.}$ y la corriente que atraviesa por el galvanómetro sería de $5 \mu\text{A}$, o sea es 10 veces menor que la corriente que circula por el galvanómetro cuando estamos midiendo una resistencia de $200 \text{ K}\Omega$. De ésta manera, se puede calibrar el instrumento de medida directamente en megohmios.

Si nuevamente pasamos el selector a la posición x10 y $R_{x10} = 10 \text{ K}\Omega$ -1%-1/2W, R_x los mismos $2 \text{ M}\Omega$, ΔV será igual a $0,5\text{V.}$ lo cual producirá una desviación a plena escala del galvanómetro, lográndose de ésta forma multiplicar la escala del mismo, por un factor de 10.

Con éste procedimiento se pueden calcular los valores de las restantes resistencias multiplicadoras.

A continuación se presentan los respectivos valores de cada resistencia multiplicadora:

Rx1	:	1 K Ω	- 1%	- 1/2W
Rx10	:	10 K Ω	- 1%	- 1/2W
Rx10 ²	:	100 K Ω	- 1%	- 1/2W
Rx10 ³	:	1 M Ω	- 1%	- 1/2W
Rx10 ⁴	:	10 M Ω	- 1%	- 1/2W
Rx10 ⁵	:	100 M Ω	- 2%	- 1/2W

Todas estas resistencias son de precisión, ya que con ellas se compara la resistencia de aislamiento a medirse.

La calibración del instrumento de medida, se hace de acuerdo a la corriente que lo atraviesa. Para el voltaje de prueba de 100V, se lo ha calibrado desde 2 M Ω hasta 100 M Ω y el factor de multiplicación va desde 0,1 hasta 10⁴ y para el voltaje de prueba de 500V., la escala comienza desde 1 M Ω y termina en 50 M Ω y el factor de multiplicación, desde 1 hasta 10⁵.

Los rangos de medida son entonces los siguientes:

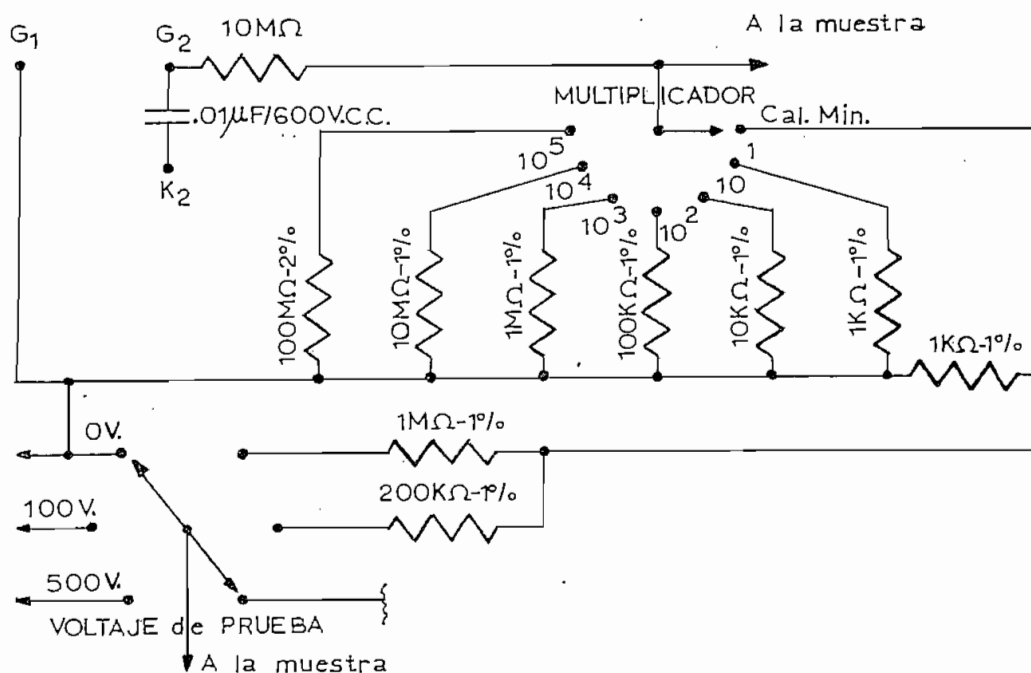
Tabla 2.11.- Rangos de Medida del Megóhmetro Electrónico:

Voltaje de prueba	Rango
100V.	0,2 M Ω hasta 1'000.000 M Ω
500V.	1,0 M Ω hasta 5'000.000 M Ω

En el circuito de la Fig. 2.18, R₁₄ es una resistencia de 10 M Ω -1/2W, que sirve para limitar la corriente en caso de que G₂ se hiciera positiva, también se ha colocado un condensador de 0,01 μ F- /600V. entre G₂ y K₂ con el objeto de que cualquier componente alterna que aparezca en el sistema multiplicador, no afecte la polarización de

G₂. A continuación se ilustra el sistema multiplicador construido.

Diagrama 2.6.- Sistema Multiplicador.



Nota: A excepción de las especificadas, las demás resistencias son de 10% de tolerancia y por lo menos 1/2W.

2.4.3.- Conmutadores de Electrificación y Sistema de Terminales para la Muestra.

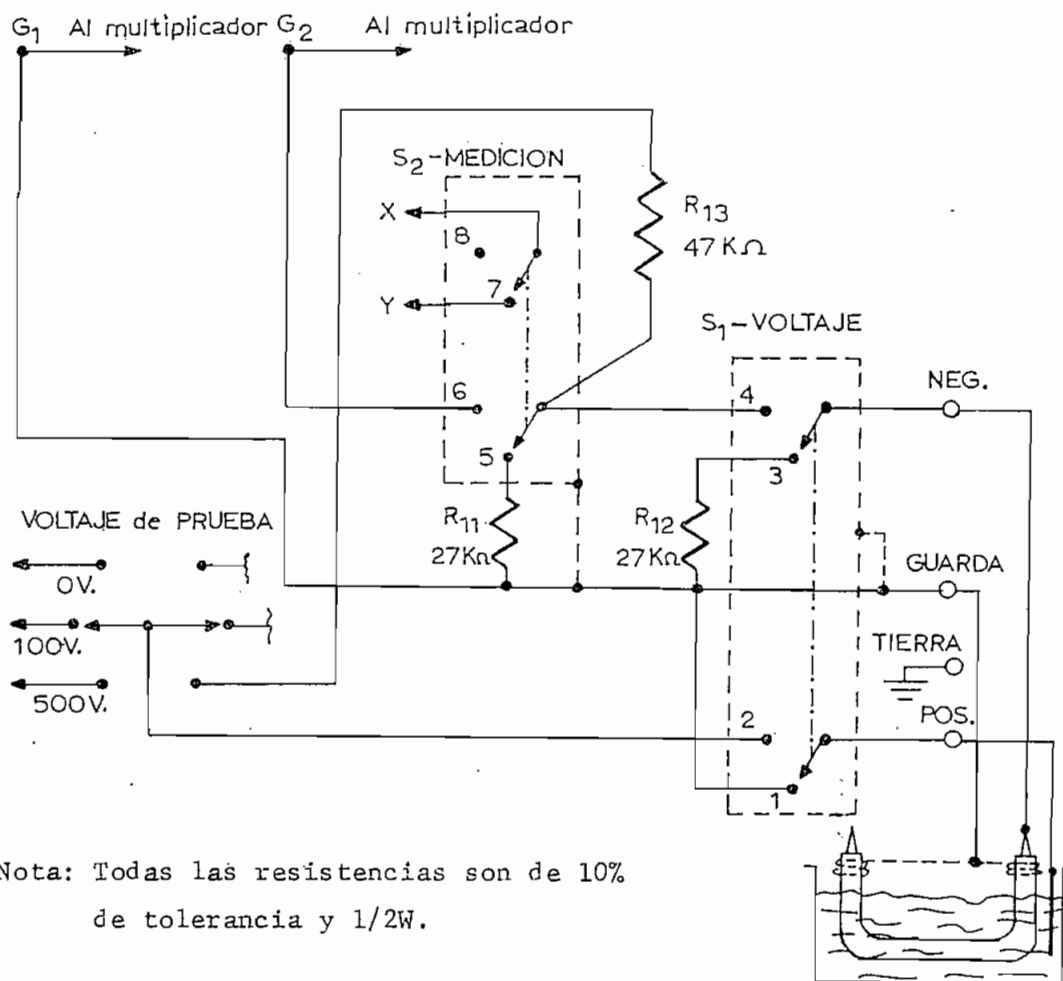
El propósito de los conmutadores de electrificación, es permitir la aplicación del voltaje de prueba especificado durante un minuto y luego realizar la medición.

En el sistema de terminales tenemos el positivo (POS.) y negativo (NEG.) a los cuales se conecta la muestra, el terminal de guar

da (GUARDA) y el de tierra (TIERRA).

El conjunto de los conmutadores y sistema de terminales, también proveen un camino para la descarga de la muestra.

Diagrama 2.7.- Conmutadores de Electrificación y Sistema de Terminales para la Carga.



Nota: Todas las resistencias son de 10% de tolerancia y 1/2W.

En éste circuito, la resistencia de aislamiento se conecta entre los terminales POS. y NEG. y el alambre de guarda se conecta al terminal GUARDA. La teoría del terminal de guarda, está desarrollada en el apéndice N° 1.

El terminal de tierra, está provisto de un puente de manera que puede ser conectado al POS. o al de GUARDA, de acuerdo a la forma de medición.

El conmutador S_1 , denominado VOLTAJE, sirve para que luego de que se ha escogido el voltaje de prueba deseado, se aplique a la muestra, ésto es al pasarlo de la posición 1 a 2 y 3 a 4. Para efectuar la medición luego de 1 minuto de electrificación, pasamos el conmutador S_2 , denominado MEDICION, a la posición 5.

El circuito equivalente en el instante de medición, es el siguiente:

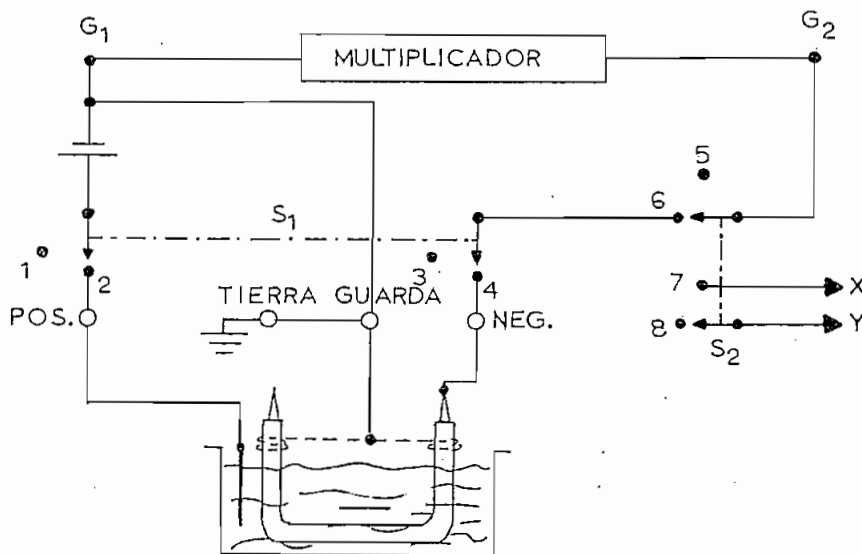


Fig. 2.22

Luego de que se ha hecho la medición, se regresan a su posición original, los conmutadores S_1 y S_2 con lo cual se cortocircuita el galvanómetro, protegiéndolo de ésta forma y R_{11} o R_{12} , actúan como resistencias de descarga de la muestra según se regresen a su posición original ya sea primeramente S_1 ó S_2 o los dos juntos a la vez. El valor de éstas resistencias es de $27 \text{ K}\Omega - 1/2W$.

En cuanto a R_{13} , es una resistencia que se conecta entre G_1

y G_2 después de apagar el voltaje de prueba y al oprimir los conmutadores S_1 y S_2 , lo que descargaría a la muestra a través de la resistencia R_{13} y no por las rejillas del tubo. Esta resistencia también sirve para descargar cualquier acumulación de carga debido a las capacidades del tubo. Su valor es de $47 \text{ K}\Omega - 1/2\text{W}$.

En el diagrama 2.8, colocado al final de éste trabajo, se presenta el circuito construido del megóhmetro electrónico diseñado.

En éste diagrama está incluido un fusible de 0,5 A. en el primario del transformador, que es mayor que la corriente que circula por el primario en condiciones normales de trabajo pero que es el de menor valor conseguido en el mercado local.

2.5.- Construcción del Equipo.

El circuito electrónico de medida, se ha construido sobre una lámina para circuitos impresos de 16 x 15 cms., teniendo especial cuidado de contaminarla ya que podría suceder que una suciedad o algo similar, presente un camino de menor resistencia que por ejemplo la resistencia multiplicadora de $100 \text{ M}\Omega$.

Por ésta misma razón, se ha utilizado un zócalo de porcelana para el tubo electrónico ya que es fácil de limpiar y mantiene sus propiedades por largo tiempo.

En el diagrama 2.9, presentado al final del trabajo, se ilustra el circuito impreso construido, junto con la disposición de cada uno de los elementos y las respectivas salidas hacia el galvanómetro, conmutadores y selectores.

El circuito rectificador para el voltaje de filamento, va colocado sobre el transformador, en una tarjeta aparte del circuito impreso principal.

El equipo posee las siguientes dimensiones:

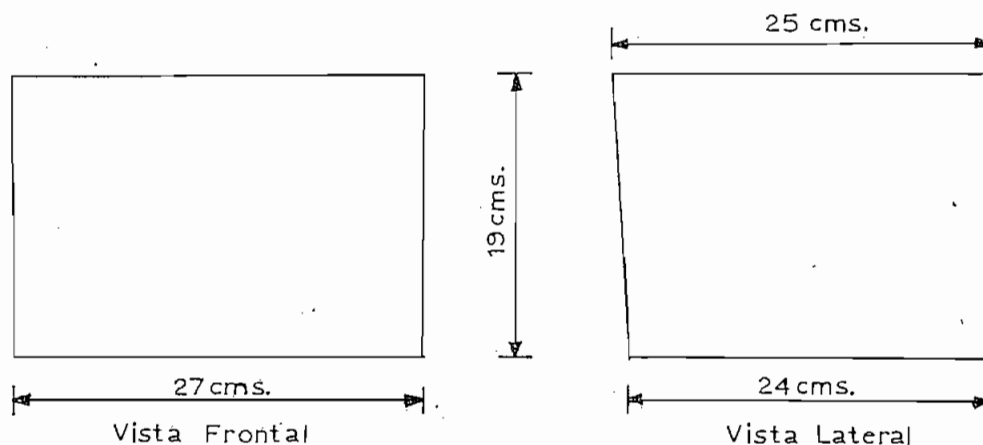
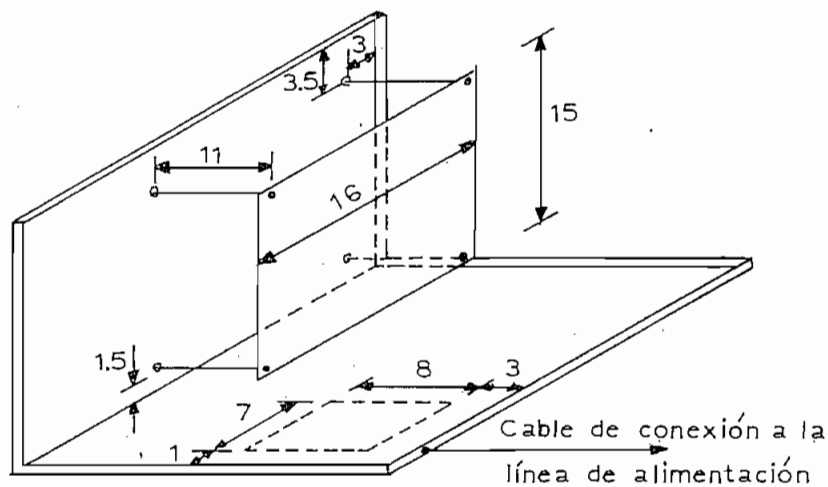


Fig. 2.23

Está dividido en dos secciones, la una, que consta del panel frontal y la base en ángulo y, la otra, compuesta por las tapas superior, laterales y posterior.

El circuito impreso, está colocado paralelamente al panel frontal, separado una distancia de aproximadamente 11 cms., por medio de cuatro espaciadores. El transformador se ha colocado en la superficie indicada con línea de segmentos de la Fig. 2.24.



Nota: Todas las medidas están en cms.

Fig. 2.24

Con el objeto de aislar al transformador perfectamente de tierra, se lo ha montado sobre una lámina de polietileno de baja den

sidad al igual que sus pernos. El cable para conectarlo a la línea de alimentación es tripolar flexible de calibre 16 AWG, cada conductor. Dos de los conductores de éste cable, son para conectarlos a los 110V. C-A (rojo y negro) y el restante (blanco), es el conductor de tierra.

En el panel frontal, se han distribuido el galvanómetro, los potenciómetros de calibración de los puntos de mínima y máxima resistencia, la luz piloto, el portafusible, el interruptor de encendido, los selectores K_1 y K_2 , los conmutadores S_1 y S_2 y los cuatro terminales. Esta distribución se muestra en el diagrama 2.10, incluido también al final de éste trabajo.

En cuanto a los selectores, tenemos que K_1 , es un monopolar de 7 vías y K_2 , bipolar de 3 vías cuyos terminales están montados sobre porcelana que presenta una alta resistencia de aislamiento.

Los conmutadores S_1 y S_2 , son de 2 vías y 2 posiciones y, para los terminales POS., GUARDA y TIERRA, se han utilizado bananas hembras especiales para alto voltaje que van montadas directamente sobre el panel frontal y, para el terminal NEG., la banana va montada sobre una lámina de polietileno de baja densidad y ésta sobre el panel frontal.

La razón de ésto es que al colocar la muestra entre los terminales POS. y NEG., tenemos el siguiente circuito equivalente:

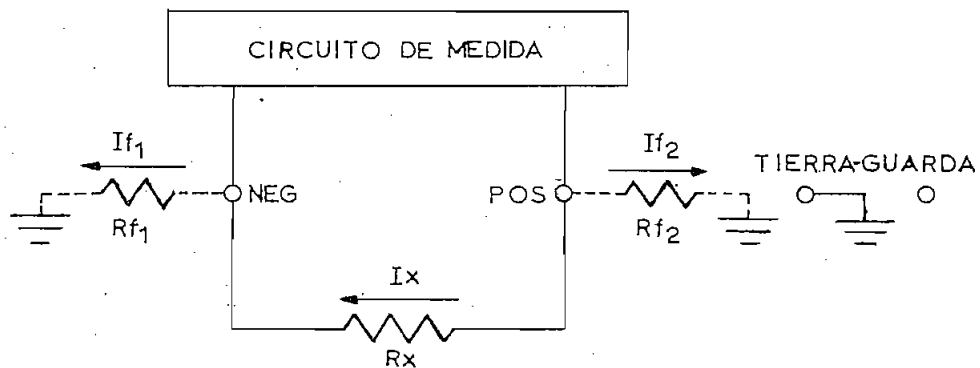


Fig. 2.25

en el cual. Rf_1 y Rf_2 son las resistencias de fuga que presentan los terminales. If_1 e If_2 , son las corrientes de fuga que circulan por ellas al aplicar el voltaje a la muestra.

Para que la medición sea correcta, es necesario que If_1 e If_2 , sean mucho menores que I_x que es la corriente que atraviesa por la muestra.

Esto se logra ya con las bananas para alto voltaje, pero para asegurar aún más el resultado, se ha montado, como se dijo antes, la banana del terminal NEG. sobre una lámina de polietileno de 3 cms. de diámetro exterior, 0,6 cms. de diámetro interior y 0,2 cms. de espesor, que presenta una resistencia de aislamiento de $10^{17} \Omega$ que es mucho mayor que la más alta resistencia a medirse con el equipo.

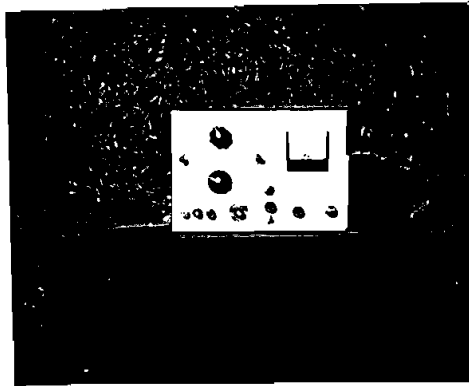
La razón de la utilización de la lámina de polietileno de baja densidad y de sus dimensiones, se explican en el apéndice N° 2.

De la Fig. 2.25, se deduce que la principal fuente de error debido a corrientes de fuga es el terminal NEG. y por ello se lo ha aislado de ésta forma.

Los cables necesarios para conectar la muestra al equipo, pueden ser de calibre 16 AWG, uno por cada terminal si la medición se hace a distancias cortas y si, se la efectúa a distancias grandes del equipo, es necesario utilizar un cable coaxial para el terminal NEG., cuyo conductor exterior se conecta al terminal de guarda y el central al negativo con el objeto de evitar cualquier corriente de fuga.

Seguidamente, se presenta una fotografía del equipo ya terminado:

Diagrama 2.11.- Fotografía del Megóhmetro Electrónico.



3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1.- Calibración del Instrumento.

Debido a que la respuesta del amplificador C-C es lineal, el galvanómetro de $50 \mu A$ puede ser calibrado directamente en megohmios, tal como un óhmetro normal.

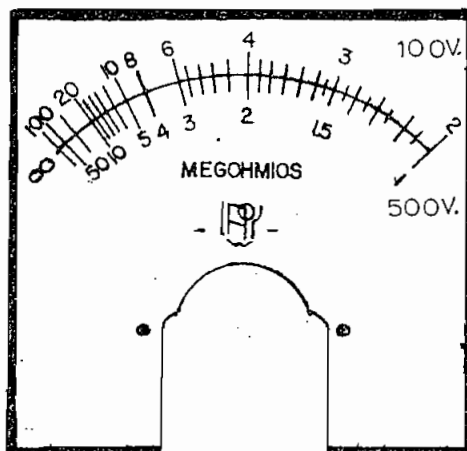
Esto significa que, el punto de $0 \mu A$, corresponde a una resistencia infinita y, el punto de $50 \mu A$, corresponde a la mínima resistencia que puede ser medida con cada uno de los voltajes de prueba. Por lo tanto, para 100V. C-C será de $0,2 M\Omega$ o $200 K\Omega$ y para 500V. C-C, $1 M\Omega$.

Ya que el punto de mínima resistencia es diferente para los dos voltajes, ha sido necesario dibujar dos escalas, la una, superior, que comienza desde $2 M\Omega$ y la inferior que comienza desde $1 M\Omega$, terminando ambas en ∞ .

La escala superior, se la ha calibrado desde $2 M\Omega$, ya que el factor de multiplicación comienza desde 0,1 con lo cual se obtiene la mínima resistencia que puede medirse con el voltaje de prueba de 100V. C-C.

La escala terminada, se muestra a continuación:

Diagrama 3.1.- Escala del Megóhmetro Electrónico.



Como puede observarse, ésta escala es similar a la de cualquier óhmetro y no es lineal, por lo tanto, cuando se realizan las mediciones, se obtendrá una mayor precisión en la lectura si se logra que la indicación se sitúe en la parte derecha de la escala.

3.2.- Procedimiento de Medida.

Para la medición de cualquier muestra, se conecta primeramente el aparato a la fuente de alimentación de 110V C-A y al conductor de tierra.

Luego de encendido, es necesario dejar pasar un lapso de 10 minutos para comenzar con el procedimiento de medida.

3.2.1.- Calibración de los Puntos Extremos.

El primer paso a efectuarse, es calibrar los puntos de máxima y mínima resistencia. Para ésto:

a) Se escoge el voltaje de prueba deseado, mediante el selector VOLTAJE DE PRUEBA. El selector MULTIPLICADOR, se lo coloca en la posición de menor multiplicación: x1 o x0,1.

b) Se presiona el conmutador MEDICION, y mediante el potenciómetro llamado MAX., se ajusta el galvanómetro al punto de resistencia infinita en la escala y se regresa el conmutador a su posición inicial. Este potenciómetro, debe ser nuevamente ajustado con el voltaje escogido, cada vez que el galvanómetro se salga de ésta calibración.

c) Con el mismo voltaje, se cambia el MULTIPLICADOR a la posición de calibración del punto de mínima resistencia: CAL. MIN. y nuevamente se presiona el conmutador MEDICION y, mediante el potenciómetro llamado MIN., se ajusta el punto de menor resistencia que corresponde en la escala a $1 M\Omega$ o $2 M\Omega$.

Este punto se debe calibrar siempre con el selector VOLTAJE DE PRUEBA, en el voltaje escogido.

3.2.2.- Operación de Medida.

Luego de calibrar los puntos extremos, se procede a:

a) Se escoge el voltaje de prueba deseado con el selector VOLTAJE DE PRUEBA y el MULTIPLICADOR se lo coloca en la posición $\times 0,1$ o $\times 1$.

b) Se conecta la muestra entre los terminales NEG. y POS. Si se utiliza alambre de guarda, se lo conecta al terminal GUARDA.

Si la muestra no está distanciada del equipo, se puede usar cualquier cable normal, pero si está alejada del mismo, es conveniente utilizar un cable coaxial con el conductor externo conectado al terminal GUARDA y el central al NEG.

c) Se presiona el conmutador VOLTAJE y luego de un minuto, se presiona el conmutador MEDICION.

d) Si el galvanómetro indica ∞ , se regresan a la posición inicial los dos conmutadores y se gira el MULTIPLICADOR hacia el siguiente factor, repitiéndose el numeral c). El factor de multiplicación se aumenta hasta obtener una lectura preferiblemente en la parte derecha de la escala.

e) La resistencia de la muestra es entonces la lectura en la escala del galvanómetro correspondiente al voltaje de prueba escogido, multiplicada por el respectivo factor indicado por el MULTIPLICADOR.

d) Luego de efectuada la lectura, se regresan a su posición inicial los conmutadores VOLTAJE y MEDICION, con lo cual se descarga la muestra.

El puente que se provee con el equipo, puede ser conectado entre TIERRA y el terminal POS. o el terminal GUARDA.

El terminal GUARDA, puede ser usado si éste o el POS. están puestos a tierra. Se debe tomar en cuenta que si el POS. está conectado a tierra, el de GUARDA estará a un voltaje negativo alto, indicado por el voltaje de prueba.

El terminal GUARDA, puede ser puesto a tierra si la muestra a medirse está aislada de tierra, pero, si un terminal de la muestra necesariamente debe ser o está puesto a tierra, el puente se conecta entre TIERRA y POS.

Ocurre generalmente que el cable conectado al terminal GUARDA, viene de algún chasis o recipiente, que no está aislado de tierra, por lo tanto, es mejor si se conecta a tierra el terminal GUARDA.

3.2.3.- Precauciones.

Es posible, que ocurra alguna vez el "corrimiento del punto cero" del amplificador C-C. Esto se comprueba, si cuando luego de calibrar los puntos de máxima y mínima resistencia, la aguja indicadora no permanece en el punto ∞ de la escala, al pasar el MULTIPLICADOR al mayor factor.

Para corregir ésta desviación, se procede de igual manera que en los puntos a), b) y c) del procedimiento de calibración de los puntos extremos, y a continuación, con el voltaje escogido y el MULTIPLICADOR en el mayor factor, se ajusta el potenciómetro R_3 , montado en el circuito impreso, en la dirección que se oponga a ésta desviación. Es preferible realizar éste ajuste con un destornillador no metálico. Luego de esto, es necesario calibrar nuevamente los potenciómetros MAX. y MIN.

Cuando se presionan los conmutadores, el voltaje de prueba se aplica a los terminales POS., NEG. y GUARDA y, aunque la corriente ha sido limitada a un valor no letal, la energía almacenada en un capacitor conectado a los terminales del megóhmetro, por ejemplo, al

medir resistencias de fuga de condensadores, puede resultar letal. Debido a ésto, es necesario regresar siempre a su posición inicial a los conmutadores VOLTAJE y MEDICION, antes de conectar o desconectar la muestra de los terminales de medición.

3.3.- Resultados Experimentales.

En la tabla 3.1, seguidamente presentada, se muestran los resultados de las mediciones realizadas con el Megóhmetro Electrónico, en diferentes resistencias.

Tabla 3.1.- Resultados Experimentales.

Resist. #	Valor Nominal (M Ω)	Valor Leído (M Ω)	Voltaje de Prueba (V)	Error %	Referencia
1	1090 \pm 2%	1060	500	-2,8	Puntas de Alto Voltaje EE-94-B
2	20	20	500	0	AVO. (Imp. de Entrada)
		21	100	5	
3	50	50	500	0	AVO. (Imp. de Entrada)
		52	100	4	
4	11	10,5	500	2,9	VTVM. (Imp. de Entrada)
		10,8	100	1,8	
5	61	60	100	1,7	AVO. y VTVM. (Imp. de Entrada, en serie)
6	100	105	500	5	AVO. y AVO. (Imp. de Entrada, en serie)
		110	100	10	

También se comparó el valor de una resistencia que, medida con el VTVM Hewlett-Packard 410-C, resultó de 560 K Ω y, con el Meg-

óhmetro Electrónico construido, $540\text{ K}\Omega$ en la escala de 100V., es de cir, una diferencia de -3,6% en relación a la medida con el VTVM.

3.4.- Conclusiones.

a) De los datos de la tabla 3.1, referentes al % de error, con relación al valor nominal de las resistencias medidas, tenemos que el error para la escala de 500V es $\pm 2,9\%$ y, para la escala de 100V es $\pm 5,2\%$.

Según éstos valores, el error para las dos escalas, está dentro de los límites que se pueden considerar como aceptables. Las lecturas serán más exactas, cuando, como se anotó anteriormente, la indicación resulte en la parte derecha de la escala del galvanómetro.

b) Ya que, el valor máximo de resistencia de aislamiento que se puede medir es de $5'000.000\text{ M}\Omega$, el equipo nos permite calcular la resistencia de fuga de la mayoría de los tipos de aislamiento eléctrico y, aunque el presente trabajo está dirigido sólo hacia la medición de resistencia de aislamiento de cables de hasta 600V, se puede también utilizar el equipo construido para medir resistencias de fuga de condensadores o, de cualquier componente eléctrico y para determinar la resistencia volumétrica o superficial de cualquier material, mediante el uso de las apropiadas puntas de prueba.

e) Para asegurar que el valor leído en el aparato es el que realmente presenta el material puesto a prueba, es necesario eliminar cualquier camino que presente menor resistencia a la corriente que atraviesa la muestra, que la impedancia de entrada, para lo cual se deben mantener siempre limpios los terminales y aún el mismo aparato y, al operarlo o repararlo, si hubiere necesidad, se debe tener especial cuidado de no contaminarlo.

Apéndice N° 1

El Sistema de Guarda.

El sistema de guarda, ha sido descrito como "aislación por conducción" y, es solamente por la aplicación de ésta técnica que se ha logrado llegar a medir resistencias de aislamiento de muy alto valor.

El sistema de guarda, minimiza los efectos de las corrientes de fuga, reduciendo el potencial que podría hacer circular corriente por una resistencia de fuga y no por la elevación de la resistencia física de la misma.

Al medir la corriente que circula por un material aislante, utilizando terminales circulares como en la Fig. 1.1, tenemos que la distribución del campo eléctrico, no es completamente uniforme.

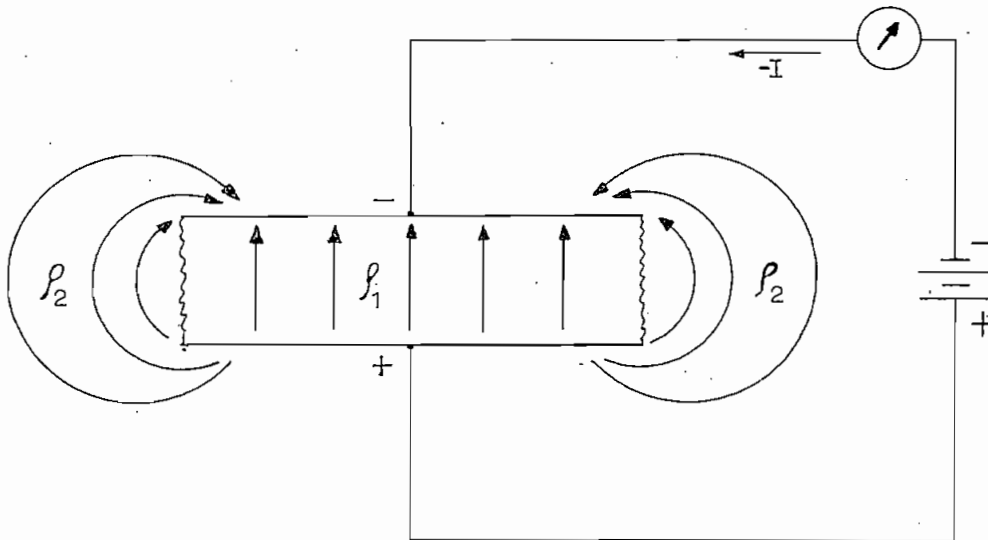


Fig. 1.1

Si llamamos \vec{E}_1 a la parte del campo eléctrico que es unifor

me, \bar{E}_2 a la parte no uniforme, ρ_2 la resistividad del medio que rodea al material aislante, ρ_1 a la resistividad del dieléctrico bajo prueba, \bar{A}_1 a la superficie que atraviesa el campo \bar{E}_1 y, \bar{A}_2 la superficie que atraviesa la parte no uniforme del campo, tenemos que la corriente total medida será:

$$I = \frac{1}{\rho_1} \bar{E}_1 \cdot \bar{A}_1 + \frac{1}{\rho_2} \bar{E}_2 \cdot \bar{A}_2 \quad (1.1)$$

ya que en éste caso, no se puede despreciar el segundo término de la parte derecha de la ecuación 1.1 porque el dieléctrico o aislante colocado entre las dos placas conductoras, puede presentar una resistividad comparable a la del medio que lo rodea, es decir:

$$\rho_1 \approx \rho_2$$

Aumentando un tercer terminal que esté a igual potencial que el terminal #1, obtenemos la siguiente distribución del campo eléctrico:

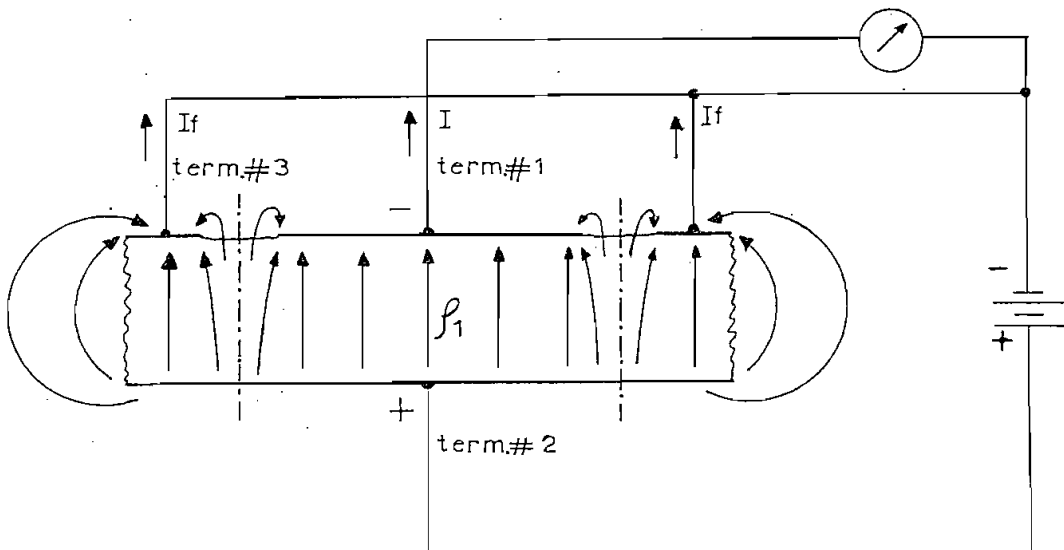


Fig. 1.2

De ésta forma, con la ayuda del terminal #3 llamado GUARDA que, en éste caso sería un anillo y que está a igual potencial que el terminal #1, suponiendo que no hay caída de voltaje en el galvanómetro, la corriente medida es:

$$I = \frac{1}{\rho_1} \bar{E}_1 \cdot \bar{A}_1$$

es decir que, la corriente producida por la parte no uniforme del campo eléctrico, no atraviesa por el instrumento, eliminándose de ésta manera el error producido por ella, habiéndose logrado entonces, "aislar" el material aislante.

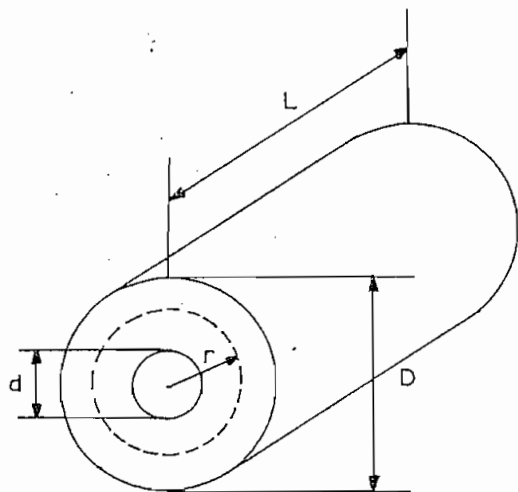
Esta forma de medición es más precisa, si las dimensiones del dieléctrico son tales que la distancia entre las placas circulares es mucho mayor que el ancho de la ranura entre los terminales #1 y #3.

Este es el principio en que se basa el terminal de guarda y, aunque algunos detalles pueden variar de acuerdo a las circunstancias que presente la medición, su importancia radica en que éste sistema presenta al instrumento o equipo de medición, la cantidad que se desea medir aislada completamente de las demás.

Apéndice-Nº 2

Resistencia de Aislamiento y Características del Polietileno.

La resistencia entre un punto interior a uno exterior que presenta un anillo, viene dada por:



$$dR = \rho \cdot \frac{dl}{dA}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{D}{d} \quad (2.1)$$

Podemos observar, de la ecuación 2.1, que para escoger un buen aislante es necesario que su resistividad volumétrica sea alta a más de que debe tener una buena resistencia a la absorción de humedad y pueda ser limpiado fácilmente, sin que pierda sus características.

En la tabla 2.1, se presentan las características de algunos materiales aislantes. Para ésta tabla, rige la siguiente clave:

- (+) el material tiene muy buena resistencia a la absorción de humedad.
- (0) el material, es moderadamente resistente a la absorción de humedad.
- (-) el material, es débil en su resistencia a la absorción de humedad.

Tabla 2.1.- Tabla Comparativa de las Características de Algunos Materiales Aislantes. (19)

Material	Resistividad Volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Resistencia a la Absorción de humedad
Teflón	$10^{17} - 10^{18}$	+
Poliestireno	$10^{12} - 10^{18}$	0
Cerámica	$10^{12} - 10^{14}$	-
Nylon	$10^{12} - 10^{14}$	-
Compuestos Epoxídicos	$10^{10} - 10^{17}$	-
Cloruro de Polivinilo	$10^{10} - 10^{15}$	+
Compuestos Fenólicos	$10^5 - 10^{12}$	-
Poliétileno Alta Densidad	$10^{15} - 10^{17}$	0
Poliétileno Baja Densidad	$10^{17} - 10^{18}$	0

Se ha escogido el polietileno de baja densidad, $0,92\text{gr/cm}^3$ a 25°C , como material para la lámina, sobre la cual se montará la banana del terminal negativo ya que, como podemos observar en la tabla 2.1, posee una alta resistividad, buena resistencia a la absorción de humedad además de que es flexible y puede limpiarse fácilmente con alcohol.

Las dimensiones de la lámina utilizada son:

$$D = 3 \text{ cms.}$$

$$d = 0,6 \text{ cms.}$$

$$L = 0,2 \text{ cms.}$$

Con éstas dimensiones, la resistencia de aislamiento es de $1,3 \cdot 10^{17} \Omega$, que es mucho mayor que la más alta resistencia a medir se con el equipo construido.

INDICE DE REFERENCIAS

Ref. #	Página	Procedencia
1	13	<u>ASTM Standards</u> , Designation D257-66, Pág. 181.
2	16	Idem #1, Pág. 180.
3	27	Idem #1, Pág. 190.
4	27	Frank M. Clark, <u>Insulating Materials</u> , Pág. 562
5	29	<u>ASTM Standards</u> , Designation D470-71, Pág. 247.
6	35	Idem #1, Pág. 190.
7	37	Peter H. Reynolds, "Localización de Fallas en Cables de Voltaje Medio", <u>Ingeniería de Fábricas</u> , Volúmen 3, número 3, Pág. 12.
8	38	Idem #1, Pág. 191.
9	45	Motorola Semiconductors Products Inc., <u>The Semiconductor Data Library</u> , Pág. 1-60.
10	46	<u>HEP Semiconductor Catalog</u> , Pág. 22.
11	48	John D. Ryder, <u>Ingeniería Electrónica</u> , Pág. 368.
12	56	Idem #10, Pág. 23.
13	57	Idem #11, Pág. 368.
14	63	Sol D. Prensky, <u>Electronic Instrumentation</u> , Pág. 148.
15	63	Valley y Walman, <u>Vacuum Tube Amplifiers</u> , Pág. 418.
16	63	Idem #15, Pág. 418.
17	64	Chesnut-Mayer, <u>Servomechanisms and Regulating Systems</u> , Pág. 164.
18	65	Millman-Taub, <u>Circuitos Digitales y de Pulsos</u> , Pág. 17.
19	97	Keithley Instruments, <u>Electrometer Measurements</u> , Pág. 17.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Chesnut, H., et. al. Mayer, R.W., Servomechanisms and Regulating Systems, 2a edición, John Wiley and Sons Inc., New York, Chapman & Hall Ltd., London, Septiembre 1956.
- 2.- Clark, F.M., Insulating Materials for Design and Engineering Practice, John Wiley & Sons Inc., New York, Julio de 1962.
- 3.- Everitt, W.L., Fundamentals of Radio and Electronics, 2a edición, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1958.
- 4.- Frank, E., Electrical Measurement Analysis, Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 1959.
- 5.- IPCEA-NEMA, Standards Publication, Thermoplastic - Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy, Part 6, Julio de 1971.
- 6.- Keithley Instruments, Electrometer Measurements, Keithley Instruments Inc., Cleveland, 1972.
- 7.- Laws, F.A., Electrical Measurements, Mc. Graw-Hill Book Company Inc., 2a edición, New York, 1938.
- 8.- Millman, J., et. al. Taub, H., Circuitos Digitales y de Pulsos, Joaquín Olivé, José F. Aperrribay, Mc. Graw-Hill Book Company Inc., New York, 1965.
- 9.- Motorola Semiconductor Products Inc., The Semiconductor Data Library, Motorola Inc., 4ta edición, 1973.
- 10.- Prensky, S.D., Electronic Instrumentation, Prentice-Hall Inc., 3a edición, Englewood Cliffs, N.J., Enero de 1964.
- 11.- Ryder, J.D., Ingeniería Electrónica, Joaquín Olivé, Emilio Cem-

- branos, Mc Graw-Hill Book Co. Ediciones del Castillo, Madrid, 1965.
- 12.- Terman, F.E., Electronic Measurement, 2a edición, Mc. Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 1952.
 - 13.- Terman, F.E., Ingeniería de Radio, 2a edición, Julio P. Calvelo, Arbó Editores, Buenos Aires, 1947.
 - 14.- Valley, G.E. et. al. Wallman, H., Vacum Tube Amplifiers, Mc. Graw Hill Book Co. Inc., New York, 1948. M.I.T., Radiation Laboratory, Series, N°18.
 - 15.- Westinghouse Electric Company, Apparatus Repair Div., Maintenance Hints, Pittsburgh, HB-6001-P.
 - 16.- A.S.T.M., Designation D470-71, Testing Thermosetting Insulated and Jacketed Wire and Cable, 1971, U.S.A., 1971.
 - 17.- A.S.T.M., Designation D257-66, D-C Resistance or Conductance of Insulating Materials, 1966, U.S.A., 1971.
 - 18.- HEP Semiconductor Catalog, U.S.A., 1972.
 - 19.- Kraus, J.D., Electromagnetismo, Ing. Adolfo Di Marco, El Ateneo, Bs. Aires, 1960.
 - 20.- Reynolds, P.H., 1974, " Localización de Fallas en Cables de Voltaje Medio.", Ingeniería de Fábricas, Vol.3, N°3, Mayo-Junio, 1974.