



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica

*“Diseño de la Jaula de Faraday y Puesta a
Tierra del Laboratorio de Alta Tensión
de la ESPOL”*

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Especialización: POTENCIA

Presentada por:

CELIANO IVAN BALSECA CUEVA

Guayaquil - Ecuador

1988

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**DISEÑO DE LA JAULA DE TARADAY Y PUESTA A TIERRA
DEL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESPOL**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION POTENCIA

Presentada por:

CELIANO IVAN BALSECA CUEVA

Guayaquil-Ecuador

1988

A G R A D E C I M I E N T O

AL ING. JORGE CHIRIBOGA Director
de Tesis, por su ayuda y
colaboración para la realización
de este trabajo.

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES,
CELIANO Y BEATRIZ.

C. Villafuerte
Ing. Carlos Villafuerte

Presidente del Tribunal

J. Chiriboga
Ing. Jorge Chiriboga

Director de Tesis

Jorge A. Chiriboga

Jorge Flores
Ing. Jorge Flores

Ing. Jorge Flores

Miembro del Tribunal

Leo Salomón
Ing. Leo Salomón

Ing. Leo Salomón

Miembro del Tribunal

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)



Celiano Iván Balseca Cueva

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es diseñar una Jaula de Faraday y la puesta a tierra del Laboratorio de Alta Tensión a ser instalado en el Nuevo Campus Politécnico de la ESPOL.

En el primer capítulo se describen las consideraciones generales del Laboratorio de Alta Tensión de la ESPOL, indicando aspectos tales como su ubicación, servicios inherentes al laboratorio y aspectos eléctricos. Además se indican los elementos y equipos que conforman un Laboratorio de Alto Voltaje y las pruebas que se realizan en instalaciones de este tipo y específicamente las que se podrán realizar en el laboratorio a ser construido en la ESPOL. En este capítulo también se plantean las condiciones físicas y eléctricas a ser tomadas en cuenta en el desarrollo de este estudio.

En el segundo capítulo se establecen los criterios generales sobre el blindaje electromagnético a través de una Jaula de Faraday; se plantean las consideraciones, respecto al blindaje, aplicables al Laboratorio de Alta Tensión y la experiencia, en este campo, de las casas especializadas en la construcción de equipo para Laboratorios de Alto Voltaje. Además se presenta la forma como se determinan las dimensiones del área a ser cubierta

por la "jaula", basándose en los valores nominales del voltaje de pruebas AC., DC., y de Impulso del Laboratorio de Alto Voltaje de la ESPOL.

Una vez que se han expuesto los criterios básicos sobre el blindaje electromagnético, se pasa al diseño de la Jaula de Faraday del Laboratorio y que se expone en el capítulo III. En este capítulo se indican las dimensiones, material, detalles de construcción y presupuesto de la Jaula de Faraday.

En el cuarto capítulo se analizan los criterios a ser tomados en cuenta en el diseño de una puesta a tierra. Se indican conceptos relacionados con la resistividad del suelo y métodos de medición e interpretación de datos de sondeo eléctrico de resistividad. Así mismo se presentan el método de la IEEE en lo que respecta al diseño de mallas de puesta a tierra y métodos de cálculo y medición de la resistencia de un sistema de puesta a tierra. Además, se plantean las consideraciones, respecto a la puesta a tierra, aplicables al Laboratorio de Alto Voltaje. También se detallan los datos de mediciones de resistividad de suelo obtenidos en el terreno donde se levantará el Laboratorio.

En el quinto capítulo se determinan las características

geológicas y eléctricas (resistividad) del terreno y mediante la aplicación del método de la IEEE se determinan las características técnicas de la malla de puesta a tierra del Laboratorio y se indican los detalles de su construcción y protección. Así mismo, se presenta el costo de esta instalación.

En el sexto capítulo, se expone el diseño de detalles que incluye la forma de aterrizar la Jaula de Faraday y la construcción de un ducto o canaletta metálica a través de la cual se protege, de interferencias electromagnéticas, a los conductores de control y medida que entran desde la mesa de control al interior de la Jaula de Faraday. Además se indican los detalles que deberán ser tomados en cuenta en la construcción de las paredes, tumbado, piso e iluminación del Laboratorio. También se determina el presupuesto general de instalar la Jaula de Faraday y la puesta a tierra del Laboratorio de Alta Tensión de la ESPOL.

Finalmente se desarrollan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	IX
INDICE DE FIGURAS	XV
INDICE DE TABLAS	XXI
ABREVIATURAS	XXIII
INTRODUCCION	24
CAPITULO I	
CONSIDERACIONES GENERALES.	
1.1 UBICACION DEL LABORATORIO	26
1.2 FACILIDADES DE ACCESO	26
1.3 PARQUEAMIENTOS	27
1.4 BODEGA	27
1.5 SEGURIDAD	28
1.5.1 En el Area Interna	28
1.5.2 En el Area Externa	36
1.6 MANTENIMIENTO	37
1.7 ASPECTO ELECTRICO	37
1.7.1 Acometida	37
1.7.2 Disposición de los transformadores	38
1.7.3 Distribución interna de cables	40

1.8 ELEMENTOS Y EQUIPOS QUE CONFORMAN UN LABORATORIO DE ALTA TENSION	41
1.9 EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESPOL	52
1.10 CLASES DE PRUEBAS A REALIZARSE EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESPOL	57
1.11 CONDICIONES FISICAS Y ELECTRICAS	60
1.11.1 Condiciones y restricciones Fisicas	60
1.11.2 Condiciones y restricciones Eléctricas ..	65
CAPÍTULO II	
CRITERIOS SOBRE LA JAULA DE FARADAY	
2.1 DEFINICION DE BLINDAJE	69
2.2 IMPORTANCIA DEL BLINDAJE ELECTROMAGNETICO	70
2.3 EFECTOS BIOLOGICOS DE CAMPOS ELECTRICOS	72
2.4 CONCEPTOS BASICOS DEL BLINDAJE ELECTROMAGNETICO .	74
2.5 CAMPO ELECTROMAGNETICO	78
2.6 DEMOSTRACION TEORICA QUE EL CAMPO ELECTRICO EN EL INTERIOR DE LA JAULA DE FARADAY ES NULO	81
2.7 ONDAS ELECTROMAGNETICAS PLANAS EN MEDIOS CONDUCTORES; APLICACION: JAULA DE FARADAY	93
2.8 TIPOS DE BLINDAJE	99
2.9 CONSIDERACIONES IMPORTANTES AL PROYECTAR EL BLINDAJE	101

PAGS.

2.10 CONSIDERACIONES APLICABLES AL LABORATORIO DE ALTA TENSION	106
2.11 AREA A CUBRIRSE	111
CAPITULO III	
DISEÑO DE LA JAULA DE FARADAY	
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DEL LABORATORIO	125
3.2 PRESUPUESTO	130
CAPITULO IV	
MALLAS DE PUESTA A TIERRA	
4.1 OBJETIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA	131
4.2 REQUISITOS DE UNA PUESTA A TIERRA	133
4.3 CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN SUELOS	135
4.4 RESISTIVIDAD DE SUELOS	140
4.4.1 Tipos de suelos	140
4.4.2 Inhomogeneidad de los terrenos	141
4.4.3 Métodos de medición de Resistividad	142
4.4.4 Interpretación de las medidas de Resistividad del terreno	152
4.5 MALLAS DE TIERRA	157
4.5.1 Objetivos	158

4.5.2 Tipos	159
4.5.3 Elementos constitutivos de una malla de tierra	161
4.5.4 Método de la IEEE para el diseño de mallas de tierra	166
4.5.5 Cálculo de la Resistencia del sistema de tierra	180
4.5.6 Mediciones de la Resistencia de la malla de tierra	195
4.5.7 Mejoramiento de la malla de tierra	199
4.6 CONSIDERACIONES APLICABLES AL LABORATORIO DE ALTA TENSION	206
4.7 REALIZACION PRACTICA DE LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD	219
CAPITULO V	
DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA	
5.1 CARACTERISTICAS DEL TERRENO	225
5.2 APLICACION DEL METODO DE LA IEEE PARA EL DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL LABORATORIO DE ALTA TENSION	236
5.3 DETALLES DE CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	259

5.4 PROTECCION DE LA MALLA	263
5.5 PRESUPUESTO	269
CAPITULO VI	
DISEÑO DE DETALLES	
6.1 PROTECCIONES	270
6.1.1 Protecciones Interior - Exterior	270
6.1.2 Protecciones Interiores.....	274
6.2 CONSTRUCCION DE PAREDES	279
6.3 CONSTRUCCION DEL TUMBADO	279
6.4 CONSTRUCCION DEL PISO	281
6.5 ILUMINACION	284
6.6 PRESUPUESTO GENERAL	288
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	289
ANEXOS	292
ANEXO A: DATOS TECNICOS Y APLICACION DEL EQUIPO DE LABORATORIO DE ALTA TENSION FABRICADO POR LA MWB MESSHANDLER - BAH AG.	292
ANEXO B: INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS EN LA MEDIDA DE VOLTAJES DE DESCARGA DISRUPTIVA, POR MEDIO DE ESPINTEROMETROS ESFERICOS	317

	PAGS.
ANEXO C: PRUEBAS BAJO LLUVIA ARTIFICIAL	326
ANEXO D: PLANOS ARQUITECTONICOS Y ESTRUCTURALES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESPOL	336
ANEXO E: DIFERENCIA DE POTENCIALES TOLERABLES	339
ANEXO F: CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO DE LA SUPERFICIE	343
BIBLIOGRAFIA	346

INTRODUCCION

La Escuela Superior Politécnica del Litoral, con el afán de lograr desarrollo científico, tecnológico y económico del país, ha visto la necesidad de contar con instalaciones experimentales a través de las cuales sus estudiantes logren alcanzar una sólida formación científico - técnica. Una de estas instalaciones es un laboratorio de alta tensión.

En este laboratorio de alta Voltaje, los estudiantes lograrán consolidar sus conocimientos teóricos de alta tensión, a través de la práctica experimental realizada en él.

En estas instalaciones, se podrán realizar pruebas a equipo eléctrico de alta tensión, que se producen e importan al país, con la finalidad de comprobar las normas exigidas a equipo de esta naturaleza; con esto se asegura de que el funcionamiento de estos equipos, en la industria o en las Empresas Eléctricas del país, sea satisfactoria.

Requerimientos fundamentales de un laboratorio de alta Tensión son el blindaje y la puesta a tierra de él mismo.

El blindaje, a través de una Jaula de Faraday, tiene la finalidad de evitar que ondas electromagnéticas externas,

al laboratorio, perturben mediciones extremadamente sensitivas, como son las de descarga parcial, que se realizan en un laboratorio de Alta Tensión. Así mismo, el blindaje evita de que ondas electromagnéticas de alta frecuencia, resultado de las descargas del generador de impulsos y procesos de descargas disruptivas, puedan causar perturbaciones a las transmisiones de radio, televisión y telecomunicaciones en los alrededores del área de pruebas del laboratorio.

La puesta a tierra provee condiciones apropiadas para prevenir sobrevoltajes peligrosos en la puesta a tierra de los equipos y conductores de control, así como para grabar oscilogramas precisos y útiles con ayuda del osciloscopio. De igual manera, las ondas electromagnéticas que llegan a la Jaula de Faraday son enviadas a tierra a través de la puesta a tierra del laboratorio.

El diseño del blindaje y la puesta a tierra del laboratorio de Alta Tensión de la ESPOL, objetivo de esta Tesis, se presenta a continuación.

CAPITULO 1

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. UBICACION DEL LABORATORIO.

Debido a las funciones del laboratorio y de las pruebas a realizarse en él, estará situado en los predios del Nuevo Campus Politécnico de la ESPOL, cercano a la Facultad de Ingeniería Eléctrica. El área escogida es lo suficientemente amplia, en donde pueden caber los servicios inherentes.

Por la estructura característica de paredes altas, casi sin ventanas, se deberá arreglar suficientes áreas verdes para armonizar el conjunto.

1.2. FACILIDADES DE ACCESO.

Teniendo en cuenta que en el laboratorio se realizarán diversas pruebas eléctricas tales como: pruebas con fines pedagógicos, pruebas de control de calidad industrial, comprobaciones de materiales importados con la finalidad de exigir las normas de los elementos a usarse en alta tensión; se deberá prever vías de acceso para transporte pesado, trailers que transportarán el material de

comprobación.

La entrada y el área de pruebas del laboratorio deberán ser de tal modo construídas que reúnan todos los requisitos para soportar grandes pesos, su movilización y descarga.

Se deberá disponer de un montacargas, o en su efecto de grúas, medios más eficaces para las operaciones de carga, descarga y movilización del equipo pesado en el interior del laboratorio.

2.3. PARQUEAMIENTOS:

De acuerdo a los planos urbanísticos del Nuevo Campus Politécnico de la ESPOL, los espacios de estacionamiento para vehículos tanto del personal que trabajará en el laboratorio, como para estudiantes, visitantes y más aún para transportes que traigan elementos a ser probados, son los que corresponden a la Facultad de Ingeniería Eléctrica cercanos al Lab. de Alta Tensión y que se especifica como estacionamiento H.

2.4. BODEGA:

Es de esperarse, que se tendrá material para probarlo

o ya probado, que aguarde el turno para ser retirado; ante esta circunstancia, será necesaria una área de bodega tanto cubierta, para aquellos materiales que pudieran dañarse a la intemperie, como al aire libre, para elementos grandes y pesados. Para ambos casos hay que tomar en cuenta, la condición del piso que deberá soportar grandes pesos.

1.5. SEGURIDAD.

La seguridad debe ser tanto para el área interna como para el área externa del laboratorio.

1.5.1. En el área interna.

El Área interna comprende el laboratorio de pruebas y los tableros de control. El ingreso de personas no autorizadas a las áreas de alta tensión deberá tener especial cuidado.

Al trabajar cerca de alto voltaje se debe tener un grado sumo de cuidado. Se sabe que el voltaje solo no causa daño, pero si alguna corriente eléctrica circula a través del cuerpo humano este puede ocasionar graves problemas.

A continuación se detallan los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica.

Causas Técnicas: Intensidad de corriente eléctrica, voltaje aplicado, resistencia del cuerpo humano.

Intensidad de Corriente	Consecuencia
1.0 mA.	No provoca reacción alguna.
1.0-1.6 mA.	Sensación perceptible en los lugares de contacto, es decir hormigueo en las manos.
1.6-3.5 mA.	Adormecimiento de las manos, dolor en las muñecas y trabazón leve en las manos.
4.5-6.0 mA.	Calambres en las manos y en el antebrazo.
6.0-8.0 mA.	Rigidez en las manos, siendo necesario hacer esfuerzos para abrir la mano y desasirse.
10.0 mA.	Calambres y sensaciones desagradables soportables durante 30 segundos, siendo necesario un esfuerzo para desasirse.

15-20 mA.	Choque doloroso, acompañado de fuertes contracciones musculares. Paralización del sistema respiratorio.
50-100 mA.	Puede causar fibrilación ventricular, es decir, pérdida de coordinación de las contracciones del corazón. Mata instantáneamente a la víctima.
100-200 mA.	Mata siempre a la víctima por fibrilación ventricular.
> 200 mA.	Produce quemaduras graves y fuertes contracciones musculares que oprimen el corazón y lo paralizan durante el choque, esta circunstancia evita la fibrilación ventricular.

Pues bien, si aplicamos una ley familiar: $V=(I)(R)$; (V =Voltaje, I =Corriente, R =Resistencia); y si tomamos la resistencia del cuerpo humano como una resistencia de 500 ohm, que es un valor promedio aceptado, y una corriente fatal de 100 mA, entonces $V = 50$ voltios. Por tanto, cincuenta voltios es todo

necesita para causar un perjuicio fatal a una persona.

En vista que el alto voltaje procede de muchas formas, tales como corriente alterna, corriente continua, voltajes de impulso, así como de sobrevoltajes de conmutación y además debido a que todas las partes del equipo que se encuentra en un laboratorio de pruebas de alto voltaje pueden producir corrientes de esta magnitud, se deben considerar peligrosos y por lo tanto, para evitar accidentes graves que podrían acarrear serios problemas, es necesario observar las siguientes normas de seguridad:

- a) Toda persona que trabaja con las instalaciones de alta tensión está obligada a observar las normas de seguridad. La falta de atención a estas regulaciones, hace peligrar la propia vida y la de los demás.
- b) Todo aquel que tenga que entrar a la instalación de alta tensión debe asegurarse visualmente que todos los conductores e implementos que podrían estar con tensión

se hallen conectados a tierra y que los interruptores en las líneas de alimentación se hallen abiertos.

c) La entrada y permanencia de personas extrañas al laboratorio solo está permitida en compañía de personas autorizadas.

d) Está terminantemente prohibido fumar durante las prácticas.

e) Toda instalación de alta tensión debe estar blindada o cerrada por una malla metálica de protección conectada a tierra.

f) Las distancias mínimas entre la malla y las piezas sometidas a alta tensión deben ser:

Tensión alterna: 50 cm. por cada 100 KV.

Tensión de choque: 20 cm. por cada 100 KV.

Separación mínima: 50 cm.

g) La introducción de objetos conductores a través de la malla es prohibida en todos los casos (excepto cables de medida y control blindados, previa comprobación que el blindaje se halle conectado a tierra).

h) Las puertas de acceso a la instalación de prueba deben estar previstas de un interruptor de seguridad que bloquee la alimentación al transformador elevador.

i) Las luces de señal indicarán:

ROJO: Alto Voltaje conectado - PELIGRO.

VERDE: Alto Voltaje desconectado y puesta a tierra.

j) Está prohibida la permanencia dentro de la "Jaula de Faraday" cuando está conectado el alto voltaje.

k) Por principio se debe primero poner a tierra la instalación y luego cortocircuitar los elementos (líneas, condensadores, etc.) antes de mover los equipos, y el proceso inverso antes de hacer funcionar la instalación.

l) Para entrar en la instalación, debe haberse cumplido que los transformadores y condensadores de alto voltaje, hayan sido puestos a tierra y cortocircuitados respectivamente.

- m) La puesta a tierra debe ser hecha solamente después de haber desconectado la fuente de alimentación.

- n) Si varias personas participan en un mismo experimento, solamente una de ellas puede hacer la maniobra de conexión y desconexión. Antes de conectar, es conveniente prevenir a los demás para que así estén dispuestos a realizar las lecturas de los instrumentos y las observaciones respectivas. De igual manera la desconexión debe ser avisada.

- ñ) Antes de iniciar el trabajo, se debe revisar el circuito, especialmente las resistencias de protección y los divisores de voltaje, así como la conexión correcta de los instrumentos de medida.

- o) Para los experimentos con aceite y otros materiales inflamables, se debe tomar especiales medidas de seguridad. Todos los participantes deben conocer el manejo de extintores de gas carbónico.

- p) Mientras la prueba está bajo voltaje, no

debe alejarse la persona que hace el experimento. La única excepción se da en pruebas de duración, una vez tomadas las precauciones necesarias.

q) Todo aquel que trabaja en el laboratorio está obligado a tener en orden las máquinas, instrumentos de medida y equipos, y a comunicar inmediatamente cualquier falla o desperfecto que en ellos encuentre.

r) Las personas que participan en una prueba con alto voltaje, deben conocer normas básicas de primeros auxilios para accidentes eléctricos.

En la Memoria Técnica y Descriptiva de las instalaciones Eléctricas, Telefónicas y Sistemas Especiales de las áreas urbanísticas del núcleo de Ingeniería del Campus Politécnico, se indica que se ha previsto instalar un equipo contra incendios que comprende un sistema especial de alarmas contra fuego (cajetines manuales de fuego y detectores de humo). Se indica que los sensores de humo del tipo que contiene una celda de humo, deberán ser sensibles a la luz,

de tal forma que al cambiar su resistencia envíe una señal al panel de control. Así mismo los cajetines de alarma para fuego manuales, deberán ser del tipo de halar hacia afuera, para montaje en la pared, de tal forma que una vez accionado pueda ser repuesto a su posición original solo por una persona autorizada.

El equipo contra incendios será utilizado únicamente cuando no haya tensión eléctrica en las áreas afectadas como protección del personal que lo usa.

1.5.2. En el Área externa.

En la Memoria Técnica y Descriptiva, antes mencionada, se indica que se ha previsto la instalación de un equipo especial de alarmas contra robos, que estará instalado en el Lab. de Alta Tensión. De igual manera se tendrá un control de acceso a los parqueaderos. Con todo esto se obtendrá un control adecuado de todas las instalaciones inherentes al laboratorio y sobre los elementos dejados en bodega o en camiones esperando el turno para las pruebas.

2.4. MANTENIMIENTO.

Periódicamente se hará una comprobación de las mallas del sistema de apantallamiento, su continuidad, el aislamiento del ruido, los puntos de tierra, si existiese alguna filtración por el piso, de afuera hacia adentro, especialmente si se trata de aceite, en cuyo caso la reparación se la efectuará de inmediato y se comprobará la conductibilidad de la tierra como de las cañerías, etc., en todo caso el edificio será construido de tal modo que requiera un mantenimiento mínimo, y su estructura sea antisísmica.

2.7. ASPECTO ELECTRICO.

1.7.1. Acometida.

La acometida eléctrica hasta la cámara de transformación perteneciente al Lab. de Alta Tensión, se la realizará de acuerdo a lo que se indica en la Memoria Técnica y Descriptiva de las Instalaciones Eléctricas, Telefónicas y Sistemas Especiales de las Áreas urbanísticas del núcleo de Ingeniería del Campus Politécnico, las que señalan que desde los patios de maniobras se alimentarán las

diferentes subestaciones por medio de ductos subterráneos. El diagrama unifilar de la acometida eléctrica se detalla en la Fig. 1.1.

1.7.2. Disposición de los transformadores.

De acuerdo a lo que se indica en la Memoria Técnica, antes mencionada, los transformadores serán del tipo convencional, autorefrigerados, con regulación $\pm 2.5\%$, $\pm 5\%$. El voltaje seleccionado es de 7620 V/120-240V.

El banco de transformadores llevará su correspondiente protección en el lado de alta, por medio de un seccionador tripolar de acción simultánea en las tres fases con el fusible cuyo valor se indica en la Fig. 1.1. En el lado de baja tensión y en el panel general, estará un interruptor termomagnético de capacidad 125 A, 3 polos.

Desde la cámara de transformación, luego de pasar por las respectivas protecciones, partirán alimentadores para el local del Lab. de Alta Tensión, en donde habrán tableros de control.

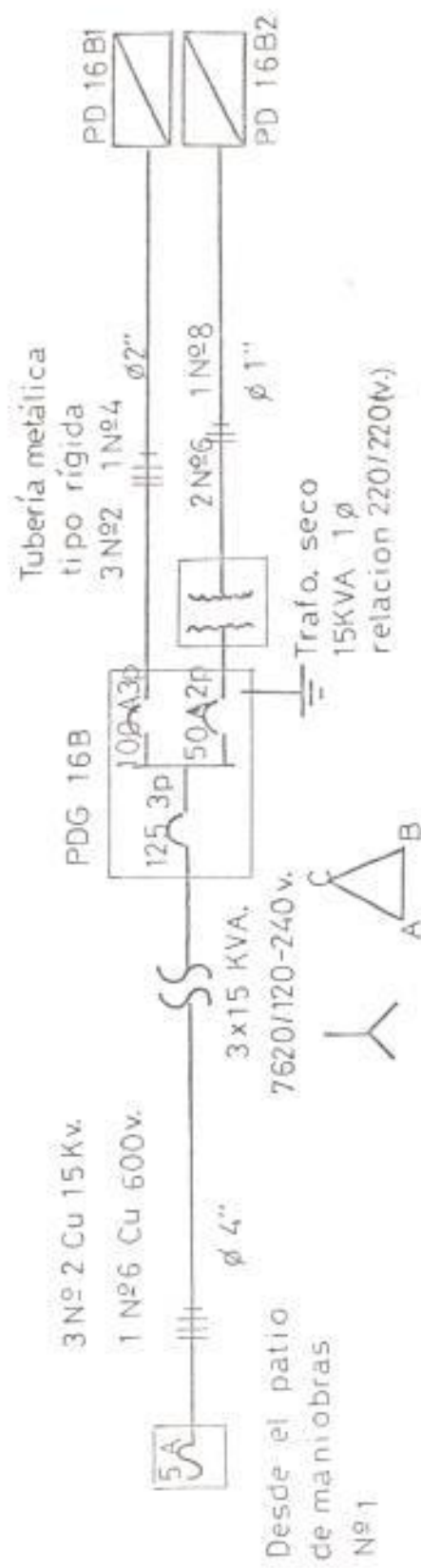


Fig. 1.1 Diagrama unifilar de la acometida eléctrica al Lab. de Alta Tensión.

Para alimentar al panel, donde se conectará el transformador de pruebas del laboratorio (ver Anexo A), se utilizará un transformador tipo seco de 220/220 V, y cuyos datos de placa se indican en la Fig. 1.1.

La construcción de la cámara se la realizará en forma paralela a la construcción del laboratorio a fin de poder utilizar la energía en las diversas comprobaciones iniciales.

1.7.3. Distribución Interna de Cables.

La distribución de los cables se la realizará de acuerdo a su función. Los de acometida, de acuerdo a lo que se indicó anteriormente, correrán por medio de ductos metálicos tipo rígido. Los cables que servirán para el alumbrado y tomacorrientes de uso general, irán protegidos por tubería metálica tipo EMT, empotrada en las paredes piso y losa.

Los cables de control y fuerza que conectan la mesa de control y los diversos equipos que se encuentran en el interior de la "Jaula de Faraday", correrán por medio de una canaleta cuyas características se indican en el

capítulo VI.

2.9. ELEMENTOS Y EQUIPOS QUE CONFORMAN UN LABORATORIO DE ALTA TENSION.

Los elementos y equipos instalados en un Lab. de Alta Tensión, se usan fundamentalmente para la generación y medida de: a) Altos Voltajes Alternos; b) Altos Voltajes Continuos; c) Altos Voltajes de Impulso; d) Corrientes de Impulso de gran amplitud.

a) Altos Voltajes Alternos.

Son requeridos en el laboratorio, para experimentos y pruebas a.c., así como para los circuitos de generación de Altos Voltajes Continuos y de Impulso.

Para la generación de Altos Voltajes Alternos, generalmente se usan transformadores de prueba, de potencia nominal considerablemente baja y una relación de transformación frecuentemente muy grande, que un transformador de potencia común. La corriente en el primario es generalmente suministrada por un transformador regulable alimentado desde la fuente principal ó, en casos especiales, por generadores síncronos. Por razones

técnicas (gran flexibilidad de operación) y económicas, se emplean dos o más transformadores de alto voltaje conectados en cascada. Mediante esta conexión en cascada, se logran generar voltajes alternos arriba de los 2 MV.

Altos Voltajes Alternos, también pueden ser generados a través de un transformador Tesla, cuyo funcionamiento esta basado en las características de los circuitos resonantes. El circuito resonante serie formado por la inductancia de corto circuito del transformador, aumentada a través de un inductor separado de alto voltaje, y la capacitancia del objeto de prueba, puede ser excitado por un transformador de voltaje secundario relativamente bajo.

La medición de Altos Voltajes Alternos se realiza a través de diferentes métodos: a) Por medio de un espinterómetro de esferas; b) usando capacitores de medida con un divisor de voltaje capacitivo y con un instrumento para medida de voltaje de cresta ubicado en la mesa de control y regulación; c) por medio de voltímetros Electrostáticos; d) con transformadores de voltaje.

Un diagrama básico de un sistema de pruebas a

frecuencia industrial, se indican en la Fig. 1.2.

b) Altos Voltajes Continuos.

Son generados, más comunmente, a través de la rectificación de altos voltajes alternos y luego usando multiplicadores de voltaje.

Generadores electrostáticos como el de Van de Graaf, están también siendo usados para generar altos voltajes continuos.

Para la rectificación del voltaje alterno, se usan rectificadores de alto vacío, o diodos semiconductores conectados en serie. La señal rectificada es conectada a un filtro RC con la finalidad de obtener un voltaje continuo más "liso" que el de la señal de voltaje continuo obtenida directamente de los circuitos rectificadores.

Una vez que se ha obtenido la señal de voltaje continuo, con un bajo factor de rizado, y mediante la utilización de un circuito multiplicador, se generan voltajes continuos sumamente elevados. El más importante de los circuitos multiplicadores es el circuito en cascada Greinacher, con el cual se

Componentes de la Fig. 1.2.

- 1) Transformador de regulación.
- 2) Reactor de compensación.
- 3) Transformador de pruebas con arrollamiento en cascada (unidad de tierra de la cascada).
- 4) Transformador de pruebas en base aislante (unidad de línea de la cascada).
- 5) Objeto de pruebas.
- 6) Medición del voltaje de pico (medición de valores r.m.s.).
- 7) Espinterómetro de esferas con resistor de amortiguamiento y relé de sobrecorriente, en el cable de tierra.
- 8) Mesa de control y regulación.

alcanzan altos voltajes continuos de hasta 5 MV.

La medición de altos voltajes continuos, se realiza a través de diferentes métodos: a) con el uso de resistencias de alto voltaje; b) por medio de voltímetros electrostáticos; c) voltímetro y medidor de intensidad de campo eléctrico; d) usando el espinterómetro de esferas; e) con medidor de voltaje de rizado.

c) Voltajes de Impulso.

Son generalmente generados por la descarga de capacitores de alto voltaje a través de un espacio de conmutación sobre una red de resistores y capacitores, por lo cual los circuitos multiplicadores son usados frecuentemente.

El generador de impulso está construido con la idea de que cada etapa sea un generador de impulsos completo; esto permite una gran flexibilidad de operación si se necesitare expansión futura.

El valor pico de voltajes de impulso puede determinarse con la ayuda de un voltímetro especial por medio de un divisor de voltaje. El

dispositivo más importante para la medida de voltajes de impulso es, sin embargo, el osciloscopio de rayos catódicos de alta velocidad, que permite obtener la característica completa de voltaje-tiempo a ser determinada por medio de un divisor de voltaje. Ya que se trata de un fenómeno rápido y que se produce una sola vez, deben estar sincronizados el generador de impulsos y el osciloscopio; éste trabajo se realiza a través de un dispositivo de disparo electrónico o Trigger, el cual debe tener dos canales: uno para el disparo del osciloscopio y otro para el disparo del generador de impulsos. Cuando se necesita obtener una onda de choque cortada, será necesario un tercer canal en el disparador. Ocasionalmente un convertidor analógico-digital puede ser usado en vez de un osciloscopio. En la Fig. 1.3 se indica un circuito generador de voltajes de impulso, y en la Fig. 1.4 un diagrama de bloques para un sistema de pruebas de voltaje de impulso.

⇒ Corrientes de Impulso.

Corrientes Transientes de gran amplitud que varían rápidamente, aparecen, por regla general, en conexiones con alto voltaje, es decir por medio de la descarga de la energía almacenada en

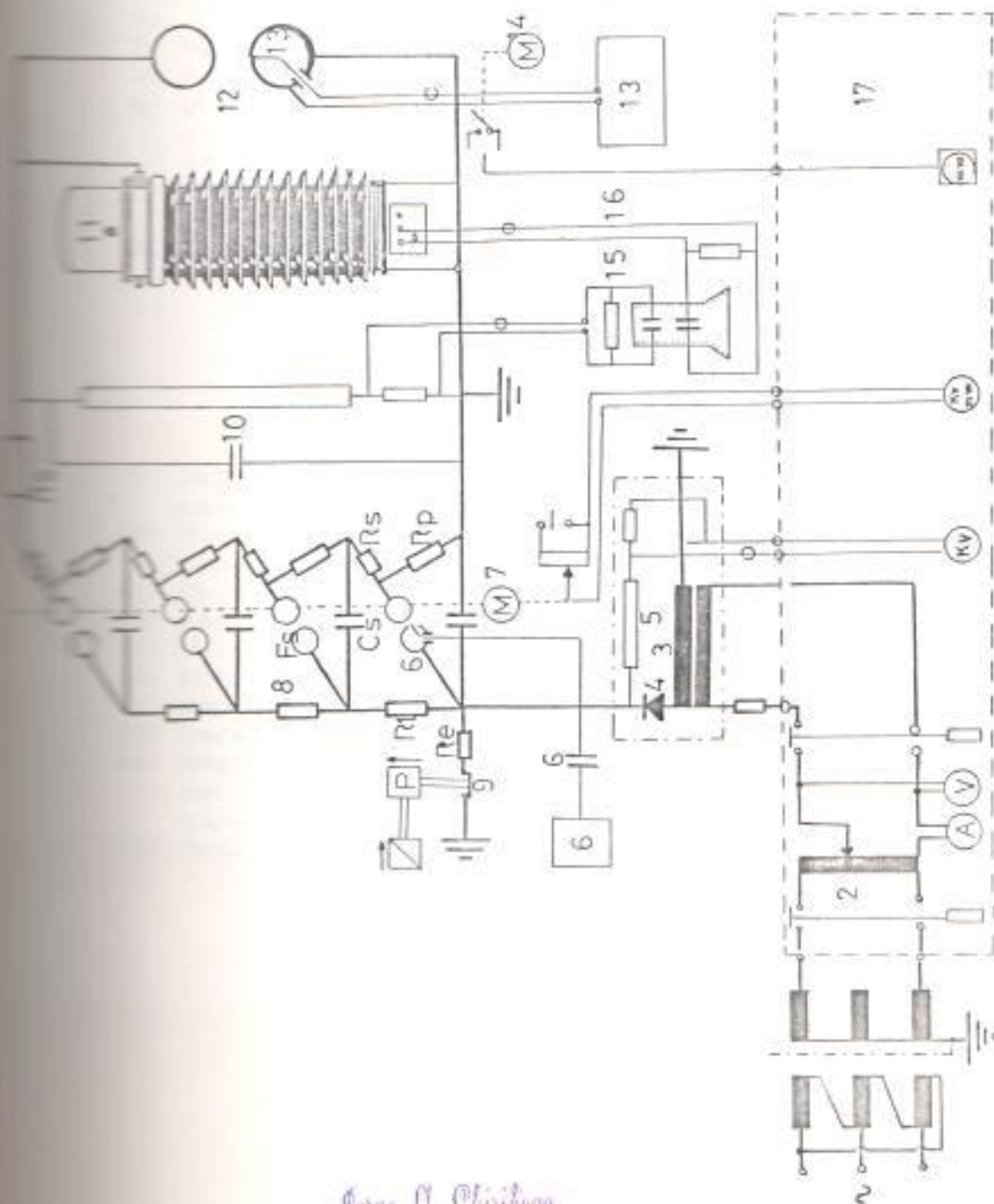
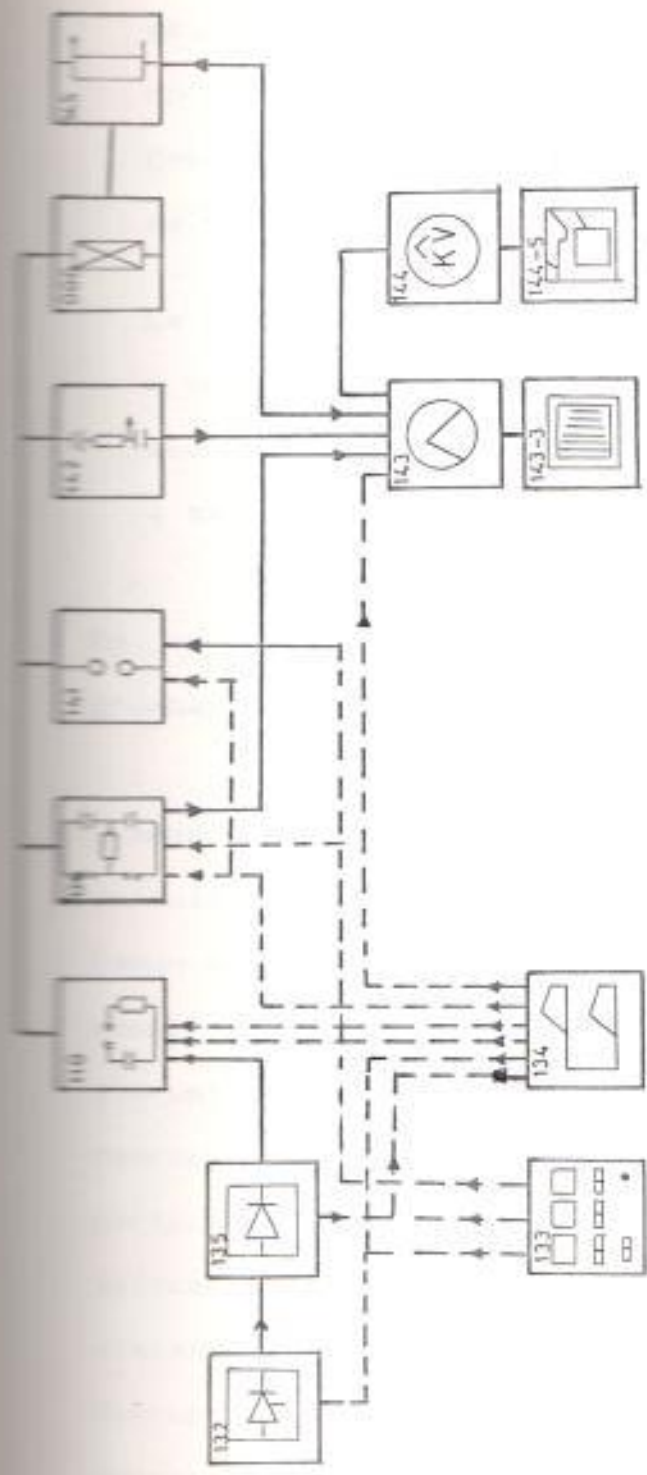


Fig. 1.3 Equipo generador de Voltaje de Impulso.

Componentes de la Fig. 1.3.

Equipo generador de voltajes de impulso.

- 1) Transformador de aislamiento.
- 2) Unidad reguladora de voltaje.
- 3) Transformador para el rectificador.
- 4) Rectificador en estado sólido.
- 5) Resistencia de medida para el voltaje de carga.
- 6) Unidad de disparo, capacitancia de acoplamiento y espinterómetros de disparo electrónico del generador de impulsos.
- 7) Motor para el control de acoplamiento del espaciador de los explosores de ignición.
- 8) Generador de Impulsos:
 - R1 = Resistencias de carga.
 - Re = Resistor descargador.
 - Rs = Resistor frontal.
 - Rp = Resistencia de cola.
 - Cs = Capacitancias de impulsos.
 - Fs = Esferas de acoplamiento (explosores) con distancia ajustable.
- 9) Dispositivo de puesta a tierra con malla de cierre en caso de interrupción de voltaje.
- 10) Divisor de voltaje resistivo, blindado capacitivamente.
- 11) Objeto de pruebas.
- 12) Espinterómetro de medida.
- 13) Unidad de disparo y electrodo de truncamiento.
- 14) Motor para el ajuste del espaciamiento del espinterómetro esférico.
- 15) Osciloscopio de rayos catódicos.
- 16) Registro de la onda oscilante en el secundario del transformador de voltaje (11) cargado capacitivamente.
- 17) Mesa de control.



- 110 Generador de voltaje de Impulso.
- 136 Explosores de ignición.
- 141 Espinterómetro esférico.
- 142 Divisor de voltaje.
- 145 Puente.
- 000 Objeto de pruebas
- 132 Unidad de tiristores.

- 135 Rectificador.
- 143 Osciloscopio para los impulsos.
- 144 Voltímetro de pico.
- 133 Dispositivo de control y medida.
- 134 Dispositivo para el disparo.
- 143-3 Dispositivo para el fotografiado.
- 144-5 Dispositivo digital registrador.

Fig. 1.4 Diagrama de bloques para un sistema de pruebas de voltajes de Impulso.

dispositivos tales como capacitores, inductores, máquinas rotativas, baterías, etc. Estas corrientes de impulso, son frecuentemente desarrolladas como una consecuencia del mecanismo de descarga de la falla.

La medida de corrientes de impulso, se la realiza a través de resistores de medida, o con arreglos que aprovechan el efecto inductivo de la corriente a ser medida.

En un Lab. de Alta Tensión se realizan, también, pruebas no destructivas de alto voltaje.

Quando un sistema de aislamiento es investigado, el voltaje disruptivo define el límite superior del rango de voltaje. Sin embargo, no es posible sacar conclusiones acerca de la causa de la descarga disruptiva a partir de un conocimiento del voltaje de descarga disruptiva y la huella de esta, porque, particularmente en materiales sólidos y por la aplicación de una fuente de alto voltaje poderosa, el aislamiento es destruido en la región de descarga disruptiva. Pruebas dieléctricas que evitan una descarga de este tipo, son de importante ayuda en el ensayo de material aislante y sistemas de aislamiento.

Los Lab. de Alta Tensión, cuentan con instalaciones para realizar pruebas bajo lluvia artificial.

Todo Lab. de Alta Tensión se encuentra blindado por una malla metálica de protección, conectada a tierra. Se cuenta, además, con una cabina de control, que en los laboratorios grandes también se encuentra blindada y está construida de un vidrio especial, lo que permite al personal de operación una buena seguridad y buena visibilidad de conjunto de toda el área de pruebas. En esta cabina se encuentran ubicadas las mesas de control, medida y regulación de los instrumentos eléctricos y equipo del Lab. de Alta Tensión principal.

2.2. EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESPOL.

El desarrollo industrial y económico del Ecuador demanda el uso de más y más energía eléctrica, la que tiene que ser transportada a través de largas distancias en cantidades grandes. La transportación de grandes cantidades de potencia necesita de líneas de transmisión de alto voltaje.

El desarrollo del sistema de potencia debe ser seguido por estudios del sistema en cuanto al equipo y condiciones de servicio, las que tienen que ser

cumplidas. Estas condiciones determinan los valores de voltajes de prueba a.c. a frecuencia industrial, de impulso y d.c., bajo condiciones específicas.

En el Ecuador, el presente voltaje de transmisión alcanza un nivel de 230 KV.; voltaje este adaptado para su distancia de transmisión. Es propósito del Instituto Ecuatoriano de Electrificación - INECEL - el de tener un anillo de transmisión a 230 KV. En décadas posteriores se tendrá una línea de transmisión de 345 KV.

En nuestro país, según estudios realizados por el INECEL, los niveles de voltaje que se encuentran en servicio son :

- Distribución Rural: 13.8 KV.
- Subtransmisión: 34.5; 46; 69 (KV.)

Debido a que con la creciente extensión e interconexión de los Sistemas Eléctricos de Potencia, equipo costoso se encuentra más expuesto a sobrevoltajes transitorios de origen atmosférico y de maniobra, especialmente en altos voltajes de transmisión y subtransmisión.

INECEL, el Instituto Ecuatoriano de Normalización - INEN-, como las Empresas Eléctricas e Industriales

necesitan cada vez más de servicios para ensayos en alto voltaje de productos y equipos utilizados en la Industria Eléctrica, a fin de comprobar características que señalan las normas internacionales tales como la IEC, BS, VDE, IEEE, NEMA, AIEE, ASA (1), o las autorizadas por el INEN, y con el afán de controlar bloques u órdenes de producción para garantizar y exigir el empleo de las normas, por los fabricantes en dichos productos.

Laboratorios de Alto Voltaje son un requerimiento esencial para realizar los ensayos en alto voltaje de los equipos y productos utilizados en la Industria Eléctrica, así como para efectuar trabajos de investigación sobre el equipo, con la finalidad de determinar su confiabilidad de operación bajo diferentes condiciones atmosféricas tales como

(1) IEC Comisión Electrotécnica Internacional, Suiza; BS Normas Británicas, Inglaterra; VDE Asociación de electrotécnicos Alemanes; IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, USA; NEMA Asociación Nacional de Fabricantes de Equipo Eléctrico, USA; AIEE Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos, USA; ASA Asociación Americana de Normalización, USA.

lluvia, neblina, contaminación industrial, temperatura, etc. En los Lab. de Alta Tensión se tienen facilidades para el estudio de propiedades dieléctricas de materiales de aislación.

Las dimensiones y el equipo de un Lab. de Alta Tensión, están determinados principalmente por la magnitud del voltaje a ser generado. Una segunda característica importante es la aplicación que vaya a tener el laboratorio, como por ejemplo para propósitos de enseñanza, prueba o investigación.

Usualmente, los Lab. de Alta Tensión involucran costos elevados. De modo general, un cierto aumento del voltaje máximo de trabajo, implica un incremento en una proporción mucho mayor de los espacios libres exigidos, como también en el peso y capacidad de los equipos, de tal forma que la combinación de estos factores hace que el costo de la instalación crezca en una proporción acentuadamente mayor que el aumento del nivel de voltaje.

Considerando : 1) que el Lab. de Alta Tensión, de la ESPEL, tendrá un aspecto didáctico y comercial; 2) que el desarrollo de la Industria Eléctrica en el Ecuador se lo realizará a niveles de voltaje de Subtransmisión, y 3) que, fundamentalmente, no se

disponen de recursos económicos suficientes; el Lab. de Alta Tensión de la ESPOL contará con instalaciones para realizar pruebas a equipos de hasta 69 KV. de voltaje nominal.

Con la finalidad de tener una idea clara de los equipos que se deberán adquirir para instalar el Lab. de Alta Tensión de la ESPOL, se presentan en el Anexo A, los datos técnicos y aplicación de cada uno de los equipos que produce la MWB MESSWANDLER BAU AG, BAMBERG - ALEMANIA. Este equipo es construido con la finalidad de ser utilizado en pruebas con fines tanto pedagógicos como comerciales a equipo eléctrico de hasta 72.5 KV. de voltaje nominal, valor este aproximado al requerido de 69 KV. de voltaje nominal.

Adicionalmente, con el propósito de tener parámetros suficientes a ser utilizados en el desarrollo de la presente Tesis, se ha adoptado tener como buena referencia al equipo indicado en el Anexo A.

De lo dicho, el Lab. de Alta Tensión tendrá los siguientes valores nominales:

a) Voltaje Alternó: 140 KV. con respecto a tierra.

Potencia nominal del

transformador de pruebas: 5
KVA.

b) Voltaje Continuo:

	Voltaje en vacío	Corriente Continua Nominal
	-----	-----
Una Etapa	140 KV.	13 mA.
Dos Etapas	280 KV.	10 mA.

c) Voltaje de Impulso:

	Voltaje de carga resultante (KV)	Energía de Salida (J)
	-----	-----
Una Etapa	140	490
Dos Etapas	280	980
Tres Etapas	420	1470

En este laboratorio se podrán realizar pruebas en equipo de hasta máximo voltaje nominal de 72.5 KV. r.m.s. de acuerdo a la coordinación de aislamiento que se indica en la Tabla I.

CLASES DE PRUEBAS A REALIZARSE EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESPOL.

En las instalaciones del Lab. de Alta Tensión de la

TABLA I

VALORES NORMALIZADOS DE NIVELES DE AISLAMIENTO
PARA MÁXIMO VOLTAJE DEL EQUIPO.

Voltaje máximo para el equipo KV r.m.s.	Voltaje de pruebas de Impulso para determinar la capacidad de resistir sobrevoltajes con onda completa standard de polaridad positiva y negativa. KV Pico.	Pruebas de voltaje no disruptivo a frecuencia industrial bajo condiciones normales. KV r.m.s.
22	45	15
33	60	19
66	75	26
110	95	34
150	150	50
200	200	70
250	250	95
350	350	140
450	450	185
550	550	230
650	650	275
1050	1050	460

ESPOL, las siguientes pruebas e investigaciones podrán ser realizadas:

- Generación de Altos Voltajes AC, DC, y de Impulso.
- Medida de Altos Voltajes AC, DC, y de Impulso, con métodos diferentes.
- Determinación experimental de Campos Eléctricos.
- Estudio de distribución de voltaje en cadenas de aisladores y condensadores.
- Medida de la resistencia de tierra.
- Pruebas no disruptivas a frecuencia industrial, en lluvia o en seco.
- Pruebas de Impulso.
- Pruebas no disruptivas a voltaje DC.
- Pruebas de ondas debido a conmutación y descargas atmosféricas.
- Pruebas bajo condiciones de atmósfera contaminada.
- Estudio de propiedades dieléctricas de materiales de aislación.
- Control de producción y pruebas finales con voltajes AC, DC, y de Impulso, en la producción de aparatos eléctricos tales como : bushings, dispositivos de distribución, celdas de maniobras, transformadores de instrumentación, fusibles, cables, transformadores de potencia, pararrayos, diferentes tipos de aisladores, capacitores, etc.
- Investigación del fenómeno de descarga disruptiva.

- en diferentes medios de aislamiento tales como gases, líquidos, sólidos y sistemas compuestos.
- Investigación sobre interferencia eléctrica debido a descargas en los equipos que están operando a altos voltajes.
 - Investigación de fenómenos de altas corrientes tales como arcos eléctricos.
 - Investigación sobre características físicas y de aplicación práctica del efecto "corona".
 - Investigación sobre coordinación de aislamiento en sistemas de potencia de alto voltaje.
 - Investigación sobre determinación de niveles isoceraúnicos.
 - Investigación de ondas viajeras sobre líneas de transmisión y en transformadores, etc.

2.11. CONDICIONES FISICAS Y ELECTRICAS.

2.11.1. Condiciones y Restricciones Fisicas.

Los Lab. de Alta Tensión pueden ser: a) tipo interior, b) tipo al aire libre. El tipo interior tiene la ventaja de brindar protección al equipo de prueba contra condiciones atmosféricas variables, simplicidad en el diseño y control del equipo de prueba, y provisión de facilidades

de observación durante la prueba.

Los laboratorios al aire libre tienen la ventaja de ser de menor costo debido a la ausencia del costo del edificio. Pero el área de pruebas al aire libre tiene limitaciones tales como: a) ausencia de facilidades de levantamientos y soportes, b) condiciones climáticas incontrolables, las que pueden restringir o impedir las pruebas, c) reproducción de resultados no garantizados debido a las condiciones atmosféricas incontrolables, y d) dificultad de realizar estudios de prueba artificial y humedad, debido a la variación del viento, temperatura, etc.

Cuando los Lab. de Alta Tensión son planificados como laboratorios internos, las siguientes condiciones fijan las dimensiones de los mismos: a) tamaño del equipo de prueba para el generador de impulsos, debido a que dicho equipo debe tener una determinada altura, y b) distancias o espacios libres entre el objeto de prueba y tierra durante condiciones de prueba y también entre los terminales de alto voltaje.

y tierra o alrededores aterrizados tales como paredes, techo y otros equipos de prueba no energizados. Aparte de esto, las pruebas a realizarse en el laboratorio, serán del voltaje máximo en equipos para probarlos o materiales que sirvan para comprobación.

Como debe esperarse, uno de los objetivos del laboratorio es proporcionar facilidades a las instituciones y fábricas del país, para realizar toda clase de comprobaciones a fin de que los equipos a usarse o venderse, cumplan con las normas especificadas, por el respectivo instituto, por lo que se espera que en el salón de pruebas vayan toda clase de equipos en tamaño y peso; por lo tanto, se deberá prever el espacio suficiente para albergar tales equipos, debiendo la entrada ser suficientemente amplia para facilitar el acceso de los mismos, de igual modo, se debe prever facilidades para levantar y movilizar estos equipos, debiéndose tomar en cuenta la construcción de amplios corredores por los que se llevarán los materiales a otros sitios del edificio del laboratorio.

La amplitud del salón principal de pruebas debe permitir la libre movilidad de equipos y personal.

Se debe prever espacio suficiente para acomodar en orden a los estudiantes de tal manera que todos puedan observar con seguridad y claridad los experimentos que se desarrollan.

Principal atención se observará en la construcción en que deberá ser exenta la humedad, principalmente en el salón de pruebas de Alta Tensión y en las áreas en que se efectúen cualquier clase de pruebas y especialmente en los lugares transitados por personal y estudiantes. Este particular será puesto de relieve, cuando se traten los aspectos relacionados a puesta a tierra del edificio y equipos.

Las pruebas a realizarse requieren un cierto nivel de iluminación, de manera que su observación sea cabal y no se requieran de repeticiones innecesarias, este particular se tendrá en cuenta, especialmente en el área de las mesas de control y prueba. La

iluminación del salón de pruebas de Alta Tensión será de tal forma que se la pueda controlar, esto es, tanto las lámparas o reflectores, como la luz proveniente de ventanas, serán controladas mediante interruptores selectivos y manualmente, respectivamente, a fin de que en determinado momento se tenga una obscuridad completa.

De igual manera, por la naturaleza de las pruebas a efectuarse, no deberán existir grandes ventanales, no solamente para obviar dificultades en el control de la entrada de luz, sino por aspectos eléctricos, que se los analizará con más detalle en otro capítulo.

El piso del laboratorio principal de pruebas, debe estar en capacidad de resistir la carga impuesta por el equipo y objeto de prueba.

En el área de prueba se evitará toda clase de desagües directos, es decir, como se realizarán pruebas bajo lluvia artificial, el agua utilizada, se la recogerá en un recipiente, del mismo que se la extraerá

mediante bombas, una vez que no hayan experimentos, hacia el desagüe principal.

La construcción debe ser hecha de tal forma que se asegure que el laboratorio esté libre de polvo y corrientes de aire fuertes.

Estas consideraciones debe tomar en cuenta el Arquitecto y el Ingeniero constructor, pero antes de todo, es el Ingeniero Eléctrico el que supervigilará que estos detalles se los cumpla en la construcción.

1.11.2. Condiciones y Restricciones Eléctricas.

Las condiciones y restricciones eléctricas del laboratorio, están relacionadas con las vistas anteriormente, pues la estructura arquitectónica y la obra civil se deben realizar de acuerdo a las necesidades eléctricas que dan la tónica para la construcción.

Todo Lab. de Alta Tensión se encuentra blindado o cerrado por una malla metálica de protección, en la forma de una Jaula de Faraday.

La Jaula de Faraday cumple varios cometidos los mismos que son examinados con más detalle en los capítulos II y III y en los que se determinan la clase de alambre o elemento usado, la clase de unión que se efectúa entre los varios tramos, si el alambre debe ser únicamente de hierro o debe ser de alguna aleación, etc.; estos puntos son aclarados luego, pero a lo que tenemos que referirnos es a la continuidad que debe tener esta, en toda el área de pruebas de Alta Tensión; pudiendo el resto del edificio permanecer con su estructura normal.

La particularidad que se debe anotar es que tanto la puerta como ventanas (si la jaula va empotrada en la pared), deben tener la continuidad eléctrica y óhmica, a fin de cumplir con el requisito de la Jaula de Faraday, por tanto se debe observar la clase de materiales empleados que cumplan con esta finalidad; además y debido a las características especiales de la puerta, esta debe llevar un sistema de seguridad para evitar que ninguna persona ingrese al área de pruebas cuando está energizado el equipo de Alta Tensión.

Es conveniente y esencial para un laboratorio de pruebas de Alto Voltaje, el que todos los componentes del circuito de Alta Tensión, estén conectados a tierra. De igual manera las partes de la instalación que no pertenecen al circuito de Alto Voltaje, tales como la Jaula de Faraday, conductores a tierra, mesas de control y prueba, deben estar conectados a tierra.

Por lo tanto, es necesaria la instalación de un sistema de puesta a tierra, el mismo que se ubicará debajo del laboratorio, y cuyos detalles constructivos tales como: dimensiones, profundidad, materiales, etc, se determinan en los capítulos V y VI.

Para la acometida de Alta Tensión, la cámara de transformación y la distribución de cables, se debe tomar en cuenta lo que se manifestó anteriormente cuando se trató estos aspectos.

La mesa de control, para los diferentes experimentos, es proporcionada por la firma comercial especializada, pero quien dirige la construcción y en especial el Ingeniero

Eléctrico, debe poner especial cuidado para que la instalación sea la que llene los requisitos previstos tanto para los cables de salida y llegada, como tierra de la misma.

En lo que respecta a los cables que deben partir desde los tableros de control a los diferentes sitios donde están localizados los elementos de prueba, deben terminar en puntos de fácil acceso y libre de obstáculos con el fin de que los cables de conexión cumplan su finalidad. En tomas de tierra se tendrá igual precaución.

CAPITULO II

CRITERIOS SOBRE LA JAULA DE FARADAY

2.1. DEFINICION DE BLINDAJE.

Blindaje Electromagnético se define como el alojamiento metálico colocado alrededor de un circuito o componente para suprimir un campo eléctrico o magnético dentro de la región circundada.

El blindaje electrostático se basa en el hecho de que un exceso de carga colocada en un conductor aislado, se aloja completamente sobre una superficie externa. En condiciones de equilibrio electrostático, el campo eléctrico en todos los puntos internos del conductor es cero (ver sección 2.6); por lo tanto para blindar un recinto cerrado contra un campo electrostático, basta que el material del blindaje sea un buen conductor.

El blindaje magnético se lo define como el recinto constituido por material de alta permeabilidad magnética, utilizado para proteger instrumentos y conjuntos electrónicos de los efectos de dispersión de campos magnéticos.

III. IMPORTANCIA DEL BLINDAJE ELECTROMAGNETICO.

Las Clínicas y Hospitales modernos de todo el mundo están equipando sus quirófanos y salas de terapia intensiva con una gran diversidad de instrumentación electrónica que representa una ayuda invaluable en el momento de una operación quirúrgica, en la vigilancia de pacientes en estado crítico e incluso en el diagnóstico clínico. Se trata de instalaciones que comprenden desde un cierto grupo de instrumentos individuales: electrocardiógrafos, defibriladores, marcapasos, encefalógrafos, contadores de centelleo, etc., hasta la formación de verdaderos sistemas electrónicos con una computadora central capaz de seleccionar casi instantáneamente los datos más significativos de la información que recibe de un grupo de pacientes, controlando un sistema de alarmas, archivando los datos importantes e incluso proporcionando al personal médico informes y orientaciones concretas sobre el diagnóstico clínico.

Independientemente de la mayor o menor complejidad de estos sistemas, la instrumentación que se maneja consta de aparatos de gran precisión que, ya sea directamente o por medio de transductores, captan señales vitales del organismo humano y después de amplificarlas, las registran en dispositivos gráficos

o las presentan en pantallas luminosas.

Es fácil comprender que por el tipo de señales tan débiles que en la mayoría de los casos es necesario procesar, este tipo de instalaciones está sujeta a problemas graves de ruidos e interferencias electromagnéticas que pueden enmascarar las señales fundamentales, impidiendo el uso eficaz de los instrumentos, y en algunos casos, poniendo en grave peligro la vida de los pacientes.

Las interferencias más comunes provienen de una gran cantidad de emisores: motores de ascensores y frigoríficos del mismo hospital, líneas de tranvías, trolebuses, emisores de radio, agitadores y otros equipos de laboratorio...etc., etc. Aparte de las perturbaciones que pueden originarse dentro del mismo quirófano o sala de terapia intensiva al operar amaladores, vibradores, cambiadores de frecuencia, etc. o simplemente por malos contactos, electrodos sueltos o blindajes de instrumentos flotantes eléctricamente.

Todo este tipo de perturbaciones electromagnéticas, que pueden considerarse comprendidas en un campo de frecuencias que abarca desde las décimas de KHz. a los pocos MHz., penetra a las salas a través de los

techos, pisos y paredes, y a través de cables de energía eléctrica y todo tipo de tuberías o ductos que no han sido bloqueados o aterrizados adecuadamente y que actúan como antenas en el exterior de la sala y como emisores en el interior de la misma.

Por consiguiente, resulta imprescindible que cualquier proyecto de instalación de equipo médico tal como el mencionado, vaya acompañado de un proyecto de blindaje electromagnético de la sala, o conjunto de salas interconectadas entre sí, donde van a instalarse los instrumentos o los sistemas completos.

El blindaje electromagnético es importante, también, en lugares donde se instalan equipos sofisticados de gran precisión destinados a captar señales y realizar pruebas de mucha validez en los procesos de investigación, control de calidad, comunicaciones, etc., que deben estar exentas de perturbaciones electromagnéticas.

III. EFECTOS BIOLÓGICOS DE CAMPOS ELÉCTRICOS.

Estudios realizados en la URSS, han reportado algunos efectos indeseables sobre los trabajadores que

laboran en medio ambientes complejos encontrados en los patios de maniobra de alto voltaje.

Los trabajos de investigación soviéticos, han concluido que los efectos adversos del ambiente de los patios de maniobra son causados por la presencia de campos eléctricos de 50 Hz. de alta intensidad.

En un patio de maniobras de alto voltaje, grandes intensidades de campo eléctrico o magnético son posibles debido a la cercanía de barras colectoras aéreas y equipo relacionado.

Los reportes soviéticos y, más aún, recientes estudios españoles, han reportado una serie de dolencias, de los trabajadores, tales como excitabilidad, dolores de cabeza, ahogo, fatiga y náusea. Estas fueron atribuidas a la presencia de campos eléctricos de alta intensidad dentro del patio de maniobras.

Estudios médicos y fisiológicos complejos han sido realizados para clarificar la acción de campos eléctricos sobre el personal que trabaja en patios de maniobra de 220, 230 y 500 KV. Una serie de exámenes médicos han sido ejecutados, concluyéndose que el campo eléctrico causa una influencia desfavorable

sobre el organismo humano, ocasionando perturbaciones en el sistema nervioso central.

2.4. CONCEPTOS BASICOS DEL BLINDAJE ELECTROMAGNETICO.

Cuando se trata de blindar un recinto cerrado contra un campo electrostático externo, la Jaula de Faraday representa un blindaje perfecto. Basta con que el material de construcción de la "jaula" sea un buen conductor eléctrico. Al cumplirse este requisito, la "jaula" se convierte en una superficie equipotencial y puede demostrarse tanto teórica (ver sección 2.6) como experimentalmente que el campo eléctrico en el interior de la misma es nulo.

En presencia de un campo electromagnético la situación se complica ya que bajo ciertas circunstancias las ondas electromagnéticas pueden penetrar fácilmente en los recintos donde no penetraba el campo electrostático.

Cuando una onda electromagnética se propaga a través de un material de buena conductividad eléctrica, las corrientes eléctricas inducidas en dicho material transforman la energía electromagnética de la onda en energía calorífica y por consiguiente, la intensidad del campo electromagnético puede presentar una

atenuación considerable conforme la onda va penetrando en el material. Puede demostrarse que en el caso de una onda plana que penetra en un buen conductor, la intensidad de campo decrece, debido a estas pérdidas que llamaremos de absorción, según la ley exponencial siguiente:

$$e^{-\sqrt{f\mu\sigma}x} \quad (2.4.1)$$

donde la variable x representa el espacio recorrido por la onda electromagnética dentro del material conductor, f es la frecuencia de la onda, μ la permeabilidad magnética del material y σ su conductividad eléctrica.

De esta expresión se deduce que una alta permeabilidad del material conductor también influye favorablemente para alcanzar una mayor atenuación, resultado que es fácil de prever si se tiene en cuenta que cuando más alta sea la permeabilidad magnética, más intensas serán las corrientes inducidas en el material y mayores las pérdidas por absorción.

La frecuencia de la onda, presenta un efecto análogo aumentando las pérdidas por absorción y por

consiguiente, la atenuación del campo electromagnético, a medida que aumenta la frecuencia. Veamos pues que el blindaje electromagnético de un cierto recinto puede consistir básicamente en un recubrimiento total formado de material ferromagnético (buen conductor y alta permeabilidad magnética). Sin embargo, como veremos a continuación, este efecto de absorción no es el único que cuenta al proyectar el blindaje.

Para muy altas frecuencias, tales como las usadas en la tecnología de las microondas (frecuencias del orden de los GHz, correspondientes a longitudes de onda de unos pocos centímetros) el blindaje puede consistir en un recubrimiento con lámina metálica pulida a espejo en su superficie externa. De esta forma, puede conseguirse una atenuación excelente debido a los fenómenos de reflexión y absorción tan marcados en el campo de estas altas frecuencias.

Para las bajas frecuencias (longitudes de onda mucho mayores que las dimensiones de las salas que se pretende blindar) el efecto de reflexión es prácticamente nulo y el de absorción se va haciendo menos significativo cuando mayores son las longitudes de onda para las que se proyecta el blindaje.

Sin embargo, se cuenta también con otro efecto que puede ser muy significativo incluso en el caso de estas frecuencias más bajas. Se trata de las corrientes que induce el campo magnético en la envoltura metálica que forma el blindaje y que circulan alrededor del recinto blindado. Estas corrientes inducen, a su vez, un campo magnético en oposición al campo que las origina (ley de Lenz), ocasionando un efecto de atenuación dentro del recinto blindado lo que se conoce como "efecto Faraday".

Este efecto Faraday permite que en algunos casos resulte práctico proyectar el blindaje a base de malla metálica en lugar de lámina, ya que las corrientes inducidas en este tipo de blindaje pueden envolver al recinto blindado circulando por los elementos que forman la malla, de forma análoga a como circulan las corrientes eléctricas por un solenoide. En casos en que no sea necesario lograr un alto nivel de atenuación, el blindaje con malla metálica puede representar un medio eficaz de obtener una atenuación aceptable a bajo costo.

Por último, debe contarse con la tendencia que presentan las corrientes de alta frecuencia a circular por la parte más superficial de los

conductores. Este efecto, llamado "efecto pelicular", influye negativamente sobre la atenuación lograda por el efecto forma, ya que al disminuir el espesor efectivo de la lámina metálica o el calibre de la eslia con que está construido el blindaje, se origina un debilitamiento de las corrientes inducidas por el campo magnético. Esto se traduce en un cierto deterioro de la atenuación. En realidad, este efecto pelicular es una consecuencia de las pérdidas por absorción antes mencionadas.

DEL CAMPO ELECTROMAGNETICO.

La fuerza ejercida sobre una carga en reposo es distinta cuando la carga está en movimiento. Decimos que en esta situación existe un campo magnético.

Si consideramos una carga de prueba, la fuerza ejercida en cada punto, colocando la carga en reposo, se denomina intensidad de campo eléctrico presente en ese punto. Si la carga (q) en el mismo punto, está animada de una cierta velocidad (v), la fuerza ejercida es distinta a la del campo eléctrico.

De lo expuesto se desprende que la fuerza que se ejerce sobre una carga en movimiento se compone de la fuerza estática o eléctrica y de la fuerza dinámica o

magnética. La ecuación total de la fuerza es pues:

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{Fuerza de Lorentz}). \quad (2.5.1)$$

El magnetismo y la electricidad no son cosas independientes y deben ser considerados siempre en conjunto como un campo electromagnético completo.

Las ecuaciones de Maxwell, que describen a este campo electromagnético, se resumen en la tabla II.

En la ecuación 2.5.1 y en las ecuaciones de la tabla

II,

\vec{E} = Intensidad de campo eléctrico (volt/m).

\vec{D} = Densidad de flujo eléctrico (coulomb/m²).

ϵ = Permitividad del medio. Para el vacío
 $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (Faradio/m).

ρ = Densidad de carga. (coulomb/m³).

\vec{B} = Densidad de flujo magnético o Inducción magnética (Newton/ampere-m).

\vec{H} = campo magnético o vector \vec{H} (ampere/m).

μ = Permeabilidad del medio. Para el vacío
 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m).

\vec{J} = Densidad de corriente. (Ampere/m²).

σ = Conductividad eléctrica en (siemens/m).

ω = Frecuencia angular = $2\pi f$.

TABLA 11

ECUACIONES DE MAXWELL EN FORMA DIFERENCIAL.

	DE LA LEY DE AMPERE	DE LA LEY DE FARADAY	DE LA LEY DE GAUSS	DE LA LEY DE GAUSS
	$\frac{\text{Corriente eléctrica}}{\text{Area}}$	$\frac{\text{Potencial eléctrico}}{\text{Area}}$	$\frac{\text{Flujo eléctrico}}{\text{Volumen}}$	$\frac{\text{Flujo magnético}}{\text{Volumen}}$
DIMENSIONES CASO GENERAL	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t$	$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$	$\nabla \cdot \vec{D} = \delta$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
ESPACIO LIBRE	$\nabla \times \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t$	$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$	$\nabla \cdot \vec{D} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
VARIACION ARMONICA	$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{H}$	$\nabla \cdot \vec{D} = \delta$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
ESTACIONARIO	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$	$\nabla \times \vec{E} = 0$	$\nabla \cdot \vec{D} = \delta$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
ESTATICO	$\nabla \times \vec{H} = 0$	$\nabla \times \vec{E} = 0$	$\nabla \cdot \vec{D} = \delta$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

f = Frecuencia (Hz).

La ley de Gauss para campos eléctricos siempre es válida tanto para campos dinámicos como para estáticos: El flujo de \vec{E} a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga que hay dentro.

La ley de Faraday, considera el efecto eléctrico de campos magnéticos variables.

La ley de Gauss para campos magnéticos, considera que como no hay cargas magnéticas, el flujo de \vec{B} a través de cualquier superficie cerrada es siempre cero.

La ley de Ampere con la generalización de Maxwell, considera el efecto magnético de corrientes estacionarias y de campos eléctricos variables.

DEMOSTRACION TEORICA QUE EL CAMPO ELECTRICO EN EL INTERIOR DE LA JAULA DE FARADAY ES NULO.

En la sección 2.5, habíamos definido la densidad de flujo eléctrico como:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{coulomb/m}^2) \quad (2.6.1)$$

El flujo de \vec{D} a través de una superficie (S) se llama Flujo Eléctrico y se denota con el símbolo \oint . Entonces:

$$\oint = \text{Flujo (de } \vec{D} \text{ a través de S)} = \vec{S} \cdot \vec{D} \quad (2.6.2)$$

El flujo eléctrico tiene las dimensiones de una carga: Coulomb.

$$\vec{D} = \oint / \vec{S} \quad (2.6.3)$$

Consideremos un elemento infinitesimal de superficie ds , como en la Fig. 2.1. La cantidad infinitesimal de flujo eléctrico $d\oint$ a través de este elemento de superficie es, por extensión de la fórmula 2.6.2:

$$d\oint = D \cos\alpha \, ds = \vec{D} \cdot \vec{n} \, ds \quad (\text{coulomb}) \quad (2.6.4)$$

donde:

- \oint = Densidad de flujo del elemento de superficie (coulomb/m²).
- α = Angulo entre \vec{D} y la normal al elemento de superficie (adimensional).
- \vec{n} = Vector unitario normal al elemento.
- ds = Area del elemento de superficie (m²).

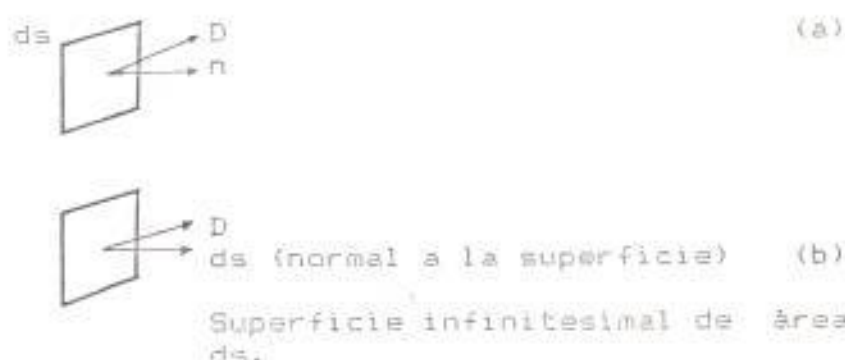


Fig. 2.1. Vectores relacionados con un elemento infinitesimal de superficie.

Esta notación puede abreviarse si escribimos:

$$\vec{ds} = \vec{n} ds \quad (2.6.5)$$

Donde \vec{ds} (Fig. 2.1), se considera como un vector que tiene como dirección y sentido los de la normal al elemento de superficie y como magnitud, la de éste mismo. Introduciendo esta notación en la ecuación 2.6.4, obtenemos:

$$d\vec{\phi} = \vec{D} \cdot \vec{ds} \quad (2.6.6)$$

Refiriéndonos ahora a la Fig. 2.2, supongamos que una carga puntual positiva, q , está colocada en el centro de una esfera imaginaria de radio r . La cantidad

Infinitesimal de flujo eléctrico $d\vec{\Phi}$ sobre el elemento de superficie ds es la dada por la ecuación 2.6.6.

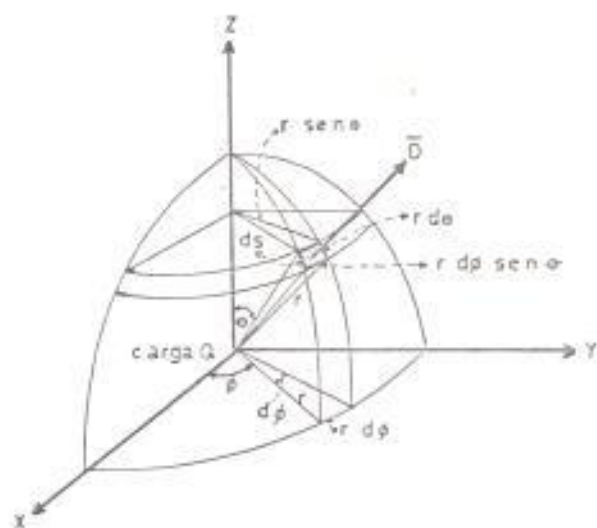


Fig. 2.2. Carga puntual Q en el origen de un sistema de coordenadas esféricas.

Integrando sobre la esfera de radio r , obtenemos, como flujo total sobre la esfera:

$$\vec{\Phi} = \vec{D} \cdot \vec{ds} \quad (2.6.7)$$

Puesto que \vec{D} es en todas partes normal a \vec{ds} , $\cos\theta = 1$, y por lo tanto, en este caso:

$$\vec{D} \cdot \vec{ds} = D ds \quad (2.6.8)$$

donde:

$$D = |\vec{D}| = \text{magnitud del vector } \vec{D}.$$

$$ds = |\vec{ds}| = \text{magnitud del vector } \vec{ds}.$$

Introduciendo la ecuación 2.6.8 en la ecuación 2.6.7, y también la magnitud de \vec{D} , según la ecuación 2.6.1, obteniéndose:

$$\bar{\xi} = \iint \frac{D}{4 \cdot \pi \cdot r^2} ds \quad (2.6.9)$$

De la Fig. 2.2:

$$ds = (r \cdot d\theta) (r \cdot d\theta \cdot \text{sen}\theta) = r^2 \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\theta \quad (2.6.10)$$

El área de la superficie dividida por el cuadrado de su radio, da el ángulo sólido subtendido por la superficie en radianes cuadrados (estereoradianes). Entonces, el ángulo sólido $d\Omega$, subtendido por el elemento de la superficie esférica de área ds viene a ser:

$$ds/r^2 = d\Omega = \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\theta \quad (2.6.11)$$

Introduciendo la ecuación (2.6.10) en la ecuación (2.6.9), obtenemos:

$$\bar{E} = \frac{Q}{4\pi} \iint d\Omega = \frac{Q}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.6.12)$$

$$\bar{E} = \frac{Q}{4\pi} [-\cos\theta]_0^{\pi} \int_0^{2\pi} d\phi$$

$$\bar{E} = \frac{Q}{4\pi} 4\pi = Q \quad (1) \quad (2.6.13)$$

Así el flujo eléctrico total a través de la esfera, obtenido por integración de la componente normal de la densidad de flujo \bar{D} sobre la esfera, es igual a la carga Q encerrada por la esfera. Podríamos haber obtenido este resultado más simplemente, en este caso, con solo multiplicar $D = Q/4\pi r^2$ por el área de la esfera: $4\pi r^2$. Pero el desarrollo anterior sirve para ilustrar el procedimiento general que puede aplicarse cuando \bar{D} no es constante como función del ángulo. El resultado obtenido en el anterior ejemplo es un caso particular de la ley de Gauss.

La expresión general de la Ley de Gauss para el Campo Eléctrico es:

(1) La primera integral, con límites 0 y 2π , está asociada con el segundo diferencial, $d\phi$, y la segunda integral, con el primer diferencial $d\theta$.

* La integral de superficie de la componente normal de la densidad de flujo eléctrico \bar{D} , extendida sobre cualquier superficie cerrada es igual a la carga encerrada ".

NOTA: Esta expresión de la Ley de Gauss es específicamente para el sistema mksr racionalizado de unidades. En general la Ley de Gauss establece que la integral de superficie de la componente normal de la densidad de flujo eléctrico extendida sobre una superficie cerrada es igual a la carga encerrada multiplicada por una constante. La constante de proporcionalidad es 1 en el sistema mksr.

Con símbolos:

$$\iint \bar{D} \cos\theta \, ds = \iint \bar{D} \cdot d\bar{s} = Q \quad (2.6.14)$$

Donde Q es la carga total o neta encerrada. Esta carga puede expresarse también como la integral de volumen de la densidad de carga ρ , de modo que la ecuación (2.6.14) deviene:

$$\iint \bar{D} \cdot d\bar{s} = \iiint \rho \, dv = Q \quad (2.6.15)$$

Donde la integración de superficie se extiende sobre una superficie cerrada y la integración de volumen, a toda la región limitada por esa superficie. Esta notación alternativa para la ecuación (2.6.15), es la siguiente:

$$\oint_S \bar{D} \cdot \bar{d}s = \oint_V \rho \, dv = Q \quad (2.6.16)$$

Donde \oint_S indica una integral doble, o de superficie extendida a una superficie cerrada, y \oint_V expresa una integral triple, o de volumen, extendida a la región limitada por la superficie.

De acuerdo a la ecuación (2.6.1), la Ley de Gauss admite también la forma:

$$\epsilon \oint_S \bar{E} \cdot \bar{d}s = Q \quad (\text{coulomb}), \quad (2.6.17)$$

La Ley de Gauss es el teorema básico de la electrostática. Es una ley de proporcionalidad cuadrática inversa (Ley de Coulomb). En efecto, si \bar{E} no varía como $1/r^2$, en el caso de una carga puntual, el flujo total sobre una superficie que encerrase la carga no sería igual a la carga.

En un volumen no contiene carga eléctrica, el flujo eléctrico sobre la superficie límite de tal volumen es siempre cero, aunque el volumen se halle en un

campo eléctrico. En este caso el flujo entrante es igual al flujo saliente (flujo neto igual a cero); en otros términos, el número de tubos de flujo que entran al volumen es igual al número de los que salen.

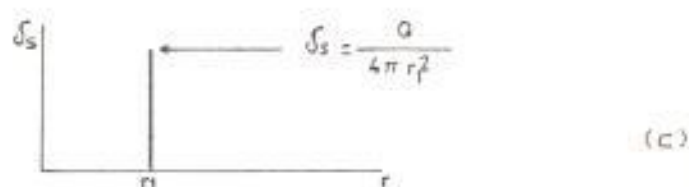
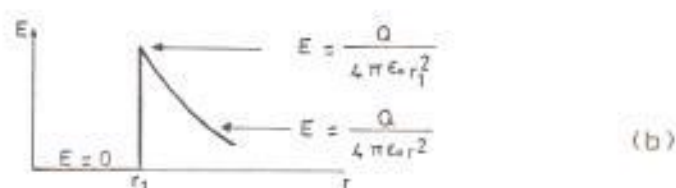
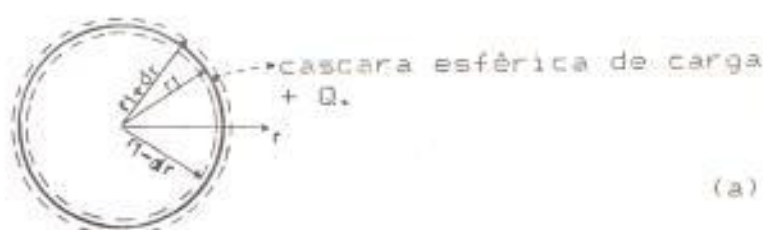


Fig. 2.3. Cáscara esférica uniformemente cargada y gráficos que ilustran la variación de la intensidad de campo \vec{E} y la densidad de carga superficial, como funciones de la distancia radial r .

Con referencia a la Fig. 2.3, supongamos que una carga positiva Q está uniformemente distribuida sobre una cáscara esférica imaginaria de radio r_1 .

Se supone que el medio es el aire en todas partes ($\epsilon = \epsilon_0$). Aplicando la Ley de Gauss por integración de \vec{D} sobre una superficie esférica de radio $r_1 - dr$, interior de la cáscara de carga, tenemos:

$$\epsilon_0 \oint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = 0, \quad (2.6.18)$$

Puesto que la carga encerrada es cero. Se deduce que \vec{E} es nulo dentro de la cáscara de carga, el resultado es, despreciando infinitésimos:

$$\epsilon_0 \oint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \epsilon_0 E 4\pi r_1^2 = 0 \quad (2.6.19)$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \quad (2.6.20)$$

Este valor de la intensidad de campo es idéntico al que produce la carga puntual Q a la distancia r_1 . Podemos entonces llegar a la conclusión de que el campo exterior de una cáscara de carga es el mismo que se tendría en la misma región si la carga estuviera concentrada en el centro de la cáscara.

En resumen, el campo debido a una cáscara de carga esférica es:

$$\vec{E} = 0 \quad \text{adentro } (r < r_1) \quad (2.6.21)$$

$$E = a \frac{Q}{r^2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \text{ afuera } (r \geq r_1) \quad (2.6.22)$$

La variación de \vec{E} como función de r es la ilustrada por la Fig. 2.3b. Obsérvese que una carga puntual en el origen, da \vec{E} infinitamente grande para $r \rightarrow 0$, mientras que una carga superficial de área finita y radio r_1 , da un valor finito para \vec{E} cuando $r \rightarrow r_1$. Esto se debe a que la densidad volumétrica de carga, δ , de una carga puntual es infinita, mientras que la densidad superficial de carga δ_s de la cáscara es finita. En el presente caso, es:

$$\delta_s = \frac{Q}{4\pi r_1^2} \quad (2.6.23)$$

Podemos deducir a partir de esto que si la Jaula de Faraday del Lab. de Alta Tensión, que tiene similitud a una cáscara esférica ya que constituye un sistema metálico cerrado, se encuentra en un campo eléctrico (externo a la "jaula"), en su interior no existe campo eléctrico tal como se ha demostrado para la cáscara esférica.

Por otro lado, en la Fig. 2.4 se ilustra una de las instalaciones características que se tienen en un

Lab. de Alta Tensión, esto es, la configuración típica de pruebas de alto voltaje DC.

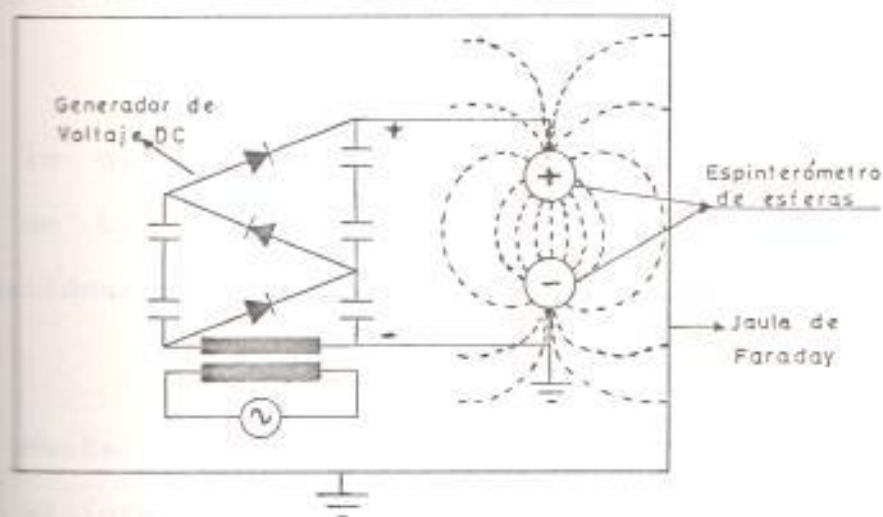


Fig. 2.4. Instalación característica de pruebas de alto voltaje DC, rodeada por una Jaula de Faraday.

Para esta condición, un campo eléctrico se produce entre las esferas del espinterómetro de esferas. El campo eléctrico se lo ha representado por las líneas trazadas (estas líneas representan las líneas de campo eléctrico) en la Fig. 2.4. Como se sabe las líneas de campo eléctrico se dirigen de una carga positiva a una carga negativa. Para nuestro caso, las líneas de campo eléctrico salen de la esfera cargada positivamente para llegar a la esfera conectada a tierra y a las paredes de la Jaula de Faraday también conectada a tierra, de tal suerte que ninguna línea de campo eléctrico producida en el

espacio interior de la Jaula de Faraday sale hacia el exterior de la misma.

De lo dicho, se concluye que la Jaula de Faraday en un Lab. de Alta Tensión cumple los siguientes requisitos:

- a) Evitar de que un campo eléctrico externo ingrese al interior de la Jaula de Faraday.
- b) Proteger al personal de operación, a los estudiantes y visitantes que se encontraran en el exterior de la Jaula de Faraday, del campo eléctrico producido en el interior de la misma.

ONDAS ELECTROMAGNETICAS PLANAS EN MEDIOS CONDUCTORES; APLICACION : JAULA DE FARADAY.

Supongamos que una onda progresiva plana choca contra la superficie límite de un medio conductor a incidencia normal, como se ve en la Fig. 2.5.

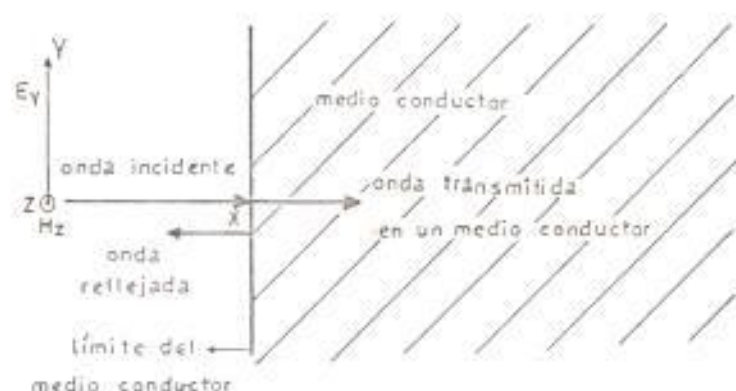


Fig. 2.5 Onda progresiva plana que penetra incidiendo normalmente en un medio conductor.

Una parte de la energía incidente es reflejada, mientras que el resto penetra en el medio conductor. Los medios conductores atenúan rápidamente las ondas electromagnéticas que se propagan en su seno; de hecho, en un buen conductor la atenuación es tan rápida que las ondas de radiofrecuencia apenas pueden penetrar en él.

A partir de las ecuaciones de rotor de Maxwell (sección 2.5), tenemos que para una onda linealmente polarizada que avanza en dirección de x , con E en la dirección Y :

$$E_y = E_0 e^{-\sqrt{j\omega\mu\sigma/2} x} e^{-j \sqrt{j\omega\mu\sigma/2} x} \quad (2.7.1)$$

En la ecuación (2.7.1), el factor de atenuación está dado por:

$$e^{-\sqrt{j\omega\mu\sigma/2} x} \quad (2.7.2)$$

y el factor de fase:

$$e^{-j \sqrt{j\omega\mu\sigma/2} x}$$

donde:

- ω = frecuencia angular ($= 2\pi f$) (1/seg.)
- μ = Permeabilidad del medio (Henry/m)
- σ = Conductividad del medio (mhos/m)
- x = distancia (m)
- j = operador complejo (adimensional)

La ecuación (2.7.1), es una solución de la ecuación de onda para una onda que avanza en el sentido positivo del eje x en un medio conductor. Ella da la variación de E_y en magnitud y en fase como función de x . El campo se atenúa exponencialmente y su fase se atrasa linealmente al aumentar x .

OBTENGAMOS ahora una medida cuantitativa de la penetración de la onda en el medio conductor. Con referencia a la Fig. 2.5 consideramos la onda que penetra en el medio conductor; vale decir, la onda transmitida.

Sea $x=0$, en el límite entre el medio conductor y el espacio libre de modo que x crece positivamente en el medio conductor. Escribamos la ecuación (2.7.1) en la siguiente forma:

$$E_y = E_0 e^{-x/\tau} e^{-j(x/\tau)} \quad (2.7.3)$$

donde:

$$\tau = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$$

para $x = 0$, $E_y = E_0$

Esta es la amplitud del campo en la superficie del medio conductor.

$$\tau = \sqrt{2} = 1 \quad \angle 45^\circ$$

En la ecuación (2.7.3), tiene la dimensión de la

distancia. Dimensionalmente es:

$$\sqrt{T \frac{Q^2 M L}{M L T Q^2}} = L$$

Luego, a una distancia $x = r$, la amplitud del campo es:

$$E_y = E_0/e \quad (2.7.4)$$

De esta manera E_y , decrece a: $1/e = 0.368$ ó el 36.8 % de su valor inicial cuando la onda ha penetrado la distancia r .

De ahí que r se llame profundidad de penetración:

$$d = 1/e$$

Como ejemplo consideramos la profundidad de penetración de una onda electromagnética plana en incidencia normal con un buen conductor, tal como el hierro.

Puesto que: $\omega = 2\pi f$, la profundidad de penetración se resulta:

$$r = 1/\sqrt{f\mu\sigma} \quad (2.7.5)$$

Para el hierro $\mu_r = 250$, de modo que $\mu = 3.15 \times 10^{-4}$ Henry/m. La conductividad es $\sigma \approx 1 \times 10^7$ siemens/metro.

Introduciendo estos valores en la ecuación (2.7.5), tenemos para el hierro,

$$\tau = 10.05 \times 10^{-3} / \sqrt{f} \quad (2.7.6)$$

donde:

τ = profundidad de penetración 1/e (m).

f = Frecuencia (1/seg.).

La profundidad de penetración es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia.

Evaluando la ecuación (2.7.6) para algunas frecuencias específicas:

A 60 Hz/seg.	$\tau = 1.3 \times 10^{-3}$ m.
A 1 MHz/seg.	$\tau = 1 \times 10^{-5}$ m.
A 30000 MHz/seg.	$\tau = 5.8 \times 10^{-6}$ m.

La penetración, que es de 1.3 mm. a 60 Hz, decrece en proporción inversa con la raíz cuadrada de la

frecuencia. Para una longitud de onda de 1 cm. (30000 MHz), la penetración es de solo 5.8×10^{-5} m., vale decir, menor que 1 micrón.

Este fenómeno denominase a menudo " efecto Pelicular" o efecto "Skin".

Luego, los campos de alta frecuencia son atenuados cuando penetran en un conductor, mucho más rápido que los campos de baja frecuencia. La tabla III, da los valores de este efecto en el hierro para tres distintas frecuencias.

III. TIPOS DE BLINDAJE.

El blindaje electromagnético puede realizarse mediante el uso de láminas o mallas metálicas.

El blindaje a través de lámina se lo realiza cubriendo toda el área a blindar, por medio de láminas metálicas, unidas a través de soldadura o utilizando uniones atornilladas. La atenuación lograda para cada frecuencia, se presenta como una función de las dimensiones del recinto blindado, el espesor de la lámina y las propiedades eléctricas (conductividad) y magnéticas (permeabilidad) del material de dicha lámina.

VALORES CARACTERÍSTICOS DEL EFECTO SKIN Y CORRIENTES INDUCIDAS AL HIERRO.

Frecuencia	60 Hz.	10 Hz.	3×10 Hz.
Longitud de onda en el espacio libre.	5000 Km.	300 metros	1 cm.
Profundidad $1/e$, metro.	1.3×10^{-3}	1×10^{-5}	5.8×10^{-8}
Longitud de onda en el conductor, metro.	8.2×10^{-3}	6.3×10^{-5}	3.6×10^{-7}
Velocidad en el conductor V_c , metro / seg.	4.9×10^{-1}	6.3×10	10.9×10^3
Índice de refracción (adimensional).	6.1×10^8	4.7×10^6	2.7×10^4

Es interesante observar que el campo eléctrico se atenúa al 1 % de su amplitud inicial cuando ha penetrado aproximadamente $3/4$ de su longitud de onda en el metal.

El blindaje a través de malla metálica se lo realiza recubriendo las paredes, techo y piso del recinto a blindar, por medio de mallas metálicas. Las mallas se unen unas a otras por soldadura o uniones entrelazadas de alambres de la malla, de tal forma que se garantice una buena conexión y continuidad. La atenuación lograda para cada frecuencia se presenta como una función de las dimensiones del recinto blindado, el calibre del alambre que forma la malla, el espaciamiento entre alambres y la conductividad eléctrica del material de la malla.

Además, el blindaje puede realizarse, combinando láminas con mallas metálicas, debidamente unidas. Tal es el caso que cuando se utiliza láminas para el blindaje de paredes, techo y piso, se puede utilizar malla para el blindaje de las ventanas y puertas.

En general puede decirse que el blindaje con lámina metálica resulta más eficaz que el blindaje con malla metálica. Sin embargo, en casos en donde no se precise un alto nivel de atenuación, la malla metálica puede representar un buen compromiso técnico-económico.

CONSIDERACIONES IMPORTANTES AL PROYECTAR EL BLINDAJE.

Al seleccionar el blindaje debe buscarse una combinación de material (lámina o malla de hierro, aluminio, cobre, etc.) y espesor (o calibre) utilizados que, junto con los procedimientos de construcción, resulte en la solución más económica para obtener el nivel de atenuación requerido.

Para ello se han ensayado varias clases de materiales como los descritos a continuación:

- a) materiales finos y flexibles, que se moldean a la superficie y que pueden ser recortados de acuerdo al molde utilizado.
- b) Contrarios a los anteriores, los hay rígidos que pueden ser depositados en soportes para formar con ellos la pared de absorción.
- c) Se han efectuado pruebas con algodón de fibra de vidrio impregnada con material suelto de polvo de carbón vegetal y si no hay problema con el calor, el material poliviron puede ser usado.

Recorte de estos materiales, una mezcla de 40 partes de silicón carbido y 100 partes de porcelana, es eléctricamente satisfactoria.

Con el fin de hacer viables comercialmente estos materiales se han hecho pruebas aún con pelo animal con una mezcla de hojuelas de aluminio, grafito o carbón vegetal en una solución de caucho.

Una vez decidida la configuración esencial del blindaje aún deben atenderse una serie de detalles, que iremos mencionando a continuación, que también son básicos para que el blindaje resulte eficaz.

En primer lugar, debe proyectarse que el blindaje recubra tanto las paredes, como el techo y piso de la sala blindada, procurando la mejor unión eléctrica posible (preferentemente, por medio de soldadura). Cuando el blindaje se construye al mismo tiempo que la obra civil, la malla metálica puede quedar embebida en el material de construcción (yeso u hormigón).

Las puertas y ventanas deben quedar recubiertas también con el material del blindaje. Cuando el blindaje se construye con lámina metálica, las ventanas pueden quedar recubiertas con malla, procurando una buena unión eléctrica entre ésta y la lámina. Las puertas deben quedar unidas con el blindaje general por medio de pletina flexible instalada a través de las charnelas.

Toda la tubería y ductos metálicos que entran en la sala (tuberías de agua, gas, aire acondicionado, etc.) deben quedar unidos eléctricamente con el blindaje en los puntos de penetración.

Los cables de energía eléctrica que entran en la sala, ya sea para iluminación o para alimentación de instrumentos, deben ir blindados por medio de malla coaxial, o bien, instalados en ductos. En cualquier caso, el blindaje de los cables debe quedar unido eléctricamente con el blindaje de la sala, por un extremo, y con el blindaje de los instrumentos que alimentan, por el otro.

De la misma forma deben quedar blindados los cables que salgan de la sala o interconecten diferentes salas entre sí. El objetivo es que los blindajes de la sala, de los instrumentos y de los cables formen una sola superficie cerrada.

No deben quedar instrumentos o equipos con blindajes flotantes, sino que todos deben estar unidos al blindaje de la sala por medio del blindaje de los cables que los alimentan.

Es conveniente que el blindaje de los cables de energía se prolongue también fuera de la sala, si es

posible, hasta la misma toma de tierra principal de la instalación eléctrica. Los mismos ductos en que van entubados normalmente los cables pueden servir para este propósito si se procura que existan buenas uniones eléctricas en las conexiones de los diferentes tramos del tubo.

Los cables de tierra de la instalación eléctrica deben quedar tendidos por el interior de los ductos en que van entubados los cables de energía.

El blindaje debe quedar conectado a tierra. Al conectar a tierra el blindaje debe respetarse las dos reglas siguientes:

REGLA # 1 El blindaje debe estar conectado a la misma tierra del circuito eléctrico que penetra en el interior del mismo.

REGLA # 2 La conexión a tierra del blindaje y la del circuito eléctrico contenido en el interior del mismo, debe efectuarse en un punto común. Este punto debe estar situado lo más cerca posible a la toma de tierra principal de la instalación eléctrica y a partir del mismo, el blindaje debe quedar aislado de los cables de tierra del

circuito eléctrico.

CONSIDERACIONES APLICABLES AL LABORATORIO DE ALTA TENSION.

Mediciones extremadamente sensitivas son realizadas frecuentemente en experimentos de alto voltaje. Los componentes del equipo de construcción de alto voltaje, pueden ser usados para mediciones de descarga parcial. El transformador de pruebas, el capacitor de medida y los otros componentes requeridos, están en una instalación apropiada, prácticamente libres de descargas parciales.

Las mediciones de descarga parcial, en particular, pueden ser perturbadas cuando el arreglo del circuito de alto voltaje se comporta como una antena y recepta ondas electromagnéticas externas. Además, como resultado de las descargas del Generador de Impulsos y procesos de descargas disruptivas en circuitos de alto voltaje, se producen ondas electromagnéticas de alta frecuencia que pueden, a su turno, causar perturbación en las transmisiones de radio, televisión y telecomunicaciones en los alrededores del área de pruebas del laboratorio.

La práctica ha mostrado que la influencia de

perturbaciones de los alrededores en las mediciones sensitivas de alto voltaje, es generalmente más intensa que aquella ejercida por las investigaciones de alto voltaje sobre los alrededores. Esto se debe principalmente al hecho de que ocurren solo ocasionalmente, en los circuitos de alto voltaje, pulsos de corta duración que puedan afectar los alrededores; mientras que las perturbaciones externas, por ejemplo debido a vehículos o motores eléctricos inadecuadamente protegidos, generan interferencias permanentes.

Cuando se realizan mediciones de descarga parcial sobre equipo de alto voltaje, el problema del ruido eléctrico externo es crítico. El ruido externo afecta directamente a la sensibilidad de las mediciones de descarga parcial haciendo que su nivel se mantenga bien abajo del nivel de los resultados de prueba esperados.

El ruido puede ser introducido dentro del circuito de pruebas, en cuatro formas diferentes:

- i) Radiación electromagnética (ruido radiado).
- ii) Voltajes inducidos (ruido inducido).
- iii) Ruido que viaja a lo largo de conductores eléctricos (ruido conducido).

el ruido introducido por acoplamiento capacitivo de diferentes sistemas de tierra (ruido acoplado).

Una eliminación casi completa de interferencias mutuas entre la instalación de alta tensión y el medio ambiente, con el fin de asegurar el buen funcionamiento de las mediciones de descarga parcial, y también, lo que es más importante, el prevenir riesgos a personas, instalaciones y aparatos, de la zona real de peligro del circuito de alto voltaje, se realiza usando un blindaje metálico continuo en la forma de una Jaula de Faraday .

Como se indicó anteriormente, de que el laboratorio tendrá fines pedagógicos, es primordial de que los estudiantes observen la ejecución de los experimentos, con toda la seguridad para evitar accidentes debido a descargas eléctricas. De igual manera, desde las mesas de control, que se ubican fuera de la Jaula de Faraday , se deberá tener total visibilidad de conjunto de toda el área de pruebas, desde cada sitio de trabajo de dicha mesa.

El alto amortiguamiento de los campos electromagnéticos, buena protección para evitar riesgos personales, y excelente visibilidad, se logran si una malla metálica conductora, suspendida

sobre o dentro de las paredes del laboratorio, se utiliza para realizar el blindaje del Lab. de Alta Tensión. A más de la ventaja económica que significa el hacer el blindaje con malla que con hojas de metal.

A continuación se indican algunas recomendaciones y experiencias, referentes al blindaje, que dan las compañías especializadas en la construcción de equipos de Lab. de Alta Tensión:

- MRS MESWLANDER señala que para el blindaje de su laboratorio, ha utilizado mallas de zing, con un reticulado de 10 mm. de lado; los pedazos han sido unidos y soldados entre sí. Indican que la malla ha sido fijada a las paredes mediante soportes de nylon, como puede apreciarse en la foto que se indica en la Fig. 2.6. Recomiendan que se puede usar malla cuyo reticulado no exceda los 50 mm. de ancho.

- ASEA, indica haber necesitado especial atención para el blindaje de su Lab. de modo que tanto el salón de pruebas como compartimientos para pruebas pequeñas, fueron enmallados. Indican que en el techo han puesto malla de cobre y en el piso a una profundidad de 4 cm. del concreto han hecho igual

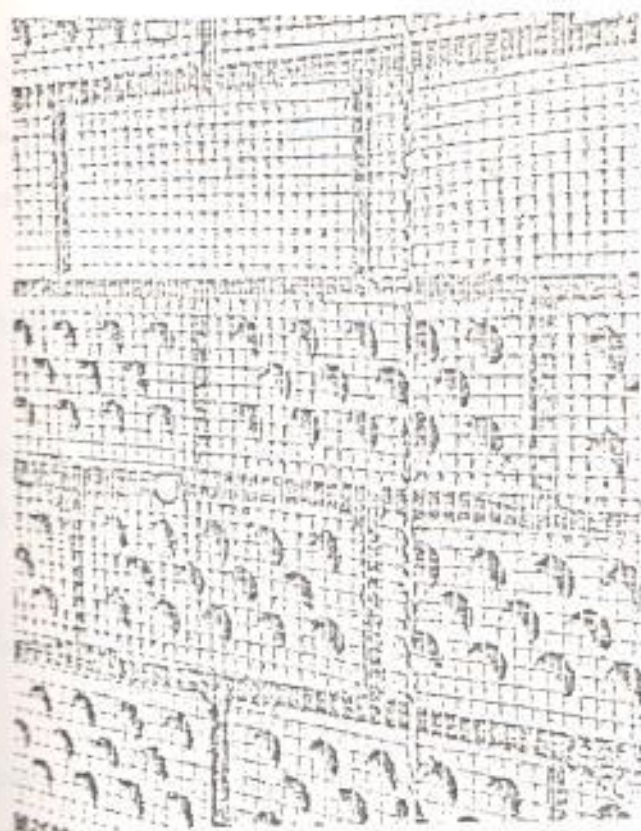


Fig. 15. Walla de alambre para formar la Jaula de Faraday.

cosa, soldándolas cuidadosamente a la malla de tierra.

- MISSING ELECTRIC, señala que el blindaje a través de malla se lo puede efectuar utilizando alambre de cobre.

- HIPOTRONICS TECHNICAL APPLICATION SERIES, indica que para su blindaje utiliza mallas de alambre de acero soldada de 100 mm y 6 mm. de diámetro, espotradas en las paredes.

En general, las mallas deben tener solidez mecánica.

Un requerimiento técnico de un Lab. de Alta Tensión es el frecuente cambio de los objetos de prueba y un gran trabajo de reconexión por lo que se tiene una puerta de acceso al área de pruebas de alta tensión, la misma que debe ser construida del mismo material que aquel de la malla y que además tenga un enclavamiento de seguridad que evita la energización del área de pruebas si la puerta de entrada no está bien cerrada.

AREA A CUBRIRSE.

Las condiciones que fijan las dimensiones de los

Lab. de Alta Tensión se indicaron en la sección 1.11.1. Para cumplir tales requerimientos, es necesario conocer principalmente el tamaño del equipo de pruebas para el generador de impulsos, y los espacios libres mínimos entre los terminales de alto voltaje y tierra y alrededores aterrizados tales como paredes, techo y otros equipos de prueba no energizados.

En la sección 1.9 se manifestó que con la finalidad de tener parámetros a ser utilizados en el desarrollo de la presente Tesis, se ha adoptado como referencia el equipo fabricado por la MWB MESSWANDLER - BAU AG. La configuración típica del generador de alto voltaje de impulso de 1, 2 y 3 etapas se indica en la Fig. 2.7.

La distribución de distancias mínimas de seguridad para el generador de impulsos, en la Fig. 2.8.

Las dimensiones de los equipos y elementos que se tendrán para la construcción de un generador de alto voltaje de impulsos, se indican en la Fig. 2.9.

El espacio libre requerido depende del tipo de voltaje usado (AC, DC, IMPULSO). Estos espacios libres mínimos, para altos voltajes, son dados como

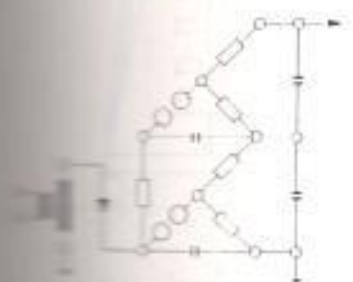
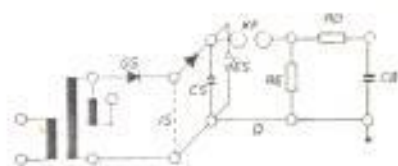
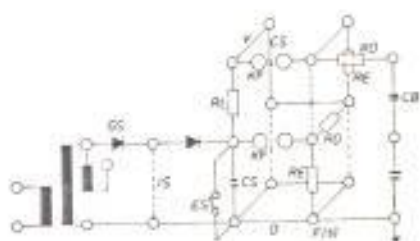
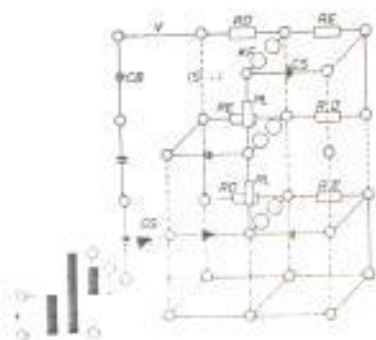
una etapados etapastres etapas

Fig. 27 Configuraciones típicas del generador de impulsos.

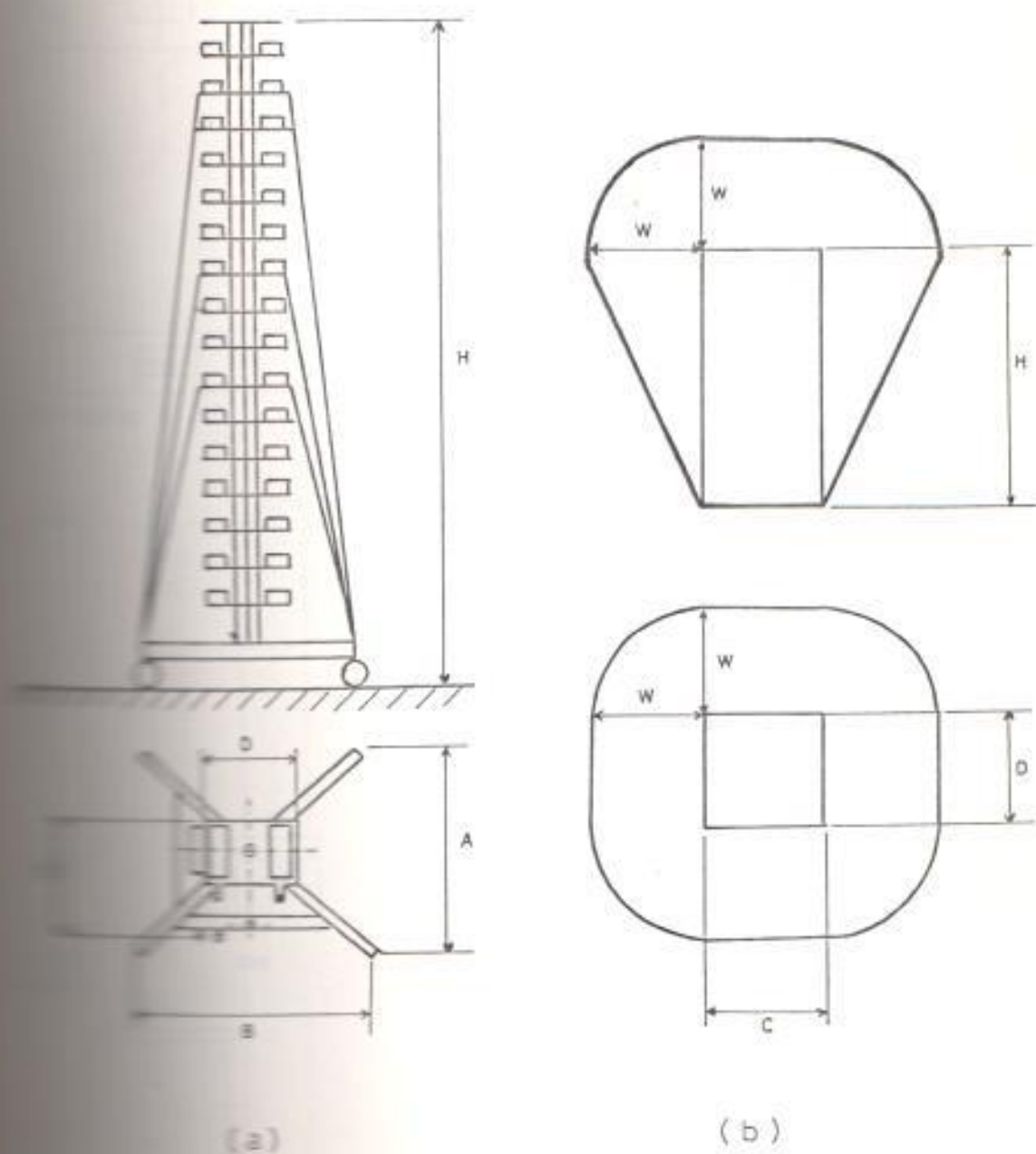


Fig. 2.25 (a) Generador de impulsos.
 (b) Distancias mínimas de seguridad para el generador de impulsos.

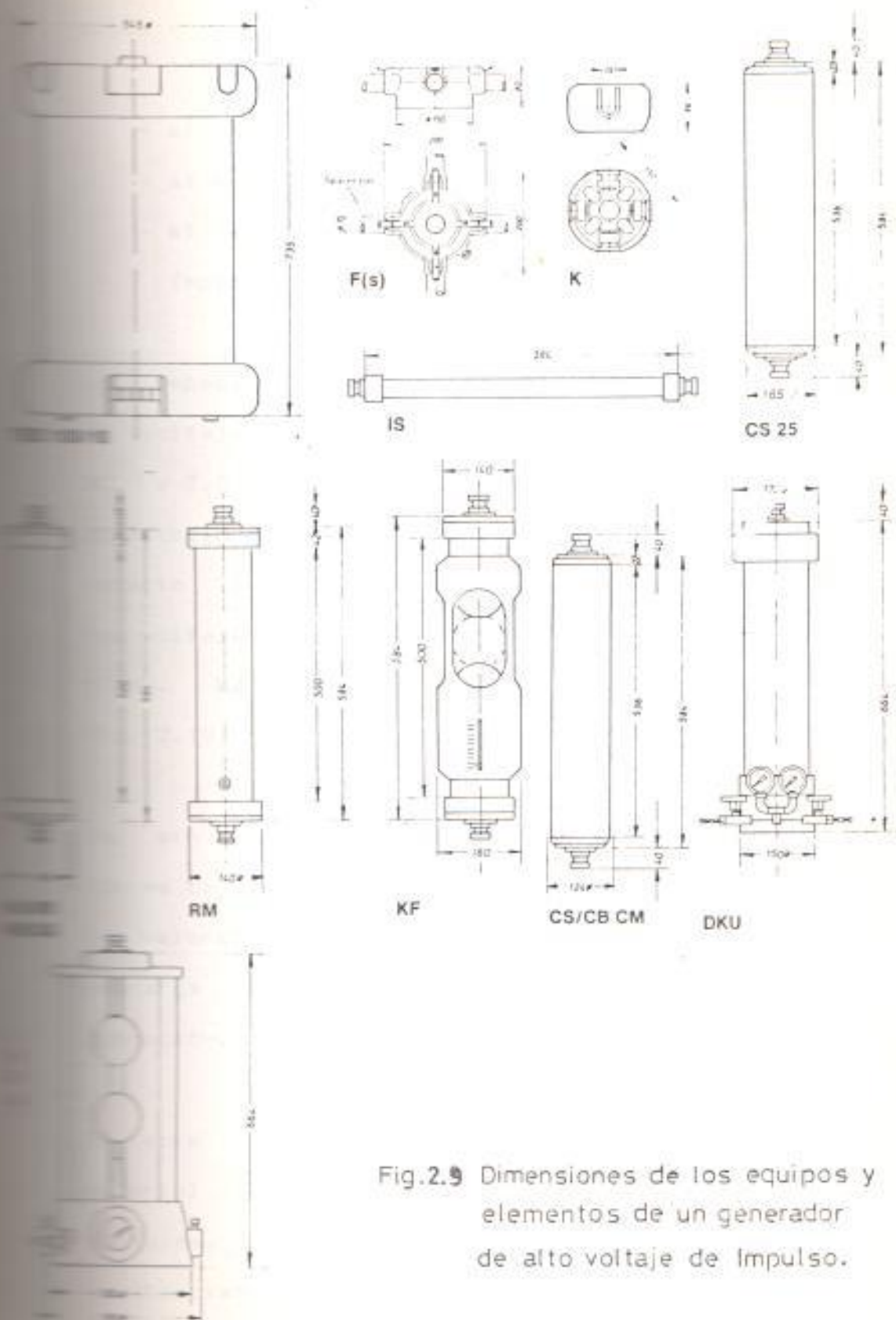


Fig.2.9 Dimensiones de los equipos y elementos de un generador de alto voltaje de impulso.

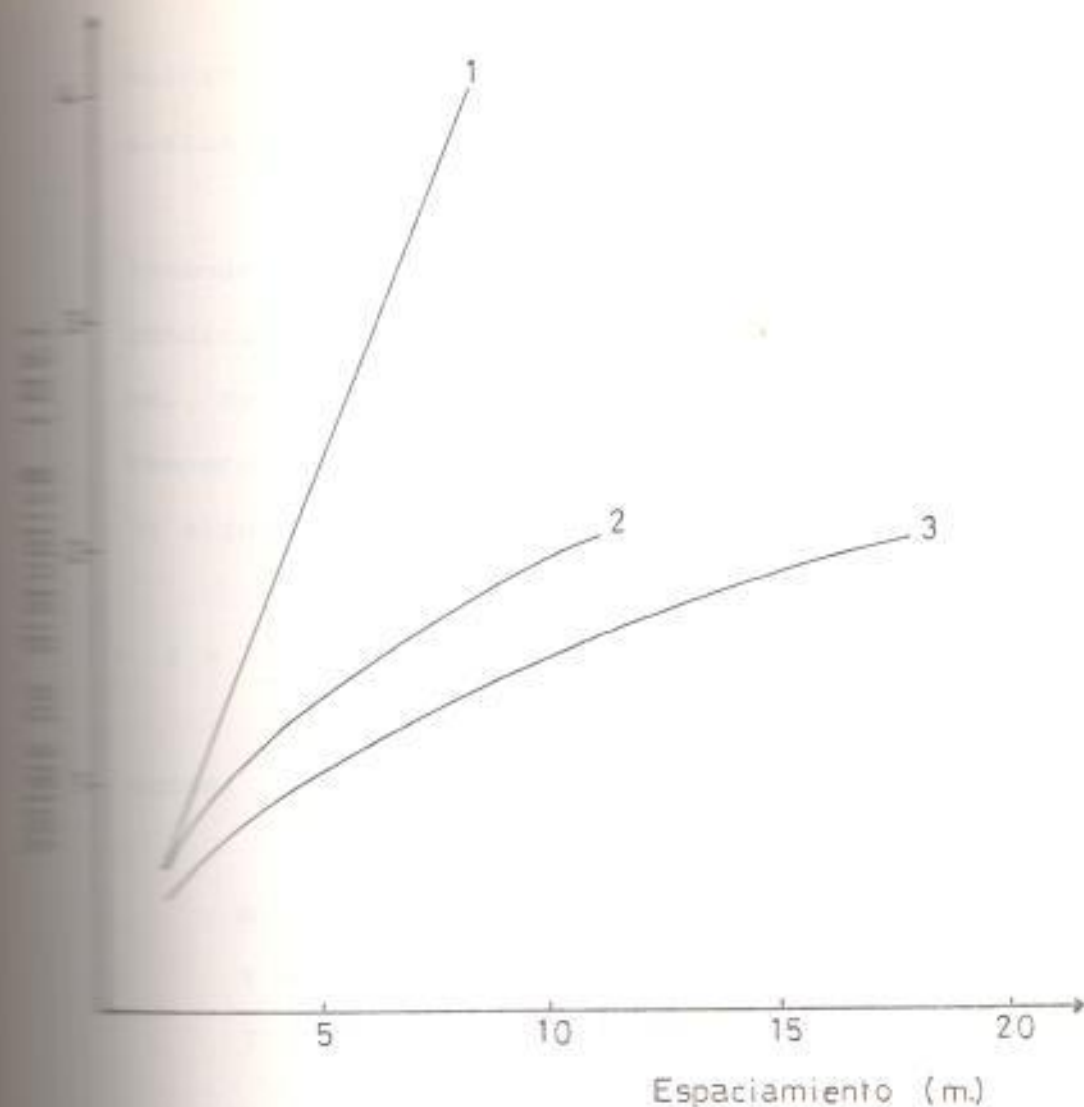
sigue :

- al menos 40 cm. por cada 100 KV. pico AC.
- al menos 400 cm. por cada 1000 KV. pico DC.
- al menos 200 cm. por cada 1000 KV. pico de Impulso.

Los espacios de arriba son seguros siempre y cuando el voltaje no exceda el 1.5 MV. para voltaje AC y DC, y 2.5 MV. para voltajes de Impulsos y ondas por conmutación. Para voltajes de prueba más altos, el espacio libre tiene que ser obtenido considerando los voltajes no disruptivos de configuración punta - plano. La característica es la que se indica en la Fig. 2.10.

Es, sin embargo, preferible acomodar los espacios libres de tal forma que exceda, cuanto sea posible, los valores indicados arriba, a fin de minimizar la descarga por corona y asegurar máxima seguridad de operación.

El aire tiene una importancia considerable como material aislante en la técnica de los altos voltajes, ya sea por sí solo o en combinación con sustancias sólidas. Casi todos los conductores y aisladores, al aire libre, y la mayoría de los



1) Voltaje no disruptivo de 50% con un impulso de 1.2/50 μ s., polaridad positiva.

2) Voltaje no disruptivo de 50% con voltaje ac. 50 Hz (pico).

3) Voltaje no disruptivo de 50% para una onda de impulso por conmutación:

100/200 μ s., polaridad positiva.

4) Voltaje no disruptivo de una configuración punta-plano.

aparatos y máquinas eléctricas dependen para su aislamiento, del aire.

Tomando por unidad la densidad del aire a condiciones normales de presión y temperatura (760 mm. de Hg. y 20 °C.), la densidad a cualquier otra temperatura y presión barométrica b, viene dada por la siguiente fórmula: (ver Anexo B).

$$\delta = \frac{b}{760} \frac{273+20}{273+t} = 0.3855 \frac{b}{273+t} \quad (2.11.1)$$

donde:

b = presión atmosférica (mm. de Hg.)

t = temperatura en °C.

T = 273 + t = temperatura absoluta.

La presión barométrica a distintas alturas sobre el nivel del mar, se determina aproximadamente por las curvas de la Fig. B.1.

La rigidez dieléctrica del aire (Edo) a condiciones normales de presión y temperatura, es de 30 KV./cm., el cual debe ser corregido para las condiciones de funcionamiento, esto es, para las condiciones atmosféricas de la ciudad de Guayaquil :

$$t = 25 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$b = 760 \text{ mm. de Hg.} \quad (1)$$

$$\text{Luego, } \delta = 0.3855 \frac{760}{273+25} = 0.98$$

Interviene un factor de corrección K de la densidad del aire (ver tabla B.I), de:

$$\text{para } \delta = 0.98 \quad K = 0.98$$

La rigidez dieléctrica del aire en la ciudad de Guayaquil (Edg) será entonces:

$$Edg = Edo \times K$$

$$Edg = 30 \text{ KV/cm.} \times 0.98 = 29.4 \text{ KV/cm.}$$

Los resultados de cálculos del espacio libre mínimo necesario considerando estas condiciones son :

Voltaje Nominal del equipo: 140 KV. AC.

280 KV. DC.

420 KV. Impulso.

Los datos proporcionados por el departamento de meteorología de la Aviación Civil, en Guayaquil.

Para AC : $140 \text{ KV.} \times 40 \text{ cm.} / 100 \text{ KV.} = 56 \text{ cm.}$, y
 considerando el factor de corrección ;
 $56 \text{ cm.} / 0.98 = 57,14 \text{ cm.}$

Para DC : $280 \text{ KV.} \times 400 \text{ cm.} / 1000 \text{ KV.} = 112 \text{ cm.}$ y
 considerando el factor de corrección:
 $112 \text{ cm.} / 0.98 = 114,286 \text{ cm.}$

Para Voltaje de Impulso: $420 \text{ KV.} \times 200 \text{ cm.} / 1000$
 $\text{KV.} = 84 \text{ cm.}$ y considerando
 el factor de corrección :
 $84 \text{ cm.} / 0.98 = 85,7 \text{ cm.}$

El espacio libre mínimo que recomienda el fabricante
 (MSB HESSWANDLER) es :

- Voltaje de Impulso por descarga atmosférica
 (1.2/50µs.) = 1 m.
- Voltaje de Impulso positivo por conmutación
 (250/2500µs.) = 2 m.

Los valores recomendados por el fabricante,
 solamente fueron determinados luego de
 exhaustivas investigaciones, razón por la cual se
 adoptará el valor de 2 m., como la distancia mínima
 de seguridad.

Las vistas frontal, superior, lateral y posterior del generador de impulsos, con sus respectivas dimensiones, y el espacio libre requerido se indican en la Fig. 2.11.

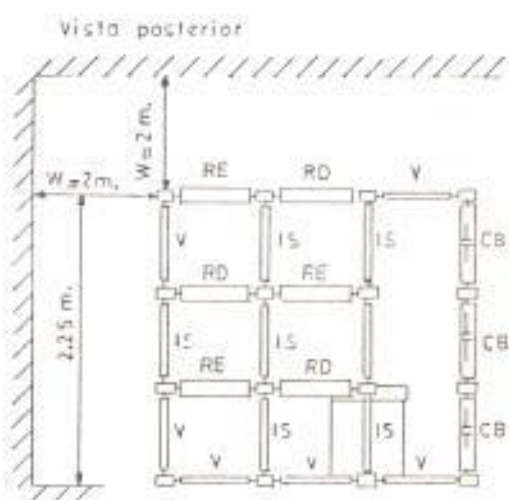
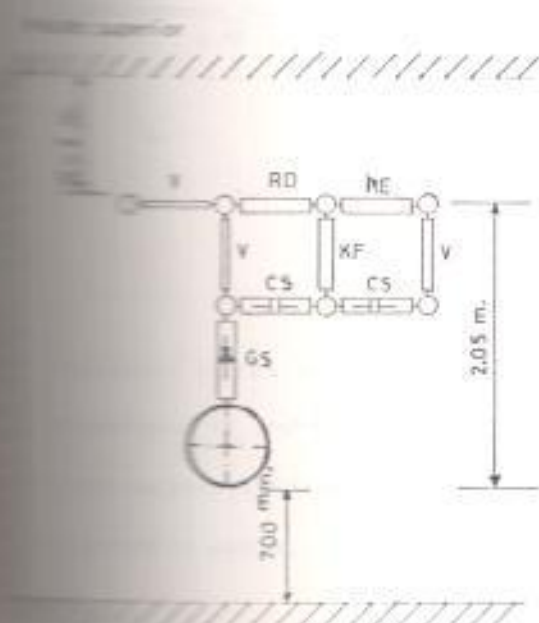
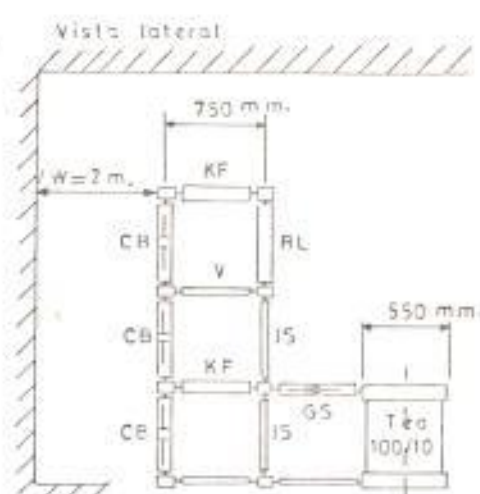
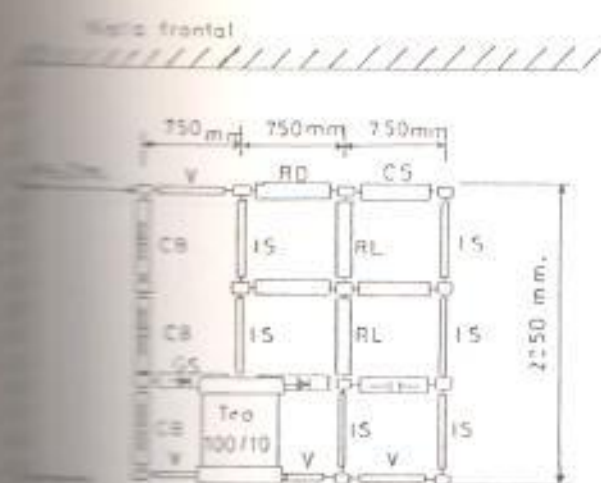
Dentro del área de pruebas de alto voltaje, se tendrá una plataforma de trabajo de armaduras de acero soldadas, con una cubierta de paneles de madera dura. Las armaduras sirven como puntos de tierra. Los circuitos de alto voltaje son instalados sobre la plataforma de trabajo. Los elementos y accesorios de construcción que no son requeridos, pueden ser almacenados en los cajones de dicha plataforma. Esta plataforma de trabajo tendrá las siguientes dimensiones:

Observando la Fig. 2.12:

Altura = 0.6 m.
Ancho = 2.5 m.
Largo = 3.75 m.

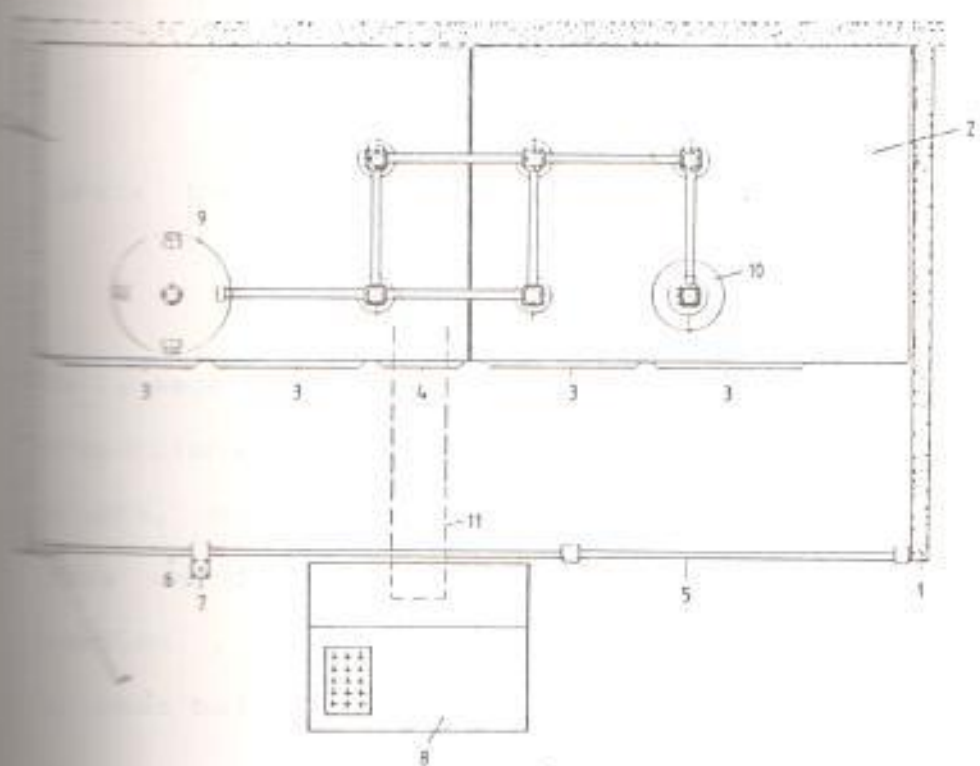
Considerando las dimensiones del equipo, espacio libre mínimo y plataforma de trabajo, las dimensiones mínimas requeridas del área de pruebas de alto voltaje son:

Alturas: Altura del equipo + altura plataforma +
 espacio libre mínimo = 2.25 m. + 0.6 m. +



- Resistencia mínima
- Resistencia de carga
- Resistencia
- Resistencia de impulso
- Resistencia de frente de onda
- Resistencia de cola de onda
- Resistencia de carga
- Resistencia de conexión
- Resistencia de soporte
- Resistencia operativa eléctrica
- Resistencia: Transformador de pruebas

Plano de la configuración de un generador de voltaje de impulso, de tres etapas.



1) Vallas y vallitas de seguridad.

2) Esquema de trabajo.

3) Soportes para aisladores, soportes, capacitores y resistores.

4) Armadura de cables. 5) Valla de seguridad.

6) Lámparas. 7) Lámparas de aviso.

8) Panel de control. 9) Transformador de pruebas.

10) Objeto de prueba. 11) Ducto para cables.

Fig. 1. Disposición sugerida para la instalación del generador de impulsos de una etapa.

$$2.0 \text{ m.} = 4.85 \text{ m.}$$

Ancho: Ancho del equipo + espacio libre mínimo =
 $2.05 \text{ m.} + 2.7 \text{ m.} = 4.75 \text{ m.}$

Largo: Largo del equipo + espacio libre mínimo =
 $2.25 \text{ m.} + 4 = 6.25 \text{ m.}$

En la sección 1.11.1, se manifestó que es necesario proporcionar facilidades para albergar equipos de prueba, movilidad de equipos y visibilidad clara de cada uno de los elementos de prueba. Se señaló, también, que se tendrían facilidades de realizar pruebas bajo lluvia artificial (Anexo C).

La Unidad de Planificación del Campus Politécnico de la ESPOL, ha determinado la construcción de un edificio para el Lab. de Alta Tensión, cuyas características se indican en el plano Arquitectónico (ver Anexo D).

Considerando todos estos factores, las dimensiones sugeridas para el área de pruebas de alta tensión, son las siguientes:

$$\text{Altura} = 6.0 \text{ m.}$$

$$\text{Largo} = 8.4 \text{ m.}$$

$$\text{Ancho} = 5.0 \text{ m.}$$

CAPITULO III

DISEÑO DE LA JAULA DE FARADAY

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DEL LABORATORIO.

En la sección 2.11 se determinaron las dimensiones adecuadas para el área de pruebas del Lab. de Alta Tensión. Por las razones indicadas en la sección 2.10, esta área de pruebas debe ir rodeada de una Jaula de Faraday, la que debe tener las mismas dimensiones del área de pruebas, esto es:

Largo : 8.4 m.

Ancho : 5.0 m.

Altura: 6.0 m.

No es por demás citar otra vez lo indicado en la sección 2.9: "Al seleccionar el blindaje debe buscarse una combinación del material (lámina o malla de hierro, aluminio, cobre, etc.) y espesor y calibre utilizados, que junto con procedimientos de construcción resulte en la solución más económica para obtener el nivel de atenuación requerido".

La utilización de malla de alambre galvanizado llena dos requisitos:

- a) La conducción de ondas perjudiciales.
- b) Economía por parte del costo del material y fácil procedimiento de construcción.

A una distancia de un metro de las paredes laterales, 0.5 m. de la pared posterior y a un metro del techo del edificio del Lab. de Alta Tensión de la ESPOL (ver plano Arquitectónico en el Anexo D), se instalará una malla metálica, que por su consistencia mecánica y buena facilidad de observación a través de ella, será de alambre galvanizado de 2.0 mm. de diámetro y que forma reticulados de 25 mm. de lado (ver Fig. 3.1). La parte inferior de la Jaula de Faraday, será colocada a 90 mm. del piso de hormigón del laboratorio y su material será el mismo tipo de malla indicada anteriormente.

Las mallas, que forman la "jaula", irán soldadas a un arazón de tubos metálicos galvanizados de 1.5 pulgadas de diámetro, a fin de que se tenga la solidez mecánica y continuidad eléctrica requeridas.

Para la conexión entre secciones de la malla (en el

mercado nacional se encuentran rollos de malla de 30 m. de longitud y 0.475 m. de ancho) se utilizará una pletina de acero de una pulgada de ancho por 2 mm. de espesor, la misma que irá soldada al armazón metálico. A esta pletina, se soldarán los terminales de secciones de malla, tal como se indice en la Fig. 3.2.

La parte inferior de la Jaula de Faraday, y en especial las uniones soldadas, debe cubrirse con pintura anticorrosiva para evitar la corrosión debido al contacto con el suelo. Así se garantiza la continuidad de la "jaula".

En la valla de protección, que separa el área de pruebas de alto voltaje, del resto del espacio donde se ubicarán las mesas de control, estará la puerta de ingreso al área de pruebas, la cual será construida del mismo material de la valla de separación y montada sobre rieles, para su fácil movilización (ver detalle 1 y 2 de la Fig. 3.1). Dicha puerta, tendrá un enclavamiento eléctrico para evitar que se energice el área de pruebas mientras la puerta está abierta.

Los detalles de construcción de la Jaula de Faraday,

se indican en la Fig. 3.1.

El armazón metálico irá sostenido al techo del edificio, tal como se indica en el corte BB' del plano arquitectónico (Anexo D).

Tanto la malla de alambre galvanizado, como los tubos del armazón, se encuentran fácilmente en el mercado, concretamente en la fábrica de alambres IDEAL ALAMBREC S.A.

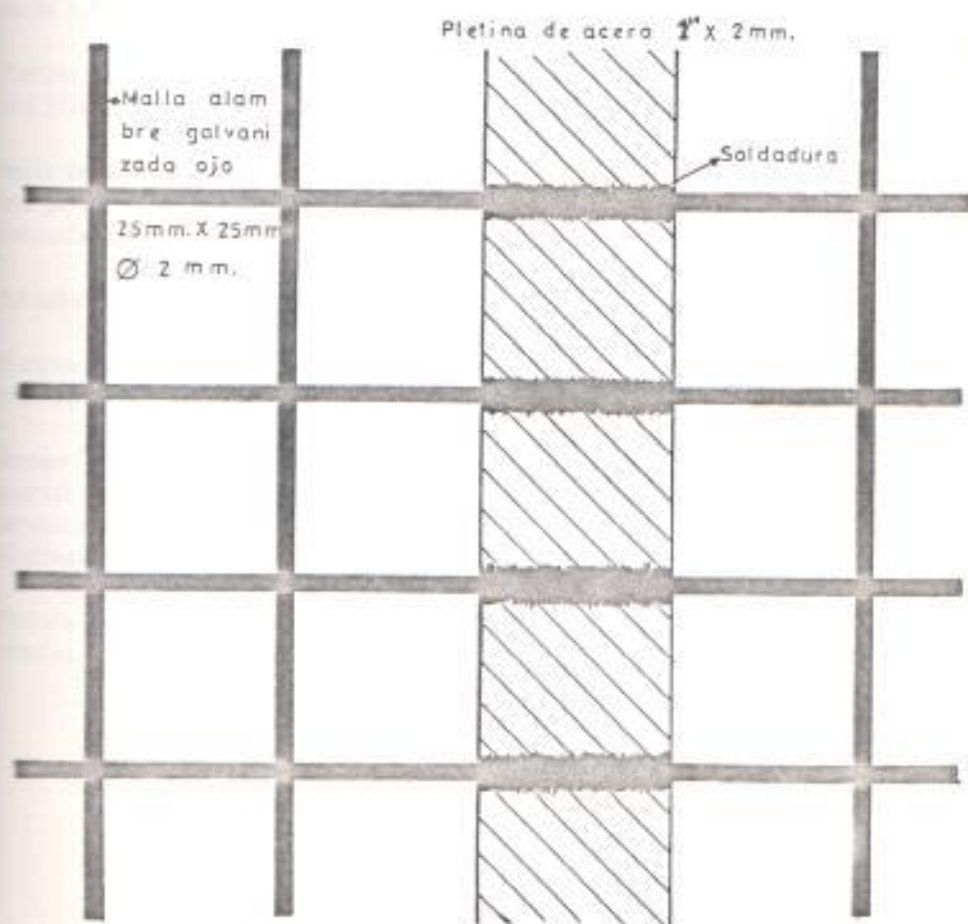


Fig. 3.2 Unión de secciones de malla.

C.D. PRESUPUESTO (a Enero de 1988).

DESCRIPCION DEL MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (SUCRES)	PRECIO TOTAL (SUCRES)
Tubo galvanizado 1.5"	286.5 a.	848.5/a.	242331.6
Conector tipo T 1.5"	74	638	47212
Conector tipo + 1.5"	39	825	32175
Conector tipo L 1.5"	12	473	5676
Unión 1.5"	4	368.5	1474
Platina de hierro 3/16"x1"	406.6 a.	132.9/a.	54037.1
Malla de alambre galvanizado reticula 25x25ea.	250.2 m ² .	870.7/m ² .	217849.1
Soldadura	13 Kilos	741.4/kilo	9638.2
Plancha de hierro negro.	1 m ² .	4439.8/m ² .	4439.8
Accesorios para puertas: ruedas metálicas, ejes, platinas.	-	-	2000
Pintura anticorrosiva.	1 galón	3289/galón	3289
Total costo			
Jaula de Faraday			620121.8

CAPITULO IV

MALLAS DE PUESTA A TIERRA

4.1. OBJETIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA.

Los objetivos perseguidos al realizar una puesta a tierra son múltiples y generalmente propios de cada caso en cuestión. Se consideran como los más frecuentes :

- a) Establecer valores adecuadamente bajos de los voltajes entre fases y tierra, durante fallas en los sistemas de transmisión.

La elección de los pararrayos de un sistema de transmisión depende de los valores posibles de voltaje de fase a tierra durante fallas. Mientras menor sea el valor de resistencia de puesta a tierra de un sistema de transmisión menor será el voltaje entre fase y tierra en el punto de falla; y por lo tanto, menor será el voltaje nominal requerido de los pararrayos.

Un valor inferior del voltaje nominal de los pararrayos significa un valor inferior del voltaje de descarga del pararrayos, y por lo tanto, un

mayor margen de protección para una aislación dada de los equipos de subestaciones o la posibilidad de reducción en los niveles de aislación de éstos.

Por otro lado los voltajes transientes por maniobras en los sistemas de transmisión son proporcionales a los voltajes fase neutro. Como es posible esperar la ocurrencia de sobretensiones transientes durante fallas a tierra, es conveniente un valor de voltaje fase a tierra de un valor lo más bajo posible para reducir la sollicitación transiente, la cual determina el nivel de aislación de los sistemas de transmisión importantes.

- a) Proporcionar una vía de baja impedancia de falla, lo más económica posible, a un sistema, para lograr la operación rápida de los elementos de protección, relés, fusibles, etc.
- b) Conducir a tierra las corrientes provenientes de descargas atmosféricas, limitando los voltajes producidos en instalaciones eléctricas (líneas de transmisión de potencia, de comunicaciones, en subestaciones, etc.); y evitando la producción de efectos secundarios tales como arcos que conduzcan a la desconexión de parte o la totalidad de estas

instalaciones.

- d) Evitar voltajes peligrosos entre estructuras, equipos, etc. (en general elementos que pudiesen adquirir algún potencial incontrolable) y el terreno durante fallas o en condiciones normales de operación.
- e) Servir como conductor de retorno a ciertas instalaciones, equipos o consumos. Por ejemplo:
 - Puesta a tierra del neutro en instalaciones de distribución.
 - Bobinados de transformadores de potencial.
 - Circuito de telefonía por onda portadora.
 - Protección catódica.
 - Transmisión de potencia en corriente continua.
 - etc.
- f) Evitar que la corriente de falla a tierra produzca gradientes de potencial en el terreno, pudiendo sobrepasar los límites tolerados por el cuerpo humano o el de los animales que pudieran encontrarse en el lugar, originando muchas veces accidentes fatales.

REQUISITOS DE UNA PUESTA A TIERRA.

Una puesta a tierra satisfactoria proyectada debe cumplir con algunos o la totalidad de los requisitos siguientes:

- a) Deberá tener una resistencia tal que el sistema de transmisión del cual forma parte, pueda considerarse como sólidamente puesto a tierra.
- b) Deberá tener una resistencia tal que en cualquier época del año, la corriente de falla a tierra sea capaz de producir la operación de los elementos de protección.
- c) Deberá tener una impedancia de onda de un valor bajo tal, que al ocurrir descargas atmosféricas, no se produzcan arcos inversos entre las partes metálicas (por ejemplo: estructuras) y los conductores energizados.
- d) Deberá conducir a tierra las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre puntos establecidos de la superficie del terreno o entre un punto del terreno y objetos conductores vecinos.
- e) Deberá ser capaz de conducir a tierra las corrientes de falla durante el tiempo

eventualmente posible sin sobrecalentamiento de sus elementos constituyentes.

- f) Deberá ser resistente el ataque corrosivo del terreno y atmósfera.
- g) Los diferentes electrodos y elementos que conforman el sistema de puesta a tierra deben ser capaces de conducir las corrientes de falla sin calentamiento tal, que en zonas específicas, este hecho pudiese dar lugar a incendios o explosiones.
- h) En zonas con emanaciones gaseosas inflamables deberá recurrirse a métodos adecuados para evitar en su totalidad posibles arcos eléctricos entre partes metálicas o entre parte metálica y el terreno.
- i) El costo del sistema de puesta a tierra deberá ser lo más bajo posible. Por esta razón las puestas a tierra naturales tales como tuberías y estructuras metálicas enterradas deben ser consideradas; teniendo presente posibles problemas de transferencias de potencial o problemas por corrosión.

4.3. CONDUCCION ELECTRICA EN SUELOS.

En el estudio y proyecto de puestas a tierra tienen una importancia básica las características eléctricas del terreno fundamentalmente la resistividad de éste, ya que la resistencia de una puesta a tierra es directamente proporcional a la resistividad del terreno.

La resistividad de la tierra está dentro de rangos limitados, entre 1 y 10000 ohm-m., y se debe medir antes de ejecutar la instalación de una toma de tierra.

El valor de la resistividad es un valor extremadamente variable resultando función de la característica geológica del suelo, de la humedad y de la temperatura.

Las unidades de resistividad se encuentran como ohm-m; ohm-cm; ohm-pulgada; etc; unidades que se encuentran dimensionalmente correctas. Pero frecuentemente, se pueden encontrar también unidades como: ohm/m; ohm/m³; ohm-m², etc. Las unidades últimamente expuestas son dimensionalmente incorrectas y es aconsejable no usarlas.

La conducción por el terreno es básicamente de orden electroquímico y depende principalmente de:

- a) El volumen de los poros del material que constituye el terreno.
- b) Disposición y distribución de los poros.
- c) Porción de los poros rellena con agua.
- d) Conductividad del agua que llena los poros.

Valores típicos de resistividad para diferentes tipos de terreno, se indican en la tabla IV.

Es interesante conocer además, las características conductivas del concreto, puesto que en ciertos casos las partes metálicas que contiene el hormigón puede proporcionar una adecuada puesta a tierra o ayudar mucho a ella. El concreto normal seco tiene un rango para su resistividad entre 10000 y 50000 (ohm-m). Es importante la humedad contenida en el concreto, ya que influye en la capacidad de conducción de éste.

Virtualmente, todas las sustancias en estado sólido o líquido poseen en algún grado propiedades de conductividad eléctrica. Los metales son los mejores conductores, mientras que muchas sustancias, como óxidos metálicos, sales minerales, y materiales fibrosos, tienen una conductividad relativamente baja, no obstante, es favorablemente afectada por la absorción de humedad.

TABLA IV

VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDAD PARA
DIFERENTES TIPOS DE TERRENO.

TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
Terrenos vegetales húmedos	10 - 50
Arcillas, gredas, limos.	20 - 60
Arenas arcillosas.	80 - 200
Fangos, Turbas	150 - 300
Arenas	250 - 500
Suelos pedregosos (poca ve- getación)	300 - 400
Rocas	1000 - 10000

La temperatura y especialmente la humedad del suelo tiene una influencia sumamente importante en la resistividad del terreno. La influencia de la humedad depende del tipo de material que compone el terreno; una determinada cantidad o porcentaje de humedad influye en forma diferente, bien sea en una arena o una arcilla por ejemplo.

La temperatura se vuelve más estable a distancias más profundas bajo la superficie de la tierra, por lo cual si se trata de una conexión permanente es

saconcejado que los electrodos de tierra estén a una distancia considerable bajo la superficie de la tierra.

Los suelos con contenidos de sales están sujetos a variaciones considerables de la resistividad, disminuyéndola según su contenido en el suelo, o por adición de una solución salina en los alrededores de los electrodos.

Los suelos salinos están sujetos a variaciones de su resistividad con la variación de la temperatura. Como las sales son rápidamente solubles en agua, el contenido de sal de un suelo, cambiará, tal como la sal sea conducida fuera de él.

En el suelo la conducción de corriente es grandemente electrolítica, y el aumento de humedad y contenido de sal del suelo afecta radicalmente a la resistividad.

Una mayor o menor compactación del suelo influencia en la resistividad de éste. Si una mayor compactación tiene el suelo, disminuye la distancia entre partículas y se logra una mejor conducción a través del líquido contenido.

Los mejores terrenos para la toma de tierra son los

húmedos y senagosos, seguidos por los arcillosos o margas. La arena y los terrenos arenosos son de mayor resistencia y dificultan la obtención de tomas de tierra de baja resistencia.

4.4. RESISTIVIDAD DE SUELOS.

4.4.1. Tipos de suelos.

En muchos casos se ha considerado que el suelo tiene una estructura uniforme en el sitio en el cual va la puesta a tierra, de tal forma que se han desarrollado métodos de evaluación de los resultados de pruebas de resistividad y de esta manera se ha desarrollado el diseño del sistema de puesta a tierra.

Sin embargo, al considerar el suelo con características uniformes de resistividad y a una determinada profundidad, pocas veces se encuentra en la realidad. A menudo se tienen suelos que están constituidos por varias capas, cada una de las cuales tiene una diferente resistividad (ver tabla IV). Debido a esto se han hecho que métodos de evaluación para suelos uniformes puedan ser adoptados para ciertos suelos de formación no uniforme.

como ocurre comunmente.

4.4.2. Inhomogeneidad de los terrenos.

Se da lugar a que en ciertos casos se pretende extrapolar conclusiones obtenidas de mediciones realizadas en zonas estimadas similares a la zona de análisis. Por experiencias se ha llegado a concluir que con estas extrapolaciones se conducen a valores que distan mucho de la realidad. Debido a lo cual un proyecto realizado con valores errados de resistividad puede resultar mal dimensionado y por lo tanto deficiente desde el punto de vista de la seguridad y el servicio, o puede resultar sobredimensionado, lo que desde el punto de vista económico significa gastos innecesarios.

A excepción de casos muy especiales, los terrenos normalmente no son homogéneos. Por lo general las inhomogeneidades se han dado lugar, debido a razones geológicas en forma de estratos o capas de diferentes materiales más o menos paralelos a la superficie del terreno. Por lo mismo todas las teorías de medición a detallarse, consideran la existencia de

estratos paralelos.

4.4.3. Métodos de medición de resistividad.

El objeto de las mediciones de resistividad es el de determinar las resistividades y espesores (o profundidades) de los diferentes estratos hasta una profundidad adecuada. Esta profundidad dependerá de la zona de influencia de la puesta a tierra a diseñar.

Las medidas de resistividad de tierra son usadas también para encontrar la mejor profundidad para electrodos de baja resistencia. Pueden también ser usadas convenientemente para prospección geofísica, o localizar cuerpos, arcillas, etc., entre la superficie de la tierra. Finalmente las mediciones pueden ser usadas a determinar el grado de corrosión que pueden presentarse en tuberías subterráneas de agua, gas, aceite, gasolina, etc.

Para realizar la medición de resistividad de suelos, existen varios métodos, los cuales se han desarrollado de acuerdo a la experiencia en el campo y por análisis matemáticos de

investigadores, que en laboratorios han conseguido satisfactorios resultados. Los métodos de medición de resistividad son los siguientes:

- a) Mediante una barra piloto.
- b) Mediante el método de cuatro electrodos. Según las alternativas de configuración de los electrodos se tiene:
 - 1) Configuración de Wenner.
 - 2) Configuración de Schlumberger.

a) La medición de resistividad mediante una barra piloto, es llamado también como "MÉTODO DE 3 ELECTRODOS". Es muy poco utilizado, debido a sus limitaciones, consiste en medir la resistencia a tierra de una barra de dimensiones conocidas enterrada en el terreno del cual se desea conocer la resistividad. La resistencia de la barra piloto se determina con el método tradicional de tres electrodos y de la ecuación de resistencia de la barra se determina el valor de la resistividad (ver Fig. 4.1).

Una de las expresiones para la resistencia

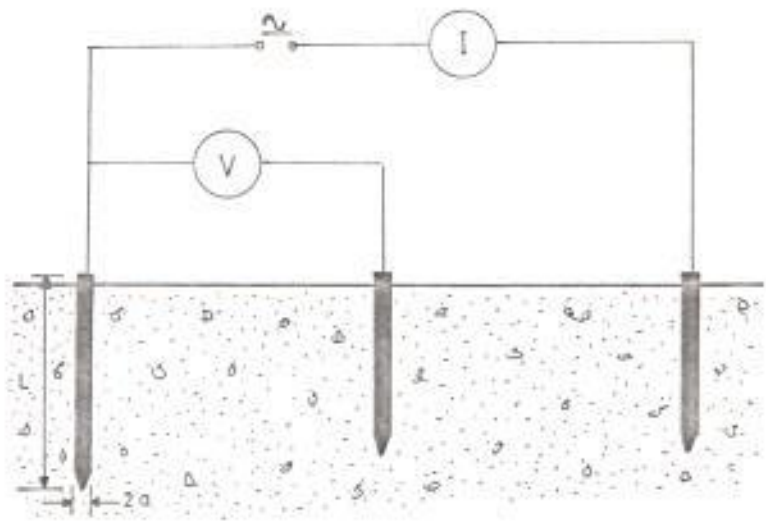


Fig. 4.1 Disposición de los electrodos en el método de la barra piloto.

de una barra de longitud L y radio a , enterrada en un medio homogéneo de resistividad δ es:

$$R = \frac{\delta}{2\pi L} \ln \frac{2L}{a}$$

de donde se obtiene que la resistividad δ del terreno, considerado homogéneo, es la siguiente:

$$\delta = \frac{2\pi RL}{\ln \frac{2L}{a}}$$

Analizando el criterio para terrenos

inhomogéneos, se puede considerar que la resistividad deducida de la ecuación anterior, corresponde a una "RESISTIVIDAD EQUIVALENTE" o promedio del terreno. Sin embargo esta "resistividad equivalente", carece de significado general y no es aplicable a cualquier electrodo de puesta a tierra.

La zona de influencia de una determinada puesta a tierra, como la profundidad, depende básicamente de la longitud de la barra. Analizando esta circunstancia para el caso de terrenos no homogéneos se concluye que la "resistividad equivalente" deducida mediante una barra de otra longitud, por lo que se puede decir que la "resistividad equivalente" de un electrodo con una determinada zona de influencia no es aplicable a otro electrodo con diferente zona de influencia.

- b) El método general de medición de resistividad por medio de 4 electrodos consiste en inyectar al terreno una corriente mediante un par de ellos y medir la diferencia de potencial entre los otros

dos. Este método es el más usado.

La corriente que se inyecta puede ser corriente continua, corriente alterna de baja frecuencia (hasta 200 Kz.) por razones de acoplamiento entre conductores, ó corriente continua conmutada de baja frecuencia (ver Fig. 4.2).

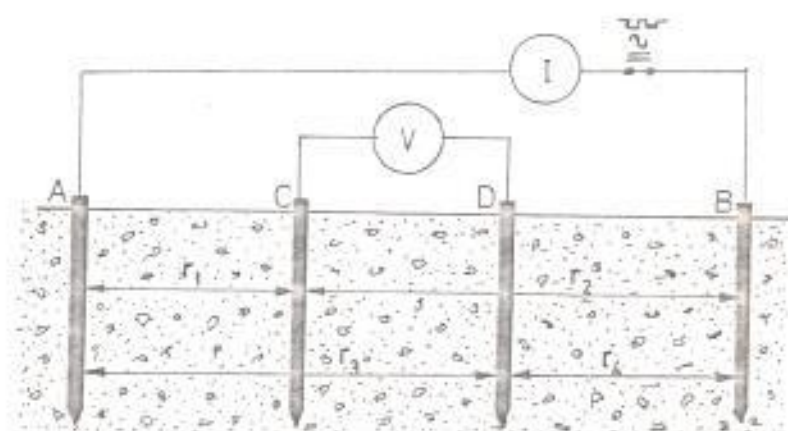


Fig. 4.2 Disposición de los electrodos en el método de los 4 electrodos.

Entre los electrodos A y B se inyecta una corriente I y entre los electrodos C y D se mide la diferencia de potencial V . A partir de los electrodos de corriente se definen las distancias a los electrodos de potencial.

La ecuación fundamental para la medición de resistividad ρ mediante 4 electrodos es:

$$\delta = \frac{2 \pi V}{I} \frac{1}{(1/r_1 - 1/r_2) + (1/r_3 - 1/r_4)}$$

Siendo r_1, r_2, r_3, r_4 las distancias definidas a partir de los electrodos de corriente a los electrodos de potencial.

Para la deducción de esta ecuación fundamental se ha considerado un terreno de resistividad homogéneo. En el caso de que el medio no sea homogéneo el valor de δ obtenido de aplicar la ecuación fundamental tiene un valor ficticio que no corresponde en general a ninguna de las resistividades presentes en el terreno, sino más bien a una cierta combinación de ellas. Por supuesto en un terreno homogéneo la resistividad leída o calculada, corresponde a la resistividad real del terreno y su valor es independiente de la separación entre electrodos.

Si un número de pruebas sobre el sitio de la puesta a tierra, no dan variaciones significativas en la medición de valores de δ , la resistividad del suelo puede ser considerada uniforme, y el valor de δ

obtenido es el valor actual de resistividad.

Según la configuración relativa de la ubicación de los electrodos en el terreno, existen diferentes configuraciones con ventajas y desventajas leves de una a otra:

a) Configuración Wenner.

En este tipo de configuración de cuatro electrodos, ubicados sobre la línea recta, se encuentran separados una distancia igual A entre ellos (ver Fig.4.3). En este caso se tiene que:

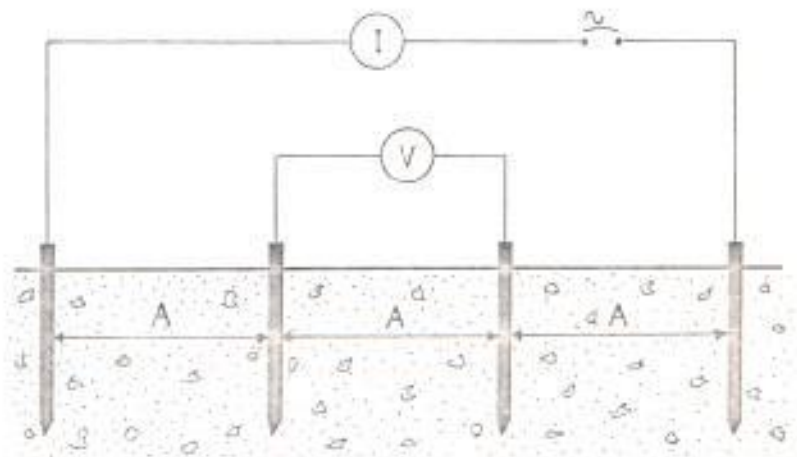


Fig.4.3 Disposición de los electrodos en la configuración de Wenner.

$$r_1 = r_4 = A :$$

$$r_2 = r_3 = 2A.$$

Estos valores reemplazados en la ecuación fundamental se tiene:

$$\delta_{aw} = \frac{2\pi V}{I} \frac{1}{(1/A - 1/2A) - (1/2A - 1/A)} =$$

$$\delta_{aw} = \frac{2\pi V}{I} A$$

δ_{aw} = Resistividad medida por el método de Wenner.

Si el valor de V/I , medido directamente con un instrumento se designa por R , tendremos:

$$\delta_{aw} = 2\pi R A.$$

b) Configuración Schlumberger.

Según esta configuración los 4 electrodos se ubican en línea recta. Los dos electrodos de potencial se disponen simétricamente con respecto al centro de medición elegido y a una distancia entre sí pequeña (1 - 3 m.).

Se ubican también simétricamente los electrodos de corriente con respecto al centro de medición (ver Fig. 4.4).

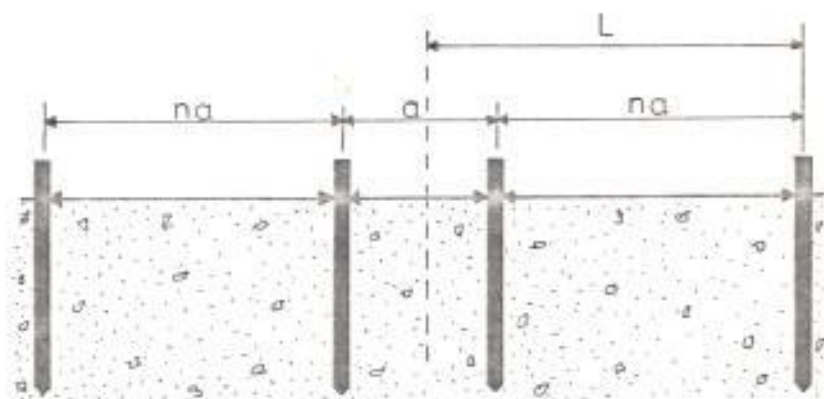


Fig.4.4 Disposición de los electrodos en la configuración Schlumberger.

Los electrodos de potencial deben permanecer fijos durante la serie de mediciones, moviéndose solamente los de corriente.

Según la configuración tenemos:

$$r_1 = (n)a$$

$$r_2 = (n+1)a$$

$$r_3 = (n+1)a$$

Reemplazando estos valores en la ecuación fundamental tenemos que:

$$\delta_{sch} = R(n) \cdot (n+1) \cdot a;$$

Siendo δ_{sch} = la resistividad medida por el método de Schlumberger.

Si $a = 1$ m., el valor de n representa la distancia en metros entre el electrodo de corriente y el de potencial adyacente.

En esta configuración, por lo regular se elige un valor de $a = 1$ m. Si al aumentar n , el valor leído es muy pequeño o el instrumento llega a un límite inferior, convendrá aumentar el valor de A , hasta unos 3 m.

De las diferentes configuraciones y modalidades analizadas, las más comúnmente usadas son las de Wenner y Schlumberger.

Se consideren dos formas de realizar la medición de resistividad de terrenos:

a) Por el perfil eléctrico: en esta forma se mantiene invariable la

separación entre electrodos, trasladándose el conjunto de 4 electrodos a lo largo de una línea perpendicular a la línea de ubicación de electrodos. Generalmente se repiten las mediciones para distintas separaciones de electrodos. Aunque esta forma de medición no es generalmente utilizada, presta cierta utilidad como ayuda a una mejor interpretación del sondeo eléctrico en un terreno con variaciones laterales importantes.

- b) Por sondeo eléctrico; en el cual el centro y eje de medición permanecen fijos mientras se aumenta la separación entre electrodos; los electrodos de corriente y potencial para la configuración Wenner y solo los de corriente para la configuración Schlumberger.

4.4. Interpretación de las medidas de resistividad del terreno.

Existe gran variedad de métodos para la

interpretación de las medidas de resistividad aparente y deducir las características del terreno. La mayoría de estos métodos son empíricos que, sin embargo, casi todos estos permiten deducir de manera aproximada, solo la ubicación de los diferentes estratos y no las resistividades de estos. A pesar de esto, se los puede usar con criterio y puede servir como guía para una solución más exacta con otros métodos más científicos pero mucho más complicados.

A continuación se verán algunos métodos empíricos de interpretación a partir de los valores de resistividad aparente, medidos en el terreno.

a) Método de quiebres.

Consiste en trazar el gráfico de resistividad aparente en función de la separación entre electrodos para la configuración Wenner. Este gráfico debe realizarse en escalas lineales, logarítmica - lineal, bilogarítmica, etc. Dentro de estos gráficos encontrar los quiebres de las curvas y ubicar en cual de estos

gráficos se manifiestan más claramente los quiebres. Los puntos de ubicación de los quiebres corresponden a los puntos de cambio de las características del terreno.

Este método, además de ser empírico y no sustentado por ningún criterio teórico, tiene el inconveniente de estar sujeto a factores sumamente subjetivos en cuanto al trazado de rectas, que aproximen un cierto número de puntos del gráfico. Por lo tanto, su aplicación se justifica a lo mucho como un primer paso en la interpretación de las medidas.

b) Método acumulativo de Moore.

Este método facilita determinar los puntos de cambio del material y no su resistividad; consiste en realizar mediciones en base a la configuración de Wenner a intervalos regulares en base a la separación de electrodos. Para cada valor de la separación entre electrodos se calcula el sumatorio de los valores de resistividad aparente hasta la separación considerada. Aplicar a continuación el

método de los quebres ya descrito.

Este método de igual forma que el anterior tiene los mismos inconvenientes.

c) Método de Barnes.

Este método considera que la profundidad de penetración de la corriente de medición (Wenner) es igual a la separación entre electrodos y que el valor medido de resistividad aparente corresponde a un cierto promedio de las resistividades hasta esa profundidad. Se supone que si aumenta la separación entre electrodos se agrega una capa de material igual al incremento de separación. Si para una cierta separación entre electrodos A_i , la resistencia medida vale R_i ; y para una separación mayor $A_{(i+1)} = A_i + \Delta A$ la resistencia vale $R_{(i+1)}$, entonces la resistencia de la capa de espesor ΔA vale:

$$1/\Delta R = 1/R_{(i+1)} - 1/R_i$$

Suponiendo que la capa ΔA actúa como si estuviera conectada en paralelo con el

terreno superior. Por lo tanto, la resistividad de la capa ΔA valdrá:

$$\delta\Delta A = 2\pi \Delta R \Delta A = \frac{2\pi \Delta A}{1/R(i+1) - 1/Ri}$$

Según este método puede decirse que la profundidad de penetración de la corriente dista mucho de ser igual a la separación entre electrodos. La experiencia y comparación con otros métodos más exactos indican que los resultados obtenidos no corresponden, en la mayoría de los casos, con la realidad. Sin embargo, este método de Barnes permite una primera aproximación en forma mejor que las dadas por los métodos ya descritos.

d) Mediante curvas patrón.

Consiste en la comparación de los gráficos de terreno con curvas patrón construidas o definidas para diferentes casos de combinación de diferentes capas. Considera, en la mayoría de los casos, que las diferentes capas son paralelas a la

superficie del terreno.

Si se obtiene un calce perfecto entre la curva del terreno y una curva patrón se supone que la estructura analizada es idéntica a la teórica. Tanto el gráfico de terreno como los gráficos patrón se realizan en papel log-log. Esto se debe a que se desea tener una independencia de las unidades y magnitudes de la medición de modo que una curva patrón sirva para interpretar diferentes estructuras.

En la práctica existen para la configuración Wenner y Schlumberger, curvas patrón para cada tipo de método. Si se efectúa una medición en terreno con la configuración Wenner, deberá usarse solo curvas patrón correspondientes a esta configuración.

RESISTENCIAS DE TIERRA.

En sistemas en donde la máxima corriente de tierra puede ser muy alta, raras veces es posible obtener una resistencia de tierra baja para asegurar totalmente que la subida del potencial del sistema de

tierra no alcance valores inseguros para el contacto humano. Siendo este el caso, el daño puede ser corregido solamente por control de potenciales locales. Una malla es usualmente la más práctica forma de conseguir esto.

Si esta malla de tierra está enterrada en el suelo de buena conductividad, esta malla puede facilitar un excelente sistema de puesta a tierra.

4.2.1. Objetivos.

En las subestaciones se trata de obtener una malla de OPERACION de resistencia baja y una buena malla de PROTECCION. La forma más económica de lograr ambos objetivos es el diseñar una sola malla que cumpla ambas funciones. En general se empleará la misma malla de tierra con fines de protección y servicio.

Los propósitos de una malla de tierra de una subestación son los siguientes:

- a) Obtener baja resistencia de tierra a neutro para limitar sobrevoltajes en el sistema y ayudar a la operación de los relés de

protección.

- b) Limitar gradientes de potencial a lo largo de la superficie de la tierra durante condiciones de corto circuito, y así mismo diferencias de potencial entre puntos cercanos, con el fin de evitar peligro a personas en el Área.

Las partes no conductoras de corriente, con superficies de conducción, tales como armazones de máquinas, cabinas, herramienta manual metálica y conductos, pueden adquirir potencial eléctrico en varios caminos, y para la protección de personas, propiedades, tales potenciales serán conducidos a una malla de tierra de baja resistencia.

4.5.2. Tipos.

Existen 2 tipos de tierra de acuerdo a su función, una con fines de servicio y otra con fines de protección y de servicio. En las subestaciones se trata de obtener una malla de servicio de baja resistencia y una buena malla de protección. La forma más económica es diseñar una sola malla que cumpla ambas

funciones.

De acuerdo a su dimensionamiento las mallas de tierra pueden ser de 4 tipos clasificados en orden creciente de precisión:

- 1) Por disposición de la instalación de tierra y de las conexiones de los aparatos.
- 2) Por tensión máxima admisible de los electrodos de tierra respecto a la tierra de referencia.
- 3) Por diferencias máximas de tensión entre partes accesibles.
- 4) Por máxima corriente admisible para el cuerpo humano.

Según la resistencia de la instalación de tierra se pueda clasificar las mallas de tierra en dos tipos:

- 1) Menor de 1 ohm.
- 2) Mayor de 1 ohm.

4.5.3. Elementos constitutivos de una malla de tierra.

La geometría de la malla es a menudo compleja debido a razones específicas para cada caso, generalmente esto se debe a que por estar enterrada horizontalmente a poca profundidad debe adaptarse a la forma del edificio y del equipo. Una malla de cables como se muestra en el gráfico 4.5, es generalmente instalada para plantas de potencia y subestaciones.

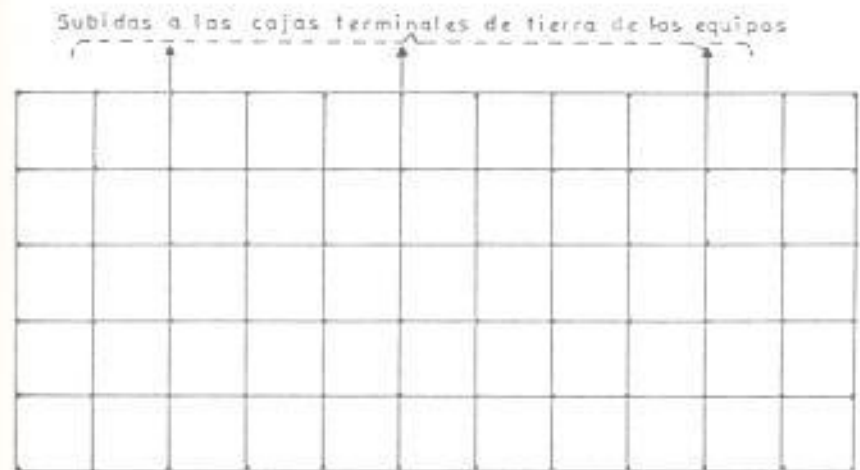


Fig.4.5 Malla de cables generalmente instalada en plantas de potencia y subestaciones

En general la malla de tierra es una red de cables de cobre, enterrados a cierta profundidad, con una separación media variable entre cables formando retículas cuyas dimensiones pueden oscilar entre 3 m. x 3 m. a

20 m. x 20 m., dentro de los patios de alta tensión y zonas de circulación.

El rango de variación de la retícula es de importancia ya que una dimensión más pequeña encarece el costo de la malla sin lograr una variación de importancia en la distribución de potencial, porque se produce un efecto de apantallado entre los conductores. Por el contrario si las dimensiones fueran superior a las dadas ya no se logra una superficie equipotencial desvirtuando de esta manera la función principal de la malla de puesta a tierra.

Normalmente se emplean barras de copperweld de puesta a tierra de 3 m. de longitud, ocasionalmente de 6 m., ubicadas en la periferia de la malla. En los puntos de puesta a tierra de los transformadores de potencia y de los pararrayos se colocan barras de puesta a tierra adicionales.

Para las conexiones en la malla de tierra se ha intensificado el uso de conexiones autofundidas (Thermoweld, Cadweld). Según el diagrama de la Fig. 4.6, los elementos constitutivos de una malla de tierra son los

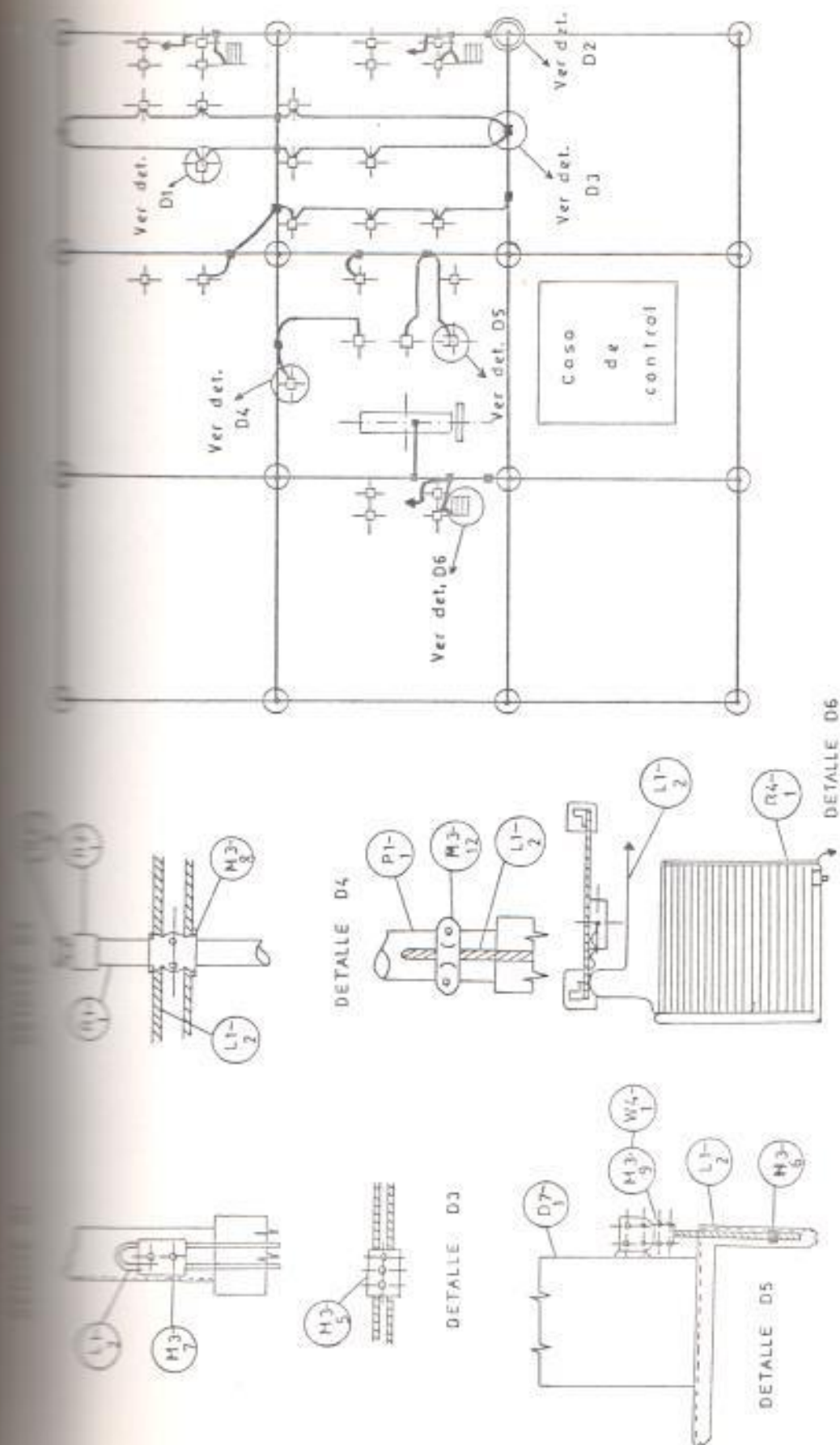


Fig.4.6 Elementos constitutivos de una malla de tierra.

siguientes:

REFERENCIA	DESCRIPCION
L1-2	Cable de cobre estañado.
R1-1	Barra de Copperweld para electrodos de tierra.
R2-1	Copla de bronce para barra de tierra.
R2-2	Perno de bronce para enterrar barra de tierra.
R4-1	Regillas de hierro galvanizado para operar desconectores.
M3-6	Conector de tierra, Burndy Tipo GBM.
M3-7	Conector de tierra, Burndy Tipo GL.
M3-8	Conector de tierra, Burndy Tipo GP.
M3-9	Conector de tierra, Usco Tipo VU.
M3-5	Grapa paralela, Burndy Tipo UC y Tipo CP.
M3-12	Conector de tierra, Burndy Tipo GAR.
-	Maila de copperweld.

Los puntos de empalme de líneas de tierra y

tomas de tierra pueden ir soldados, atornillados, remachados o unidos a presión. Hay que establecerlos de manera que se tenga garantizado en todo momento una buena unión eléctrica segura.

En cada caso hay que prever una protección contra la corrosión.

Los conductores de la malla tienen como función fundamental el conducir las corrientes de falla y disiparlas a tierra con eficiencia durante determinado tiempo (30 seg. o más) sin sufrir daño alguno.

Las barras de copperweld para electrodos de tierra tienen como función principal el dar lugar a un buen camino a tierra (baja resistencia) cuando corrientes de falla se producen en el sistema.

La regilla de hierro galvanizado tiene como función el operar los desconectores en caso de darse lugar a esta operación para dar seguridad al sistema de puesta a tierra.

Los conectores de tierra tienen como función

el ejercer buena consistencia mecánica y buena conducción eléctrica. Similar función tienen las grapas, pernos, coplas, etc., dentro del sistema de malla de tierra.

3.4. Método de la IEEE para el diseño de mallas de tierra.

El método propuesto por la IEEE para el diseño de mallas de tierra, es el más utilizado para tal fin, y cuyo procedimiento se lo puede clarificar en cuatro secciones definidas:

- 1) Diseño preliminar.
- 2) Datos y cálculos.
- 3) Comprobación de los límites de seguridad.
- 4) Diseño definitivo.

1) Diseño preliminar.

El diseño de una malla de tierra generalmente comienza con una inspección del plan trazado para el equipamiento y estructuras.

Un cable continuo debe rodear el perímetro de la malla logrando encerrar más tierra:

deben evitarse puntas de cable sin conectar.

Dentro de la malla los cables deben ser colocados en líneas paralelas y preferiblemente a espacios uniformes y razonables. Ellos obviamente deben estar cerca de todas las salidas a estructuras y equipos para facilitar la conexión a tierra.

El diseño preliminar debe ser ajustado de tal modo que la longitud total de los conductores enterrados, incluyendo varillas, sea mayor o igual al valor de L mínimo a calcularse más adelante.

No es aconsejable realizar excesivos cruces transversales en la malla aunque en algunos casos es recomendable ya que aseguran la continuidad de la malla en caso de daños mecánicos.

2) Datos y cálculos necesarios para el diseño.

Datos:

Es necesario conocer los siguientes datos antes de iniciar cualquier cálculo:

- Tiempo máximo de despeje de fallas a tierra en la subestación: t (seg.).
- Resistividad del suelo donde se levantará la subestación: δ (ohm-m).
- Profundidad propuesta para enterramiento de la malla de tierra: h (m).
- Voltaje nominal de la subestación: V (voltios).
- Impedancia de fallas de sistemas:
 R_1, R_2, R_0 = Resistencias de secuencia positiva, negativa y cero, vistas desde el punto de falla (ohm/fase); X_1'', X_2'', X_0'' = reactancias de secuencias positiva, negativa, y cero, vistas desde el punto de falla (ohm/fase).
- Área de la subestación cubierta por la malla de tierra: A (m²).

Cálculos.

Se procede al diseño del sistema de tierra siguiendo el ordenamiento detallado a continuación:

- Calcular la resistencia estimada (R) del sistema, aplicando el método propuesto por Laurent.

$$R = \frac{\delta}{4r} + \frac{\delta}{L} \quad (\text{ohm})$$

Donde:

δ = resistividad del terreno supuesto homogéneo en (ohm-m).

r = radio de un círculo cuya área sea equivalente al área de la malla prediseñada en (m).

L = longitud del conductor a utilizarse, precalculada en el diseño preliminar en (m).

- Determinar cuales son las fallas a tierra posibles que resultarán de un flujo grande de corriente entre la malla y la tierra en los alrededores.
- Calcular la corriente de falla a tierra en el momento de la iniciación de la falla (I'').

respecto a la onda de voltaje; para permitir que asumamos las condiciones más severas, es necesario tomar un desplazamiento del 100 % de la onda. Aplicar la tabla V, para la obtención del factor D.

TABLA V
RELACION ENTRE LA DURACION DE LA FALLA Y
EL FACTOR DE DECREMENTO.

DURACION DE LA FALLA		FACTOR DE DECREMENTO
seg.	ciclos (Hz.)	
0.08	0.5	1.65
0.10	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 o más	30 o más	1.00

- Considerar un factor de corrección (k) por acción de cambios futuros en la subestación. Se recomienda un factor $k = 1.5$.

- La máxima corriente de falla será:

$$I = (k) (D) (I'') \quad (\text{Amp.})$$

- Calcular el calibre mínimo del conductor a enterrarse. Se lo calcula en base a la ecuación de ONDERDONK:

$$S = I \sqrt{\frac{33 t}{\log \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}} \quad \text{C.M.}$$

Donde:

S = Sección mínima del conductor (C.M.).

I = Máxima corriente de falla (Amp.).

t = Tiempo de falla (seg.).

T_m = Temperatura máxima permitida (°C).

T_a = Temperatura media del suelo a nivel de enterramiento (°C).

Las siguientes asunciones son válidas cuando se utiliza la ecuación de arriba:

T_a = 40 °C.

T_m = - Temperatura de fusión del cobre: 1083 °C.

- Temperatura máxima permitida en una junta con soldadura: 450 °C.

- Temperatura máxima permitida en una junta empernada: 250 °C.

Para una determinación rápida del calibre del conductor de cobre, se aplican los valores presentados en la tabla VI.

TABLA VI

SECCION MINIMA DEL CONDUCTOR Cu. PARA EVITAR FUSION.

tiempo (seg.)	Cable solo (MCM/Amp.)	Junta soldada (MCM/Amp.)	Junta con perno (MCM/Amp.)
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.55

Para garantizar una seguridad de carácter mecánico, se recomienda utilizar como mínimo conductor de cobre de calibre 2/0 AWG (133.1 MCM).

- Calcular la longitud mínima de conductor requerido para evitar problemas de gradientes "L".

La expresión de longitud mínima de

conductor requerido resulta de la condición de que el voltaje de toque debe ser necesariamente mayor al voltaje de malla.

$$V_{\text{TOQUE}} = \frac{165 + 0.25 \delta s}{\sqrt{t}} \quad (\text{volt.})$$

$$V_{\text{MALLA}} = (K_m)(K_i)(\delta)(I)/L \quad (\text{volt.})$$

de donde resulta:

$$L = \frac{(K_m)(K_i)(\delta)(I)(\sqrt{t})}{165 + 0.25 \delta s} \quad (\text{m.})$$

Donde:

K_m = coeficiente que considera el efecto de n , D , d , h .

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{3}{4} \left(\frac{5}{\delta} \right) \dots \text{etc} \right]$$

D = Espaciamiento propuesto para los conductores de la malla (m.).

d = Diámetro del conductor de la malla (m.).

h = Profundidad de enterramiento de la

malla (m.).

NOTA: El número de términos en paréntesis será igual a $(n-2)$, siendo n el número de conductores en paralelo de la malla sin considerar los transversales.

K_i = Factor de corrección por el flujo irregular de corriente hacia el terreno. Está definido por la siguiente ecuación empírica:

$$K_i = 0.65 + 0.172 n.$$

n = Número de conductores en paralelo de la malla.

δ = Resistividad del terreno (ohm-m).

δ_s = Resistividad superficial del terreno. Se estima en 3000 ohm-m, que es el valor que tiene la piedra triturada o grava para condiciones de máxima humedad.

I = Corriente máxima de falla (amp.).

t = Tiempo de despeje de la falla (seg.).

Es razonable que la longitud calculada

exceda hasta en un 15 % la longitud del conductor necesario para ser enterrado.

- Analizar el valor obtenido de " L " mediante comparación con la longitud propuesta en el diseño preliminar. Se pueden presentar las siguientes alternativas:

a) Que el valor de " L " calculado sea menor al prediseñado, lo cual nos indica que la malla de tierra es suficiente para disipar toda la corriente de falla y que no se necesitan jabalinas de puesta a tierra.

b) Que el valor de " L " calculado sea un poco superior al prediseñado pero con una redistribución de los espaciamientos entre conductores se logre obtener la longitud mínima necesitada en cuyo caso tampoco se necesitan jabalinas.

c) Que el valor de " L " calculado sea mucho mayor al prediseñado en cuyo

caso es necesario una redistribución de los espaciamentos entre conductores y además se deben utilizar jabalinas de puesta a tierra.

3) Comprobación de los límites de seguridad.

En esta sección del método se procede a verificar que los límites de seguridad propuestos sean satisfechos por la malla diseñada. Es necesario realizar las siguientes comprobaciones:

- a) Chequeo que el voltaje de toque sea mayor que el voltaje de malla.
- b) Chequeo que el voltaje de paso sea mayor que el voltaje de paso perimetral.
- c) Chequeo del máximo voltaje de malla.

Si se cumplen todas estas condiciones se tendrá un buen diseño de malla.

a) Chequeo del voltaje de Toque.

Es necesario cumplir la condición siguiente:

Voltaje de Toque permitido por el cuerpo humano, sea mayor que el voltaje de malla producido. (Ver anexo E).

$$V_{\text{TOQUE}} = \frac{165 + 0.25 \delta s}{\sqrt{t}} \quad (\text{volt.}).$$

$$V_{\text{MALLA}} = (K_m)(K_i)(\delta)(I)/L \quad (\text{volt.}).$$

Si $V_{\text{TOQUE}} \geq V_{\text{MALLA}}$ la malla de tierra cumple con la condición.

b) Chequeo del Voltaje de Paso.

Es necesario comparar el voltaje de paso tolerado por el cuerpo humano con el máximo voltaje de paso perimetral.

$$V_{\text{PASO}} = \frac{165 + \delta s}{\sqrt{t}} \quad (\text{volts.})$$

$$V_{\text{MAX.PASO}} = (K_s)(K_i)(\delta)(I)/L \quad (\text{volts.})$$

Donde:

K_s = Coeficiente que toma en cuenta el

efecto del número de conductores, el espaciamiento y la profundidad de enterramiento de los conductores de la malla. Su valor en término de estos factores es el siguiente:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)$$

D = Espaciamiento propuesto para los conductores de la malla (m.).

h = Profundidad de enterramiento de la malla (m.).

NOTA: El número de términos en paréntesis será igual al número de conductores en paralelo sin considerar los transversales.

La condición a cumplirse será:

$$V_{\text{PASO}} > V_{\text{MÁX.PASO}}$$

c) Chequeo del máximo voltaje de malla.

Finalmente es obligada la comprobación de que el máximo voltaje de malla sea

menor que el voltaje de paso tolerado por el cuerpo humano.

$$V_{\text{MAX.MALLA}} = (I)(R) \quad (\text{volts.})$$

Donde:

I = Máxima corriente de falla a tierra (Amp.).

R = Resistencia de la malla con valor de "L" corregido (ohm).

Para el cálculo de esta resistencia referirse a la sección 4.5.5.

4) Diseño definitivo.

Si se ha logrado cumplir con todos los requerimientos de seguridad personal y de equipos, considérese el diseño preliminar definitivo.

4.5.5. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra.

En el cálculo de la resistencia de mallas de

tierra existe una gama de métodos de cálculo. Las ecuaciones para el cálculo de resistencia de tierra, exceptuando para la mayoría de arreglos elementales de electrodos, son muy complicados y para arreglos asimétricos de electrodos inalcanzables.

Las ecuaciones para el cálculo de resistencia de tierra para el arreglo más simple de electrodos asume que el electrodo está rodeado por el suelo de resistividad uniforme. Como es bien conocido la composición del suelo varía grandemente de un punto a otro, algunas veces cambiando grandes porcentajes en una distancia de una milla o menos. Además de la composición del suelo, el contenido de humedad y temperatura varía apreciablemente a diferentes profundidades bajo la superficie de la tierra. No es muy común encontrar grandes variaciones en estos factores en los primeros 3 metros pies bajo la superficie del suelo.

Los métodos son los siguientes:

a) Método de Laurent y Niemann.

El método de Laurent y Niemann permite el

cálculo aproximado de la resistencia de una malla de tierra consistente en un reticulado sin barras:

$$R = \frac{\delta}{4r} + \frac{\delta}{L}$$

donde:

R = Resistencia de la malla de tierra.

r = Radio equivalente de la malla ($r = \sqrt{A/\pi}$) en m.

A = Area total que abarca la malla en m².

δ = Resistividad del suelo supuesto homogéneo en ohm-m.

L = Longitud del conductor del reticulado en m.

Una forma particular de la expresión de Laurent y Niemann para el cálculo de una malla en un medio biestratificado para el caso en que el reticulado está dentro del estrato superior de una resistividad δ_1 superior a la del estrato inferior δ_2 es:

$$R = \frac{\delta_2}{4r} + \frac{\delta_1}{L}$$

Estas expresiones son de uso simple y rápido. Se utilizan generalmente en las primeras etapas de cálculo para un conocimiento aproximado de la resistencia de una malla que cubrirá una determinada área, generalmente pre establecida, como es el caso de mallas de subestaciones.

b) Método de Dwight.

Este método considera una malla de tierra de una subestación, formada por los conductores horizontales, siendo despreciadas las jabalinas de tierra. De esta manera obtenemos un resultado de resistencia de puesta a tierra un poco mayor del valor real, consecuentemente se puede proyectar a partir de este valor una malla de tierra con un cierto coeficiente de seguridad.

La primera ecuación de Dwight a ser usada expresa un cálculo de resistencia de tierra de un conductor horizontal, considerando un factor de profundidad:

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} \right)$$

siendo:

R_s = Resistencia de tierra propia de un conductor horizontal colocado en la tierra en (ohm).

L = Longitud del conductor en cm.

h = Profundidad del conductor en cm.

r = Radio del conductor en cm.

δ = Resistividad del suelo en ohm-cm.

Una vez calculada la resistencia a tierra de un solo conductor, procedemos al cálculo de la resistencia adicional debido a las interferencias mutuas entre la conductancia de cada conductor con cada una de las conductancias de los demás conductores. Tal resistencia adicional es dada por la segunda ecuación de Dwight:

$$R_a = \frac{\delta}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{E} - 1 + \frac{E}{2L} - \frac{E^2}{16L^2} \right)$$

donde:

R_a = Resistencia mutua adicional en ohm.

L = Longitud del conductor en cm.

δ = Resistividad del suelo en ohm-cm.

E = Espaciamiento equivalente entre un conductor y los demás en cm.

Para la determinación del espaciamento E , basta consultar la tabla VII, determinando un factor F a ser multiplicado por el espaciamento real, ϵ , entre los conductores paralelos.

$$E = (\epsilon)(F)$$

La resistencia total de tierra de un conductor será entonces:

$$R_c = R_s + (N-1) R_a$$

Y la resistencia a tierra de N conductores en paralelo será:

$$R_{cp} = \frac{R_c}{N}$$

Debe considerarse en adición las resistencias de los conductores de unión (los conductores transversales) a saber:

R_{sj} = Resistencia propia de un conductor de

TABLA VII

FACTOR DE ESPACIAMIENTO EFECTIVO USADO EN EL CALCULO DE RESISTENCIA MUTUA DE UN CONDUCTOR CON CUALQUIER OTRO CONDUCTOR DE LA MALLA.

Número de conductores de la malla	Factor de espaciamento efectivo. (F)
2	1.00
3	1.26
4	1.51
5	1.76
6	2.01
7	2.25
8	2.49
9	2.73
10	2.97
11	3.21
12	3.44
13	3.50
14	3.70
15	3.85
16	4.00
17	4.15
18	4.30
19	4.45
20	4.55
21	4.70
22	4.85

unión.

R_{aj} = Resistencia mutua adicional debido a cada uno de los otros $(n-1)$ conductores de unión.

Estos valores de resistencia de puesta a tierra de conductores de unión son calculados de manera análoga a la expuesta anteriormente.

Como no hay un método preciso para obtener un factor de espaciamiento que pueda ser usado para determinar la resistencia mutua entre los conductores de unión y los otros conductores de la malla, se usa un artificio de sumar las resistencias mutuas de los componentes como sigue:

$$R_{am} = (n-1) R_{aj} + (N-1) R_a$$

La resistencia de tierra de un conductor de unión es igual a:

$$R_{cj} = R_{sj} + R_{am}$$

La resistencia de los conductores de unión en paralelo es:

$$R_{cjp} = \frac{R_{cj}}{n}$$

La resistencia de puesta a tierra total de la malla viene dada por:

$$R = \frac{(R_{cp}) (R_{cj})}{R_{cp} + R_{cj}}$$

c) Método de Koch.

Este método se refiere a la asociación de electrodos en paralelo, basado en la resistencia de aterrizamiento de un solo electrodo cilíndrico:

$$R = \frac{\delta}{2\pi L_1} + \ln \frac{4 L_1}{d},$$

así como en la eficacia de paralelismo de esos electrodos.

Datos obtenidos en la práctica demuestran que la eficacia de jabalinas en paralelo decrece a medida que aumenta el número de jabalinas. Hay por lo tanto un límite práctico para aquel número de jabalinas que pueden ser clavadas en una determinada

Área. Eso resulta del hecho que a medida que aumenta el número de jabalinas en una determinada área, el espaciamiento entre ellas disminuye. Los cilindros de tierra que circundan las jabalinas, y que determinan una resistencia de tierra, tienden a envolverse unos a otros. Introduciendo jabalinas adicionales en un espacio muy estrecho no se obtendrá alguna reducción significativa en la resistencia de la malla, o sea, las jabalinas adicionales, simplemente aumentan el costo de la instalación. Basado en estos antecedentes se fundamenta el método de Koch cuya resistencia de puesta a tierra, se expresa por la ecuación siguiente:

$$R = \frac{\delta}{2\pi L_1 n} \left(\ln \frac{4L_1}{d} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \ln \frac{\sqrt{m_i^2 + \Gamma + 1}}{\sqrt{m_i^2 + \Gamma - 1}} \right)$$

donde:

R = Resistencia de puesta a tierra de n jabalinas en ohm.

δ = Resistividad del suelo en ohm-m.

L₁ = Parte enterrada de la jabalina cilíndrica en m.

n = Número de jabalinas.

d = Diámetro de la jabalina cilíndrica en
m.

$$m_i = \frac{a_i}{L_1}$$

a_i = Distancia entre la jabalina considerada
y cada una de las demás jabalinas, en
m.

d) Método de la Compañía Italo - Argentina de
Electricidad S.A.

Considera un sistema de tierra, formado
por una malla y por jabalinas de puesta a
tierra.

- La resistencia de la malla de tierra (R_m)
está dada por la siguiente fórmula
empírica:

$$R_m = \frac{\delta}{2 D}$$

donde:

δ = Resistividad media del terreno (ohm-
m).

D = Diámetro del círculo equivalente a la superficie interesada por la malla, en m.

- Resistencia equivalente de n jabalinas interconectadas entre sí (R_j):

$$R_j = \frac{1}{n} \frac{\delta}{2\pi L_1} \ln \frac{2L_1}{r_0}$$

Para distancia entre jabalinas mayor que $4L_1$.

$$R_j = \frac{\delta}{2\pi L_1} \ln \frac{2L_1}{R_{MG}}$$

Para distancias entre jabalinas menor a $4L_1$.

donde:

R_{MG} = Radio medio geométrico entre jabalinas.

L_1 = Longitud de la jabalina en m.

δ = Resistividad media del terreno a la profundidad que se encuentra la jabalina, en ohm-m.

r_0 = radio de la jabalina en m.

- La resistencia de la combinación Malla - Jabalina (R_I).

La resistencia del sistema se transforma aproximadamente en el paralelo de la resistencia de la jabalina y la de la malla (se desprecia la influencia mutua).

$$R_T = \frac{(R_j)(R_m)}{R_j + R_m}$$

e) Método de la Corporación Eléctrica Mitsubishi.

Este método es aplicable para mallas de tierra con jabalinas incorporadas. El objetivo perseguido es lograr un valor de resistencia de malla de tierra menor a 1 ohm.

Las fórmulas de Shwarz's para malla y jabalina son aplicadas:

$$R_{11} = \frac{1.045 \delta}{L} \left(\ln \frac{2L}{a} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \text{ ohm.}$$

$$R_{22} = \frac{0.52 \delta}{n L_1} \left[\ln \frac{4L_1}{b} - 1 + \frac{2 K_1 L_1}{\sqrt{A}} (\sqrt{n}-1)^2 \right]$$

en ohm.

donde:

R11 = Resistencia de tierra producida por los conductores enterrados (ohm).

R22 = Resistencia a tierra producida por las jabalinas (ohm).

L = Longitud total del conductor enterrado (pies).

L1 = Longitud de las jabalinas (pies).

$$a = \sqrt{\frac{1}{12} (d)(h)}$$

d = diámetro del conductor en pulgadas.

h = profundidad de enterramiento en pies.

δ = Resistividad del suelo (ohm-m).

b = 1/24 (diámetro de jabalina en pulgadas).

n = cantidad de jabalinas.

A = Area de la malla a tierra (pies²).

$$K1 = 1.43 - \frac{2.3 h}{\sqrt{A}} - 0.044 \frac{B}{C}$$

$$K2 = 5.50 - \frac{B h}{\sqrt{A}} + (0.15 - \frac{h}{\sqrt{A}}) \frac{B}{C}$$

donde:

h = Profundidad de enterramiento de la malla.

B = Lado mayor de la malla.

C = Lado menor de la malla.

Obtenidos los valores de R_{11} y R_{22} lo que sigue es calcular la resistencia mutua a tierra R_{12} .

$$R_{12} = R_{11} - \frac{1.045 \delta}{L} \left(\ln \frac{L_1}{a} - 1 \right).$$

A continuación se calcula el valor de la resistencia de malla total R :

$$R = \frac{(R_{11})(R_{22}) - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2 R_{12}}$$

Si el valor de R no excede el límite máximo propuesto de 1 ohm considérese que el sistema cumple con las condiciones necesitadas para garantizar seguridad.

Como se puede apreciar, los métodos presentan diferencia en el procedimiento de cálculo de la resistencia de puesta a tierra, aunque parten de las ecuaciones de Shwarz's.

4.5.6. Mediciones de la resistencia de la malla de tierra.

Una vez construida la malla, deberá procederse a medir la resistencia eléctrica que presenta ella al paso de la corriente a tierra.

La medición de la resistencia de las tomas de tierra es necesaria tanto al inaugurar el servicio como posteriormente, a intervalos periódicos, para determinar la bondad y la permanencia de la toma de tierra. La medición de la resistencia de una toma de tierra con respecto a la tierra absoluta es muy difícil y todos los resultados son solamente aproximados, con diferentes grados de precisión.

La resistencia de puesta a tierra se mide casi exclusivamente con el método clásico de tres electrodos. Este método está ilustrado en la Fig. 4.7.

Cuando un electrodo B es colocado en el terreno a una cierta distancia del punto A de la malla de tierra, como se muestra en la figura, y una corriente es pasada entre A y B,

el potencial en el terreno, medido en P, puede variar de acuerdo con la curva de la Fig. 4.8.

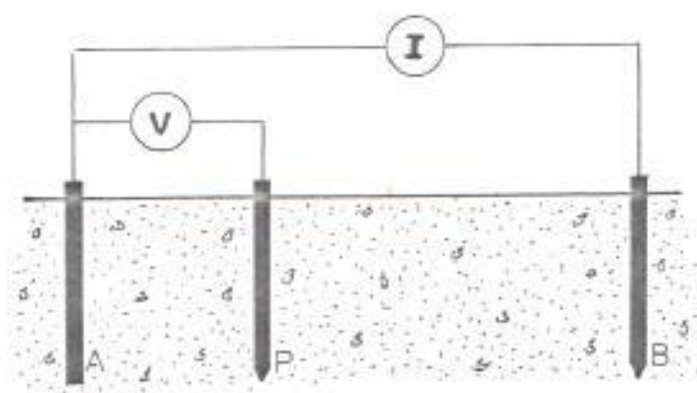


Fig. 4.7. Disposición de los electrodos para medir la resistencia de puesta a tierra.

En el gráfico 4.7:

A = Punto de malla de tierra (electrodo o conductor).

P = Electrodo de potencial.

B = Electrodo de corriente.

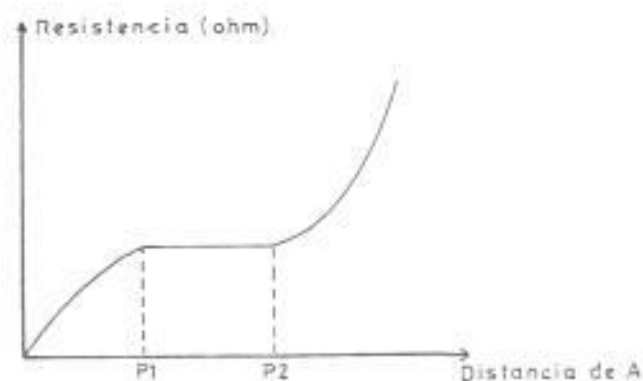


Fig.4.8 Curva de variación del potencial medido entre los puntos A y P.

La parte inclinada a la izquierda de la curva representa el potencial en el espacio circundante al punto de la malla de tierra A. La inclinación de la derecha representa el potencial en el espacio circundante del electrodo de corriente B.

En el gráfico de cero a P1, un voltaje por amperio de corriente de prueba aumenta, pero el gradiente de potencial decrece tornándose prácticamente nulo en P1 (densidad de corriente nula). En P2 el efecto de convergencia de la corriente en el electrodo (de corriente) comienza a aparecer y un crecimiento del gradiente de potencial comienza a surgir a medida que se aproxima al electrodo de corriente. La parte horizontal del gráfico representa una zona donde el efecto de convergencia de corriente de los electrodos es despreciable, consecuentemente determina el valor de resistencia de aterrizamiento de la malla.

Especial atención debe darse para escoger un espaciamiento adecuado entre el electrodo de la malla y el de corriente externo, pues en el caso de que la distancia entre esos electrodos

no sea suficiente, la corriente que fluye de la malla de tierra no diverge lo suficiente, consecuentemente no habrá región, entre los electrodos externos, de densidad de corriente nula (parte horizontal del gráfico de la Fig. 4.8) imposibilitando la determinación de un valor exacto de la resistencia de aterrizamiento de la malla. Para eso se procede de la siguiente forma:

- a) Como electrodo auxiliar de corriente se coloca una barra enterrada a 50 cm. Si se denomina L , la mayor dimensión en metros de la malla por medir, el electrodo de corriente debe ubicarse por lo menos a una distancia de $5L + 30$ (m.) de la malla.
- b) El voltímetro debe conectarse directamente a la malla.
- c) Como electrodos de potencial se usa una barra enterrada a 30 cm.
- d) Se mide los potenciales en varios puntos entre la malla y el electrodo de corriente. Para cada punto se calcula el valor de la razón V/I y se dibuja un gráfico en

función de la distancia. Se obtiene un gráfico similar al de la Fig. 4.8.

Una versión particular de este método es el criterio de Tagg, en el que el electrodo auxiliar de potencial se ubica sobre la línea que une el centro de la puesta a tierra y el electrodo auxiliar de corriente, a una distancia del centro de la puesta a tierra igual al 61,8 % de la distancia entre esta y el electrodo de corriente. Dentro de la zona plana de la Fig. 4.8, se encuentra el punto de Tagg.

4.5.7. Mejoramiento de la malla de tierra.

La resistividad juega un papel importante en el diseño de una buena tierra. Esta varía con el tipo, contenido de humedad y temperatura del suelo. Estas variables afectan la resistencia del sistema de tierras. Consecuentemente cambios estacionales pueden causar fluctuaciones en la resistencia.

Cuando se encuentra que la resistencia de puesta a tierra no es lo suficientemente baja, hay varias formas las cuales pueden mejorar

esto, tales como: aumento de la longitud del electrodo de tierra, uso de múltiples varillas, tratamiento del suelo, etc.

Para el mejoramiento en las características de las mallas de tierra se tienen ciertos procedimientos que nos facilitan lo deseado.

El efecto de las varillas en un terreno homogéneo es únicamente el aumento de la longitud efectiva del conductor de la red, y para nada interviene la profundidad a la que se coloquen estas. Sin embargo, en la mayoría de los terrenos se encuentran que a los 2 o 3 metros de profundidad, la humedad del terreno es mucho mayor, reduciéndose con esto la resistividad, en estos casos es muy conveniente colocar varillas de tierra para que además del aumento de la longitud efectiva de los conductores, se aproveche la zona de resistividad menor del terreno disminuyendo aún más de esta manera la resistencia a tierra de una red ya construida, si esto no es suficiente, debe colocarse mayor longitud de conductor o agregar otras mallas hasta que todo el sistema esté dentro de la seguridad.

Cuando la medida de la resistencia de la malla de tierra resulta superior al valor esperado, se procede de la siguiente forma:

En los puntos en que se van a instalar los electrodos se hace perforaciones con broca, de aproximadamente 35 m. de profundidad. Estas perforaciones se rellenan con barro formado con tierra vegetal, al que además se agrega sulfato de cobre. Luego se entierran las barras de Copperweld.

Si la resistencia de la malla aún resultase mayor, después del tratamiento recién descrito, se procede de la siguiente manera:

Se hace un pozo de un metro por un metro y 2.5 metros de profundidad. En este pozo, en los niveles 0.5 y 1.5 m., medidos desde el fondo, se instalan mallas de un metro por un metro construidas con el mismo conductor que el resto de la malla de tierra. Sobre cada una de estas dos mallas que en conjunto forman un electrodo, se coloca una capa de 20 Kg. de sulfato de cobre. El resto del pozo se rellena con tierra vegetal. Las dos mallas se conectan entre sí y se conectan a la malla de

tierra total.

Otro método de obtención de resistencia de tierra más baja es a través del uso de tratamiento del suelo. La Fig. 4.9 ilustra un procedimiento típico. Algunos materiales de tratamiento son usados, pero ordinariamente roca salina es más común porque esta es fácil de obtenerse y a bajo precio. El proceso químico reduce la resistividad del suelo que rodea y consecuentemente la resistencia de la varilla de puesta a tierra. Como estos procesos químicos se disipan en el suelo o son conducidos afuera por las caídas de lluvia, deben ser reemplazados periódicamente. La Fig. 4.10 muestra variaciones estacionales de resistencia de varillas de tierra para suelo tratado con respecto a suelo no tratado. El suelo tratado provee una resistividad más constante durante el año y así mayor estabilidad de resistencia de tierra a través de las estaciones.

El tratamiento químico del suelo es un buen camino a mejorar la resistencia del electrodo de tierra cuando la profundidad de enterramiento no puede ser aumentada debido a

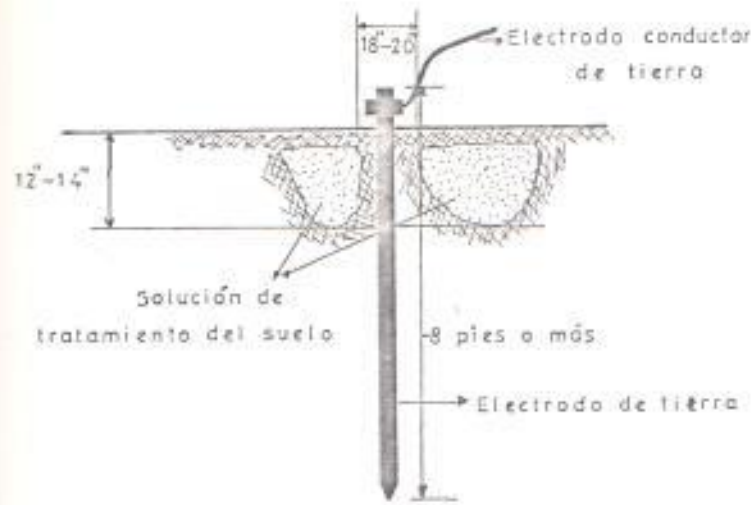


Fig. 4.9 Método de tratamiento de suelo

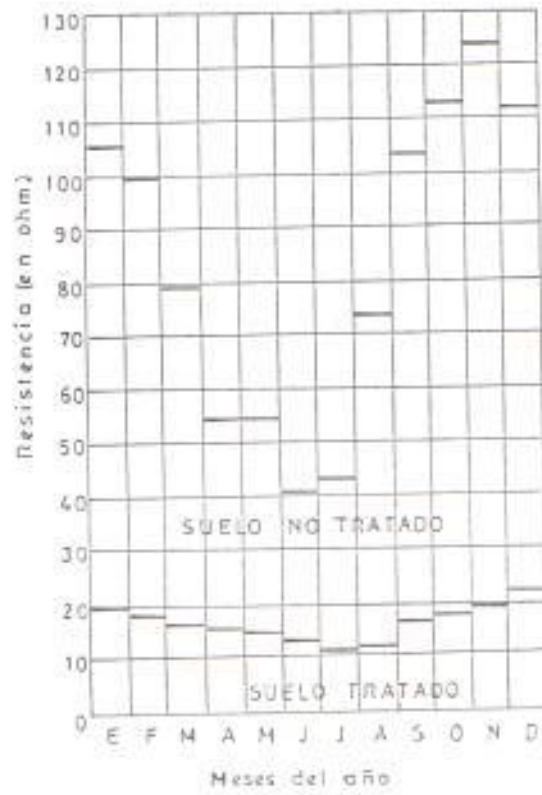


Fig. 4.10 Variaciones de resistencia con las estaciones.

un suelo rocoso, por ejemplo: sulfato de magnesio, sulfato de cobre y roca de sal, no son corrosivos para los materiales. Sulfato de magnesio es el menos corrosivo, pero la roca de sal es fácilmente obtenible. El tratamiento químico no es una manera permanente de mejorar la resistencia del electrodo de tierra. Dependiendo sobre todo de la porosidad del suelo y del aumento de la lluvia, el periodo para el reemplazo varia pudiendo ser de algunos años antes de que otro tratamiento sea requerido.

En general es posible mejorar la conductividad del suelo alrededor de los electrodos de tierra por la inyección de electrolitos tales como, sal común o carbonato de sodio. El tiempo que el tratamiento es efectivo es variable de acuerdo a la permeabilidad del suelo, en algunos casos puede ser por o más de 5 años. De otro modo es casi cero cuando hay un flujo interior apreciable de agua en el suelo o cuando la tierra es muy porosa. La sal común acelera la corrosión de los electrodos, pero no en exceso cuando se usa cobre o acero ablandado.

Otro medio de mejorar consiste en rodear los electrodos con una cama de carbón coke o mejor aún con carbón de leña, la cual es menos corrosiva:

Se tiene un método por el cual se logra mejorar las características de una malla de tierra en sus funciones y trata sobre la ejecución en terrenos de baja conductividad. El procedimiento puede emplearse en cualquier tipo de terreno de características desfavorables.

Básicamente, el procedimiento consiste en rellenar las grietas naturales, aberturas y huecos libres que existen en el terreno mediante una masa que envuelve las partículas del terreno y las une eléctricamente, formando una gran superficie buena conductora de la electricidad. Como masa de relleno y unión se utiliza una sustancia conductora de la electricidad, muy apropiada para rellenos y que además protege al conductor de tierra contra la corrosión. Experiencias realizadas han demostrado que los minerales arcillosos entre los cuales se encuentra la Bentonita, son los más apropiados para este uso.

CONSIDERACIONES APLICABLES AL LABORATORIO DE ALTA TENSION.

Los requerimientos que cubren el sistema de tierra, y las conexiones de bajo voltaje y control de una instalación de impulsos son:

- a) El principal propósito de la puesta a tierra, es la de proveer condiciones apropiadas para grabar oscilogramas precisos y útiles con ayuda del osciloscopio.
- b) Reglas apropiadas de puesta a tierra, previenen también sobrevoltajes peligrosos en el sistema de tierra y en los terminales de control de bajo voltaje. La operación de otras instalaciones de prueba no debe estar influenciada por una instalación de impulsos.
- c) Métodos de puesta a tierra apropiados previenen el ingreso de ondas de impulso provenientes de edificios adyacentes y de sistemas principales.
- d) Dentro del área de pruebas, el sistema de puesta a tierra deberá resguardarse del nivel de voltaje de radiointerferencia de fuentes de voltaje externas; de tal forma que prevalezcan condiciones

favorables para mediciones de ionización. En suma, la energía de alta frecuencia producida durante las pruebas de impulso, no deberán causar problema alguno alrededor del campo de pruebas.

Para el diseño de la planta de pruebas de alto voltaje, a ser equipada con un generador de voltaje de impulsos, se debe tener en cuenta el proveer de una buena puesta a tierra, de toda la instalación de impulsos para cumplir con los requerimientos antes mencionados. En principio, este estudio debe ser coordinado con el diseño del trabajo de Ingeniería Civil. Si este procedimiento no fuese observado, necesariamente se tendría tarde o temprano, que llevarse a cabo modificaciones costosas en el área de pruebas, o a su vez, esperar sorpresas desagradables durante la operación de las instalaciones.

El colapso repentino del voltaje en la descarga disruptiva ocurre en un tiempo corto, que en comparación con el voltaje de impulso por descarga atmosférica parece como lento. La descarga que se desarrolla en el sitio de descarga disruptiva es, para una primera aproximación, alimentada por la descarga de un capacitor, en que, en el caso de un generador de voltaje de impulso es esencialmente la capacitancia de carga y para un transformador de

prueba la capacitancia del devanado de alto voltaje y la instalación de prueba. Propiedades significantes de este estado de sucesos pueden ser deducidos desde el esquema simple de la Fig. 4.11. Un capacitor C_a comienza a descargarse en $t=0$ a través de un espacio el cual puede ser puentado en un tiempo muy corto. El comportamiento eléctrico de un circuito puede ser descrito por medio del circuito equivalente mostrado, donde L_a denota la inductancia del circuito de corte completo. La forma amortiguada periódicamente del voltaje del capacitor V_c y la corriente i_a , resultan como se indican. El primer requerimiento inmediatamente reconocible es que el camino de la corriente i_a debería ser cerrado en un circuito apropiado.

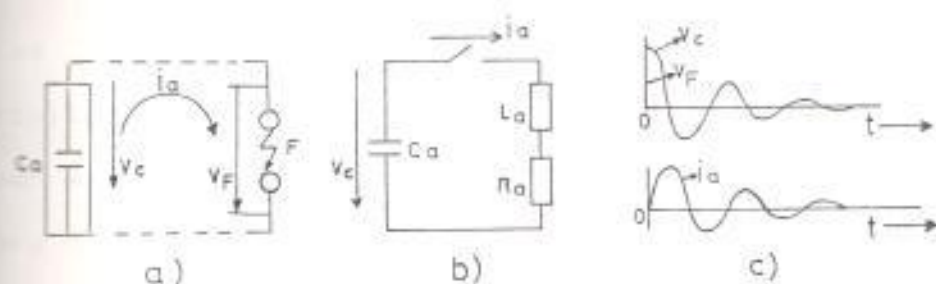


Fig.4.11 Esquema simple de un circuito de Alto Voltaje con un proceso de descarga disruptiva.

- a) Instalación del circuito.
- b) Circuito equivalente.
- c) Curvas de voltaje y corriente.

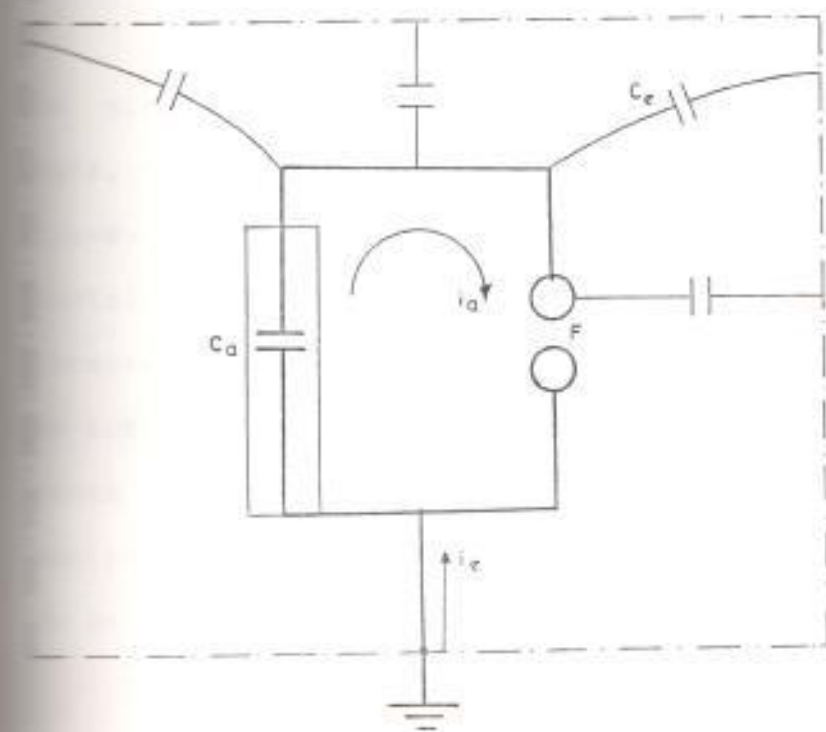
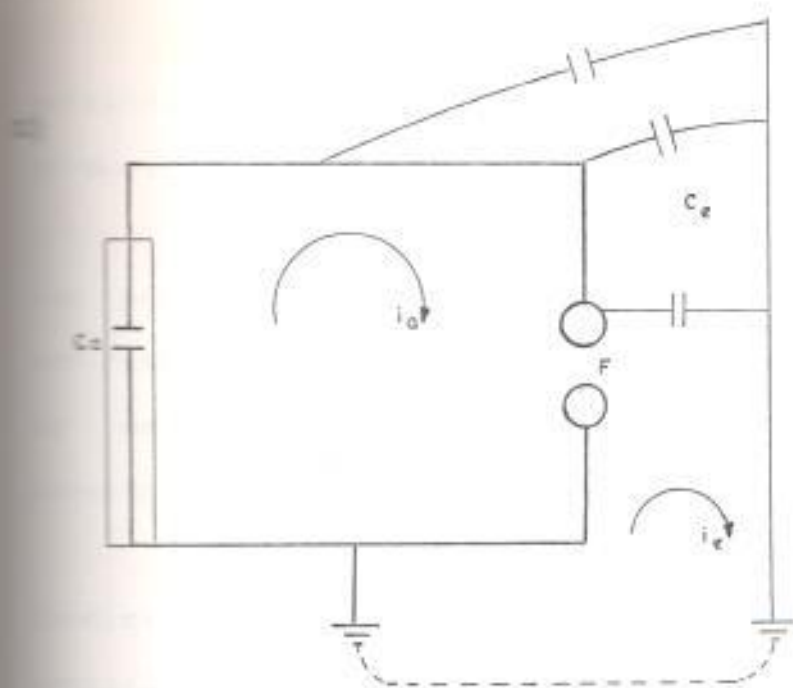
Dentro de los circuitos de impulso, en principio, capacitancias son cargadas y descargadas. Este fenómeno sucede con constantes de tiempo cortas (hasta 0.2 μ seg.) resultando un flujo grande de corriente de alta frecuencia y por lo tanto cambios en el campo electromagnético. La corriente de alta frecuencia puede producir caídas de voltaje óhmicas en cualquier posición incorrecta de los conductores. Estas caídas de voltaje pueden perturbar la operación satisfactoria de la instalación de impulsos. Las consecuencias de un cambio rápido del campo electromagnético son, sin embargo, mucho más importantes. Estos últimos fluyen a través de todos los lazos formados por los conductores de bajo voltaje y control pudiendo inducir tales voltajes en estas conexiones, ya que contorneamientos y cortos circuitos entre los conductores o a tierra, pueden poner a la instalación de impulsos, o parte de ella, fuera de operación.

Un arreglo apropiado de los conductores de bajo voltaje y control, debe prevenir el flujo magnético de alta frecuencia de circular a través del mismo. El proceso de descarga de las capacitancias dentro del circuito de impulsos ha sido mencionado antes; estas capacitancias son:

- Las capacitancias de impulso del generador.
- El capacitor básico de carga.
- La capacitancia del objeto de prueba.

Un campo eléctrico se desarrolla entre los elementos a un potencial de alto voltaje y los elementos cercanos a un potencial de tierra. Este campo parásito a tierra puede ser simulado por una capacitancia a tierra distribuida C_e , como se indica en la Fig. 4.12a. Debe C_e ser rápidamente descargada, una corriente transiente a tierra i_e es producida, generada por la variación del potencial del circuito de corte; esta corriente fluye, al menos en parte, fuera de la instalación de pruebas y aquí puede causar sobrevoltajes indeseables. Si por otro lado el circuito completo de alto voltaje es rodeado por un blindaje metálico cerrado, una Jaula de Faraday como en la Fig. 4.12b, entonces la corriente a tierra también fluye en caminos predeterminados y las conexiones a tierra afuera de la "jaula" permanecen libres de corrientes. Estas conexiones a tierra pueden, por lo tanto, ser diseñadas exclusivamente de acuerdo a los requerimientos de una adecuada operación estable a tierra.

Todos los cables de medida y control, así como también las conexiones a tierra, deben ser colocadas



Corrientes a tierra en instalaciones de alto voltaje.

a) sin blindaje.

b) con una Jaula de Faraday.

evitando lazos grandes y si es posible que vayan en un ducto metálico.

Los problemas resultantes del arreglo de terminales, son resueltos principalmente por un diseño apropiado de los varios componentes de la instalación de impulsos, y de los canales para cables.

Condiciones especiales para las mediciones de ionización, pueden ser bien satisfechas, construyendo toda el área de pruebas dentro de una Jaula de Faraday .

Un simple punto a tierra es comunmente usado. En esta, (Fig. 4.13), la puesta a tierra se la realiza a través de una malla de cobre y de varillas de tierra, instaladas dentro del piso del laboratorio, y la conexión desde la malla es realizada por un conductor de cobre de gran tamaño a un punto identificado como punto común a tierra. La conexión a tierra de varios equipos y otros componentes del laboratorio de prueba de alto voltaje, son hechas al punto común de tierra.

Pruebas de impulso de alto voltaje, ocasionan corrientes altas. Si este particular no es tomado en cuenta, pueden ocurrir descargas por contorno o daño en dispositivos de control y riesgos a la vida de las

personas. A fin de evitar estas dificultades, los terminales a tierra de los aparatos son conectados a tierra no inductivamente, usando bandas de cobre en vez de conductores redondos para minimizar la inductancia del circuito de puesta a tierra. Secundariamente, la malla metálica embebida en el concreto del piso, ocasiona menos resistencia e inductancia en el circuito a tierra.

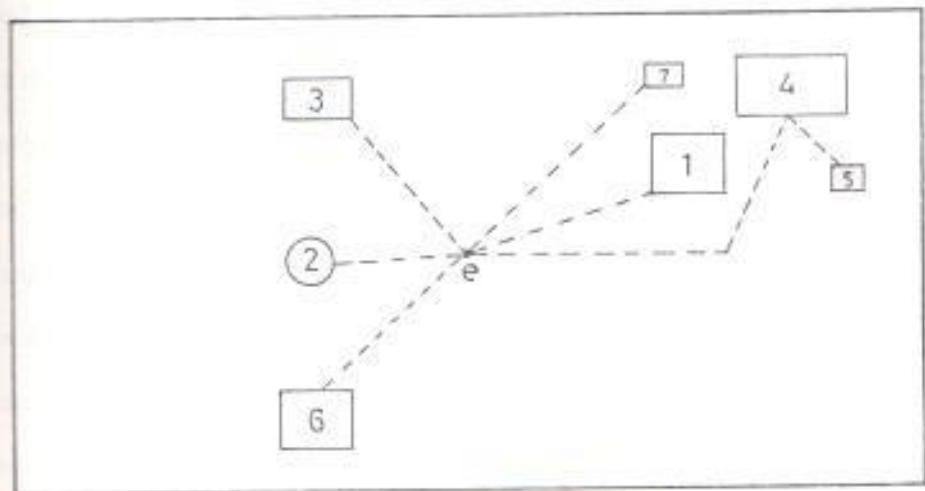


Fig.4.13 Diagrama de puesta a tierra de un Lab. de Alta Tensión.

1. Generador de voltaje de impulso; 2. Espinterómetro; 3. Posición del objeto de prueba para prueba de impulso; 4. Generador de corriente de impulso; 5. Posición del objeto de prueba para prueba de corriente de impulso; 6. Cuarto de control y posición del osciloscopio; 7. Rectificador de carga; e. Posición del simple punto a tierra.

El área de tierra de impulsos debe estar provista de terminales de conexión (punto común extendido) de tal forma que sea posible conectar el objeto de prueba, independientemente de su posición, a través del conductor más corto a tierra.

Todos los conductores de control y de las fuentes de potencia de las diferentes unidades del circuito de impulso entran a la mesa de control. Los cables de medida conectan al potenciómetro de impulsos y el objeto de prueba con los dispositivos de medida de onda de impulso. La Fig. 4.14 representa dicho arreglo de conexiones como diagrama de bloques. Las líneas corresponden a los cables de control, fuente de potencia y medida; la línea gruesa (raya y punto) señalan las conexiones al lado de tierra del circuito de impulso principal. Este ejemplo ilustra como el arreglo de conexiones de una instalación de impulsos, NO debe realizarse. Algunas forman una red de cables con lazos grandes en los cuales el campo electromagnético induce impulsos de alto voltaje. En vista de que estos impulsos producen contorneamiento dentro del cableado, dichos lazos de cable, deben evitarse tanto como sea posible.

La Fig. 4.15, corresponde a la misma instalación, sin embargo representa un arreglo de conexiones

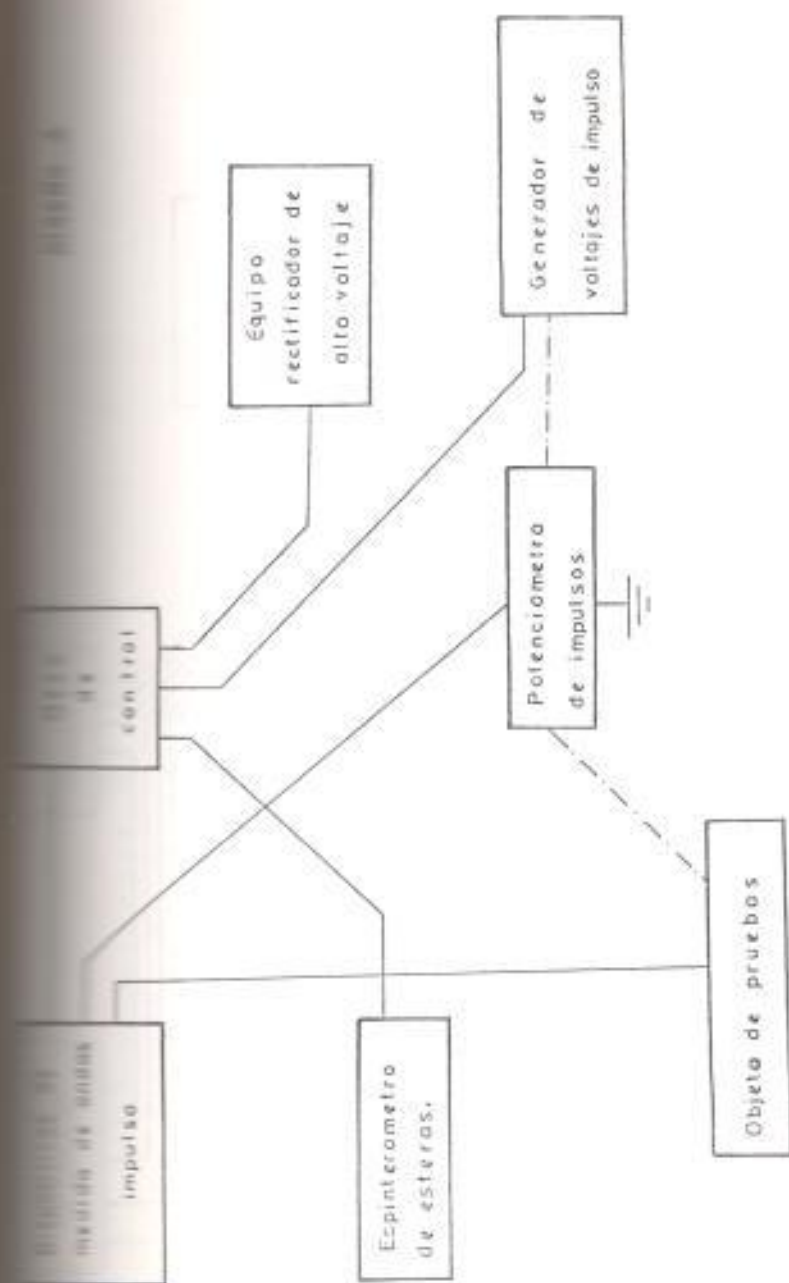


Fig. 1:14 Diagrama de bloques incorrecto de puesta a tierra para laboratorios de Alto Voltaje.

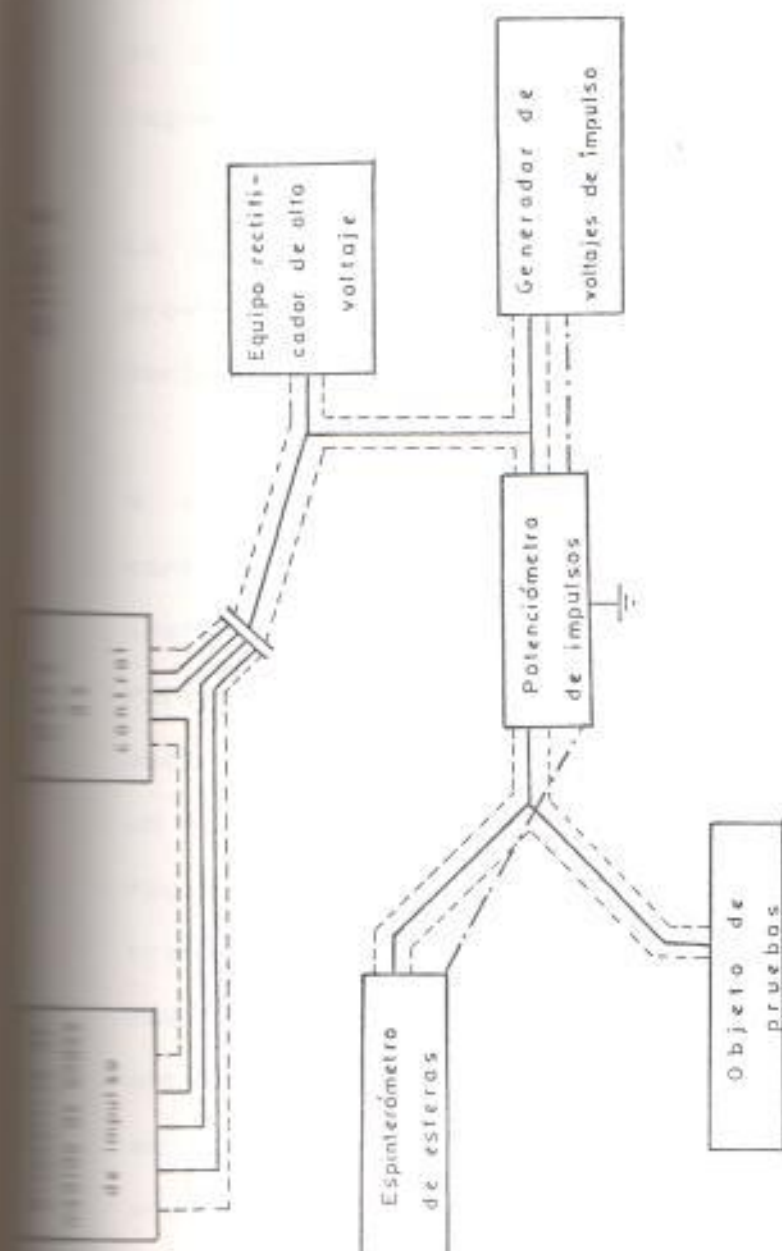


Fig. 4.15 Diagrama de bloques correcto de puesta a tierra para laboratorios de Alto Voltaje.

apropiado y seguro. No hay red de cables, pero si tres grupos de ramificaciones. A través de tal arreglo son evitados lazos de cables y ningún voltaje de perturbación puede ser inducido por los campos magnéticos de alta frecuencia.

La cobertura metálica de los ductos para cables provee un cierto blindaje del cableado contra campos perturbadores.

A fin de prevenir interferencias en los circuitos de corrientes sensibles, nos hace que al efectuar instalaciones, se usen cables coaxiales blindados.

Particular atención debe ponerse a la conexión del osciloscopio si perturbaciones durante la medida de un fenómeno de variación rápida, son evitadas. Por regla general, la señal de medida es siempre transferida al dispositivo de medición vía cables coaxiales blindados de medida. Por esto se debe sin embargo, prevenir corrientes, las que no retornan en el conductor interior, de fluir por la envoltura aterrizada del cable de medida, ya que la caída de voltaje correspondiente es sobrepuesta sobre la señal de medida como un voltaje de interferencia.

Corrientes de interferencia por la envoltura pueden evitarse colocando al cable blindado un ducto

estático aterrizado, y conectado a este a través de su envoltura.

Es sin embargo frecuentemente inevitable que la envoltura del cable de medida y el sistema de tierra, formen un lazo cerrado en el que las corrientes circulantes de perturbación puedan fluir, como resultado de campos magnéticos que varían rápidamente.

En instalaciones de alto voltaje con variaciones rápidas de voltaje ocurren ondas electromagnéticas, y las señales de interferencia pueden afectar directamente al cable de medida y al osciloscopio. Por esta razón el cable y el osciloscopio usados deben ser realmente bien blindados. Particularmente en el caso de un osciloscopio con un amplificador es recomendable instalarlo en una cabina de medición blindada cuya línea de entrada es alimentada a través de un transformador de aislamiento y un filtro pasabajo.

Estos mismos aspectos los que se aplican para la conexión del osciloscopio deben ser observados cuando son empleados dispositivos de medida de voltaje de pico electrónicos de lectura exterior directa. La medición de voltaje de impulso de corte en el frente

es particularmente crítico.

Los valores picos de la corriente a tierra I_e a ser esperados bajo condiciones desfavorables, aparecen aproximadamente en proporción al valor instantáneo V_d del voltaje de corte. Los siguientes valores guías han sido obtenidos experimentalmente:

Para instalaciones incompletamente blindadas:

$$I_e / V_d \leq 2.5 \text{ KA./MV.}$$

Para instalaciones completamente blindadas:

$$I_e / V_d \leq 6.5 \text{ KA./MV.}$$

Para una corriente a tierra dada, la impedancia del conductor plano a tierra es el factor decisivo para las caídas de voltaje producidas.

REALIZACION PRACTICA DE LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD.

Con el objeto de determinar la resistividad, y consecuentemente el tipo de suelo, del terreno en el cual va a asentarse el Lab. de Alta Tensión de la ESPOQ, y por lo tanto la malla de tierra, se ha

procedido a solicitar a la Facultad de Ingeniería en Geología Minas y Petróleo de la ESPOL, el equipo necesario para tal fin. El equipo solicitado es el siguiente:

- Estratímetro, SOILTEST, INC.; que incluye una fuente de corriente DC (0 - 150 mA.) y un voltímetro DC (0-750 V.)
- Electrodo de cobre:

Largo = 50 cm.

Diámetro = 2.54 cm.

- Carretes de alambre de conducción.
- Multímetro.

Para la elección del sitio, dentro del terreno destinado al laboratorio, se han tomado precauciones tales como la de evitar la presencia de objetos metálicos enterrados, tuberías de desagüe, pendientes pronunciadas cercanas al terreno, presencia de trozos de roca semi-enterradas y corrientes de agua; factores estos, que pueden afectar a las lecturas.

El método utilizado para realizar las mediciones de resistividad, es el de 4 electrodos en su configuración Wenner, debido a la facilidad que

presta tanto en la ejecución de tomas de lecturas en el terreno, así como en la interpretación de los resultados de las mediciones.

De igual manera, con el objeto de obtener mediciones confiables, se comprobó la lectura que indicaba el voltímetro del estratímetro, utilizando otro voltímetro previamente ajustado en el laboratorio.

El método de 4 electrodos configuración Wenner, es el más utilizado por las Empresas Eléctricas y concretamente ENDESA de Chile, ha determinado que por experiencia la separación entre electrodos vaya variando como sigue: 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0 (metros).

Las lecturas fueron realizadas en una época en la cual hay ausencia de precipitaciones fluviales, es decir el suelo se presenta seco.

Los datos obtenidos son los que se presentan en la Tabla VIII.

De acuerdo con el método que utilizan las empresas Eléctricas Brasileñas, Argentinas, Chilenas y en nuestro país; que consiste en realizar mediciones en

diferentes partes del terreno, con una separación entre electrodos de 3 m. (con la finalidad de hallar la resistividad aparente del terreno hasta una profundidad aproximada de 3 m.) y luego calcular el valor promedio de las diversas mediciones para tener un valor representativo de la resistividad del terreno. Estos datos pueden observarse en la Tabla IX.

TABLA VIII

REGISTRO DEL SONDEO DE RESISTIVIDAD.

ESPACIO ENTRE ELECTRODOS (m.)	LECTURA DE VOLTAJE (mV.)	$R=V/I$ (ohm)*	RESISTIVIDAD APARENTE $\delta = 2 \pi A R$ (ohm-m)
0.6	300	3.00	11.31
0.8	220	2.20	11.06
1.0	180	1.80	11.31
1.6	113	1.13	11.31
2.0	72	0.72	9.05
2.5	60	0.60	9.42
3.0	48	0.48	9.05
4.0	36	0.36	9.05
5.0	33	0.33	10.37
6.0	30	0.30	11.31
7.0	23	0.23	10.12
8.0	22	0.22	11.06
9.0	20	0.20	11.31
10.0	24	0.24	15.08
12.0	22	0.22	16.59
14.0	20	0.20	17.59
16.0	18	0.18	19.10

* $I = 100$ mA.

Lecturas tomadas en: 16 de Noviembre de 1987.

Día soleado, temperatura ≈ 30 °C., hora = 11:00h.

TABLA IX

REGISTRO DE SONDEO DE RESISTIVIDAD CON A = 3 m.

CORRIENTE (mA)	LECTURA VOLTAJE (mV.)	RESISTENCIA (ohm)	RESISTIVIDAD ($2\pi AR$) (ohm-m)
100	50	0.50	9.42
100	52	0.52	9.80
100	70	0.70	13.19
100	47	0.47	8.86
100	46	0.46	8.67
100	48	0.48	9.05

Lecturas tomadas en: 16 de Noviembre de 1987.

Día soleado, temperatura \approx 30 °C., hora = 11:00h.

CAPITULO V

DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA

DEL CARACTERISTICAS DEL TERRENO.

Para determinar las características geológicas del terreno, se procede a interpretar los valores de resistividad obtenidos en el sondeo eléctrico. Una buena interpretación se logra si se utilizan los siguientes métodos:

- a) Método de quiebres.
- b) Método acumulativo de Moore.
- c) Método de Barnes.

Cada uno de estos métodos fueron descritos en la sección 4.4.4.

Como se desea conocer las características reales del suelo sobre el cual se levantará el Lab. de Alta Tensión se adoptó como solución el de realizar una excavación. De esta manera se logra determinar visualmente la composición geológica del suelo y se comprueban los resultados obtenidos de la interpretación de los datos del sondeo eléctrico.

a) METODO DE QUIEBRES.

Los valores de resistividad aparente, medidos para cada espacio entre electrodos, son graficados versus la profundidad y una curva es trazada a través de los puntos.

Aplicando a nuestro caso y utilizando los datos de la tabla X, resultan los gráficos de las Fig. 5.1, 5.2 y 5.3.

De los gráficos realizados, el que mayores facilidades presta para la interpretación es el gráfico en escala lineal. En este gráfico se puede observar que existen 3 quiebres, uno en $A \approx 2.0$ m., el siguiente en $A \approx 4.5$ m., y el otro en $A \approx 9.5$ m. La capa comprendida entre 2.0 m. y 4.5 m. presenta una resistividad más baja que la de las capas adyacentes, esto posiblemente debido a que dicha capa tenga cierta humedad.

b) METODO ACUMULATIVO DE MOORE.

Moore presentó este método para mostrar la profundidad a la que ocurre un límite geológico.

Para usar el método de Moore, las lecturas de

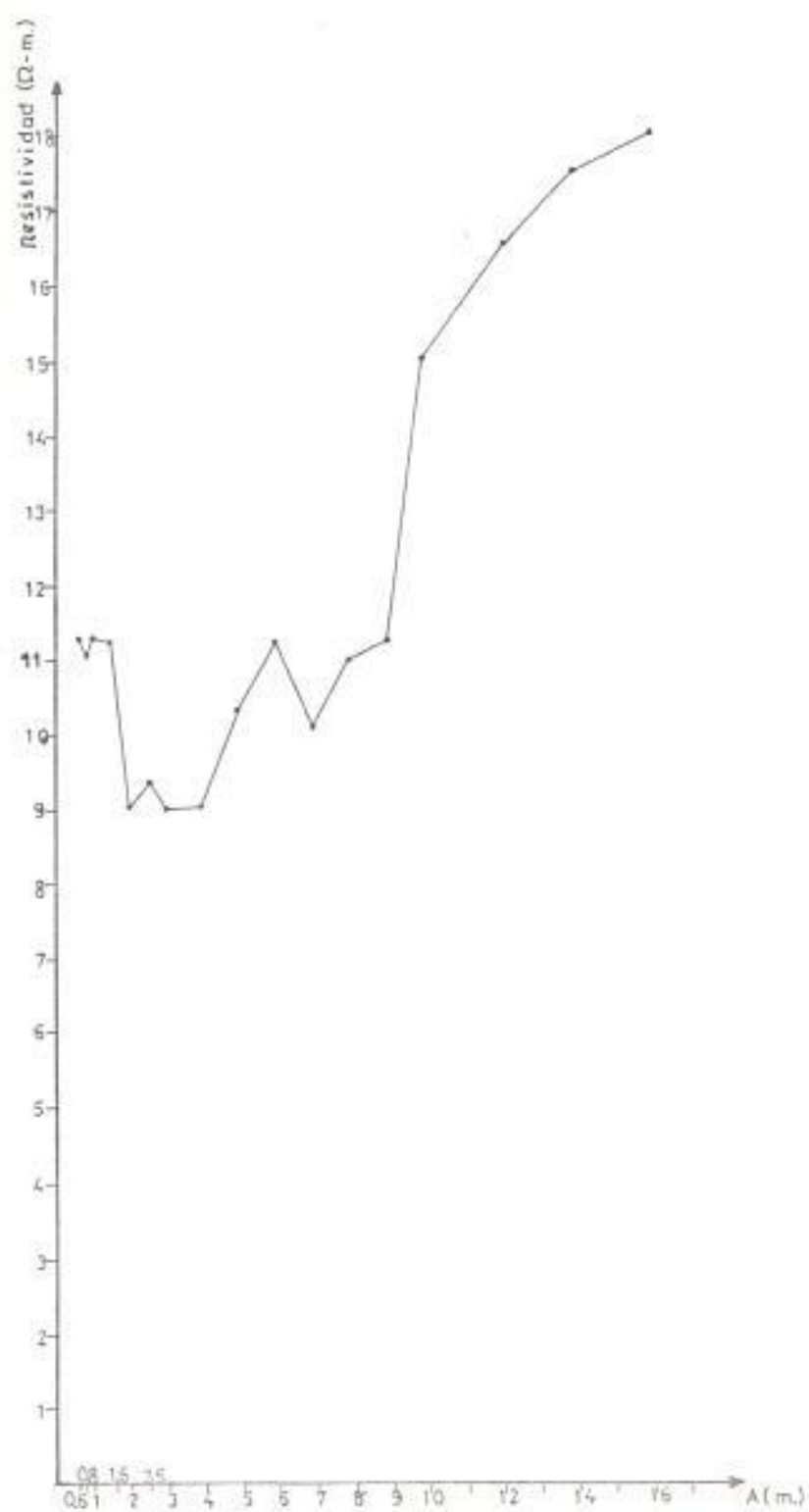


Fig. 5.1 Método de quiebres : gráfico en escala lineal.

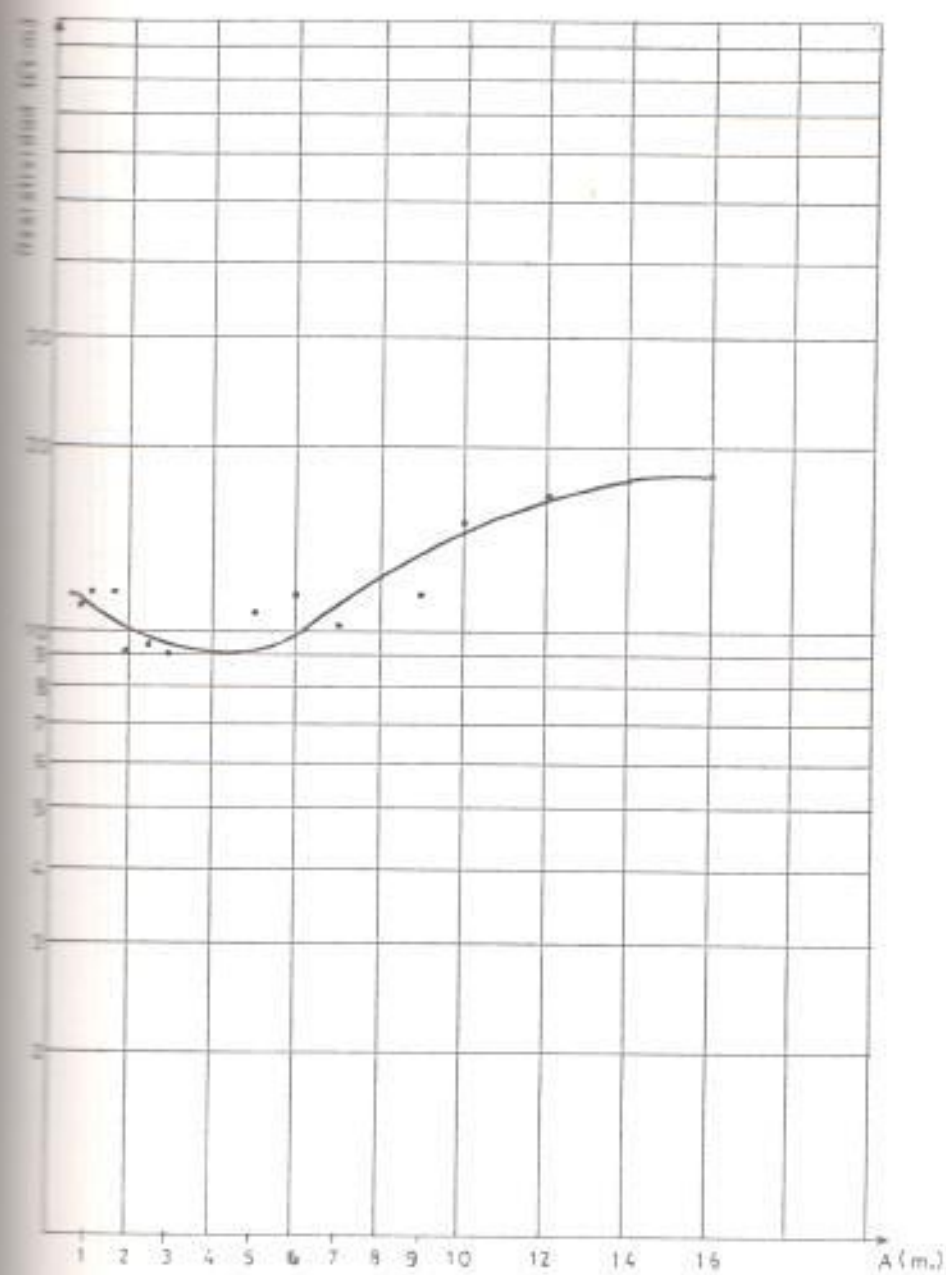


Fig. 5.2 Método de quiebres : gráfico en escala semilog.

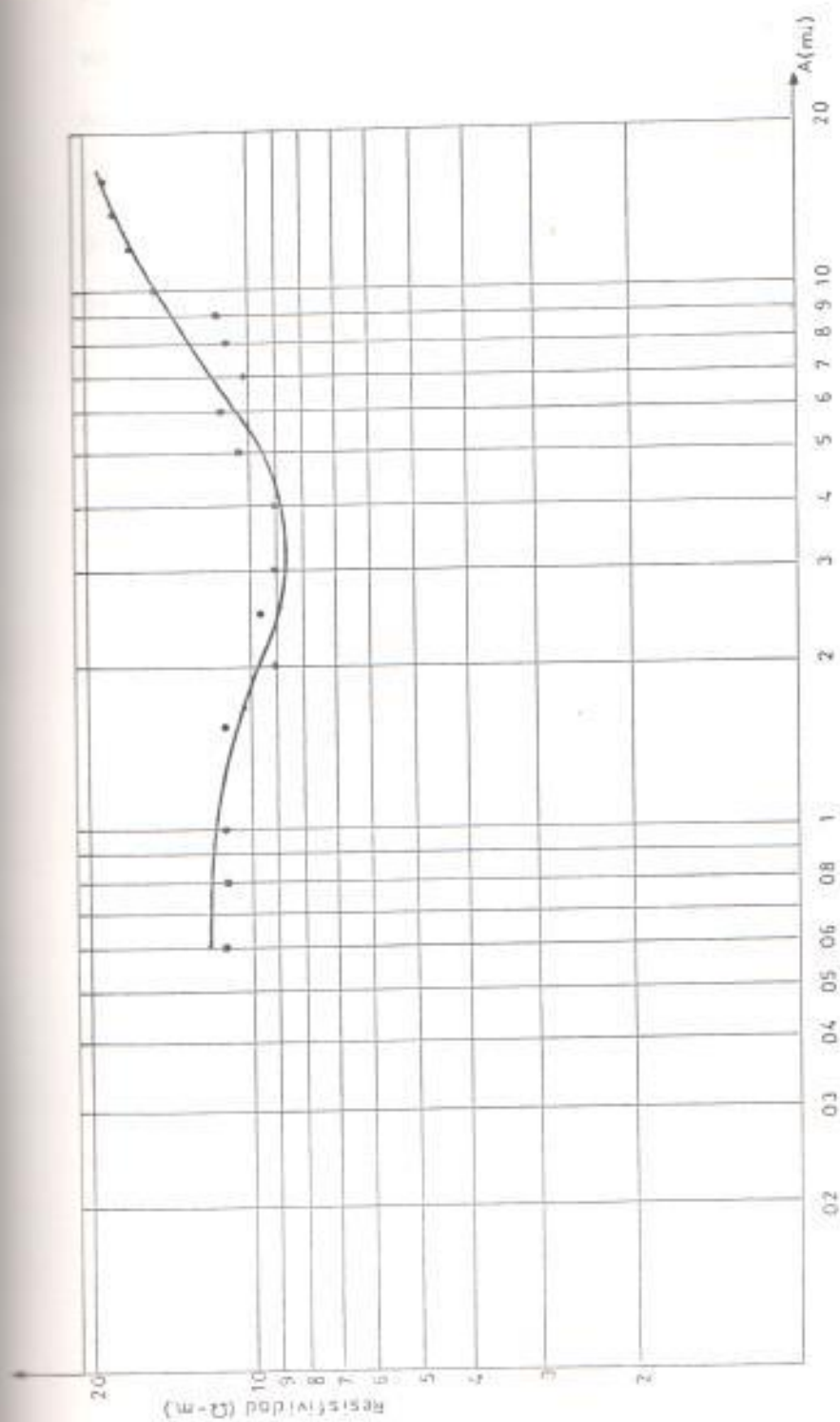


Fig. 5.3 Método de quiebres: gráfico en escala log-log.

resistividad deben tomarse a intervalos iguales de separación entre electrodos (se recomienda un metro). Para cada separación entre electrodos se calcula la suma de su resistividad aparente y se grafica la resistividad acumulativa contra la separación entre electrodos; se trazan líneas rectas a través de los puntos de tal forma que la mejor línea se acomode a dichos puntos.

La separación entre electrodos a la que las líneas se intersectan son consideradas a ser iguales a la profundidad de los límites geológicos.

Para ilustrar el método, los valores de resistividad aparente y acumulativos son presentados en la tabla X. Los datos son graficados, y trazadas las líneas, tal como se indica en la Fig. 5.4.

En la Fig. 5.4 se pueden observar dos intersecciones, una a los 4.5 m. y otra a los 9 m., respectivamente. La primera capa presenta una resistividad baja debido posiblemente a un cierto contenido de humedad. La segunda intersección señala un posible cambio de litología entre las dos capas consideradas.

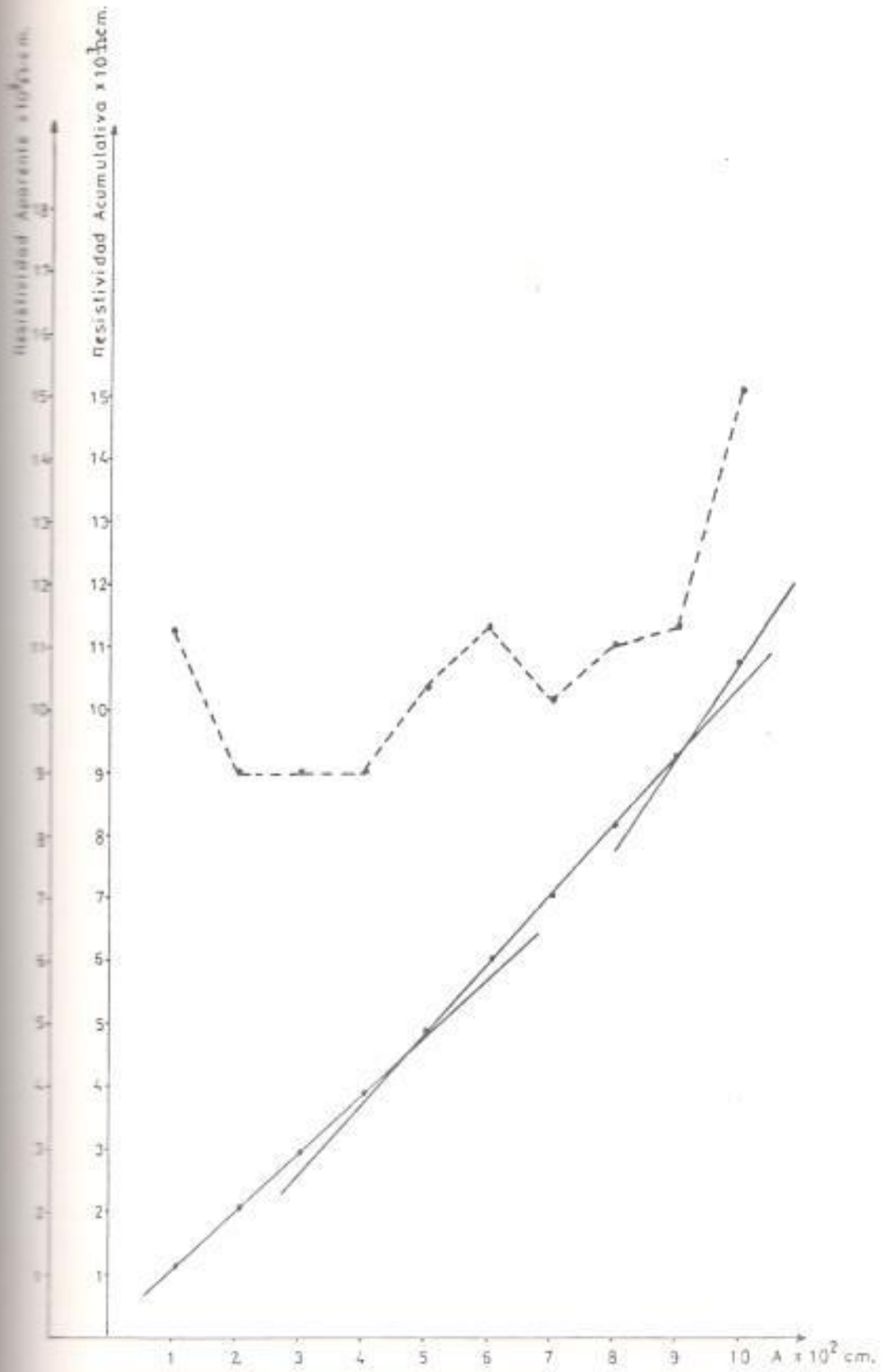


Fig. 5.4 Gráfico del método acumulativo de Moore.

c) METODO DE BARNES.

También conocido como el método de las capas de Barnes. Este método trata de distinguir la resistividad de las capas de la tierra. El espesor de la capa es asumida a ser igual al incremento en el espacio entre electrodos; Se acostumbra tomar un incremento de 3 pies (\approx 1 m.).

Los resultados del método de la capa de Barnes pueden presentarse en un gráfico de resistividad versus profundidad, como en la Fig. 5.5.

Ya que los valores representan un valor promedio de resistividad de la capa, estos se trazan en el centro del espacio de la misma, como se muestra en la Fig. 5.6. Líneas rectas son usadas para conectar los puntos. Los datos necesarios para trazar los gráficos 5.5 y 5.6, se indican en la tabla X.

Observando estos gráficos se puede concluir que hasta los 4.0 m. de profundidad se tiene una capa cuyo valor de resistividad va disminuyendo, lo que nos indica la presencia de humedad. Entre 4.0 m. y 6.0 m., la resistividad del suelo aumenta. Entre los 6.0 m. y 7.0 m. hay la presencia de una

capa de terreno de características similares a la primera. Entre los 7.0 m. y 8.0 m., existe la variación más importante en las características del terreno, teniendo una capa de elevado valor de resistividad.

Del análisis de los 3 métodos de interpretación de resistividad de suelos se puede concluir que existe una capa uniforme que se extiende hasta una profundidad de 4.5 metros, observándose en los dos últimos metros, de esta capa, una disminución de la resistividad debido posiblemente a la presencia de humedad. Después de los 4.5 m. la resistividad sufren un aumento paulatino de su valor lo que indica ausencia de humedad o un cambio de litología.

Como se manifestó anteriormente, y con la finalidad de garantizar los resultados del sondeo eléctrico obtenidos, se procedió a realizar una excavación de 4 m. de profundidad, en el sitio donde se ubicará el Lab. de Alta Tensión. Se observó que existe una capa de arcilla que se mantiene uniforme hasta la máxima profundidad que se pudo excavar, esto es 4 m. A partir de los 2.5 m. de profundidad se observó que el material presentaba cierta humedad. De esta manera se comprueban los resultados obtenidos en el sondeo eléctrico hasta esta profundidad.

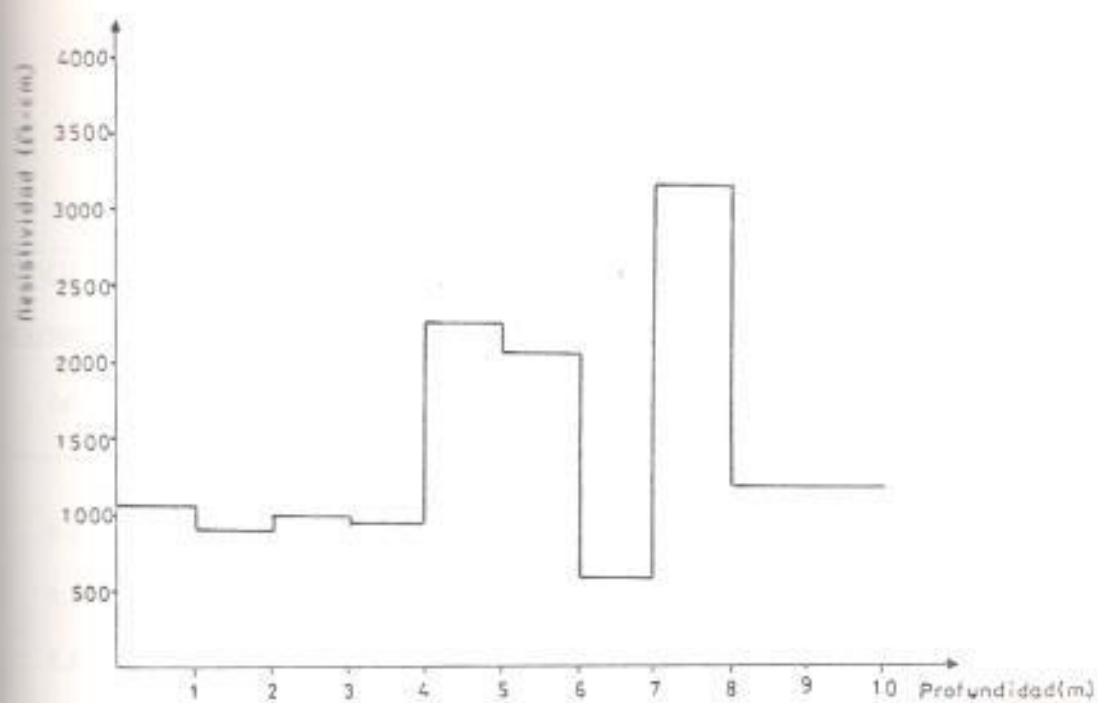


Fig. 5.5 Gráfico del método de Barnes.

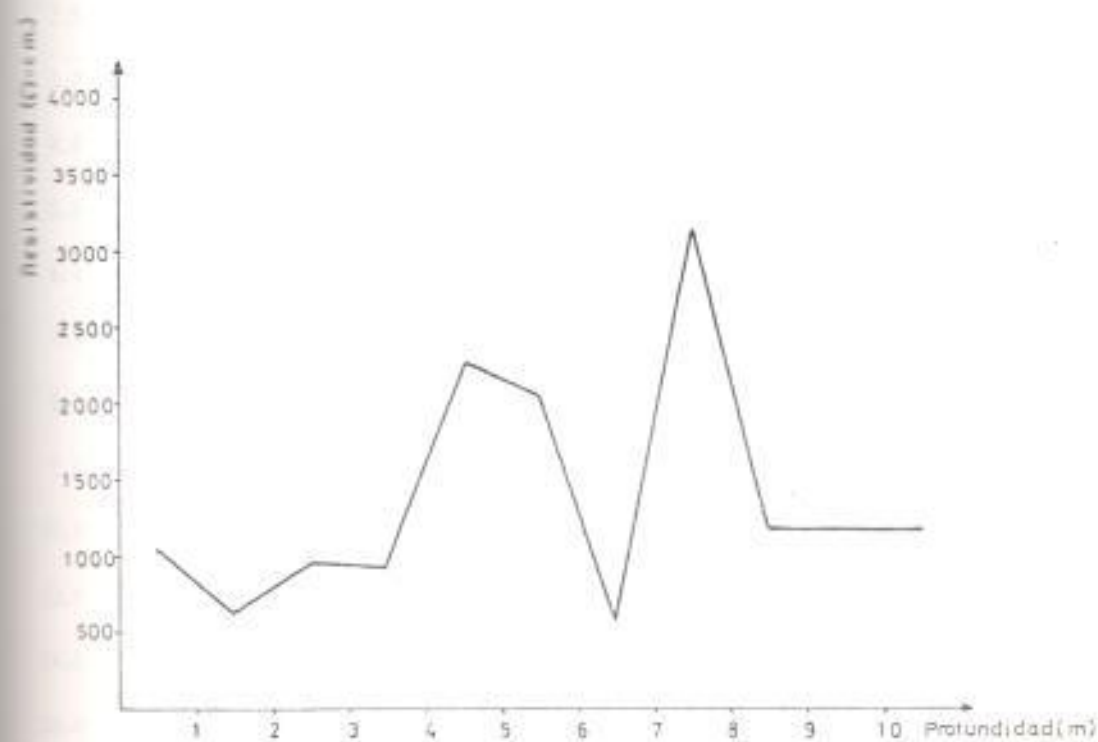


Fig. 5.6 Gráfico del método de Barnes.

TABLA X

CALCULOS DE SONDEO DE RESISTIVIDAD

ESPACIO ENTRE ELECTRODOS A (a)	LECTURA DE RESISTENCIA (ohm)	RESISTIVIDAD APARENTE, 2γAR (ohm-cm)	VALORES DE RESIS- TIVIDAD ACUMULADA (ohm-cm)	CONDUCTANCIA 1/R (Mhos)	CAPA DE BARNES 1/RL	#L=2γARL (ohm-cm)
0.5	3.00	11.31				
0.8	2.20	11.06				
1.0	1.80	11.31	1131	0.56	0.56	1131
1.6	1.12	11.26				
2.0	0.72	9.05	2036	1.39	0.83	757
2.5	0.60	9.42				
3.0	0.48	9.05	2941	2.08	0.69	911
4.0	0.36	9.05	3846	2.78	0.70	898
5.0	0.33	10.37	4883	3.03	0.25	2513
6.0	0.30	11.31	6014	3.33	0.30	2094
7.0	0.25	10.12	7026	4.35	1.02	616
8.0	0.22	11.06	8132	4.54	0.19	3307
9.0	0.20	11.31	9263	5.00	0.46	1566
10.0	0.24	15.08	10771	4.17	-	-
12.0	0.22	16.59				
14.0	0.20	17.59				
16.0	0.18	18.10				

El conocimiento de las características del suelo hasta la profundidad alcanzada, es suficiente para nuestro estudio de puesta a tierra.

El valor de resistividad a ser utilizado en cálculos posteriores es de 10 ohm-m., valor que corresponde al promedio de los datos indicados en tabla IX, tal como recomiendan las Empresas Eléctricas del CIER (Comisión de Integración Eléctrica Regional).

3.2. APLICACION DEL METODO DE LA IEEE PARA EL DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL LAB. DE ALTA TENSION.

Para el diseño de la malla de tierra, utilizaremos el método propuesto por la IEEE y cuyo procedimiento se lo indicó en la sección 4.5.4.

1) DISEÑO PRELIMINAR.

Se inicia analizando el plan trazado para el equipamiento y estructuras del Lab. de Alta Tensión, para lo cual nos ayuda los planos presentados por el departamento de Planificación del Nuevo Campus Politécnico y que se adjuntan en el Anexo D. Como se puede observar, en dichos planos, el área disponible para la puesta a tierra es aquella que abarca el edificio del Lab. de Alta

Tensión y aquellos espacios libres que lo rodean.

Lo que interesa aterrizar son los equipos de construcción de alto voltaje, componentes del laboratorio y la estructura metálica del edificio, por lo cual la malla de puesta a tierra debe ubicarse directamente abajo del área del Lab. de Alta Tensión.

Con la finalidad de poder realizar una inspección periódica del estado de la malla de puesta a tierra, a través de un punto por lo menos, y considerando que dicha inspección resultaría muy difícil si todos los conductores de la malla se ubican debajo de la losa del piso del laboratorio, se ha visto en la necesidad de que parte de los conductores corran debajo de un área que no cubra el laboratorio.

Por otro lado, se indicó anteriormente en la sección 4.5, que se recomienda tener regillas en la malla de tierra, de no menos de 3 m. x 3 m., por las razones anotadas en dicha sección.

Considerando todo lo antes mencionado, el diseño preliminar de la malla de puesta a tierra se indica en la Fig. 5.7, con el espaciamento entre

electrodos indicado.

2) DATOS Y CALCULOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO.

- Tiempo de despeje de falla:

En los Lab. de Alta Tensión se hacen pruebas de descarga cuyo tiempo de duración es muy corto (hasta 0.2 μ s). Se ha considerado 4 seg. como el tiempo de despeje de falla, para dar un gran margen de seguridad.

- Resistividad del suelo.

Del análisis del suelo donde se levantará el laboratorio se concluyó que para fines de cálculo se utilizará una resistividad aparente de 10 Ω -m.

- Profundidad propuesta para el enterramiento de la malla de tierra.

La profundidad de la malla, será siguiendo la práctica y la experiencia de Empresas Eléctricas de Argentina, Chile, Brasil y algunos países Europeos, de 0.6 m. a 1 m.

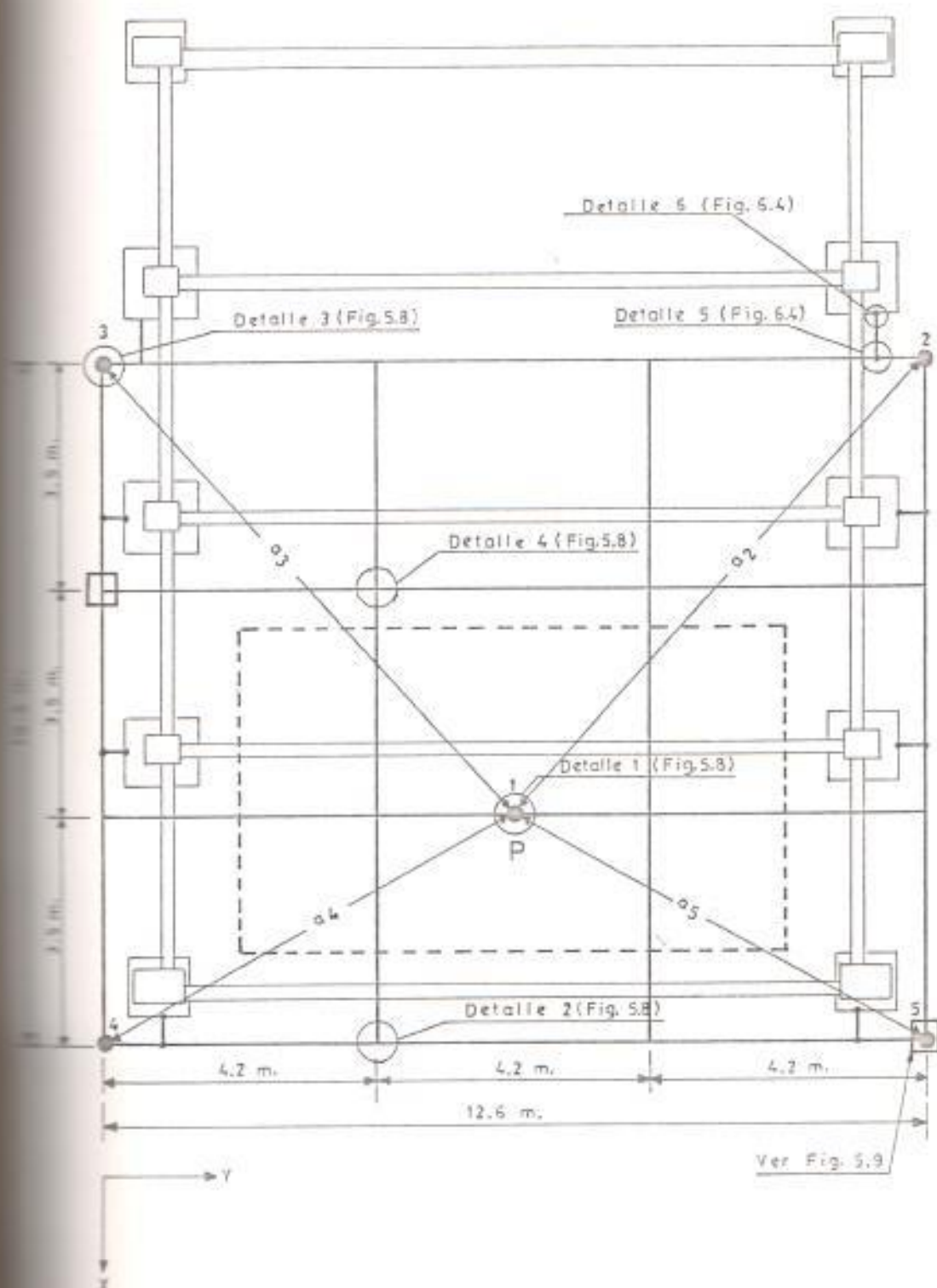


Fig. 5.7 Diagrama de puesta a tierra del Lab. de Alta Tensión

En nuestro caso nos referimos a los planos que se presentan en el anexo D. El nivel que tomamos como referencia para determinar la profundidad de la malla es el que corresponde al área que rodea al Lab. de Alta Tensión, esto es el nivel 76:15, debido a que la corriente que se disipa por la malla de tierra puede inducir voltajes en la superficie alrededor del laboratorio, y afectar a personas que se encuentren en dichos espacios.

Observando el plano que corresponde a la cimentación, loza, cubierta y planilla (ver anexo D) del Lab. de Alta Tensión, se ve que el espesor de las riostras de la estructura del edificio es de 0.5 m., desde el nivel 76:15 hasta el nivel 75:65, por lo que la malla de puesta a tierra debe ubicarse debajo de este nivel.

Del estudio de las características del terreno, se determinó que una capa uniforme de suelo se mantiene hasta 4.5 m., por lo que la malla de puesta a tierra puede ubicarse a cualquier profundidad dentro de este rango.

Se ha considerado que una profundidad adecuada

para la colocación de la malla es de 0.6 m., en el nivel 75:55, debajo de las riostras, por cuanto una malla colocada a 0.6 m. va a tener características técnicas casi similares a una malla colocada a 1 m., ya que el tipo de suelo es el mismo, y debido también a que el costo de excavar 0.6 m. es menor al costo de excavar 1 m. de profundidad.

- Área cubierta por la malla de tierra:

$$A = 12.6\text{m} \times 10.5\text{m} = 132.3 \text{ m}^2. \quad (\text{ver Fig. 5.7})$$

2) CALCULOS.

- Cálculo de la resistencia estimada (R) del sistema, aplicando el método de Laurent.

$$R = \frac{\delta}{4r} + \frac{\delta}{L};$$

$$r = \sqrt{A/\pi} = 6.4894 \text{ m.}; \quad L = 92.4 \text{ m.}; \quad \delta = 10 \text{ } \Omega\text{-m.}$$

$$\Rightarrow R = 0.4935 \text{ } \Omega.$$

- Cálculo de la máxima corriente a ser disipada:

Las mallas de tierra están construidas por elementos metálicos o cables que tienen la

capacidad de disipar una corriente máxima, proveniente de cualquier tipo de falla, sean estos por falla de fases a tierra, descargas eléctricas o como en el caso que nos ocupa, por enviar la corriente a tierra luego de un experimento, así como también la corriente debido a las capacitancias parásitas indicadas en la sección 4.6.

Para el laboratorio, se tendrá como dato importante las máximas corrientes que se deban enviar a tierra sin causar daños a los conductores de la malla metálica; datos como capacidad del generador de impulsos, transformadores, etc., son los que nos facilitan este conocimiento. Para nuestro caso en concreto, nos referiremos al capítulo 1, donde se presentaron los datos nominales que tendrá el Lab. de Alta Tensión de la ESPOL, y que es como sigue:

- Generador de Impulsos hasta 420 Kv.
- Equipo de pruebas con alta tensión alterna hasta 140 KV.
- Potencia del transformador de prueba: 5 KVA.

Utilizando la conocida fórmula:

$$P = (V) (I).$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{5 \text{ KVA}}{140 \text{ KV}} = 0.036 \text{ Amp.}$$

Por otro lado, considerando la corriente debido a las capacitancias parásita y con un laboratorio completamente blindado tendremos, de acuerdo a lo indicado en la sección 4.6, lo siguiente:

$$I_e \leq 6.5 \frac{\text{KA}}{\text{MV}} ;$$

$$I_e \leq 6.5 \frac{\text{KA}}{\text{MV}} \times 0.42 \text{ MV} \leq 2.730 \text{ KA.}$$

Por lo tanto, la corriente máxima a ser disipada es de 2730 Amp. y es la que utilizamos para nuestro diseño.

- Aplicación del factor de decremento:

De la tabla V tenemos que para 4 segundos de duración de la falla, el factor de decremento es 1.

- Factor de corrección k por acción de cambios futuros en el Lab. de Alta Tensión.

Considerando que el laboratorio sea equipado para pruebas a equipo de 138 KV. de voltaje nominal, para el cual el voltaje de prueba de impulso es de 650 KV., entonces el factor de corrección k es:

$$k = \frac{650 \text{ KV.}}{420 \text{ KV.}} = 1.55$$

Por lo tanto la máxima corriente de falla es:

$$I_{\text{max.}} = (K) (D) (I)$$

$$I_{\text{max.}} = (1.55) (1) (2730) = 4232 \text{ Amp.}$$

- Cálculo del calibre mínimo del conductor:

De la ecuación de UNDERDONK:

$$S = I \sqrt{\frac{33 t}{\log \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}}$$

tiempo de despeje de falla : t = 4 seg.

a) Para uniones soldadas:

$$T_m = 450 \text{ }^\circ\text{C.}; T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C.}$$

=> S = 77138.34 CM., que corresponde a un conductor # 1 AWG cobre.

b) Para uniones empernadas:

$$T_m = 250 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

=> $S = 97613.96 \text{ CM.}$, que corresponde a un conductor 1/0 AWG cobre.

Por lo tanto, la malla puede ser construida por cables relativamente delgados pero es antitécnico; por razones mecánicas y debido a la casi imposibilidad de inspeccionar las fallas mecánicas en toda la malla una vez enterrada, se escoge, lo que en la mayoría de los casos para laboratorios de alta tensión se usa, cable 2/0 AWG cobre.

- Cálculo de la longitud mínima (L) de conductor requerido para evitar problemas de gradientes.

$$L = \frac{(K_m)(K_1)(\delta)(I)(\sqrt{E})}{165 + 0.25 \delta s}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} + \ln \left(\frac{3}{4} + \frac{5}{8} + \frac{7}{8} \dots n-2 \right)$$

$$D = 4.2 \text{ m.}; h = 0.6 \text{ m.}; d = 0.0105 \text{ m.}; n = 4.$$

$$\Rightarrow K_m = 0.6724.$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 n.$$

$$\Rightarrow K_i = 1.338.$$

$$\delta = 10 \Omega\text{-m.}; \quad \delta_s = 3000 \Omega\text{-m.}; \quad I = 4232 \text{ Amp.}; \quad t = 4 \text{ seg.}$$

$$\Rightarrow L = 83.2220 \text{ m.}$$

El valor obtenido de $L = 83.2220 \text{ m.}$ comparando con la longitud propuesta en el diseño preliminar de $L = 92.4 \text{ m.}$, es superado por un 11 %, lo que nos indica que la malla de tierra es suficiente para disipar la corriente de falla. Para dar un mayor margen de seguridad, a nuestra malla de puesta a tierra, se ha creído conveniente instalar jabalinas de copperweld, que en la práctica son de 2.5 m. de longitud por 3/4" de diámetro, en cada una de las esquinas de la malla, cumpliendo el requerimiento de que las jabalinas deben estar separadas por lo menos una vez la longitud de las mismas.

Con la instalación de las jabalinas se alcanzan zonas de suelo de mayor humedad y por consiguiente menos resistividad, con lo que se logra que la corriente se disipe en mejor forma.

Con la finalidad de que el punto principal de puesta a tierra del Lab. de Alta Tensión se ubique en la parte central de la Jaula de Faraday se ha visto la necesidad de realizar la conexión en la parte que se indica en la Fig. 5.7, señalada con la letra P, en este mismo punto se instalará una jabalina para permitir que las corrientes pasen a tierra lo más directamente y se dispersen lo más rápido posible.

Por lo tanto, la nueva longitud de conductor enterrado es: $L = 92.4 \text{ m} + 5 \times 2.5 \text{ m} = 104.9 \text{ m}$, dando así un mayor margen de seguridad.

3) COMPROBACION DE LOS LIMITES DE SEGURIDAD.

- Chequeo del voltaje de toque:

$$V_{\text{toque}} = \frac{165 + 0.25 \delta s}{\sqrt{t}}$$

$$\Rightarrow V_{\text{toque}} = 457.5 \text{ (V)}.$$

$$V_{\text{malla}} = (K_m) (K_i) (3) (I) / L$$

$$\Rightarrow V_{\text{malla}} = 362.9560 \text{ (V)}.$$

\Rightarrow Se cumple con el requerimiento que $V_{\text{toque}} \geq$

V_{malla} .

- Chequeo del voltaje de paso:

$$V_{\text{paso}} = \frac{165 + 3000}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$\Rightarrow V_{\text{paso}} = 1582.5 \text{ (V)}.$$

$$V_{\text{max.paso}} = (K_s)(K_i)(\delta)(I)/L$$

$$K_s = -\left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots\right)$$

$$D = 4.2 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow K_s = 0.4187.$$

$$\Rightarrow V_{\text{max.paso}} = 226.0108 \text{ (V)}.$$

\Rightarrow Se cumple con la condición que $V_{\text{paso}} > V_{\text{max.paso}}$.

- Chequeo del máximo voltaje de malla.

$$V_{\text{max.malla}} = I(R).$$

El valor de la resistencia de puesta a tierra de nuestro sistema se calcula con los métodos descritos en la sección 4.5.5 :

a) Método de Laurent y Niemann.

$$R = \frac{\delta}{4r} + \frac{\delta}{L};$$

$$\delta = 10 \text{ } \Omega\text{-m}; \quad r = \sqrt{A7\pi} = 6.4894 \text{ m.}; \quad L = 104.9 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow R = 0.4806 \text{ } \Omega.$$

b) Método de Dwight.

Considera la malla de tierra formada solo por conductores horizontales, siendo despreciadas las jabalinas. Para utilizar este método nos ayudaremos de la Fig. 5.7, en el cual se ha señalado la dirección X y Y.

En la dirección X:

Resistencia a tierra de un conductor horizontal (R_s):

$$R_s = \frac{\delta}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} \right)$$

$$L = 1260 \text{ cm.}; \quad h = 60 \text{ cm.}; \quad r = 0.526 \text{ cm.}; \quad \delta = 1000 \text{ } \Omega\text{-cm.}$$

$$\Rightarrow R_s = 1.2219 \text{ } \Omega.$$

Resistencia adicional debido a las interferencias mutuas (R_a):

$$R_a = \frac{\delta}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{E} - 1 + \frac{E}{2L} - \frac{E^2}{16L^2} \right)$$

$$E = \epsilon(F);$$

$$\epsilon = 350 \text{ cm.};$$

de la tabla VII para $N = 4$, $F = 1.51$.

$$\Rightarrow E = 528.5 \text{ cm.}$$

$$L = 1260 \text{ cm.}; \delta = 1000 \text{ } \Omega\text{-cm.}$$

$$\Rightarrow R_a = 0.1836 \text{ } \Omega.$$

Resistencia a tierra de un conductor (R_c):

$$R_c = R_s + (N-1) R_a.$$

$$N = 4;$$

$$\Rightarrow R_c = 1.7649 \text{ } \Omega.$$

Resistencia de N conductores en paralelo
(R_{cp}):

$$R_{cp} = R_c/N = 0.4412 \text{ } \Omega.$$

Resistencia de los conductores transversales
(dirección Y):

Resistencia de un conductor horizontal (R_{sj}):

Se calcula con la misma fórmula de R_s .

$$L = 1050 \text{ cm.}$$

$$\Rightarrow R_{sj} = 1.4044 \ \Omega.$$

Resistencia adicional debido a las interferencias mutuas (conductores trasnversales) (R_{aj}):

Se calcula con la misma fórmula para R_a .

$$E = \epsilon(F);$$

$$\epsilon = 420 \text{ cm.}$$

De la tabla VII, para $n = 4$ $F = 1.51$.

$$\Rightarrow E = 634.2 \text{ cm.}; L = 1050 \text{ cm.}$$

$$\Rightarrow R_{aj} = 0.1773 \ \Omega.$$

Resistencia mutua total entre los conductores trasnversales y los demás conductores de la malla (R_{am}):

$$R_{am} = (n-1)R_{aj} + (N-1)R_a.$$

$$\Rightarrow R_{am} = 1.0827 \ \Omega.$$

Resistencia a tierra de un conductor horizontal (R_{cj}):

$$R_{cj} = R_{sj} + R_{am}.$$

$$\Rightarrow R_{cj} = 2.4871 \ \Omega.$$

Resistencia de n conductores transversales en paralelo (R_{cjp}):

$$R_{cjp} = R_{cj}/n = 0.6218 \Omega.$$

Resistencia a tierra total de la malla (R):

$$R = \frac{(R_{cp}) (R_{cjp})}{R_{cp} + R_{cjp}}$$

$$\Rightarrow R = 0.2581 \Omega.$$

c) Método de Koch.

Considera la puesta a tierra solo a través de jabalinas.

$$R = \frac{\delta}{2\pi L_1} \frac{1}{n} \left(\ln \frac{4L_1}{d} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \ln \frac{\sqrt{m_i^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_i^2 + 1} - 1} \right)$$

Para el cálculo del sumatorio (Σ) nos ayudaremos de la Fig. 5.7, en el que se indica la colocación de las jabalinas. Tomando como pivote la jabalina en la parte interna de la malla tenemos:

$$m_1 = \frac{a_1}{L_1}; \quad Y_1 = \ln \frac{\sqrt{m_1^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_1^2 + 1} - 1}$$

$$m_2 = a_2/L_1 = 9.4175/2.5 \quad \Rightarrow \quad Y_2 = 0.5249$$

$$\begin{aligned}
 m_3 &= m_2 & \Rightarrow Y_3 &= Y_2 \\
 m_4 &= a_4/L_1 = 7.2069/2.5 & \Rightarrow Y_4 &= 0.6806 \\
 m_5 &= m_4 & \Rightarrow Y_5 &= Y_4 \\
 & & \Rightarrow \Sigma Y_i &= 2.4111
 \end{aligned}$$

$$L_1 = 2.5 \text{ m.}; n = 5; d = 0.0191 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow R = 0.9506 \Omega.$$

Con el método de Dwight se ha calculado la resistencia de los conductores dispuestos horizontalmente, mientras que con el método de Koch se ha calculado la resistencia de las jabalinas. Considerando que ambos conjuntos se hallan conectados en paralelo, la resistencia total del sistema de tierra es:

$$R_{DK} = \frac{(R_{Dwight}) (R_{Koch})}{R_{Dwight} + R_{Koch}}$$

$$R_{Dwight} = 0.2581 \Omega; R_{Koch} = 0.9506 \Omega.$$

$$\Rightarrow R_{DK} = 0.2030 \Omega.$$

d) Método de la Compañía Italo - Argentina de Electricidad S.A.

Resistencia de la malla de tierra
(conductores horizontales) (R_m):

$$R_m = \delta / 2D.$$

$$D = 12.9788 \text{ m}; \delta = 10 \text{ } \Omega\text{-m.}$$

$$\Rightarrow R_m = 0.3852 \text{ } \Omega.$$

Resistencia de n jabalinas (R_j):

Para distancia entre jabalinas menor que $4L_1$:

$$R_j = \frac{\delta}{2\pi L_1} \ln \frac{2L_1}{R_{MG}}$$

R_{MG} = para calcular este valor consideramos la jabalina interna como pivote y nos ayudamos de la Fig. 5.7.

$$R_{MG} = \sqrt{(r_0)(a_2)(a_3)(a_4)(a_5)}$$

$$n = 5; r_0 = 0.0095 \text{ m}; a_2 = a_3 = 9.4175 \text{ m}; a_4 = a_5 = 7.2069 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow R_{MG} = 2.1292 \text{ m.}$$

$$L_1 = 2.5 \text{ m.}; \delta = 10 \text{ } \Omega\text{-m.}$$

$$\Rightarrow R_j = 0.5435 \text{ } \Omega.$$

Resistencia de la combinación malla-jabalina
(R_T):

$$R_T = \frac{(R_j)(R_m)}{R_j + R_m}$$

$$\Rightarrow R_T = 0.2254 \Omega.$$

e) Método de la Corporación Eléctrica Mitsubishi.

Resistencia a tierra producida por los conductores horizontales de la malla (R11):

$$R_{11} = \frac{1.045 \delta}{L} \left(\ln \frac{2L}{a} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right)$$

Resistencia a tierra producida por las jabalinas (R22):

$$R_{22} = \frac{0.52}{n L_1} \ln \frac{4L_1}{b} - 1 + \frac{2 K_1 L_1}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2$$

$L = 92.4 \text{ m.} = 303.1496 \text{ pies}; L_1 = 2.5 \text{ m.} = 8.2021 \text{ pies.}$

$$a = \sqrt{1/12 (d) (h)}$$

$d = 0.414 \text{ pulgadas}; h = 1.9685 \text{ pies.}$

$$\Rightarrow a = 0.2606$$

$b = 1/24 \text{ (diámetro de jabalina en pulgadas).}$

Diámetro de la jabalina = 0.75 pulgadas.

$$\Rightarrow b = 0.03130$$

$n = 5; A = 132.3 \text{ m}^2 = 1424.0653 \text{ pies}^2.$

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3 h}{\sqrt{A}} - 0.044 \frac{B}{C}$$

$$K2 = 5.50 - \frac{B h}{\sqrt{A}} + \left(0.15 - \frac{h}{\sqrt{A}} \right) \frac{B}{C}$$

$$B = 12.6 \text{ m} ; C = 10.5 \text{ m.}$$

$$\Rightarrow K1 = 1.2572 ; K2 = 5.200.$$

$$\Rightarrow R11 = 0.4361 \ \Omega ; R22 = 0.8609 \ \Omega.$$

La resistencia mutua a tierra:

$$R12 = R11 - \frac{1.045 \delta}{L1} \left(\ln \frac{L1}{a} - 1 \right)$$

$$\Rightarrow R12 = 0.3517 \ \Omega.$$

Resistencia total a tierra (R):

$$R = \frac{(R11) (R22) - R12^2}{R11 + R22 - 2R12}$$

$$\Rightarrow R = 0.4241 \ \Omega.$$

Los diferentes métodos de cálculo de resistencia, utilizados, dan resultados que varían desde 0.4806 Ω a 0.2023 Ω .

El valor de resistencia calculado por la ecuación de Laurent y Niemann, presenta un valor mayor a los calculados con otros métodos porque no considera los efectos de los espaciamentos

entre los conductores, la profundidad de enterramiento de la malla, ni las interferencias mutuas entre los conductores. Además, la Compañía Brasileña CHESF (Compañía Hidroeléctrica do São Francisco) nos indica que, por experiencia, el valor calculado por la fórmula de Laurent y Niemann es comunmente superior al valor medido.

Para c/u de los métodos el V_{max} . de malla será:

$$V_{max.} = (I) (R)$$

$$I = 4232 \text{ Amp.}$$

- Para el método de Laurent y Niemann,

$$R = 0.4806 \Omega.$$

$$\Rightarrow V_{max.} = 2033.8992 \text{ (V)}.$$

- Para los métodos Dwight y Koch, unidos,

$$R = 0.2023 \Omega.$$

$$\Rightarrow V_{max.} = 856.1336 \text{ (V)}.$$

- Para el método de la Compañía Italo-Argentina de electricidad, $R = 0.2254 \Omega$.

$$\Rightarrow V_{max.} = 953.8928 \text{ (V)}.$$

- Para el método de la Corporación Eléctrica Mitsubishi, $R = 0.4241 \Omega$.

$$\Rightarrow V_{\max.} = 1794.7912 \text{ (V)}.$$

De los resultados obtenidos, se puede observar que 2 de los 4 métodos de cálculo de resistencia de puesta a tierra, el $V_{\max.}$ de la malla supera al potencial de paso ($V_{\text{paso}} = 1582.5 \text{ V.}$), esto se debe a que se considera un amplio tiempo de despeje de falla ($t=4 \text{ seg.}$); si se considera un tiempo de despeje de falla de 1 seg., por ejemplo, el potencial de paso es de 3165 V., que supera ampliamente al potencial de malla calculado con cualquiera de los métodos utilizados. De todas maneras una resistencia de:

$$1582.5/4232 = 0.3739 \Omega.; \text{ es un valor seguro.}$$

De lo dicho anteriormente, el diseño se acepta y lo que queda es comprobar el valor de resistencia, midiendo en el terreno con el método descrito en la sección 4.5.6. El valor medido deberá ser \leq a 0.3739Ω .

Para asegurarse de que este valor va a ser realmente inferior deben colocarse jabalinas en

todos los puntos de unión de los conductores de la malla dispuestos horizontalmente. Debe recordarse que se está protegiendo tanto la vida de las personas, como el equipo del Lab. de Alta Tensión cuyo costo es considerable.

4) DISEÑO DEFINITIVO.

Se ha logrado cumplir con todos los requerimientos de seguridad y de equipos; por lo tanto se considera el diseño como definitivo.

3.3. DETALLES DE CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

Determinada la longitud que deben tener los conductores que forman la malla, para presentar una determinada resistencia de tierra, se procede a la construcción de la misma. El procedimiento a seguir es el siguiente:

a) Excavar una zanja que, por facilidades en la instalación de la malla, será de 1 m. de ancho y de una profundidad tal que llegue hasta el nivel 75:05 (ver plano en el anexo D).

b) Rellenar la zanja desde del nivel 75:05 hasta el

nivel 75:55 con arcilla fina zarandeada (a los efectos de eliminar piedras y cantos rodados) apisonada con agua en forma continua.

c) Instalar los conductores (cables y jabalinas).

De acuerdo a los niveles de corriente máxima a ser disipada y debido a aspectos mecánicos y de corrosión, el conductor usado será cable de cobre 2/0 estañado y desnudo, con un mínimo suficiente de ebras para una mayor flexibilidad y por consiguiente una mejor maniobrabilidad.

Las jabalinas usadas en la malla de tierra son del tipo cobre con alma de acero y cuyas medidas serán las medidas Standard aplicadas de 3/4" de diámetro x 2.5 m. de longitud.

El conductor que une a la malla de puesta a tierra, con el punto central de tierra, al cual se conectan los terminales de tierra de los diferentes equipos del Lab. de Alta Tensión, será una barra (platina) de cobre de 1/4" x 2" x 0.95 m. de longitud, con la finalidad de que la conexión sea menos inductiva (como aconsejan los fabricantes de equipos para Lab. de Alta Tensión). El extremo superior de esta barra de cobre irá

conectado a una plancha de cobre de 50 cm.x 50 cm.x 2 mm., la misma que tendrá conexiones apertnables con la finalidad de tener varios puntos de conexión y poder fácilmente aterrizar los diferentes equipos de construcción de alto voltaje.

El conductor que conecta la estructura metálica del edificio a la malla de puesta a tierra, será cable de cobre 1/0 desnudo. La conexión de la estructura del edificio será realizada siguiendo el camino más corto desde los plintos a la malla de tierra (ver Fig. 5.7).

Las jabalinas de puesta a tierra, los conductores de la malla, la barra principal de puesta a tierra, y los diferentes conductores de conexión de puesta a tierra de equipos y estructura del edificio, deberán estar completamente libres de material aislante, pinturas o cualquier sustancia que afecte al contacto de los conductores con el suelo.

Los cables serán tendidos horizontalmente en la parte central de la ranja, de manera que sigan en lo posible líneas rectas sin grandes ondulaciones.

Las jabalinas serán clavadas cuidadosamente para evitar algún daño metálico.

Para la ubicación de cables y jabalinas referirse a la Fig. 5.7.

d) Conectar los diferentes elementos del sistema de puesta a tierra. Para realizar tales conexiones se utilizará la conexión CADWELL, debido a que presenta las siguientes características:

- Capacidad de conducción de corriente igual a la del conductor.
- No se deteriora con los años.
- Enlace molecular permanente que no puede dañarse o corroerse.
- Soporta fallas repetidas.
- Bajos costos de trabajo en su instalación.
- Hecha con equipo barato y de poco peso.
- No son requeridas experiencias o habilidades especiales.
- No se requieren potencia o calor externas.
- Puede ser revisada, por motivo de calidad, a través de una inspección visual.

El sitio y el tipo de conexión se indican en las figuras 5.7 y 5.8 respectivamente; la conexión

entre la platina, o barra de cobre, a la plancha de cobre se indica en la Fig. 5.9. Los detalles de cada una de ellas se indican en la tabla XI.

- e) Rellenar la zanja (mínimo 50 cm.) con arcilla fina zarandeada apisonada con agua en forma continua, de tal forma que exista un contacto directo entre los cables y la tierra.

Como los potenciales tolerables de contacto y de paso dependen de la resistividad de la capa superficial del terreno, se ha adoptado la solución de colocar una capa de piedra triturada (tamaño entre 1.2 y 2.5 cm.) de un espesor de 10 cm. en toda la superficie que rodea al Lab. de Alta Tensión.

La instalación del sistema de puesta a tierra, deberá ser coordinado con la obra de construcción civil del edificio del Lab. de Alta Tensión.

3.4. PROTECCION DE LA MALLA.

La protección de la malla se inicia desde el momento en que se está efectuando los surcos y su relleno con arcilla.

Después de esta operación, la correcta colocación de

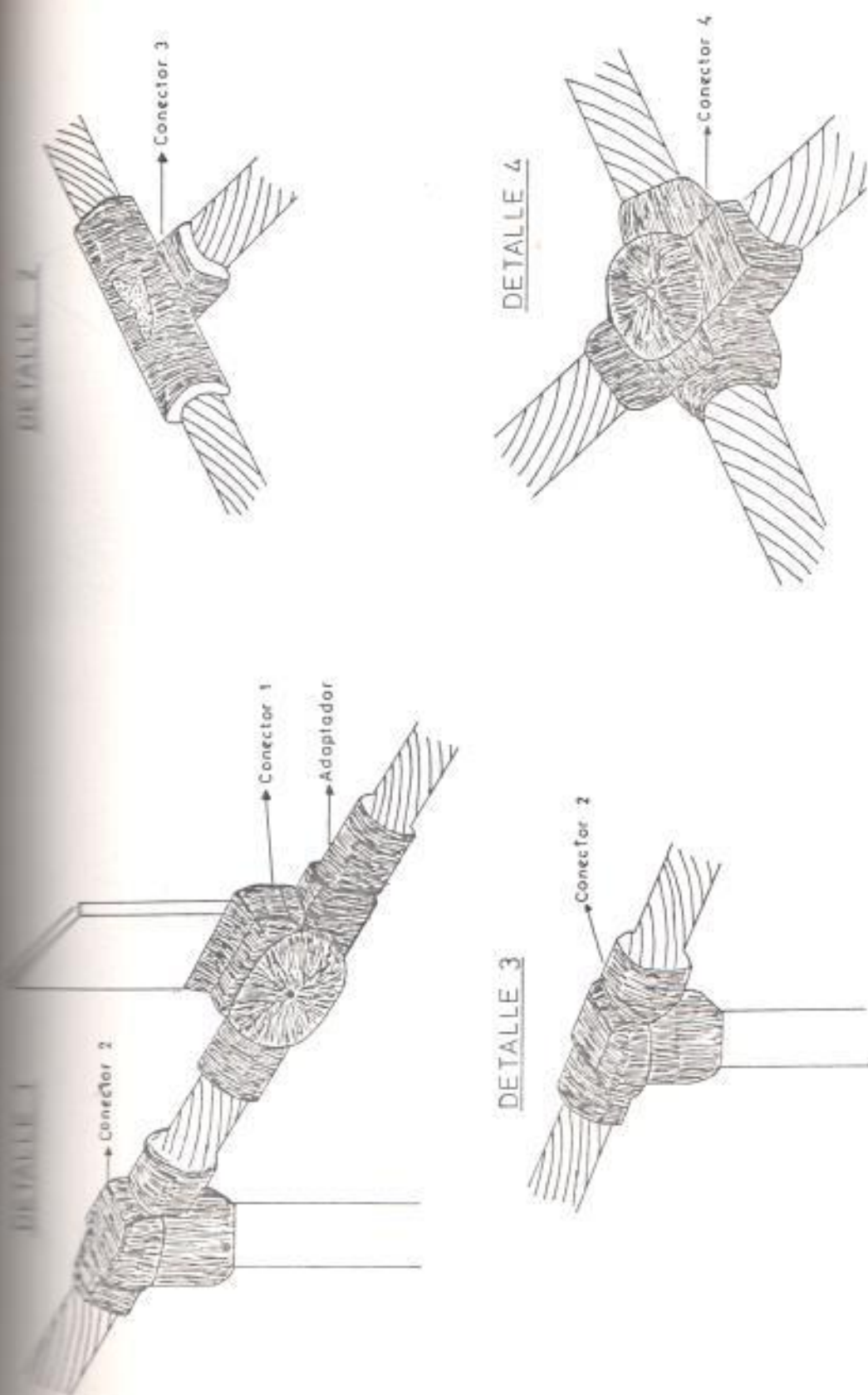


Fig. 5.8 Detalles de conexión y tipos de conectores de puesta a tierra.

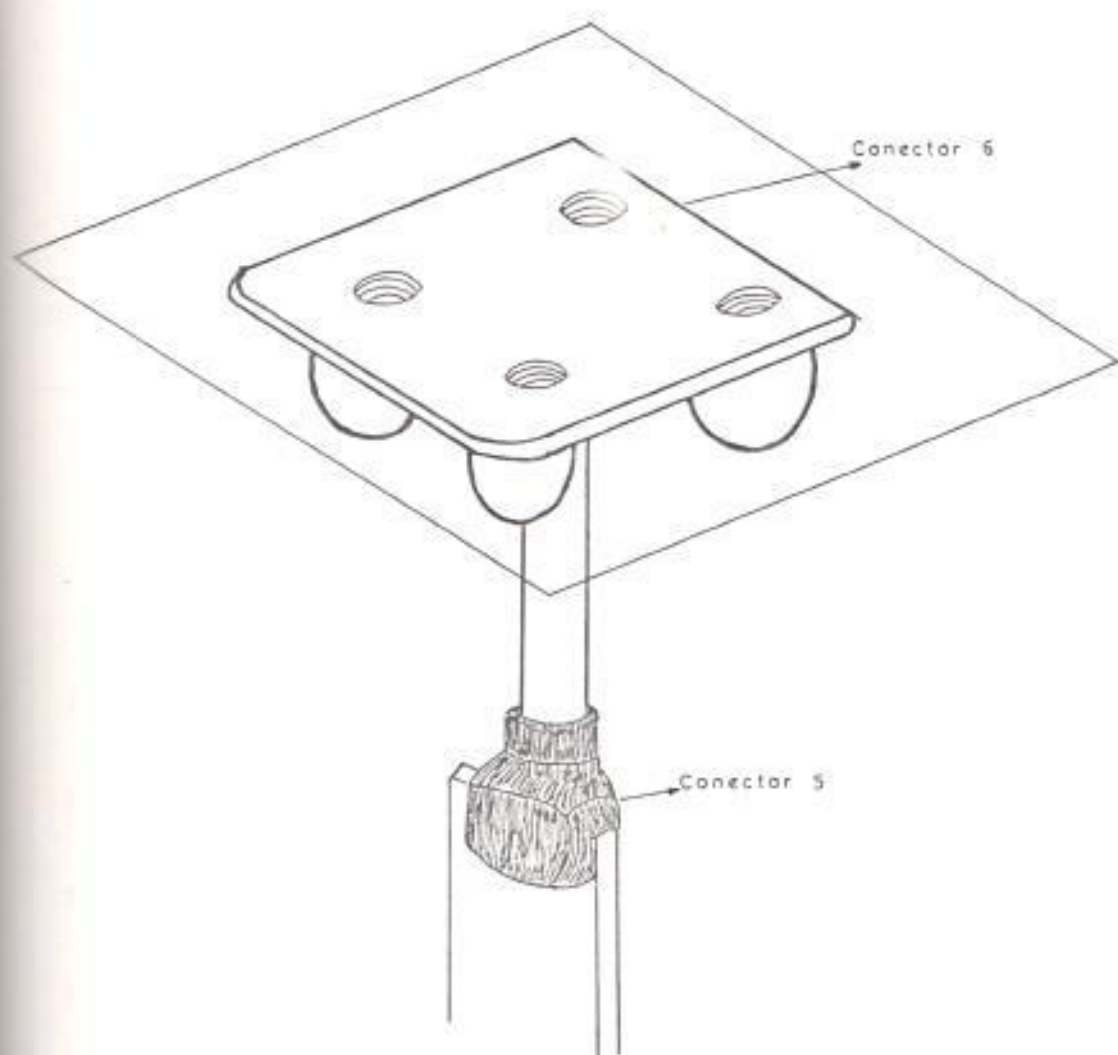


Fig. 5.9 Detalle de conexión barra a plancha de cobre.

TABLA XI

DETALLES DE CONECTORES EN EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

CONECTOR	DESCRIPCION	REFERENCIA COPWELD	CONDUCTORES				MOLDES COPWELD
			CABLE	CABLE	BARRA	JABALINA	
1	Molde para unión de cable con barra.	LE	2/0		1/4"x2"	-	LEC-2LEH + adapta- tador conductor 2/0
2	Molde para unión cable con jabalinas de copperweld.	BT	2/0	-	-	3/4"	BTC - 1826
3	Molde para unión cable a cable.	Tipo TA	2/0	2/0	-	-	TAC - 2626
4	Molde para unión cable a cable.	Tipo TA	2/0	2/0	-	-	XAC - 2625
5	Conexión de barra a cable.	Tipo LJ	4/0	-	1/4"x2"	-	LJC - E620
6	Conexión de placas a tierra a plancha de cobre.	Serie B-164	-	-	-	-	B-164-20

los conductores horizontales y jabalinas.

Las barras y conductores de cobre NO deberán ser conectadas mediante tornillos, grampas o abrazaderas de HIERRO DESNUDO o galvanizado.

La presencia de hierro, plomo y zing promueve la corrosión del cobre donde haya aguas de lluvia o del suelo que contenga electrólitos. Para unir la malla de tierra (conductores de cobre) y la estructura de hierro del edificio, se efectua un estañado en el cable de cobre a los efectos de que no se produzca corrosión debido al par que se forma entre el cobre y el hierro galvanizado.

Para evitar un mal contacto proveniente de una futura corrosión, es necesario que se pinten, todos los puntos de interconexión, con pintura anticorrosiva.

Cuando se realice el apisonamiento de la arcilla que cubre a la malla de tierra, deberá ser hecho de tal forma que se alcance una buena compactación sin producir daños mecánicos a los conductores.

Es aconsejable dejar accesos a puntos de revisión con el fin de controlar periódicamente el estado de los conductores de la malla y tomar las debidas

precauciones en caso de ser necesario. Estos puntos de revisión construidos en los sitios que se señala en la Fig. 5.7 y cuyo detalle de construcción se indica en la Fig. 5.10.

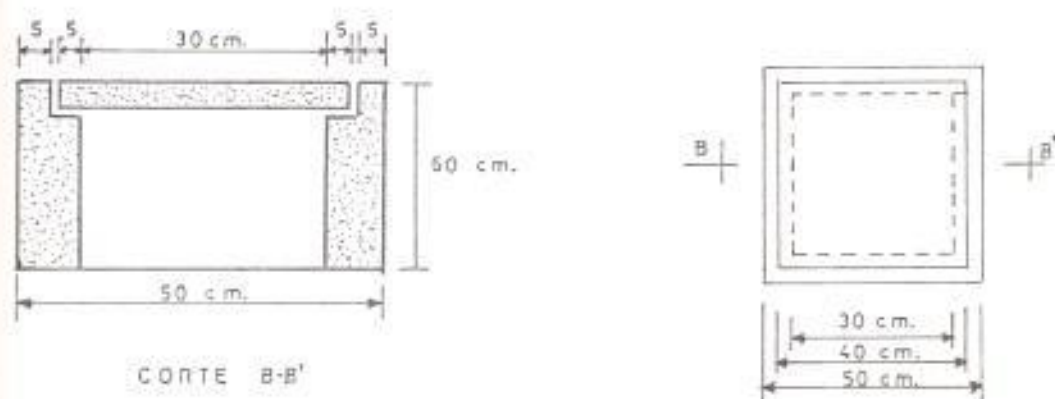


Fig 5.10 Caja de revisión malla de tierra.

5.5. PRESUPUESTO (a Enero de 1969).

DESCRIPCION DEL MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (SUQUES)	PRECIO TOTAL (SUQUES)
Conductor de cobre 2/0	92.4 m.	1263.4/m.	114243.4
Conductor de cobre 1/0	4.9 m.	980.1/m.	4763.3
Jabalina de Cooperweld 0-3/4" x 2.5 m.	17	2640	44880.0
Barra de cobre 2"x1/4"x0.95 m.	1	1135	1135.0
Plancha de cobre 0.5 m. x 0.5 m. x 2 mm.	1	4000	4000.0
Molde conector LEC-2LEH + adaptador 2/0.	1	13005.3	13005.3
Molde conector BTC-1826	1	10805.3	10805.3
Molde conector TAC-2626	1	10805.3	10805.3
Molde conector XAC-2626	1	10805.3	10805.3
Molde conector LIC-EG20	1	10805.3	10805.3
Molde conector 0-164-22	1	10805.3	10805.3
Cartuchos de suelda Cadweld	32	2117.5	67760.0
Excavación	101.6 m.	700/m.	71148.0
Jarandeo arcilla	92.4 m.	160/m.	14784.0
Conexión			6000.0
Piedra triturada	30 m.	1230/m.	36900.0
		Total puesta a tierra	432645.5

CAPITULO VI

DISEÑO DE DETALLES

PROTECCIONES.

Las protecciones pueden ser de diversa índole dentro del concepto eléctrico, si se mira desde el interior hacia el exterior y protecciones interiores en sí mismo.

6.1.1. Protecciones interior - exterior.

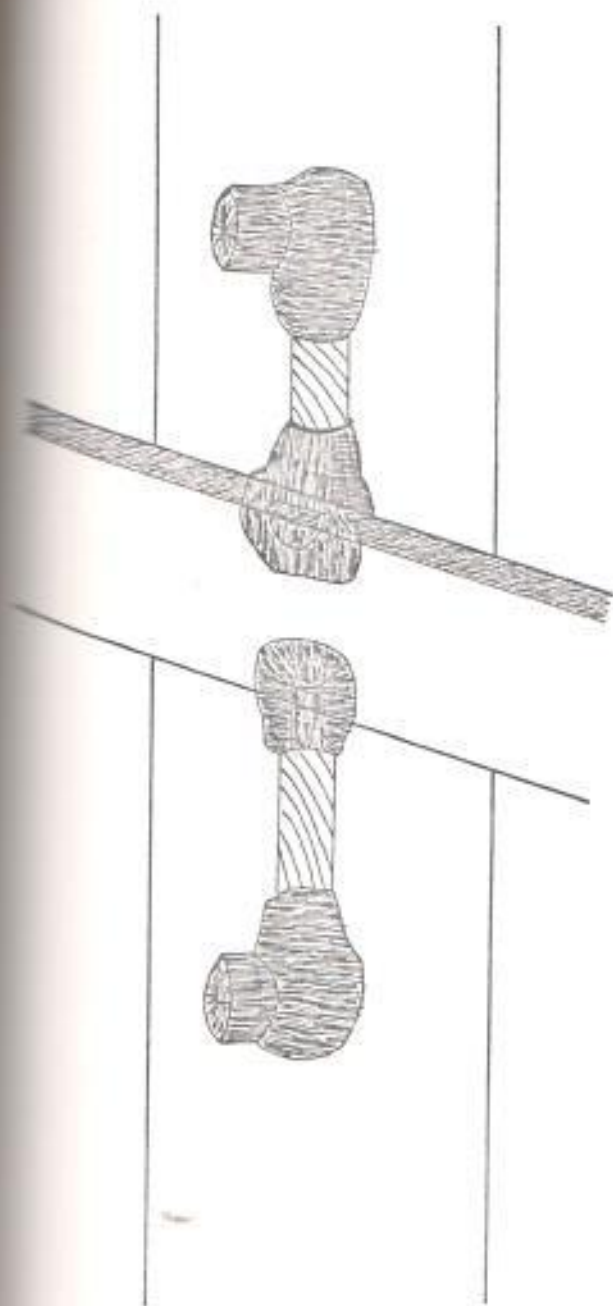
Se considerarán los efectos perturbadores originados en el interior del laboratorio y que pueden salir al exterior por diversos medios, sean a través de las paredes como ondas de alta frecuencia, originadas en las descargas de alta tensión, o por efecto corona, a través de cables que entren o salgan del edificio, o por ductos de desague o tubería de agua potable que entran al edificio, especialmente los situados en el área de prueba, o a través de venas de agua conductoras de dichas perturbaciones.

Para el caso de ondas de alta frecuencia se ha

establecido en el capítulo III, recomendaciones y procedimientos que se ejecutarán durante la construcción del laboratorio.

Como se manifestó anteriormente, el apantallamiento debe conectarse a la malla de tierra principal, a fin de que las ondas llevadas por el mismo tengan su escape a tierra. Esta conexión a tierra se la realizará por la parte inferior de la Jaula de Faraday, esto es, entre el tubo galvanizado que pasa por el centro de la "jaula" y la barra de cobre que constituye el punto principal de puesta a tierra. La conexión utilizada es la conexión Cadweld y cuyo detalle de conexión y conectores se los indica en la Fig. 6.1.

Así mismo fue mencionado anteriormente, lo relacionado con los desagües, puesto que se realizarán pruebas de alta tensión bajo lluvia artificial, será necesario de que no exista una vena líquida continua, entre el interior del edificio y el exterior, pues esto será un buen conductor de ondas perjudiciales. Para evitar este medio de transporte se deberá



CONECTOR	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA CADWELD	CONDUCTORES			MOLDE CADWELD
			BARRA	CABLE	TUBO ACERO	
7	Molde para unión de cable a tubo de acero horizontal.	Tipo VN	—	2/0	1/2"	VNC-2G-H-2
8	Molde para unión cable a barra	Tipo LJ	1/4" x 2"	2/0	—	LJC-EG 2G

Fig. 6.1 Detalle de conexión de puesta a tierra de la Jaula de Faraday.

prever la utilización de un recipiente en el área de pruebas y al cual irán todas las aguas utilizadas y cuando no haya ninguna prueba se expulsará mediante una bomba.

La puerta que conduce al interior de la Jaula de Faraday, debe ir equipada con contactos de puerta. Los contactos están cerrados cuando la puerta está cerrada. Los contactos irán conectados en serie y alimentados desde el toma corriente correspondiente en la mesa de control. Si la puerta está abierta el equipo de prueba no puede ser energizado; si esta puerta está siendo abierta mientras el equipo está energizado, un contactor desconectará inmediatamente el circuito. Lámparas de aviso rojo y verde serán instalados en la puerta e irán conectadas a los terminales apropiados de la mesa de control; las lámparas de aviso indicarán las condiciones indicadas en la sección 1.5.1.

Los cables de entrada hacia el laboratorio deberán ser del tipo apantallado NYSY, NYHSY, NYSEY, NYHSY o similares que tienen pantallas de cobre 0.8 a 14 mm. El significado de las

letras anteriores es el siguiente:

N = Cable con conductores de cobre o aluminio según VDE.

Y = Aislamiento PROTODUR.

S = Apantallamiento (tipo de cobre).

Y = cubierta PROTODUR.

H = capas limitadoras del campo eléctrico.

Todos los cables de alimentación y control al cuarto de pruebas de alta tensión, ingresarán a la Jaula de Faraday, por un punto central, esto es, por el interior de una canaleta metálica cuya ubicación y detalles de construcción se indican en la Fig. 6.2. Esta canaleta se conectará a la Jaula de Faraday en el cruce. La conexión se realizará utilizando solda y su detalle de conexión se indica en la Fig. 6.3.

6.1.2. Protecciones interiores.

Dentro de las protecciones interiores se tendrá especial cuidado con los cables de control que serán del tipo apantallado cuyos extremos irán sólidamente unidos a tierra a través de la canaleta que los conduce al

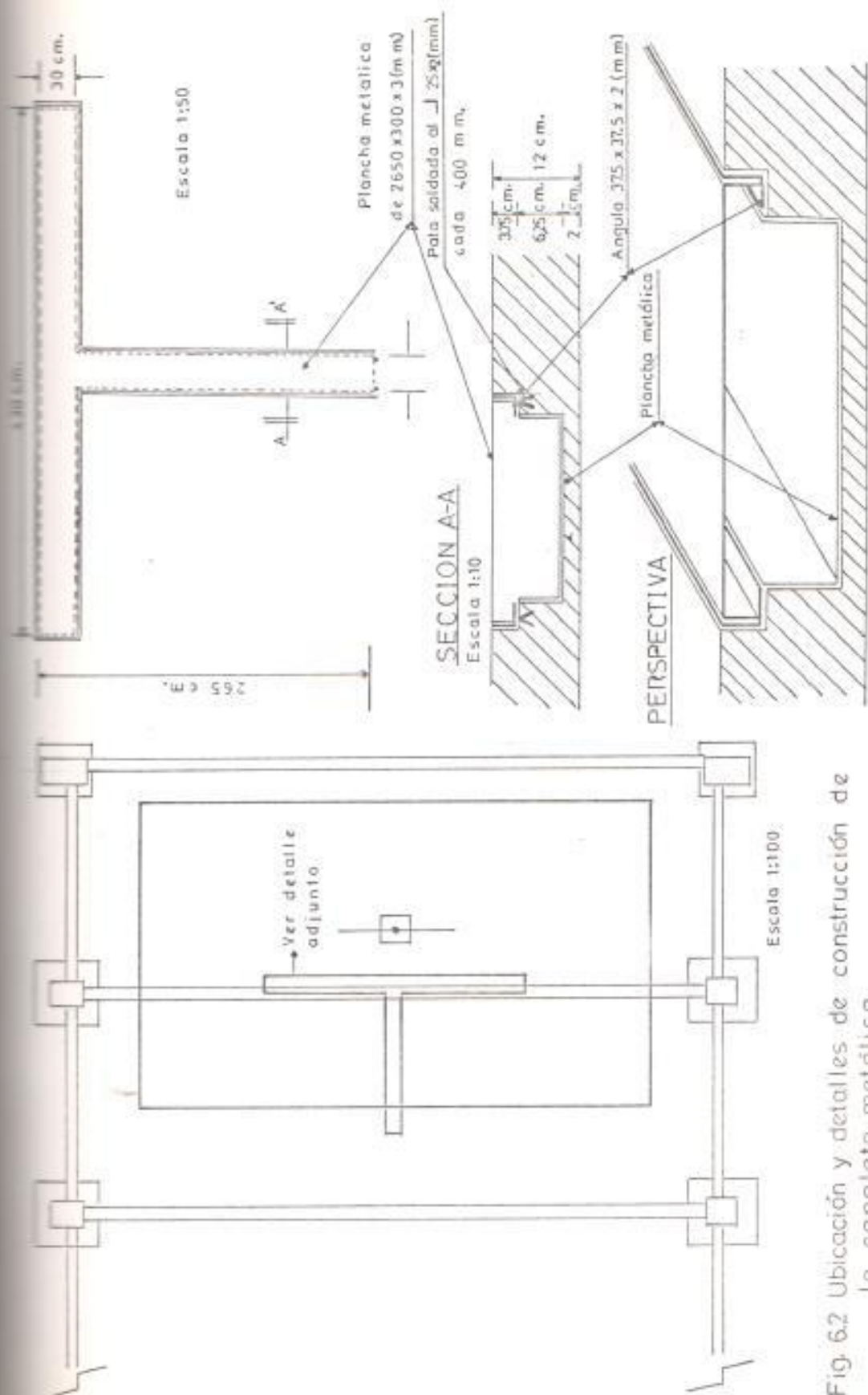


Fig. 6.2 Ubicación y detalles de construcción de la canaleta metálica

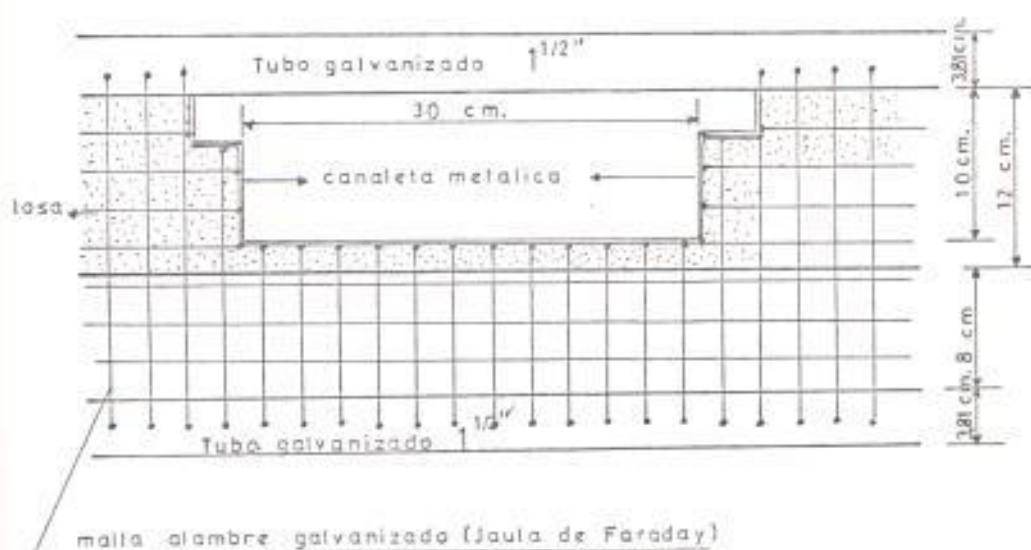


Fig. 6.3 Detalle conexión canaleta a Jaula de Faraday.

interior de la "jaula".

Los cables de control, como es natural, estarán uniendo mesas de mando y equipo de prueba, por lo tanto dichas mesas de mando deberán estar puestas a tierra mediante el respectivo conductor de cobre conectado a la canaleta metálica que conduce a dichos conductores.

Aparte de los conductores de control están los de fuerza, que deben observar los mismos requisitos que los anteriores, debiendo evitar que existan corrientes de retorno a través del neutro o cable de tierra.

Los siguientes conductores de control, deben ser instalados desde la mesa de mando a los aparatos individuales: (Tomando como referencia el Equipo de la MWB MESSWANDLER presentado en el Anexo A)

- a) Al transformador de pruebas; cable flexible aislado $2 \times 4 \text{ mm}^2$.
- b) Al mecanismo de dirección; cable flexible aislado $3 \times 0.75 \text{ mm}^2$.
- c) Al conmutador de tierra; cable flexible

aislado 7 x 0.5 mm².

d) Al espinterómetro; cable flexible aislado 3 x 0.75 mm².

Además cables de medida coaxial serán instalados desde el escritorio de control hacia los instrumentos de medida individuales, como sigue:

- Al capacitor de medida (medida del voltaje pico AC).
- Al capacitor de carga (medida del voltaje de impulso).
- Al resistor de medida (medida del voltaje DC).

Dentro del área del laboratorio, estarán situados diversos elementos tales como la mesa de trabajo, escritorios, etc, todos ellos, especialmente si son metálicos, o si sus estructuras son metálicas, deberán estar provistos de un escape a tierra, para evitar diferencias de tensión entre dos puntos.

Antes de que el equipo de prueba sea puesto en operación, todas las conexiones y uniones a

tierra deberán ser verificadas una y otra vez.

6.2. CONSTRUCCION DE PAREDES.

La construcción de paredes requiere de un cuidado especial a partir de la colocación de los hierros para los plintos ya que de cada uno de estos, cercanos a la malla de tierra, saldrá un chicote que se unirá por medio de suelda a la malla de tierra. El detalle de conexión y conectores se indica en la Fig. 6.4.

Las paredes exteriores serán de concreto y las interiores irán cubiertas de piedra pómez (absorbente de sonido) y aislantes térmicos para que junto con la Jaula de Faraday el conjunto sea a prueba de sonido, calor e interferencias electromagnéticas.

Las paredes cercanas a la Jaula de Faraday tendrán ventanas elevadas con la finalidad de que la iluminación natural no perturbe la observación de experimentos en los que ocurren fenómenos que pueden mirarse, en mejor forma, en la oscuridad.

6.3. CONSTRUCCION DEL TUMBADO.

El tumbado deberá llenar los requisitos tanto de



CONECTOR	DESCRIPCION	REFERENCIA CADWELD	CONDUCTOR		HOLDE CADWELD
			CABLE	CABLE VARILLA HIERRO	
9	Molde para unión cable a cable	Tipo TA	2/0	1/0	TAC-2G, 2C
10	Molde para unión cable a varilla de hierro	Tipo RR	—	1/0	RRH 5G, 2C RRH 5S, 2G

Fig. 6.4 Detalle de conexión de puesta a tierra de la estructura metálica del edificio del Lab. de Alta Tensión

Arquitectura como de construcción Civil, se contemplará dentro del estudio del proyecto, la manera de dotar las facilidades para la colocación y fijación de la Jaula de Faraday.

Se instalarán ganchos o poleas fijas, que permitan asegurar elementos de experimentación al techo y además ser usadas para suspender ciertos componentes ligeros, tales como las conexiones de alto voltaje, mediante cuerdas plásticas.

Con respecto a la iluminación, que partirá desde el tumbado, se realizará mediante tubos soportantes los mismos que estarán perfectamente unidos a la citada Jaula de Faraday, para guardar la debida continuidad (ver la Fig. 6.5).

4. CONSTRUCCION DEL PISO.

Un requerimiento técnico de los Lab. de Alta Tensión, es el frecuente cambio de los objetos de pruebas y un gran trabajo de reconexión, por lo cual se prefiere instalar la cabina de control al mismo nivel del piso del área de pruebas, esto es muy particular puesto que con las técnicas de pruebas modernas hay que mirar características pequeñas en los objetos de

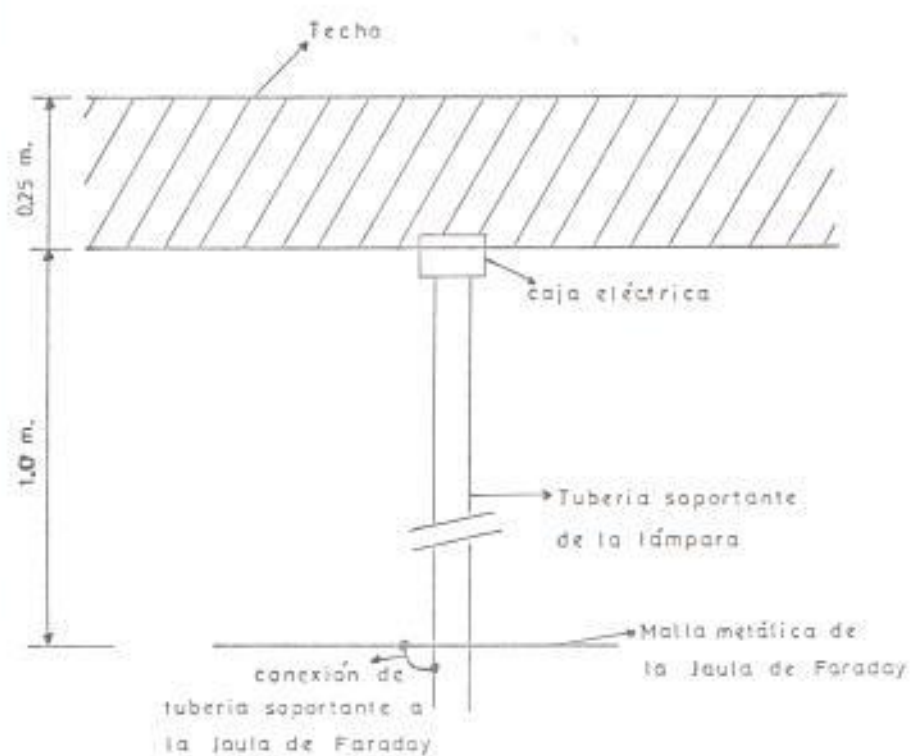


Fig. 6.5 Detalle de conexión entre los tubos, soportantes para iluminación, y la Jaula de Faraday

prueba durante los ensayos.

Una importante decisión a ser tomada en vista de futuros objetos de prueba, concierne la capacidad de carga necesaria del piso del cuarto de investigación. Está esencialmente influenciada por la duda de que el equipo de gran escala es móvil o no. La movilidad puede ser enfocada desde el punto de vista de la utilización óptima del salón.

Según el análisis del anexo F, el piso del salón de alto voltaje, el cual deberá soportar los más grandes pesos de los equipos, deberá tener un valor de esfuerzo máximo que soporte a los equipos más pesados. Estos equipos son los siguientes:

- Transformador de pruebas : 400 Kg.; =>
 $r_{\max.} = 126.32 \text{ kg/cm}^2$.
- Generador de Impulsos: 244.2 Kg.; => $r_{\max.} = 77.73$
 Kg/cm².

Se ha creído conveniente que una capacidad portante del piso de 250 Kg/cm² es un valor más que suficiente para soportar los pesos de los equipos antes indicados, dejando un amplio margen para una futura ampliación del Lab. de Alta Tensión con equipos más pesados, y también para equipo a ser probado cuyo

peso supere al peso del transformador de pruebas.

El estrato interior del piso será de concreto, el cual deberá estar impregnado de sustancias sellantes para evitar la penetración de aceite. La losa será de 12 cm., con una superficie de gravilla basáltica para que el piso no sea resbaladizo.

Para la construcción de la losa del piso, se deberá tomar en cuenta los detalles para la puesta a tierra del laboratorio, la malla del sistema del blindaje y los detalles para la canaleta por donde ingresarán los cables de control y fuerza.

Los hierros de la losa del piso, irán conectados a tierra, con la finalidad de que todo el conjunto se encuentre a un mismo potencial y, además, para disminuir la resistencia de puesta a tierra.

En la Fig. 6.6, se indica la forma como se dispondrán los diferentes elementos que irán debajo del piso del laboratorio.

6.5. ILUMINACION.

La iluminación debe ser finamente ajustable, ya que

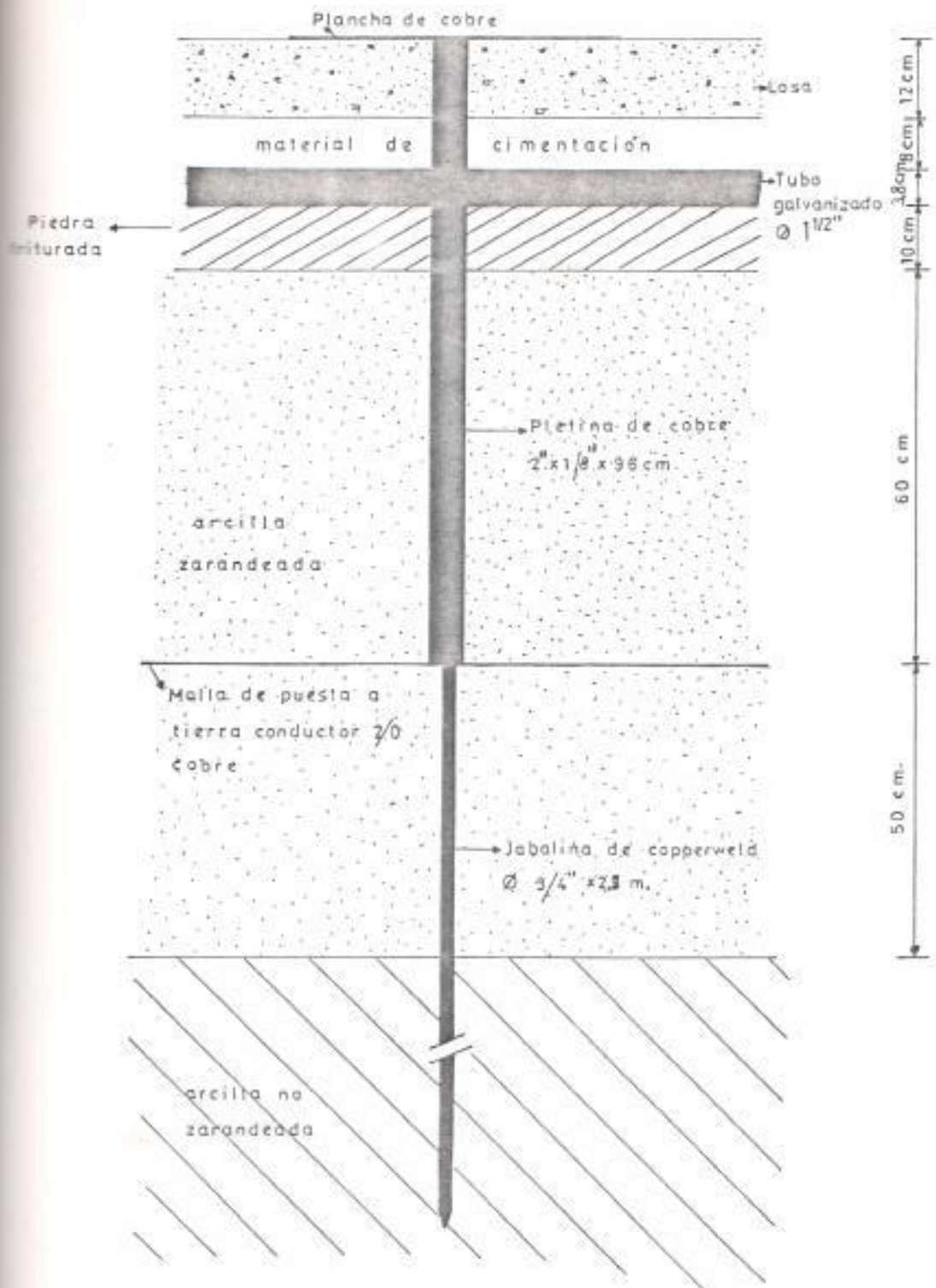


Fig. 6.6 Disposición de las diferentes elementos que irán debajo del piso del Lab. de Alta Tensión

las observaciones visuales y mediciones ópticas representan una ayuda auxiliar indispensable en la ejecución de los experimentos de alto voltaje.

Una buena iluminación ayudará a evitar repeticiones innecesarias de los experimentos, por lo tanto se debe tener buena visibilidad de los aparatos bajo prueba.

En los paneles de control, la iluminación será lo suficientemente amplia para poder leer con precisión los valores señalados por las agujas de los instrumentos de medida situados en dicho panel.

Para la iluminación se deberá llenar el requisito de número suficiente de luxes (para laboratorios de este tipo se recomienda como iluminación media de 500 luxes. El control de la iluminación se efectuará desde la mesa de control.

Como la Jaula de Faraday estará a 1 m. bajo el techo del edificio, se deberá tomar en cuenta la sombra de la malla que se podría proyectar sobre el piso del laboratorio, lo que acarrearía algún problema, por lo que si la iluminación parte desde el techo, deberá realizarse mediante tubos soportes, los mismos que estarán perfectamente unidos a la "jaula", para dar

la debida continuidad. Las luminarias fluorescentes deberán ir cubiertas de una malla metálica (continuidad de la Jaula de Faraday) para evitar de esta manera se enciendan debido al campo electrostático que podría existir al momento de un cierto ensayo.

Es factible, también, la utilización de reflectores a fin de poder concentrar mayor iluminación en una determinado punto, los reflectores pueden ser dirigidos a voluntad o controlados según la necesidad.

Las ventanas que se ubiquen cerca a la Jaula de Faraday, que serán ventanas elevadas, deberán ir provistas de cortinas para permitir obscurecer el área de pruebas, lo cual ayudará para las observaciones visuales de corona, etc.

5.6. PRESUPUESTO GENERAL (a Enero de 1989).

DESCRIPCION DEL MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (SUQUES)	PRECIO TOTAL (SUQUES)
Jaula de Faraday			620121.9
Puesta a tierra			432645.5
Molde conector VNC-26-H-2	1	10805.3	10805.3
Molde conector LJC-EB 26	1	10805.3	10805.3
Molde conector TAC-26 26	1	10805.3	10805.3
Molde conector RRH-56 26	1	10805.3	10805.3
Cartucho de suelda Cadweld	20	2117.5	42350
Canaleta metálica, accesorios de la misma, conexión a Jaula de Faraday.			32570
Mano de obra			222743.7
Ingeniería y supervisión			200487.3
		Total	1594159.5

CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se han determinado todos los detalles técnicos para la construcción del blindaje y la puesta a tierra de un Laboratorio de Alta Tensión, en el que se contará con equipo necesario para realizar pruebas en alto voltaje hasta 420 KV. de voltaje de impulso y 140 KV. de voltaje alterno a frecuencia industrial. Así mismo se ha tomado en cuenta los detalles presupuestarios para dar un valor muy aproximado del costo de construcción.

La Jaula de Faraday estará formada por material de muy buenas cualidades eléctricas y de fácil adquisición en el mercado local, lo que hace técnica y económicamente ventajoso.

Para los efectos de construcción del edificio del laboratorio, se procederá a la medición de la Resistencia de puesta a tierra, por medio del método recomendado, una vez que se haya instalado el sistema de puesta a tierra. La finalidad es la de garantizar el valor deseado. Se espera que la resistencia varíe con el tiempo, pero en todo caso como la resistividad del suelo fue medida en época de verano, la resistencia disminuirá ante la presencia de precipitaciones fluviales.

La colocación de los conductores del sistema de puesta a tierra, aterrizamiento de la estructura metálica del edificio, colocación de la Jaula de Faraday y su aterrizamiento, y demás detalles de construcción del blindaje y puesta a tierra del Laboratorio de Alta Tensión, será efectuado bajo la supervisión permanente por parte del Ingeniero Eléctrico que se encontrare a cargo de la dirección de la obra, en junta del Ingeniero Civil y de los constructores.

RECOMENDACIONES.

Es de mucha importancia para la Escuela Superior Politécnica del Litoral el contar con una Laboratorio de Alta Tensión, ya que es fundamental para los fines didácticos de la ESPOL, y también, en cuanto a lo comercial se refiere, prestaría un gran servicio al sector eléctrico del Ecuador. Cabe anotar que contando con un laboratorio de este tipo, y en vista de que la ESPOL se encuentra en su fase inicial de investigación, se podría experimentar en áreas referentes a construcción de materiales conductores y aislantes.

Considerando estos aspectos importantes, es necesario que se de agilidad en la adquisición de equipos y construcción del edificio de Alta Tensión, en vista de que los costos

de los mismos y de los materiales de construcción se ven afectados considerablemente por el incremento de los precios, debido a la inflación de los mismos al transcurso del tiempo.

BIBLIOGRAFIA.

1. D. Kind, An Introduction to High - Voltage Experimental Technique (Braunschweig: Vieweg, 1978).
2. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Laboratorio de Alto Voltaje, Hojas Guías de Laboratorio (Quito 1983).
3. Unidad de Planificación del Nuevo Campus Politécnico de la ESPOL, Memoria Técnica y Descriptiva de las Instalaciones Eléctricas, Telefónicas y Sistemas Especiales de las Áreas Urbanísticas del Núcleo de Ingeniería del Campus Politécnico.
4. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Power Apparatus Testing Techniques (Guayaquil 1979)
5. A. Vicuña, "Diseño del Nuevo Laboratorio de Alto Voltaje para la Escuela Politécnica Nacional" (Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, 1977).
6. M. Frydman, High Voltage Laboratory Equipment (Newster, New York, Hipotronics Technical Application Series, Marzo 1984).
7. A. Navarro, "Blindaje Electromagnético de Quirófanos y Salas de Terapia Intensiva", IEEE Electrolatina, (Marzo 1974).
8. J.D. Krauss, Electromagnetismo (Editorial el Ateneo, Buenos Aires, 1960).

9. MWB MESSWANDLER-BAU AG, High Voltage Construction Kit (Bambert, West Germany, P 2/1e-1).
10. HAEFELY, The Earthing of Impulse Voltage Stations (Publ. 508040/1 E).
11. NISSIN ELECTRIC, Impulse Voltage Testing Equipment.
12. M.S. Naidu y V. Kanaruiu, High Voltage Engineering (Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1982).
13. N. La Puerta, "Estudio Cálculo y Diseño de Mallas de Tierra para Subestaciones de Alto Voltaje" (Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, 1978).
14. M. Cedeño, "Normalización de Mallas de Tierra para Subestaciones de hasta 69 KV. (Zona Costa)" (Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1981).
15. Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER), Criterios Aplicados en el Proyecto de Mallas de Tierra, (Buenos Aires, Agosto 1974).
16. SOILTEST INC., Earth Resistivity Manual (Evanston, Ill. 60202, U.S.A.).
17. ERICO PRODUCTS INC., The Cadweld Connection (Cleveland, Ohio 44139).
18. J.E.Bridges, "Environmental Considerations Concerning the Biological Effects of Power Frequency (50 o 60 Hz) Electric Fields", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-97, No.1 (January-February, 1978).