

41126

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO 64

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON**

**“SELECCIÓN Y USO DE CABLES PARA TRANSMISIÓN
EN ALTA TENSIÓN POR VIA SUBTERRÁNEA**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICO**

**P R E S E N T A :
SANDRA MALDONADO CRUZ**

**ASESOR:
ING. JESÚS NÚÑEZ VELADEZ**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

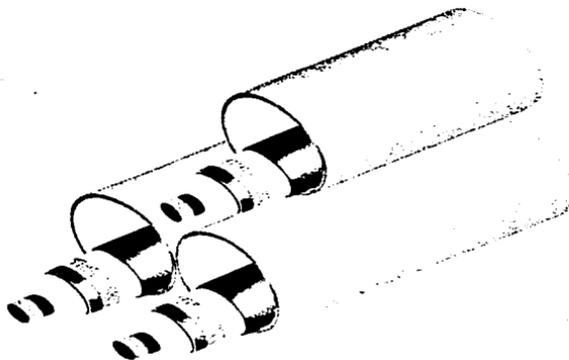
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

**"SELECCIÓN Y USO DE CABLES PARA TRANSMISIÓN EN ALTA
TENSIÓN POR VÍA SUBTERRÁNEA"**

PRESENTA

SANDRA MALDONADO CRUZ



PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

ASESOR: ING JESÚS NÚÑEZ VALADEZ

MÉXICO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2003

B



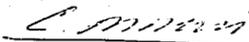
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

SANDRA MALDONADO CRUZ
P R E S E N T E.

En contestación a la solicitud de fecha 9 de enero del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. JESÚS NUÑEZ VALADEZ pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado "SELECCIÓN Y USO DE CABLES PARA TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN POR VÍA SUBTERRANEA", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 22 de enero de 2003
LA DIRECTORA


ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



- C p Secretaria Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- C p Asesor de Tesis.

LTG/AIR/IIa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGÓN
SECRETARÍA ACADÉMICA

Ing. RAÚL BARRÓN VERA
Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica,
Presente.

En atención a la solicitud de fecha 13 de marzo del año en curso, por la que se comunica que la alumna SANDRA MALDONADO CRUZ, de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "SELECCIÓN Y USO DE CABLES PARA TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN POR VÍA SUBTERRÁNEA", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, reitero a usted las seguridades de mi atenta consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 13 de marzo del 2003
EL SECRETARIO


LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS

C p Asesor de Tesis.
C p Interesado.

AIR/vr

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGÓN - UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: ENAR/JAME/0220/03.

ASUNTO: Sinodo.

LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS
SECRETARIO ACADÉMICO
PRESENTE.

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Sínoo del Examen Profesional de la alumna: SANDRA MALDONADO CRUZ, con Número de Cuenta 9017098-4, con el tema de tesis: "SELECCIÓN Y USO DE CABLES PARA TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN POR VÍA SUBTERRÁNEA".

PRESIDENTE:	ING. JESÚS NÚÑEZ VALADEZ	ABRIL	77
VOCAL:	ING. NOÉ GONZÁLEZ ROSAS	DICIEMBRE	82
SECRETARIO:	ING. RODOLFO ZARAGOZA BUCHAIN	NOVIEMBRE	90
SUPLENTE:	ING. JOSÉ LUIS GARCÍA ESPINOSA	AGOSTO	98
SUPLENTE:	ING. SERGIO RAMÍREZ RAMÍREZ	DICIEMBRE	01

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el Ing. Jesús Núñez Valadez, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Bosques de Aragón, Estado de México, 15 de marzo del 2003.
EL JEFE DE CARRERA



ING. RAÚL BARRÓN VERA

c.e.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez - Jefa del Depto. de Servicios Escolares.
c.e.p. Ing. Jesús Núñez Valadez, Asesor.
c.e.p. alumno

RBV/scd.

TESIS CON
FALTA DE CUMPLIR

E

AGRADECIMIENTOS

A mi madre:

Sira Teresa

Gracias por haber infundido en mi deseo de superación, por insistir constantemente en lo importante que era estudiar para poder lograr algún día realizar mis sueños.

A mis hermanas:

Miriam, Liliana y Magaly

Por compartir conmigo éste, mi gran logro.

A mi esposo:

Ing. Marco A. Tapia M.

Realmente no tengo palabras para expresar cuan tan agradecida estoy contigo, por haberme apoyado para realizar uno de mis más grandes sueños, siempre estuviste incondicionalmente conmigo, no fue nada fácil por todos los obstáculos que se presentaron, pero al fin he logrado uno de mis más grandes propósitos.

Mil gracias.

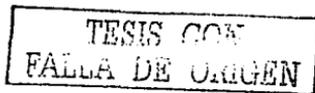
A mis hijos:

Marco Antonio, Mario André (♂), Sharon Michelle e Ian Alexei

A ustedes por ser motivo de inspiración para seguir superándome, son mis más grande tesoro, espero que éste mi gran logro les sirva de ejemplo para que algún día lleguen a realizar sus metas que se planteen.

Los Amo.

F



A mis amigos:

Ing. Jesús Núñez Valadez.

Por haberme enseñado lo que sé y por haber aceptado ser mi asesor para realizar este trabajo de tesis.

Ing. Noé Gonzalez Rosas.

Por su apoyo en momentos difíciles, a sus consejos y a los conocimientos transmitidos.

Ing. Rodolfo Zaragoza Buchain.

Por el apoyo proporcionado para la culminación de mis estudios.

Ing. David Moisés Téran Pérez

Por el tiempo, conocimientos y consejos para continuar con mi carrera y poder terminarla.

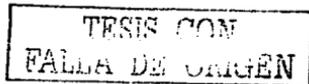
Ing. José Luis García Espinosa.

Por haber aceptado ser parte de mi jurado y revisor de tesis.

Ing. Sergio Ramírez Ramírez.

Por el tiempo dedicado para la revisión de este trabajo de tesis.

A todos gracias por su gran apoyo para la realización del presente trabajo. Siempre estuvieron pendientes de que el mismo cumpliera con las expectativas planteadas, sin lo cual la realización de ésta tesis no se hubiera llevado a cabo.



G

A los Ingenieros de Luz y Fuerza del Centro:

Ing. Luis Manuel Corripio Mazzocco.

Ing. Esteban de la Torre Cabrera.

Por su apoyo y las facilidades al proporcionarme la información y dedicación de su valioso tiempo para la realización de este trabajo de tesis, aclarando las dudas surgidas durante el desarrollo del mismo.

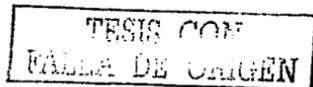
Así como la oportunidad que me brindaron para que me desarrolle profesionalmente en lo relacionado a mi carrera en esta distinguida empresa.

H

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

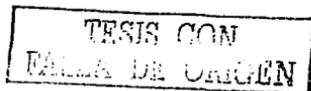
INDICE

INTRODUCCIÓN	3
ANTECEDENTES	5
CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DE LOS CABLES TIPO TUBO.	
1.1 Descripción de los tipos de cables	6
1.2 Características y descripción de los diferentes tipos de cables	6
1.3 Ventajas y desventajas de los distintos tipos de cables	14
1.4 Capacidad de conducción y las pérdidas de los cables tipo tubo	16
1.5 Empalmes, terminales y accesorios para los cables tipo tubo	33
CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS CABLES TIPO XLPE Y EPR	
2.1 Descripción de los cables XLPE y EPR	38
2.2 Características de los cables XLPE y EPR	40
2.3 Ventajas e inconvenientes de los cables XLPE y EPR	44
2.4 Capacidad de conducción y las pérdidas de los cables tipo XLP y EPR	46
2.5 Empalmes, terminales y accesorios de los cables XLPE y EPR	67
2.6 Cálculos de tensión de jalado en los cables	71
2.7 Estudio sobre pérdidas en los cables de energía (voltajes inducidos)	77
CAPITULO 3. – METODO CROSS-BONDING	
3.1 Método de unión	82
3.2 Descripción del cross-bonding	95
3.3 Problemas	109



**CAPITULO 4. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE
PROYECTOS DE CABLES SUBTERRÁNEOS**

4.1 Levantamiento topográfico, ruta para el derecho de vía y construcción de la obra Civil.....	114
4.2 Diseño de trincheras para cables y sistemas de tierras.....	115
4.3 Diseño de pozo de empalme y registro de tierras.....	116
4.4 Lineamientos generales para proyectos de cables de potencia, alcance del Proyecto y descripción de los cables.....	117
4.5. Construcción obra electromecánica, instalación de cables y empalmes.....	119
4.6 Instalación de terminales e instalación de sistemas de tierra.....	120
4.7 Diseño y montaje de estructuras para terminales de los cables de potencia, suministro, pruebas y puesta en servicio.....	123
CONCLUSIONES.....	130
ANEXOS. PLANOS, DIBUJOS DE EQUIPO, ACCESORIOS PARA LOS CABLES SUBTERRÁNEOS DE TRANSMISIÓN Y PLANOS DE CABLES.....	132
BIBLIOGRAFÍA.....	158



INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis constituye una recopilación y ordenación de la información técnica acumulada en la sección de líneas y cables de transmisión de ingeniería eléctrica junto con las áreas de topografía, ingeniería civil y construcción de Luz y Fuerza del Centro como resultado de numerosos años dedicados al diseño de cables subterráneos para tensiones de 85,230 y 400 kV.

Los objetivos que se persiguen son los siguientes:

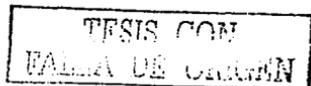
- A) Contribuir a la normalización de los diseños de cables subterráneos, lo que tendrá como resultado el aumento de la productividad en la realización de proyectos.
- B) Proporcionar material didáctico para la formación profesional de ingenieros.

Además se hace mención de aspectos importantes para la proyección de cables de transmisión en las tensiones que se operan en Luz y Fuerza del Centro ya que México es un país en pleno desarrollo social y económico que requiere de suministro constante y suficiente de energía eléctrica, elemento vital, sin el cual no es posible el crecimiento de las ciudades, la instalación de nuevas industrias y el mejoramiento de los habitantes en general.

La vida moderna nos ha obligado cada vez más al empleo de equipos y aparatos eléctricos dando como consecuencia, que el índice de Kilowatts instalados y Kilowatts consumido por habitante, vaya siempre en aumento, dando origen a la instalación de nuevas plantas generadoras, subestaciones y sistemas de transmisión y distribución. En Luz y Fuerza del Centro, los sistemas de transmisión operan en tensiones de 23, 85,230 y 400 kV.

En la actualidad, se están construyendo únicamente instalaciones de 85, 230 y 400 kV. Las instalaciones aéreas en LyFC trabajan en todas las tensiones indicadas anteriormente, mientras que las subterráneas se transmiten únicamente a 85 y 230 kV.

En el Distrito Federal y en algunas partes del Estado de México, el problema que se presenta al tratar de alimentar nuevas subestaciones por medio de líneas aéreas, suspendidas en torres o postes de acero, es el alto desarrollo demográfico, la carencia de derechos de vía y las reglamentaciones gubernamentales, lo cual hace imposible la construcción de los sistemas de transmisión aéreos.



Hoy en día debido al gran impacto ambiental de las líneas aéreas, se está recurriendo cada vez más a la instalación de líneas subterráneas en suelos urbanos o urbanizables.

Este problema se resuelve satisfactoriamente mediante la construcción de sistemas de transmisión subterránea operando a tensiones elevadas. Estas instalaciones si bien son más costosas que las aéreas tienen la ventaja de que son más confiables, ya que no están expuestas al exterior, dando además una mejor apariencia a la ciudad.

TESIS COM
FALLA DE ORIGEN

ANTECEDENTES

La transmisión de energía eléctrica por medio de cables aislados dio comienzo con los estudios realizados durante 19 años por Luigi Emanuelli, consistentes en demostrar la efectividad del aislamiento de papel impregnado en aceite sometido a presión. En 1926 logró demostrar que mediante este proceso era posible suprimir la corriente de ionización en los cables.

Después de estas experiencias, se instalaron en Europa un gran número de cables a compresión en tubos de acero. En Alemania por ejemplo a pesar de la guerra, se llevaron a cabo 14 instalaciones antes de 1940 y 4 años más tarde el número llegaba a 24, de las cuales 9 eran cables de 100 kV o más.

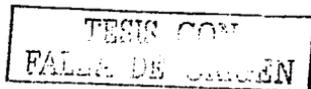
En Inglaterra no tubo aceptación este tipo de cables debido al problema que presentaba la corrosión, sin embargo cuando la tubería fue recubierta con plomo encontró gran aceptación y durante la guerra se instalaron 8 cables, llegándose a experimentar con un cable de corta longitud a 246 kV.

En los Estados Unidos de Norte América no tuvieron aceptación al principio puesto que la economía de estos sistemas no había sido plenamente demostrada y no se encontraba algún medio para evitar la corrosión, además de lo complicado de los empalmes. Pese a ellos, la Pennsylvania Railroad instalo un cable en 1934, el cual tuvo éxito con excepción de alguna corrosión en la tubería. En 1940, en Burlington New Jersey se instaló un segundo cable de 138 kV con resultados satisfactorios.

En México Luz y Fuerza del Centro instaló en 1951 el primer cable subterráneo tipo tubo a compresión de gas a 85 kV con longitud aproximada de 9.6 Km. El cable se encuentra hasta la fecha operando satisfactoriamente. Posteriormente Martín Hodstadler llevó a la práctica el principio de Emanuelli aplicando presión radial desde el centro del conductor, encontrando que la presión a través del aislamiento no era constante. Tiempo después, aplicó la presión desde el exterior, descubriendo que a 14 kg/cm^2 se eliminaba la ionización.

En 1932 se instaló en Londres, el primer cable trifásico con fines comerciales, con longitud de 4 Km y operando a 33 kV. Este cable fue recubierto con una capa triangular de plomo e introducido en una tubería de acero con una presión de nitrógeno de 14 kg/cm^2 . El cable fue retirado de servicio dado que tuvo problemas de corrosión. El Dr. D.M. Robinson en 1933 construyó una instalación experimental en Wood Lane, Londres consistente en un cable a compresión probado a 66 kV, operando continua y satisfactoriamente durante tres años bajo distintos ciclos de carga y sobre voltajes. En este caso, el problema también fue la corrosión que no pudo ser eliminada.

En 1936, en Arnhem, Holanda, los laboratorios Kema efectuaron una instalación experimental de 260 kV con longitud de 100 m, obteniendo un esfuerzo de ruptura máximo en el dieléctrico de 400 volts/mil. La instalación falló en una unión en la que entró humedad durante su elaboración. Se instaló un segundo cable con menor espesor en el aislamiento obteniéndose un esfuerzo máximo de ruptura del dieléctrico de 425 volts/mil.



CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DE LOS CABLES TIPO TUBO

1.1 Descripción de los tipos de cables.

Los primeros cables aislados de alta tensión fueron cables tipo OF (aceite fluido) Más tarde empezaron a desarrollarse los cables de aislamiento seco (XLPE, EPR), aumentando cada vez más los niveles de tensión a los cuales podía utilizarse este tipo de cables.

Gracias a una avanzada tecnología, la fiabilidad de estos cables es hoy en día muy alta, y presentan ciertas ventajas frente a los cables OF (aceite fluido): el aislamiento no requiere un circuito hidráulico presurizado, no hay que vigilar la señalización de las presiones del circuito hidráulico, mayor simplicidad en el tendido del cable y en la confección de accesorios.

A continuación haremos una breve descripción de las características de los cables hechos de papel impregnado y con aceite a presión. Todos los cables con aislamiento de papel impregnado tienen un proceso de manufactura semejante, con algunas variantes particulares dependiendo del tipo de cable de que se trate. Dicho proceso por lo general es el siguiente:

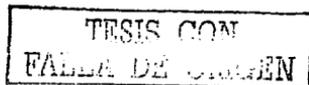
Una vez aplicado el aislamiento al cable con una máquina de cabezales múltiples, se pasa a un proceso de secado por temperatura y vacío sumergiéndose a continuación en aceite especial a una temperatura de 115°C. Manteniendo dicha temperatura y vacío se logra la impregnación mediante un cierto tiempo, después del cual el cable es enfriado lentamente, manteniendo el vacío durante el proceso.

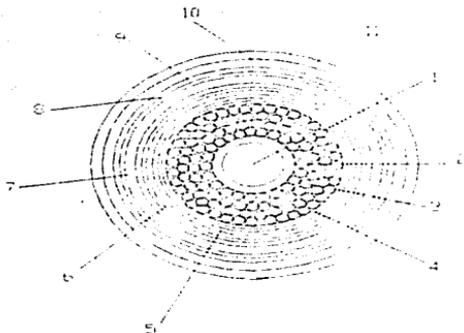
Sobre el conductor se colocan generalmente cintas de papel semiconductor hechas a base de papel y carbón que tienen como objeto evitar la concentración de esfuerzos eléctricos en los huecos que invariablemente quedan entre los alambres que forman la última capa del conductor. La pantalla colocada sobre el aislamiento tiene también la finalidad de uniformar el campo eléctrico.

1.2 Características y descripción de los diferentes tipos de cables.

A) Cable lleno de aceite (auto contenido)

Es un cable en el cual la parte central del conductor está ocupada por un ducto formado por una cinta de acero o bronce en forma de hélice abierta sobre la cual descansan las capas de hilos conductores ver Fig. Siguiente. Este ducto tiene las dimensiones adecuadas para permitir la libre circulación del aceite.



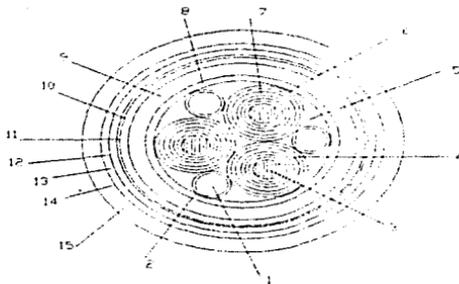


CABLE MONOFÁSICO AUTOCONTENIDO

- 1- ducto de aceite
- 2- espiral
- 3- conductor
- 4- pantalla
- 5- aislamiento
- 6- pantalla
- 7- primera cubierta
- 8- cubierta de algodón
- 9- cubierta de refuerzo
- 10- cubierta de anticorrosivo
- 11- cubierta de anticorrosivo

Cuando el conductor se calienta, el aceite se expande y fluye hacia los empalmes y tanques de almacenamiento, los que además de servir como depósito proporcionan la presión necesaria para forzar de nuevo el aceite hacia el interior del aislamiento del cable.

En el caso de cables trifásicos los ductos de aceite se sitúan en los huecos que forman los tres cables, evitando en esta forma el montaje de los cables sobre la hélice y dándole al cable trifásico una sección circular como se muestra en la Fig. siguiente.



CABLE TRIFÁSICO AUTOCONTENIDO

- 1- ducto de aceite
- 2- espiral
- 3- conductor
- 4- pantalla
- 5- relleno
- 6- pantalla
- 7- aislamiento
- 8- encintado
- 9- primera cubierta
- 10- cubierta de algodón
- 11- cubierta de refuerzo
- 12- cubierta anticorrosiva
- 13- cubierta anticorrosiva
- 14- armadura
- 15- forro exterior

Sobre el aislamiento y pantallas tendremos una cubierta de plomo reforzada con cintas de acero en caso de ser para alta tensión, y finalmente una cubierta de polietileno de alta densidad con objeto de evitar la corrosión en el plomo.

B) Cables a presión de gas.

Este cable es similar al tipo lleno de aceite, aunque el principio de funcionamiento es distinto, pues aquí no se trata de evitar los espacios vacíos si no de llenarlos de gas comprimido ya que la tensión de ionización de un gas es más alta cuando mayor sea la presión a que está sometido.

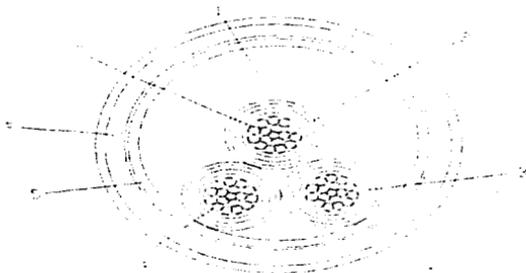
En los cables de tipo de baja presión no es posible eliminar la ionización de todo el aislamiento, por lo que la tensión de operación se ha limitado a un valor de aproximadamente 145 kV.

C) Cables en tubo a presión de aceite.

El principio en que se basa este tipo de cables para evitar la ionización, es el de proporcionar a todo el medio que rodea a los cables una presión tal que evite la formación de espacios vacíos.

Dado que el aceite que rodea al cable tiene propiedades dieléctricas semejantes a las del compuesto impregnante del aislamiento, este no se ha provisto de ninguna cubierta, dando como consecuencia un posible intercambio entre el aceite y el compuesto impregnante. Para evitar la penetración de impurezas del aceite en el aislamiento, se coloca sobre este una cinta de cobre y cinta mylar dando con esto una cubierta bastante comprimida para no permitir el paso de impurezas.

En las instalaciones en tubo de acero se coloca sobre el conducto un enrollamiento en forma de hélice abierta que constituye el alambre de deslizamiento de latón de manera que permite la libre circulación del medio de presión bajo los cables como se muestra en la figura siguiente.



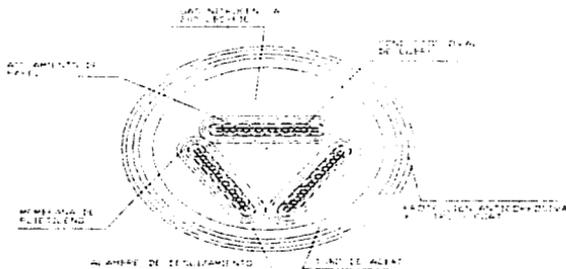
CABLE EN TUBO A PRESION DE ACEITE

- 1- aceite a 200 lb./pie² de presión
- 2- alambre de deslizamiento
- 3- aislamiento de papel
- 4- conductor de cobre
- 5- tubo de acero
- 6- protección anticorrosiva x-tru-coat
- 7- hilo monitor

D) Cable en tubo, a compresión de gas o aceite.

Estos cables llevan una cubierta de polietileno sobre la cual actúa la presión del gas o del aceite impidiendo el intercambio entre el compuesto impregnante y el medio de presión. En este caso, la presión actúa en forma radial sobre el cable pudiéndose permitir la formación de espacios vacíos en los huecos debidos a la viscosidad del impregnante.

Debido a la dilatación del compuesto impregnante y dado que éste no puede fluir a través de la cubierta, pueden producirse esfuerzos mecánicos sobre el aislamiento e inclusive la rotura de las cintas por lo cual se le ha dado al conductor una forma oval o triangular, un objeto de que al dilatarse el impregnante, la forma oval o triangular sea un círculo. De este modo obtenemos que al dilatarse el conjunto ocupe una sección circular y al contraerse, vuelva a su forma original, como se muestra en la Figura siguiente.



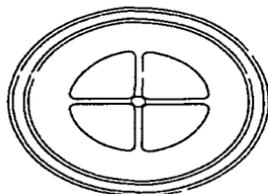
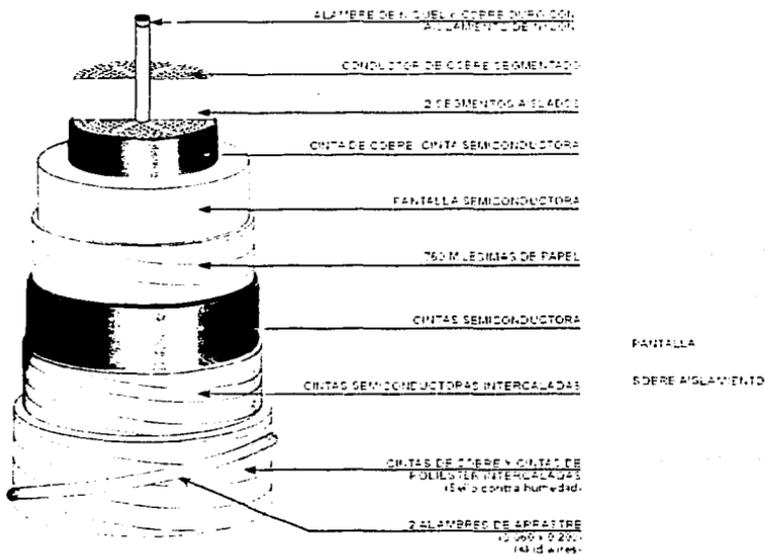
CABLES EN TUBO A COMPRESIÓN DE GAS

En este tipo de instalación para el transporte de la energía se utiliza tres cables unipolares por circuito, en los que el aislamiento principal del conductor, es papel impregnado en aceite. A continuación se da la descripción, construcción y características del mismo.

Conductor.

Cable segmental con hilo monitor (cuatro segmentos de 375 KCM) de cobre suave, de acuerdo con normas ASTM-B, cubiertas con una cinta semiconductora, aislamiento de papel impregnado con aceite para 230 kV, pantalla de aislamiento, sello contra humedad y alambres de arrastre o deslizamiento, la figura siguiente muestra lo anterior.

CONSTRUCCION DEL CABLE DE 1500 MCM



DIAM DEL CONDUCTOR	36.2 mm 1.429 pulg.
DIAM AISLAMIENTO	72.5 mm 2.89 pulg.
DIAM EXTERIOR	80 mm 3.13 pulg.
PESO APROXIMADO	13.414 Kg/Km

La razón principal de las pantallas del conductor y pantallas de aislamiento, es la de proporcionar una distribución uniforme de los esfuerzos eléctricos del aislamiento. Las pantallas pueden ser cintas conductoras o semiconductoras.

La pantalla del conductor consiste en una cinta semiconductora de pulpa de madera con carbón y espesor de 0.38 mm aplicada directamente sobre el conductor, que tiene por objeto, formar un campo equipotencial en la cara interna del aislamiento para prevenir un posible daño del mismo, ocasionado por el efecto corona y la ionización del aire debido a diferencias de potencial que pueden presentarse, de no existir la pantalla del conductor.

La pantalla de aislamiento o blindaje del cable se forma enrollando en espiral cintas delgadas semiconductoras intercaladas con cintas de papel carbón aluminizado y preparado (aluminio hacia fuera) alrededor del aislamiento aplicándolas en forma continua a lo largo de éste.

Espesor cintas semiconductoras	0.25 mm
Espesor cintas de papel	0.25 mm
Diámetro	76.20 mm
Cintas de cobre de 0.005" x 28 mm intercaladas con cintas Mylar Al de 0.0024" x 28 mm.	
Espesor	0.19 mm
Diámetro	76.6 mm

La pantalla de aislamiento debe mantenerse al potencial de tierra mediante conexiones adecuadas por lo menos en uno de sus extremos, siendo recomendable que la pantalla se aterrice en las terminales y en cada uno de los empalmes del cable.

Aislamiento

El aislamiento de los conductores consiste en cintas de papel (pulpa de madera) que son enrolladas helicoidalmente alrededor de éstos hasta obtener el espesor deseado. El papel es impregnado con un aceite aislante después de un proceso de secado y vacío. El espesor del aislamiento es para un nivel del 100%.

Hilo Monitor

El diseño de estos cables cuenta con un pequeño alambre de cobre duro del No 14 AWG con aislamiento de nylon en el centro de los cuatro segmentos el cual es muy sensible a los cambios de temperatura. Al conectar este hilo monitor a un equipo especial en las terminales de los cables nos permite conocer cual es la temperatura media a lo largo de los conductores.

TESIS CON
FALLA DE URGEN

El conocimiento de ésta temperatura media sirve para determinar si el cable esta trabajando dentro de los límites térmicos especificados por los cálculos, así como para poder calcular hasta que punto puede sobrecargarse el cable en caso de emergencia.

El poder llevar la historia térmica de los cables, permitirá diseñar los futuros cables con menor margen de tolerancia, lo cual se traducirá en valiosas economías.

La utilización del sistema de medición de temperatura por medio del hilo monitor, está proyectada para un futuro ya que actualmente y durante algunos años mas, los cables estarán trabajando a un factor de carga del 75 %. Al alcanzar el 100% de factor de carga se hará uso de este sistema.

Alambres de Deslizamiento.

Dos alambres de deslizamiento o de arrastre son enrollados helicoidalmente sobre el cable ya terminado. Los alambres de deslizamiento son de latón recocido y sin rebabas con objeto de no dañar el recubrimiento interior de la tubería.

Con objeto de disipar el calor generado por los cables, se rodea a las tuberías con una arena especial, llamada arena térmica, que debe reunir ciertas características.

El área de laboratorio de Luz y Fuerza del Centro efectúa las mediciones en el terreno natural y con el relleno térmico el cual se considera una resistividad térmica de 150° C cm/watt y otro con la resultante de la arena térmica y el suelo nativo.

La arena térmica utilizada para el relleno de la trinchera fue traída de los arenales de Amecameca, Estado de México.

Esta arena es de tipo subangular y contiene una cantidad de lama a base de Kaolín de 9%. El contenido de lama no debe ser menor de 5% y no mayor de 8%. En este caso el valor de 9% se debió a que la zona es de alta contaminación.

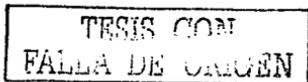
El valor de resistividad térmica de la arena fue de 103 ° C cm / watt. La nueva resistividad térmica del terreno, o sea la resistividad resultante obtenida en la arena térmica que rodea a las tuberías, puede calcularse aproximadamente con la fórmula siguiente:

$$C_r = C_m + (C_o - C_m) e^{-4h}$$

En donde

C_r = C resultante en °C cm/watt

C_m = C de la mezcla



$C_0 = C$ original del terreno

a = ancho de la trinchera

h = altura desde la parte inferior del tubo hasta 15 cm arriba del tubo

1.3 Ventajas y desventajas de los distintos tipos de cables.

Haremos la comparación tomando como referencia el cable tipo tubo a presión de aceite en base a los puntos siguientes:

- a. - Fabricación
 - b. - Instalación
 - c. - Operación
 - d. - Mantenimiento
- a. - **Fabricación**

Se dijo anteriormente que la fabricación de todo los cables con aislamiento de papel es semejante con pequeñas variantes para cada cable en particular. En este caso el cable tipo tubo a presión de aceite tiene las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas:

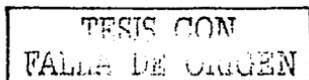
- 1. - No requiere cubiertas como los cables a compresión de aceite o de gas.
- 2. - Los conductores no van montados sobre la espiral de latón que es característica de los cables auto contenidos.

Desventaja:

Requiere una protección adecuada hasta su instalación la cual se le proporciona por medio de carretes sellados con atmósfera controlada.

b. - **Instalación**

La instalación esta sujeta a las características del lugar en donde se va a efectuar el trabajo más que a la propia instalación. En nuestro caso tenemos las siguientes ventajas y desventajas.



Ventajas.

1. Debido a las características del suelo de la Ciudad de México, tiene que obtener una elevada resistencia mecánica en la instalación, que se logra con la tubería de acero, la cual es capaz de resistir, debido a su elasticidad, los hundimientos relativos e incluso desplazamientos. La tubería sirve también como protección en el caso de que se efectuara alguna excavación.
2. Accidentalmente pudieran dañar la instalación, como sucedería si se tratara de un cable tipo auto contenido.
3. Se necesita un menor número de empalmes ya que sabemos que las limitaciones en la longitud de un cable son debidas al peso unitario del mismo y en este caso, debido a la ausencia de la cubierta, pueden fabricarse tramos con longitudes un poco mayores de 1000 m sin ocasionar problemas en el transporte y jalado del cable.
4. Facilidad para la instalación de la tubería sin necesidad de tener que excavar grandes longitudes de trinchera.

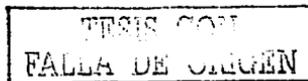
Desventajas.

1. - Mayor costo del equipo de instalación
2. - Instalación de la tubería, pues en el caso de cables auto contenidos no es necesario.

c. - Operación

Desde este punto de vista tenemos la ventaja de que el aceite tiene mayor conductividad térmica que el gas y con la relación al cable auto contenido tiene la ventaja de poder uniformar la temperatura del aceite mediante desplazamientos del mismo, evitando de esta manera los puntos calientes que se presenten a lo largo del cable.

Una desventaja en la operación de los cables es la necesaria vigilancia del equipo de bombeo ya que en caso de que el cable pierda presión debido a alguna rotura en la tubería, el cable debe salir de servicio, ya que el equipo de bombeo no está diseñado para esta contingencia.



d. - Mantenimiento

Debido a que los empalmes pueden considerarse como prolongaciones del cable, estos pueden tomarse como inexistentes, lo cual constituye una ventaja con respecto a los cables auto contenidos que requieren un elevado número de tanques compensadores de aceite aproximadamente a cada 250 m ó 300 m, con sus correspondientes tubos, válvulas y accesorios lo que origina un elevado mantenimiento.

En relación con los empalmes y terminales puede decidirse que los empleados en los cables a presión de aceite son de un diseño e instalación más sencillo puesto que no hay que dar continuidad a otros elementos como son cubiertas, ductos conductores de aceite o gas, etc.

Hasta el momento se ha realizado la comparación de los diversos tipos de cables, en aceite o gas sus ventajas y desventajas, dejando para el capítulo II las características de los cables del tipo XLPE y EPR.

1.4. Capacidad de conducción y las pérdidas de los cables tipo tubo.

La capacidad de conducción de un conductor, despreciando por el momento la regulación, está dada por la máxima temperatura constante que soporta el aislamiento sin degradarse, esto es, la corriente que producen las pérdidas totales elevan la temperatura del conductor hasta el punto en que se establece que la cantidad de calor producido es igual a la cantidad de calor disipado sin que la temperatura sobrepase la máxima mencionada.

Se establece lo anterior ya que es lógico suponer que para cualquier corriente constante se alcanza una determinada temperatura y a su vez, se establece el balance térmico, lo cual es cierto si los parámetros que intervienen en la ecuación térmica lo fueran, esto es, que su magnitud permaneciera constante, lo cierto es que el factor de potencia del dieléctrico no permanece constante con la temperatura, sino que después de alcanzar un mínimo, comienza a crecer aumentando las pérdidas y produciendo un nuevo aumento de temperatura. Este efecto acumulativo puede producir la destrucción del dieléctrico en determinadas condiciones que dependen de la tensión tomándola en cuenta por medio del factor de ionización del dieléctrico.

Tomando como punto de partida la temperatura máxima permisible del aislamiento, o sea la temperatura límite de operación, el problema se reduce a determinar si un cable dado puede conducir la carga para la cual se efectúa la instalación sin sobrepasar la temperatura límite de operación.

En base a lo anterior se deduce lo siguiente:

- 1º - La capacidad de conducción no es función únicamente de la sección del conductor.
- 2º - La temperatura del conductor y del ambiente, está íntimamente ligada con la capacidad de conducción del cable.

3º - La capacidad de conducción no es función lineal de la sección del cable.

4º - La resistencia térmica limita la capacidad de conducción.

En el análisis se considera como fuente de calor la energía producida por el efecto joule, además de tomarse en cuenta la energía adicional producida o debida ha:

1º - Aumento de la resistencia de corriente alterna en el conductor debido a los efectos superficiales y de proximidad.

2º - Calor generado en el dieléctrico (pérdidas por efecto capacitivo).

3º - Calor producido por corrientes parásitas o circulantes en los recubrimientos metálicos del cable unipolar.

4º - Calor producido en el tubo debido a corrientes inducidas.

Deben tomarse en consideración los siguientes factores:

1º - Otras fuentes de calor en las proximidades del cable.

2º - Las variaciones anuales de temperatura del medio que rodea a la instalación.

Como se puede apreciar, el problema de establecer una fórmula que considere todos los factores mencionados, es sumamente complicado, sin embargo se desarrollará a continuación la fórmula que considere lo expuesto anteriormente con objeto de calcular la capacidad de corriente.

En el cálculo de las resistencias eléctricas tomaremos como base la resistencia del conductor a la corriente continua de un conductor sólido, de sección constante a la temperatura de 20°C. Por lo tanto tenemos:

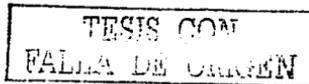
$$R_{cc_{20}} = \frac{\lambda_{20}}{S.R.} K_c \text{ ohms/km} \quad \dots \dots \dots 1-1$$

Donde:

S.R. = Sección recta del conductor en mm²

K_c = Factor de aumento de resistencia por cableado.

K_c vale desde 1.02 para conductores normales hasta 1.06 para conductores muy flexibles.



La S.R. en milímetros cuadrados está dada por la siguiente expresión:

$$IMCM = 0.507 \text{ mm}^2$$

$$1500 \text{ MCM} = 1500 \times 0.507 = 760.5 \text{ mm}^2$$

$$R_{cc_{20}} = \frac{17.241}{760.5} \times 1.02 = 0.023124 \dots \text{ ohms/km.}$$

Para calcular la resistencia del conductor a la temperatura de operación del cable (85°C) aplicamos la fórmula siguiente:

$$R_{cc_t} = R_{cc_{20}} (1 + \alpha_{20} (t-20)) \quad \Omega/\text{km} \text{ ----- } 1 - 2$$

En donde:

α_{20} = Coeficiente térmico de resistividad correspondiente a 20°C

$$R_{cc_{85}} = 0.23124 (1 + 0.00393 (85-20)) = 0.02903 \quad \Omega/\text{km.}$$

Dado que a nosotros nos interesa conocer la resistencia a la C.A., en donde es necesario tomar en cuenta los efectos superficiales y de proximidad, utilizaremos las fórmulas propuestas por McGrath y que aparecen en la publicación 55 - 468 del AIEE. o sea:

Para conductores monofásicos no compactos en tubo.

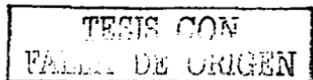
$$\Delta R_{sp} = kc \left[\frac{3.12}{R_{cc} - 0.278} \right] \left[1 + 4 \left(\frac{dc}{s} \right)^2 \right] \mu\Omega / \text{pie} \text{ ----- } 1 - 3$$

Para conductores monofásicos compactos en tubo.

$$\Delta R_{sp} = kc \left[\frac{2.52}{R_{cc} - 0.241} \right] \left[1 + 4 \left(\frac{dc}{s} \right)^2 \right] \mu\Omega / \text{pie} \text{ ----- } 1 - 4$$

En donde:

Kc = 1.7 para arreglo triangular de conductores.



$K_c = 2.0$ para arreglo acunado de conductores.

Arreglo de los conductores

Cuando la relación D_i/d es menor de 2.5 el arreglo de los conductores es triangular, si es mayor de esta relación la formación es acunada.

D_i = Diámetro interior del tubo

d = Diámetro efectivo del conductor sobre el aislamiento más 1.5 veces el espesor del alambre de arrastre.

Para este caso tenemos:

$$d = 2.96 + 1.5 \times 0.06 = 77.47 \text{ mm. (3.05 pulgadas)}$$

$$D_i = 206.38 \text{ mm. (8.125 pulgadas)}$$

$$D_i / d = 8.125 / 3.05 = 2.66$$

∴ Vemos que se tiene formación acunada por lo que tomaremos $K_c = 2.0$

$$d_c = 36.2 \text{ mm (1.425 pulgadas)}$$

Para calcular S en un arreglo acunado, se ha deducido la fórmula siguiente, por medio de la cual se puede calcular la distancia entre los conductores adyacentes al central:

$$s = \frac{2da}{D_i - da} \cdot \frac{D_i^2 - 2D_i da}{D_i - da}$$

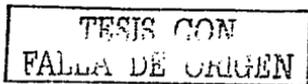
da = diámetro medio de los alambres de deslizamiento (mm)

$$= 79.5 \text{ mm (3.13 pulgadas)}$$

$$s_{1-2} = \frac{2 \times 3.13}{8.125 - 3.13} \cdot \frac{8.125^2 - 2 \cdot 8.125 \times 3.13}{8.125 - 3.13} = 123.93 \text{ mm (4.879 pulgadas)}$$

S_{1-2} y S_{2-3} serán evidentemente iguales a da , por lo que la distancia media geométrica S es:

$$S = \sqrt[3]{S_{1-2} S_{2-3} S_{1-3}}$$



$$S = 3 \cdot 3.13 \times 3.13 \times 4.879 = 92.177 \text{ mm} (3.629 \text{ pulgadas})$$

Dado que las fórmulas propuestas por Mc. Grath han sido obtenidas en el sistema inglés, trabajaremos los cálculos en este sistema con el objeto de evitar cometer errores al tratar de cambiarlas al sistema métrico decimal, debido a los factores de tipo experimental que intervienen.

Por lo que la resistencia a la corriente continua de los conductores convertida a $\mu\Omega/\text{pie}$ será:

$$R_{\text{CCRS}} = \frac{0.02903 \times 10^6}{3281} = 8.848 \quad \frac{\mu\Omega}{\text{pie}}$$

Sustituyendo valores en la fórmula 1-3 tenemos.

$$\Delta R_{\text{sp}} = 2 \left[2.52 / \sqrt{8.848 - 0.241} \right] \left[1 + 4 (1.425 / 3.629)^2 \right] = 1.96 \frac{\mu\Omega}{\text{pie}}$$

Por lo que el incremento debido a los efectos superficial y de proximidad será:

$$Y_{\text{sp}} = \frac{\Delta R_{\text{sp}}}{R_{\text{cc}}} = \frac{1.96}{8.848} = 0.2215$$

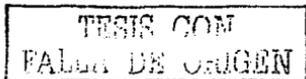
Incremento de la resistencia debido a la pantalla y alambres de deslizamiento.

La resistencia de la pantalla puede considerarse formada por dos de ellas en paralelo, uno de los dos alambres de latón de deslizamiento y otra de la cinta de cobre.

La cinta de cobre es de 0.127 x 28 mm e irá traslapado con una cinta de mylar de 0.061 x 28 mm cuya principal característica es la impermeabilidad para evitar que el papel y el aceite impregnante del aislamiento se contamine con la humedad ambiente en el tiempo que el cable es expuesto a la intemperie en el momento de introducirlo en la tubería. La cinta de cobre y la de mylar forman un solo camino alrededor del aislamiento al estar intercaladas, cuya unidad de longitud de cable podemos deducir de la figura siguiente. Si consideramos que las cintas de cobre y mylar se traslapan entre sí 8.0 mm. Tendremos que el paso vale la suma de ambos anchos menos dos veces el traslape, o sea:

$$P = 2 \times 28 - 2 \times 8.0 = 40 \text{ mm.}$$

El diámetro de la pantalla (dp) es de 76.6 mm por lo tanto:



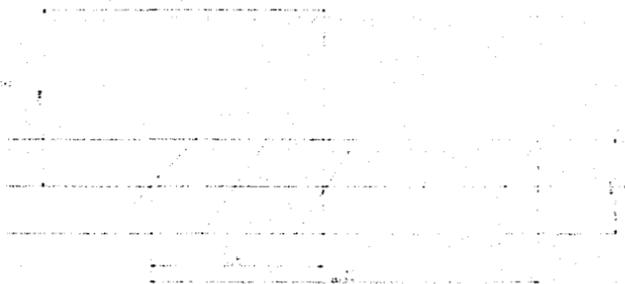


FIGURA No 6 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE LA PANTALLA

$$V = \frac{Ic}{P}$$

$$Ip = v \cdot (\pi dp)^2 + P$$

$$Ip = \frac{Ic}{p} \cdot (\pi dp)^2 + P^2$$

$$\frac{Ip}{Ic} = (\pi dp)^2 / P^2 + 1$$

Donde:

V = Numero de vueltas

Ip = Longitud de la pantalla

Ic = Longitud del conductor

dp = Diámetro de las pantallas

P = paso

$$\frac{I_p}{I_c} = (\pi \times 76.6)^2 / 40^2 + 1 = 6.0987$$

La resistencia a la corriente continua de dicha cinta será:

$$R_{20} = e_{20} / S I_p / I_c = 17.241 / 0.127 \times 28 \times 6.0987 = 29.57 \Omega / \text{km}$$

Si consideramos que la temperatura en la cubierta del cable es 50°C y corregimos por temperatura se tiene:

$$R_{50} = 29.57 (1 + 0.0393 (50 - 20)) = 33.056 \Omega / \text{Km}$$

Para proteger la pantalla en el jalado de los cables se instalan dos alambres de deslizamiento de sección "D" enrollados en forma de hélice sobre el conductor y con un paso de 76.2 mm (3") para cada uno, de modo que en el sentido axial del cable se encontrarán a 38.10 mm (1.5") de separación entre cada alambre. Dichos alambres son de latón recocido, su sección transversal tiene la forma de la mitad de un círculo, de radio de 2.54 mm lo que nos da la siguiente sección total para los dos alambres.

$$S = \pi r^2 = \pi \times 2.54^2 = 20.27 \text{ mm}^2$$

La longitud de la hélice (In) que forman los alambres de deslizamiento la obtenemos aplicando la fórmula que fue deducida para calcular la longitud del conductor que es:

$$\frac{I_n}{I_c} = (\pi d a / p) + 1 = (\pi \times 79.5 / 76.2) + 1 = 3.427$$

Por lo que la resistencia de los dos alambres de deslizamiento es:

$$R_{cc_{20}} = \left(\frac{\lambda_{\text{latón}}}{S} \right) \left(\frac{I_n}{I_c} \right)$$

$$R_{cc_{20}} = \frac{66.2}{20.27} \times 3.427 = 11.19 \Omega / \text{Km}$$

Corrigiendo por temperatura tenemos:

$$R_{cc_{50}} = 11.19 [1 + 0.002(50-20)] = 11.86 \Omega / \text{Km}$$

La resistencia equivalente de la cubierta y alambres de deslizamiento es:

$$R_{cc_{50}} = \frac{33.056 \times 11.86}{33.056 + 11.86} = 8.73 \Omega / \text{km} \quad 0.266077 \mu\Omega / \text{pie}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Incremento de resistencia debido a las pantallas

Los incrementos de resistencia a la corriente alterna debido a las corrientes circulantes y parásitas en la pantalla los obtenemos aplicando las fórmulas siguientes:

$$Y_p = Y_{pc} + Y_{pp} \text{-----} 1-7$$

$$Y_{pc} = \frac{1.7 \times 3 \times m}{R_{cc} R_{cpc}} \text{-----} 1-8$$

$$\text{En que } X_m = 0.882 f \log 2.3S \text{-----} 1-9$$

Para formación acuñaada

Donde:

Y_p = Incremento de resistencia a la corriente continua en el conductor debido a corrientes circulantes en la pantalla del cable. Referidos a la resistencia a la C.C. en el conductor (p.u).

da = Diámetro medio de la pantalla considerando los alambres de deslizamiento como parte de ella en mm.

RPC = resistencia eléctrica de la pantalla en $\mu\Omega$ / pie

$$Y_{pp} = \frac{1.7 \times 3 \times R_{cpc} / R_{cc}}{(5.2 R_{cpc} / f)^2 + 1/5 (2S / da)} (da / 2S)^2 \times$$

$$[1 + 5 / 12 (da / 2S)^2] \text{-----} 1-10$$

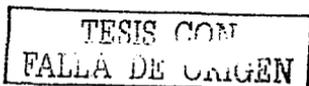
La ecuación 1-8 nos da el incremento debido a corrientes circulantes en la pantalla (Y_{pc}).

La ecuación 1-10 nos da el incremento debido a corrientes parásitas en la pantalla.

$$X_m = 0.882 \times 60 \log_{10} 2.3 \times 3.629 / 3.13 = 22.54 \mu\Omega / \text{pie}$$

$$Y_{pc} = 1.7 \times 22.54^2 / 8.848 \times 2660.77 = 0.03669$$

$$Y_{pp} = 1.7 \times \frac{3 \times 2660.77 / 8.848}{(5.2 \times 2660.77)^2} + 1 \left(\frac{2 \times 92.177}{79.5} \right)^2 (79.5 / 2 \times 92.177)^2$$



$$[1 + 5 / 12 (79.5 / 2 \times 92.177)^2] = 0.005779$$

Aplicando la fórmula 1 - 7 tenemos:

$$Y_p = 0.03669 + 0.005779 = 0.04247$$

El incremento de la resistencia debido al tubo está dado por las siguientes fórmulas experimentales:

$$Y_t = 0.89 d_a - 0.115 D_i / R_{cc} \quad \text{para posición triangular}$$

$$Y_t = 0.34 d_a + 0.175 D_i / R_{cc} \quad \text{para posición acuada}$$

D_a y D_i en pulgadas y R_{cc} en $\mu\Omega / \text{pie}$

$$Y_t = 0.34 \times 3.13 + 0.175 \times 8.125 / 8.848 = 0.28098$$

$$R_{ca} / R_{cd} = 1 + Y_{sp} + Y_p + Y_t$$

$$= 1 + 0.2215 + 0.04247 + 0.28098$$

$$R_{ca} = 8.848 \times 1.54495 = 13.67 \mu\Omega / \text{pie}$$

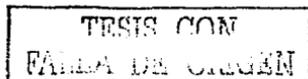
$$= 0.02903 \times 1.54495 = 0.04485 \Omega / \text{Km}$$

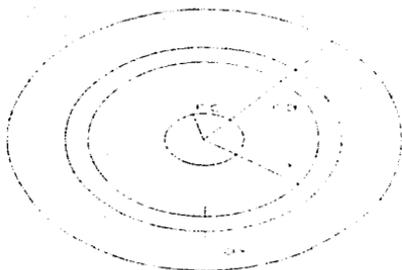
Cálculo de las resistencias térmicas

Resistencia térmica del interior del cable

La resistencia térmica, es directamente proporcional a la resistividad térmica del material, a la longitud de la trayectoria e inversamente proporcional al área del medio de propagación del calor.

En la figura siguiente vemos que el calor que genera el conductor tiene que atravesar por un medio cuya trayectoria será igual al espesor del medio conductor y un área variable y proporcional al radio X considerado; tomando diferenciales del espesor del aislamiento tenemos que:





$$dR_d = \epsilon d \cdot dx / 2 \pi \lambda \pi X$$

Para una longitud unitaria

$$R_d = \int_a^b \frac{\epsilon d}{\mu_{rc}} \cdot dx / 2 \pi x = \frac{\epsilon d}{2 \pi \mu_{rc}} \ln \frac{r_d}{r_c}$$

$$R_d = \frac{\epsilon d}{2 \pi} \ln \frac{r_d}{r_c}$$

DETERMINACION DE LA RESISTENCIA TERMICA EN EL DIELECTRICO.

Cambiando la base de los logaritmos y tomando diámetros en lugar de radios queda.

$$R_d = 0.00367 \epsilon d \log \frac{d_d}{d_c} \text{ } ^\circ\text{Cm / watt}$$

$$d_d = \varnothing \text{ aislamiento} = 75.2 \text{ mm}$$

$$d_c = \varnothing \text{ conductor} = 36.2 \text{ mm}$$

$$R_d = 0.00367 \times 550 \log \frac{75.2}{36.2} = 0.6409 \text{ } ^\circ\text{Cm / watt}$$

Resistencia térmica del tubo

$$R_t = 0.00367 \epsilon t \log \frac{d_e}{d_i} \text{ -----1 - 12}$$

det = Ø exterior tubo = 219.09 mm

dit = Ø interior tubo = 206.37 mm

Rt = 0.00367 x 2.23 log 219.09 / 206.37 = 0.00021226 °Cm / watt

Resistencia térmica de los recubrimientos del cable y tubo.

Se deducen las fórmulas de la misma manera que para Rd, sustituyendo únicamente los diámetros correspondientes y la resistividad del material de que se trate, o sea:

Rp = 0.00367 C p log dep / dip -----1 - 13

Rt = 0.00367 C t log det / dit -----1 - 14

Cuando el espesor y la resistividad térmica del material sean relativamente pequeños como en el caso de la pantalla, tubo, etc. Se puede calcular la resistencia térmica por medio de la fórmula establecida en términos de la propia definición de la resistencia térmica, o sea:

$R_m = \frac{C_m}{100 \pi D} \frac{t}{\text{watt}} \text{ } ^\circ\text{Cm} \text{ } \text{-----1 - 15}$

donde:

Cm = resistividad del material en °C - cm / watt

D = Diámetro medio del material.

T = Espesor del material.

Resistencia térmica de recubrimiento del tubo (cubierta).

T = 1.52 mm (0.060 pulgadas)

Rc = 320 x 1.52 / 100 x 3.14 x 220.61 = 0.007022 °C cm / watt

Resistencia térmica de la pantalla del cable.

Se considera que la mitad de la superficie del aislamiento esta cubierta por cinta de cobre y la otra mitad por cinta mylar, por lo que se tienen dos caminos térmicos en paralelo y consecuentemente una resistencia térmica de doble valor, por lo que:

$$R_p = 2 \times 0.26 \times 0.005 \times 25.4 / 100 \times 3.14 \times 76.39 = 0.000002752 \text{ } ^\circ\text{Cm} / \text{watt}$$

Resistencia térmica del aceite.

Dado que la disposición de los cables es totalmente asimétrica con respecto al tubo se ha desarrollado la siguiente ecuación empírica.

$$R_{pt} = 1.44 / (dp)^{0.5} \text{-----} 1 - 16$$

$$Dp \text{ en pulgadas} = 76.6 / 25.4 = 3.016''$$

$$R_{pt} \text{ en } ^\circ\text{C m} / \text{watt}$$

$$R_{pt} = 1.44 / (3.016)^{0.5} = 0.82918 \text{ } ^\circ\text{C pie} / \text{watt} = 0.2528 \text{ } ^\circ\text{C m} / \text{watt}$$

Resistencia térmica entre el tubo y el medio ambiente.

Interferencia de otros cables:

Cuando se operan cables cercanos entre sí, se tienen calentamientos mutuos que se traduce en un aumento aparente de resistencia térmica del terreno. También debe tomarse en cuenta el "factor de carga", que se define como la relación de la carga promedio entre la carga máxima en un periodo de 24 horas y que trae como consecuencia una menor temperatura en el cable que la que correspondería a la carga máxima.

La combinación de estas situaciones afecta la fórmula de Kenelly quedando como sigue:

$$R_e = 0.00367 C_e N [\log (D_X / D_C) + F.P. \log (4P F / D_X)] \text{ } ^\circ\text{Cm} / \text{watt} \text{----} 1 - 17$$

Donde:

C_e = Resistividad térmica del terreno $^\circ\text{Cm} / \text{watt}$

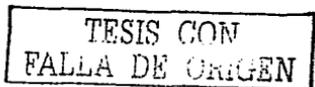
D_c = Diámetro sobre la cubierta del tubo (mm)

F.P. = Factor de pérdidas que se define como la relación de las pérdidas promedio a las pérdidas correspondientes a la carga máxima, es un periodo de 24 horas.

Del estudio de un gran número de ciclos típicos de carga, se ha obtenido la siguiente ecuación.

$$F.P. = 0.3 FC + 0.7 FC^2$$

F.C. = factor de carga



$$F.P. = 0.3 \times 0.75 + 0.7 \times 0.75^2 = 0.6187$$

DX = Diámetro ficticio en el cual comienza el efecto del factor de pérdidas, que se calcula con la siguiente fórmula empírica

$$DX = 1.02 \sqrt{\alpha T}$$

α = Difusividad del suelo (cm² / hora)

T = Duración del período característico en horas (generalmente 24 horas)

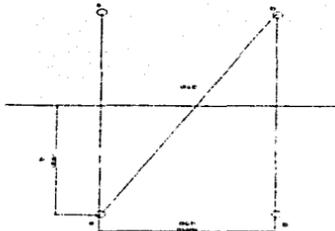
$$DX = 1.02 \sqrt{19.3 \times 24} = 21.953 \text{ cm} = 219.53 \text{ mm}$$

El factor F depende de la influencia de cables cercanos (ver la figura siguiente), que produzcan calentamiento, y es igual al producto de la relación de distancias que se obtienen al dividir la distancia desde el cable a calcular a la imagen de cada cable cercano entre la distancia del cable a calcular y cada cable.

El número de términos será igual al número de cables adyacentes, si no hay cables cercanos F = 1

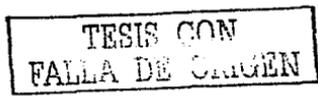
$$F = \sqrt{240^2 + 70^2} / 70 = 3.57$$

$$\begin{aligned} \text{Re} &= 0.00367 \times 150 \times 3 [\log 219.53 / 222.13 + 0.6187 \log (4800 / 219.53 \times 3.57)] \\ &= 1.925 \text{ }^\circ\text{Cm} / \text{watt} \end{aligned}$$



$$F = (d_{AB}' / d_{AB}) (d_{AC}' / d_{AC}) \dots \dots \dots (d_{AN}' / d_{AN})$$

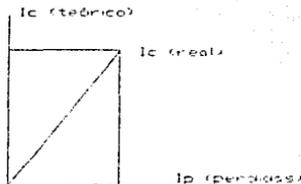
INFLUENCIA DE CABLES ADYACENTES



Perdidas en el dieléctrico.

El aislamiento de un conductor hace las veces del dieléctrico y el conductor y recubrimiento las veces de electrodo, por lo que podemos establecer una corriente capacitiva a través del dieléctrico que resulta adelantada 90° con respecto al voltaje pero que en realidad esta adelantada un ángulo menor de 90° debido a la pequeña corriente de pérdidas.

Esta corriente da lugar a la potencia disipada en el dieléctrico ver la figura siguiente:



CORRIENTE CAPACITIVA EN EL DIELECTRICO.

La potencia disipada por el dieléctrico será:

$$Wd = Ip \cdot V$$

$$Wd = Ic \cos \varnothing V \text{ (ya que } \varnothing \text{ es casi } 90^\circ \text{)}$$

Así mismo

$$Ic = V / Xc$$

$$Xc = 1 / 2 \pi f C$$

En donde:

$$Ic = 2 \pi f C V \times 10^{-6} \quad \text{Amp / km}$$

$$Y Wd = 2 \pi f C V^2 \cot \varnothing \times 10^{-6} \quad \text{watts / km}$$

$\cot \varnothing$ = factor de potencia del dieléctrico.

Por otra parte

$$C = 0.0241 \xi / \log dd / dc$$

En donde

ξ = Constante dieléctrica del aislamiento

dd = Diámetro del aislamiento

dc = Diámetro del conductor

Sustituyendo valores y reduciendo tenemos:

$$Wd = 9.08 \xi v^2 \times 10^6 \cot \theta \times 10^{-6} / \log dd / dc \quad \text{watts / km} \quad \text{-----} 1 - 18$$

$$Wd = 9.08 \times 3.4 \times (230 / \sqrt{3})^2 \times 106 \times 0.005 \times 10^{-6} / \log 76.2 / 36.2 = 8420 \text{ watts / km}$$

Elevación de temperatura debido a pérdidas en el dieléctrico.

Se obtiene sustituyendo los valores de resistencia térmica obtenidos anteriormente aplicados en la siguiente fórmula:

$$\Delta Td = Wd (\frac{1}{2} Rd + Rp + Rpt + Rt + Rc + Re) \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{-----} 1 - 19$$

$$\Delta Td = 8420 (1/2 \times 0.6409 + 0.000002752 + 0.2528 + 0.00021226 + 0.007022 + 1.925)$$

$$10^{-3} = 21.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

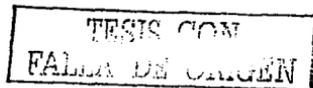
$$\Delta Td = 21.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Resistencia equivalente del circuito térmico

La resistencia equivalente la obtenemos aplicando las fórmulas siguientes

$$Op = 1 + yp / 1 + Ysp \quad \text{-----} 1 - 20$$

Donde:



Qp - Pérdidas en el conductor referidas a las mismas, más el incremento aparente de pérdidas en el conductor, debido a las pérdidas generadas en la pantalla por corriente circulante.

$$Q_p = 1 + 0.04247 / 1 + 0.2215 = 1.03477$$

$$Q_t = 1 + Y_p + Y_t / 1 + Y_{sp} \text{ ----- } 1 - 21$$

Donde:

Qt - Es igual a Qp más el incremento aparente de pérdidas en el conductor, debidas a las pérdidas generadas en la pantalla por corrientes circulantes.

$$Q_t = 1 + 0.04247 + 0.28098 / 1 + 0.2215 = 1.2648$$

$$R_E = R_d + R_p + Q_p R_{pt} + Q_p R_c + Q_t R_c \text{ ----- } 1 - 22$$

Donde:

R_E - Resistencia térmica equivalente del circuito térmico °C m / watt

$$R_E = 0.6409 + 0.000002752 + 1.03477 \times 0.2528 + 1.03477 \times 0.00021226 + 1.03477$$

$$\times 0.007022 + 1.2648 \times 1.925 = 3.34 \text{ °Cm / watt}$$

La corriente admisible la obtenemos sustituyendo los valores obtenidos, en la fórmula siguiente:

$$I = T_c - \frac{(T_a + \Delta T_d)}{R_{cc}(1 + Y_{sp})R_E} \text{ ----- } 1 - 23$$

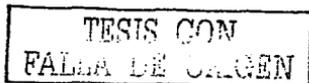
$$I = 85 - \frac{(24 + 16.16) \times 10^3}{0.02903(1 + 0.2215) \times 2.604} = 696.86 \text{ Amperes.}$$

A continuación calcularemos la corriente que pueden transportar los cables con la resistividad resultante:

$$E_r = 104.4 \text{ °C cm / watt}$$

Obtenida con la arena térmica.

$$R_e = 1.339 \text{ °Cm / watt}$$



$$\Delta T_d = 16.16 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_E = 2.604 \text{ }^\circ\text{C m / watt}$$

$$I = 85 - \frac{(24 + 16.16) \times 10^3}{0.02903(1 + 0.2215) \times 2.604} = 696.86 \text{ Amperes.}$$

Cálculo de las pérdidas

En el conductor

$$W_c = I^2 R_{cd} (1 + Y_{sp}) \text{ ----- } 1 - 24$$

$$W_c = (696.86)^2 \times 0.02903 (1 + 0.2215) = 17219.94 \text{ watts / Km}$$

En el dieléctrico (calculadas anteriormente)

$$W_d = 8420 \text{ watts / Km}$$

En la pantalla

$$W_p = I^2 R_{cd} Y_p \text{ ----- } 1 - 25$$

$$W_p = (696.86)^2 \times 0.02903 \times 0.04247 = 598.72 \text{ watts / Km}$$

En el tubo

$$W_t = I^2 R_{cd} Y_t \text{ ----- } 1 - 26$$

$$W_t = (696.86)^2 \times 0.02903 \times 0.28098 = 3961.08 \text{ watts / Km}$$

Por lo tanto las pérdidas totales en watts / Km por conductor son:

$$W = W_c + W_d + W_p + W_t \text{ ----- } 1 - 27$$

$$W = 17219.94 + 8420 + 598.72 + 3961.08 = 30199.74 \text{ watts / Km}$$

Las pérdidas totales para los tres conductores son:

$$W_t = 3W$$

$$W_t = 0.3 \times 30199.74 = 90584.22 \text{ watts / Km}$$

1.5 Empalmes, terminales y accesorios para los cables tipo tubo.

EMPALMES.

Ya que desde el punto de vista de fabricación y de instalación es imposible construir y tender un cable que tenga la longitud total que existe entre los lugares de generación de energía eléctrica hasta los de consumo, se tiene necesidad de fabricar y tender tramos de cables, razón por la cual para unir los tramos de cable es necesario utilizar empalmes, los que deben tener características eléctricas y mecánicas por lo menos iguales a las del resto del cable.

Los empalmes utilizados en las instalaciones son rectos y sellados totalmente mediante camisas metálicas soldadas. Utilizan como aislamiento papel tipo crepe impregnado en aceite y una pieza fundida de cuarzo-epoxi llamada "voltalit". Este tipo de empalme fue desarrollado por pirelli en Italia y ha sido empleado con gran éxito por el fabricante de éstos en Estados Unidos de Norteamérica.

La condición que deben cumplir los empalmes es la de comportarse como un tramo de conductor de las mismas características que el resto de la instalación y dar continuidad de conducción sin presentar un punto débil durante su operación.

Dado que en la reconstrucción del aislamiento del conductor en el empalme, las condiciones están muy por debajo para la realización de este trabajo ya que se debe mantener el mismo nivel de aislamiento al del cable original, el diámetro del conjunto cable-aislamiento en ese punto es mayor que el resto de la instalación.

La cubierta del empalme es de dimensiones tales que permita la circulación de aceite bajo condiciones dinámicas.

TERMINALES:

La función de las terminales en los cables subterráneos es la de poder conectar los extremos de los cables con el resto de la instalación.

Las terminales al igual que los empalmes son dimensionados bajo los mismos puntos de vista en cuanto a concentración del esfuerzo eléctrico.

La terminal se forma a base de un rollo de papel prefabricado a base de papel "Kraft" de alta calidad que es llamado como de alivio, que ha sido secado e impregnado de aceite de la misma manera que el aislamiento del cable.

ACEITE AISLANTE

El aceite utilizado en las instalaciones sirve como aislante, refrigerante y como lubricación durante el jalado de cables dentro de las tuberías.

Las características del aceite aislante SUN No 6 de Eléctrica Insulating Oil utilizado son las siguientes:

Características Físicas

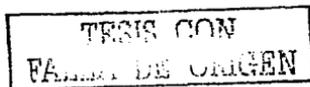
Densidad relativa a 15.6 °C	0.925 – 0.930
Viscosidad SU a 37.8°C en seg.	750-800
Viscosidad SU a 98.9°C en seg.	58 – 63
Temperatura de inflamación en °C	193
Temperatura de combustión en °C	227
Temperatura de escurrimiento en °C	-21

Características Químicas

No. De neutralización en mgKOH / g aceite	0.05
Azufre libre corrosivo	Negativo
Azufre total, en porcentaje	0.35
Contenido de humedad en ppm de agua	30
Carbón Conradson en porcentaje	0.05
Cloruros y sulfatos	Negativo

Características Eléctricas

Tensión de ruptura dieléctrica a 80°C en kV	30
Factor de potencia a 100°C, 1000 V y 60 Hz en porcentaje:	
Inicial	0.60
Envejecido	2.80
Resistividad volumétrica a 100°C y 500V en ohm – cm $\times 10^{12}$:	
Inicial	2.5
Envejecimiento	0.5



Antes de introducir el aceite en las tuberías, debe ser filtrado y desgasificado por el fabricante para que cumpla satisfactoriamente como aislante.

Tubería de Acero

La tubería tiene por objeto alojar a los cables dentro de ésta para protegerla de daños mecánicos y poder tenerlos a la presión de 14 Kg / cm² que es la presión nominal a la que trabajan los cables tipo tubo.

Las tuberías utilizadas son de acero ASTM A523-68 grado "A" según las especificaciones API-5L del "American Petroleum Institute" con una costura longitudinal soldada por resistencia eléctrica, usando por lo menos dos pasos de soldadura. El material proviene de un horno Siemens-Martín, o un horno eléctrico.

Características de las Tuberías

Carbón: 0.21%

Manganeso: 0.90%

Fósforo: 0.04%

Azufre: 0.05%

Propiedades Físicas

Punto de eudencia: 21.1 Kg / mm²

Carga de ruptura: 33.7 Kg. / mm²

Elongación en 50.8 mm: 31.5% mínimo

Dimensiones

Diámetro exterior: 219.09 mm

Grueso de la pared: 6.35 mm

Diámetro interior: 206.37 mm

Longitud promedio: 14.5 m

Los tramos de tubería tienen sus extremos abocinados para unirlos entre sí, mediante anillos de respaldo y soldadura. El abocinado tiene un ángulo interno de 5°.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Recubrimiento de las tuberías

Interior

Después de pulirse perfectamente la superficie interior de la tubería, se le aplica una capa de pintura anticorrosiva "Tixopoxi" de un espesor constante de 0.203 mm que tiene por objeto evitar la oxidación de la tubería y consecuentemente la contaminación del aceite.

Exterior

Como protección exterior, la tubería lleva una cubierta protectora contra corrosión y electrólisis, con resistencia dieléctrica de 30,000 volts a base de una capa interior de cemento de hule modificado y una capa extruida de 1.52 milímetros (0.060 pulgadas) de polietileno de alta densidad color amarillo para facilitar la localización de pequeñas imperfecciones en las tuberías. El recubrimiento deberá abarcar toda la longitud del tubo, a excepción de 150 mm en cada extremo.

Estación de Bombeo y Tanques de Almacenamiento

La función principal de la estación de bombeo y tanques de almacenamiento es la de mantener una presión de aceite en el cable que impida la ionización del aislamiento del cable por medio del aceite que ocupara los huecos del aislamiento. Además mantiene comprimido el aislamiento durante las expansiones debidas a las variaciones de temperatura ocasionadas por los ciclos de carga. Existen diferentes tipos de bombeo que son: Bombeo Manual, Bombeo Automático y Bombeo en Oscilación.

Protección Catódica.

Para proteger de la corrosión a las tuberías de los cables, se les dota de un recubrimiento exterior de polietileno de alta densidad, dado que al transportar e instalar las tuberías éstas pueden sufrir daños en el recubrimiento, es necesario protegerlas catódicamente para evitar que los puntos de falla de la cubierta de polietileno expuestos a la corrosión sean un peligro para la instalación al perforarse la tubería en esos puntos.

El principio de la protección catódica se basa en tener a las tuberías a un potencial inferior al de tierras (potencial negativo), de modo que actué como cátodo. La magnitud de dicho potencial debe ser de un valor tal que neutralice cualquier fuerza electromotriz en sentido contrario.

Existen dos sistemas para protección catódica, uno basándose en ánodos de sacrificio y el otro a base de rectificadores.

El tipo de protección catódica utilizado como norma en LyFC para las tuberías de los cables de potencia subterráneos es por medio de corriente impresa, obtenida por rectificadores, debido a que estos proporcionan una tensión variable (no mayor de 1.5 volts), corriente variable y por lo tanto la posibilidad de empleo para cualquier requerimiento de corriente y además es aplicable a cualquier resistividad del medio.

El parámetro más importante a determinar es el potencial mínimo de protección, es decir, se trata de fijar el mínimo potencial del metal con respecto al electrolito que nos garantice que la estructura trabajará permanentemente como cátodo. Esto depende de varios factores, sin embargo, con relación al hierro se mencionará lo siguiente:

Existe un criterio ampliamente aceptado, el cual establece que la potencia de la estructura del electrolito deberá tener un valor de 0.85 Volts de C.D. medido a través de un electrodo saturado, siendo la estructura por proteger negativa. Se toma 0.85 volts como potencial mínimo de protección sobre la base de los estudios de los fenómenos químicos termo-dinámicos, que establecen un potencial de -0.53 volts para que el hierro alcance un grado de inmunidad a la corrosión.

CAPITULO 2.

DESCRIPCIÓN DE LOS CABLES TIPO XLPE Y EPR

2.1 Descripción de los cables XLPE y EPR

Hoy en día debido al gran impacto ambiental de las líneas aéreas, se está recurriendo cada vez más a la instalación de líneas subterráneas en suelos urbanos o urbanizables.

Los primeros cables aislados de alta tensión fueron cables tipo tubo como ya se observo en el capítulo anterior. Más tarde empezaron a desarrollarse los cables de aislamiento seco (XLPE, EPR), aumentando cada vez más los niveles de tensiones a los cuales podía utilizarse este tipo de cables.

Gracias a una avanzada tecnología, la fiabilidad de estos cables es hoy en día muy alta, y presentan ciertas ventajas frente a los cables tipo tubo:

- El aislamiento no requiere un circuito hidráulico presurizado
- No hay que vigilar la señalización de las presiones del circuito hidráulico
- Mayor simplicidad en el tendido del cable y en la confección de accesorios.

Un cable aislado de alta tensión con aislamiento seco consta de las siguientes partes:

Conductor

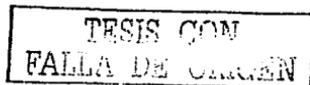
Sirve para transmitir las corrientes eléctricas y soporta las tensiones de tiro durante el tendido del cable.

El material utilizado es cobre o aluminio, siendo la capacidad de transporte del cobre mucho mayor, a su menor resistividad eléctrica. En la práctica la sección de aluminio necesaria para transmitir una misma potencia, suele ser del orden de dos secciones normalizadas por encima de la del cobre.

Los conductores están formados por alambres redondos compactados. Cuando las tensiones son muy elevadas y tenemos secciones del conductor muy grandes ($S_{Cu} > 1000 \text{ mm}^2$ o $S_{Al} > 1600 \text{ mm}^2$) se recurre a seccionalizar el conductor en varios sectores para reducir las pérdidas debidas al efecto "piel".

Semiconductor interno

Es una pequeña capa semiconductor de XLPE situada entre el conductor y el aislamiento.



Homogeneiza la superficie del conductor obteniendo una superficie lisa con lo que se consigue que el campo eléctrico sea homogéneo y no se concentre en puntos concretos.

Asegura un contacto total con el aislamiento evitando la existencia de aire entre las dos capas y la posterior ionización de este.

Aislamiento

Es el elemento que soporta las diferentes tensiones aplicadas:

- Tensión de red
- Sobretensiones tipo rayo
- Sobretensiones de maniobra

Semiconductor externo

Sus funciones y composición son las mismas que las del semiconductor interno. Las dos capas semiconductoras se estruyen junto con el aislamiento en triple extrusión en una sola cabeza, con lo que se consigue eliminar todas las posibles impurezas que se forman con otros sistemas.

Pantalla metálica

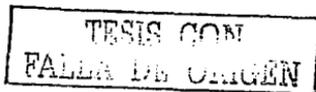
Las funciones de la pantalla metálica son:

- Proveer de una pantalla eléctrica al cable evitando que exista campo eléctrico en el exterior
- Las pantallas aisladas evitan la entrada de humedad, protegiendo a los aislamientos de su mayor enemigo
- Contribuye a la protección mecánica
- Funciona como conductor de las corrientes capacitivas y de la corriente de circuito homopolar.

Según las necesidades concretas del enlace existen cables con diferentes tipos de pantallas:

- Alambres de cobre o aluminio
- Pletinas de cobre soldadas
- Cobre corrugado
- Aluminio corrugado
- Plomo lido
- Mezcla de varias.

Cuando el cable debe trabajar inundado, las pantallas que son totalmente aisladas son el aluminio corrugado y el plomo liso, pudiendo también usarse cobre corrugado o pletinas de cobre soldadas pero con menor fiabilidad.



Armadura

Todos los cables pueden ir provistos de un refuerzo adicional si fuese necesario, por las condiciones en que vaya a trabajar. Suelen utilizarse flejes de acero amagnético o cobre duro.

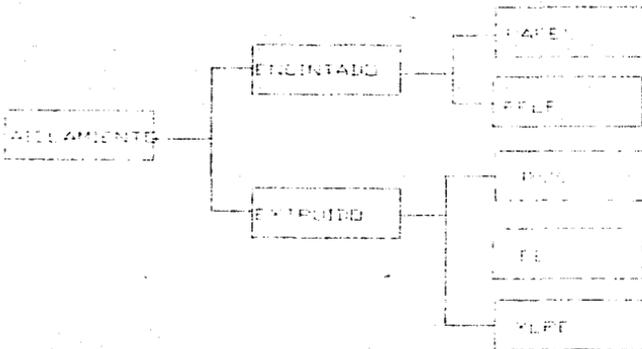
Cubierta exterior

La función de la cubierta exterior es aislar el cable del medio externo enviando fugas a tierra de la pantalla y protegiéndola contra la corrosión.

El material que se utiliza es polietileno termoplástico. Este suele llevar a veces una capa semiconductora que permita realizar los ensayos dieléctricos de la cubierta en obra.

2.2 Características de los cables XLPE y EPR

Se deben distinguir dos grandes familias: encintados y extruidos.



Tipos de aislamientos habitualmente utilizados

Aislamientos de papel impregnado

El papel normal, fabricado a base de fibras de celulosa obtenidas por tratamiento químico de la pulpa de madera, se utiliza normalmente en cables de baja, media y alta tensión. Se usan papeles de espesores diferentes que van de 50 a 200 mm y con densidades de 659 a 1000 kg/m³. Dado que la densidad intrínseca de las fibras es del orden de 1500 kg/m³, el espacio libre entre ellas debe ser rellenado con elementos de impregnación de papel, bien con aceite mineral o sintético o bien con una especie de cera ("masa") no migrante. Esta última posee la interesante propiedad de ser fluida a 120°C y no migrante o sólida, a la temperatura máxima de servicio de los cables. Su composición se controla para dotarla de una consistencia plástica tal que confieran al cable un buen comportamiento en el plegado del mismo.

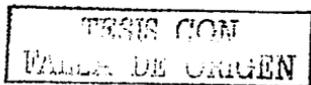
Para la muy alta tensión (400 kV o más), han aparecido, en los últimos años, nuevos tipos de papeles: se trata de los laminados con tres capas de papel y polipropileno, llamados PPLP (Polipropileno Laminado Papel). Estos papeles tienen la gran ventaja de reunir en ellos la tecnología experimentada de la fabricación e instalación de los cables tradicionales de papel impregnado con las excelentes propiedades eléctricas y dieléctricas inferiores a los del papel normal y unos gradientes de tensión de perforación superiores en un 25 a 30%. Su precio, aún elevado, restringe su utilización sólo a las muy altas tensiones de servicio.

Aislamientos extruidos

La mayoría de los plásticos que hoy se utilizan como aislamientos de cables fueron desarrollados en los años treinta. Sin embargo, excepto algunas aplicaciones específicas, hasta 1950 no comenzó a usarse el PVC (Policloruro de Vinilo) y el PE (Polietileno) como aislamiento de cables eléctricos. Se usaron inicialmente PE de baja densidad (LDPE) con valores de 916.930 kg/m³ y PE de alta densidad (HDPE) con valores de 945 a 960 kg/m³, pero pronto se comprobó que el comportamiento de estos dos materiales frente al envejecimiento no era suficientemente bueno y que su temperatura de fusión era demasiado baja para las temperaturas de servicio a las cuales se estaba habituado con los cables aislados con papel.

Para paliar este inconveniente, se recurrió al procedimiento llamado de reticulación que se describe en el siguiente apartado. Este proceso afecta naturalmente al polietileno reticulado XLPE (Crosslinked Polietileno) y al EPR (Etileno Propileno Rubber) al que también se conoce como caucho sintético. Más adelante se verá con detalle cuales son las propiedades más interesantes de todos ellos.

El XLPE es conocido y utilizado mundialmente para tensiones de servicio de hasta 400 kV. El EPR se usa para cables en media tensión y alta tensión en Italia, Inglaterra, España, Suiza, USA y en menor medida en Latino América hasta niveles de 159 kV.



Campos de Aplicación



Desde hace algunos años se viene constatando como los cables de papel van perdiendo terreno frente a los de aislamiento reticulado para todos los niveles de tensión. En estos últimos años se han llegado a instalar en Francia cables de 400 kV con aislamiento PE termoplástico (no reticulado) pero desde 1994 se ha detenido su instalación para siempre.

Los semiconductores

La capa aislante de los cables esta rodeada, tanto en su interior como en su exterior, por una capa de material semiconductor cuyo papel es homogeneizar el campo eléctrico en el aislamiento. Se trata por lo general de polímeros a base de EVA (Ethyl Vinyl Acetato) o similares que contienen un 40% de negro de humo, grafito o negro de carbono, para conferirle su necesaria conductividad eléctrica.

La importancia de estas capas semiconductoras no se tenía muy en cuenta con los inicios, pero pronto se constato que los iones que contenían contaminaban en gran medida al aislamiento lo que originaba perforaciones prematuras de los cables. Por ellos se dejaron de utilizar pronto las capas semiconductoras grafitadas que se usaron en las primeras generaciones de cables aislados con materiales sintéticos.

En los cables usados en AT (Para tensiones mayores a 60 kV), solo deben utilizarse los semiconductores superlisos ("supersmooth"). Son producidos con negro de humo cuyo contenido en iones es menor que en el negro de carbono, lo que disminuye el peligro de difusión de cargas eléctricas peligrosas en el aislamiento. Además, este tipo de semiconductores garantiza una superficie de contacto perfecto entre el aislamiento y los semiconductores exterior e interior y por consiguiente, una homogeneidad perfecta del campo eléctrico y una ausencia de puntos con campo eléctrico alto.

El envejecimiento de los aislamientos

La norma IEC 505 define el envejecimiento como "un cambio nefasto e irreversible de los sistemas aislantes para seguir siendo apto para el servicio. Estos cambios se caracterizan por un índice de fallos que aumentan con el tiempo". A pesar de esta definición, el envejecimiento eléctrico de los dieléctricos es más un asunto de opinión que un fenómeno perfectamente conocido y definido. El término "envejecimiento" está asociado a un amplio aspecto de fenómenos tales como las perforaciones, arborescencias, descargas parciales, oxidación, etc.

Arborescencias de agua.

A pesar de la cantidad enorme de datos experimentales disponibles sobre el envejecimiento, los fenómenos fundamentales causantes del mismo aún están lejos de ser entendidos. No es extraño pues que sea muy difícil predecir con precisión la duración que le queda a un cable, basándose en ensayos acelerados realizados en condiciones absolutamente diferentes a las que el cable tendrá en su vida real de servicio.

No obstante lo anterior, hay un fenómeno que es perfectamente conocido por los fabricantes y supervisores de cables, aunque su origen sea todavía un misterio: son las famosas arborescencias de agua.

Estas arborescencias, especie de micro canales de descomposición del polímero, pueden llevar rápidamente a la perforación de los cables en servicio. Para que su nacimiento tenga lugar debe darse en el cable la presencia de tres elementos al mismo tiempo:

- Agua
- Impurezas en el aislamiento o irregularidades en la interfaz aislamiento/semicondutor
- Campo eléctrico

Las primeras generaciones de aislamientos sintéticos contenían muchas impurezas y los procedimientos y técnicas de fabricación así como los ensayos eléctricos no eran como los de hoy en día; por esas razones se producían numerosos fallos en los primeros cables con apenas unos años de servicio.

Posteriormente se ha hecho progresos y ensayos que los han llevado a los altos índices de fiabilidad que hoy en día dan algunos fabricantes.

Para finalizar, diremos que los ensayos de envejecimiento de un cable aislado deben tener en cuenta un gran número de variables entre las que, se mencionan el tiempo, el gradiente eléctrico, la frecuencia, la temperatura (constante o cíclica), la construcción del cable, el proceso de fabricación del mismo, el tipo de aislamiento, la morfología del mismo, el medio circulante (aire, agua). Esta complejidad da una explicación del porqué aún no existe una norma internacional para medir el envejecimiento de los cables.

2.3. Ventajas e inconvenientes de los cables XLPE y EPR

Aislamiento de papel

Las experiencias mundiales con cables aislados con papel impregnado datan de los años 30. Pueden ser utilizados diferentes materiales de impregnación: masa migrante o no migrante, aceite fluido o incluso gas. Para los cables de alta tensión se utiliza, normalmente, aceite, bien de origen mineral o bien sintético. En este último caso (el más frecuente hoy día) se trata de un alquilbenceno llamado DDB (DioDecyl-Benzene). Las ventajas e inconvenientes de los cables de aceite fluido se resumen en la tabla siguiente:

Ventajas	Inconvenientes
Tecnología muy conocida	Pérdidas dieléctricas muy elevadas
Amplia experiencia	Necesidad de vigilancia y mantenimiento de la línea
Interfaz entre cables y accesorios muy homogénea	Pérdidas de escapes y contaminación del suelo

Aislamiento PPLP

El polipropileno constituye el aislamiento eléctrico mientras que las dos delgadas capas, una por cada cara, aseguran la circulación de aceite entre las diferentes capas que constituyen el aislamiento.

Sus propiedades se resumen en la tabla siguiente:

Ventajas	Inconvenientes
Tensión de perforación muy elevada	Sin experiencia a largo plazo
Pérdidas dieléctricas inferiores al papel normal	Interfaz entre cable y accesorios muy delicada
	Presencia de aceite: Mantenimiento
	Riesgo de escapes y contaminación

Como se apuntan en la tabla anterior, sus ventajas esenciales residen en que sus propiedades eléctricas y dieléctricas son superiores al papel convencional. Por ello, a igualdad de pérdidas, los espesores con PPLP son un 25% menores que con el papel normal y para un espesor igual de ambos tipos la tensión de perforación del PPLP es un 30% más alto.

Poliétileno Reticulado (XLPE)

El XLPE se usa desde hace casi 30 años como aislamiento de cables de energía. Poco a poco ha desplazado al papel impregnado en los cables de tensión de servicio cada vez más elevadas, usándose hoy en día hasta para 400 kV. Su fabricación, en estas tensiones, requiere una tecnología de punta y equipo de producción muy sofisticado. Sus propiedades fundamentales se exponen en la tabla siguiente:

Ventajas	Inconvenientes
Cable seco sin necesidad de vigilancia posterior ("Tendido y Olvidado")	Técnicas difíciles para accesorios de tensiones muy altas
Buenas propiedades dieléctricas	Imposibilidad de conocer el estado del aislamiento.
Tensiones altas de perforación	

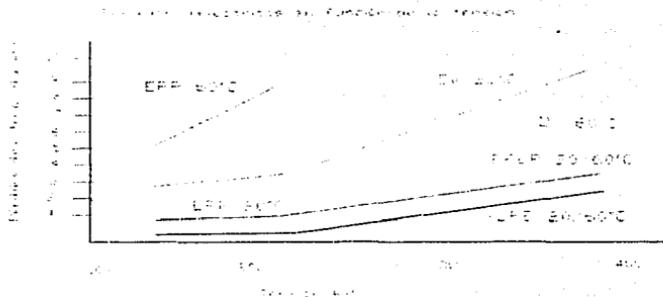
Caucho sintético (EPR)

El EPR se utiliza sobre todo para cables de media tensión por su excelente resistencia al agua y a las descargas parciales. Se trata de una matriz polimérica que contiene cargas minerales, caolín, en un porcentaje aproximado del 40%. El elevado valor de sus pérdidas dieléctricas hace desaconsejable su uso para tensiones superiores a 150 kV. Ver tabla siguiente:

Ventajas	Inconvenientes
Buena resistencia natural al agua y a las descargas parciales	Pérdidas dieléctricas altas
Buena flexibilidad	Mezcla de unos 10 productos, cuya cantidad es difícil mantener constante

Pérdidas dieléctricas

Las pérdidas dieléctricas de todos los aislamientos se resumen en la figura siguiente:



La calidad de los aislamientos actuales del mercado es, en general, excelente. Se han hecho estos últimos años progresos considerables para mejorar, por un lado, la calidad de las materias primas y por otro, sus condiciones de manejo y disponibilidad en el momento de la fabricación de cables.

La duda entre cables secos o de aceite solo se plantea para tensiones de 230 y 400 kV para los cuales cada una de las dos tecnologías tiene sus ventajas e inconvenientes. En general, será la situación particular de cada enlace quien dictaminara la elección.

2.4. Capacidad de conducción y las pérdidas de los cables tipo XLP y EPR

En todo dispositivo eléctrico, el principio de la conservación de la energía se manifiesta en sus más variadas formas. El transporte de energía eléctrica a través de un conductor aislado ocasiona pérdidas de la misma que son transformadas en energía calorífica. La evacuación de este calor es función de la construcción del cable y del tipo del medio en el que se encuentra tendido.

Las diferentes resistencias térmicas de las distintas capas constituyentes del cable y del medio que le rodea son las que limitan la potencia a transportar por el conductor.

Para este análisis es preciso conocer las partes constitutivas de un cable de energía. Procederemos a analizar cuanta energía eléctrica se transforma en calor en cada una de las partes constitutivas del cable. De manera general, el calentamiento alcanzado por el

conductor al paso de corriente eléctrica es función de las diferentes fuentes que provocan pérdidas y sus resistencias térmicas y podría expresarse por la fórmula siguiente, cuando nos hallemos en el estado de equilibrio térmico.

$$\Delta\theta = P_v \times \sum_{i=1}^n T_i$$

$\Delta\theta$ (°C) = Calentamiento del conductor

P_v (W/m) = Pérdidas activas

T_i (°C x m / W) = Resistencias térmicas

Esta fórmula, en la realidad, es mucho más complicada porque:

- Hay que considerar varias fuentes de calor en el cable
- El calor debe evacuarse a través de diferentes capas (papel, aceite, PE, XLPE, metales, alquitrán, etc.) con diferentes resistencias térmicas, aunque conocidas
- Además, deben ser respetados los límites de temperatura máxima de los diferentes materiales de las capas del cable
- El modo de tendido y el medio circulante tienen una influencia notabilísima.

Pérdidas óhmicas en los conductores

Las pérdidas en el conductor están descritas en el "efecto joule" que dice que son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por el conductor y a la resistencia efectiva que ofrece el conductor al paso de la corriente. Esta resistencia efectiva deberá ser calculada a la temperatura de operación del conductor y deberá tomar en cuenta los efectos piel y de proximidad, según las condiciones de instalación y operación.

Matemáticamente podemos escribir lo anterior, así:

$$W_c = I^2 \times R_{ef}$$

Si I está dada en amperes y R_{ef} en ohms/m, entonces W_c estará en watts/m.

En un enlace trifásico cargado simétricamente, las pérdidas óhmicas son:

$$P = 3 \times I^2 \times R_{ca} \quad [W / km]$$

Siendo I la corriente en A por fase y R_{ca} la resistencia óhmica del conductor en corriente alterna en Ω / km .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Este valor de R_{ca} es función de varios factores, entre ellos el valor de la resistencia del conductor en corriente continua, la frecuencia, el diámetro y naturaleza del conductor, la distancia entre ejes de los mismos, etc.

Veamos primero como calcular la resistencia óhmica en corriente continua:

$$R_{cc} = \rho / A [1 + \alpha(\theta - 20)] \quad [\Omega / m]$$

Siendo A = sección del conductor en mm^2

θ = temperatura en °C del conductor, con la intensidad de servicio

ρ y α = según tabla siguiente:

Materiales	ρ $\Omega \times mm^2 / m$ a 20°C	α a 20°C
Conductores		
Cobre	$17.241 \cdot 10^{-3}$	0.00393
Aluminio	$28.264 \cdot 10^{-3}$	0.00403
Pantallas		
Plomo y aleaciones	$214 \cdot 10^{-3}$	0.004
Acero	$138 \cdot 10^{-3}$	0.0045
Bronce	$35 \cdot 10^{-3}$	0.003
Acero inoxidable	$700 \cdot 10^{-3}$	Despreciable
Aluminio	$28.4 \cdot 10^{-3}$	0.00403
Cobre	$17.3 \cdot 10^{-3}$	0.00393

Para calcular el valor de la resistencia óhmica en corriente alterna aplicamos esta fórmula:

$$R_{ca} = R_{cc} \times (1 + Y_s + Y_p) \quad [\Omega / m]$$

Donde:

Y_s = factor del efecto "piel"

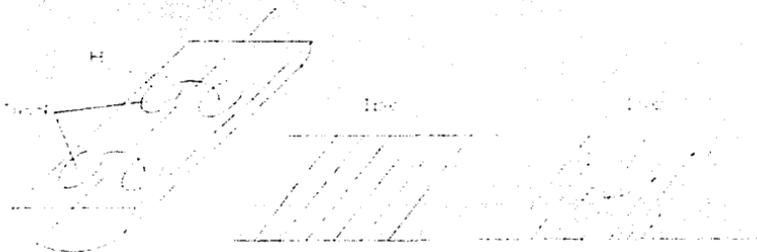
Y_p = factor del efecto proximidad

Los dos factores Y_s y Y_p pueden ser dados como un porcentaje de incremento de la resistencia en corriente continua del conductor para una temperatura dada y una frecuencia determinada (50 Hz y 16 2/3 Hz normalmente). Estos valores podemos definirlos así:

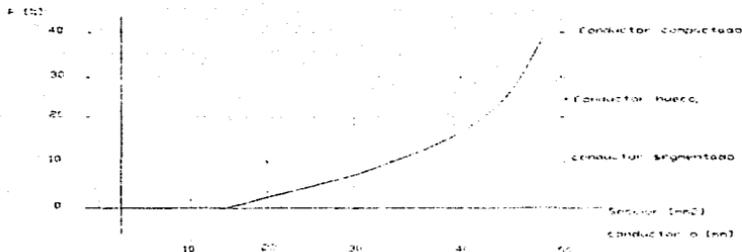
- a. El efecto piel corresponde a una modificación del reparto de flujo de corriente en un conductor debido al efecto del campo magnético interno. Su valor es:

$$Y_s = X_s^4 / 192 + 0,8 \times X_s^4$$

Donde $X_s^2 = \frac{8 \times \pi \times f \times K_s \times A \times 10^{-7}}{\rho \times [1 + \alpha \times (\theta - 20)]}$



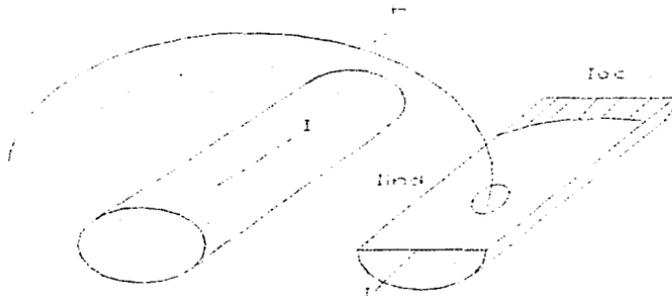
El efecto piel no tiene apenas influencia sino que a partir de secciones superiores a 185 mm². Para las secciones mayores de 1000 mm² es tan importante que los conductores sean segmentados con objeto de reducir su influencia.



- b. El efecto proximidad corresponde a la deformación del reparto de corriente en el Conductor originada por las corrientes inducidas por el campo magnético de los diferentes alambres de los conductores y por los propios conductores. Es un fenómeno atribuido al paralelismo de hilos.

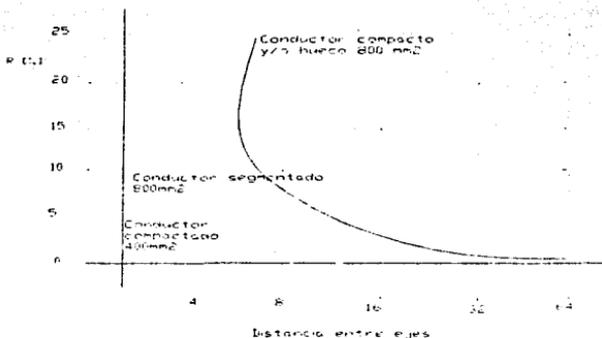
Su valor es:

$$YP = \frac{Xp^4}{192 + 0.8xXp^4} \times \left[\frac{dc^2}{S} \times \left[0.312x \frac{dc^2}{S} + \frac{1.18}{192 + 0.8xXp^4} + 0.27 \right] \right]$$



$$\text{donde } Xp2 = \frac{8 \times \pi \times f \times Kp \times A \times 10^{-7}}{\rho \times [1 + \alpha \times (\theta - 20)]}$$

En la práctica de los enlaces de alta tensión, entre los espesores grandes de aislamiento y la distancia entre ejes de conductores monopolares, la influencia de este efecto es muy pequeña. Su influencia en el valor de Rca se observa en la gráfica siguiente:



Pérdidas dieléctricas en el aislamiento

Partiendo de la hipótesis de que ningún material aislante es perfecto, esto es, todo material conocido sujeto a una diferencia de potencial permite una circulación de corriente entre dos puntos, debemos intuir que esa corriente eléctrica también producirá calor.

Las pérdidas en el aislamiento de un cable de energía dependerán fundamentalmente de las características físicas del material. Estas características se han expresado mediante factores, tales como: la permitividad del dieléctrico y su factor de potencia y se han relacionado en expresiones matemáticas más o menos complejas que nos permiten cuantificar las pérdidas.

Una expresión aceptada para el cálculo de las pérdidas en el dieléctrico de un cable de energía es la siguiente:

$$Wd = 2 \pi f C \epsilon n Eo^2 f.p. (3.28) 10^{-6}$$

Donde:

f es la frecuencia, en Hertz

Eo es el voltaje al neutro, en kV

C = 7.354 / log (1 + 2T/d) en micro farads/pie de cable

Donde:

T es el espesor del aislamiento

D es el diámetro del conductor

ϵ es la constante dieléctrica

f.p. es el factor de potencia del aislamiento expresado en decimales

n es el número de fases

La fórmula anterior se aplica en el caso de cables unipolares con pantalla o sin ella. A continuación se da otra fórmula aplicable para el mismo caso:

$$WD = \omega \times C \times Uo^2 \times \text{tg}\delta \quad [\text{W/km}]$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f \quad \text{donde } f \text{ es la frecuencia en Hz}$$

$$C = \text{capacidad del conductor en } [\text{F/km}]$$

$$Uo = \text{tensión contra tierra en } [\text{V}]$$

$$\text{tg}\delta = \text{factor de pérdidas}$$

Para la capacidad del conductor aplicamos:

$$C = \frac{\epsilon}{18 \times \ln Da / dc} \times 10^6 \quad [\text{F/km}]$$

Donde:

ϵ = constante dieléctrica del aislamiento

dc = diámetro del conductor en mm, incluido el semiconductor interno si existe

Da = diámetro sobre el aislamiento en mm

Las pérdidas dieléctricas dependen de la frecuencia, de las dimensiones del conductor, del tipo de aislamiento y del cuadrado de la tensión. Su valor, a partir de 110 kV, comienza a considerarse por su influencia en la corriente máxima admisible en el conductor y a tensión de servicio de 220 kV puede llegar a ser del orden de las óhmicas.

En la tabla siguiente se exponen los valores característicos de ϵ y $\text{tg}\delta$ para diferentes tipos de aislamiento.

Tipo de aislamiento	ϵ	$\text{tg}\delta$
Papel impregnado de aceite fluido	3,6	0,004
Poliétileno PE	2,3	0,001
Poliétileno reticulado XLPE	2,5	0,001
Caucho EPR	3,0	0,005

Pérdidas óhmicas en las pantallas metálicas ($\lambda 1$), los cinchos y armaduras ($\lambda 2$)

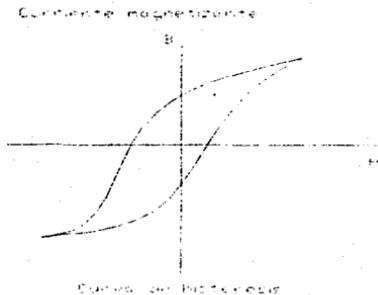
Estas pérdidas son despreciables en el caso de cables unipolares instalados en formación trébol. Los cables de alta tensión llevan vainas metálicas continuas de aluminio, plomo o cobre o pantallas de flejes, pletinas o hilos de cobre. Cuando éstos cables tienen una presión interior, el plomo va cinchado con flejes de bronce o acero inoxidable, y dependiendo del modo de tendido y del tipo de cable, se requiere a veces la utilización sobre la vaina o pantalla, de un esfuerzo mecánico metálico o de una armadura de tracción.

En todos éstos elementos citados aparecen pérdidas de tres tipos:

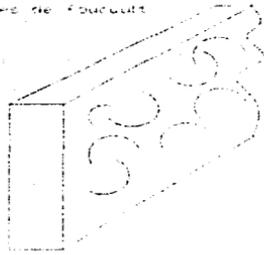
1. pérdidas debidas a corrientes inducidas
2. pérdidas por corrientes de foucault
3. pérdidas por histéresis

Las pérdidas por histéresis aparecen en todos los componentes magnéticos del cable. Puesto que los cables de alta tensión son monopolares y no pueden utilizarse materiales magnéticos, estas pérdidas no existen. Siempre se usan como cinchos o armaduras, en estos cables, cobre duro, bronce, acero inoxidable o aleaciones de aluminio.

Cuando hay campos magnéticos elevados debido a intensidades de corriente altas, las corrientes de foucault en los materiales magnéticos son importantes. Siguen trayectorias aleatorias y por ello se hacen los núcleos de los transformadores con chapas y no macizos; en nuestro caso de cables monopolares tampoco existen éstas pérdidas por no existir materiales magnéticos.



Corrientes de Foucault



Sin embargo, si debemos considerar las corrientes que circulan por las pantallas cinchos y armaduras, cuando estos están puestos a tierra en ambos extremos. Estas corrientes son debidas a las tensiones inducidas por el campo eléctrico generado por el paso de la corriente alterna en el conductor o conductores. Su valor puede llegar en ciertos casos, a valores superiores a la intensidad por el conductor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Calcularemos entonces estas pérdidas para el caso de circuitos trifásicos que empleen cables unipolares separados. En este tipo de cálculos generalmente se desprecia el efecto de proximidad en la apreciación de la inductancia mutua y únicamente se considera el efecto de piel. En otras palabras se supone que cada uno de los cables del circuito está tan alejado de los otros, que el fenómeno de inducción por proximidad con otros cables no se manifiesta.

Para una mejor comprensión se desarrolla un inciso completo dedicado a las pérdidas eléctricas en pantallas.

Las pérdidas en las pantallas metálicas se calculan según la fórmula:

$$W_s = I^2 \Delta R_s$$

Donde:

I es la corriente admisible en el cable, en amperes
 ΔR_s es el aumento o incremento de la resistencia efectiva del conductor a la temperatura de operación del cable, debida a las pérdidas en las pantallas, en ohms/1000 pies.

$$\text{Ahora } \Delta R_s = (X_M^2)(R_s^2) / X_M^2 + R_s^2 \text{ -----1}$$

Despreciando los efectos de proximidad y considerando a los cables separados equidistantemente.

$$\text{Además: } X_M = 2 \pi f L_M \text{ -----2}$$

$$L_M = 0.1404 \log DMG/rm \times 10^{-3} \text{ -----3 (Henrys al neutro/1000pies)}$$

Donde: rm = radio medio de la pantalla (cm) = dext.pantalla - espesor pantalla / 2

$$\text{Además: } DMG = \sqrt[3]{ABC} \text{ (cm)}$$

Disposición de los cables	
Formación equilateral	Formación horizontal

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Valores de X_M		
Para 50 Hz	$X_M = 44.8 \log \frac{ABC}{rm} \cdot 10^{-3}$ -----4	Ohms / 1000 pies
	$X_M = 144.6 \log \frac{ABC}{rm} \cdot 10^{-3}$ -----5	Ohms / km
Para 60 Hz	$X_M = 52.93 \log \frac{ABC}{rm} \cdot 10^{-3}$ -----6	Ohms / 1000 pies
	$X_M = 173.61 \log \frac{ABC}{rm} \cdot 10^{-3}$ -----7	Ohms / km

El radio medio de la pantalla es la distancia del centro del conductor a la parte media de la pantalla, en centímetros.

$$r_m = \frac{1}{2} d_c + C_a + \frac{1}{2} C_s$$

$$r_m = d_c + C_s / 2 + C_a \text{ ----- 8}$$

En la expresión (8):

d_c es el diámetro sobre el conductor, en centímetros.

C_a = espesor de aislamiento, en centímetros.

C_s = espesor de las pantallas metálicas, en centímetros.

La resistencia de la pantalla R_s es:

$$R_s = 1503 + P_s + 3.28 / r_o^2 - r_i^2$$

Donde:

- Ro = radio sobre la pantalla, en pulgadas
- Ri = radio bajo la pantalla, en pulgadas
- Ps = resistividad de la pantalla, en $\mu\Omega$ - cm

En la siguiente tabla se dan valores de Ps para plomo y para cobre:

Ts (°C)	Ps Plomo	Ps Cobre
40	22.6	1.86
50	23.4	1.93
60	24.2	1.99
70	25.0	2.06

Generalmente la temperatura de operación de las pantallas es de 60°C, cuando la temperatura del conductor es de 75°C.

Sustituyendo las expresiones 5, 8 y 9 en la expresión 1, se tiene:

$$\Delta R_s = \left(144.6 \log^3 \frac{ABC}{rm} \cdot 10^{-1}\right)^2 (4930 \cdot P_s \cdot 10^{-4} / ro^2 - ri^2)^2 \dots \dots \dots 10$$

La expresión 10 es válida para 50 cps y es el incremento en la resistencia efectiva del conductor a la temperatura de operación del cable, debida a las pérdidas en las pantallas y está expresada en ohms/km. Consecuentemente las pérdidas en ohms/km en las pantallas metálicas sobre el aislamiento de un cable de energía trabajando a una frecuencia de 50 cps, se obtiene multiplicando el cuadrado de la corriente que circula por el conductor por la expresión 10.

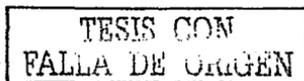
En el caso de tener una frecuencia de 60 cps, el cuadrado de la corriente en el conductor deberá multiplicarse por la expresión (11) que a continuación aparece:

$$\Delta R_s = \left(173.61 \log^3 \frac{ABC}{rm} \cdot 10^{-1}\right)^2 (1503 \cdot P_s \cdot 10^{-4} / ro^2 - ri^2)^2 \dots \dots \dots 11$$

Resistencias térmicas

Son las correspondientes a los materiales no metálicos que forman parte del cable, es decir:

- Aislamiento bajo la vaina o pantalla: T1
- Protección de la vaina o pantalla: T2
- Cubierta externa sobre cinchos o armaduras: T3
- Medio ambiente: T4



Todas esas resistencias son tubos cilíndricos y su valor viene dado por esta fórmula general:

$$T_i = \frac{\rho t}{2 \times \pi} \times \ln \frac{D}{d}$$

donde: T_i = resistencia térmica en °C x cm / W

ρt = resistividad térmica en °C x cm / W

D = diámetro exterior de la resistencia en mm

d = diámetro interior de la resistencia en mm

Los valores de ρt para los materiales más usados son:

- papel impregnado 600 [°C• cm / W]
- polietileno (PE o XLPE) 350
- caucho EPR 375

Un ejemplo del reparto de las resistencias térmicas para un cable de aceite de 60 kV es:

Parámetros para el cálculo:

- Resistividad térmica del suelo: $\rho_{sol} = 1^\circ\text{C} \cdot \text{m} / \text{W}$
- Temperatura de medio ambiente: $\theta_{amb} = 20^\circ\text{C}$
- Profundidad 1m

Modulo de instalación	Directamente enterrado	entubado	Aire libre
Aislamiento T1	15,75 %	13 %	30 %
Cubiertas T2 + T3	3,8 %	3 %	7,5 %
Medio ambiente T4	80,5 %	Aire 28 %	62,5 %
		Suelo 56 %	

El reparto de las resistencias térmicas para una instalación al aire libre muestra que la capacidad de transmisión del cable viene determinada por el límite de temperatura del conductor o de la pantalla metálica.

Para una instalación directamente enterrada, el mayor salto de temperatura se da en el medio exterior, por lo que la temperatura de la superficie del cable puede alcanzar un valor elevado si no se aplica la limitación de la temperatura del terreno a 50°. Esta limitación hace que, las instalaciones de cables ΔT bajo tubos embebidos en hormigón permitan transportar mas cantidad de corriente que aquellas en que los cables van directamente enterrados y no admitimos que haya desecamiento incontrolado del terreno.

Corriente máxima y calentamiento correspondiente

Todos los parámetros descritos hasta ahora se interrelacionan en la fórmula general que establece la IEC-287 o UME-21144 y que es:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_D \times (0.5 \times T1 + n(T2 + T3 + T4))}{Rca \times T1 + n \times Rca(1 + \lambda.1) \times T2 + n \times Rca(1 + \lambda.1 + \lambda.2) \times (T3 + T4)}} \quad [A]$$

Todo conductor por el que circula una corriente alterna se halla rodeado de un campo electromagnético sinusoidal. Si un circuito metálico abierto se encuentra dentro de ese campo estará sometido a una tensión inducida y si está cerrado circulará por el una corriente eléctrica.

Las pantallas metálicas de los cables unipolares se encuentran en la situación descrita en el párrafo anterior; estarán por tanto, sometidas a una tensión inducida si el circuito de pantalla está abierto (puesta a tierra en un punto) o recorridas por una corriente eléctrica si el circuito está cerrado (puesto a tierra en dos puntos).

La intensidad de la corriente depende de los coeficientes de autoinducción mutua de los tres conductores y de las tres pantallas, los cuales son a su vez función de la construcción del cable y de su disposición geométrica.

Cables aterrizados en las pantallas en un punto a tierra

En un sistema trifásico equilibrado, las corrientes de fase serán iguales entre sí ($I_R = I_S = I_T = I_C$). La tensión inducida en las pantallas de cada fase será proporcional a la intensidad I_C y a la longitud de la línea y estará desfasada 90° con respecto a la intensidad I_C .

$$U_i = j \times \omega \times l \times I_C \times M$$

M = coeficiente de inducción mutua entre conductor y pantalla [Km.]

$\omega = 2 \times \pi \times f$ siendo f la frecuencia

l = longitud de la línea en Km.

I_C = intensidad de servicio de la línea [A]



S = distancia entre ejes

dm = diámetro medio de la pantalla metálica

En este caso, el valor de las inducciones mutuas será idéntico para cada fase y la tensión inducida en cada pantalla será:

$$U_i = j \times 2 \times I_C \times \omega \times l \ln 2S / dm \times 10^{-4} \quad [V/km]$$

Para una frecuencia de 50 Hz y una longitud de 1 km:

$$U_i = j \times I_C \times 4 \times \pi \times 50 \times l \ln 2S / dm \times 10^{-4} \quad [V/km]$$



En este caso, las inducciones mutuas serán iguales solamente para las dos fases del exterior pero no así para la que está en la posición central.

La tensión inducida será, por consiguiente, diferente para la fase central que para las exteriores

$$U_{iR} = j \times l \times I_c \times \omega \times l \times 2 \times \left[-1/2 \times \ln 2S / dm + j \sqrt{3}/2 \times \ln 4S/dm \right] \times 10^{-4} \quad [V/km]$$

$$U_{iS} = j \times 2 \times l \times I_c \times \omega \times l \times \ln 2S / dm \times 10^{-4} \quad [V/km]$$

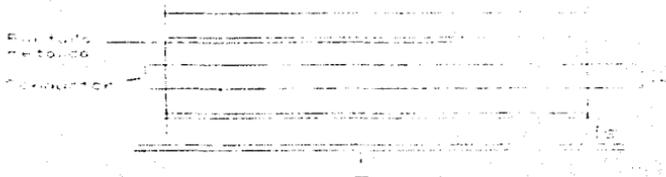
$$U_{iT} = j \times l \times I_c \times \omega \times l \times 2 \times \left[-1/2 \times \ln S / dm - j \sqrt{3}/2 \times \ln 4S/dm \right] \times 10^{-4} \quad [V/km]$$

Para $l = 1 \text{ Km}$ y $f = 50 \text{ Hz}$

$$U_{i_r} = U_{i_r} = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot I_c \cdot \left[(-1/2 \cdot \ln S / dm)^2 + (.3/2 \cdot \ln 4S / dm)^2 \right] \cdot 10^{-4} [V / Km]$$

$$U_{iS} = 4 \times \pi \times 50 \times I_c \times \ln 2S / dm \times 10^{-4} \quad [V/km]$$

Cables con pantalla a tierra en dos puntos



Por el circuito pantalla-tierra circulará una corriente cuya intensidad dependerá de la tensión inducida calculada en el apartado anterior y de la independencia de la pantalla metálica

$$I_p = U_i / Z_p$$

Donde $Z_p = 1 \bullet \sqrt{R_p^2 + (\omega L)^2}$

Siendo L el coeficiente de inducción de la pantalla

La intensidad de corriente en pantalla será:

$$I_p = 2\pi f \bullet M \bullet 10^{-1} \bullet I_c / \sqrt{R_p^2 + (\omega L)^2}$$

Siendo R_p = resistencia óhmica de la pantalla a temperatura de servicio

L = coeficiente de inducción de la pantalla

I_c = intensidad en el conductor por fase

Dado que el valor $(\omega L)^2$ es muy pequeño frente a R_p^2 se puede despreciar su valor en el cálculo.

Las pérdidas en pantallas, en un circuito trifásico, serán:

$$P_{tot} = P_R + P_S + P_T = (I_{pR}^2 + I_{pS}^2 + I_{pT}^2) \times Z_p$$

Posibilidades para reducir pérdidas en las pantallas

Hay básicamente, dos formas de reducirlas:

1. Aumentando la impedancia del circuito pantalla-tierra por medio de un incremento de la resistencia de pantalla o bien por la incorporación en el circuito de una impedancia grande, o bien disminuyendo la reactivancia de la pantalla.
2. Dado que la intensidad de corriente en las tres fases de un circuito trifásico están desfasadas 120° , realizando las conexiones especiales entre las pantallas que permitan anular, en los extremos del enlace, la suma vectorial de las tensiones inducidas (sistema cross-bonding).

Pantalla con resistencia óhmica grande

Aumentando la resistencia de la pantalla por disminución de la sección, el valor de la tensión inducida apenas varía.

Sin embargo, el valor de la impedancia de pantalla será alto y tanto la intensidad como las pérdidas en pantalla disminuirán, resumiendo:

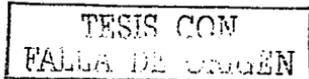
Para: $R_{p2} > R_{p1}$

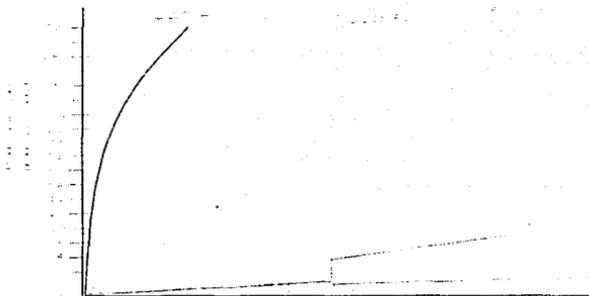
Cuando se piense en una solución de este tipo, no se debe olvidar que la pantalla debe soportar intensidades importantes de la larga duración en el caso de un sistema trifásico con neutro aislado o compensado y corrientes de cortocircuito muy altas en el caso de una derivación a tierra cuando la red tiene su neutro a tierra.

Todo ello nos lleva a concluir que esta solución no se suele contemplar en los enlaces de alta tensión.

Disminuir la reactivancia

Se puede decir que cuanto menor sea el espacio entre ejes de los conductores, más baja es la reactivancia y menores las pérdidas ocasionadas.





En la disposición trébol, se obtiene la mínima distancia entre ejes y una distribución simétrica de corrientes. Sin embargo sólo $2/3$ de la superficie del cable puede disipar calor, ya que esto no puede suceder en el área donde los cables están en contacto.

En una disposición en capa toda la superficie sirve para disipar calor. Debido a esto, aunque las pérdidas por corrientes inducidas sean mayores, puede llevar a una mayor transmisión de corriente.

Las pérdidas no solo son grandes sino que además los cables exteriores tienen mayores pérdidas que el cable central. Para evitar estas cargas asimétricas los cables se trasponen ciclicamente, preferiblemente antes de las uniones. Debido a esta transposición, cada cable está en la misma posición cada tres tramos. Las corrientes inducidas para la sección total son menores y simétricas.

Intercalar una impedancia en el circuito de tierra

En vez de aumentar la resistencia de la pantalla, se puede introducir una impedancia en el circuito. De esta forma podrían casi anularse las corrientes en pantallas si la impedancia intercalada tiene un valor muy grande.

En general, esta impedancia es un pararrayos que se conecta en uno de los extremos del enlace.

Haremos algunas consideraciones acerca del dimensionamiento de estos pararrayos.

Deberán ser dimensionados de tal forma que protejan el aislamiento que las pantallas tienen respecto a tierra; esto es, la cubierta exterior. Dado que la Norma IEC exige aplicar, después de tendido el cable, una tensión continua de 10 kV entre pantallas y tierra se podrá admitir para el pararrayos una tensión en corriente alterna de 6 kV y una tensión a las ondas de choque de 20 kV como valores admisibles en servicio.

Las tensiones a las que el extremo aislado (con pararrayos como impedancia alta) de un enlace está sometido, a dos tipos de sobretensión:

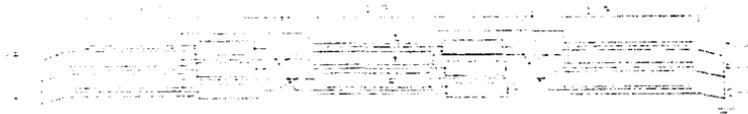
- La inducción en la pantalla como consecuencia de un cortocircuito en el enlace.
- La provocada por una onda debida al acoplamiento capacitivo-conductor-pantalla. Esta puede ser particularmente grande en el caso de que un rayo caiga en la línea aérea muy cerca de su entronque con la línea subterránea.

En el primer caso, si el apartarrayos se ceba, estaríamos en una situación de un enlace con la pantalla puesta directamente a tierra en ambos extremos. La energía disipada en el circuito pantalla-tierra es tan grande que el pararrayos explota. Es imperativo que el apartarrayos no se ceba en caso de cortocircuito en el enlace.

En el segundo, los valores de sobretensión pueden superar los que soporta la cubierta exterior por lo que, para no destruir el cable, el apartarrayo debe cebarse. Aquí la potencia generada es débil de tal forma que su valor es soportado sin problemas por el pararrayo.

Instalación de un sistema cross-bonding

Este procedimiento, el más utilizado en enlaces largos, consiste en dividir la línea en tres tramos equivalentes, instalar empalmes aislados longitudinalmente contra tierra y cruzar los cables en cada empalme.



Dado que las pantallas de las fases están dispuestas geoméricamente siempre en la misma posición, al transponer o cruzar los conductores, las tensiones inducidas sobre las pantallas de los tres tramos serán idénticas pero desfasadas 120° . Al ser la suma vectorial nula, no habrá circulación de corriente en las mismas.



Longitud máxima para un tramo cross-bonding o un enlace con pantalla a tierra en un punto

Los pararrayos de protección de cubierta exterior que se utilizan actualmente son los de óxido de zinc. Con el fin de respetar los valores de garantía del material de la cubierta exterior ($U_{\text{máx}} = 6 \text{ kV}$ y $U_{\text{choque}} = 20 \text{ kV}$) el tipo de pararrayos a instalar será el MVR 6.0. En el capítulo 3 se describe a detalle el funcionamiento y aplicación del sistema cross-bonding.

2.5. Empalmes, terminales y accesorios de los cables XLPE y EPR

Bajo denominación "accesorios" agrupamos a los materiales siguientes:

TERMINALES

- a. De exterior
- b. De transformador
- c. De GIS

EMPALMES

- a. Encintados
- b. Vulcanizados
- c. Premoldeados

BRIDAS

- a. De anclaje o amarre
- b. De sujeción

Terminales exteriores

Hay dos tipos específicos de terminales exteriores en función del material a emplear para el aislamiento externo:

- con aislador de porcelana
- con aislador epoxy

Este último llamado " a prueba de explosión" o "no deflagrante", está compuesto de un tubo delgado (de unos pocos milímetros) de epoxy reforzado con fibra de vidrio.

El aislador de epoxy tiene las siguientes características:

- a prueba de explosión (no provoca daños en los materiales vecinos)
- poco peso
- no se fractura
- alta resistencia a la abrasión, especialmente adaptado para condiciones severas de servicio
- línea de fuga adaptable
- gran efecto auto limpiador (deformación elástica de las aletas bajo la presión del viento)

Se han realizado pruebas en terminales de alta tensión, que muestran el comportamiento de esta clase de accesorios.

Características internas de las terminales

- Poseen un deflector de goma para el control del campo electrostático, que mantiene los gradientes eléctricos dentro de los límites prefijados.
- Debe existir una adecuada presión de contacto entre la pieza moldeada y la superficie aislante del cable, para evitar descargas parciales en la interfase. Ello obliga a una exigencia grande de circularidad del cable.
- El interior del aislador se rellena con un líquido que tenga una rigidez dieléctrica adecuada, que sea compatible con todos los materiales y pueda trabajar a la temperatura máxima existente. Se suele utilizar aceite de sílicona.

Terminales GIS y terminales de transformador

Las características principales de este tipo de terminales son:

- Línea de fuga pequeña al trabajar inmersos en aceite o SF₆, las dimensiones de éstas terminales son por tanto mucho menores
- Campo eléctrico controlado por un deflector moldeado en caucho como en las terminales exteriores
- Pequeños depósitos de expansión exteriores, que aseguren en todas las circunstancias térmicas su llenado completo.

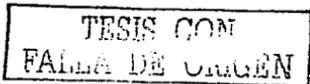
En este tipo de terminales, normalmente se emplea un aislador de resina epoxy que separa el cable y el GIS, haciendo a su vez la función de soporte mecánico del conductor, contra posibles fuerzas originadas por cortocircuitos.

Para casos especiales, es posible introducir la terminación del cable (con un cono de descarga) directamente en el GIS, ya que con cables secos es posible trabajar en contacto con SF₆.

Hay disponible una gama especial de terminales de transformador, pero es también posible emplear las terminales tipo GIS

Empalmes encintados

Como se puede ver en la historia de producción de empalmes, al principio no existían estándares disponibles, por lo que se crearon accesorios que pudieran ser equivalentes a los conocidos para cable de aceite fluido.



El primer diseño para 110-170 kV estaba basado en cintas auto-amalgantes, que se convierten en una masa sólida cuando son aplicadas con una cierta tensión mecánica. Cuando se aplican las cintas, es inevitable que en la superposición de las distintas capas se formen pequeñas porosidades. La presencia de estas cavidades se mide realizando correctamente, las descargas parciales serán de baja energía.

El resultado de este tipo de empalmes fue excelente, están en servicio sin fallas desde 1976. Hay algunos fabricantes de cables en el mundo que utilizan aún esta técnica. Los resultados son muy buenos con los instaladores bien entrenados, pero todo depende del trabajo manual, por eso se cambió en la década de los 80 a otro tipo de empalme. Empalmes vulcanizados en caliente

La segunda generación está basada en una reconstrucción del aislamiento con cintas EPR y una reticulación bajo presión.

Este tipo de empalme tiene un dieléctrico completamente homogéneo con el del cable y puede ser realizado con el mismo diámetro del cable y con rigidez dieléctrica similar.

Este método ha sido ensayado hasta 220 kV y está actualmente en la última fase de desarrollo para aplicarse a 400 kV.

Empalmes prefabricados

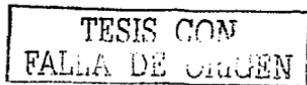
La ventaja fundamental de este tipo de empalme, es que al venir preparados de fábrica, pueden ser montados con facilidad en la obra, ahorrando tiempo. Así mismo, los ensayos de rutina y mecánicos pueden hacerse previamente. Gracias a esto, se puede eliminar cualquier fallo en esta etapa. Estos ensayos se realizan con equipos especialmente diseñados para ello, incluyendo medidas de las descargas parciales hasta 1.75 U₀ y ensayos de tensión alterna a 2.5 U₀ durante 30 min.

Para un cable de 76/132 kV, los ensayos eléctricos que experimentaría el empalme serían:

- 2.5 U₀ = 190 kV AC por 30 min.
- Medidas de descarga parcial, 1.5 U₀ = 114 kV valor máximo: < 5pC.

Descripción del empalme

- Cuerpo de composite con electrodos integrados que se colocará sobre el aislamiento del cable. Los materiales usados son aislantes o semiconductores a altas tensiones.
- Conexión de los conductores por compresión o soldado.



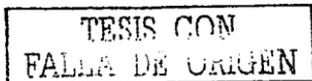
- Excelentes características eléctricas, mecánicas y térmicas, debido a estudios por ordenador de los campos eléctricos, una elección adecuada de las materias primas, fabricación cuidada y estrictos controles de calidad.
- Cubierta que asegura más perfecta protección del empalme, hecha de un tubo de cobre y una cubierta de polietileno de alta densidad.
- La cubierta está aislada de tierra para una tensión de 25 kV. Se tienen dos variantes, con o sin cross-bonding.

El empalme prefabricado está hecho totalmente de materiales elásticos, por eso la técnica de enfilar puede ser empleada. Para evitar contacto entre la superficie aislante del empalme y el semiconductor exterior del cable, se ha desarrollado una herramienta de montaje basada en nuestra patente de la herramienta de montaje para 20 kV.

Los fabricantes de cables conocen la importancia de esta precaución, ya que siempre existe riesgo de que una pequeña cantidad de partículas semiconductoras se adhieran en las paredes del empalme si éstas se deslizan sobre él. Esta operación se realiza con la herramienta de precisión hidráulica, que sirve también para el engarce de la conexión del conductor. Esto nos permite una instalación fácil, de esta manera los instaladores pueden concentrarse en las partes esenciales.

Campo eléctrico de empalme 145 kV

1. aislamiento del cable
2. conductor del cable
3. aislamiento del empalme
4. electrodo alta tensión del empalme
5. electrodo de tierra



2.6. Cálculos de tensión de jalado en los cables

Durante el tendido, los cables son sometidos a diversos esfuerzos mecánicos que deben ser objeto de un detallado análisis.

El tendido será estudiado de forma que éstos esfuerzos permanezcan dentro de los límites admisibles. El origen de estas tensiones es:

- esfuerzo de tracción
- esfuerzo de compresión radial en las curvas
- esfuerzo de plegado.

Si las tolerancias no se respetan, los cables pueden sufrir daños como el plegamiento de los papeles con formación de vacuolas, microfisuras en los materiales sintéticos, fatiga o desgarrado de las cubiertas metálicas. Los defectos resultantes no aparecen necesariamente durante la puesta en servicio, sino que pueden permanecer ocultos durante varios años.

Calculo del tendido

Calculo del esfuerzo de tracción

Trazado recto sin diferencia de nivel

El esfuerzo de tracción al final del tramo viene dado por la fórmula:

$$P = G \times L \times \mu$$

Donde:

P: tracción al final del cable [daN]

G: peso del cable [kg/m]

L: longitud del trazado [m]

μ : coeficiente de rozamiento

Trazado recto con diferencia de nivel

El esfuerzo de tracción viene dado por la fórmula:

$$P = G \times L \times (\mu \times \cos\beta + \text{sen}\beta)$$

Donde:

β : ángulo de inclinación

+: tendido ascendente

-: tendido descendente

Si β es pequeño: $P = G \times L \times \mu + G \times h$

Donde: h: diferencia de nivel [m]

Con β inferior a 18°, lo cual representa una pendiente de 32%, el error es inferior a 5%.

Trazado con cambio de dirección

Durante el tendido con curvas debe ser tendida en cuenta la presión específica efectiva, que se compone, por una parte, del peso del cable y por otra parte, de la fuerza de compresión debida a los esfuerzos de tracción:

P = peso lineal del cable

Za = esfuerzo de compresión radial por unidad de longitud

Fa = fuerza de compresión resultante

$$Fa = Z^2_a + p^2$$

Admitiendo:

P1 = Fuerza de tracción al principio de la curva

P2 = Fuerza de tracción al final de la curva

$$Za = P/r$$

$$a = 2 \times \pi / 360 \times a \times r$$

Para P = P1 se obtiene

$$P_2 = P_1 + Fa \times a \times r$$

$$P_2 = P_1 + \left(\frac{P_1}{r}\right)^2 + P_1^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{360 \cdot a \cdot r \cdot \mu}\right)$$

Esta función no tiene en cuenta el esfuerzo necesario para el doblado del cable, por lo que es exacta en caso de grandes radios de curvatura, pero ligeramente optimista en el caso de radios débiles.

El coeficiente de rozamiento depende de los materiales en contacto. Los diferentes valores que pueden presentarse durante el tendido vienen resumidos en la tabla siguiente:

	Cables con cubierta Ext. En yute μ	Cables con cubierta Ext. Termoplástica μ	Cables armados μ
Tendido sobre rodillos	0.25 - 0.35	0.2 - 0.3	0.15 - 0.25
Tendido en tubos de cemento	0.5 - 0.7	0.4 - 0.6	0.4 - 0.5
Tendido en tubos termoplásticos [en seco]	0.4 - 0.6		0.25 - 0.35
Tendido en tubos termoplásticos [con grasa especial]	-----	0.15 - 0.25	0.15 - 0.25
Tendido en tubos termoplásticos [con agua]	-----	0.15 - 0.25	0.20 - 0.30
Tendido en tubos termoplásticos [con grasa y agua]	-----	0.10 - 0.20	0.10 - 0.20

Los cables con cubierta exterior Termoplástica no pueden ser tendidos en tubos sintéticos durante grandes longitudes, sin lubricación.

Los calentamientos locales que se pueden producir en las curvas, podrían provocar que el cable se pegara a la pared del tubo.

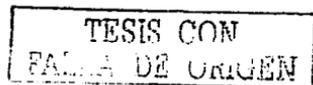
Esfuerzos de tracción admisibles

En los conductores

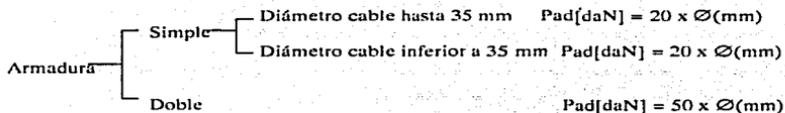
Cable	Unipolar	Conductor cobre	$\delta_{ad} = 6 \text{ daN/mm}^2$
		Conductor aluminio	$\delta_{ad} = 3 \text{ daN/mm}^2$
	Multipolar	Conductor cobre	$\delta_{ad} = 4 \text{ daN/mm}^2$
		Conductor aluminio	$\delta_{ad} = 2 \text{ daN/mm}^2$

En la cubierta

$$P_{ad}[\text{daN}] = 5 \times \text{diámetro exterior del cable}$$



En la armadura



El esfuerzo de compresión radial

Cálculo de esfuerzo de compresión radial

Este esfuerzo depende de los esfuerzos de tracción al inicio de la curva, al ángulo de la misma y al radio de curvatura.



Admitiendo para simplificar que $P1 = P2 = P$

$$Z = 2P \times \text{sen } \alpha/2 \quad a = 2 \times r \times \pi \times \alpha/360$$

Y así $Za =$ esfuerzo de compresión por unidad de longitud.

$$Za = \frac{P \times \text{sen } \alpha/2}{r \times \pi \times \alpha/360}$$

En el dominio $0 - 90^\circ$ tenemos aproximadamente

$$\text{Sen } \alpha/2 = \pi \times \alpha/360$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$Z_u = P/r \text{ [kg/m]}$$

Para una curva inferior a 90°, el defecto con esta fórmula aproximada es inferior al 10%

Esfuerzo de compresión radial admisible

Para tendido en tubos de plástico

Cable	No armado	$Z_{aad} = 1000 \text{ daN/m}$
	Armadura simple	$Z_{aad} = 1500 \text{ daN/m}$
	Armadura doble	$Z_{aad} = 1800 \text{ daN/m}$

Cuando, en las curvas, el cable se tiende sobre rodillos

Cable	No armado	$Z_g = 150 \text{ daN/rodillo}$
	Armadura simple	$Z_g = 250 \text{ daN/rodillo}$
	Armadura doble	$Z_g = 300 \text{ daN/rodillo}$

Esfuerzo de plegado

Radio de curvatura mínimo admisible

Cables de alta tensión Monopolar

Aislamiento papel [P] 20 x Ø ext.[mm]

Termoplástico [T]

Poliétileno reticulado[X] 15 x Ø ext.[mm]

Caucho [G] 12 x Ø ext.[mm]

Otro método empleado para el cálculo de tensión de jalado es:

$$L_0 = 15.60$$

$$L_1 = L_0 + L_{IT}$$

$$L_2 = L_1 \cosh(C.F. \cdot RAD) + \sqrt{(L_1)^2 + (R/C.F.)^2} \sinh(C.F. \cdot RAD)$$

$$L3 = L2 + L2T$$

$$T = C.F. \times P_{\text{cable}} \times L3$$

Donde:

L1T es la distancia del claro antes de una curva

C.F. es el coeficiente de fricción

RAD. Es la conversión de los grados de la curva en radianes

R es el radio de curvatura del plano topográfico

L2T es la distancia del claro después de la curva

P_{cable} es el peso del cable de potencia

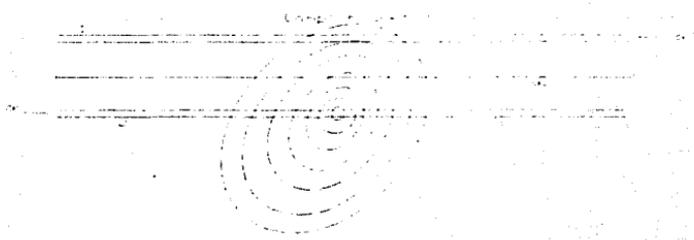
Esto son los datos proporcionados en el plano topográfico que se envía para la realización del proyecto.

2.7. Estudio sobre pérdidas en los cables de energía (voltajes inducidos)

El problema de cuantificar y minimizar los voltajes inducidos en las pantallas de los cables de energía, se refiere fundamentalmente a los cables unipolares, ya que las variaciones del campo magnético en los cables tripolares o en formación triple se anulan a una distancia relativamente corta al centro geométrico de los conductores y consecuentemente los voltajes que inducen en sus pantallas son tan pequeños que pueden desprejarse. Analizaremos este fenómeno para el caso de circuitos que utilicen cables unipolares.

En nuestro país, la transmisión y distribución de energía eléctrica generalmente se hace en corriente alterna en 50 ó 60 Hz. Estableceremos los fundamentos de la teoría que estudia a este fenómeno.

Si tenemos dos conductores paralelos colocados uno cerca del otro, y uno de ellos lleva una corriente alterna, tendremos un campo magnético alrededor del conductor que lleva la corriente. Dada la cercanía de los conductores, las líneas de flujo del campo magnético del conductor energizado cortaran al otro conductor y se inducirá una corriente en éste último como se ilustra en la figura siguiente:

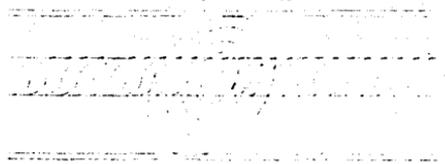


Las variaciones del campo en el conductor (2) harán que la corriente en (1) varíe en función del tiempo y de la magnitud de la corriente en el conductor (2).

En la figura siguiente se observa que la corriente alterna que circula por el conductor central crea un campo magnético pulsante, cuyas líneas de flujo enlazan a la pantalla y en función del fenómeno ya estudiado, se induce un voltaje a tierra en ella, cuya magnitud viene dada por la ecuación:

$$E_o = I \times W \times \mu \times 10^{-3}$$

volts / km ----- I



I = Corriente en el conductor en amperes

$$W = 2\pi f$$

M = Inductancia mutua por fase

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$M = 0.46 \log 2 \text{ DMG} / \text{dm} , \quad \text{mH} / \text{km}$$

DMG = Distancia media geométrica en mm.

dm = Diámetro promedio de la pantalla metálica, en mm

$$\text{dm} = \text{ds} - \text{es}$$

Donde:

ds = Diámetro sobre la pantalla metálica, en mm

es = Espesor de la pantalla metálica, en mm

Si las pantallas se conectan a tierra en ambos extremos del cable (práctica ampliamente recomendada en la mayoría de las instalaciones por razones de seguridad), se tiene una corriente fluyendo en ellas debido a la acción de E_o .

La magnitud de esta corriente es:

$$I_M = E_o / \sqrt{R_M^2 + X_M^2} \text{ Amp.} \text{-----} 2$$

Donde:

$$X_M = \omega M \times 10^{-3} \quad \Omega/\text{km}$$

$R_M = 1000 / A_s \times \rho_s =$ resistencia de la pantalla Ω / km

$A_s =$ sección transversal de la pantalla (mm^2)

$$A_s = \pi / 4 (\text{de}^2 \text{ pantalla} - \text{di}^2 \text{ pantalla})$$

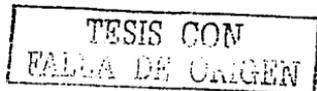
$\rho_s =$ conductividad eléctrica de la pantalla a 50°C $\text{M} / \Omega \times \text{mm}^2$

(50 para Cu y 4.2 para Pb)

Por razones de seguridad del CCITT limita el voltaje a 60 volts r.m.s. en operación normal y a 430 volts en condiciones de corto circuito. (Una fase a tierra en sistemas con neutro a tierra). En las prácticas se acostumbra conectar a tierra las pantallas de los cables en todos aquellos puntos accesibles al personal, principalmente en los empalmes y terminales garantizando con esto una diferencia de potencial nula entre pantalla y tierra en esos puntos.

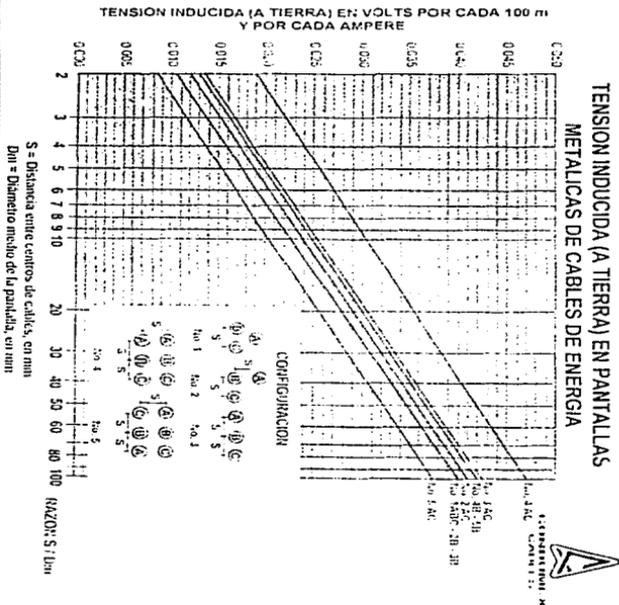
Desgraciadamente el problema no termina ahí pues la corriente I_m que circula por las pantallas causa dos efectos desfavorables sobre el cable:

- a) produce pérdidas
- b) envejece térmicamente a los materiales aislantes que le rodean



El voltaje inducido en las pantallas sobre el aislamiento de los cables de energía, se obtiene fácilmente aplicando la relación D / r_m a las curvas de la figura siguiente gráfica de tensiones inducidas a tierra en pantallas, leyendo directamente el voltaje inducido en función de la longitud del cable y de la corriente en el conductor.

A continuación se muestran algunos arreglos comunes de los conductores en circuitos trifásicos:



TESIS COM
FALLA DE CORRIENTE

Para obtener los voltajes inducidos E_a , E_b y E_c para cada uno de los tres conductores inducidos en la gráfica anterior, úsense las curvas de la tabla siguiente como sigue:

Para obtener	Arreglo de los conductores figura anterior		
	Rectangular	Plana un circuito	Plana dos circuitos
E_a ó E_c	Curva B	Curva D	Curva E
E_b	Curva A	Curva A	Curva C

CAPITULO 3

METODO CROSS-BONDING

3.1 Métodos de unión

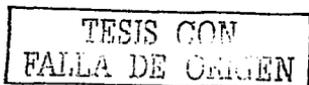
La vaina se une en un solo cable del conductor para la CA, funciona como el secundario de un transformador; la corriente en el conductor induce un voltaje en la vaina. Cuando se unen las vainas de los cables del conductor, como se práctica comúnmente, el voltaje inducido actual causa pérdidas. Anteriormente, cuando la unión era especial se empleaba para la prevención de las pérdidas de la vaina de los cables una chaqueta aislante, las vainas se sujetaban a los voltajes de CA, y la unión fue diseñada para guardar la magnitud de los voltajes inducido dentro de los límites pequeños para prevenir la posible corrosión de la vaina debido a la electrólisis de la CA.

Diferentes niveles de voltaje de la vaina permisible se conectan a tierra, se propuso en ciertos momentos un voltaje de 12 a 17 Volts, para prevenir corrosión debido a la electrólisis. En la actualidad, se fabrican cables con una chaqueta aislante, para que los voltajes inducidos ya no constituyan un problema de corrosión, y los voltajes comparables del cable secundarios puedan ser aceptables.

El problema de pérdidas en la vaina es particularmente importante cuando es muy grande, se ponen los cables del conductor comprendiendo un circuito en ductos separados, o espaciando entre los cables directamente enterrados, esto es para reducir los efectos de calefacción mutua, como los voltajes son significativamente más altos, estos son inducidos en las vainas del cable. El propósito mayor de la vaina especial es que une solo a los cables del conductor y previene o reduce pérdidas en la vaina.

Se han instalado cables desnudos en conductos y se ha tenido un éxito total, se han operado en América del Norte durante muchas décadas. El voltaje de la vaina opera a un cierto límite y a un cierto valor (normalmente 12 - 17 V entre la vaina y tierra) esto se determinó por consideraciones de la corrosión electrolítica. Los cables de un conductor metálico son protegidos por chaquetas de varios tipos, y sólo servían como una protección de anticorrosión, más recientemente la vaina bajo condiciones normales de operación, las propiedades tienen que ser dictadas por los requisitos que se necesitan fuera del funcionamiento anormal de los circuitos eléctricos para que la propia chaqueta se vuelva un aislador. Las limitaciones permanecen en el valor superior de voltajes inducidos permisibles, pero a un nivel muy más alto como siguen:

- 1) El voltaje de la avería (voltaje de la perforación) en la chaqueta aislante bajo las condiciones de falla.
- 2) Reflejo del voltaje en la unión en la sección de la vaina.



Cualquier vaina que se une o conecta a tierra por el método que sea, debe realizar las funciones siguientes:

- 1) Como requisito para las uniones en la sección de la vaina los voltajes de esta deben tener un límite.
- 2) Reducir o eliminar las pérdidas de la vaina.
- 3) Mantener un circuito la vaina continua, para permitir el retorno de la falla actual y rapidez adecuada para la protección.

Si satisface estos requisitos total o parcialmente, las vainas del cable son divididas en varias secciones uniendo estas en la vaina. La longitud de estas secciones es determinada por el voltaje de la vaina permitiendo el nivel de falla para las condiciones normales.

En los arreglos especiales de unión en la vaina, deben tenerse los siguientes aspectos:

- 1) La opción de unir las vainas del sistema que debe ser adoptado. Normalmente se espera que el potencial del cable y la vaina estén a tierra, pero en un sistema, se garantiza que se pueden tener voltajes apreciables con respecto a tierra. Debe considerarse a cualquier aspecto de seguridad que pueda tenerse y especificar el valor límite del voltaje en la vaina.
- 2) La supresión completa de corrientes circulantes en la vaina no siempre pueden ser posibles debido a dificultades prácticas que se tienen por la longitud del cable y espacios. Es entonces necesario calcular las corrientes de la vaina residual y evaluar su efecto en el cable.
- 3) El uso de uniones especiales da lugar a un sobrevoltaje en la vaina durante los transitorios del sistema y a falta de las magnitudes de este, debe ser tomado en cuenta. Para los sistemas de voltajes más altos, un limitador de voltaje en la vaina es necesario y en todos los casos, debe darse a la coordinación del aislamiento de la vaina un nivel de sobrevoltaje al que este sujeto el aislamiento respectivo.
- 4) Una falla en el aislamiento de la vaina o en un limitador de voltaje, puede producir grandes corrientes en la misma y pérdidas que se deben, a causa del calentamiento de los cables. Deben tenerse consideraciones en la vaina del dispositivo que limita el voltaje y mantiene el funcionamiento de un sistema completo.

Para circuitos de cables de un solo conductor que llevan corrientes grandes a más de 500 A, la unión especial es a menudo económicamente deseable por la reducción de pérdidas, que permiten usar un conductor más pequeño.

Cuando se requiere introducir uniones especiales, el costo extra de los cables por el tamaño de conductor es necesario. Para una sólida conexión del sistema se debe garantizar que el costo del equipo adicional y el mantenimiento sea equilibrado.

Los métodos de unión son los siguientes:

- Unión en un solo punto
- Método de unión de las impedancias
- Unión cruz
- Unión de las secciones en cruz
- Unión modificada en las secciones cruzadas
- Unión continúa en cruz

Unión en un solo punto

La forma más simple de una unión especial, consiste en poner en orden las vainas de los tres cables que se conectarán a tierra en un momento dado, sólo a lo largo de su longitud. Otros puntos del voltaje aparecerán en la vaina con la conexión a tierra, ése será un punto máximo más alejado de la conexión a tierra. Las vainas deben aislarse adecuadamente a tierra. No hay ningún circuito de la vaina cerrado subsecuentemente, exceptúe a través del limitador de voltaje de la misma, la corriente normalmente no fluye longitudinalmente a lo largo de las vainas y actualmente las pérdidas ocurren en la vaina circulante (la pérdida de la vaina todavía estará presente).

Los voltajes en la vaina

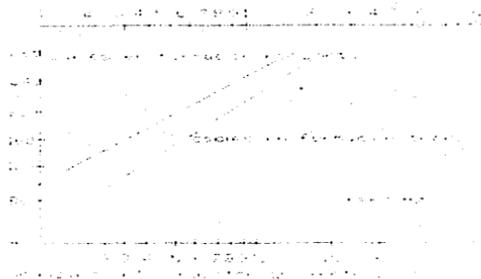
En los voltajes de la vaina se puede encontrar el gradiente usando la tabla siguiente para un circuito típico que tiene una corriente en el conductor $I = 1000$ A.

$$\frac{S}{d} = z$$

Donde:

S= centro a centro del cable

d= diámetro de la cubierta inferior



El voltaje de la vaina será respectivamente 103 v/km y 138 v/km para el arreglo en trébol y formación plana. Puesto que la vaina del cable puede en algunos puntos estar expuesta para ser revisado por el personal, este potencial a tierra puede afectar al personal de esa área, es común en la práctica especificar el voltaje máximo permisible durante el funcionamiento a plena carga. Se reconoce que este voltaje se excederá grandemente durante los transitorios del sistema y los cortos circuitos. El voltaje máximo de la vaina permitido a carga plena varía considerablemente entre los países.

Cuando la longitud del circuito es tal que la limitación del voltaje da lugar a que la vaina se exceda, se conecta a tierra en un extremo del circuito, también puede conectarse en algún otro punto. El centro de la longitud y el voltaje en cada una de las dos secciones menores se reduce en forma correspondiente. Cuando el circuito es demasiado largo para ser repartido por este, significa que puede ser seccionado con el uso de uniones en la sección de la vaina para que el voltaje en cada sección sea menor a este dentro de la limitación impuesta.

Conductor paralelo de continuidad a tierra

Durante una falla a tierra en el sistema, la corriente que lleva es cero. La vaina del cable garantiza la conexión a tierra en un sólo punto, no se puede exceptuar en el caso de que exista una falla en el cable, llevando cualquier corriente de retorno. Esto puede ser a menos de que algún conductor externo paralelo disponible se proporcionado para servir como un camino alternativo para la corriente de retorno, ésta sólo puede fluir a través de la propia tierra, ya que la resistividad de la misma es muy alta se comparó con los buenos conductores. La profundidad de los componentes es frecuente en muchos cientos de metros, porque la corriente de retorno en promedio es tan remota que la corriente del conductor, las pérdidas de voltajes inducidos a lo largo de los conductores paralelos, incluso en las vainas del cable, son muy altas.

Además, en ausencia de un conductor de tierra paralelo, al ocurrir una falla de tierra en la proximidad inmediata de un cable, podría causar una diferencia mayor entre los potenciales de tierra a los dos extremos en un sistema del cable. Dependiendo de alguna magnitud del plan particular del limitador de voltaje empleado, los riesgos podrían suceder entonces al personal o equipo. Por lo tanto se recomienda que en un solo punto de la instalación del cable se garantice proporcionalmente un conductor de continuidad de tierra paralelo que se conecta a ambos extremos de la ruta. El espacio de este conductor en el circuito del cable debe estar suficientemente cerca del límite del levantamiento de voltaje de la vaina a un nivel aceptable durante una falla en una sola fase. El tamaño de este conductor debe ser el adecuado para llevar la falla esperada fuera del sistema del cable.

El conductor de continuidad de tierra paralelo, normalmente se aísla para evitar cualquier riesgo de corrosión y estará sujeto a la inducción de voltaje de los cables de potencia de la misma manera como cualquier otro conductor paralelo. Para evitar corrientes circulantes y pérdidas en este conductor, cuando los cables de potencia no se transponen, para cruzar el conductor paralelo de continuidad a tierra, se usan los métodos descritos con anterioridad.

Arreglos del circuito

En las figuras siguientes se muestra la aplicación de un solo punto que se une para singularizar la longitud y los circuitos de longitudes múltiples respectivamente. Estos diagramas no muestran las cajas desconectoras para permitir probar el aislamiento de la vaina.

Métodos de unión de las impedancia

Las secciones de la vaina del cable están juntas garantizando de alguna manera a través de ella una impedancia. Esta impedancia puede consistir en reactores simples de dispositivos como reactores saturables y transformadores. En todos estos métodos una cierta cantidad de corriente en la vaina es permisible, para reducir las pérdidas y los voltaje de la misma en las conexiones a tierra, los dispositivos de impedancia normalmente se diseñan con laminillas en el centro y los puntos conectados a tierra.

En alguna coacción se usaron resistencias normales, sin embargo, al unir éstas se demostró que no son prácticas, ya que dichas resistencias son muy grandes y permiten el paso de las corrientes de falla.

Aunque una supresión parcial de voltajes inducidos de la vaina usa métodos de unión de las impedancias, hay varias desventajas que limitan la aplicación de estos métodos. Las desventajas principales son:

- 1) Se requiere de un espacio adicional para la inspección.
- 2) La impedancia del dispositivo puede ser relativamente cara entonces tiene designada resistencias a las corrientes de falla.

3) En el funcionamiento normal, se pueden introducir 3 armónicas en la vaina y éstas pueden causar interferencia en líneas telefónicas cercanas. Las pérdidas directas de corrientes entran a través de la conexión a tierra y pueden causar saturación en los centros férricos y perturbación en el funcionamiento de los reactores o transformadores.

Unión cruz

Arreglo del circuito básico

La unión cruz consiste esencialmente en seccionar la vaina en divisiones menores y cruzadas, que se conectan para neutralizar el voltaje inducido total, aproximadamente en tres secciones consecutivas, como se muestra a continuación:



Con los cables transpuestos, como se ve en la figura anterior, es imposible lograr un equilibrio exacto de voltaje inducido en la vaina a menos de que los cables se pongan en trébol. Cuando por ciertas razones los conductores del cable se transponen en cada posición de la unión, los voltajes inducidos de la vaina se neutralizan. Con la formación independiente del cable se proporcionan las tres secciones menores y son idénticas. En la figura siguiente se muestra cómo esto sólo puede hacerse para un circuito de tres secciones menores. La vaina garantiza la conexión a tierra en ambos extremos de la ruta. En este arreglo, las tres secciones menores son unidas en una sección mayor.



Uniendo las secciones en cruz

Este sistema que se une en cruz se llama a menudo Kirke -Searing unido, aunque el sistema usado por H.R. Searing y W.B. Kirke no involucra transposiciones de los cables. Cuando el número de secciones menores es exactamente divisible a través de tres, el circuito puede consistir en uno o secciones más grandes en serie. En la unión de dos secciones mayores y de los extremos del circuito, las vainas están juntas garantizando el contacto a tierra, aunque las uniones de las secciones mayores generalmente serán a tierra (Ver las figuras siguientes en las que cada sección mayor separada se conecta).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Unión modificada en las secciones cruzadas

En esta explicación la sección cruzada que se une al sistema se modificó, aquí no es necesario tener el número de secciones menores. Las condiciones de voltaje equilibrado dentro de una sección mayor consiste en cuatro secciones menores, estas pueden ser logradas subdividiendo una sección menor en dos subdivisiones, como sigue:

1- Una longitud corta (o subdivisión) seguida por dos longitudes iguales (o las secciones menores) con otra longitud corta (o subdivisión) completando la sección mayor, deben tener fuerzas para la longitud de una sección menor como se muestra rnas adelante.



2- Una longitud corta (o la sección menor) otra la longitud corta (o subdivisión) seguida por una longitud más larga (o la sección menor) al complotar la sección mayor; las dos longitudes más largas (o las secciones menores) deben ser iguales y la longitud combinada de las dos subdivisiones debe tener fuerza para la longitud de una sección menor como se muestra mas adelante. En el caso de que las primeras uniones cruzadas deban invertirse.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Unión continúa en cruz

En este sistema la vaina cruzada se unió al final de cada sección menor por toda la ruta del cable. Las tres vainas están garantizando sólo la conexión a tierra de los dos extremos de la ruta, como se muestra en la figura siguiente, es generalmente deseable que los cables se transpongan para que cada conductor ocupe una de las tres posiciones para un tercio de la longitud total. El número de secciones iguales menores deben ser precisamente divisibles entre tres, pero esto no es tan importante como el número total de aumentos de las secciones menores.

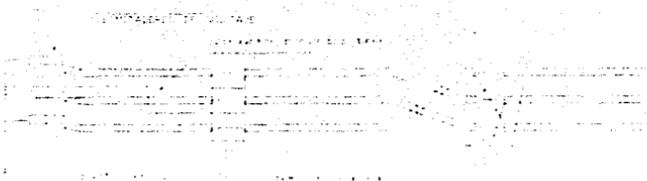
Sistemas mixtos

Cuando el número de secciones menores no es precisamente divisible a través de tres, el sistema puede consistir en una mezcla regular y modificado solo en el punto de las longitudes garantizadas. Cuando es necesario unir mediante cruces, estas pueden ser del tipo de la figura siguiente en ella se muestran el arreglo de un solo punto final en la longitud total a causa de un número grande de secciones menores que tienen longitudes diferentes, al final de un sistema cruzado.

Sistemas desbalanceados

No es posible dividir la longitud de la ruta en partes exactamente iguales a la longitud de la sección menor, ni siempre es posible mantener un espacio constante de los cables a lo largo de la ruta. En sistemas cruzados continuos, se puede también no tener un número total de secciones menores precisamente divisible en tres. En sistemas prácticos, hay por

consiguiente algún desequilibrio y puede ser necesario calcular las corrientes de la vaina circulante que están presentes para que se evalúe su efecto en el cable.



Unión de las vainas de sección

Cuando deben reducirse las pérdidas de la vaina de los cables de un solo conductor se eliminan entonces se requieren uniones de las secciones de la vaina para interrumpir la continuidad eléctrica del circuito de la misma. Para realizar su función satisfactoriamente hay algunos factores mayores involucrados en el plan de estas uniones. Mecánicamente deben de ser impenetrables a la humedad y al fluido, bajo todas las condiciones de operación. Eléctricamente deben diseñarse para resistir el voltaje, enfatizando que ocurra bajo la condición de falla, y descargas por rayo, cambiando las condiciones.

Puede usarse una de las cantidades que deben evaluarse antes de una unión en las secciones de la vaina en un esquema. Esto puede ser determinado, calculando el voltaje máximo aparecido por la unión debido a las fallas por rayo.

Opción de unir un sistema.

Los métodos de unión de las impedancias son menos satisfactorios que los otros métodos descritos con anterioridad. Por esta razón estos métodos no se recomiendan para el uso general.

Uniendo transformadores puede ser en algunos casos mas barato por ejemplo:

- 1) El equilibrio conveniente por la unión cruzada en un punto es imposible y solo es inaceptable (ningún conducto vacío está disponible para un conductor de continuidad a tierra).
- 2) Un cable de repuesto (un cuarto de cable es solo un circuito o un séptimo de cable para un circuito doble) se instala; en este caso, se reconecta al unir cruzando siempre que el cable se necesite, es un funcionamiento largo y complejo, considerando que reconectando se unen los transformadores simplemente.

Ventajas de la unión cruzada.

Las vainas del cable del sistema unidas en un solo punto, generalmente son en una área particular y la conductibilidad los hace bastante capaz de llevar corrientes de corto-circuito a través de las fallas del sistema, ellos se conectan con tierra en un momento dado. Un conductor de continuidad de tierra paralelo se recomienda por consiguiente y esto agrega apreciablemente el costo del sistema del cable.

La ventaja principal de unir en cruz es que, mientras se inhiben corrientes de la vaina inducida durante el equilibrio normal de funcionamiento de la carga, las vainas forman un camino continuo del circuito del cable, se conectan a tierra en ambos extremos. Las corrientes de la vaina pueden fluir por consiguiente durante las fallas a tierra, y la necesidad del conductor de continuidad a tierra paralelo está alejada. Además de la economía lograda por la eliminación del conductor de tierra, las vainas del cable funcionan más eficazmente como protección a los conductores durante las fallas a tierra. Los voltajes inducidos en un cable paralelo son menos durante las fallas a tierra en un sistema cruzado que para un sistema similar en un solo punto

Opción de sistema cruz-garantizado.

Para los circuitos de un cable largo, hay una opción entre las uniones de las secciones cruzadas continuas. Las ventajas relativas son las siguientes:

Ventajas de unir las secciones cruzadas.

(1) Cada parte de la sección es mayor que una malla eléctrica separada, para calcular las corrientes de la vaina cuando las longitudes o espacios de la sección menor no son uniformes.

En una sección no uniforme que tiene una configuración del cable equilátera, la proporción de las pérdidas en la vaina esta dada por:

$$\frac{N}{Y} = [1 - 3(\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3)]$$

Donde:

N= pérdidas de la unión cruzada

Y= pérdidas en las uniones sólidas

1, 2, 3= las secciones de la longitud por unidad de las tres secciones menores

Ejemplo:

1= 0.4

$$\gamma_2=0.2$$

$$\gamma_3=0.4$$

La pérdida con las vainas cruzadas es 4% de la pérdida con la conexión sólida a las vainas.

- 2) La vaina unida en cada sección mayor permite que la falla de un cable sea un fracaso, esto debido a la distribución entre las tres vainas excepto dentro de la sección mayor que contiene la falla.
- 3) La vaina y las uniones de las secciones mayores tienden a reducir los voltajes de la vaina en las transposiciones.
- 4) El número de limitadores de voltaje de la vaina requiere que este reducido.
- 5) En la vaina se unen las secciones mayores asegurando que no habrá flujo, más allá de los puntos neutros de las ataduras independientes de cualquier desigualdad en las longitudes de las secciones menores.

Ventajas de unir en cruz continua.

- 1) Los efectos de la no uniformidad pueden reducir las secciones menores cuando éstos forman parte de un circuito de la vaina total, que contiene varias secciones. También puede ser posible para no usar un número total de secciones dividir entre tres.
- 2) Si es posible supervisar en un momento dado, todas las corrientes de la vaina del circuito entero independientemente del número de secciones menores, a lo largo de la longitud.
- 3) Para que las fallas de la resistencia baja sea menor, el supervisor del aislamiento de la vaina y los limitadores de voltaje de la misma, los pone más fácil porque hay uno sólo, dos vainas se unen y un eslabón a tierra se quita, incluso en un circuito largo, para permitir las pruebas se aplican a los extremos del circuito del cable.

3.2. Descripción del cross-bonding.

El método cross-bonding es de utilidad en los cables ya que consiste de varios procedimientos y formas de conexión para la eliminación de corrientes circulantes en las pantallas de los cables y también proporciona una seguridad tanto al equipo como al personal de mantenimiento y operación.

A continuación se da la descripción de los métodos, indicando los puntos de cada uno como siguen:

Cross-bonding y un punto simple de unión de los cables de alto voltaje.

Iniciamos con la opción de la cubierta para los cables, ésta realiza con la unión de puntos múltiples sólidos, la unión de un punto simple y la unión cruzada.

La función principal de la unión especial es suministrar la corriente electrostática a tierra, reducir las pérdidas en la cubierta, proporcionar la trayectoria para el regreso de la corriente y limitar el voltaje en la cubierta.

Las consideraciones especiales para la designación de la unión son: la elección del método unión, la supresión de grado de circulación de la corriente, la coordinación de aislamiento del sistema a tierra, las pruebas periódicas al sistema y tener un producto económico.

La unión sencilla de un punto puede ser de punto final, punto medio o punto sencillo con unión múltiple.

Las consideraciones de la unión en un punto simple son principalmente utilizar las dimensiones de corto circuito, eliminar las pérdidas de corrientes circulantes en las cubiertas de los cables, las condiciones de la cubierta del voltaje requieren separación de la tierra de regreso y algo de residuo de corriente inducida en el circuito del conductor a tierra.

El límite de la condición del voltaje en la cubierta de los cables se muestra en la siguiente tabla:

voltaje del sistema en kV	límite de voltaje de la carga de la cubierta
< 138	65 v
275	150 v
400	150 v

El punto simple para las consideraciones de las uniones del sistema de tierras de los cables es el sistema de tierras del cable en un solo punto, el uso de SVL's y las conexiones en un sitio final a tierra, la conexión paralela del conductor a tierra continua, la conexión entre cubierta y tierra del conductor y la unión del plomo, con baja impedancia y el límite de la longitud de la unión del plomo.

Para que al final del aterrizamiento del circuito tenga la entrada de altos transitorios, una baja resistencia a tierra, los interruptores metálicos de la GIS, el acceso a áreas publicas en la subestación y las cajas del estabón.

El cross-bonding (uniones cruzadas) tiene menor y mejores secciones continuas para el mismo, dividiendo y modificando la sección x-union con la combinación simple pt y x-union.

Las consideraciones para el cross-bonding son dimensiones más comunes con los circuitos largos, una completa supresión de los circuitos de corrientes usuales no prácticas y la tierra que no es necesaria para separar a los conductores.

Las secciones continuas en x-uniones son simple designación a falta de la cubierta también mejora la distribución y reducción del transitorio en las cubiertas que tengan los limitadores de voltaje.

Para los continuos se tiene un mejor arreglo de simetría entre menor sección. Se hace un monitoreo para la localización de la corriente en la cubierta simplificando las pruebas. Las consideraciones del cross-bonding en un sistema de tierras para el cable, generalmente no requiere de un conductor paralelo a tierra, la transposición del cable se une en cruz a la cubierta y baja la impedancia uniendo en corto el plomo del lado, transportando la falta de corriente usando las SVL con conexión delta y una configuración "y" y cajas de conexión.

La cubierta seccionada se junta con una unión cruzada del sistema teniendo una fuerza mecánica, una humedad constante y una resistencia eléctrica. El voltaje estándar de la cubierta es práctico y de producto seguro ya que tiene un electrodo para la corrosión de la cubierta y sus requerimientos de la chaqueta o cubierta son mínimos.

La continuidad durante la falta de tierra en la x unión del sistema es simple aun teniendo escasez del cable o por defecto del sistema externo. El conductor de continuidad necesita conectarse a tierra del sistema adecuado para llevar corriente de falla aislándolo para evitar corrosión y estar sujeto a la inducción actual de la proximidad del cable y la transposición.

Las consideraciones para las protecciones de equipo en interrupciones del escudo y los aisladores de la vaina que están fuera de la chaqueta del cable, se hacen uniendo las cajas del eslabón y las SVL's.

El criterio para la coordinación del aislamiento es que el voltaje en pie bajo la carga del emergente y el voltaje desarrollado por la falla en el sistema, y la comprobación del mantenimiento del sistema con el uso de SVT's en "delta" y en "y" de la configuración, las SVT's para el voltaje residual tienen un efecto de unir la longitud del cable.

Los tipos principales de voltajes en la vaina y el uso de limitadores (SVL's) son:

El hueco de la chispa con los SVL es más simple y tardía en los transitorios empinados, eliminando el goteo actual en el funcionamiento normal seguido después de un daño por un chispazo coexistente requiriendo inspección y mantenimiento más frecuente.

En la resistencia no lineal el carburo de silicón (sic) solo debe operarse dentro de los límites específicos, debe protegerse de la humedad y las características pueden cambiar entre las unidades de resistencia variable con olas repetidas, capacidad limitada de absorber energía y no llevar 60 Hz por la falta de corriente e inspección periódica recomendando pruebas al equipo.

La resistencia no lineal del óxido de zinc (Zno) se caracteriza porque se debe proteger de la humedad y es más estable con olas repetidas que el SIC. La capacidad limitada de absorber energía y no llevar 60 Hz por falta de corriente y una inspección periódica y pruebas recomendadas.

La resistencia no lineal en serie con chispa en el hueco tiene una respuesta más lenta para empapar a los transitorios, eliminando el goteo actual en un funcionamiento normal y la corriente sigue interrumpida (no requiere de ningún mantenimiento del hueco), requiriendo más espacio.

Los requisitos de prueba para el tipo SIC y ZNO SVL's que se recomienda por el cigre son:

a) La prueba de voltaje residual

- Un impulso de 8/20 usec 2,5,8,10 y 15 Ka cada uno (permitiendo que los SVL estén frescos entre los tiros)
- registro del voltaje residual

b) Condicionando la prueba

- Veinte tiros de 8/20 usec x 10 Ka a un intervalo de tiempo de un minuto
- Un impulso de 9/20 usec x 10 Ka

c) La prueba de impulso actual excesiva

- Un impulso de 1/20 usec x 30 Ka
- Un impulso de 8/20 usec x 10 Ka

d) La prueba de impulso alto

- Dos pruebas de 4/10 usec x 40 Ka (permite que los SVL estén frescos entre los tiros)
- Un impulso de 8/20 usec x 10 Ka

e) Deben hacerse pruebas

- 2000 usec x 10 Ka a la ola de impulso rectangular
- 60 Hz para el voltaje en un seg.
- repita lo anterior dentro de 15 seg.
- Un impulso de 720 usec x 10 Ka

f) Repita la prueba de voltaje residual

- En ambiente normal
- Un impulso de 8/20 usec x 10Ka
- PRV para SIC $\leq + 15\%$ del valor original
- PRV para ZNO $\leq + 5\%$ del valor original

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Unión de los aisladores de las secciones requeridas para el impulso que resistan los niveles según la tabla siguiente.

VOLTAJE DEL SISTEMA (KV)	EL IMPULSO DE RESISTENCIA (1 X 50 μ SEC)	
	ENTRE LAS MITADES DE LA UNION (KV)	CADA MEDIO UNION SE CONECTA A TIERRA (KV)
69	35	17.5
138	45	22.5
275	75	37.5
400	110	55

El plan de 1/C para las primacías en la unión.

VOLTAJE DEL SISTEMA K ^v	COBRE RIGIDO DE TAMAÑO EN KCMIL	PVC AISLAMIENTO* MILS
69	240	130
138	480	130
275	600	130
400	1000	130

El plan de primacías en la unión concéntricas para las mismas sujeto a la corriente de falla del sistema.

VOLTAJE DEL SISTEMA KV	EL CONDUCTOR INTERNO Y EL CONDUCTOR DEL LADO COBRIZO EXTERIOR (KCMIL)	ESPESOR DEL AISLAMIENTO INTERNO (MILS)	ESPESOR DEL AISLAMIENTO EXTERIOR (MILS)
69	240	180	130
138	480	180	130
275	600	180	130
400	1000	275	130

Requisito del cono circuito al unir los conductores

VOLTAJE DEL SISTEMA KV	FALTA EL REQUISITO DE CAPACIDAD ACTUAL
69	15 KA PARA 1 SEC
138	26 KA PARA 1 SEC
275	40 KA PARA 1 SEC
400	60 KA PARA 1 SEC

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Caja del eslabón principal rasgos de la función, para poder desconectar los eslabones y las SVL's, facilita la conexión apropiada de los mismos, proporciona las conexiones de la resistencia del contacto bajo y proporciona la imposibilidad de paso de agua y una resistencia a efectos de falla del sistema.

El impulso de la caja del eslabón consiste en los siguientes requisitos.

VOLTAJE DEL SISTEMA (KV)	EL IMPULSO A LA RESISTENCIA (1 X 50 uSEC)	
	MEDIO DEL ESLABON (KV)	MEDIO DEL ESLABON (KV)
69	35	17.5
138	35	17.5
275	60	30
400	60	30

Al probar los SVL's después de la instalación y mantenimiento deben hacerse pruebas

CARBURO de SILICÓN SVL's

SVL	PRUEBE DEL VOLTAJE EN DC	LÍMITE ACTUAL mA A 20°C *	
		SITIO QUE COMISIONA LA PRUEBA	PRUEBA DE MANTENIMIENTO
8	70	5 - 16	5 - 50
16	140	5 - 16	5 - 50
28	210	5 - 16	5 - 50

*Las corrientes de record se disminuyen aumentando respectivamente el 1% para cada grado debajo de 20 °C.

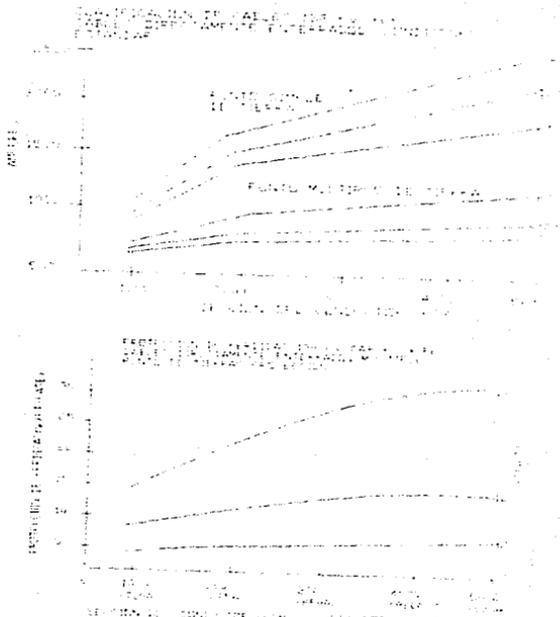
OXIDO de CINC SVL's

SVL LADO	PRUEBA MA ACTUAL	EL VOLTAJE LIMITE A 20 °C *	
		SITIO QUE COMISIONA LA PRUEBA	LA PRUEBA DE MANTENIMIENTO
TODOS	10	VOLTAJE + 17 A + 45%	TASO VOLTAJE + 17 A + 45%

*El voltaje debe ser disminuido aumentado respectivamente el 1% para cada grado por debajo de 20 °C.

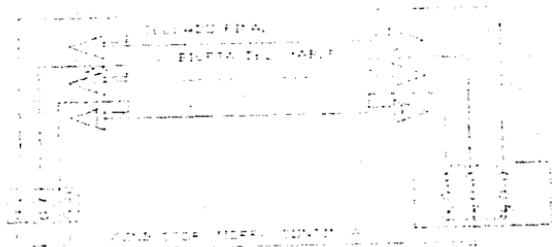
En la instalación se realiza a 10 kV DC durante un minuto con SVL's desconectadas, la prueba eléctrica a las SVL's y a los eslabones de la resistencia <20 ohms. Anualmente se debe realizar una comprobación después de una perturbación mayor a 5 kV DC durante un minuto con las SVL's desconectadas, la prueba eléctrica a las SVL's y a los eslabones con resistencia <20 ohms.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

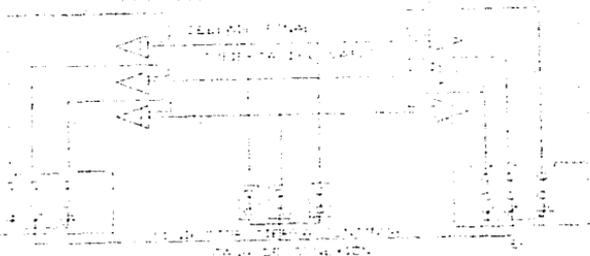
ESQUEMA DE UNIDAD EN BLOQUE DEL SISTEMA



LA APLICACION

CON UN PROCEDIMIENTO

ESQUEMA DE UNIDAD EN BLOQUE DEL SISTEMA



LA APLICACION

CON UN PROCEDIMIENTO

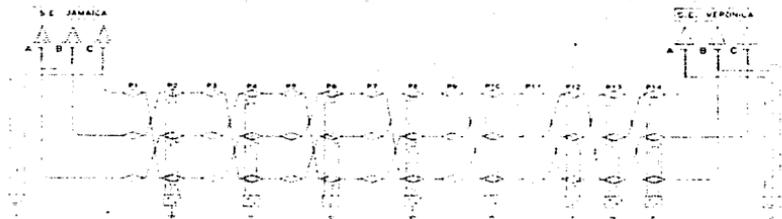
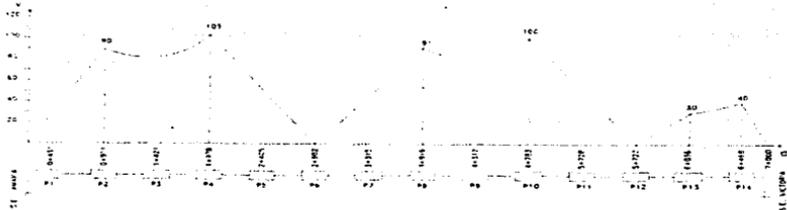


DIAGRAMA DE UN CABLE CON CROSS-BONDING Y CAJAS DE TIERRA

LA CURVA APROXIMADA DE LOS VOLTAJES INDUCIDOS ES COMO LO MUESTRA LA SIGUIENTE FIGURA



CURVAS DE LOS VOLTAJES INDUCIDOS

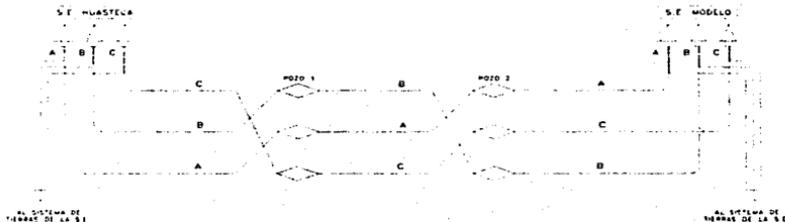


DIAGRAMA DE UN CABLE CON TRANSPOSICIONES Y POZOS DE EMPÁLME



CAJA DE CONEXIÓN A TIERRA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

GRADIENTE DE VOLTAJES INDUCIDOS EN LOS CABLES

CASO GENERAL PARA LA FORMACION DE UN CABLE (IEEE 575)

$$E_a = j\omega I_h (2 \cdot 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{2S_{ab}^2}{dS_{ac}} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{2S_{ac}}{d} \right) \right] V/M$$

$$E_b = j\omega I_h (2 \cdot 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{4S_{ab}S_{bc}}{d^2} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{S_{bc}}{S_{ab}} \right) \right] V/M$$

$$E_c = j\omega I_h (2 \cdot 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{2S_{bc}^2}{dS_{ac}} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{2S_{ac}}{d} \right) \right] V/M$$

Donde:

d = Diámetro geométrico de la cubierta

S_{ab} = Espaciamiento axial de fase a y b

S_{bc} = Espaciamiento axial de fase b y c

S_{ac} = Espaciamiento axial de fase a y c

GRADIENTE DE VOLTAJE INDUCIDO EN LA CUBIERTA DE LOS CABLES

FORMACION DEL CIRCUITO EN TREBOL

$$E_a = j\omega I_h (2 \cdot 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) V/M$$

$$E_b = j\omega I_h (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) V/M$$

$$E_c = j\omega I_h (2 \cdot 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) V/M$$

GRADIENTE DE VOLTAJE INDUCIDO EN LA CUBIERTA DE LOS CABLES
FORMACION HORIZONTAL DEL CIRCUITO

$$E_a = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} + j \frac{3}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right] V/M$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{2S}{d} V/M$$

$$E_c = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} - j \frac{3}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right] V/M$$

GRADIENTE DE VOLTAJE INDUCIDO EN LA CUBIERTA DEL CABLE
DOBLE CIRCUITO EN EL SISTEMA

$$I_a = -\frac{1}{2} + j \frac{3}{2} \quad \text{ASIGNADO PARA LOS CABLES 1 Y 4}$$

$$I_b = -1 + j0 \quad \text{ASIGNADO PARA LOS CABLES 2 Y 5}$$

$$I_c = -\frac{1}{2} - j \frac{3}{2} \quad \text{ASIGNADO PARA LOS CABLES 3 Y 6}$$

$$E_{aa'} = I_a \cdot jX_{aa'} + I_b \cdot jX_{ab'} + I_c \cdot jX_{ac'}$$

$$E_{bb'} = I_a \cdot jX_{ab'} + I_b \cdot jX_{bb'} + I_c \cdot jX_{bc'}$$

$$E_{cc'} = I_a \cdot jX_{ac'} + I_b \cdot jX_{bc'} + I_c \cdot jX_{cc'}$$

$$X_{aa'} = K \log_e \frac{1}{r_{am} \cdot S_{14}}$$

$$X_{ab'} = K \log_e \frac{1}{S_{12} \cdot S_{15}}$$

$$X_{ac'} = K \log_e \frac{1}{S_{13} \cdot S_{16}}$$

$$X_{ab} = K \log_e \frac{1}{r_{am} \cdot S_{25}}$$

$$X_{bc} = K \log_e \frac{1}{S_{23} \cdot S_{35}}$$

$$X_{ca} = K \log_e \frac{1}{r_{am} \cdot S_{2b}}$$

GRADIENTE DE VOLTAJE INDUCIDO EN LA CUBIERTA DEL CABLE
UNION EN UN SOLO PUNTO ENTRE FASES

$$E_a = j\omega I_{ab} (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{ab}}{d} V/M$$

$$E_b = j\omega I_{ab} (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{ab}}{d} V/M$$

$$E_c = j\omega I_{ab} (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{bc}}{S_{ac}} V/M$$

GRADIENTE DE VOLTAJE INDUCIDO EN CABLES CON CUBIERTA EN UN
PUNTO DE UNION, UNA FASE FUERA DE TIERRA A NEUTRO.

$$E_a = I_{ac} \left[R_g + j\omega (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{ac}^2}{dr_g} \right] V/M$$

$$E_b = I_{ac} \left[R_g + j\omega (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{S_{ac} S_{bc}}{r_g S_{ab}} \right] V/M$$

$$E_c = I_{ac} \left[R_g + j\omega (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \frac{S_{ac} S_{bc}}{r_g S_{ac}} \right] V/M$$

$$E_a = j\omega I_{aa} (2 \cdot 10^{-7}) \log_e \left[\left(\frac{S}{d} \right)^2 \frac{d}{r_g} \right] V/M$$

PARA EL CASO GENERAL

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a + K \\ I_b + K \\ I_c + K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} jX_{aa} + jX_{ab} + jX_{ac} \\ jX_{ba} + jX_{bb} + jX_{bc} \\ jX_{ca} + jX_{cb} + jX_{cc} \end{bmatrix}$$

$$I_a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$I_b = 1 + j0$$

$$I_c = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$K = 2\pi f \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot 1$$

$$X_{aa} = X_{bb} = X_{cc} = \ln \frac{1}{d/2}$$

$$X_{ab} = X_{ba} = \ln \frac{1}{S_{ab}}$$

$$X_{ac} = X_{ca} = \ln \frac{1}{S_{ac}}$$

$$X_{bc} = X_{cb} = \ln \frac{1}{S_{bc}}$$

$$E_a = K \left[\left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) j \ln \frac{1}{2} + (1 + j0) j \ln \frac{1}{S_{ab}} + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) j \ln \frac{1}{S_{ac}} \right]$$

$$E_a = jK \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 \cdot S_{ab}^2}{d \cdot S_{ac}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2 \cdot S_{ac}}{d} \right) \right) \right]$$

3.3 Problemas

CÁLCULOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CROSS-BONDING

En un sistema trifásico se tiene una carga de 1000 A. y una frecuencia de 60 Hz con una separación entre cables de 20' y un diámetro de la cubierta de 4", el conductor de tierra es de 240 mm², d= .780" y una longitud de la sección de 1000 ft (304.8m), la separación del conductor a tierra es de .7 s y la configuración del cables es en forma horizontal como lo muestra el dibujo siguiente:



SOLUCION:

$$E_a = j \cdot w \cdot I \cdot l \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \left[-\frac{1}{2} \ln \frac{S}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{4S}{d} \right]$$

$$E_a = j 2\pi f \cdot 1000A \cdot 304.8m \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \left[-\frac{1}{2} \ln \frac{20}{4} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 20}{4} \right]$$

$$E_a = -59.6 - j18.5 = 62.4 \angle 197^\circ V / 1000A / 1000FT$$

$$E_a = j \cdot w \cdot I \cdot l \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot S}{d} \right)$$

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACION

$$E_h = j \cdot K \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 20}{4}\right) = 0 + j52.9 = 52.9 \angle 90^\circ \text{V} / 1000\text{A} / 1000\text{FT}$$

$$E_c = j \cdot w \cdot l \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \left[-\frac{1}{2} \ln \frac{S}{d} - j \frac{3}{2} \cdot \ln \frac{4S}{d} \right]$$

$$E_c = j \cdot K \cdot \left[-\frac{1}{2} \ln \frac{20}{4} - j \frac{3}{2} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 20}{4} \right) \right]$$

$$E_c = 59.6 - j18.5 = 62.4 \angle 343^\circ \text{V} / 1000\text{A} / 1000\text{FT}$$

2.- FALLA DE FASE A TIERRA EN UN SOLO PUNTO

$$E_a = I_{W1} \cdot j \cdot w \cdot l \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot S_{21G}}{d \cdot R_{G1}}\right)$$

$$E_b = I_{W1} \cdot j \cdot w \cdot l \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{S_{1G} \cdot S_{2G}}{R_{G1} \cdot S_{12}}\right)$$

$$E_c = I_{W1} \cdot j \cdot w \cdot l \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{S_{1G} \cdot S_{3G}}{R_{G1} \cdot S_{13}}\right)$$

$$S_{W1} = .35 \cdot 50\% + 1.75 \cdot 50\% = S$$

$$S_{2G} = .75 \cdot 50\% + .75 \cdot 50\% = .75$$

$$S_{3G} = 1.75 \cdot 50\% + .35 \cdot 50\% = S$$

$$E_a = I_{W1} \cdot j \cdot K \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot S^2}{d \cdot R_{G1}}\right) \Rightarrow \left(\frac{2S^2}{d \cdot R_{G1}}\right)$$

$$E_b = I_{W1} \cdot j \cdot K \cdot \ln\left(\frac{S \cdot .75}{R_{G1} \cdot S}\right) \Rightarrow \left(\frac{.75}{R_{G1}}\right)$$

$$E_c = I_{10} \cdot j \cdot K \cdot \ln \left(\frac{S \cdot S}{R_G \cdot 2S} \right) = \left(\frac{S}{2 \cdot R_G} \right)$$

$$E_a = 1000A \cdot j2\pi f \cdot 304.8m \cdot 2 \times 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 20^2}{4 \cdot .334} \right)$$

$$E_a = 131 \angle 90^\circ V \quad E_b = 86 \angle 90^\circ V \quad E_c = 78 \angle 90^\circ V$$

X-BONDING DE UNA FASE A TRES FASES CON FALLA

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} KI_1 \\ KI_2 = 0 \\ KI_3 = -I \\ \downarrow = -I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \ln \frac{1}{d/2} + j \ln \frac{1}{S_{12}} + j \ln \frac{1}{S_{13}} \\ j \ln \frac{1}{S_{21}} + j \ln \frac{1}{d/2} + j \ln \frac{1}{S_{23}} \\ j \ln \frac{1}{S_{31}} + j \ln \frac{1}{S_{32}} + j \ln \frac{1}{d/2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \cdot K \\ -I \cdot K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \ln \frac{1}{d/2} + j \ln \frac{1}{S_{13}} \\ j \ln \frac{1}{S_{21}} + j \ln \frac{1}{S_{23}} \\ j \ln \frac{1}{S_{31}} + j \ln \frac{1}{d/2} \end{bmatrix}$$

$$E_1 = KIj \left[\ln \frac{1}{d/2} - \ln \frac{1}{S_{13}} \right] = KIj \ln \frac{S_{13}}{d/2}$$

$$E_2 = KIj \left[\ln \frac{1}{S_{21}} - \ln \frac{1}{S_{23}} \right] = KIj \ln \frac{S_{23}}{S_{21}}$$

$$E_3 = KIj \left[\ln \frac{1}{S_{31}} - \ln \frac{1}{d/2} \right] = KIj \ln \frac{d/2}{S_{31}}$$

$$E_{13} = E_1 - E_2 = K/l \left[\ln \frac{S_{13}}{d/2} - \ln \frac{d/2}{S_{31}} \right]$$

$$E_{13} = l j K \ln \left[\frac{S_{13} \cdot S_{31}}{(d/2) \cdot (d/2)} \right] \Rightarrow \ln \left(\frac{4S^2}{d^2/4} \right) \Rightarrow \ln \left(\frac{16S^2}{d^2} \right)$$

$$E_{13} = k \cdot l \cdot j \cdot \ln \left(\frac{16S^2}{d^2} \right)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{d/2} + \ln \frac{1}{S_{12}} + \ln \frac{1}{S_{13}} + \ln \frac{1}{S_{14}} + \ln \frac{1}{S_{15}} + \ln \frac{1}{S_{16}} \\ \ln \frac{1}{S_{21}} + \ln \frac{1}{d/2} + \ln \frac{1}{S_{23}} + \ln \frac{1}{S_{24}} + \ln \frac{1}{S_{25}} + \ln \frac{1}{S_{26}} \\ \ln \frac{1}{S_{31}} + \ln \frac{1}{S_{32}} + \ln \frac{1}{d/2} + \ln \frac{1}{S_{34}} + \ln \frac{1}{S_{35}} + \ln \frac{1}{S_{36}} \\ \ln \frac{1}{S_{41}} + \ln \frac{1}{S_{42}} + \ln \frac{1}{S_{43}} + \ln \frac{1}{d/2} + \ln \frac{1}{S_{45}} + \ln \frac{1}{S_{46}} \\ \ln \frac{1}{S_{51}} + \ln \frac{1}{S_{52}} + \ln \frac{1}{S_{53}} + \ln \frac{1}{S_{54}} + \ln \frac{1}{d/2} + \ln \frac{1}{S_{56}} \\ \ln \frac{1}{S_{61}} + \ln \frac{1}{S_{62}} + \ln \frac{1}{S_{63}} + \ln \frac{1}{S_{64}} + \ln \frac{1}{S_{65}} + \ln \frac{1}{d/2} \end{bmatrix}$$

$$I_1=1$$

$$I_2=I_3=0$$

$$I_4 = I_5 = I_6 = -1/3$$

$$E_1 = I \left[\ln \frac{1}{d/2} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{d/2} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{S} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{2S} \right]$$

$$E_1 = I \left[\frac{2}{3} \ln \left(\frac{2}{d} \right) - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{2S^2} \right]$$

$$E_s = I \left[\ln \frac{1}{2S} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{2S} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{S} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{d/2} \right]$$

$$E_s = I \left[-\frac{1}{3} \ln \frac{2}{d} + \frac{1}{3} \ln \frac{1}{S} + \frac{2}{3} \ln \frac{1}{2} \right]$$

$$E_1 - E_s = E_{1s} = j\omega I \cdot 2\pi \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{4S}{d} \right) \dots \dots \dots E_{12} = \ln \left(\frac{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot S}{d} \right)$$

3.- X-BONDED TRIFASICO CON FALLA DE CARGA(EN EX1 EXCEPTO CROSS-BONDING DE LA CUBIERTA).

E_a, E_b, E_c PARA EX1

$$E_{a0} = E_a - E_b = 93 \angle 230^\circ \dots V / 1000A / 1000FT$$

$$E_{ar} = E_a - E_c = 119 \angle 180^\circ \dots V / 1000A / 1000FT$$

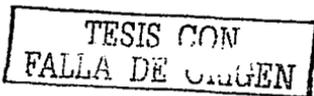
$$E_{bc} = E_b - E_c = 93 \angle 130^\circ \dots V / 1000A / 1000FT$$

4.- X-BONDED CON FALLA DE FASE A FASE

$$E_{ar} = j \cdot I \cdot W \cdot l \cdot 2\pi \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{15S^2}{d^2} \right)$$

$$E_{ar} = j \cdot 1000A \cdot 2\pi f \cdot 304.8 \ln \left(\frac{16 \cdot 20^2}{4^2} \right)$$

$$E_{ar} = 138 \angle 90^\circ \dots V / 1000A / 1000FT$$



CAPITULO 4

LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE PROYECTOS DE CABLES SUBTERRANEOS

4.1 Levantamiento topográfico, ruta para el derecho de vía y construcción de la obra Civil.

En el levantamiento topográfico se realiza la selección de la ruta adecuada para el cable en el mismo se determinan los obstáculos que se tienen en el trazo de la trayectoria. De acuerdo con lo indicado en las consideraciones básicas de selección para los cables subterráneos, las características de cada uno de éstos, los pozos de empalme, registro de tierras, estructuras para terminales en SF6 e intemperie, y las especificaciones del proyecto, el contratista debe de realizar todas las actividades indicadas en las especificaciones hasta completar el proyecto de los cables de potencia, tienen que incluirse las siguientes:

- Determinación de los parámetros a emplear en el proyecto
- Localización de la ruta general del cable de potencia, pozos de empalme, registro de tierras y estructuras para terminales.
- Someter la localización de pozos de empalme a un proceso de optimización.
- Elaboración de los planos de cruzamientos con vías de comunicación y / o de energía.
- Diseño de los sistemas de tierras, cuando se requieran
- Determinación de las cantidades y tipos de materiales de la instalación permanente para casos especiales de cables de potencia.
- Cálculo del sentido de jalado y tensiones para el tendido de los cables de potencia.
- Entrega de los planos finales del proyecto tal como fue construido, conteniendo las modificaciones que se tuvieron que realizar durante el proceso de construcción.
- Cualquier otra actividad necesaria para el correcto desarrollo del proyecto.

Antes de iniciar los trabajos de localización de la ruta del cable, el contratista o constructor debe de someter a la aceptación de LyFC los parámetros de diseño que propone emplear en los trabajos de localización de pozos de empalme, registro de tierras y terminales. En el levantamiento topográfico LyFC tiene que revisar y hacer las observaciones pertinentes en un periodo de tiempo no mayor a 20 días.

LyFC debe revisar todas las actividades mencionadas en este inciso así como todas las adicionales que requieran para lograr el diseño funcional y eficiente de los cables de potencia.

El material empleado para el sistema de tierras estará de acuerdo a las mediciones de campo, respecto a los conectores tienen que ser del tipo compresión o mecánica y deberán garantizar una conexión firme tanto mecánica como eléctrica.

En el caso de que la longitud calculada del cable de cobre desnudo sea demasiado grande en su instalación debido al tipo de terreno, se pueden utilizar varillas para tierra copperweld de la longitud adecuada para obtener el valor de resistencia a tierra requerido.

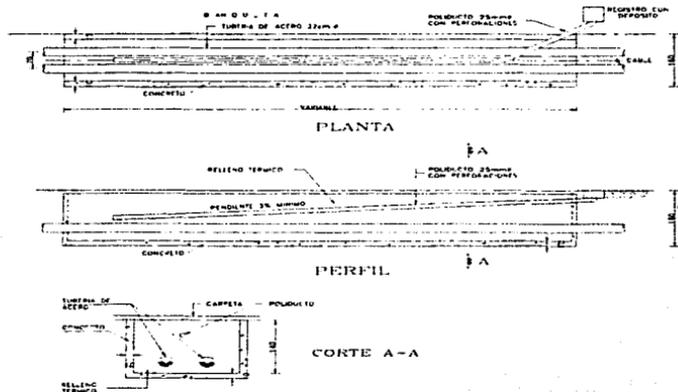
No se puede utilizar ningún material diferente al especificado, cualquier propuesta diferente debe ser presentada a LyFC para su aceptación. No se permite el uso de recubrimientos y rellenos de cualquier tipo sin previa autorización de LyFC.

En el diseño de los sistemas de tierras el contratista debe tomar en cuenta que la profundidad mínima de instalación del alambre de tierra (contra antena) es la siguiente:
 0.80 m en terrenos urbanos.
 1.50 en terrenos de cultivo.

El contratista tiene que proporcionar una copia del estudio del sistema de tierras a LyFC.

4.2 Diseño de trincheras para cables y sistemas de tierra

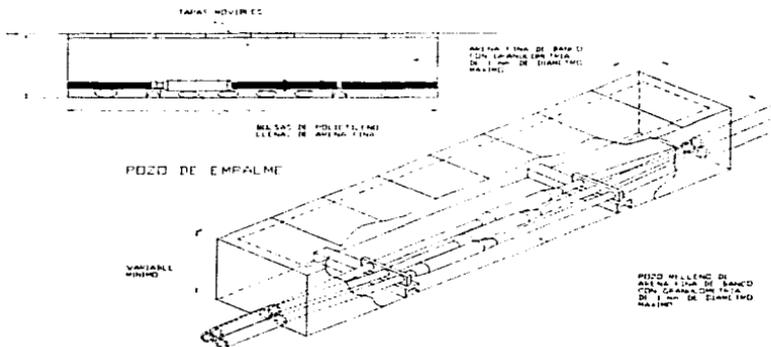
Las características y dimensiones de las trincheras de uno o dos circuitos trifásicos, donde se colocarán los tubos de PVC en el arreglo que se determine según el análisis, se construirán de acuerdo a las consideraciones básicas de diseño para cables subterráneos, acto seguido se analizará la ruta general de las canalizaciones del cable optimizando su ubicación.



DIBUJO DE TRINCHERAS PARA CABLES SUBTERRÁNEOS

4.3 Diseño de pozos de empalme y registro de tierras.

Una vez localizada la ruta general para las canalizaciones del cable de potencia, el proyectista debe optimizar la ubicación de los pozos de empalme previo análisis de longitudes entre los mismos, los pozos de empalme para uno o dos circuitos se tienen que construir de acuerdo con las consideraciones básicas de diseño para cables subterráneos, previo al análisis de tensiones inducidas se ubicarán los registros de sistemas de tierras cuando así lo requiere el estudio, estos registros se construirán con las consideraciones básicas de diseño.



Diseño del sistema de tierras.

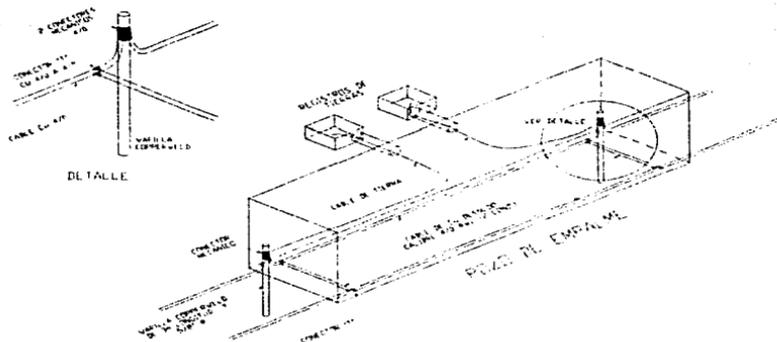
De acuerdo con las características de cada uno de los cables de potencia, se diseña el sistema de tierras para los diferentes arreglos de los mismos, esto se puede hacer con la ayuda de algún programa de cómputo.

Debe considerarse lo siguiente:

- La resistencia máxima en el sistema de tierras de un pozo de empalme con registro de tierras debe ser de dos ohms medidos durante la temporada de secas.
- El material es cable de cobre desnudo no menor al calibre 4/0 AWG y los conectores deben ser tipo compresión o mecánicos y tendrán que garantizar una conexión firme tanto mecánica como eléctrica.
- En el caso de que la longitud calculada del cable de cobre desnudo sea demasiado grande en su instalación debido al tipo de terreno, se pueden utilizar varillas para tierra copperweld de la longitud adecuada para obtener el valor de resistencia a tierra requerido.

- No se puede utilizar ningún material diferente al especificado, cualquier propuesta diferente debe ser presentada a LyFC para su aceptación. No se permite el uso de recubrimientos y rellenos de cualquier tipo sin previa autorización de LyFC.
- En el diseño de los sistemas de tierras, el contratista debe tomar en cuenta que la profundidad mínima de instalación del alambre de tierra (contra antena) es de 50 cm en promedio.

(SISTEMA DE TIERRAS EN POZOS DE EMPALME REQUERIDOS)



4.4 Lineamientos generales para proyectos de cables de potencia, alcance del proyecto y descripción de los cables

Alcance del proyecto

LyFC requiere la ejecución del proyecto completo de los cables de potencia, cuyas características generales se indican en las consideraciones básicas de diseño para cables subterráneos de transmisión.

El licitante debe considerar en su oferta la entrega de los planos definitivos del proyecto final completo, incluyendo planos de perfil, planta de la ruta de canalizaciones del cable, localización de pozos de empalmes y registro de tierra, análisis, diseño e ingeniería de los

pozos de empalme, registro de tierra, soporte de terminales, lista general de materiales y accesorios para fijación del cable y terminales, planos de dispositivos de herrajes y sistemas de tierras.

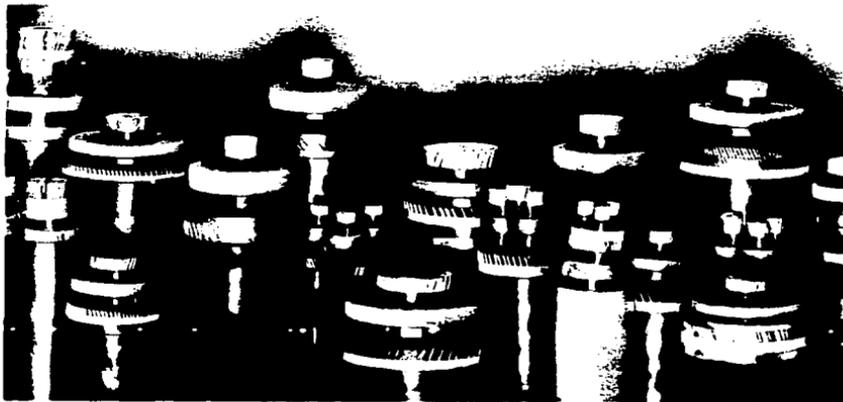
Además tiene que entregar una video grabación en formato VHS con una duración mínima de 2 horas, que contengan los aspectos más relevantes de construcción del cable de potencia.

Descripción de los cables

El diseño y selección del cable de potencia se realiza con el apoyo de programas de cómputo especializados en este tipo de trabajos.

Como parte del diseño del cable de potencia, el contratista le tiene que entregar a LyFC los programas de cómputo empleados con los permisos de uso correspondientes a favor de LyFC, así como el licitado sobre su manejo.

El licitante puede considerar al elaborar la oferta todos los factores que intervienen en la elaboración del diseño, necesidades de materiales y equipo, así como recursos humanos y los programas de cómputo incluyendo los cursos de capacitación



VARIEDAD DE CABLES DE POTENCIA

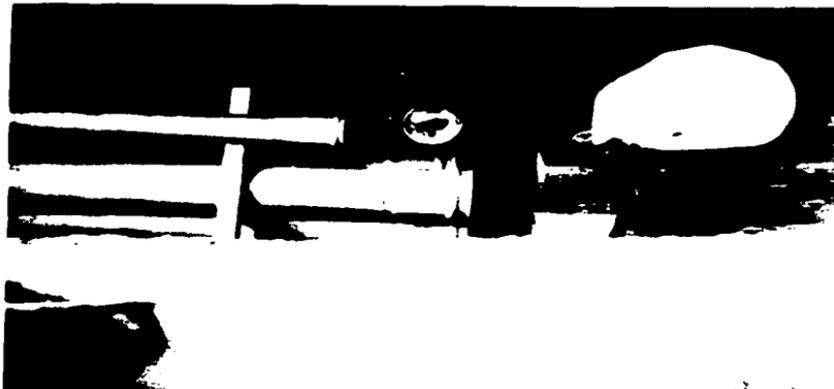
4.5 Construcción obra electromecánica, instalación de cables y empalmes.

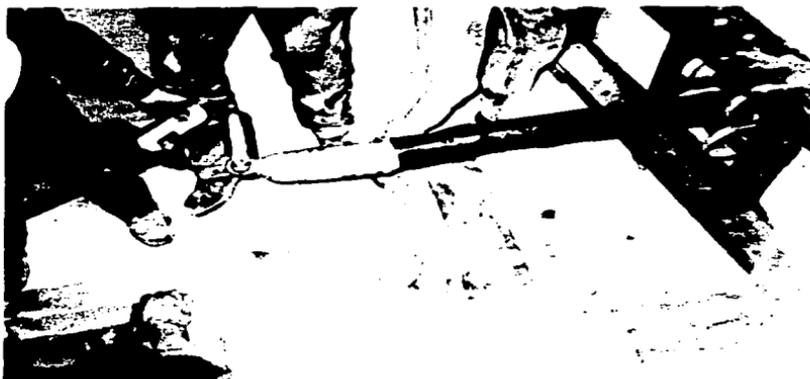
La instalación de los cables debe efectuarse de acuerdo con lo indicado en las especificaciones de instalaciones y montaje de los cable de potencia. Tiene que respetarse siempre lo indicado a continuación.

- Deben limpiarse los ductos de PVC previo a la introducción del cable de potencia.
- El tendido de los cables se efectúa bajo tensión mecánica previamente calculada, utilizando el equipo adecuado de jalado y respetando el sentido que resultó del análisis.
- Los cables no deben permanecer con las puntas descubiertas, estas puntas se protegen con capuchones especiales a prueba de humedad
- En ningún caso se tiene que permitir que los cables en su instalación se rasguen con filos o puntas y se dañe en su cubierta protectora.

Empalmes:

Una vez tendidos los cables de potencia, éstos se corta a la medida requerida para los empalmes dentro del pozo, posteriormente se preparan las puntas de los mismos y se procede a realizar el empalme, ya sea normal, con conexión a tierra o con cross bonding, todo lo anterior siguiendo las instrucciones de montaje y supervisión del proveedor.





EXTREMO DEL CABLE CON GANCHO PARA EL JALADO

4.6 Instalación de terminales e instalación de sistemas de tierras

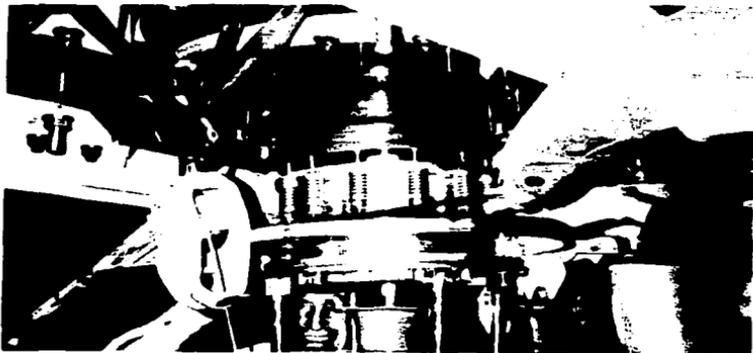
Una vez ya tendido el cable de potencia hasta el lugar de las terminales, se mide el cable hasta la longitud requerida, para un perfecto acoplamiento con el equipo de la Subestación Eléctrica (S.E.) SF6 o tipo convencional, acto seguido se prepara el cable para instalarle la terminal ya sea en SF6 o tipo intemperie, todo esto de acuerdo con las instrucciones de montaje del proveedor.

Después del análisis del sistema de tierras se determina que pozo de empalme va a llevar registro de tierras, la longitud de las contra antenas se instalarán aproximadamente a 50 cm debajo de la base perimetral del pozo de empalme y a lo largo de las canalizaciones del cable de potencia, dejando puntas en la base del pozo para la conexión al registro de tierras, esto debe realizarse de acuerdo con los croquis que están en las consideraciones básicas de diseño para cables subterráneos.

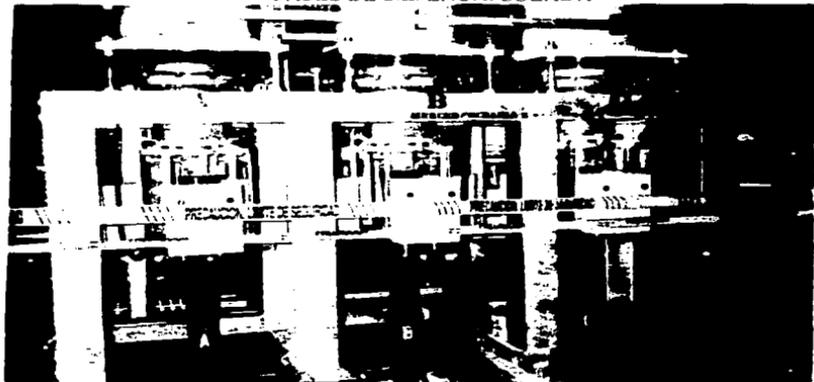


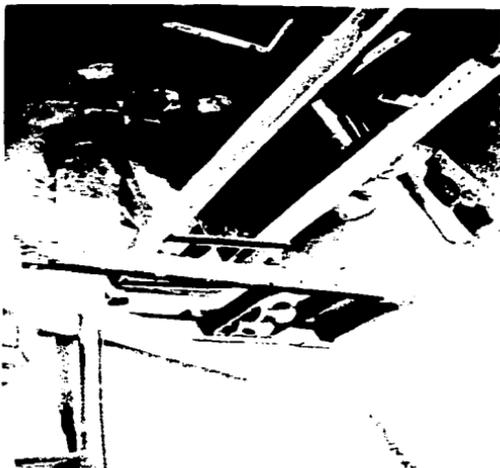
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

COLOCACIÓN DE TERMINALES INTEMPERIE Y CABLE DE POTENCIA



INSTALACIÓN DE TERMINALES EN LA S.E. ENCAPSULADA
FASES DE S.E. ENCAPSULADA





POZO DE EMPALME (SUPERIOR) Y CAJA DE TIERRAS (INFERIOR)



4.7 Diseño y montaje de estructuras para terminales del cable de potencia, suministro, pruebas y puesta en servicio.

El contratista debe efectuar el montaje de las estructuras para las terminales del cable de potencia en los sitios determinados en el proyecto, las actividades a realizar:

- Montaje de la estructura completa de acuerdo a los planos de construcción aceptados por LyFC.
- Instalación de herrajes y accesorios para la fijación del cable de potencia.
- Previo a todo esto se realiza la cimentación para dicha estructura, aceptada por LyFC.

Suministro

Los licitantes deben considerar en su oferta que el suministro de los materiales de instalación permanente cubra las siguientes etapas:

- a) Fabricación en serie, pruebas de calidad, empaque, embarque, transportación y almacenamiento del cable de potencia, empalmes, ductos de PVC, estructuras de terminales, material de obra civil, accesorios, etc.
- b) Pruebas de rutina y de aceptación en el cable, empalme, terminales y accesorios
- c) El licitante debe considerar que luz y fuerza del centro puede supervisar el proceso de fabricación y aseguramiento de calidad de todos los materiales y equipos que forman parte de los cables de potencia.
- d) El contratista debe otorgar en todos los casos las facilidades necesarias a LyFC para que realice los trabajos y aseguramientos de la calidad del producto, cuando así le sea solicitado.
- e) El contratista tiene que avisar a LyFC cuando menos con diez días hábiles de anticipación la fecha de realización de las pruebas de aceptación de los suministros.
- f) El costo de las pruebas de calidad debe ser considerado por los licitantes al elaborar la oferta, como parte del alcance del suministro y no efectuara ningún cargo especial a LyFC por este concepto.

g) Al concluirse las pruebas de rutina y de aceptación de cada lote de suministro, el contratista debe entregar a LyFC el reporte de las pruebas efectuadas, el resultado de las mismas y comentarios relevantes.

h) En todos los casos el contratista tiene que empacar los lotes de suministros de tal manera que resistan el manejo rudo sin causar daños a los equipos.

i) LyFC no acepta el suministro de materiales y equipos que no hayan sido instalados en otros cables de transmisión de características similares con resultados satisfactorios en los últimos 10 años de operación.

Cualquier producto ofertado debe cumplir con las siguientes condiciones:

a) Incluir los cuestionarios para la evaluación técnica debidamente llenados, la falta de estos es motivo de descalificación.

b) Tener prototipos probados y aceptados por el laboratorio de pruebas de CFE (LAPEM) u otro laboratorio acreditado internacionalmente y presentar lista de usuarios de los productos ofertados con referencias mínimas de 10 años.

c) Proveedores calificados y aceptados por parte del laboratorio de pruebas de CFE (LAPEM) u otro organismo certificador, acreditados internacionalmente.

Cuando se presentan alternativas de suministro, luz y fuerza solicita que el cable, empalme, terminales y accesorios sean de un solo proveedor por compatibilidad de materiales y garantía de los mismos, esta oferta debe estar claramente indicada.

El suministro de todos los materiales necesarios para la construcción y montaje electromecánico de los cables de potencia, incluidos en estas licitaciones debe efectuarse apeguándose estrictamente a las especificaciones de LyFC correspondientes.

En la elaboración de la oferta, el licitante debe considerar todos los aspectos que intervienen en el costo de los materiales tales como: Diseño, insumos, fabricación, transporte, impuestos, almacenaje y manejo, capacitación y supervisión, etc., LyFC no reconoce ningún costo adicional al precio indicado en la oferta

Las pruebas y puesta en servicio del sistema completo (cable, empalmes y terminales), se llevaran a cabo tomando en cuenta lo indicado en las normas o especificaciones para cables de potencia con aislamiento sintético extruido, terminales en SF6 e intemperie.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



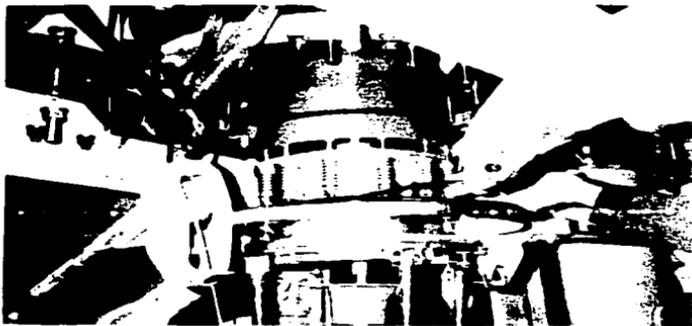
TERMINALES INTEMPERIE Y S.E. ENCAPSULADA



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TERMINALES INTEMPERIE



COLOCACIÓN DE LA ENVOLVENTE DENTRO DE LA S E ENCAPSULADA

ESPESORES DE AISLAMIENTO PARA CABLES MONOFASICOS

KV ENTRE FASES		Calibre del conductor AWG o MCM	Espesor de Aislamiento Mils De Plg
Con neutro a tierra	Sin neutro a tierra		
60	45	3/0 a 2000	255
65	49	3/0 a 2000	270
70	-	3/0 a 2000	290
75	56	3/0 a 2000	305
80	60	3/0 a 2000	320
85	64	3/0 a 2000	335
90	68	3/0 a 2000	355
95	71	3/0 a 2000	370
100	75	3/0 a 2000	385
105	79	3/0 a 2000	400
110	83	3/0 a 2000	420
115	86	3/0 a 2000	435
130	98	3/0 a 2000	480
145	109	4/0 a 2000	530
161	-	4/0 a 2000	590
230	-	500 a 2000	760
345	-	1000 a 2500	1035

PROPIEDADES TERMICAS DE MATERIALES DIVERSOS

Material	Resistividad térmica °C - cm / watt	Difusividad cm ² / horas
Aluminio	0.49	
Bronce amarillo	1.17	
Constantan	4.4	
Cobre	0.26	
Plata	0.24	
Acero	2.23	
Acero inoxidable	3.86	
Hierro (fundición)	2.13	
Aire	4000	
Neopreno	600	
Aceite	610	
Papel impregnado	550	
Poliétileno	320	
Suelo seco medio	130	19.2
Suelo húmedo medio	130	19.3
Suelo arena seca	120	25.8
Suelo arena húmeda	50	32.2
Concreto	70-110	22.6
Somas tic	210-170	

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

PROPIEDADES ELECTRICAS DE MATERIALES CONDUCTORES

Material	Resistividad Ohm-mm ² / Km	Coficiente térmico De resistividad a 20 °C	% de Conductividad IACS
Aluminio	28.28	0.00403	61.0
Bronce amarillo	66.2	0.002	26.0
Constantan	500	0.00001	3.45
Cobre	17.241	0.00393	100
Hierro	100	0.005	17.2
Plomo	22.3	0.00387	7.73
Plata	16.41	0.0038	105.1
Acero	140	0.004	12.3
Acero inoxidable	730	0.00094	2.4

VALORES DE LOS COEFICIENTES ks Y kp

Tipo de conductor	ks	kp
Cable redondo normal	1.0	0.8
Cable redondo compacto	1.0	0.6
Cable redondo segmental	0.44	0.4
Cable sectorial compacto	1.0	Ver Nota

Nota: Considerar un efecto de proximidad igual a la mitad de la que resulte para un conductor redondo compacto de la misma sección.

CONSTANTES DIELECTRICAS

Material	E
Poliétileno	2.3
Aislamiento de papel (tipo sólido)	3.7
Aislamiento de papel (otros tipos)	3.3 a 4.2
Hule y compuestos de hule	5
Cinta de Cambray Barnizada	5

CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DE Rpt

Condiciones de instalación	A	B
En ducto metálico	3.2	0.19
En ducto de fibra a la intemperie	5.6	0.33
En ducto de fibra recubierto con concreto	4.6	0.27
Cable en tubo lleno de gas	2.1	0.68
Cable en tubo lleno de aceite	2.1	2.45

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CONCLUSIONES

Las conclusiones que se tienen al término de éste trabajo son las siguientes.

El tipo de cable mas adecuado para la ciudad de México dependerá de las características propias del suelo y de los posibles daños que pudieran causar las obras de otras dependencias gubernamentales al efectuar excavaciones cerca de nuestras instalaciones subterráneas.

En el caso del tipo tubo de alta presión de aceite, la tubería le proporciona a los cables una adecuada protección mecánica. Para los cables tipo seco el arreglo del encofrado dentro de los ductos los protegen de daños. Esto se ha demostrado a través de los años que tienen en servicio los cables tipo tubo instalados por LyFC los cuales se encuentran operando satisfactoriamente. Los tipo seco ya con un mayor número de instalaciones han demostrado también su operación satisfactoria sin los inconvenientes de los del tipo tubo.

Al efectuar el cálculo de los cables se vio que teniendo baja resistividad térmica en el terreno, se incrementa la capacidad de conducción de los cables.

Otros factores importantes para la seguridad de la instalación subterránea, es que durante la instalación de ésta no quede con muchas fallas. En el cable tipo tubo, el aislamiento de la cubierta debe de quedar protegido ya que con el tiempo las fallas que pudiera sufrir se harían más grandes trayendo como consecuencia que el voltaje aplicado a las tuberías no fuera suficiente para proteger a los tubos y por consecuencia la contaminación de los mismos.

En el caso de los cables tipo seco se debe cuidar que al realizar el tendido de los cables no sea tan grande el jalado del indicado por el fabricante ya que esto ocasionaría daños a las cubiertas y a las pantallas semiconductoras teniendo fallas en las pruebas y en la puesta en servicio.

Aunque económicamente la instalación subterránea resulta ser más costosa que la aérea, la primera ofrece mayor confiabilidad de servicio y da mejor apariencia a la ciudad.

Sería conveniente realizar un estudio económico para hacer la comparación del costo inicial de los trabajos con el tiempo de recuperación del capital invertido a largo plazo, esto para las instalaciones subterráneas.

Debido al crecimiento de la ciudad de México, es necesario recurrir más frecuentemente a las instalaciones subterráneas.

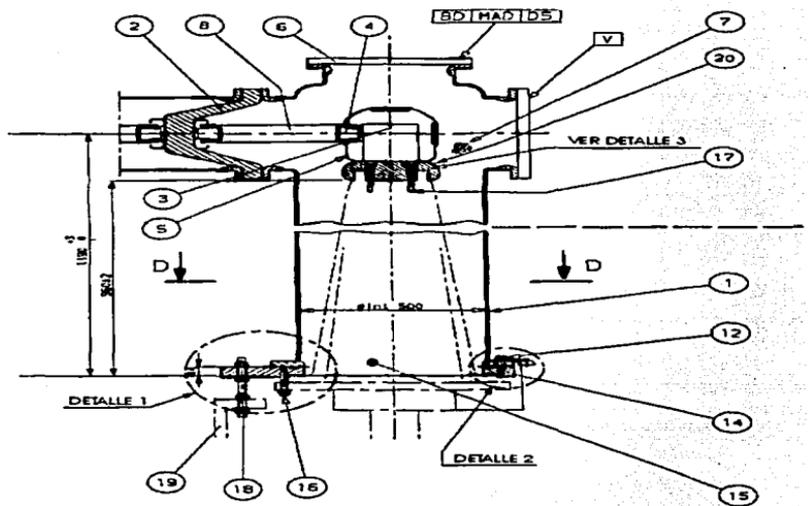
También se espera que éste trabajo cumpla con la función de dar un soporte a los estudios y uso de los cables subterráneos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A N E X O S

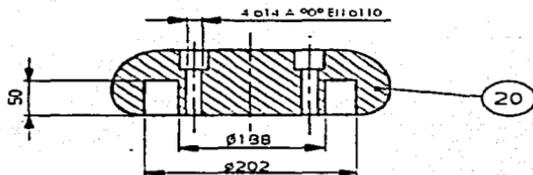
**PLANOS, DIBUJOS DE EQUIPO, ACCESORIOS PARA LOS CABLES
SUBTERRANEOS DE TRANSMISIÓN Y PLANOS DE CABLES.**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

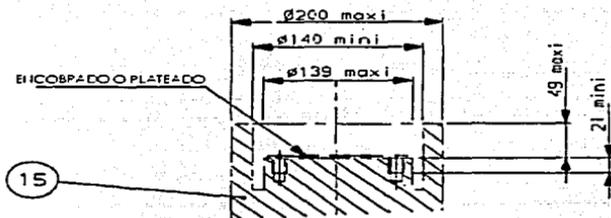


DETALLE DE LA ENVOLVENTE QUE VA HACIA EL BANCO

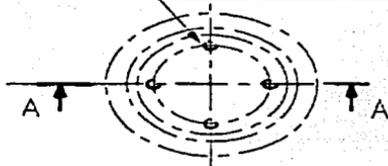
DETALLE 3



DETALLE AA



4 GUJEROS 1/12 A 90° E11 G110±0.3

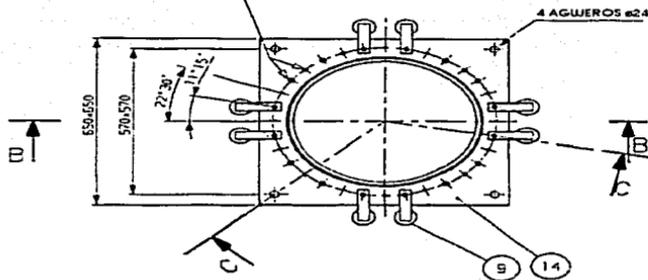


DETALLE DE SUJECIONES DE ENVOLVENTE

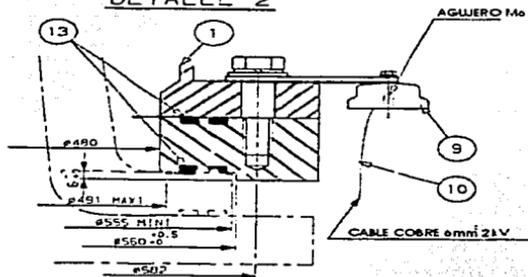
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2x1e AGUEROS M10 E11 e562 ±0.5

CORTE DD

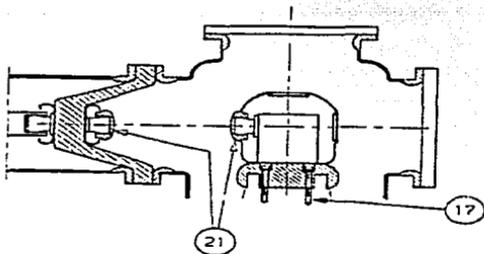
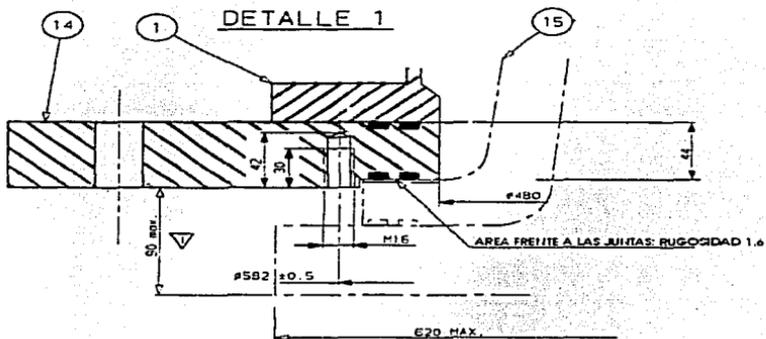


DETALLE 2

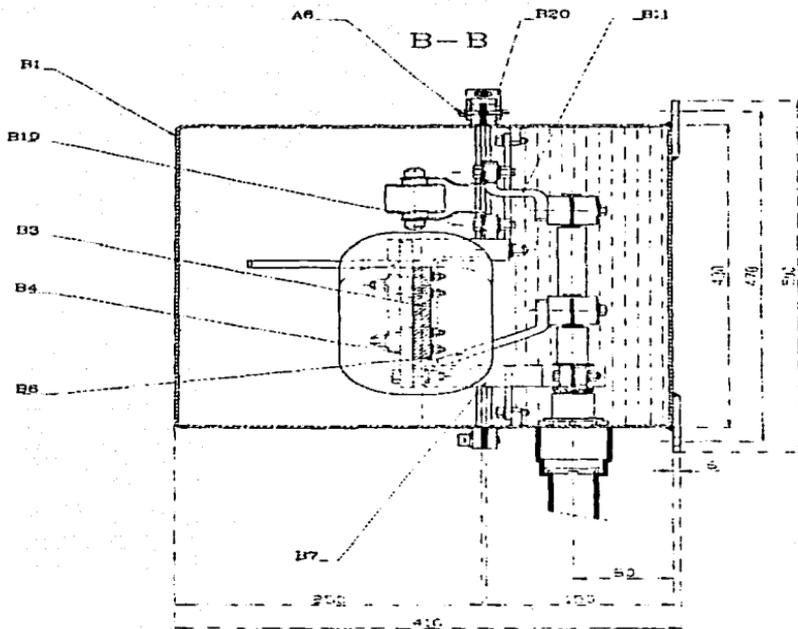


DETALLE DE SUJECIÓN PARA LA ENVOLVENTE

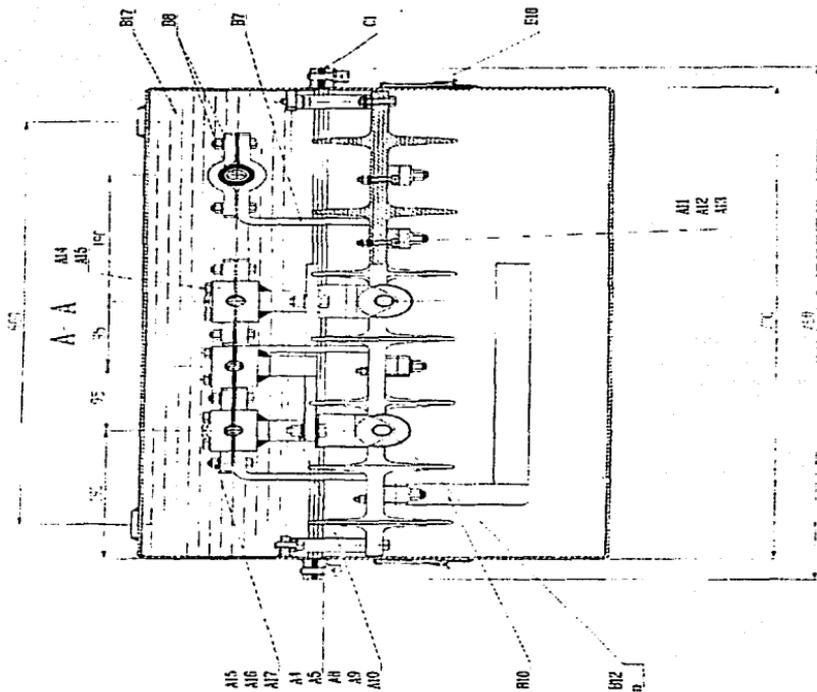
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



MONTAJE PARA PRUEBA DEL CABLE

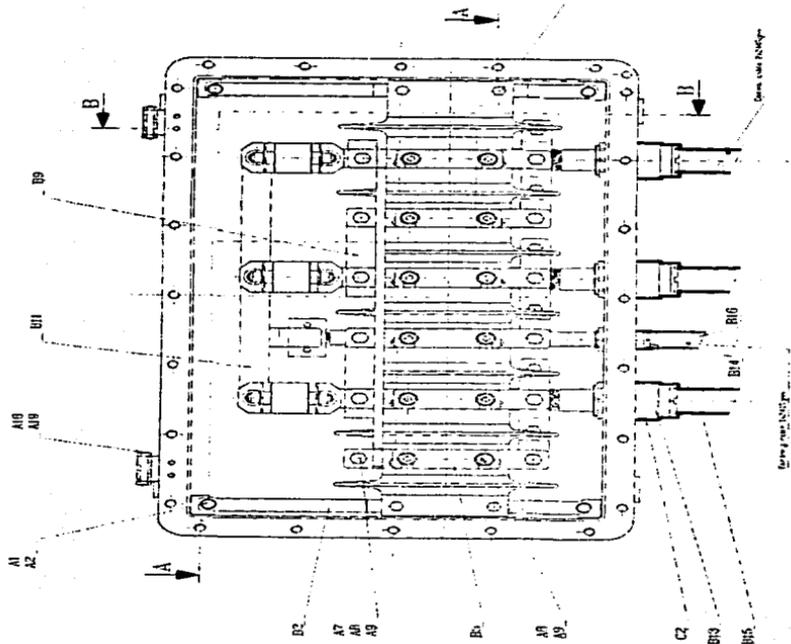


DETALLE LATERAL DE UNA CAJA DE TIERRAS NORMAL



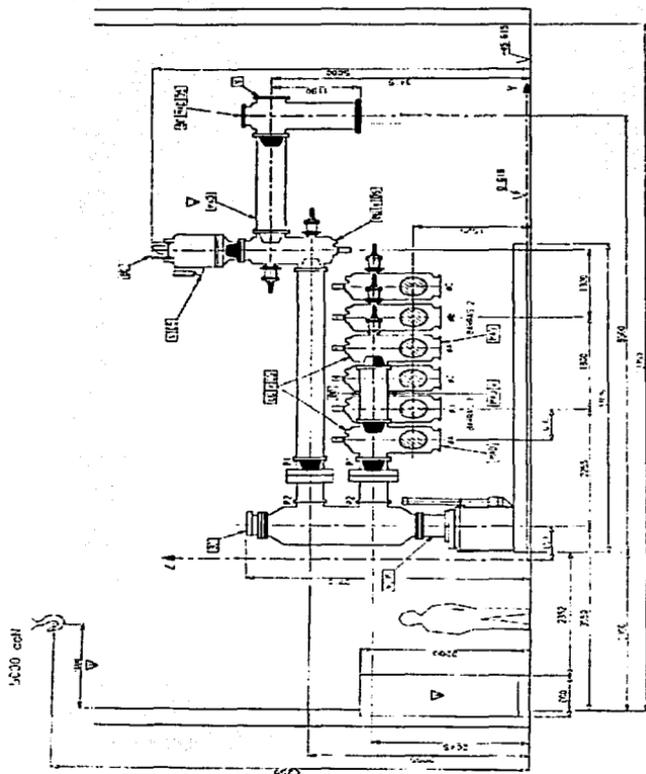
VISTA SUPERIOR DE LA CAJA DE TIERRAS NORMAL

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



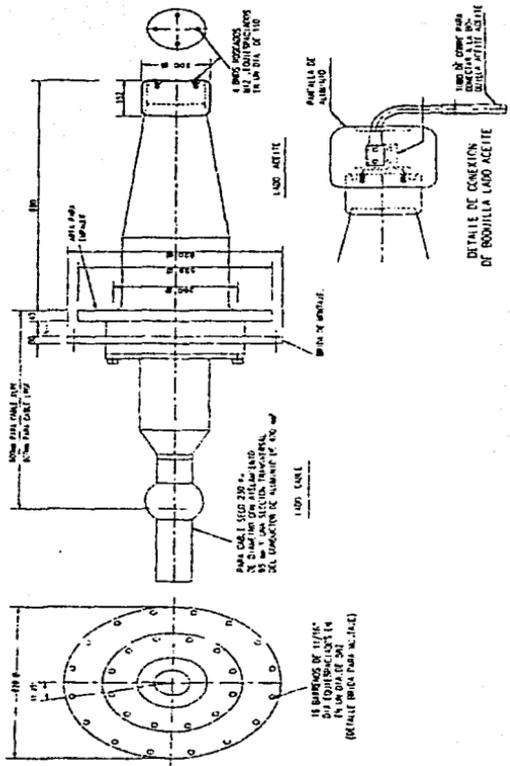
VISTA FRONTAL DE LA CAJA DE TIERRAS Y LAS CONEXIONES

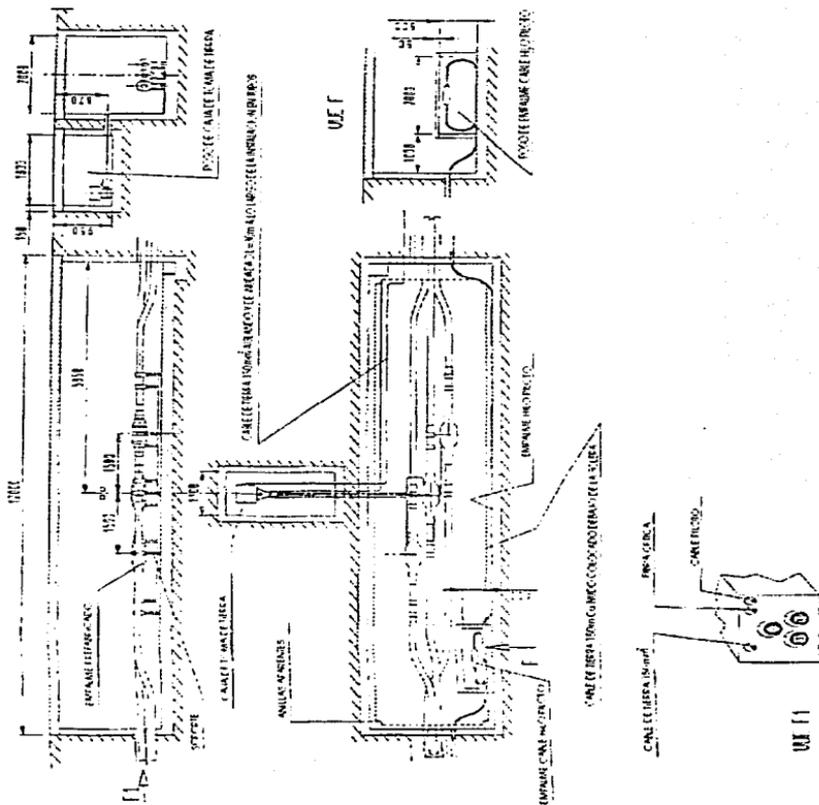
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



VISTA DEL EQUIPO ENCAPSULADO Y COMPARACIÓN DE ALTURA

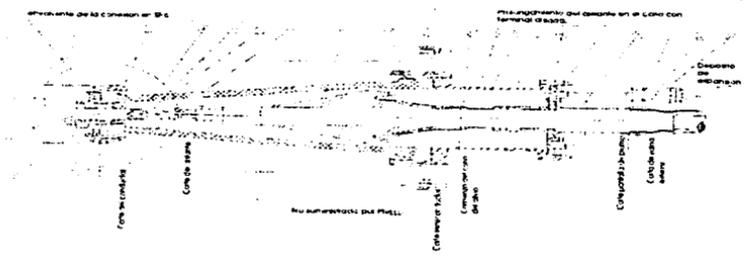
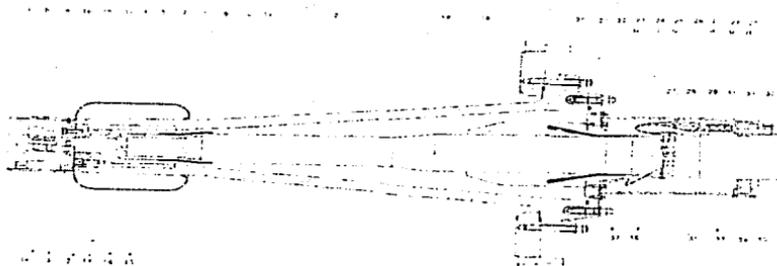
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN





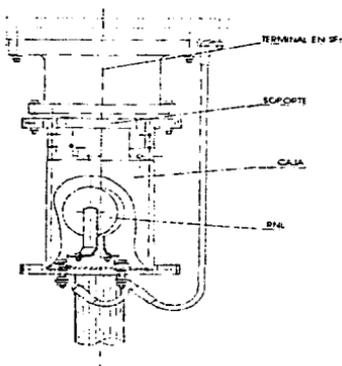
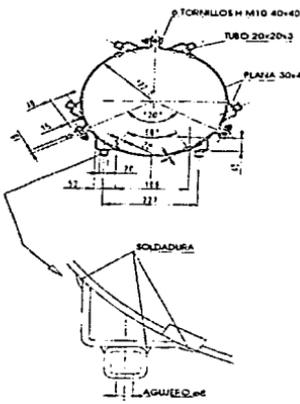
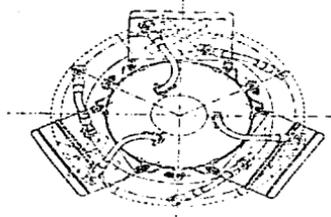
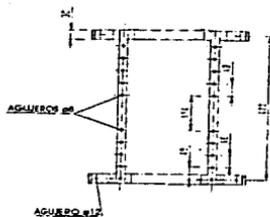
CORTES CON CONEXIÓN DE LAS CAJAS DE TIERRA Y EL CABLE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



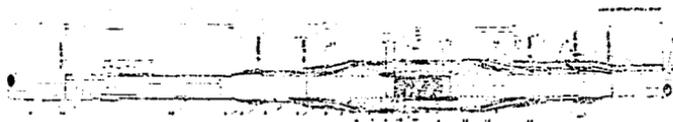
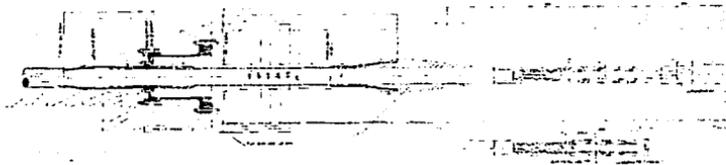
**DETALLE INTERNO DE LAS TERMINALES DEL LADO DEL BANCO
 COMO DEL LADO DEL BANCO**

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**



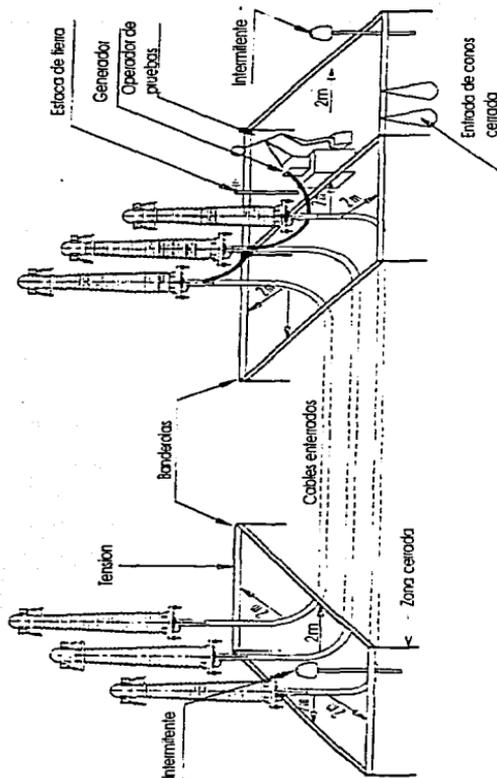
DETALLE DE UBICACIÓN DE LAS RNL EN LA ENVOLVENTE

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



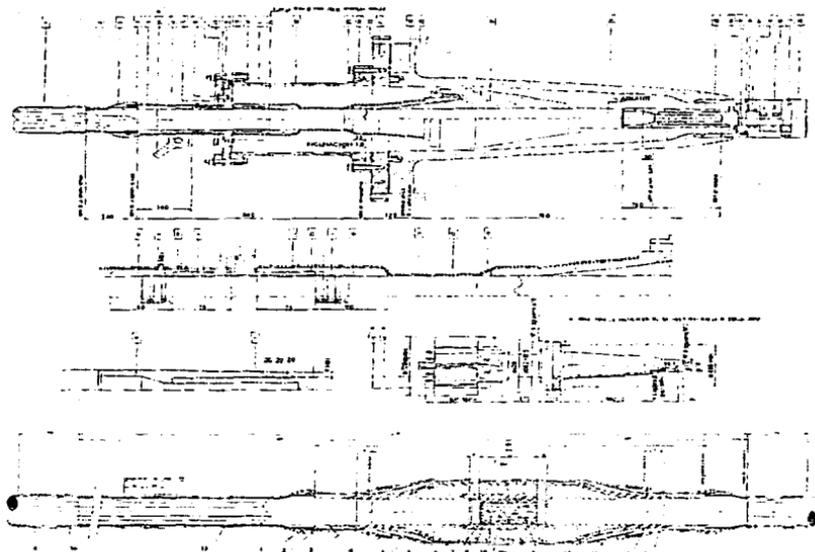
DETALLE DE UN EMPALME (INFERIOR) Y ENVOLVENTE(SUPERIOR)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

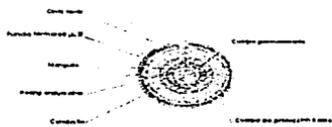


DETALLE DE LA FORMA DE PRUEBAS DEL EQUIPO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

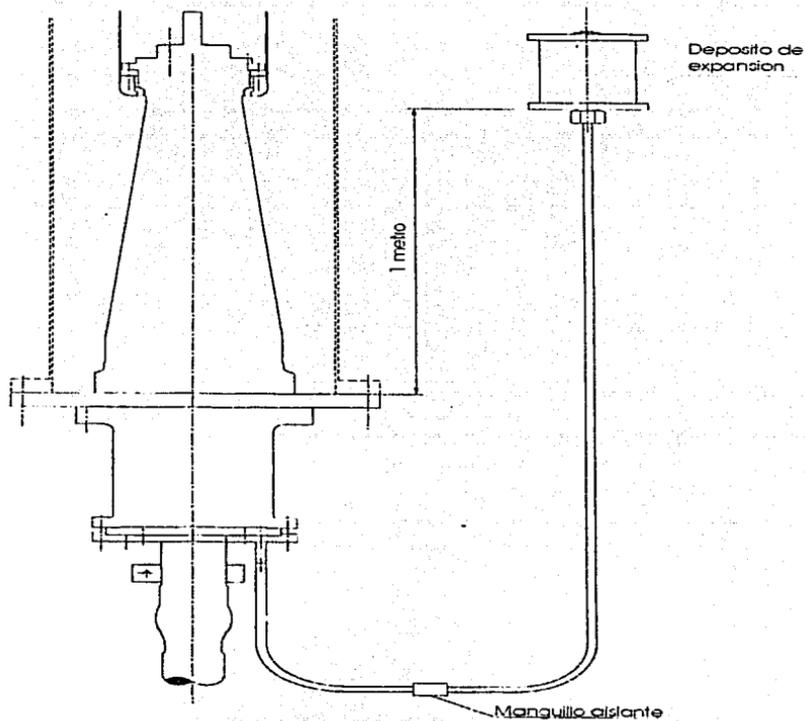


Sección A-A

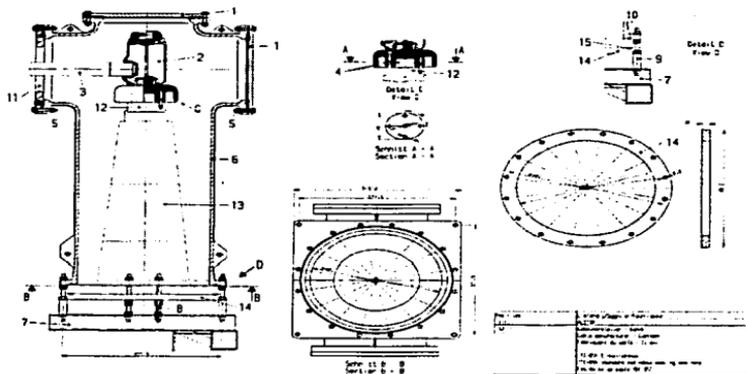


DETALLES INTERNOS DE LA ENVOLVENTE Y DETALLES DE UN EMPALME PREMOLEADO PARA CABLE

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

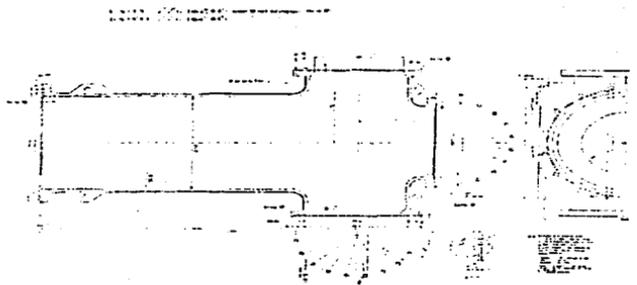
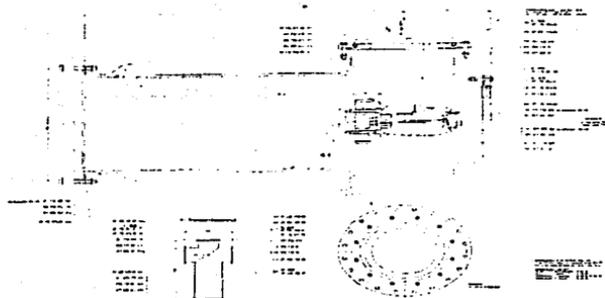


FORMA DE INSTALAR EL DEPOSITO DE VACIO EN LA ENVOLVENTE

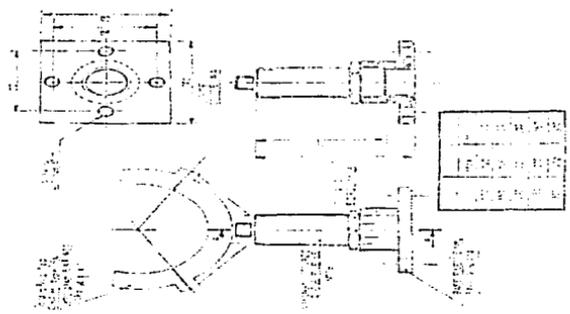
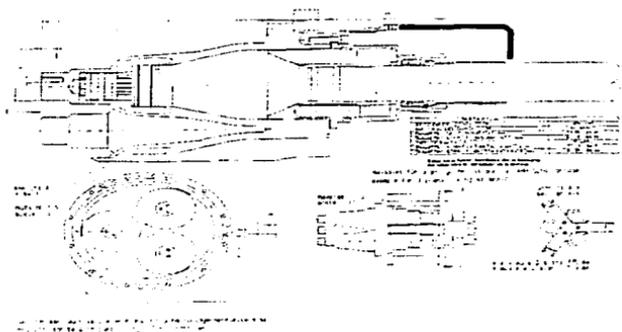


DETALLES DE ENVOLVENTES DEL LADO DEL BANCO COMO DEL LADO DEL CABLE

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

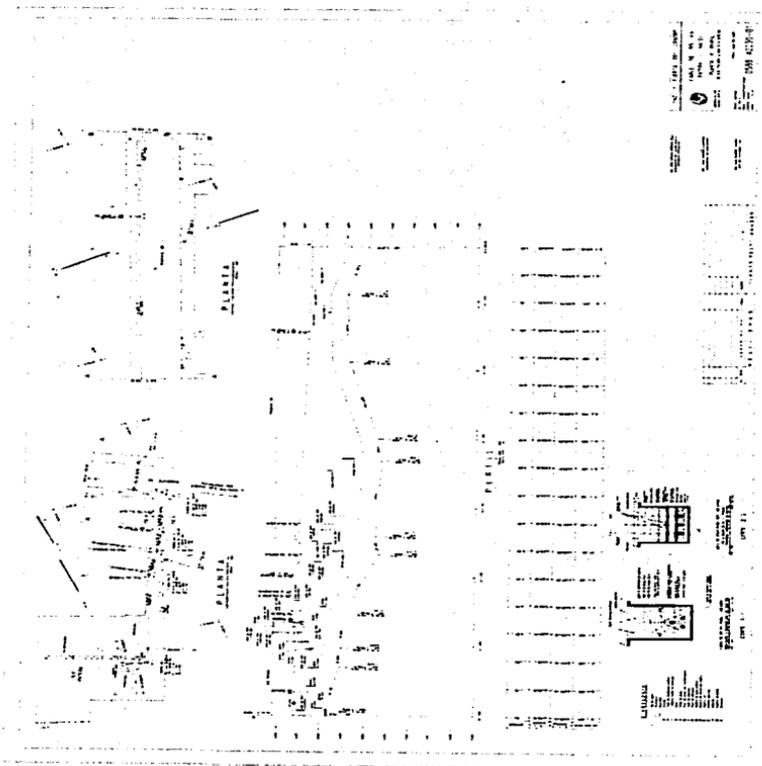


DETALLES DE LAS BRIDAS DE LA TERMINAL



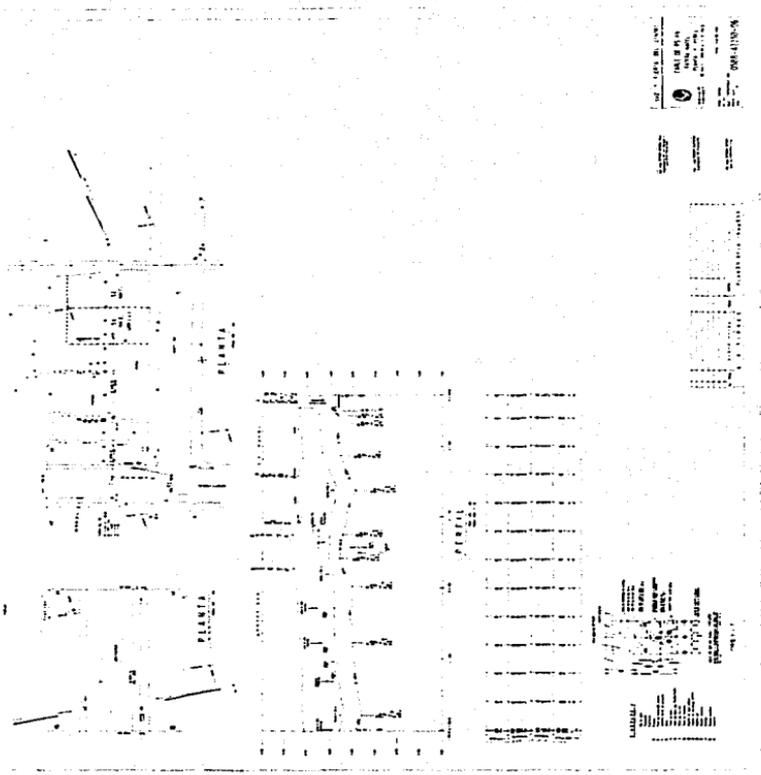
DETALLE DE TERMINAL TRIFÁSICA Y DE LA SUJECIÓN DE LOS CABLES

TESIS CON
FALLA DE CARGEN



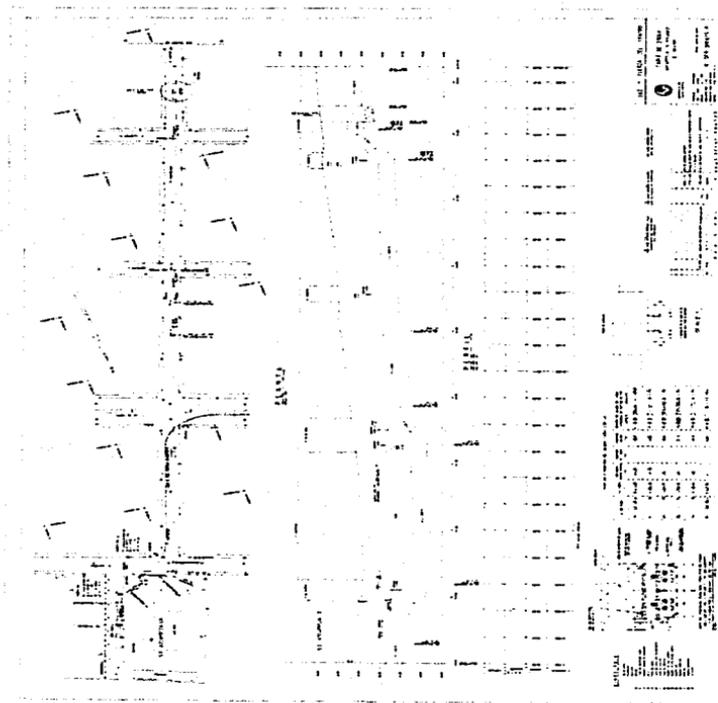
PLANO DE PROYECTO DE UN CABLE DE POTENCIA

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



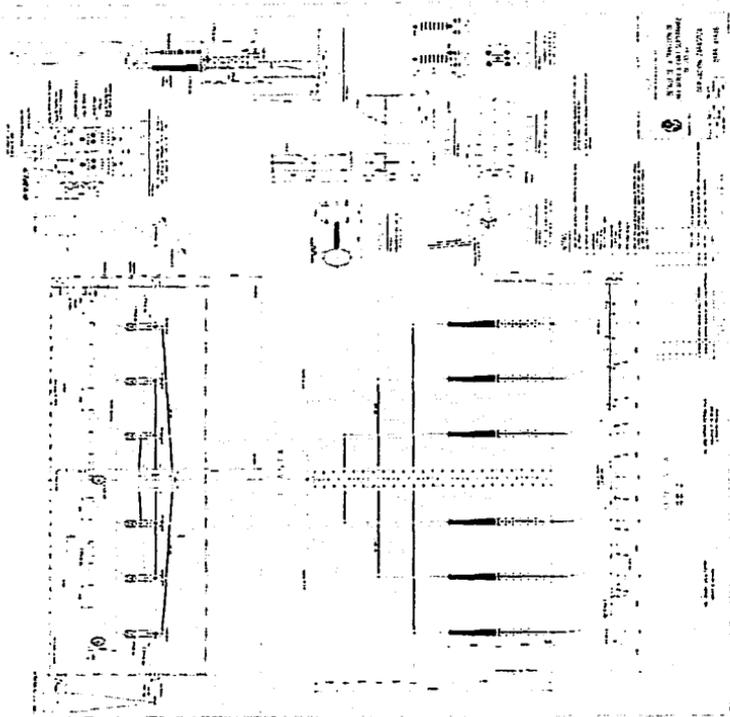
OTRO EXTREMO DE UN PROYECTO DE UN CABLE DE POTENCIA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



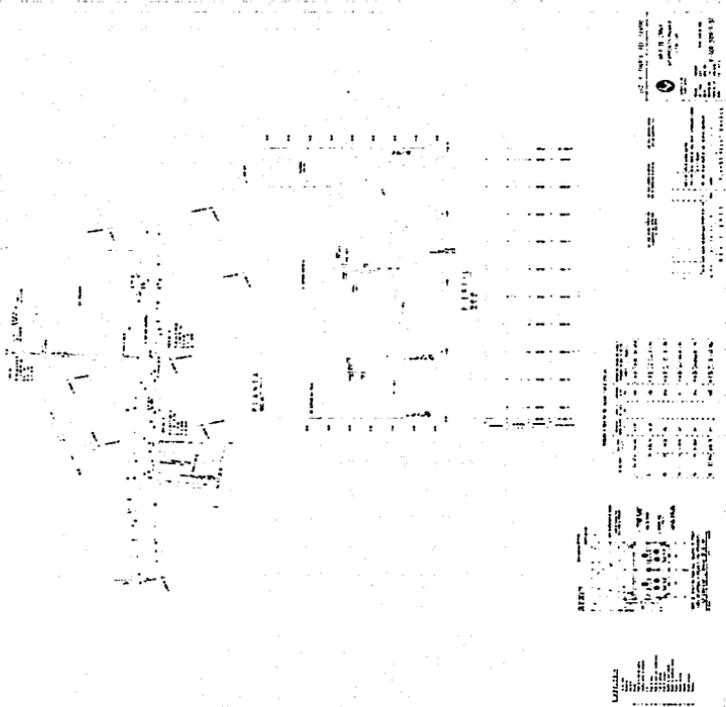
PROYECTO DEL CABLE AZCAPOTZALCO-POLANCO 230 KV

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



TRANSICIÓN DE LINEA AEREA A CABLE SUBTERRÁNEO EN 230 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



BIBLIOGRAFIA

- WESTINHOUSE ELECTRIC CORPORATION (1984). ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK. U.S.A.
- ANACONDA WIRE AND CABLE COMPANY (1989). COORDINATION OF CABLE AND LINE PIPE FOR PIPE TYPE CABLE. USA.
- AMERICA NATIONAL STANDARD.(1993). IEEE GUIDE FOR THE APPLICATION OF SHEATH-BONDING METHODS FOR SINGLE CONDUCTOR CABLES AND THE CALCULATION OF INDUCED VOLTAGES AND CURRENTS IN CABLE SHEATHS.
- IEEE/PES T&G CONFERENCE (1996). CROSS BONDING & SINGLE POINT BONDING OF HV CABLE. USA. LOS ANGELES, CA. SEP.
- ABB CABLES COMPANY (2000). POWER CABLES AND PROJECTS FOR HIGH AND EXTRA HIGH VOLTAGES. SUIZA.
- CABLES PIRELLI. (1998). SISTEMA DE CONEXIÓN ESPECIAL EN PANTALLAS. FRANCE.
- ALCATEL CABLES FRANCE (1999). 63 kV-500 kV. XLPE INSULATED CABLES. FRANCE.
- LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, (2000). CABLES DE ALTA TENSIÓN. MÉXICO.
- ING. FERNANDO SUAREZ NAJERA(1976). TESIS PROFESIONAL IPN. MÉXICO.