

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**



**FUNDAMENTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
DE EQUIPO ELECTRICO EN LA INDUSTRIA**

**TESINA**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA**

**JUAN TREVIÑO HERRERA**

**ASESOR: ING. EUDOCIO RODRIGUEZ**

**CD. UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE DE 1998**



T

TK443

77

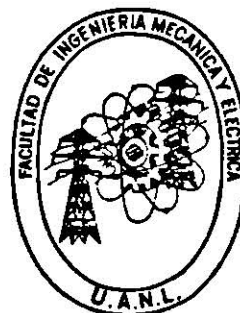
C.1



1080089019

# **UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**



**FUNDAMENTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
DE EQUIPO ELECTRICO EN LA INDUSTRIA**

**TESINA**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA**

**JUAN TREVIÑO HERRERA**

**ASESOR: ING. EUDOCIO RODRIGUEZ**



T  
TK441  
T7



## Indice

Prólogo.....	II
Introducción.....	1
Capítulo 1 Introducción a los equipos eléctricos, mantenimiento y pruebas..	2
Capítulo 2 Pruebas de corriente directa para equipos eléctricos.....	18
Capítulo 3 Pruebas de corriente alterna para equipos eléctricos.....	35
Capítulo 4 Seguridad.....	45
Capítulo 5 Banco de baterías.....	53
Capítulo 6 Principios relacionados con la prueba de resistencia de tierras..	55
Bibliografía.....	64

# Prólogo

El crecimiento en la demanda eléctrica en las ciudades, tanto en la población como en la industria tiene por consecuencia que las redes de distribución de las compañías generadoras y suministradoras se preocupen de una mayor calidad en sus suministros ya que con esto se logra una productividad en constante aumento que resulta en un beneficio que impacta en el crecimiento de la economía de nuestro país.

Como consecuencia de lo anterior los sistemas eléctricos para su buen funcionamiento dependen en gran parte de los mantenimientos preventivos y correctivos que garanticen un funcionamiento confiable y seguro de estos sistemas.

Las empresas actualmente se preocupan en forma sistemática de que sus departamentos de mantenimiento, ingeniería, producción, etc., estén actualizados y consientes de la importancia de tener programas de mantenimientos rutinarios en todas estas áreas.



# Introducción

El desarrollo de esta tesina tiene la finalidad de brindar información a las personas relacionadas en el área de la ingeniería eléctrica sobre los fundamentos de los mantenimientos y pruebas que deben de hacerse a los equipos eléctricos para su buen funcionamiento.

Lleva también la intención de brindar al ingeniero que se inicia en este campo una información y herramientas que le puedan ser de utilidad para enfrentar los problemas de mantenimiento en su que hacer profesional.

# Capítulo 1

## Introducción a los equipos eléctricos, mantenimiento y pruebas

### Introducción

Cuando los equipos eléctricos son instalados y puestos a funcionar es normal el proceso de deterioro que estos empiezan a tener. Si el deterioro no es revisado de una manera sistemática puede causar fallas y malos funcionamientos.

En suma, los cambios de carga o alteración en los circuitos puede suceder en general sin haberse planeado y que puede resultar en una instalación inapropiada de dispositivos de protección en los circuitos. El propósito de un mantenimiento eléctrico preventivo y un programa de pruebas deberán ser admitiendo, para proveer los medios correctivos. Con un mantenimiento preventivo y un programa de pruebas, el peligro potencial que puede causar la falla de un equipo o la interrupción de un servicio eléctrico puede ser detectada y corregida. También un programa de mantenimiento preventivo y de pruebas deberá minimizar el peligro en la vida del equipo que puede resultar de una falla cuando no se da un mantenimiento apropiado. Propiamente un mantenimiento adecuado a los equipos reduce o minimiza las fallas catastróficas.

Este programa consiste en hacer inspecciones de rutinas, pruebas, reparaciones en equipos tales como transformadores, cables, interruptores y periféricos como circuitos de control, reveladores e instrumentos de señalamiento y medición.

### 1.1 Porqué hacer mantenimiento y pruebas

Un programa organizado de mantenimiento y pruebas, minimiza accidentes, reduce paros de empresas, y prolonga el tiempo de falla en los equipos eléctricos. Las ventajas pueden ordenarse en directas e indirectas. Las ventajas directas son los beneficios efectivos de los equipos y el aprovechamiento mejor del personal de seguridad y propiedades de la empresa. Las ventajas indirectas están relacionadas con un mejor estado de ánimo de los empleados, incremento en la habilidad, en la fabricación y productividad.

## **1.2 Planeación de un programa (MEPP) Mantenimiento Eléctrico Preventivo y Pruebas**

Las partes principales de un programa de mantenimiento pueden ser clasificados dentro de las consideraciones de administración de mantenimiento y requerimientos técnicos.

### **1.2.1 Consideraciones de administración de mantenimiento**

El mantenimiento es como un seguro que no deberá ser en forma directa reembolsable, sino que nos permita que su costo sea agregado al costo de un producto final. La administración de una empresa deberá generalmente estar consciente de la necesidad de un buen programa de mantenimiento y deberá mostrar a su personal de mantenimiento eléctrico que un programa de pruebas y mantenimiento es justificable.

La planeación de un programa (MEPP) deberá incluir: las ventajas de los mantenimientos, costos de los mismos, pérdidas en la productividad debido a las fallas en los equipos. La planeación de un programa (MEPP) deberá incluir: suministros de equipos de pruebas, herramientas, traslado de personal, tiempos requeridos para llevar a cabo inspecciones. Para un programa (MEPP), deberán tornarse en cuenta los pasos siguientes:

- Determinar los factores que forman las bases de mantenimiento, así como necesidad de una producción continua.
- Encaminar y consolidar los datos de los equipos que quedan fuera de servicio y el costo por pérdida de producción. Hacer un análisis de costos y la conveniencia de los beneficios de un mantenimiento planeado.
- Establecer prioridades en el mantenimiento eléctrico. Esto consiste en la secuencia de producción en línea, determinar los equipos más importantes y los menos importantes.
- Establecer las mejores técnicas de mantenimiento. Esto involucro seleccionar los mejores métodos de mantenimiento y el personal para el manejo de los equipos a utilizar.
- Hacer un calendario de este programa ( MEPP )



- Determinar costos y beneficios. Analizar las funciones del programa (MEPP) en forma periódica

Después de que el programa (MEPP) ha sido implementada es esencial que contenga cinco elementos que son esenciales para su funcionamiento:

## **1. Responsabilidades**

Las responsabilidades de un programa (MEPP) deberán ser claramente definidas por la organización de la empresa con trabajos definidos por áreas. Cada uno de los departamentos deberá ser informado de las responsabilidades asignadas por la organización.

## **2. Inspección**

La inspección es la llave para cualquier programa de mantenimiento. Con anticipación suficiente deberá verificarse una inspección de las condiciones de nuevos equipos instalados. El propósito de la inspección es el de tener un avance en cuanto a las condiciones de los equipos, pudiéndose por ejemplo detectar deterioros, y hacerse una reparación a tan reemplazo de los mismos antes de que suceda una falla.

## **3. Calendarios**

Para llevar a cabo un mantenimiento hay que definir un calendario o fecha que deberá quedar establecida para ejecutarse. Las fechas de mantenimiento serán basados en los mínimos tiempos que estarán fuera de servicio las diferentes áreas de operación. Las fechas para la inspección de mantenimientos de rutina, dependen de varios factores como: edad de los equipos, frecuencia de operación, horas de servicio, condiciones de trabajo, y requerimientos de seguridad.

## **4. Ordenes de trabajo**

Las ordenes de trabajo son requeridas por el jefe de mantenimiento o área y pueden ser establecidos por inspección de rutina que dan una información concerniente al estado de los equipos.

## **5. Archivo de reportes**

El éxito de un programa de mantenimiento planeado depende en mucho de la importancia que se de a este evento por la administración de la empresa, jefes y personal de mantenimiento. Para hacer un programa efectivo es imperativo que el

mantenimiento y pruebas de todos los equipos deberán ser completos y poder determinar la vida de estos equipos. Todos los formatos y reportes deberán ser archivados y tener acceso a ellos en caso de ser necesarios para cualquier problema suscitado en el área de estos equipos.

### **1.2.2 Requerimientos técnicos**

Los requerimientos técnicos pueden ser establecidos como sigue:

- ✓ Examinar el equipo de la planta
- ✓ Hacer un listado del equipo en orden de importancia.
- ✓ Hacer un plan para llevar a cabo un programa (MEPP) con una frecuencia regular.
- ✓ Desarrollar instrucciones y procedimientos para el programa (MEPP).

#### **Examinar el equipo de la planta**

Para llevar a cabo un programa efectivo de (MEPP) es necesario tener datos acerca de la potencia del sistema eléctrico. Esto deberá incluir diagramas unifilares, estudio de coordinación de corto circuito, diagramas de alambradas de control, y otros datos que pueden ser usados como puntos de referencia para mantenimientos futuros y pruebas.

#### ✓ **Procesos o diagramas de flujo**

Es un diagrama conceptual de la función interrelacionada entre los equipos.

#### ✓ **Diagrama de bloque**

Es un grupo interconectado de bloques, cada uno del cual representa un elemento del sistema.

#### ✓ **Diagrama unifilar**

Muestra por medio de simples líneas y símbolos gráficos, el flujo de la potencia eléctrica o el curso de los circuitos eléctricos y como están ellos interconectado. Un diagrama unifilar típico es mostrado en la figura 1. 1.

## DIAGRAMA UNIFILAR

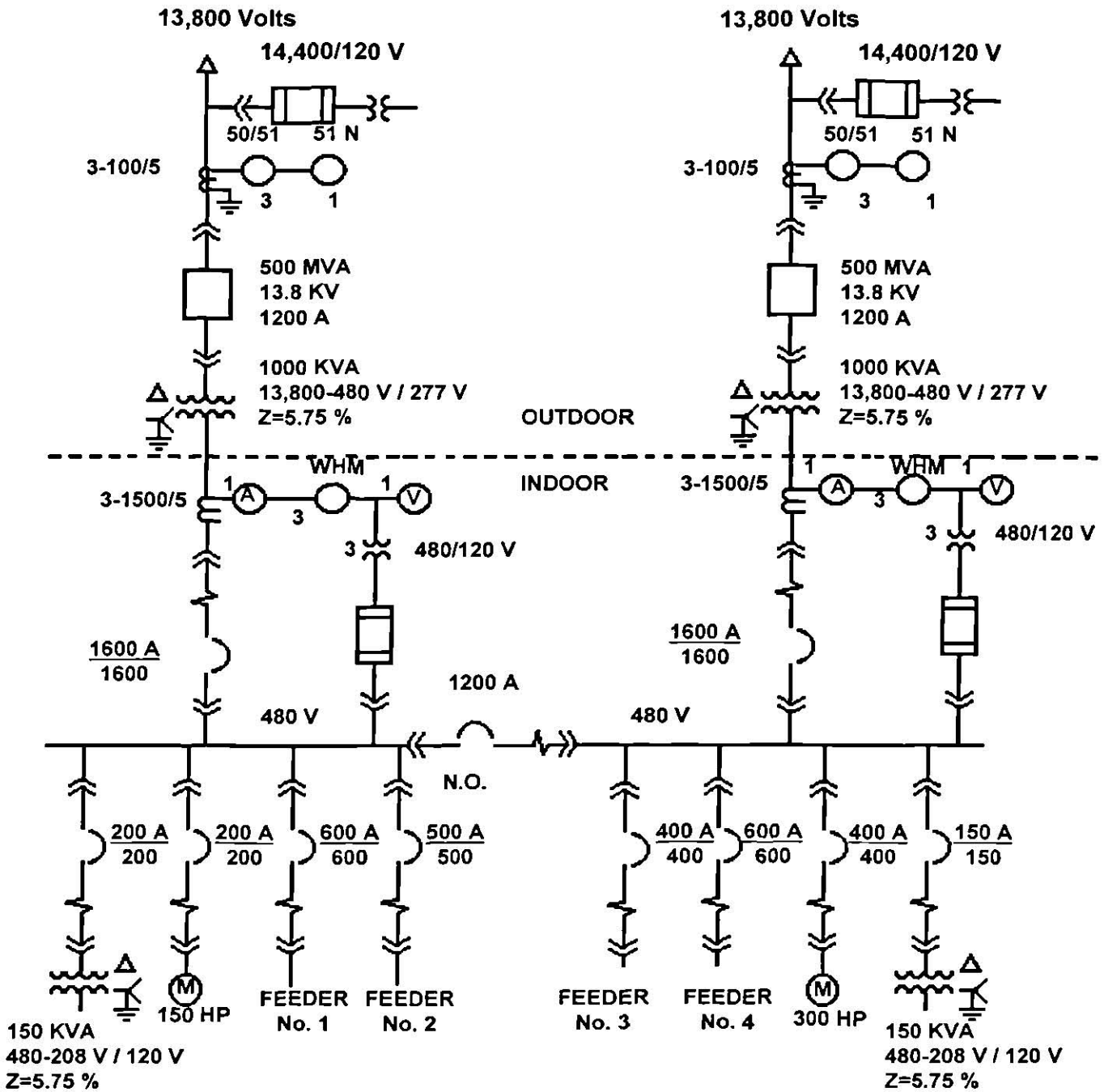


FIGURA 1.1



✓ **Diagrama esquemático**

Muestra todos los circuitos y dispositivos de los elementos de los equipos. Este diagrama enfatiza los dispositivos de los elementos y sus funciones y siempre muestra mediante líneas a todos los dispositivos de un modo desenergizado. Un diagrama típico de los elementos se muestra en la figura 1.2(a).

✓ **Diagrama de secuencia de control**

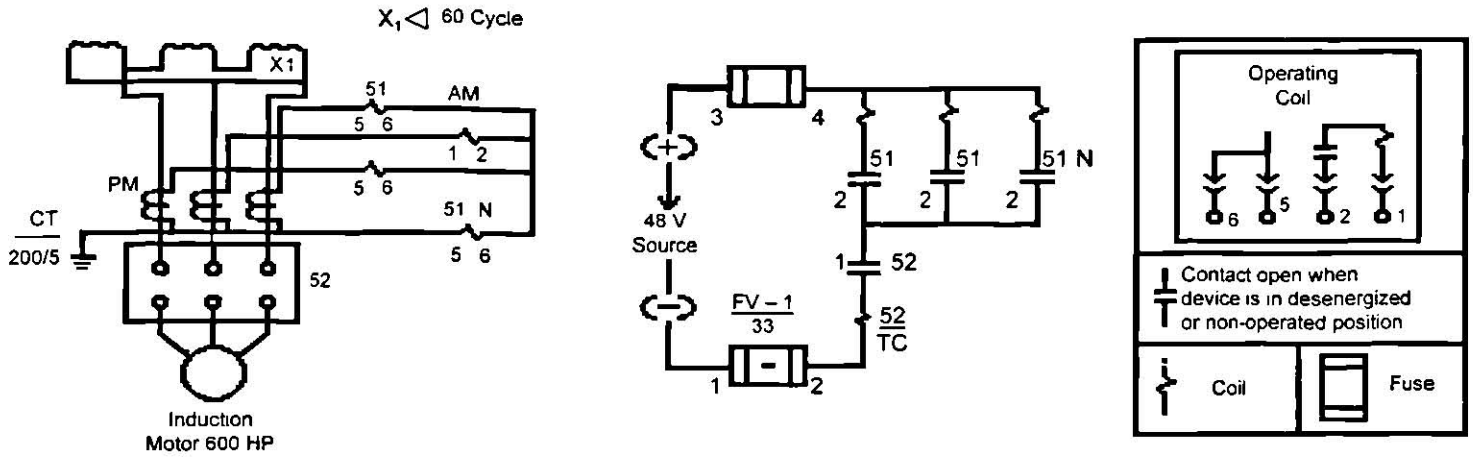
una descripción de la posición de los contactos o conexiones que son hechos para cada una de las posiciones del control de los dispositivos.

✓ **Diagrama de cableado**

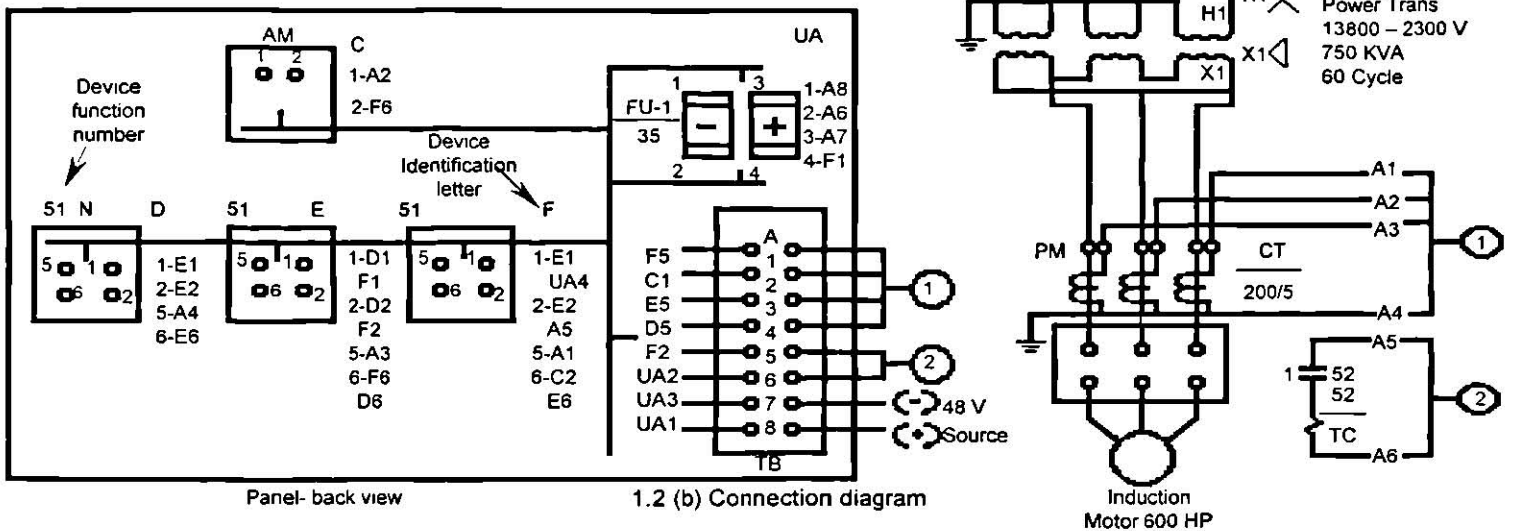
Localiza e identifica dispositivos eléctricos, terminales y cables interconectados y ensamblados. Este diagrama muestra cables interconectados por líneas y terminales. Un diagrama típico es mostrado en la figura 1.2 (b)

✓ **Diagrama de interconexión**

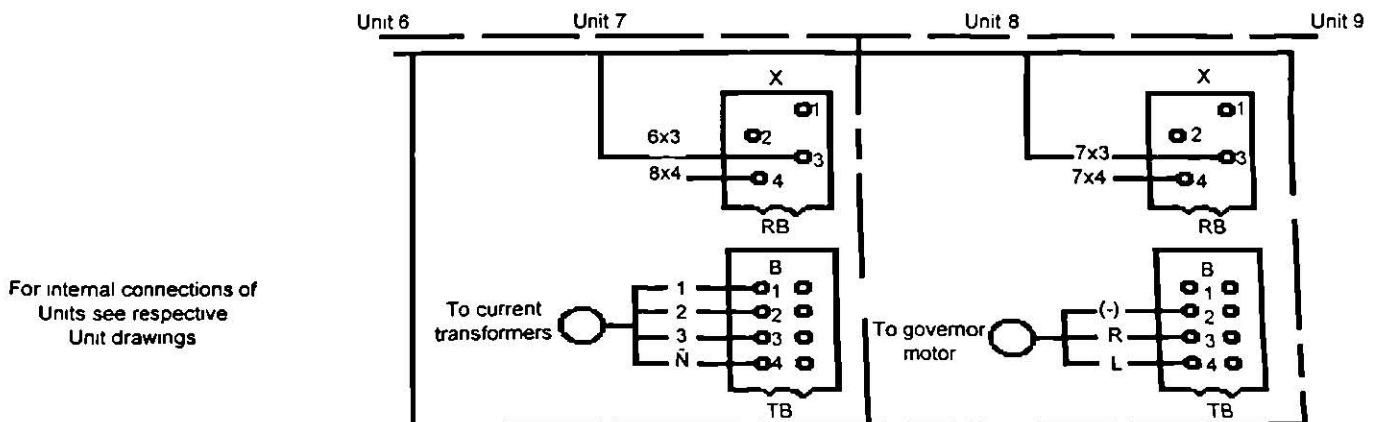
Muestra solamente las conexiones externas entre los controles y equipos asociados o entre varias unidades de equipos ensamblados o asociados a un mismo interruptor como se muestra en la figura 1.2 (c)



1.2 (a) Elementary control diagram



1.2 (b) Connection diagram



1.2 (c) Interconnection diagram

### **1.3 Qué debe ser incluido en un programa (MEPP)**

El programa de mantenimiento eléctrico preventivo y pruebas deberá abarcar las actividades siguientes:

- Mantenimiento eléctrico preventivo y pruebas.
- Reparaciones eléctricas.
- Análisis de fallas.

Para tener una operación eficiente y efectiva es esencial considerar estas tres actividades que se mencionan.

#### **Mantenimiento eléctrico preventivo y pruebas**

Esta actividad involucra inspección, limpiezas, ajustes y pruebas de equipos para asegurar una operación sin problemas hasta la siguiente fecha de mantenimiento.

El mantenimiento preventivo y pruebas puede predecir o impedir fallas de piezas de algún equipo y que pueden ser reemplazados a tiempo.

#### **Reparaciones Eléctricas**

La reparación de equipos eléctricos y máquinas periféricos asociados con la producción de una planta es un requisito fundamental de un buen programa de mantenimiento. Deberá llevarse a cabo en forma expedita y económica. El objetivo básico del programa de mantenimiento deberá evitar tiempos fuera (sin trabajar) de los equipos o máquinas de producción.

#### **Análisis de Fallas**

Las fallas de los equipos eléctricos deberán ser analizados para atender y valorar los tiempos fuera de los mismos a no ser que la causa de la falla sea obvia, la calidad de los equipos deberá ser cuestionada. Por lo tanto los equipos aunque estén bien diseñados pueden en cualquier momento fallar por esta falta de atención.

## **1.4 Tipos de métodos de pruebas**

Las pruebas en los equipos eléctricos involucra revisar el aislamiento de los sistemas, propiedades eléctricas y otros factores relacionados con la operación total del sistema de potencia. Por lo tanto las pruebas de los equipos eléctricos pueden ser enumeradas cómo sigue:

- 1.** Pruebas de aislamiento de estado sólido
- 2.** Pruebas de dispositivos de protección
- 3.** Pruebas de aislamiento en líquidos (aceites)
- 4.** Análisis de tiempos de disparo en interruptores
- 5.** Pruebas de resistencia de tierra
- 6.** Pruebas y análisis de gases
- 7.** Pruebas de inspección infrarrojo (rayos)

### **Pruebas de aislamiento de estado sólido**

El aislamiento puede ser de cualquier material dieléctrico (sólido, líquido o gas) y que prevenga flujo eléctrico entre puntos de diferentes potencial. Las pruebas de aislamiento son hechas para determinar la integridad del medio de aislamiento. Esto consiste generalmente en aplicar un alto potencial de voltaje y determinar mediante pruebas de la corriente de fuga que fluye bajo estas condiciones de prueba. Una corriente excesiva de fuga puede indicar las condiciones de deterioro y un inminente peligro de falla. Las pruebas de aislamiento pueden hacerse aplicando cualquiera de los siguientes voltajes.

Voltaje de corriente directo (DC)

Voltaje de corriente alterna (AC)

Las pruebas de aislamiento de estado sólido pueden agruparse en dos categorías: no destructivos y destructivos respectivamente. La prueba no destructivo es llevada a cabo mediante la aplicación de bajos voltajes y el equipo sometido a prueba raramente es dañado. La prueba de alto potencial de corriente alterna es una prueba en la cual el voltaje es subido (levantado) hasta un nivel especificado. Si el equipo falla o muestra una corriente de fuga excesiva, el equipo bajo prueba queda inservible (inutilizable). Si el equipo no falla entonces ha superado la prueba.

## **Pruebas de aislamiento de estado sólido en voltaje C.D.**

Antes de que entendamos las diferentes pruebas que se hacen con un voltaje de corriente directa, permítanos echar un vistazo a las corrientes varias que tienen lugar cuando un voltaje de corriente directa es aplicado a través de un aislamiento de estado sólido. Estas corrientes, son las siguientes:

1. Corrientes de carga capacitiva.
2. Corriente de absorción dieléctrica.
3. Corrientes de fuga (de superficie).
4. Corriente parcial de descarga (corona).
5. Corriente de fuga volumétrica.

### **Corriente de carga capacitiva**

La corriente de carga capacitiva es tan alta como el voltaje que es aplicado. La corriente de carga es una función del tiempo y puede decrecer al tiempo que es aplicado el voltaje en forma creciente. Esto es que la corriente de carga inicial y por lo tanto no debe evaluarse en el tiempo que el voltaje es aplicado. Las lecturas de esta prueba no deben ser tomadas hasta que la corriente haya descendido hasta un valor suficientemente bajo.

### **Corriente de absorción dieléctrica**

La corriente de absorción dieléctrica es tan alta como el voltaje de prueba que se aplica y decrece a medida que el tiempo de aplicación de voltaje aumenta.

### **Corriente de fuga (de superficie)**

Las corrientes de fuga de superficie es debida a la conducción sobre la superficie de aislamiento y donde hay puntos a tierra Esta corriente no es

deseada en los resultados de las pruebas y por lo tanto deberán ser eliminadas limpiando cuidadosamente la superficie de los conductores, para eliminar trayectorias a esta corriente de fuga.

### **Corriente de descarga parcial**

La corriente de descarga parcial también conocida como la corriente corona, es causada por los sobre - esfuerzos en los quiebres de los conductores debido a la prueba de alto voltaje. Esta corriente no es deseable y deberá ser eliminada mediante una protección o blindaje sobre los puntos de esfuerzos durante las pruebas.

### **Corriente volumétrica de fuga**

La corriente volumétrica de fuga que fluye a través del volumen mismo del aislamiento y es de importancia primaria. Esta es la corriente que es usada para evaluar las condiciones del aislamiento que está sometido a prueba. El tiempo de la prueba deberá permitir que la corriente volumétrica se estabilice antes de tomar las lecturas de la misma.

Dos pruebas pueden ser hechas en estado sólido con la aplicación de este voltaje: La prueba de la resistencia de aislamiento y la prueba de voltaje de alto potencial.

#### **a) Prueba de resistencia de aislamiento**

Esta prueba se hace aplicando voltajes de 100 a 5000 Volts. El instrumento usado es un megohmetro.

La calidad del aislamiento es evaluada tomando como base un nivel de resistencia de aislamiento. El aislamiento puede variar, dependiendo de la temperatura, humedad y otros factores ambientales. Por lo tanto las lecturas de las pruebas deberán ser corregidas de acuerdo con un standard de humedad y temperatura. Ver tabla 1.1

El valor de la resistencia de aislamiento en megohmetro es inversamente proporcional a el volumen de aislamiento en que está siendo probado. Como un ejemplo, un cable de 333m. longitud (1000 pies ) deberá tener 1/10 de la resistencia de aislamiento de un cable de 100 pies bajo condiciones idénticas. Esta prueba nos da una indicación de el deterioro del aislamiento del sistema.



Los valores de la resistencia de aislamiento no nos indica los puntos de debilidad ni tampoco los esfuerzos dieléctricos, sin embargo nos indican la contaminación del aislamiento y debemos preocuparnos cuando los valores de las resistencias de aislamiento son bajos.

**Tabla 1-1**  
**Factores de conversión de resistencia de aislamiento a 200° C**

<b>Temperatura 0°C</b>	<b>En aceite</b>	<b>Tipo seco</b>
0	0.25	0.40
5	0.36	0.45
10	0.50	0.50
15	0.75	0.75
20	1.00	1.00
25	1.40	1.30
30	1.98	1.60
35	2.80	2.05
40	3.95	2.50
45	5.60	3.25
50	7.85	4.00
55	11.20	5.20
60	15.85	6.40
65	22.40	8.70
70	31.75	10.00
75	44.70	13.00
80	63.50	16.00

Los valores medios de las resistencias de aislamiento pueden hacerse mediante 5 métodos comunes que son:

1. Lecturas de tiempo corto
2. Lecturas tiempo resistencia
3. Lecturas de picos de voltaje
4. Prueba de absorción dieléctrica
5. Prueba de clasificación de polarización.

## **Lectura de tiempo corto**

Esta prueba muestra simplemente el valor de la resistencia de aislamiento para una duración de tiempo corto de 30 a 60 segundos. Las lecturas que se obtengan pueden ser comparados con valores de previos que se tengan, y para interpretar los resultados se pueden comparar con tablas normalizadas a 20° C con efectos de humedad también considerados.

## **Lectura tiempo - resistencia**

Un sistema bien aislado muestra un incremento continuo de los valores de resistencia sobre un periodo de tiempo en el cual un voltaje es aplicado. Por otro lado si un sistema esta contaminado con impurezas, polvo, etc., mostrará baja resistencia.

En un buen aislamiento el efecto de la corriente de absorción decrece a medida que el tiempo se incrementa. En un aislamiento malo el efecto de la corriente de absorción se traduce en una alta corriente de fuga. El método tiempo-resistencia es independiente de la temperatura y magnitud del equipo.

Las lecturas tiempo-resistencia pueden ser usadas para indicar las condiciones del aislamiento del sistema. La razón de las lecturas a 60 seg. a 30 seg. es llamada la relación de absorción dieléctrica RAD

$$\text{RAD} = \frac{\text{Lecturas de resistencia a 60 seg.}}{\text{Lecturas de resistencia a 30 seg.}}$$

Una relación ( RAD ) abajo de 1.25 en motivo de una investigación o una reparación de un aparato eléctrico, usualmente las lecturas (RAD ) son manejadas con un megohmetro.

## **Lecturas de picos de voltajes**

En este método el voltaje es aplicado en forma de picos para que el aislamiento que está bajo prueba, sea fijado por un voltímetro. A medida que el voltaje es incrementado los puntos débiles de aislamiento deberán mostrar resistencia bajas que obviamente no muestran con bajos niveles de voltaje.

Residuos, polvos, y otros contaminantes pueden ser detectados a niveles de voltaje bajos, esto es más abajo de los voltajes de operación, mientras que un daño físico, un aislamiento malo, etc., solo pueden ser detectados con altos voltajes. La prueba de picos de voltaje es muy valiosa si es hecha en forma periódica.

### **Prueba de absorción dieléctrica**

La prueba de absorción dieléctrica es hecha con voltajes mucho más altos que las usadas en las pruebas de resistencia de aislamiento ya que son valores del orden de 100 kilovoltios.

Bajo esta prueba el voltaje es aplicado por un periodo de tiempo de 5 a 15 minutos, las lecturas de resistencia de aislamiento y corrientes de fuga son tomadas periódicamente. La prueba es evaluada tomando como base la resistencia de aislamiento. Si el aislamiento está en buenas condiciones, la resistencia de aislamiento deberá incrementarse a medida que la prueba es desarrollada. La prueba de absorción dieléctrica es independiente del volumen y la temperatura del aislamiento que esta bajo prueba.

### **Prueba de clasificación de polarización**

La prueba de clasificación de polarización es una aplicación especializada de la prueba de absorción dieléctrica. La clasificación de polarización es la razón de la resistencia de aislamiento en 10 minutos a la resistencia de aislamiento en un minuto. Una clasificación de polarización menor de 1 indica deterioro en el equipo y necesita un mantenimiento inmediato. Esta prueba es usada para cables, transformadores y máquinas giratorias.

## **PRUEBAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE ALTERNA DE ESTADO SOLIDO**

Varias pruebas pueden ser hechas en estado sólido con la aplicación del voltaje alterno para evaluar las condiciones del aislamiento del sistema. Estos son los siguientes:

- 1. Prueba de alto potencial**

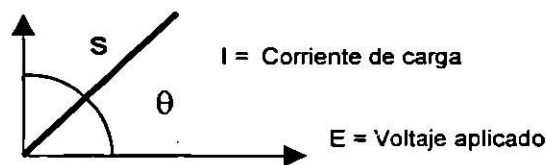
## 2. Prueba de aislamiento del factor de potencia

### Prueba de alto potencial

La prueba de alto potencial comúnmente conocida como la prueba de Hi-Pot (CA). Es usualmente hecha con un voltaje superior al voltaje de operación normal del sistema por un corto tiempo, algo así como 1 minuto. Desde luego diferentes voltajes son involucrados en la operación de un sistema eléctrico de potencia y es recomendado seguir las instrucciones de manufactura a seguir un standard de valores en el desarrollo de estas pruebas.

### Prueba de aislamiento del factor de potencia

Cuando el aislamiento de un sistema es engrasado con un voltaje de corriente alterna, el factor de potencia es igual al coseno del ángulo entre la corriente de carga y el voltaje aplicado. La evaluación está basada en el hecho de que para valores bajos de factor de potencia, el factor de disipación puede suponerse lo mismo que el factor de potencia. El factor de disipación es igual a la tangente del ángulo  $S$ , donde  $S$  es igual a  $(90^\circ)$ .



El aislamiento del factor de potencia es una herramienta importante para determinar la calidad del aislamiento para transformadores, interruptores, máquinas giratorias, cables, reguladores y líquidos aislantes. Varias precauciones deberán tomarse en cuenta cuando se hace una prueba de factor de potencia.

El equipo bajo prueba deberá estar aislado del resto del sistema.

La prueba deberá hacerse a una temperatura superior a  $32^\circ \text{ F}$  ( $0^\circ \text{ C}$ ) y con una Humedad relativa abajo del 70%.

El equipo de prueba deberá ser capaz para producir una onda senoidal de 60 ciclos a un voltaje de por lo menos de 2500V. El mínimo voltaje de prueba no deberá ser menor a 5000V. en todos los casos.

La evaluación de los datos de la prueba deberá estar basada con estándares comparativos de la industria con valores de otros equipos similares, o con resultados de pruebas previos en equipo similares.

### ✓ **Pruebas a dispositivos de protección**

Las pruebas a dispositivos de protección involucra pruebas y mantenimiento de interruptores de bajo voltaje, conexiones, relevadores y equipos tales como transformadores de instrumentos y cableados de baja tensión.

La función del mantenimiento y pruebas de protección es la de asegurar que un interruptor o relevador esté en condiciones de ejecutar su función de operación. Las pruebas de los dispositivos de protección pueden ser clasificados como pruebas de rutina y verificación.

### ✓ **Pruebas de aislamiento de líquidos (aceites)**

El aislamiento de líquidos usados en transformadores o en otros aparatos eléctricos están sujetos a una deterioración y contaminación en un periodo de tiempo. Esta contaminación tiene un efecto perjudicial en las propiedades del aislamiento de los devanados. Básicamente los elementos que causan el deterioro de el aislamiento de los líquidos tales como: humedad, temperatura, oxígeno y otros catálisis que resultan de reacciones químicas que producen ácidos y sedimentos, los cuales atacan el aislamiento de los líquidos. El aislamiento a base de líquidos que hoy en día está en uso son: aceites, askarel y silicona, sin embargo el uso de askarel ha sido prohibido por el alto grado de tóxicos que contiene.

Las pruebas se recomiendan regularmente para monitorear las condiciones del aislamiento de los líquidos. Se deben tomar pruebas de los líquidos de los equipos acuerdo con los métodos de los ASTM de acuerdo a la Tabla 1-2.

**Tabla 1-2**  
**Métodos de la ASTM para pruebas en los aislamientos de los líquidos**

Prueba	Métodos de pruebas ASTM
Acidez	D1534 ó 1902
Color	DI 500
Voltaje de Ruptura Dieléctrica	D877 (silicona askarel)
Examinación Visual	D1816 aceite
Tensión Interfaces	D 1524 aceites
( únicamente aceite)	D 1702 askarel
Numero de Neutralización	D971
Factor de Potencia	D2285
	D974; D664
	D924

## Capítulo 2

### Pruebas de corriente directa para equipos eléctricos

#### Introducción

Este capítulo abarca las pruebas de corriente directa para cualquier desempeño en el campo para la aceptación y mantenimiento de equipos y aparatos eléctricos. Esta información proporcionada por estas pruebas indican si es necesario el mantenimiento correctivo o reemplazo del equipo instalado, asegura si el equipo recientemente instalado puede ser energizado con seguridad y la carta de deterioro gradual del equipo sobre la vida en servicio.

Los métodos de prueba de C. D. son discutidas en este capítulo cubre transformadores, líquidos aislantes, cables, interruptores, motores y generadores. Esto es importante al tener el equipamiento apropiado y estudiando el operador cuando esté conduciendo la prueba.

También si alguna prueba proporciona óptimos beneficios. Esto es esencial en la obtención de todos los datos de pruebas y mantenimientos para análisis de acciones futuras y referencias futuras. Mas en el futuro las pruebas de equipo podrá ser mantenido en buenas condiciones y utilizado por operadores



calificados. Cuando las pruebas de equipo son utilizadas para calibrar otros equipos, este podrá tener el doble de precisión del equipo bajo prueba. Además, el equipo de prueba podrá ser calibrado a intervalos regulares para asegurar la exactitud de los equipos de prueba.

Los niveles y métodos de pruebas de voltaje como son descritos en este capítulo, son en su mayor parte de acuerdo con los estándares industriales para los tipos de equipo discutidos. Los valores de voltaje de corriente directa corresponden a los valores de C.D. como es especificado para aplicación de estándares industriales esto es recomendado para manufactura del equipo sea consultado para pruebas específicas y pruebas de niveles de voltaje cuando la información para un equipo particular no puede ser obtenida esto es recomendado y sugerido para las pruebas de voltaje de C.D. en el orden posible para evitar en lo posible dañar al sistema del material aislante. Esto es muy importante para observar precauciones adicionales cuando la prueba conduce alto voltaje de C. D.

## **2.1 Transformadores**

La prueba de C.D. de transformadores implica pruebas de aislamiento de estado sólido expuesto al viento y los líquidos aislantes usados en transformadores.

La prueba de aislamiento sólido y expuesto al ambiente completa otras pruebas de transformadores. La prueba de aislamiento sólido al ambiente no son concluidas en sí mismas, proporciona información de valores en condiciones ambientales semejantes al contenido de humedad y carbonización.

Las pruebas de C.D. son consideradas no destructivas o igual como si al tiempo ellas pudieran causar deterioro ambiental, esto puede ser obvio fuera de un resultado de un deterioro incipiente que la prueba fue supuesta y detectada. Si esta ha sido detectada, esto podrá ocurrir a un tiempo determinado. La prueba de conductividad de C.D. para transformadores de aislamiento son discutidas en el siguiente capítulo en el orden de prioridades.

### **2.1.1 Mantenimiento de resistencia de aislamiento**

Esta prueba es interpretada por encima de una razón de voltaje para determinar si estos son resistentes bajo el suelo o camino, o medio ambiente, para ambientes como un resultado de deterioro ambiental. Los valores de mantenimiento de esta prueba son afectados por variables tales como temperatura, humedad, voltaje de prueba y tamaño del transformador.

Esta prueba puede conducir antes y después de reparación o mantenimiento de operación. Los datos de prueba pueden ser recordados para comparaciones futuras. Los valores de prueba pueden ser normalizados a 20°C para propósitos de comparaciones. Los factores de conversión son presentados en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1**  
**Conversión de factores a 20° C de aislamiento resistivo**

Temperatura	Transformador en aceite	Transformador tipo seco
0	0.25	0.40
5	0.36	0.45
10	0.50	0.50
15	0.75	0.75
20	1.00	1.00
25	1.40	1.30
30	1.098	1.60
35	2.80	2.05
40	3.95	2.50
45	5.60	3.25
50	7.85	4.00
55	11.20	5.20
60	15.85	6.40
65	22.40	8.70
70	31.75	10.00
75	44.70	13.00
80	63.50	16.00

La regla general de pulgar es utilizada para valores aceptables hasta 1 megaohm (M.)/1,000 Volts (v) de aplicación en la prueba de voltaje. Muestra valores de resistencia de buen aislamiento en el sistema son presentados en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2**  
**Valores típicos de resistencia de aislamiento para transformadores de distribución y potencia**

Bobinas del transformador Voltaje (KV)	20° C	30° C	40°C	50°C	60°C
Menores de 6.6	400	200	100	50	25
6.6 a 19	800	400	200	100	50
22 a 45	1000	500	250	125	65
66 y mayores	1200	600	300	100	75

**Los procedimientos de prueba son los siguientes:**

- ✓ No desconecte la conexión a tierra en el transformador del tanque y núcleo. Asegúrese que el tanque y el núcleo del transformador están aterrizados.
- ✓ Desconecte todo el alto voltaje, bajo voltaje y conexión a neutro, apartarrayos, sistemas de ventilación, contador o algún sistema de control de bajo voltaje, estos son conectados al transformador ambiental.
- ✓ Antes de iniciar la prueba soltar juntas todas las conexiones de alto voltaje, asegurándose que los colados sean limpios de todo metal y partes a tierra. También suelte juntos todos los bajos voltajes y conexiones a neutro, asegurándose que los colados sean limpios de todo metal y partes a tierra.
- ✓ Use un megohmetro con una escala mínima de 20,000 M.
- ✓ Mantenimiento de resistencias son entonces puestas entre cada una de las bobinas y tierra. La bobina debe ser medida teniendo la tierra removida en orden a medición de resistencia de aislamiento.
- ✓ El megohmetro puede tomar lecturas si es mantenido por un período de un minuto. Hace las siguientes lecturas para transformadores de arrollamientos:
  - ✓ Arrollamiento de alto voltaje a bobina de bajo voltaje y a tierra.
  - ✓ Bobina de alto voltaje a tierra.
  - ✓ Bobina de bajo voltaje a bobina de alto voltaje y a tierra.
  - ✓ Bobina de alto voltaje a tierra.
  - ✓ Bobina de alto voltaje a bobina de bajo voltaje. Las conexiones para estas pruebas son presentadas en las figuras 2.1(a) hasta (e) y 2.2(a) hasta (e).

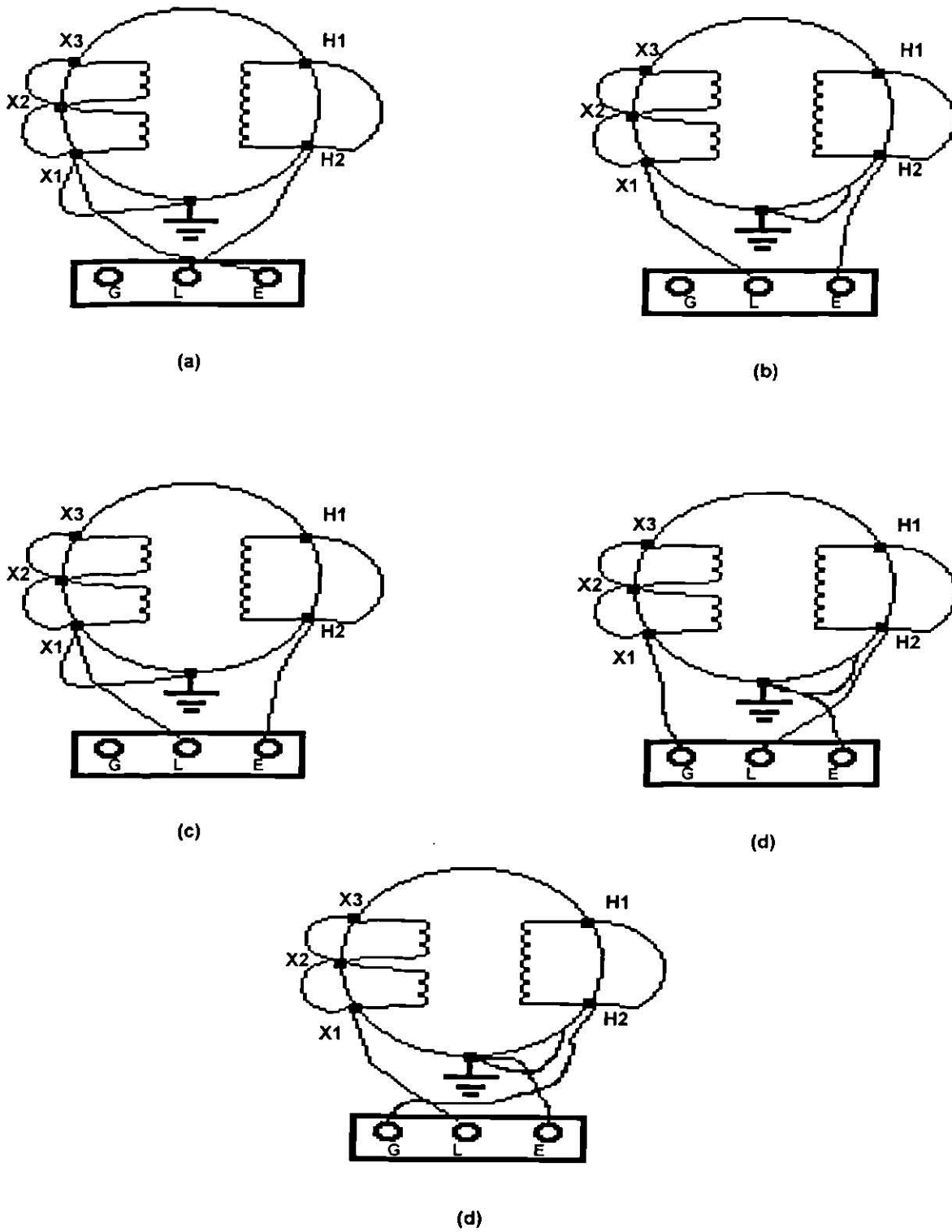


FIGURA 2.1 Prueba de conexiones para aislamiento resistivo de transformadores de una sola fase.

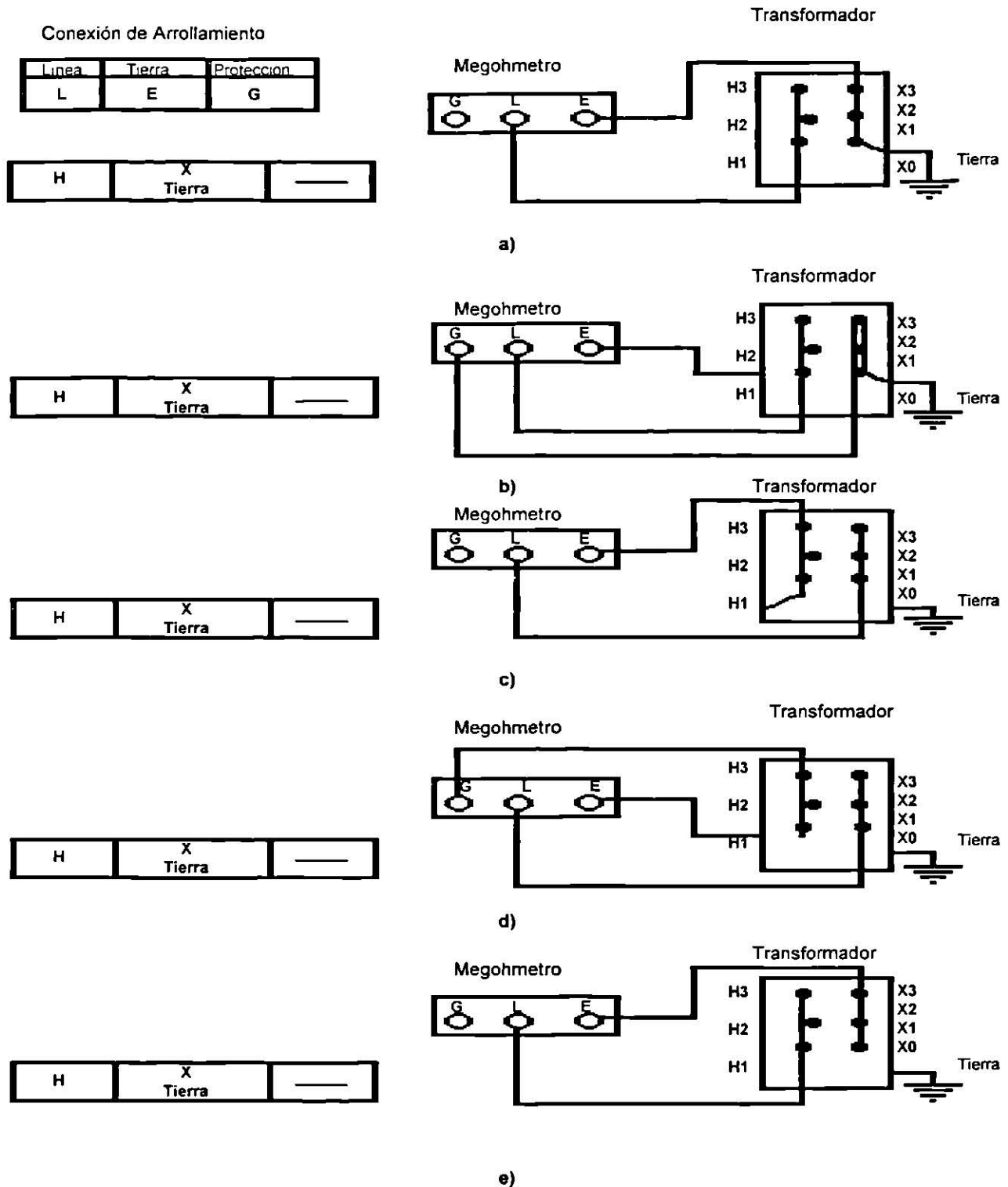


FIGURA 2. 2 Conexiones de prueba para resistencia de aislamiento para transformadores trifásicos. (a) Conexión de bobina de alta protegida; (b) Conexión para bobina de alta a tierra y bobina de alta protegida; (c) Conexión de bobina de baja a bobina de alta a tierra; (d) Conexión de bobina de baja a tierra y bobina de alta y protegida; (e) Conexión de bobina de alta a bobina de baja.

- ✓ El megohmetro puede leer o grabar a lo largo de la prueba de temperatura (°C ). La lectura puede ser correcta a 20° C para los factores de corrección presentados en la Tabla 2.1. Si los valores de prueba de campo correctos son un medio o más de lecturas de aislamiento de fabrica a 1,000 megaohms o cualquiera menor, el transformador es considerado para la prueba de alta potencia.
- ✓ Para transformadores de tres arrollamientos, la prueba podrá ser hecha como sigue:
  - ✎ Alta a baja, terciario y a tierra ( H-LTG)
  - ✎ Terciario a alta, baja y tierra ( T- HLG)
  - ✎ Baja a alta, terciario y a tierra ( L-HTG)
  - ✎ Alta, baja y terciario a tierra ( HT-G )
  - ✎ Alta y terciario a baja y tierra (HT-LG )
  - ✎ Baja y terciario a alta y tierra (LT-HG)
  - ✎ Alta y baja a terciario y tierra (HL-TG )
- ✓ No se puede hacer la prueba del megohmetro del arrollamiento de transformador sin el liquido del transformador porque el valor de resistencia de aislamiento en aire puede ser menor que el liquido. Tampoco podrá ser la resistencia de aislamiento del transformador cuando este esté bajo vacío por la posibilidad de una descarga a tierra,

En la figura 2.2 las conexiones de prueba expuestas en (a), (c) y (e) son más frecuentemente utilizados. Las conexiones de prueba en la figura 2.2 (b), (d) son prácticamente iguales a las lecturas de conexiones de prueba (c) y (d) respectivamente.

### 2.1.2 Prueba de absorción dieléctrica

La prueba de absorción dieléctrica es una extensión de la prueba de medición de resistencia de aislamiento para transformadores expuestos al ambiente. La prueba consiste en aplicar voltaje por 10 minutos y tomar lecturas de medición de resistencia a intervalos de 1 minuto. Los valores de resistencia medidos durante esta prueba son graficados en papel logarítmico con coordenadas de resistencia contra tiempo. La inclinación de la curva para un buen sistema de aislamiento es una línea recta incrementándose con respecto al tiempo, mientras que un pobre sistema de aislamiento tiene una curva de caída con respecto al tiempo. Estas son dos pruebas especiales bajo la prueba de absorción dieléctrica.



### **2.1.3 Prueba para índice de polarización**

La razón de resistencia de aislamiento de bobinas para valores a 10 minutos hasta 1 minuto es definida como el índice de polarización (PI). El PI proporciona información sobre la humedad y deterioro del aislamiento de las bobinas. Los valores del PI pueden variar desde arriba de 2 hasta por debajo de 1. Un valor aceptable debe de ser menor de 2 y mayor de 1, valores entre 2 y 1 indican condición mínima aceptable y valores inferiores a 1 indican una condición no aceptable.

### **2.1.4 Prueba de razón de absorción dieléctrica**

La razón de resistencia de aislamiento en bobinas para valores desde 60 segundos (s) hasta 30 segundos esta definida como la razón de absorción dieléctrica (DAR). Esta prueba proporciona información similar a la prueba PI excepto que la duración de la prueba es más corta. Las conexiones y procedimientos de prueba para conductores son iguales como las pruebas para mantenimiento de resistencia de aislamiento de las bobinas del transformador.

### **2.1.5 Prueba de alto potencial en C. D. (HI-POT)**

La prueba de alto potencial en C.D. es aplicada en alto porcentaje de voltaje para evaluar la condición del aislamiento de las bobinas del transformador. La prueba de alto voltaje en C.D. No es recomendada en transformadores de potencia por encima de 34.5 KV; en su lugar la prueba de alto potencial en C.A. debe ser usada. Generalmente, por rutina el mantenimiento del transformador esta prueba no es empleada por la posibilidad del daño al aislante de la bobina. De cualquier modo, esta prueba es hecha para aceptación y después reparar los transformadores. En caso que la prueba de HI-POT sea dirigida para un mantenimiento de rutina los valores de la prueba no deben de exceder del 65% de los valores de prueba de fabricación, el cual es igual a 1.6 veces el valor del tiempo de C.A. para pruebas periódicas (i. e.,  $1.6 \times 65 = 104\%$  de C.A. del valor de prueba de fabrica). La prueba de HI-POT de C. A. puede ser aplicada como una medición de la prueba de voltaje donde las lecturas de corriente de salida son tomadas para cada medición. Si la corriente de salida es excesiva es notificada, el alto voltaje puede ser atrasado antes de dañar la pieza. Por esta razón, la prueba de HI-POT en C.D. es considerada una prueba no destructiva. Algunas compañías llevan a cabo la prueba de HI-POT de C.A. para índice de voltaje por 3

minutos para pruebas periódicas en lugar del 65% de la prueba de voltaje de fabrica. Los valores de la prueba de HI-POT para voltajes de C. D. son mostrados en la tabla 2.3

**Tabla 2.3**  
**Valores de La prueba dieléctrica para mantenimiento de rutina del líquido de los transformadores.**

<b>Bobina del transformador Razón de Voltaje (KV)</b>	<b>Factor de prueba Voltaje de C.A. (KV)</b>	<b>Mantenimiento de rutina Voltaje de C.D. (KV)</b>
1.2	10	10.40
2.4	15	15.60
4.8	19	19.76
8.7	26	27.04
15.00	34	35.36
18.00	40	41.60
25.00	50	52.00
34.50	70	72.80

**El procedimiento para dirigir esta prueba es como sigue (referencia a la Figura 2.3 (a) y (h) para la conexión de esta prueba).**

- ✓ El transformador debe tener aprobada la prueba de resistencia de aislamiento antes de iniciar esta prueba.
- ✓ El transformador debe ser seguro de la carcasa, núcleo y tierra.
- ✓ Desconectar - todo el alto voltaje, bajo voltaje y conexiones a neutro, sistema de control de bajo voltaje, sistema de ventilación y conecte los contadores a las bobinas y núcleo del transformador.
- ✓ Cortocircuito con cables uniendo todas las conexiones de alto voltaje en el mismo potencial con respecto a tierra. También el cortocircuito con cables uniendo todo el bajo voltaje y conectado a tierra.
- ✓ Conecte la prueba de alto potencial realizándola entre alto voltaje y tierra. Gradualmente aumente el voltaje de prueba al valor deseado. Dé las pruebas de voltaje una duración de 1 minuto, después decremente gradualmente el voltaje hasta cero.

- ✓ Quite el bajo voltaje a los cables a tierra y conecte la prueba de alta potencia realizándola entre las bobinas de bajo voltaje y tierra. Incremente gradualmente el voltaje de prueba hasta el valor deseado. Dé a las pruebas de voltaje una duración de 1 minuto, después decremente gradualmente el voltaje hasta cero.
- ✓ Si el procedimiento de las dos pruebas no causa daños o fallas el transformador es considerado satisfactorio y puede ser energizado.
- ✓ Desconecte todos los cables y reconecte las conexiones del primario y secundario y otros equipos del sistema que este pueda tener desconectados.
- ✓ Las siguientes son algunas precauciones y consideraciones al ejecutar la prueba de HI-POT

El líquido en el transformador de los dos sistemas de aislamiento están en serie, esto es, aislamiento sólido con aceite o fluido sintético. Cuando a la prueba de hi-pot de C.A o C.D. se aplica voltaje, la caída de voltaje es distribuida como sigue:

Voltaje	Papel-celulosa Aislamiento	Aceite
C.A.	25%	75%
C.D.	75%	25%

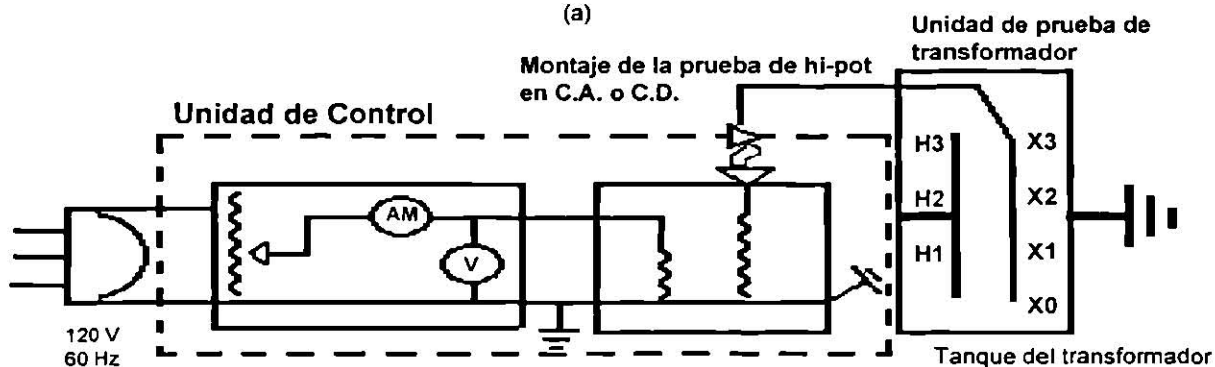
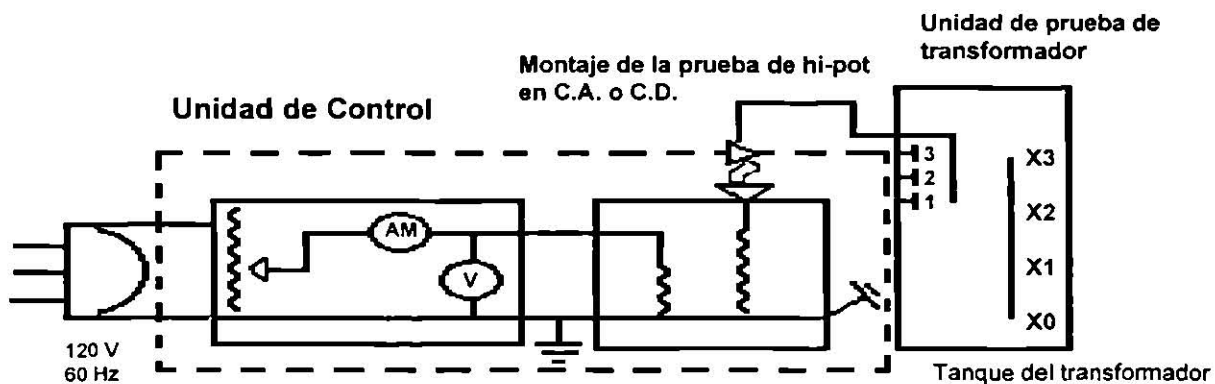


FIGURA 2.3 Conexión de la prueba de alto voltaje del transformador (Hi-Pot) a) Conexión de la prueba Hi-Pot en las bobinas de alta. b) Conexión de la prueba de Hi-Pot en las bobinas de baja.

Cuando utilice corriente directa en el líquido del transformador, el aislamiento sólido puede ser sobrecargado.

Este aislamiento puede ser debilitado cerca al neutro, puede permanecer en servicio debido a la baja tensión bajo condiciones de operación. De cualquier modo, cuando el voltaje está sujeto a la prueba de HI-POT, este puede caer y requerir reparación inmediata. El aislamiento debilitado usualmente puede ser detectado por la medición de bajos voltajes.

Si una prueba de HI-POT es llevada a cabo por un mantenimiento de rutina, considerar lo siguiente de antemano:

1. Simule una falla que pueda ocurrir.
2. Tenga un repuesto o pieza a la mano.
3. Tenga personal disponible para desempeñar el trabajo.
4. ¿Esta el daño del transformador hasta la reparación, son hechos fuera del corte de electricidad original de rutina?

## **2.2 Cables y accesorios**

Las pruebas de cables son dirigidos por la carta de deterioro gradual por los años, hace aceptables las pruebas después de la instalación, para verificación de empalmes y uniones, y para probar reparaciones especiales. Normalmente, el mantenimiento prueba el criterio a ejercitar sobre los cables que están a prueba de voltaje para el 60% de la prueba final de voltaje de fabricación. Cuando existe la construcción exacta de un cable en una instalación esta no es aceptada, este es generalmente recomendado, el mantenimiento para probar C.D. en la prueba de voltaje esta basado en un circuito de C.A. usando un porcentaje de voltaje utilizando el valor recomendado para el tamaño del conductor en el rango de porcentaje de voltaje de C.A. La prueba de voltaje de C.D. realizada en cables son medidas la resistencia de aislamiento y la prueba de alta potencia en C.D. (prueba de HI-POT en C.D.). La prueba de HI-POT es C.D. puede ser hecha como caída de corriente contra prueba de voltaje, caída de corriente contra prueba de tiempo, o va, no va prueba de sobrepotencial.

Estas son propiedades del comportamiento de la primera prueba de medición para resistencia de aislamiento, y si los datos obtenidos son bien vistos, entonces se procede con la prueba de sobrepotencial.

### **2.2.1 Prueba de medición de la resistencia de aislamiento**

La resistencia de aislamiento es medida por un instrumento portátil consistente de un generador de voltaje directo, semejante a un generador, batería, o rectificador, y un ohmetro de alto rango, este proporciona lecturas de resistencia de aislamiento en megaohms u ohms. Este es un método no destructivo para determinar la condición del aislamiento del cable para comprobar la contaminación debido a humedad, suciedad, o carbonización. El método de medición de resistencia de aislamiento no da la lectura de resistencia dieléctrica de aislamiento del cable o fragilidad en el cable. Generalmente, los siguientes voltajes pueden ser utilizados para indicar cables.

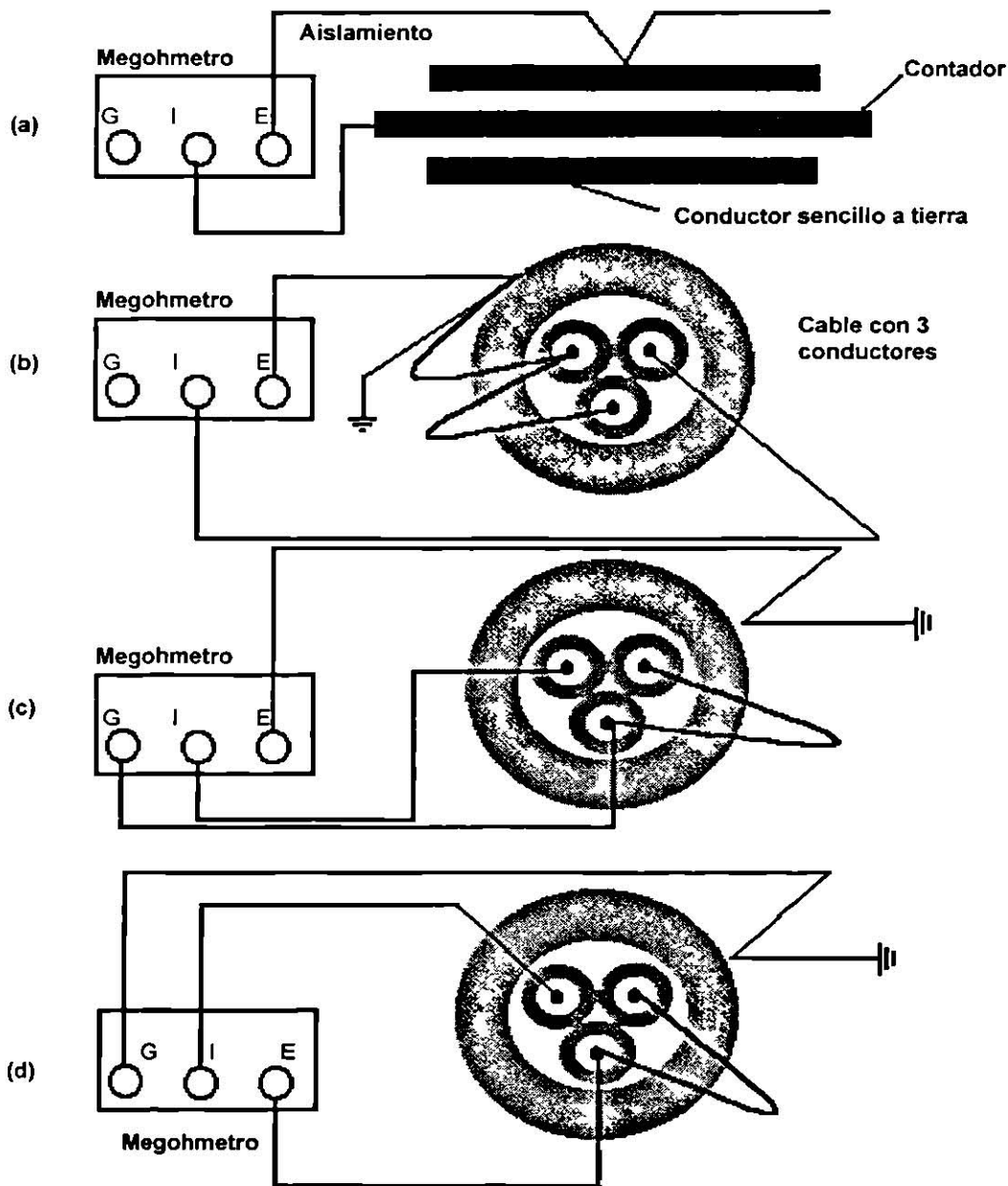
Rango de voltaje del cable	Voltaje de Megaohmetro
Abajo de 300 V.	500 V.
300 a 600 V.	500 a 1000 V.
2400 a 5000 V.	2500 5 KV.
Arriba de 5000V.	Arriba de 5 KV.

El siguiente es el procedimiento general cuando se utiliza un megohmetro (Megger) para la prueba de medición de resistencia.

- ✓ Desconecte el cable a ser probado por otros equipos y circuitos para garantizar que no esta energizado.
- ✓ Descargue toda la capacitancia almacenada en el cable por tierra antes de la prueba además después de terminar la prueba.
- ✓ Conecte la terminal de línea del aparato al conductor a prueba.
- ✓ Aterrice todos los otros conductores juntos en la vaina y a tierra. Conecte esté a la terminal de tierra del aparato de la prueba
- ✓ Igualmente tome otros valores de resistencia de aislamiento entre un conductor y otros conductores conectados, un conductor a tierra y sobre manera. Las conexiones son presentadas en la figura 2.4 (a) hasta (d).
- ✓ La terminal de protección del megohmetro puede ser usada para eliminar los efectos de perdidas de superficie a través de aislamiento expuesto en la parte final del cable, o ambos extremos del cable o perdidas por tierra.

Las mediciones de resistencia de aislamiento debe ser realizada a intervalos regulares y registrada para propósitos de comparación. Guardado en la memoria para comparaciones validas, las lecturas deben ser correctas a una baja

temperatura, tal como 20° C. Un continuo descenso es una indicación de aislamiento deteriorado, aunque los valores medidos de resistencia son superiores a los límites mínimos aceptados.



FUIGURA 2.4 Conexiones de la prueba de cable para medición de la resistencia de aislamiento: (a) Conexión para la prueba de un conductor sencillo y un conductor a tierra. (b) Conexión para de un cable de tres conductores, un conductor a otro conductor y envoltente a tierra. (c) Conexión para de un cable de tres conductores, un conductor a la vaina y a tierra y dos conductores protegidos. (d) Conexión para un cable de tres, un conductor a todos los otros conductores sin pérdidas por tierra.

### 2.2.2 Prueba de sobrepotencial en C.D.



Esta prueba es extensamente usada para aprobación y mantenimiento de cable. Ello puede indicar la condición relativa del aislamiento a voltajes mayores o cercanos a los niveles de operación. Esta prueba puede ser utilizada para identificación de debilidades en el aislamiento del cable y puede también ser usada para una avería o falla incipiente. Un aparato típico de la prueba de C.D. es mostrado en la figura 2.5. Generalmente, no es recomendada esta prueba para ser utilizada para averías de fallas incipientes aún cuando algunos operadores de prueba la utilizan para este propósito. Por lo tanto, la falla incipiente de averías probables debe ser anticipado antes, y durante la prueba de HI-POT. Inminentemente el cable falla y usualmente esta indicado por cambios súbitos en la fuga anterior de corriente, y anteriormente el aislamiento es dañado la prueba puede ser detenida. Los valores de voltajes de prueba para C.D. en 12 prueba de HI-POT están basados sobre la prueba de voltaje final de fabrica, el cual esta determinado por el tipo y espesor de aislamiento, el tamaño del conductor, la construcción del cable, y aplicaciones en los estándares industriales. Los valores de la prueba de C.D. correspondientes a un factor de C.A. de prueba para los voltajes de C.A. para cada sistema de aislamiento. Esta razón esta designada como k la cual cuando es multiplicada por la prueba de aceptación con un factor del 80% y manteniendo el factor del 605 produciendo los factores de conversión para obtener los voltajes de prueba de C. D. para las pruebas de hi-pot. Estos factores de conversión para prueba de voltajes recomendada es expuesta en la tabla 2.4

**Tabla 2.4**  
**Factores de conversión para la prueba de HI-POT en C.D.**

Tipos de aislante	K	Factor de Conversión	
		Aceptación de C.D. Voltaje de prueba (0.8x k)	Mantenimiento de C.D. Voltaje (0.6xk)
Papel impregnado cubierto de plomo	2.4	1.92	1.44
Coagulo de barniz	2.0	1.60	1.20
Resistencia de hule compuesto de goma	3.0	2.40	1.80
Polietileno	3.0	2.40	1.80
Cloruro de polivinilo	2.2	1.76	1.32
Compuesto de goma	2.2	1.76	1.32

Algunos factores deben ser considerados en la selección correcta de voltaje para la existencia de cables que están en servicio. Como una regla general, para la existencia de cables el mayor valor para mantenimiento no debe exceder del

60% del voltaje de prueba final de fabricación y el valor mínimo de prueba no debe ser menor que el de C.D. equivalente del voltaje de operación. En caso que el cable no pueda ser desconectado de todo el equipo conectado, el voltaje de prueba debe ser reducido a el nivel de voltaje de menor valor del equipo conectado. La prueba de HI-POT puede ser conducida como un paso de la prueba de voltaje como sigue:

### **2.2.3 Voltaje contra prueba de caída de corriente (paso de la prueba de voltaje)**

En esta prueba, el voltaje esta elevado en iguales pasos y el tiempo es puesto entre cada paso para la caída de corriente para llegar a ser estable. Como se explicó en el capítulo 1, la corriente es relativamente alta como el voltaje es aplicado debido a la capacitancia de la corriente de carga, caída de corriente en la superficie, y corriente de descarga parcial. Como instantes del paso, estas corrientes transitorias llegan a ser mínimas con el estado estable de la corriente restante, que es la actual caída de corriente y una muy pequeña cantidad de absorción de corriente. En cada paso de voltaje, la caída de corriente registrada es tomada antes del procedimiento al siguiente paso. Usualmente, es recomendado por lo menos en ocho pasos iguales de voltaje es usado y menor que 1 a 4 minutos es admitido entre cada paso. La caída de corriente contra voltaje son trazadas como una curva. Tan larga como esta trazada la curva es lineal para cada caso, el sistema de aislamiento esta en buena condición. En algunos valores de voltajes de pasos, si la caída de corriente empieza a alimentar deberá ser notificado, un aumento en la inclinación de la curva podrá ser notificado como se muestra en la figura 2.6 en el punto A. Si la prueba es seguida más allá de esta prueba de voltaje, la caída corriente podrá incrementarse más rápida e inmediatamente cae puede suceder en el aislamiento del cable. A menos que la caída sea deseada, la prueba debe ser detenida tan pronto como suceda el incremento de la inclinación y sea notificado en la curva de voltaje contra caída de corriente.

### **2.2.4 Caída de corriente contra tiempo de prueba**

Cuando el voltaje de prueba final de caída de corriente contra prueba de voltaje es alcanzado, puede ser dejado encendido por lo menos 5 minutos, y la caída de corriente contra tiempo puede ser trazada para intervalos regulares de tiempo como la caída de corriente durante estos pasos para un alto valor inicial hasta un valor en estado estable. Una buena curva para cables debe indicar generalmente un continuo decremento en la caída de corriente con respecto al

tiempo un valor en estado estable sin algún incremento de corriente durante la prueba. Esta curva es presentada en la figura 2.7.

### **2.2.5 Funciona, no funciona prueba de sobrepotencial.**

La prueba de HI-POT puede ser conducida como un funciona, o no funciona en la prueba sobrepotencial. En esta prueba el voltaje es gradualmente aplicado hasta el valor especificado. La razón de elevar el voltaje de prueba es mantenido para suministrar un estado de caída de corriente hasta que el voltaje de prueba es alcanzado. Usualmente, 1 a 1.5 minutos es considerado tiempo suficiente para alcanzar el voltaje final de prueba. El voltaje final de prueba puede ser sostenido por 5 minutos, y si no es repentino el aumento en la corriente por la falla de cortocircuito, la prueba será exitosamente aprobada. Esta prueba no proporciona un análisis completo de la condición del cable, pero proporciona suficiente información como de resistencia requerida. Este tipo de prueba es usualmente realizada después de la instalación y reparación, donde solo un cable resiste la verificación de fuerza sin un daño estaría certificado.

### **2.2.6 Prueba de sobrepotencial de C. D. (Conexiones y procedimientos.)**

La prueba de conexiones para esta prueba son similares a las que son mostradas en la figura 2.4 (a) y para cables de tres conductores son similares a los expuestos en la figura 2.4 (b) y (c). Los procedimientos de prueba son los siguientes:

- ✓ El cable puede ser probado si esta desenergizado, abierto en ambos extremos si es posible, y aterrizado a descarga, ninguna carga electrostática en el cable. Interruptores, transformadores de potencia, carga detenida, fusibles, apartarrayos y algunos interruptores deben ser desconectados. Si es imposible desconectar alguno o varios de los equipos conectados, la prueba de voltaje no debe exceder el valor al cual podrán sobretensionarse estos dispositivos conectados al cable.
- ✓ La prueba de voltaje de C.D. debe ser aplicada para fase a tierra en cada conductor con otros, conductores, protecciones y carcazas metálicas conectadas a tierra u otros conductores con protección y carcazas metálicas aterrizadas.
- ✓ Asegurarse que el interruptor principal "ON-OFF" del aparato del HI-POT este en la posición de apagado (OFF) y el interruptor de encendido del alto voltaje

en la posición de apagado (OFF) con el interruptor del control de voltaje colocado en la posición de cero antes de iniciar la prueba.

- ✓ Conecte el aparato de prueba HI-POT asegurando el montaje de la tierra a una buena tierra eléctrica y asegurarse que las conexiones están apretados. Nunca opere el aparato de prueba HI-POT de C.D. sin esta conexión a tierra del aparato.
- ✓ Conecte la línea de retorno para otros conductores que no están bajo prueba a tierra y a la terminal de toma de tierra o a la protección del aparato como desea. El interruptor de aterrizado del HI-POT debe ser cambiado a la posición adecuada, Normalmente, 100V de aislante son requeridos en la línea de retorno. Conecte la protección y vaina a tierra y también a la terminal de tierra del aparato de prueba. La terminal de tierra esta provista por derivación de corriente debido a la corona alrededor micrometrica de manera que la corona de corriente no es incluida en la lectura de prueba.
- ✓ Conecte un extremo de la salida o línea del cable a la fase deseada del cable bajo prueba, asegúrese que las conexiones estén apretadas y sin algún borde afilado. Donde la corona de corrientes puede se supuesta, debido a la aplicación de alto voltaje es recomendado que las conexiones sean roscadas, tapadas con bolsas de plástico o usar un aro de corona o protector de corona. El extremo del cable de salida es conectado a la salida o montaje de línea del aparato de prueba.
- ✓ El cable utilizado para conectar el aparato de prueba HI-POT al cable bajo prueba, que es la línea o cable de salida, debe ser corto y directo y sostenida a la línea del tramo de manera que no toque el suelo o aterrice materiales o superficies. En caso de extensión de cables son usados con la salida o línea hasta alcanzar el cable bajo prueba, preferiblemente deben ser utilizados cables cubiertos para este objetivo. Los cables de extensión cubiertos y el cable debe ser corrido desde el empalme cubierto y el cable del HI-POT debe estar conectado con un empalme cubierto, el cual debe ser corrido desde el empalme para evitar fugas posteriores. En caso de que el cable de extensión no sea cubierto, debe ser precavido de colocar para mantener el alambre no cubierto lejos del aterrizado así como de superficies previamente explicado.
- ✓ Cuando el cable cubierto es probado, lo recomendado es arreglar la tapa posterior alrededor de 1" para cada 10 KV. La cubierta en el aparato de prueba el extremo del cable es conectado a tierra como se explico previamente. La cubierta en el otro extremo del cable puede ser encintado y dejado pendiente sin alguna conexión hecha a este.

- ✓ El aparato de prueba ahora debe ser conectado dentro de 115 V, 60Hz de salida. Es importante que la C.D. que proporciona voltaje tenga una buena regulación en la línea, porque el voltaje de C.D. de salida del aparato de prueba depende de la línea de C.D. de voltaje de entrada. El rango de voltaje de prueba en KV debe ser seleccionado antes de iniciar la prueba. La potencia ahora puede ser cambiada a encendido(ON) y la prueba empieza: uno, como paso de voltaje, o como prueba en marcha no en marcha.
- ✓ Después de que la prueba es concluida, cambie el interruptor de alto voltaje del aparato de prueba a la posición de apagado(OFF). Deje el cable probado descargando a través del circuito interno del aparato de prueba o la tierra externa aplicada al cable por medio de la varilla caliente o guantes. No toque el cable hasta que este completamente descargado.
- ✓ Conecte una tierra al cable que fue probado y déjelo conectado por lo menos el doble del tiempo de prueba o hasta que el cable sea conectado dentro del sistema.

## Capítulo 3

# Prueba de corriente alterna para equipos eléctricos

## Introducción

Este capítulo cubre las pruebas de corriente alterna que ordinariamente son usadas en campo para aceptar o bien para darles mantenimiento a equipos eléctricos.

Los métodos de corriente alterna que se tratan en este capítulo son para transformadores, líquidos aislantes y cables. Las pruebas comúnmente más usadas son: la de alto potencial y la de factor de potencia.

La prueba de alto potencial se hace con voltajes superiores al voltaje normal de operación y son pruebas de corta duración.

La prueba del factor de potencia esta enfocada sobre el aislamiento del sistema. Esta prueba tiene como base una temperatura normal de 0° C y una humedad relativa del 70%.

### 3.1 Transformadores

Las pruebas a transformadores pueden hacerse con voltaje de C.A. o C.D. pero es preferible la prueba con C.A. porque se simula los esfuerzos internos a que se somete un transformador durante condiciones normales de operación.

Las siguientes son, las pruebas que se hacen a un transformador:

- Prueba de Alto Potencial con C.A. ( HI-POT )
- Prueba de factor de Potencia de Aislamiento.
- Relación de Vueltas de Transformador (TTR)
- Prueba de Polaridad
- Prueba de Excitación
- Prueba de Potencial Inducido.

#### a) Prueba de alto potencial con C. A. (HI -POT)

La prueba de alto potencial se hace para evaluar la condición de los devanados del transformador. Esta prueba es recomendada para todos los voltajes, especialmente para aquellos superiores a 34.5 KV.

En mantenimiento de rutina, el voltaje de prueba no deberá exceder del 65% ya que existe la posibilidad de dañar los aislamientos de los devanados. Esta prueba también se hace para aceptar o checar reparaciones, pero aquí el voltaje de prueba se hace al 75% del valor con que se hizo la prueba de fábrica.

Los valores de prueba del alto potencial para diferentes relaciones de voltaje en transformadores se muestran en la tabla 3.1

**Tabla 3.1**  
**Prueba de alto potencial de C.A. para aceptación y en mantenimiento de rutina en transformadores autoenfriados en aceite aislante.**

Relación de voltaje (KV)	Voltaje aplicado prueba de fábrica	Voltaje aplicado en campo (KV) 75%	Voltaje aplicado (KV) en mtto. de rutina
1.20	10	7.50	6.50
2.40	15	11.20	9.75
4.80	19	14.25	12.35



8.70	26	19.50	16.90
15.00	39	25.50	22.10
18.00	40	30.00	26.00
25.00	50	37.50	32.50
34.00	70	52.50	45.50
46.00	95	71.25	61.75
69.00	140	105.00	91.00

### b) Prueba de factor de potencia del aislamiento

Esta prueba se hace en transformadores de alto voltaje. Básicamente esta prueba mide la pérdida de potencia debido a las corrientes de fuga a través del aislamiento.

El factor de potencia puede ser representado cómo la relación de Watts (w) dividido por los volt-amperes. La ecuación se escribe de la forma siguiente:

$$FP = W / EI = \frac{EI \cos \theta}{EI}$$

Donde:

E = Voltaje de fase.

I = Corriente total de fase.

$\theta$  = Angulo de fase entre E e I.

W = Watts.

La corriente total de fase (I) es al resultante de las corrientes resistiva  $I_r$  y capacitiva  $I_c$ . Sin embargo cuando el transformador es energizado con el secundario abierto (sin carga), la corriente resistiva es pequeña y es prácticamente limitada las perdidas dieléctricas.

La figura 3.1 muestra una forma típica simple del transformador de dos devanados.

Los valores aceptados en la prueba de factor de potencia para transformadores son mostrados en la tabla 3.2.

#### Valores de factores de potencia para transformadores.

Prueba	Bueno	% del Factor de potencia	
		Límite	Investigar
Devanado H	0.5 ó menos	0.5 a 1.0	Arriba de 1.0



Devanado X	0.5 ó menos	0.5 a 1.0	Arriba de 1.0
Entre devanados	0.5 ó menos	0.5 a 1.0	Arriba de 1.0

### c) Prueba de relación de vueltas del transformador (TTR)

La prueba de relación de vueltas (TTR), aplica 8V de C.A. al devanado de bajo voltaje del transformador bajo prueba y el transformador de referencia en el equipo TTR. El devanado de alto voltaje del transformado bajo prueba y el transformador de referencia en el equipo TTR están conectados a través de un instrumento detector. Después que la polaridad ha sido establecida a 8V, cuando el aparato detector indica cero, la lectura que se lee, indica la relación de vueltas del transformador bajo prueba.

La prueba de relación de vueltas (TTR) proporciona la siguiente información:

- Determina la relación de las vueltas y la polaridad de los transformadores monofásicos y trifásicos.
- Confirma la relación de transformación de los datos de placa del transformador.
- Determina la relación de vueltas y polaridad (pero no la relación del voltaje) de transformadores que no tienen datos de placa. Esta prueba no incluye la posición de el tap de derivaciones del transformador.
- Identifica perturbaciones en los devanados del transformador, por ejemplo si estos devanados están abiertos o en cortocircuito. Los resultados de esta prueba, deberán estar dentro de un 0.5% de los datos de placa.

### d) Prueba de polaridad

La prueba de polaridad puede hacerse con un (TTR) en transformadores de potencia, distribución y potencial. Sin embargo para transformadores de corriente el TTR no es usado. En vez de esto lo que comúnmente se hace es aplicar un C.D. a través de una batería y un multímetro. Esta prueba con una batería de C.D. si puede utilizarse en transformadores de potencia y distribución, pero el TTR se prefiere.

La conexión para esta prueba en transformadores de corriente se indica en la figura 3.1

El voltaje de C. D. de la batería que generalmente usado es de 7.5 V y el multímetro tiene un rango de voltaje de 3V.

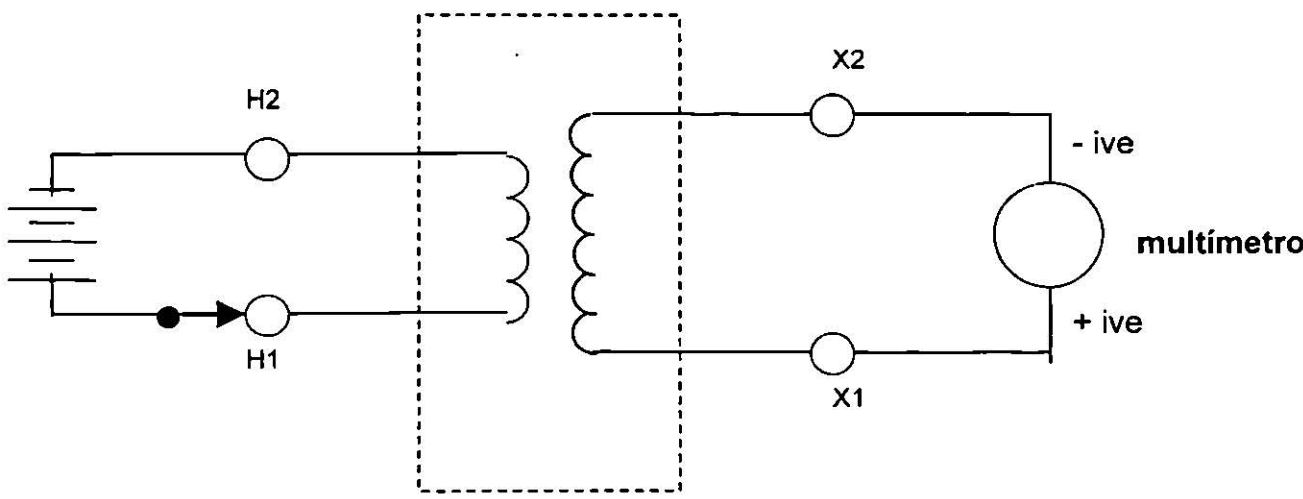


FIGURA 3.1

### e) Prueba de corriente de excitación

La corriente de excitación de un transformador es la corriente en el primario del mismo cuando es aplicado un voltaje en este lado y el secundario se mantiene en circuito abierto.

La corriente de excitación también es conocida como la corriente en vacío de el transformador.

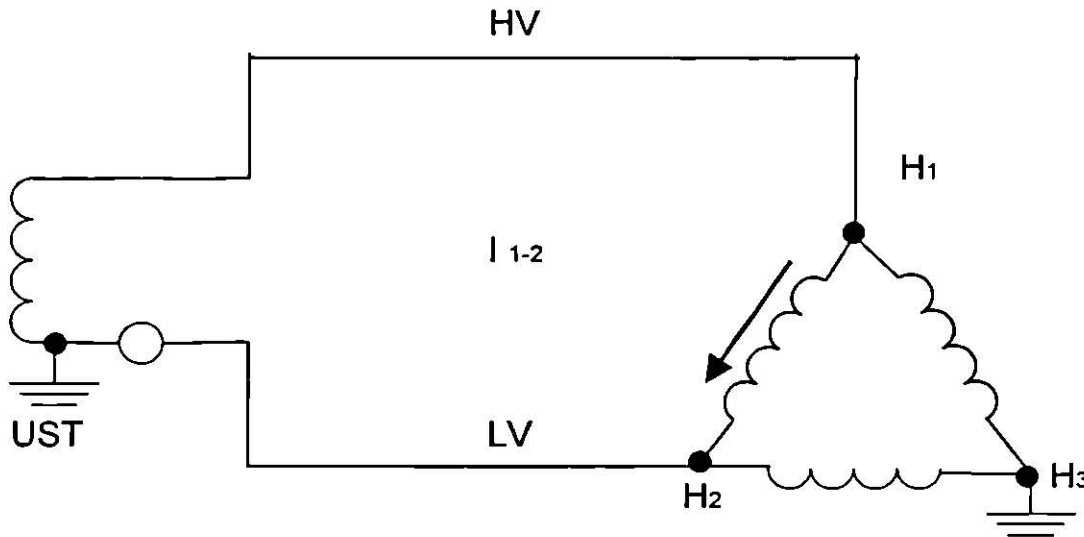
La prueba de la corriente de excitación cuando es usada en mantenimientos preventivos rutinarios para aceptar transformadores, provee un medio de detección si tiene corto circuito en sus devanados, problemas en su núcleo, falsos contactos interiores, etc.

Esta prueba es sencilla de hacerse y puede desarrollarse de la forma siguiente:

En la figura 3.2 (a) se representa la fase HI-2 energizada de una conexión trifásica en Delta. Tres (3) medidas son hechas rutinariamente (H1-2, H2-3, H3-1 ) a voltajes generalmente bajo del nominal no excediendo 2.5 o 10 KV dependiendo

de la relación que tenga el equipo de prueba. El devanado de bajo voltaje no es mostrado en la figura, está aislado de la fuente de voltaje o carga durante la prueba. Si la conexión está en estrella, el neutro está aterrizado normalmente.

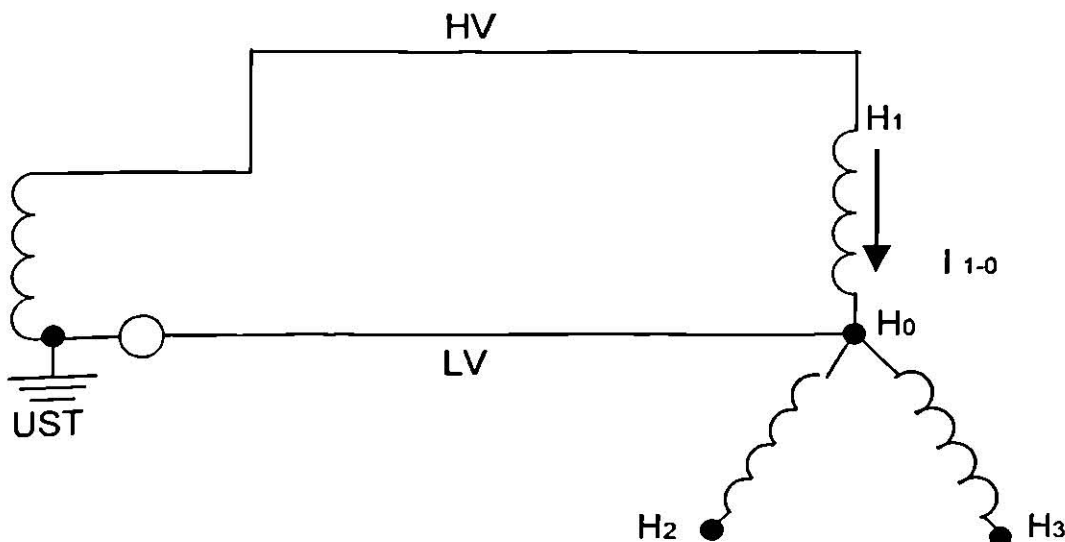
La figura 3.2 (b) ilustra la misma prueba con una fase energizada, estando sin transformador trifásico conectado en estrella.



Ie	Energizado	UST	Tierra	Flotado
H1-H2	H1	H2	H3*	X1 X2 X3
H2-H0	H2	H0	H1*	X1 X2 X3
H3-H0	H3	H0	H2*	X1 X2 X3

Si X, X0 es aterrizado es conectado en estrella

(a)



Ie	Energizado	UST	Flotado	Ground
H1-H0	H1	H0	H2 H3- X1 X2 X3	*
H2-H0	H2	H0	H1 H3-X1 X2 X3	*
H3-H0	H3	H0	H1 H2-X1 X2 X3	*

Si X, X0 es aterrizado es conectado en estrella

(b)

**FIGURA 3.2**

### ✓ Prueba de potencial inducido

La prueba de potencial inducido es una prueba que se hace con niveles de voltaje más altos que los voltajes normales de operación. Bajo esta prueba el aislamiento entre devanados y entre fases es sometido a un esfuerzo de un 65% por encima de la prueba a que es sometido en fábrica a una secuencia arriba de 60 ciclos, algo así como de 200 ó 300 ciclos la frecuencia con que se hace esta prueba deberá ser 5 años o más.

Cuando se aplican secuencias arriba de 120 ciclos la prueba es más severa y por esta razón la duración de está debe ser reducida tal como se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2**  
**Duración de la prueba de potencial inducido a diferentes frecuencias**

Frecuencia (Hz)	Duración (tiempo en seg.)
120 o menos	60
180	40
240	30
300	20
400	18

El voltaje para empezar esta prueba deberá ser de la cuarta (4ta) parte o menos de voltaje nominal y deberá irse incrementando hasta alcanzarlo en un tiempo no mayor a los 15 segundos. Después de mantener la prueba, el tiempo mostrado en la tabla 3.2 deberá reducirse el voltaje en un tiempo no mayor a los 5 segundos, a una cuarta parte del voltaje nominal o menos y en circuito abierto.

Cuando esta prueba se hace a transformadores trifásicos, se puede desarrollar energizando una fase y el voltaje se aplica entre líneas con la fase que se está

probando a tierra. Los neutros del devanado pueden o no ser aterrizados durante la prueba.

Cuando la prueba del voltaje inducido sobre un devanado, da como resultado un voltaje entre terminales de otro devanado y que exceda la frecuencia del voltaje aplicado, entonces los devanados pueden ser separados y aterrizados.

### 3.2 Pruebas de líquidos aislantes

Los líquidos aislantes tales como aceites, silicon, etc., son usados en transformadores interruptores, capacitores; debido a que estos líquidos aislantes se deterioran durante su uso, es necesario monitorearlos y hacerles pruebas para determinar sus propiedades dieléctricas.

Este punto describe las pruebas de Voltaje Alterno y de Factor de Potencia para determinar las condiciones de estos líquidos y prevenir falla.

#### 3.2.1 Prueba dieléctrica en líquidos

Esta prueba de sobre voltaje alterno es aplicado a los líquidos aislantes para determinar su punto de ruptura. Los valores típicos de ruptura son mostrados en la tabla 3.3

La prueba dieléctrica consiste simplemente en tomar una muestra del liquido aislante de transformador en un pequeño recipiente o tasa (cup) y aplicarle voltaje entre electrodos sumergidos en dicho aceite. La prueba es repetida en por lo menos S veces para determinar el promedio de ruptura en KV.

**Tabla 3.3**  
**Valores dieléctricos para líquidos aislantes en transformadores**

Tipos de líquidos	Ruptura dieléctrica en (KV) satisfactorio	Se necesita regenerar
Aceite	23	Menor de 23
Askerel	26	Menor de 25
Silicon	26	Menor de 26
Wecosol	26	Menor de 26

En líquidos como Askarel, Aceite, etc. es utilizado un recipiente (cup) que tiene en su interior los electrodos separados 2.5 mm = 0.1 pulg. Esta prueba es descrita paso por paso en seguida.

## **Prueba dieléctrica ASTM D-877**

Generalmente los equipos con que va a efectuarse una prueba de rigidez dieléctrica son portátiles. Las pruebas dieléctricas cuya ruptura en KV estén en el orden de 40, son aceptables.

Las instrucciones y procedimientos son los siguientes:

- Los electrodos y la copa deberán limpiarse con papel de seda o gamuza que estén limpios y secos. El espacio entre electrodos es una medida standard de 0. 1 pulg.
- Los electrodos y la copa deberán estar libres de gasolina o solventes utilizados en su limpieza y secado.
- Después de haber cumplido con los incisos a) y b) la copa es llevada con el liquido aislante que se va a probar y una vez que este completamente estático (sin burbujas), se aplica voltaje a razón de 3KV/seg. hasta que sucede la ruptura.
- Al comenzar cada prueba, los electrodos deben de ser examinados para cerciorarse de que estén libres de impurezas, acumulación de carbón, separación de electrodos, etc.
- Si en una prueba, la ruptura salió por abajo de los valores establecidos para que el aceite sea aceptado, los electrodos y la copa deberán ser limpiados y preparados antes de hacer una segunda prueba.
- La rigidez dieléctrica se ve alterada por impurezas y para obtener resultados satisfactorios, el aceite debe ser filtrado varias veces hasta obtener puntos de ruptura de acuerdo con los valores mínimos establecidos.
- La temperatura que debe de haber al hacer una prueba no debe de ser menor de 20° C (68° F)
- El voltaje aplicado comenzará de cero (0) y se incrementará uniformemente a razón de 3 kv./seg. Hasta obtener el punto de ruptura.

### **3.2.2 Procedimiento para el muestreo de líquidos aislantes**

Los recipientes de vidrio son recomendados para las muestras de aceite a las que se le van hacer las pruebas de rigidez dieléctrica debido a que fácilmente pueden inspeccionarse y cerciorarse de que están completamente limpios.

- Un aceite que tenga un factor de potencia cuyo valor se encuentre entre 0.5 y 2% a 20°C se considera satisfactorio.
- Un aceite que tenga un factor de potencia cuyo valor sea superior al 2% a 20°C debe de considerarse su regeneración.

## Capítulo 4

### Seguridad

#### Introducción

Como sabemos de antemano, todo equipo eléctrico puede en cierta forma ser dañado por ciertos factores ajenos al propósito o diseño del mismo. La seguridad de operación de nuestro equipo radica en dotarlo de todos y cada uno de aquellos elementos que le permitan operar sin riesgo a ser dañado, o en dado caso dañar a algún sistema adjunto, lo cual repercutiría directamente en costos y tiempo.

#### 4.1 Equipo de protección

Todo transformador industrial está expuesto a diferentes daños o fallas que pueden presentarse en dado caso, y por ello conforme ha transcurrido el estudio de estas máquinas, han surgido nuevas formas o tipos de protección del mismo tal como las veremos a continuación:

- ✓ Relevador Buchholz
- ✓ Fusibles
- ✓ Apartarrayos



## Muestreo de aceite de transformadores

Las instrucciones generales para un muestreo de aceite de transformadores son las siguientes:

1. Para las pruebas de rigidez dieléctrica acidez y tensión interfacial, con una muestra en un recipiente cuyo volumen sea menor a los 2 litros es suficiente.
2. Las muestras deberán ser tomadas en días secos y con poca humedad.
3. Las muestras no deberán de ser tomadas en días lluviosos que tienen por consecuencia una humedad atmosférica arriba del 70%.
4. Las muestras hay que protegerlas del viento y del polvo.
5. Si las muestras son tomadas de válvulas, hay que limpiarlas para que estén libres de polvo y otros contaminantes.

### 3.2.3 Pruebas del factor potencia

El factor de potencia de un líquido aislante es el valor que se obtiene del coseno del ángulo de desfase entre el voltaje aplicado y la corriente resultante. El factor de potencia indica la pérdida de capacidad dieléctrica del líquido aislante y que aumenta al incrementarse la temperatura. La prueba del factor de potencia es ampliamente usada en pruebas de aceptación y mantenimientos preventivos en líquidos aislantes.

Esta prueba es comúnmente hecha con la norma ASTM D-924

Un aceite aislante en buen estado no debe de exceder de 0.05% a 20° C. Un factor de potencia a o en aceites o líquidos aislantes es indicio de deterioro y/o contaminación con sedimentos, carbón, humedad, barniz, etc. Un factor de potencia en aceite usado, que sea mayor que el 0.5%, deberá ser analizado en el laboratorio para determinar su origen .

En aceite aislante como el askarel con un factor de potencia alto es considerado mayor a 2.0 %.

Un aceite nuevo se considera con un factor de potencia de 0.05% o menos a una temperatura de 20° C

El carbón o asfalto en el aceite causa decoloración. El carbón no necesariamente causa factor de potencia alto a menos de que presente humedad.

Las siguientes sugerencias sirven de guía para evaluar una prueba del factor de potencia:

## **RELEVADOR BUCHHOLZ**

La desconexión automática de los interruptores a causa de las sobretensiones producidas, se realiza por intermedio de aparatos especiales llamados relés.

Las irregularidades en el funcionamiento de los transformadores dan origen a calentamientos locales en los arrollamientos, y consiguientemente a la producción de gases de aceite, cuya cantidad y rapidez en su desarrollo crecen sensiblemente a medida que se extiende la avería.

Los accidentes producidos en los transformadores, dan lugar siempre a la producción de gases o vapores, iniciándose a continuación diferentes casos que suelen presentarse:

- 1.** Al haber una ruptura en conexiones dentro del TR, se produce un arco el cual volatiliza el aceite, por lo tanto estos gases escapan a una cavidad llamada cuba (donde se encuentra el relevador).
- 2.** También se produce el arco cuando existe falta de aislamiento con la masa.
- 3.** Cuando existe una sobrecarga, las capas internas del arrollamiento se calientan y volatilizan el aceite, provocando pequeñas burbujas en explosión.
- 4.** También, si las propiedades dieléctricas del aceite han disminuido considerablemente, se puede suscitar por sobre-calentamiento el disparo de un arco, provocando que se formen gases en el interior.

## **APARTARRAYOS**

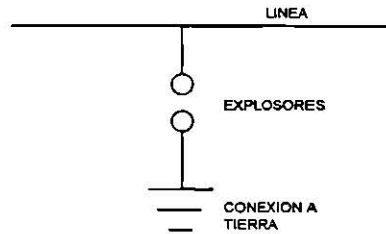
Las sobretensiones que se presentan en las instalaciones de un sistema, pueden ser de dos tipos:

- 1.** Sobretensiones de origen atmosférico.
- 2.** Sobretensiones por fallas en el sistema.

El apartarrayos es un dispositivo que nos permite proteger las instalaciones contra sobretensiones de origen atmosférico. Las ondas que se presentan durante una descarga atmosférica viajan a la velocidad de la luz y dañan el equipo si no se les tiene protegido correctamente, para la protección del mismo se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Descargas directas sobre la instalación
2. Descargas indirectas

El caso que puede presentarse más frecuente es el de las descargas indirectas, y el apartarrayos, que se encuentra conectado permanentemente en el sistema, opera cuando se presenta determinada descarga, drenando la corriente a tierra. Su principio general de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos explosores, cuya separación está determinada de antemano de acuerdo con la tensión a la que va a operar.



### Antecedentes

Anteriormente los apartarrayos consistían solo en un par de gap al aire, en el cual se inducía el alto voltaje originado por una descarga atmosférica, permitiendo que la corriente se descargara a tierra. Estos gap tienen la desventaja de no permitir que la corriente de corte circuito en el sistema, fluya a tierra sino hasta que se establezca el arco. Eléctricamente hablando, esto es lento o tardío, y la respuesta depende de la forma y el voltaje de la onda aplicada.

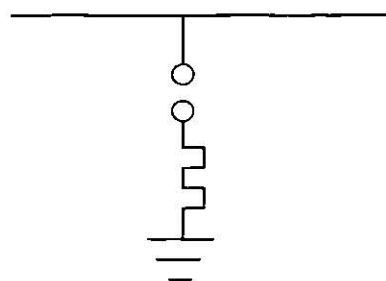
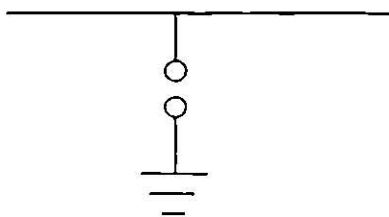
Un apartarrayos moderno es una versión más sofisticada de un gap al aire, la cual consiste en un elemento de gap o entrehierros en serie con un elemento no lineal conectados entre línea y tierra. El elemento de gap tiene dos funciones: La primera es completar el corte circuito a tierra durante la operación del apartarrayos; la segunda es desconectar el circuito a tierra restableciendo la alta resistencia después de descargar el sobre voltaje de la línea.

### Clase de apartarrayos

Según sus niveles de protección y la severidad de las pruebas de durabilidad, los apartarrayos se clasifican en:

- |                 |                  |
|-----------------|------------------|
| a) Distribución | (5000 a Serie B) |
| b) Intermedios  | (5000 a Serie A) |
| c) Estación     | (10000 a )       |

### Simbología



## Componentes

Para llevar a cabo sus objetivos, los apartarrayos cuentan con una serie de componentes ensamblados, los cuales desempeñan cada uno diferentes funciones específicas las cuales en conjunto producen el comportamiento global de éste.

- ✓ **Entrehierros.-** Estos están formados por un grupo de electrodos separados entre sí por distancias calibradas de tal forma que la cantidad y distancia entre ellos determina los voltajes a los que el apartarrayos descargará.
- ✓ **Resistencias graduadoras.-** Normalmente son espaciadores de forma cilíndrica que se colocan entre los electrodos que conforman los entrehierros, manteniéndolos separados entre sí, distribuyendo uniformemente el voltaje.
- ✓ **Block valvular.-** Serie de resistencias lineales conectadas en serie con los entrehierros utilizadas para limitar el voltaje residual durante el paro de la corriente de descarga.

Los materiales de que se encuentran fabricadas estas piezas, generalmente es de carburo de silicio unido mediante porcelana a alta temperatura. Existen también otros materiales de más reciente desarrollo, como el óxido de zinc cuya característica no lineal es tan marcada que puede utilizarse en apartarrayos sin necesidad de entrehierros.

## Efectos de contaminación atmosférica

Existen tres diferentes efectos de la contaminación atmosférica sobre la operación y vida de un apartarrayos que se estudiarán más adelante, y son: Arqueo externo, daño a la hermeticidad del apartarrayos, y descarga interna del apartarrayos.

## CUCHILLAS FUSIBLES

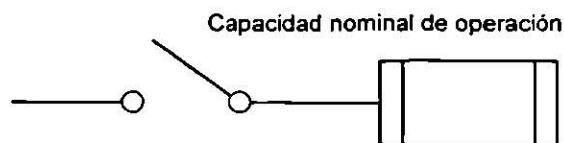
La cuchilla fusible es un elemento de conexión y desconexión de circuitos eléctricos. Tiene dos funciones: Como cuchilla desconectadora, para la cual se conecta, y como elemento de protección.

El dispositivo de protección lo constituye el dispositivo fusible, que se encuentra dentro del cartucho de conexión y desconexión. El dispositivo fusible lo seleccionan de acuerdo con el valor de corriente nominal que va a circular por él. Pero los fabricantes tienen el correspondiente valor de corriente de ruptura para cualquier valor de corriente nominal.

### Terminología

- ✓ **Cortacircuitos.-** Dispositivo de protección para los sistemas de distribución de energía eléctrica que en combinación con los eslabones fusibles interrumpe la corriente de corto circuito o de sobrecarga, con el fin de aislar un equipo o la parte de un circuito donde se presenta la falla.
- ✓ **Eslabón fusible.-** Dispositivo de protección de sobrecorriente con una parte fusible que abre el circuito al calentarse y fundirse por la sobrecorriente que pasa a través de él.
- ✓ **Capacidad interruptiva.-** Es el valor eficaz de la corriente que el cortacircuitos debe interrumpir satisfactoriamente.
- ✓ **Pruebas prototipo.-** Son aquellas que se efectúan a cada producto o modificación del mismo, para determinar si cumple con las características de su diseño.
- ✓ **Pruebas de aceptación.-** Son las que se efectúan en presencia de un representante del usuario para verificar la calidad del producto (son por muestreo).
- ✓ **Pruebas de rutina.-** Son aquellas que se efectúan con el fin de comprobar la calidad de los materiales usados y el trabajo realizado en la manufactura de un producto (son al 100%).

### Simbología



## Componentes

El cortocircuito fusible está integrado principalmente por: Aislamiento (Porcelana), Herrajes y Portafusible, los que durante la operación del mismo, realizan funciones específicas.

## SISTEMAS A TIERRA

✓ **Tomas de tierra.-** Son una parte de la instalación y de las que depende la seguridad de la misma. En general, se les ha prestado poca atención, pero ya el Reglamento vigente prescribe las revisiones periódicas que han de efectuarse con el fin de conocer el estado de las tomas de tierra.

El valor de las resistencias de las tomas de tierra en las redes de baja tensión, para que rindan eficacia, no debería ser superior a 10 ó 15  $\Omega$ . En las de alta tensión no debe pasarse del valor reglamentario de 20  $\Omega$ .

Hay que hacer constar que el terreno se comporta como una resistencia de tipo aglomerado, y que en estas condiciones dicha resistencia disminuye en función de la tensión aplicada.

Por otra parte, para tensiones muy importantes, la superficie de contacto activa de la toma de tierra se encuentra sensiblemente aumentada por el hecho de formarse varios pequeños arcos en los espacios de aire entre la parte metálica y el terreno. Además, para las corrientes rápidamente variables como es el caso de las sobretensiones de origen externo, la capacidad interviene en paralelo con la resistencia para reducir en grandes proporciones la impedancia total del circuito.

Por estas razones, los valores de la resistencia indicados anteriormente y medidos con baja frecuencia y baja tensión, son más eficaces que lo que parece a primera vista. La impedancia del circuito de tierra se compone :

1. De la resistencia del contacto entre el aparato protegido y el conductor de tierra.
2. De la impedancia del conductor y su conexión con el electrodo.
3. De la resistencia propia del electrodo.
4. De la resistencia entre el electrodo y el terreno.

## 5. De la resistencia del terreno.

De donde los incisos a), b), c) y d) son parámetros despreciables; en cambio el parámetro e) (Resistencia del Terreno), es muy importante ya que es en el que se puede presentar la mayor impedancia.

Todos los Ingenieros que han llevado a cabo experiencias sobre la resistencia de las tomas de tierra, han llegado a la conclusión de que los mejores resultados se obtienen empleando como electrodos tubos metálicos de características indicadas. Dichos tubos, que deben ser de hierro galvanizado, se colocan en terreno en la forma que muestra la Figura, dejando una arqueta del tubo destinada a fijar en ella la brida de conexión.

Para conservar la buena conductividad del terreno, se llena periódicamente de una solución salina, y en la parte inferior de éste van colocados orificios para que la solución penetre en la tierra y se filtre.

Puede emplearse además de sal común, cloruro de calcio, sulfato de cobre o de magnesio, los cuales reducen la resistividad.

## RUTINAS DE INSPECCION

El tratar de determinar la periodicidad de inspección de transformadores, es una labor algo complicada ya que intervienen una serie de factores que son los que determinan, en última instancia, las rutinas de inspección, estos factores son: Historia del equipo, condiciones de operación, calidad del equipo, condiciones ambientales, importancia del equipo, etc.

Aún cuando los fabricantes establecen en sus instructivos las rutinas de inspección, únicamente el personal de mantenimiento, a través de la experiencia, pueden establecer sus rutinas que en muchas ocasiones se aparta bastante de lo que el fabricante recomienda, por lo que es de vital importancia que las pruebas de puesta en servicio se realicen lo más completas posibles, a efecto de poder tener un punto de referencia en las pruebas y observaciones subsecuentes. Se recomienda que a los seis meses de estar operando el transformador, se efectúe nuevamente todas las pruebas; si éstas son normales podrán aplicarse las siguientes rutinas:

- 1. Inspección diaria semanal.-** Se refiere a las inspecciones usuales para detectar fallas incipientes en los elementos principales o equipos auxiliares del transformador. Todo este tipo de inspecciones se efectúa con el equipo en operación verificando :



- **Ruidos Anormales.-** Poner atención de cualquier ruido extraño que provenga del interior del transformador e investigar la causa.
- **Al Equipo de Preservación de Aceite Inertaire.-** Observar y registrar la presión del cilindro de nitrógeno, la mínima debe ser de 14 Kg/Cm<sup>2</sup> (200 PSI). Compare esta lectura con la anterior para evaluar si hay fugas.
- **Depósito de Sílica Gel.-** Ver el color de la sílica gel, si ésta ha variado, cambiar o regenerar si está húmeda, observando si no está obstruido el orificio de respiración del deshidratador.
- **Relevador Buchholz.-** Observar si el relevador tiene gas.
- **Dispositivo de Alivio de Sobrepresión.-** Observar si no está operando, si es así, investigue la causa, puede ser alta presión de nitrógeno o falla interna.
- **Indicador de Temperatura del Aceite.-** Observar y registrar la temperatura del aceite y la temperatura ambiente.
- **Indicador de Temperatura Punto Caliente.-** Observar y registrar la temperatura del punto caliente; para un transformador en servicio, la temperatura del punto caliente debe ser 10°C a 15°C mayor que la temperatura del aceite. Comparar la temperatura de P.C. con la demanda en KVA del TR, la temperatura de punto caliente debe ser 95°C cuando se trata de aislamiento de 55°C, o 11°C cuando es aislamiento de 65°C.
- **Indicador de Nivel de Aceite.-** Observar y registrar el nivel de aceite; el indicador de temperatura trae en su escala tres graduaciones: Bajo, mediano y alto. La indicación correcta de nivel depende de la temperatura del aceite, de tal manera que para 25°C debe estar en posición 'MEDIA', para 95°C posición de "ALTO" y para 20°C posición de "BAJO".
- **Radiadores y Ventiladores.-** Observar si las válvulas de radiadores están abiertas, observar si los ventiladores están operando (se recomienda que operen en forma automática cuando la temperatura de punto caliente llega a 65°C). En caso de no estar operando, colóquese el switch manual para observar que todos los ventiladores estén en buenas condiciones.

- **Gabinete de Control.-** Abra el gabinete y observe la limpieza, verifique que el switch "Manual Automático" este en la posición adecuada.
- **Boquillas de Alta Tensión.-** Observar si no hay despostillado en la porcelana de boquillas, señales de arqueo, decoloración en conectores; observar el nivel de aceite de boquillas (si lo hay).
- **Fugas de Aceite.-** Observar si se tienen fugas de aceite, comparar con el nivel de aceite. Las fugas se pueden presentar cuando la temperatura ambiente es muy baja debido a dilataciones de los materiales de empaque.

**2. Inspecciones Anuales o Bienales.-** Se refiere a inspecciones que requieren desenergizar el transformador para efectuar las pruebas de rutina o para observar las condiciones dieléctricas de sus aislamientos.

Estas inspecciones serán anuales durante los tres primeros años del transformador; si solamente se encuentran pequeñas variaciones con respecto a las pruebas de puesta en servicio, se puede abrir la inspección a cada 2 años.

Cuando de acuerdo a los resultados de las pruebas exista alguna duda con respecto a las condiciones del transformador, deberá tenerse éste en observación y analizar a detalle hasta encontrar la causa; en este caso se deberán efectuar las pruebas al TR.

## **Capítulo 5**

### **Banco de baterías**

Batería Plomo-Acido

Valores típicos de densidad: 1.200-1.220.

Voltaje por celda: 2.15 Volts. 129 Volts totales para 60 celdas

La variación en la densidad es directamente proporcional a la carga o la descarga.

**Correcciones en la densidad:**

	Variación en 25 °C Temperatura	Variación en nivel normal	Corrección
+ 1.5 °C	+ .001	+ 1/2 "	+ .015
- 1.5 °C	-.001	- 1/2 "	- .015

### Efectos de la densidad en las baterías:

Densidad más alta	Densidad más baja
1.- Más capacidad ( A -Hr )	1.- Menos capacidad
2.- Menos duración	2.- Más duración
3.- Se requiere menos espacio	3.- Se requiere más espacio
4.- Régimen de descarga momentánea más elevado.	4.- Régimen de descarga momentánea más reducida
5.- Más pérdida cuando está inactiva	5.- Menos pérdidas cuando está inactiva
6.- Menos adaptable para trabajo de flotación	6.- Más adaptable para trabajo de flotación

### Características de la descarga:

No se debe producir gasificación excesiva o que haga hervir el electrólito o que la temperatura del electrólito sea de 43°C por periodos largos, o de 51 °C por periodos cortos.

La corriente no debe producir voltajes mayores a 2.4 Volts por celda.

Se debe evitar en lo posible tanto el exceso como la falta de carga.

Una cantidad insuficiente de carga, aunque sea pequeña, si se deja que continúe puede producir la sulfatación gradual de las placas negativas y, con el tiempo, una pérdida de capacidad y la reducción de la vida útil del acumulador.

Una cantidad excesiva de carga corroerá o formará las rejillas de las placas positivas y las volverá peróxido de plomo, con lo cual, las debilitará físicamente y les hará aumentar la resistencia eléctrica que oponen. Si la sobrecarga es a regímenes relativamente elevados, la gasificación será excesiva y eso tiende a desprender el material activo de las placas positivas. Esto disminuye la capacidad y la vida del acumulador.

**Carga de flotación:** En este tipo de carga el acumulador está conectado constantemente a un sistema eléctrico, que incluye un cargador y una demanda de corriente. El cargador esta proyectado para mantener un voltaje constante cualquiera que sea la corriente: suministra suficiente corriente para vencer sus pérdidas internas y mantenerlo totalmente cargado; pero sin que exista sobrecarga apreciable.

**Carga de igualación:** En este tipo de carga se trata de una continuación de la carga normal hasta que se logre un estado de carga total. Esta ocurre al momento que las lecturas sucesivas de voltaje y densidad no aumenten en un período de varias horas .

**Conservación:**

La carga correcta es el factor mas importante para el servicio y la vida del acumulador y se debe seguir cuidadosamente el método prescrito para cada aplicación Un acumulador que está en servicio flotante o para emergencia o bien está almacenado, se debe mantener siempre con el máximo posible de carga.

Se debe agregar agua a los intervalos necesarios a fin de que el nivel del electrólito quede dentro de los límites prescritos. Nunca se debe permitir que las placas tengan ninguna parte de su superficie que no esté sumergida en el electrólito .

Los acumuladores se deben mantener limpios y secos, a fin de que no haya corrosión, polvo o humedad que constituyan un camino conductor que pueda ocasionar un corto circuito a una " tierra ".

Los acumuladores de plomo - ácido no necesitan ninguna reparación ni que les cambie el electrólito durante toda su vida, salvo que sea a consecuencia de algún daño accidental.

## **Capítulo 6**

### **Principios relacionados con la prueba de resistencia de tierras.**

La resistencia de tierras de cualquier sistema de electrodos teóricamente puede ser calculada con ecuaciones basadas en la fórmula general de resistencia

$$R = \rho L / A$$

donde  $\rho$  es la resistividad del terreno en ohm - cm, L es la longitud de la trayectoria de conducción, y A es el área que cruza la sección de la trayectoria.

Para entender el principio de la prueba de tierras, considere el diagrama esquemático de la fig. 5a. Ahora bien, asumamos que se tienen 3 barras enterradas en el suelo, separadas alguna distancia y un voltaje aplicado como se muestra en la fig. 5a. La corriente entre las barras 1 y 2 es medida por un amperímetro; la diferencia de potencial ( voltaje ) entre las barras 1 y 3 es medida por un voltímetro.

Si la barra 3 es colocada en varios puntos entre las barras 1 y 2, preferentemente en una línea recta, se puede obtener una serie de lecturas de voltaje. Con la ley de Ohm ( $R = E / I$ ) se puede determinar la resistencia de tierra en cualquier punto medido.

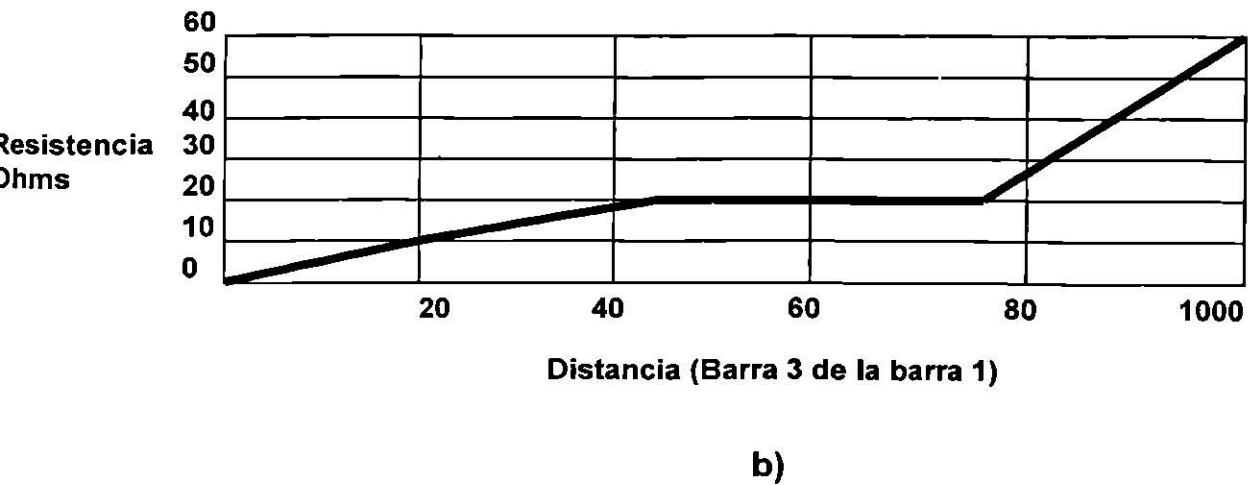
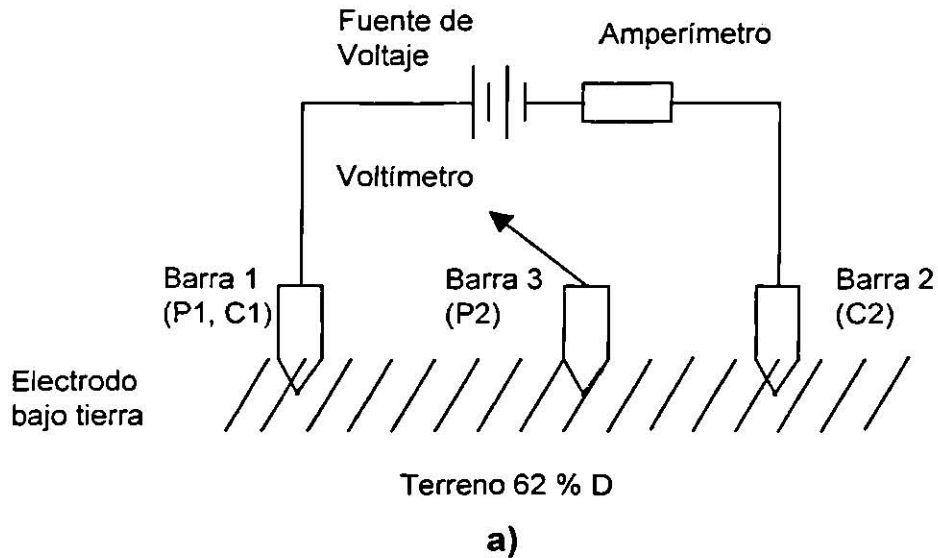
La serie de valores de resistencia puede ser trazada contra distancia para obtener una curva ( Fig. 5b. ). Note que, como la barra 3 es alejada de la barra 1, los valores de resistencia se incrementan, pero la cantidad de incremento va siendo menor y menor; hasta que un punto es alcanzado donde la tasa de incremento llega a ser tan pequeña, que la lectura puede ser considerada constante ( 20 ohms en la fig. 5b). Esto se explica, considerando que las líneas de trayectoria de tierra entre las barras 1 y 3 tienen un superficie de área tan grande que ellas incrementan en un valor muy pequeño el valor de resistencia total. Después de este punto, como las líneas de trayectoria de tierra de la barra 3 se acercan a las de la barra 2, la resistencia gradualmente se eleva. Cerca de la barra 2, los valores se incrementan de manera aguda.

Ahora bien, si la barra 1 es nuestro electrodo bajo prueba, de una curva típica de resistencia de tierra, tal como la fig. 5b, ¿cuál es la resistencia de ésta barra?. Nombraremos a la barra 2 sonda de referencia de corriente C2 y a la barra 3, sonda de referencia de potencial P2. La resistencia correcta es a menudo obtenida si P2 ( barra 3 ) es colocada a una distancia desde el centro del electrodo de tierra ( barra 1 ) de aproximadamente 62 % de la distancia entre el electrodo de tierra y C2 ( barra 2 ).

Esta regla trabaja bien para electrodos sencillos, tal como un electrodo enterrado. También funciona para un pequeño grupo de barras. Pero se debe conocer el correcto centro eléctrico del sistema con una precisión aceptable. Además, la exactitud de la lecturas es mejor si la resistividad del terrero entre los tres electrodos es razonablemente constante.

Finalmente, C2 debe estar lo suficientemente alejado del sistema de electrodos de tierra de tal forma que el 62 % de la distancia esté fuera de la esfera de influencia del electrodo de tierra.

**Fig. 5 Principio de una prueba de resistencia de tierra**



**MANUAL SOBRE PRUEBAS DE RESISTENCIA DE TIERRA.**

Métodos básicos de prueba para resistencia de tierra.

Los instrumentos Megger para pruebas de resistencia de tierra incluyen Una fuente de voltaje, ( 2 ) un ohmetro para medir directamente la resistencia, y ( 3 ) selectores para cambiar el rango de resistencia del instrumento.

Existen 2 métodos básicos de prueba, mostrados esquemáticamente en la fig. 6 y 7, llamados:

- Método directo, o prueba de 2 terminales.
- Método de caída de potencial, o prueba de 3 terminales.

### Método directo:

Las terminales P1 y C1 se conectan al electrodo de tierra bajo prueba; Las terminales P2 y C2 se conectan a un sistema completamente metálico de tubería de agua ( fig. 6 ).

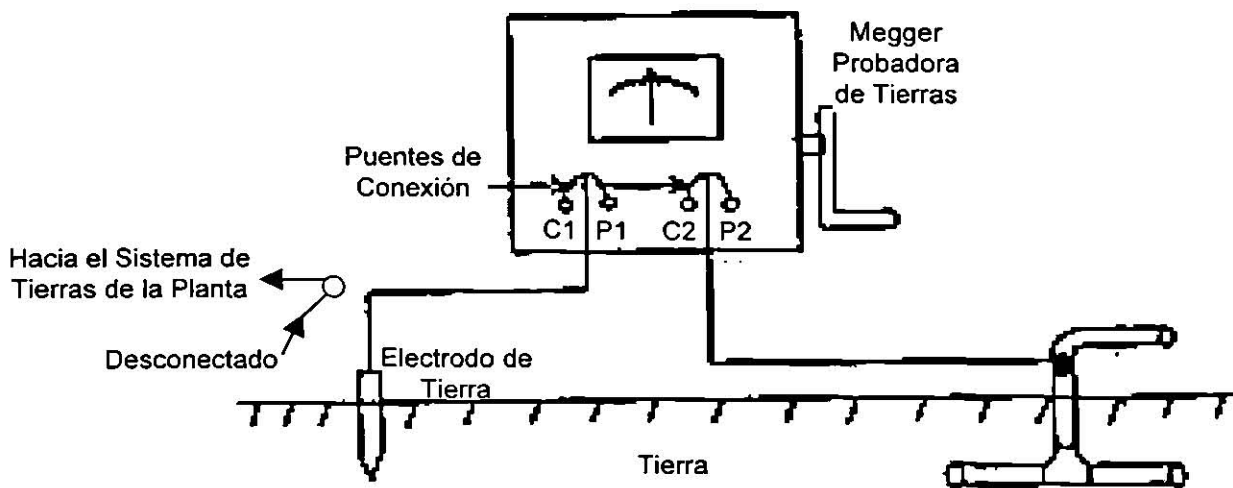


Fig. 6 Método directo o prueba de 2 terminales



Si el sistema de agua es grande ( que cubra una área extensa ), su resistencia debe ser sólo una fracción de 1 ohm. Se podrá tomar la lectura del instrumento con el valor de la resistencia del electrodo bajo prueba.

Existen tres limitantes para el empleo de este método:

1. El sistema de tubería de agua debe ser lo suficientemente grande para que su resistencia sea muy pequeña.
2. El sistema de tubería debe ser completamente metálico, sin coples o uniones de material aislante.
3. El electrodo de tierra bajo prueba debe estar lo suficientemente alejado del sistema de tubería de agua para caer fuera de la influencia del campo esférico del sistema.

**Regla empírica:** La distancia del electrodo de tierra a el sistema de tubería de agua deberá ser alrededor de 10 veces el radio de electrodo o red para obtener una medición con una exactitud de  $\pm 10\%$ .

**Método de caída de potencial:** Esta prueba de 3 terminales es el método descrito previamente con referencia a la fig. 5. Las terminales P1 y C1 en el instrumento son puenteadas y conectadas al electrodo de tierra bajo prueba. La barra de referencia C2 deberá ser colocada tan lejos del electrodo de tierra como sea posible; esta distancia puede estar limitada por la longitud del cable disponible, o la geografía de los alrededores ( vea la fig. 7 ).

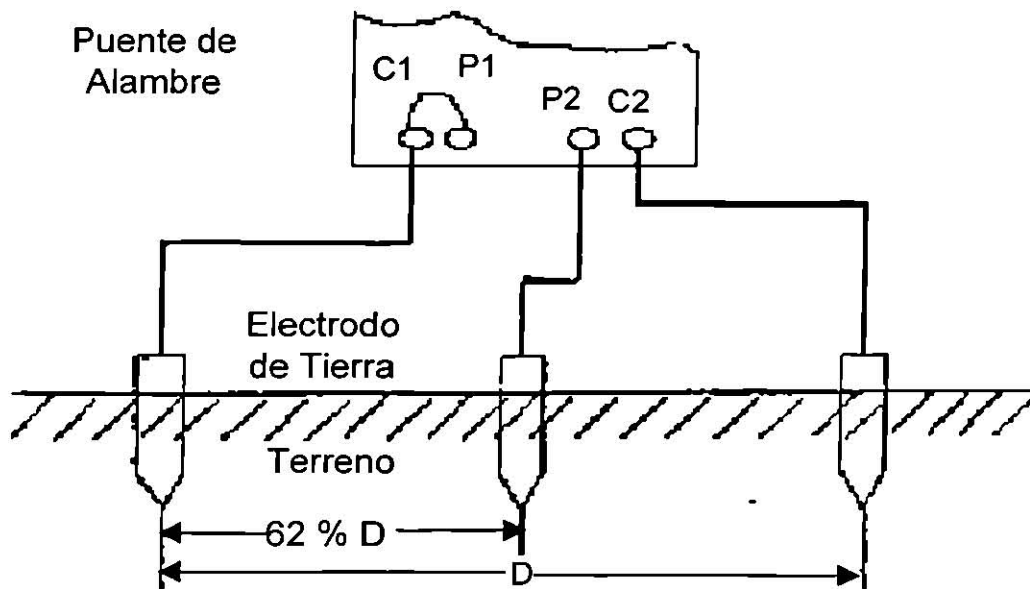
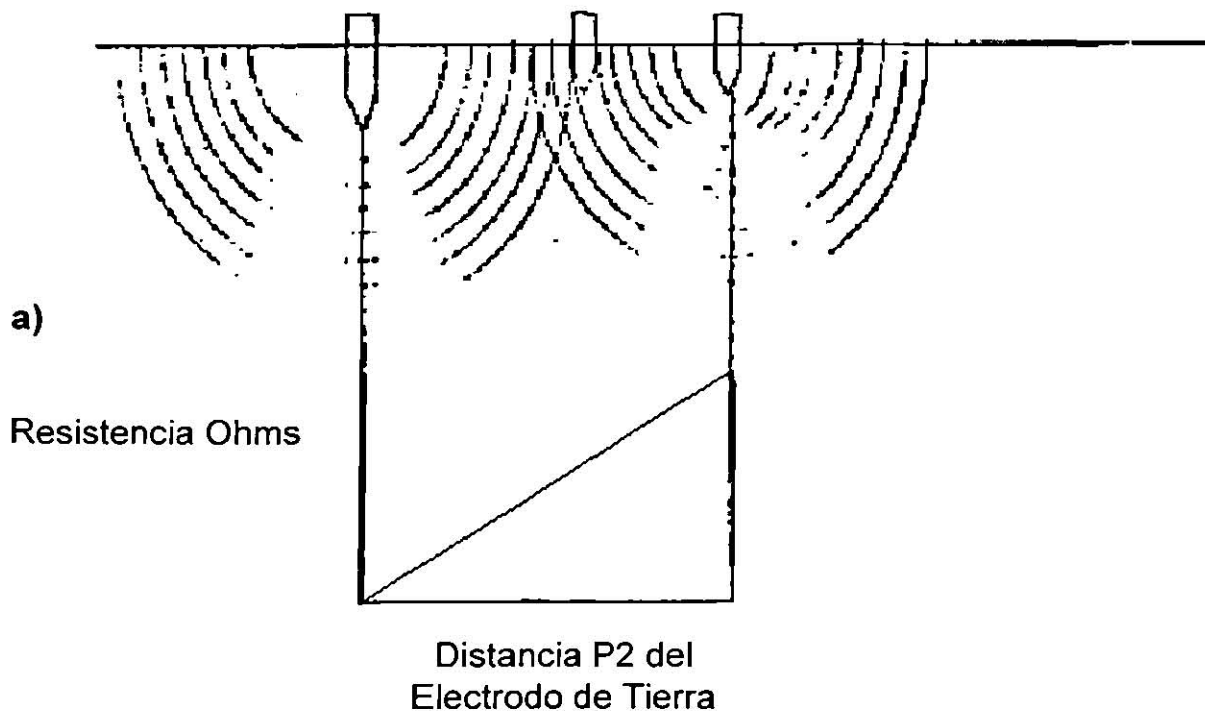


Fig. 7 Prueba de resistencia de tierra por "caída de potencial" o 3 terminales.

La barra de potencial de referencia P2 es ahora enterrada en un número de puntos aproximadamente sobre una línea recta entre el electrodo de tierra y C2. Las lecturas de resistencia son anotadas para cada uno de los puntos. Una curva de resistencia contra distancia, como en la fig. 5b, es luego trazado. La resistencia de tierra correcta es leída de la curva para la distancia de alrededor 62 % de la distancia total del electrodo de tierra a C2. En otras palabras, si la distancia total es D, el 62 % de distancia es  $0.62 D$ ; por ejemplo, si D es 120 metros, la distancia para la resistencia de tierra es  $0.62 \times 120 = 74$  Mts.

### EFFECTOS DE DIFERENTES PUNTOS DE COLOCACION DE LA SONDA DE REFERENCIA.

Mínima distancia para C2. Considere la fig. 8 la cual muestra las líneas de trayectoria de tierra alrededor del electrodo de tierra y la sonda C2. En la fig. 8a, C2 está muy cerca al electrodo de tierra de tal forma que las líneas de trayectoria de tierra se traslapan en gran cantidad. Entonces, no se obtendrá una estabilización de la medida de la resistencia al alejar P2 del electrodo de tierra; ya que las líneas de trayectoria de C2 se suman a las líneas de trayectoria del electrodo de tierra. Por lo cual la resistencia continuará incrementándose.



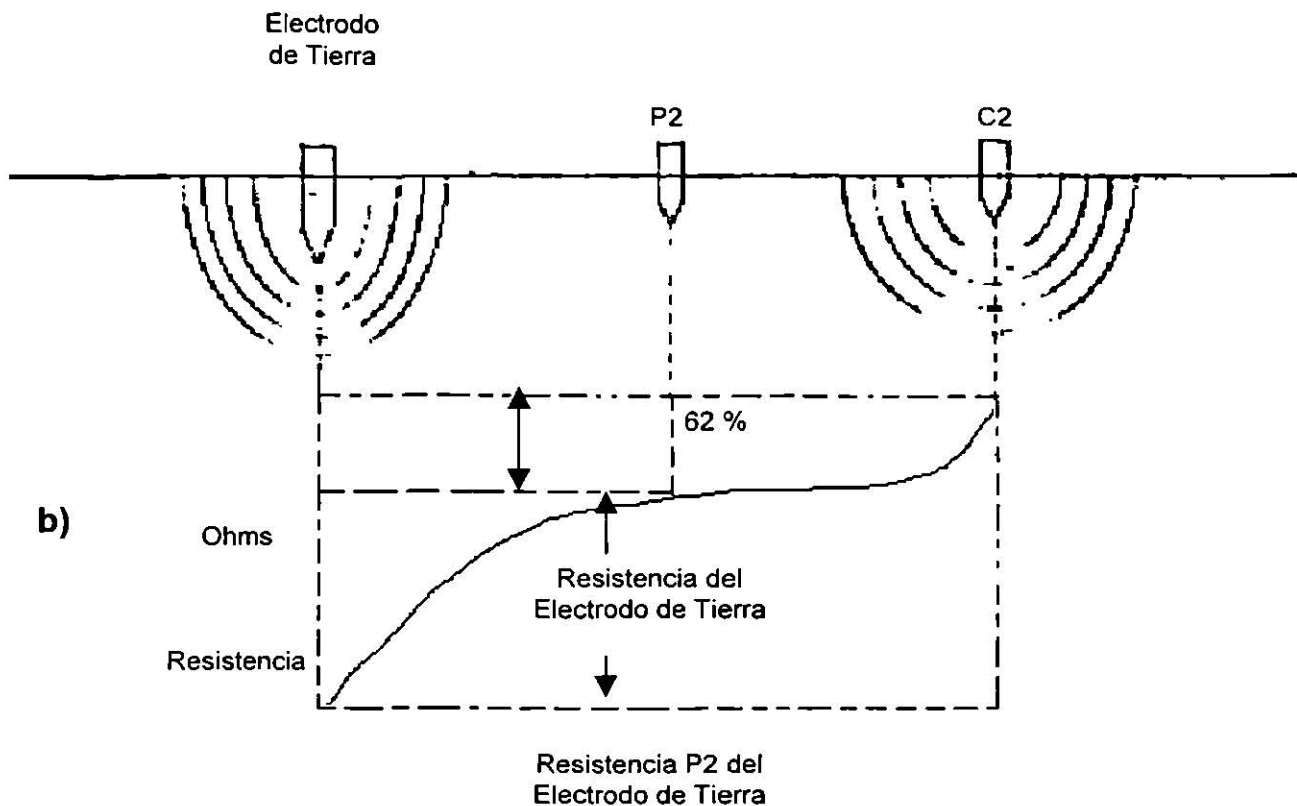


Fig. 8 Efecto de la distancia de colocación de C2 sobre la curva de resistencia.

**Prueba simplificada de caída de potencial:** Algunos usuarios no colocan el electrodo de referencia P2 a el 62 % de distancia. Ellos usan un procedimiento similar a el método anterior, pero ellos empiezan con P2 en medio del electrodo de tierra y C2. Después de medir la resistencia para este punto, ellos hacen 2 o 3 pruebas hacia ambos lados 3 metros retirados del punto medio. Si la resistencia del punto medio coincide con las otras lecturas dentro una exactitud requerida, el valor promedio es usado como resistencia de tierra.

Si las lecturas no están dentro de la exactitud pedida, la sonda C2 tiene que ser colocada más lejos y repetir las pruebas.

Este método puede dar suficiente exactitud, pero siempre dará valores en el lado bajo de la curva.

#### ALGUNAS REGLAS EMPIRICAS SOBRE EL ESPACIAMIENTO DE P2 Y C2.

Con una malla pequeña de uno o dos electodos de tierra, C2 puede generalmente ser puesto alrededor de 30 a 40 metros del electrodo bajo prueba; P2 correspondientemente puede ser colocado alrededor de 20 a 25 metros alejado.

Si el electrodo es grande consistiendo, por ejemplo, de varias barras o placas en paralelo la distancia para C2 debe ser aumentada en lo posible a 60 metros, y para P2 algunos 37 metros.

Se necesitarán aún mayores distancias para sistemas de electrodos complejos que consistan de, digamos, un gran número de barras o placas y otras estructuras metálicas, todas conectadas entre sí.

La tabla 1 es una guía para la colocación de la sonda de referencia.

Se encontrará la " máxima dimensión " tomando la distancia diagonal a través del área del sistema de electrodos. Por ejemplo, si las medidas del área son de 30 x 30 m., la diagonal es de alrededor de 40 m. De la tabla, encontramos que la distancia P2 deberá ser 111m., desde el electrodo de referencia y C2 a 180 m. del mismo.

**Tabla 1 Guía para la colocación aproximada de las sondas de referencia.**

<b>Dimensión máxima (mts.)</b>	<b>Distancia a P2 (mts.)</b>	<b>Distancia a C2 (mts.)</b>
0.6	12.2	21.3
1.2	18.3	30.5
1.8	24.4	38.1
2.4	27.4	42.7
3.0	30.5	48.8
3.7	32.0	51.8
4.3	36.6	57.9

## **RESISTIVIDAD DEL TERRENO.**

La resistividad del terreno, expresada en ohm - cm., es una de las variables más importante que afecta la resistencia a tierra de un sistema de electrodos.

No obstante, nosotros consideramos que el valor actual de resistividad de la tierra no es necesario que sea medida para verificar la resistencia de los electrodos de tierra.

## **COMO SE MIDE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.**

El mismo instrumento de Megger que se utiliza para medir la resistencia del electrodo de tierra es usado para medir la resistividad del terreno. Ahora, sin embargo, se utilizan 4 electrodos pequeños enterrados a la misma profundidad y espaciados a distancias iguales en una línea recta. Cuatro cables individuales conectados a los electrodos se llevan a las terminales del instrumento, como se muestra en la fig. 16. El nombre de esta prueba es "El método de 4 terminales".

El Dr. Frank Wenner desarrolló la teoría de esta prueba, el mostró que, si la profundidad a la que se entierra el electrodo ( B ) se mantiene lo suficientemente pequeña, comparada con la distancia entre electrodos ( A ), la siguiente fórmula se aplica:

$$\rho = 2\pi AR$$

donde  $\rho$  es el promedio de la resistividad del terreno a la profundidad B en ohm - cm.  $\pi$ , es la constante 3.1416, A es la distancia entre los electrodos en cm., y R es la lectura del instrumento Megger leído en ohms.

En otras palabras, si la distancia A entre electrodos es 40 cm., obtenemos el promedio de la resistividad del terreno a una profundidad B de 20 cm., como sigue:

Si la lectura del instrumento es 60 ohms, la resistividad del terreno sería:

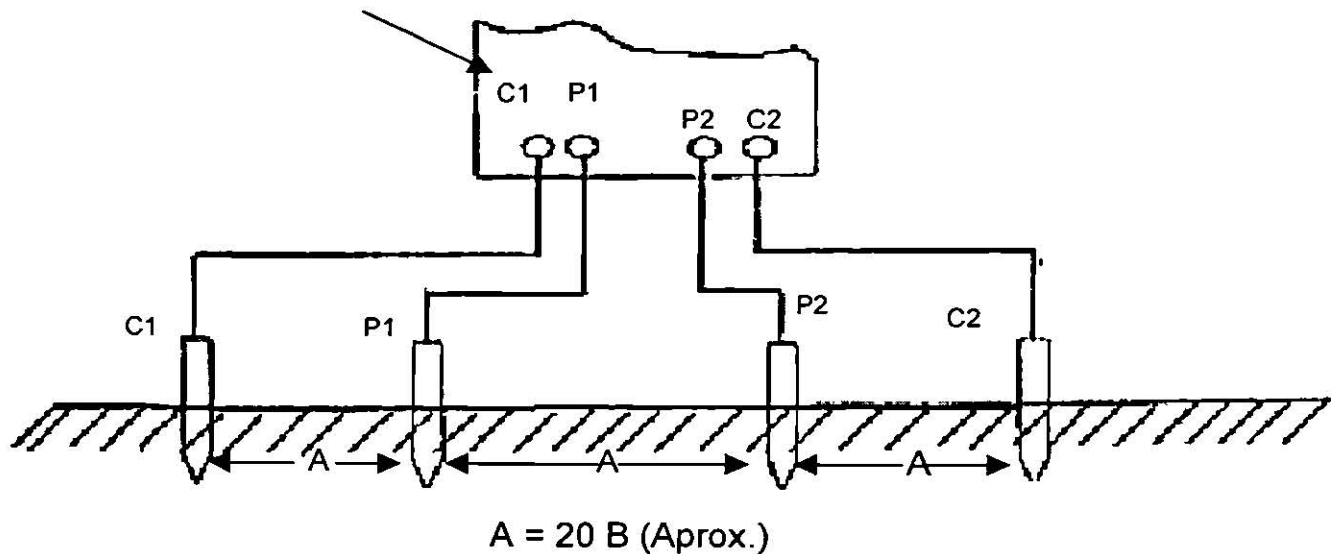


Fig. 16 Método de 4 terminales para medición de resistividad del

## Bibliografía

- 1.** Gilberto Enriquez Harper. El ABC de las instalaciones eléctricas industriales.
- 2.** Electrical ,Equipment Testing and Maintenance. Gill, Editorial Prentice Hall.



