



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES SOBRE LA
CONEXIÓN A TIERRA DE PANTALLAS
DE CABLES DE ALTA TENSIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELÉCTRICO
ELECTRÓNICO**

PRESENTAN:

ANTONIO LÓPEZ LARA

LUIS ALBERTO UEDA GALLEGOS

RODRIGO RICARDO MEZA FLORES

DIRECTOR DE TESIS

ING. ARMANDO RÍOS COSÍO

MÉXICO NOV.2008^p



Iniciar cualquier tipo de obra ya sea personal o laboral, es cosa relativamente fácil, basta tan solo con avivar un poco la lumbre del entusiasmo. Perseverar en ella hasta alcanzar la felicidad es cosa muy diferente; eso ya es algo que requiere continuidad y esfuerzo, es por eso, que en estas líneas quiero plasmar mis agradecimientos empezando con darle gracias a la vida y a Dios por haberme dado la oportunidad a través de ésta tesis, de concluir con mis estudios, desde luego que esto hubiera sido imposible sin el apoyo de mis *padres* que día a día estuvieron impulsándome, aconsejándome, apoyándome en todos los aspectos para poder llegar hasta aquí, y con todo el afecto y cariño que les tengo les doy las gracias por todo y les dedico esta tesis.

Por otro lado, les agradezco a todos mis hermanos y hermanas: Paco, Nico, Olivia, Angélica, Luisa, Pilar, Alicia y Leonardito por su preocupación y por estar al pendiente del desarrollo de esta tesis.

En cuanto a mis profesores, les agradezco todo su apoyo y consejos, ya que sin su ayuda jamás hubiera llegado hasta aquí.

A nuestro director de tesis. Ing. Armando Ríos Cosío por su paciencia y consejos durante el desarrollo de esta tesis, y por poner a nuestro alcance un gran número de herramientas para salir adelante y destacar como profesionistas.

Al Ing. Luna Castillo por su gentileza, tiempo y por compartir información para el desarrollo de esta tesis.

También quiero dedicar esta tesis y darles las gracias a todos mis amigos por haberme apoyado en los momentos más críticos durante mi estancia en la facultad, el haber conocido a un gran número de personas valiosas fue parte esencial en mí desarrollo personal y profesional, y por supuesto que también les agradezco todos aquellos momentos gloriosos de diversión y cotorreo que dejaron buenos recuerdos.

El haber estado en la máxima casa de estudios fue una de las etapas mas gloriosas de mi vida, fue como mi segunda casa donde aprendí muchas cosas tanto académicas como de la vida, es por eso, que siempre estaré agradecido a la Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ingeniería.

Finalmente quiero mencionar que el concluir con esta tesis, es solo una prueba más que la vida nos tiene reservado, es el comienzo de otra etapa, pues pienso que todo ser humano nace y tiene un objetivo que perseguir. En lo personal la perseverancia y una buena actitud son las llaves del éxito.

Rodrigo Ricardo Meza Flores

Tal vez estas hojas no alcanzarían para agradecer a todos aquellos que me han brindado su apoyo y confianza durante estos años, a muchos les he perdido el rastro, pero otros siguen aquí, así que me limitaré a hacer una pequeña reseña.

Antes que nada quiero agradecer a Dios que siempre me ha brindado fuerzas y me ha acompañado en los momentos más difíciles y más felices a pesar de las discrepancias que hayamos tenido en el camino.

A mis padres por su gran esfuerzo, por brindarme apoyo, amor y cariño muy a su manera; no sería quien soy sin ellos.

A mi novia Mari Flor Alejandro por todo su amor desde hace 6 años, por su apoyo, por ver en mí algo tan maravilloso que tal vez ni yo logro ver, por estar en los momentos más difíciles, y por lo que nos queda adelante.

A mis hermanos con los que siempre he compartido momentos especiales, y a mi familia en general, ya que son tantos solo me queda generalizar.

A todos los amigos que siempre extendían la mano cuando se necesitaba y no dudaban en ayudar cuando se les necesitaba. Que a lo largo de esta etapa de la vida universitaria estuvieron ahí, de esta etapa que no volverá pero que siempre quedará viva en mi memoria.

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por formar en mí, antes que un ingeniero, un ser humano crítico, consciente, leal, responsable, para con su país, sus seres queridos y su alma mater. Por mostrarme que las cosas que valen la pena son aquellas por las que te esfuerzas.

A mi Facultad de Ingeniería, a sus profesores, académicos y trabajadores por su orientación, por sus consejos, por el conocimiento y las enseñanzas brindadas pero sobre todo por su tiempo.

A mi director de tesis Ing. Armando Ríos Cosío, por el material bibliográfico facilitado, por los consejos, por su tiempo y paciencia.

Antonio López Lara.

En este pequeño espacio agradezco el gran apoyo, que mi familia y las personas que estimo me han brindado a lo largo de mi vida y en este momento para la elaboración de mi tesis.

En primer lugar agradezco a mis padres José Luis Ueda Gómez y Concepción Gallegos Figueroa por todo el apoyo moral y económico que me han brindado, sobre todo el amor y paciencia para obtener este tipo de objetivos. Gracias por infundirme la ética y el ímpetu que guían mi vida, así como su comprensión. Gracias por creer en mí...

Agradezco a mi hermano José Daniel Ueda Gallegos por ayudarme y apoyarme sin condiciones. Su respaldo fue parte muy importante para lograr este fin. Su valiosa presencia en momentos importantes y palabras de estímulo me ayudaron en momentos de flaqueo. Gracias Hermano...

A mis compañeros de tesis Rodrigo y Antonio, ya que formamos un buen equipo para elaborar este documento, además de su incondicional apoyo en todo momento. Espero seguir contando con personas tan valiosas a lo largo de mi vida profesional.

A mi director de tesis Ing. Armando Ríos Cossío que le debemos que ésta tuviera los menos errores posibles y que el contenido fuera de gran calidad. Gracias por su generosidad al brindarnos la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia profesional en un marco de confianza.

A el Ing. Luna por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este trabajo.

A mi familia, amigos, compañeros y todas las personas que siempre estuvieron allí para brindarme su apoyo y siempre han creído en mí y que gracias a ellas he logrado cosas como ésta, elaborar mi tesis.

A la Facultad de Ingeniería, UNAM, por brindarme los conocimientos, los excelentes profesores, y las facilidades para forjarme como profesionista y gracias por el apoyo para la elaboración de esta tesis.

Luis Alberto Ueda Gallegos

ÍNDICE GENERAL

	Página
ABREVIATURAS.....	V
INTRODUCCIÓN.....	VII
CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES	
1 Historia de los Cables de Energía Aislados para Alta Tensión en México	1
1.1 Cables tipo HPGF	1
1.1.2 Cables tipo HPOF	2
1.1.3 Cables tipo LPOF	4
1.1.4 Cables de Energía para A.T .con Aislamiento Extruido (XLPE).....	6
1.1.5 Aspectos Generales.....	9
1.1.6 Futuro de México en materia de Cables de Energía Aislados para A.T...	9
1.2 Cables de energía subterráneos.....	11
1.2.1 Función de las pantallas eléctricas.....	12
1.2.2 Diseño y selección de la Pantalla Metálica.....	17
1.2.3 Aplicaciones de las pantallas.....	19
1.3 Pérdidas en los cables.....	20
1.3.1 Pérdidas en el Aislante.....	20
1.3.2 Pérdidas en el Conductor.....	21
1.3.3 Pérdidas en la pantalla metálica.....	26
1.3.4 Pérdidas totales en el cable.....	28
1.3.5 Ejemplo del costo de pérdidas en pantalla metálica.....	28
1.4 Ampacidad.....	32
1.4.1 Cálculo de la ampacidad.....	32
1.4.2 Factores que afectan a la ampacidad.....	33
1.4.3 Flujo de calor.....	34
1.4.4 Otros factores.....	35
1.4.5 Tablas de ampacidad para tensiones de 69 y 115kV.....	36
CAPITULO II. TENSIONES Y CORRIENTES INDUCIDAS EN PANTALLA METÁLICAS	
2 Tensiones inducidas en las pantallas metálicas.....	39
2.1 Conexión a tierra.....	40
2.2 Valores de las tensiones inducidas.....	41
2.3 Tensiones inducidas y su relación con los métodos de conexión.....	43
2.3.1 Conexión en un solo punto.....	44
2.3.2 Conexión cruzada en secciones.....	44
2.3.3 Conexión cruzada continua.....	45
2.4 Análisis de tensiones transitorias.....	45
2.5 Corrientes inducidas en las pantallas metálicas.....	46
2.5.1 Campo magnético.....	46
2.5.2 Flujo magnético.....	47
2.5.3 Fuerza Electromotriz y Corriente Inducida.....	47
2.6 Aplicación de conceptos generales para el caso de pantallas metálicas.....	49



2.6.1	Impedancia, Resistencia y Reactancia Inductiva.....	49
2.6.2	Resistencia y Reactancia Aparentes en Configuración Trébol.....	52
2.7	Corrientes inducidas en los métodos de conexión.....	54
2.7.1	Conexión en dos o más Puntos.....	54
2.7.2	Corriente inducida en las pantallas metálicas con conexión cruzada (Cross Bonding.).....	58
2.7.3	Caso de estudio utilizando MATLAB.....	59
2.8	Software utilizado para simulación y cálculo de tensiones y corrientes en pantallas metálicas.....	65
 CAPÍTULO III. MÉTODOS ESPECIALES DE CONEXIÓN		
3.	Métodos de conexión de pantallas a tierra.....	66
3.1	Diseño.....	68
3.2	Conexión en un solo punto.....	69
3.2.1	Varias Secciones (múltiples longitudes).....	70
3.2.2	Conductor paralelo de tierra.....	70
3.2.3	Arreglos.....	72
3.3	Métodos de conexión de transformadores (Impedancias).....	73
3.3.1	Descripción de la conexión del transformador de pantalla (SBT).....	74
3.4	Conexión cruzada (Cross Bonding).....	76
3.4.1	Arreglo para circuito básico.....	76
3.4.2	Circuitos largos.....	77
3.4.3	Conexión cruzada en secciones (Cross Bonding en secciones).....	77
3.4.4	Conexión cruzada en secciones “modificada”.....	79
3.4.5	Conexión cruzada continua.....	81
3.4.6	Sistemas mixtos.....	81
3.4.7	Sistemas desbalanceados.....	82
3.5	Elección de un sistema de conexión.....	82
3.5.1	Uso de la conexión en un solo punto.....	83
3.5.2	Ventajas de la conexión cruzada.....	83
3.5.3	Elección del sistema en conexión cruzada.....	84
3.5.3.1	Ventajas de la conexión cruzada en secciones.....	84
3.5.3.2	Ventajas de la conexión cruzada continua.....	85
 CAPÍTULO IV. ACCESORIOS		
4.	Accesorios para la conexión a tierra	86
4.1	Empalmes con interrupción de pantalla.....	86
4.2	Limitadores de tensión (LT's).....	89
4.2.1	Tipos de limitadores de tensión.....	89
4.2.1.1	Resistencias no lineales.....	89
4.2.1.2	Spark gaps	92
4.2.1.3	Resistencias no lineales en serie con spark gap.....	93
4.2.2	Criterios para la selección de los limitadores de tensión.....	93
4.2.3	Uso de los limitadores de tensión.....	94
4.2.3.1	Conexión en un solo punto.....	94
4.2.3.2	Conexión cruzada.....	94
4.3	Características de operación y especificaciones de los pararrayos.....	96



4.4	Cajas de conexión.....	105
4.4.1	Caja metálica con cubierta de fibra de vidrio.....	105
4.4.2	Caja metálica.....	106
4.4.3	Conexiones del cable de tierra.....	107
4.4.4	Conexiones del cable de tierra al neutro corrido.....	108
4.5	Cajas de conexión según los métodos especiales.....	108
4.6	Terminales.....	111
4.7	Pruebas a los accesorios.....	114
4.8	Tabla de grados IP.....	115

CAPÍTULO V. EFECTOS EN CABLES PARALELOS

5	Efectos en cables paralelos.....	116
5.1	Efecto sobre los cables paralelos de comunicación.....	116
5.2	Factores de inducción.....	118
5.2.1	Acoplamiento.....	118
5.2.2	Blindaje.....	118
5.2.3	Tensión longitudinal.....	119
5.3	Calculo de tensión inducida longitudinal en cables paralelos.....	119
5.4	Relación entre los métodos especiales de conexión de pantallas a tierra y cables paralelos.....	120
5.5	Tensión inducida en líneas de ferrocarriles	120
5.6	Equipo de medición de corriente en pantalla.....	121
5.7	Seguridad y precauciones durante la instalación.....	122
5.7.1	Seguridad.....	122
5.7.2	Normas Nacionales e internacionales de seguridad aplicadas en los centros de trabajo.....	122
5.7.3	Tensiones inducidas durante el jalado del cable.....	125
5.7.4	Precauciones.....	127
5.8	Campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de A.T. y sus efectos en el cuerpo humano.....	129
5.8.1	Campos electromagnéticos y su interacción con la materia.....	130
5.8.2	Estudios sobre la salud. Estudios epidemiológicos.....	131
5.8.3	Efectos sobre la salud. Estudios experimentales.....	137
5.8.4	Normas y recomendaciones internacionales.....	139

	CONCLUSIONES.....	140
--	--------------------------	------------

ANEXOS

Anexo A. Tensiones inducidas en pantallas - Perspectiva histórica de práctica y problemas

A.1	Retrospectiva de Estados Unidos	143
A.2	Práctica Canadiense.....	143
A.3	Práctica Mexicana.....	143
A.4	Experiencia Británica previa a 1970.....	144
A.5	Práctica en otros países de Europa, previa a 1980.....	144



Anexo B. Tensiones inducidas en pantallas – Información actual

B.1	Práctica actual en Estados Unidos.....	145
B.2	Práctica actual en Canadá.....	145
B.3	Prácticas actuales internacionales.....	146
B.4	Práctica actual en México.....	147

Anexo C. Cálculo de tensiones inducidas

C.1	Tensiones inducidas.....	148
C.2	Gradientes de tensión inducidos en pantalla.....	148
C.2.1	Caso general para cualquier configuración de cable.....	149
C.2.2	Configuración trébol.....	149
C.2.3	Configuración plana.....	149
C.3	Transposición y Conductor independiente paralelo.....	150
C.4	Tensiones inducidas en pantallas.....	151

Anexo D. Tensiones transitorias, requerimientos de tensiones en cubiertas protectoras

D.1	Sobretensiones en redes eléctricas.....	152
D.1.1	Sobretensiones en pantalla.....	153
D.1.2	Conexiones del neutro a tierra.....	154
D.1.3	Conexión en un solo punto.....	155
D1.3.1	Falla trifásica.....	155
D1.3.2	Falla de bifásica.....	155
D1.3.3	Falla monofásica a tierra (Con neutro conectado directamente a tierra).	155
D1.3.4	Magnitud de tensiones.....	156
D1.4	Conexión cruzada	157
D1.4.1	Falla simétrica trifásica.....	157
D1.4.2	Falla bifásica.....	157
D1.4.3	Falla monofásica a tierra.....	157
D1.4.3.1	Cables en configuración trébol.....	157
D1.4.3.2	Cables en configuración plana.....	159
D1.4.4	Magnitud de tensiones.....	161

GLOSARIO GENERAL DE CABLES.....	163
--	------------

REFERENCIAS.....	171
-------------------------	------------



ABREVIATURAS

SIGLAS	SIGNIFICADO
A.T.	Alta tensión
BIL	Nivel básico de aislamiento al impulso
CFE	Comisión Federal de Electricidad
COEMSA	Constructora Electromecánica, S.A de C.V
CONDUMEX	Conductores Mexicanos
DP	Descarga parcial
EPP	Equipo de protección personal.
EPR	Etileno Propileno
HDPE	Polietileno de alta densidad
HPGF	Cables tipo tubo de A.T rellenos con gas a alta presión
HMWP	Polietileno de alto peso molecular
ICEA	Insulated Cable Engineers Association
IEC	International Electrotechnical Commission
KCM	Kilo Circular Mil: unidad de área del sistema Norteamericano de calibre de conductores eléctricos, igual a 1000 circular mil (CM). Anteriormente conocida como MCM.
LDPE	Polietileno de baja densidad
LPOF	Cables con aislamiento de papel y aceite a baja presión
LT's	Limitador de tensión de pantalla
CLyFC	Compañía Luz y fuerza del Centro
MOV-ZnO	Varistor de Óxido Metálico-Óxido de Zinc
NOM- 001	Norma Oficial Mexicana 001-Sede 2005
PE	Polietileno natural y puede ser de tres tipos HMWP, HDPE Y LDPE
PILC	Cables aislados con papel impregnado y cubierta de plomo
SBT's	Transformador de conexión de pantallas
SIC	(Specific Inductive Capacity): inductancia capacitiva específica,



constante dieléctrica de un material que es la relación que existe entre un condensador con el material como dieléctrico y el mismo condensador con aire como dieléctrico

SiC	Carburo de silicio
SF6 GIS	Aislamiento con gas
TCI	Tensiones y corrientes inducidas
XLPE	Polietileno de cadena cruzada
XLPE-TR	Polietileno de cadena cruzada con retardante a las arborescencias



INTRODUCCIÓN

En general se asocian enormes costos de inversión a la instalación de circuitos de transmisión subterráneos los cuales van a la par de su optimización, eficiencia y capacidad de rendimiento de las líneas. Con la popularidad que tiene la utilización de cables de energía XLPE y sus ventajas como son la casi eliminación de pérdidas, así como la alta resistencia dieléctrica que presentan sus materiales aislantes y la mejora de los recubrimientos de los cables, se genera gran interés en la utilización de estos, así como la de los problemas de tensiones y corrientes inducidas asociados con su uso, muchos de estos problemas (por ejemplo, la falla de la cubierta del empalme o la falla de cubierta de los cables, y corrosión de pantallas) han sido reconocidos a partir de que los cables con pantalla metálica se utilizaron por primera vez, así como los fundamentos del cálculo de las tensiones y corrientes de la pantalla, sin embargo, cada vez han aumentado más los requerimientos de ampacidad y las capacidades de cortocircuito en los modernos sistemas de potencia, acentuándose algunos problemas, mientras que las mejoras en los aislamientos que interrumpen la pantalla en los empalmes han eliminado algunos otros.

Así pues, es evidente que existe la necesidad de un documento detallado para que el ingeniero de cables pueda seleccionar el método de instalación o conexión de pantallas más adecuado, en otras palabras que mejor se adapte a las necesidades de una instalación en particular.

Las precauciones de seguridad y prácticas en diseño, construcción, operación y mantenimiento se pueden analizar con base a la tensión que existe en la pantalla de un cable de transmisión.

Las pantallas aterrizadas en dos o más punto son una solución bastante sencilla al problema de las tensiones en pantalla, estas conexiones eliminan prácticamente las mismas, sin embargo, las corrientes circulantes inducidas en la pantalla producen grandes pérdidas que traen consigo grandes costos, también estas corrientes son proporcionales a las del conductor de tal manera que reducen considerablemente la ampacidad del cable, así que este tipo de conexión provoca enormes desventajas. Haciendo una comparación con los métodos especiales de conexión, estos se justifican debido a su bajo costo (usualmente con cargas superiores a 500A) o cargas extremadamente grandes donde todo el calor generado ha sido minimizado. Más adelante se profundizará en diseños y consideraciones de operación de estos métodos especiales de conexión, ver capítulo 3.

El más simple y efectivo método de conexión especial es la conexión en un solo punto, aunque su mayor desventaja es que la tensión inducida se incrementa linealmente a lo largo de la pantalla y esta puede ser peligrosa, de tal manera que este método se emplea generalmente para sistemas de 1 a 2 kilómetros de longitud.

Para líneas de mayores distancias, la conexión cruzada es la más utilizada de las opciones de conexión, este método idealmente evita tensiones inducidas en la pantalla y minimiza así el flujo de corrientes circulantes en la misma, reduciendo enormemente las pérdidas en el cable. Bajo algunas circunstancias aun con conexiones a tierra bien



realizadas puede existir un alto potencial a tierra, con los materiales de cubiertas de la actualidad y dependiendo del grueso de la misma, se ha permitido en algunos países como Estados Unidos y Canadá niveles de tensión inducida en la pantalla por encima de los 600V especialmente en conexiones realizadas a sistemas de cables de transmisión. En México los niveles de tensión inducida en pantallas señalados por la NOM-001 Sede 2005 son de 55V, sin embargo, actualmente este valor se está discutiendo para llegar a niveles por arriba de los 115V.

La eliminación total de las corrientes circulantes en la pantalla no puede ser posible debido a limitaciones respecto al largo de cable y espacio de instalación. Por ello es necesario el cálculo de estas corrientes residuales en pantalla y sus efectos en el desempeño del cable.

El uso de conexiones especiales incrementa las sobretensiones en pantalla durante los transitorios del sistema debidas a fallas, así que estos valores deben ser considerados. Para sistemas de A.T es necesario un dispositivo limitador de tensión en la pantalla, ver capítulo 4.

La falla de la cubierta o del limitador de tensión puede dar como resultado corrientes considerables, y pérdidas de pantalla, por consiguiente sobrecalentamiento de los cables, por lo que debe tomarse en cuenta el dispositivo limitador dependiendo de la tensión a la que es sujeto, así como monitorear y darle mantenimiento completo al sistema en operación.

En general los métodos especiales de conexión (principalmente el de conexión cruzada) son extremadamente necesarios en la actualidad, ya que el costo de la generación de la energía eléctrica es muy elevado, y esto nos obliga a desperdiciarla lo menos posible, a parte que disminuimos riesgos en la instalación y la operación, aunque queda claro que hay que tomar en cuenta todos los valores de tensión como de corriente, para analizar por completo nuestro sistema y poder seleccionar el material, equipo, accesorios y todos los requerimientos necesarios para optimizar nuestro sistema de cables subterráneos de potencia.

OBJETIVO

El objetivo de este documento es elaborar una referencia técnica para consulta de los especialistas sobre los diferentes métodos que se usan actualmente en México para conectar a tierra las pantallas metálicas de los cables de energía de alta tensión (69, 85, 115, 138, 230 y 400kV).



CAPÍTULO 1

CONCEPTOS GENERALES

1 Historia de los Cables de Energía Aislados para Alta Tensión en México

1.1 Cables tipo HPGF

Los Cables de Energía Aislados para Alta Tensión (69-400kV) cuentan ya con una larga historia en el país, se empezaron a utilizar en México en los años 50's, por medio de CFE y CLyFC principalmente.

En el año de 1950 se instaló el primer circuito subterráneo con una longitud de 5.8 Km utilizando cable de 85kV del tipo *HPGF*, fabricado en los E.U. por *Phelps Dodge* e instalado por LyFC entre las Subestaciones Nonoalco y San Lázaro en la Ciudad de México.

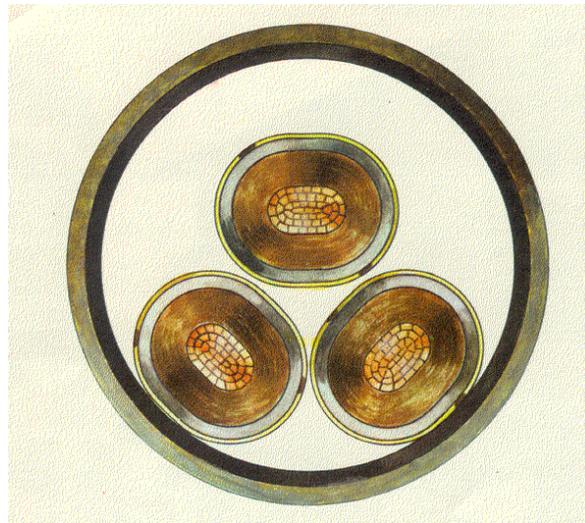


Fig. 1.1- Cable de energía del tipo *HPGF* utilizado en los años 50's.

Fuente: Fotografía Condumex

A lo largo de la primer década de vida de estos cables, en nuestro país se instalaron otros cuatro circuitos de más o menos las mismas características, los cuales se mencionan a continuación.



No.	ENLACE ENTRE SUBESTACIONES	ENTRADA EN OPERACIÓN	VOLTAJE NOMINAL (KV)	AREA DEL CONDUCTOR DE COBRE		DIAMETRO DEL TUBO plg (mm)	MEDIO AISLANTE	LONGITUD APROX. (KMS)	No. DE CIRCUITOS
				(kcm)	(mm2)				
1	NONOALCO - SAN LAZARO	1950	85	500	250	5.1 (129)	GAS	5.8	1
2	SAN LAZARO - JAMAICA	1952	85	500	250	5.1 (129)	GAS	3.9	1
3	TACUBAYA - CONDESA	1960	85	700	350	5.1 (129)	GAS	3.5	1
4	CONDESA - NARVARTE	1960	85	700	350	5.1 (129)	GAS	4.5	1
5	NARVARTE - TAXQUEÑA	1960	85	900	450	5.1 (129)	GAS	5.3	2
								23.0	

Tabla 1.1- Cables de Energía tipo *HPOF* de 85 kV instalados por LyFC en la Cd. de México entre 1950 y 1960.

Fuente: LyFC⁽¹⁾

1.1.2 Cables tipo *HPOF*

Son cables aislados con cintas de papel impregnado en aceite dentro de un tubo de acero con aceite a alta presión (14.3 Kg/cm^2), estos han sido ampliamente utilizados en los E.U. por sus características mecánicas y eléctricas. Las primeras instalaciones realizadas con este tipo de cables fueron en la Ciudad de México en la década de los 60's.



Fig. 1.2- Cable Tipo *HPOF*.

Fuente: Fotografía Condumex

En el año de 1966 los primeros circuitos subterráneos con cables tipo *HPOF* de 85kV, enlazan las subestaciones Morales, Verónica, Indianilla y Jamaica de Luz y Fuerza del Centro en la Ciudad de México⁽¹⁾.

Estos cables fueron fabricados (parcialmente) por primera vez en México por *Condumex*, con asesoría de *Anaconda Wire & Cable Co.* el resto del cable, los empalmes, las terminales, el tubo de acero y el aceite fueron importados de E.U.



La instalación fue hecha por la Gerencia de Construcción de LyFC con supervisión de *Conдумex* y de *Anaconda*. El uso de este tipo de cable se extendió hasta finales de los años 80's debido a sus ventajas y a la experiencia adquirida en la instalación y mantenimiento de los mismos.

N°	ENLACE ENTRE SUBESTACIONES	ENTRADA EN OPERACIÓN	VOLTAJE NOMINAL (KV)	AREA DEL CONDUCTOR DE COBRE		DIAMETRO DEL TUBO plg (mm)	MEDIO AISLANTE	LONGITUD APROX. (KMS)	NUMERO DE CIRCUITOS
				(kcm)	(mm2)				
1	MORALES - VERONICA	1966	85	1000	500	6.125 (156)	ACEITE	3.7	2
2	VERONICA - INDIANILLA	1966	85	800	400	6.125 (156)	ACEITE	3.3	1
3	INDIANILLA - JAMAICA	1966	85	800	400	6.125 (156)	ACEITE	2.8	1
4	JAMAICA - BUEN TONO (PCC)	1969	85	800	400	6.125 (156)	ACEITE	3.5	1
5	BUEN TONO (PCC) - NONOALCO	1969	85	800	400	6.125 (156)	ACEITE	3.3	1
6	MORALES - HUASTECA	1983	85	1000	500	6.125 (156)	ACEITE	3	1
7	HUASTECA - VERONICA	1983	85	1000	500	6.125 (156)	ACEITE	1	1
8	HUASTECA - PEMEX	1988	85	1000	500	6.125 (156)	ACEITE	0.2	1
9	VERONICA - PEMEX	1988	85	1000	500	6.125 (156)	ACEITE	1	1
								21.8	

Tabla 1.2- Cables de Energía tipo *HPOF* de 8 kV instalados por LyFC en la Cd. de México entre 1966 y 1988.

Fuente: LyFC⁽¹⁾

En el año de 1975 se instaló el único cable de 115kV tipo *HPOF* fabricado e instalado por *Conдумex* y operado por CFE, entre las subestaciones Veracruz 1 y González Pages, en la Ciudad de Veracruz.

Este circuito consta de dos secciones de aproximadamente 4 km de longitud, uno con cable 3/0 AWG y el otro con cable 250 kcm, ambos de cobre; la tubería, el aceite, los empalmes y las terminales fueron importados de E.U. Este circuito fue sustituido por un cable de aislamiento extruido XLPE en el 2005.

Los Primeros cables tipo *HPOF* de 230kV en México se fabricaron en el año de 1972 por *Conдумex* y ese mismo año se instalaron en la Ciudad de México tres circuitos: “K-0 – Pensador Mexicano”, “Pensador Mexicano – Merced” y “Merced – Jamaica”. El tubo de acero, el aceite y los accesorios (empalmes y terminales) fueron importados de E.U.

La instalación de estos circuitos fue hecha por personal de la Gerencia de Construcción de LyFC, con la supervisión de *Conдумex* y de *Anaconda Wire & Cable Co.*



N°	ENLACE ENTRE SUBESTACIONES	ENTRADA EN OPERACIÓN	VOLTAJE NOMINAL (KV)	AREA DEL CONDUCTOR DE COBRE		DIAMETRO DEL TUBO plg (mm)	MEDIO AISLANTE	LONGITUD APROX. (KMS)	NUMERO DE CIRCUITOS
				(kcm)	(mm2)				
1	K-O - PENSADOR MEXICANO	1972	230	1000	500	8.125 (206)	ACEITE	2.4	1
2	PENSADOR MEXICANO - MERCED	1972	230	1000	500	8.125 (206)	ACEITE	2.3	1
3	MERCED - JAMAICA	1972	230	1000	500	8.125 (206)	ACEITE	3.9	1
4	CEYLAN - VALLEJO	1977	230	1500	750	8.125 (206)	ACEITE	4.2	2
5	SAN ANGEL - COYOACAN	1979	230	1000	500	8.125 (206)	ACEITE	4	1
6	AZCAPOTZALCO - REMEDIOS	1984	230	1500	750	8.125 (206)	ACEITE	5.1	2
7	MERCED - PERALVILLO	1986	230	1500	750	8.125 (206)	ACEITE	3.7	1
8	JAMAICA - VERTIZ	1987	230	1500	750	8.125 (206)	ACEITE	2.8	2
9	ESMERALDA - PERALVILLO	1988	230	1500	750	8.125 (206)	ACEITE	5.2	2
10	K - O - CUAUHTEMOC	1990	230	1500	750	8.125 (206)	ACEITE	2.8	2
								36.4	

Tabla 1.3- Cables de Energía tipo *HPOF* de 230kV instalados por LyFC en la Cd. de México entre 1972 y 1990.

Fuente: LyFC⁽¹⁾

1.1.3 Cables tipo LPOF

Este tipo de Cables consta de las mismas características y los mismos principios de funcionamiento que el tipo anterior con la diferencia de que el aceite en su interior se encontraba a una presión menor que el anterior, como su nombre lo menciona.

En el año de 1974 se instaló el primer y único cable de 115kV, tipo LPOF calibre 1x95 mm² fabricado en México e instalado por *Condumex* dentro de la planta de *VWM*, en Puebla, contaba con 900 m de longitud aproximadamente.

Este primer circuito se instaló entre 1974 y 1975. El primer circuito se sustituyó en el 2005 por cables con aislamiento extruido XLPE. El segundo circuito sigue en operación. En 1979 se instaló otro cable igual fabricado por *Pirelli* en Italia.



Fig. 1.3- Primer y único cable de 115 kV, tipo *LPOF*, instalado en VWM por Condumex en 1975.

Fuente: Fotografía Condumex



Los primeros cables de 400kV que se instalaron en México fueron de este tipo en el año de 1974. Debido al desarrollo de los Proyectos Hidroeléctricos de la cuenca del Río Grijalva, fue necesario utilizar cables del tipo LPOF de 400kV fabricados por Pirelli en Italia.

Estos cables fueron instalados por personal técnico del mismo fabricante en las Centrales Hidroeléctricas Adolfo López Mateos (Infiernillo 1974), Belisario Domínguez (Angostura 1a etapa 1977 y 2a etapa 1978), y Manuel Moreno Torres (Chicoasén 1a etapa 1982).

No	CENTRAL HIDROELECTRICA	ENTRADA EN OPERACIÓN	VOLTAJE NOMINAL Kv	AREA DEL CONDUCTOR DE COBRE mm ²	MEDIO AISLANTE	LOGITUD APROX. en m.	NUMERO DE CIRCUITOS
1	ADOLFO LOPEZ MATEOS (INFIERNILLO)	Dic-74	400	300	DUODECILBENCENO	3,666	2
2	BELISARIO DOMINGUEZ (ANGOSTURA 1ª ETAPA)	Dic-77	400	300	DUODECILBENCENO	1,620	3
3	BELISARIO DOMINGUEZ (ANGOSTURA 2ª ETAPA)	Sep-78	400	300	DUODECILBENCENO	1,140	2
4	MANUEL MORENO TORRES (CHICOASEN 1ª ETAPA)	Dic-82	400	400	DUODECILBENCENO	2,775	5
						9,201	

Tabla 1.4- Cables de Energía tipo LPOF de 400kV instalados por LyFC en Centrales Hidroeléctricas en los Estados de Michoacán y Chiapas.
Fuente: LyFC⁽¹⁾



Fig. 1.4- Cables de 400kV utilizados para la construcción de grandes proyectos eléctricos en México.

(a) “El Infiernillo”, 300 mm², Dic. ’74 (b) “Chicoasén”, 400 mm², Dic. ‘82
Fuente: Varias fotografías Condumex



1.1.4 Cables de Energía para A.T. con Aislamiento Extruido (XLPE)

Este tipo de cables son modernos, mucho más eficientes que los mencionados anteriormente y por ende son mucho más durables también.

Algunas ventajas de estos cables sobre los cables de aceite (LPOF y HPOF) en tensiones de 69 a 400kV:

- + Menor peso
- + Mayor rapidez y facilidad en la instalación y entrada de operación
- + No se requieren estaciones de bombeo
- + Se elimina el manejo de líquidos inflamables
- + Mayor facilidad en la elaboración de los accesorios
- + Detección y reparación de fallas con mayor facilidad y rapidez
- + Son más económicos
- + Baja capacitancia
- + Reducción de pérdidas
- + Mejor rendimiento



Fig. 1.5- Cable de Energía para Alta Tensión con Aislamiento Extruido (XLPE).

Fuente: Fotografía Condumex

En el año de 1975 se instalaron los primeros cables de 69kV⁽²⁾ con aislamiento extruido (EPR), por parte de la división Jalisco de la CFE, estas instalaciones contaron con las siguientes características y circuitos:

- + 2 circuitos en la Cd. de Guadalajara (uno con cable de *Condumex* y otro con cable de *Conductores Monterrey*)
- + Un enlace entre la Subestación Alameda y un poste de transición en la Glorieta de la Normal
- + Longitud de 2.7 km



- ✚ Aproximadamente 16,200 m de cable calibre 380 mm² (750 kcm) de Aluminio con aislamiento de EPR
- ✚ 27 empalmes tipo *Hotsplicer*
- ✚ 12 terminales de porcelana marca *G&W* del tipo llenadas en fábrica

Estos circuitos se instalaron en 1976 y fueron energizados en Enero de 1977, en Agosto del 2002 se realizaron mediciones de descargas parciales (*DP*) “en línea” en el circuito con cables de Conductores Monterrey, sin encontrar niveles altos de *DP*.

N°	ENLACE ENTRE SUBESTACIONES	ENTRADA EN OPERACIÓN	VOLTAJE NOMINAL (KV)	AREA DEL CONDUCTOR DE COBRE		MEDIO AISLANTE	LONGITUD APROX. (KMS)	NUMERO DE CIRCUITOS
				(kcm)	(mm ²)			
1	MORALES - COLGATE PALMOLIVE	1988	85	1000	500	XLPE	0.8	1
2	MORALES - INDUSTRIA SEDENA	1993	85	750	380	XLPE	2.6	2
3	JAMAICA - VERONICA	2000	85	1600	800	XLPE	7	2
4	HUASTECA - CERVECERIA MODELO	2001	85	800	400	XLPE	1	1
5	PATERA - NACEL	2002	85	800	400	XLPE	1.5	1
							12.9	

Tabla 1.5- Cables de Energía con Aislamiento Extruido de 85kV instalados por LyFC en la Ciudad de México entre 1988 y 2002.

Fuente: LyFC⁽¹⁾

El primer cable de 115kV de Aislamiento Extruido se instaló en México en el año de 1980, siendo el primer cable de este tipo instalado por la CFE en el País, contaba con 2 Km de longitud aproximadamente. Enlaza las Subestaciones González Pagés y Playa Norte, en el puerto de Veracruz⁽²⁾, con cable calibre 500 kcm de aluminio con aislamiento XLPE. El cable fue fabricado por *Conelec*, e instalado en ductos subterráneos por personal técnico de la CFE, se utilizaron empalmes premoldeados marca *Elastimold* y terminales *G&W*.

Los primeros Cables de 138kV con este tipo de aislamiento fueron instalados en el año de 2002 en L.T. “Río Bravo, entronque Parque Industrial Reynosa”, en Reynosa, Tamaulipas. Cuenta con dos circuitos con una longitud aproximada de 1,100 m (6,600 m de cable), los cables fueron fabricados por Conductores Monterrey; con un calibre 500 mm² de Cobre, con aislamiento XLPE, para la instalación se emplearon 12 empalmes, 6 terminales en poste y 6 más en la Subestación.

Como detalle a mencionar esta lo siguiente:

- ✚ *En cables con tensión hasta 150kV, el operador final puede “armar” su Sistema de Cables.*
- ✚ *En sistemas de cables con tensiones superiores a 150kV, se usa la modalidad de “llave en mano”, donde los fabricantes llevan a cabo la ingeniería, suministran todos los materiales (cables, terminales y empalmes) y efectúan el montaje y las pruebas de recepción al sistema ya instalado. Todo lo anterior se hace con la finalidad de poder garantizar a sus clientes el sistema de cables completo.*



Los primeros cables XLPE de 161kV fueron instalados en el año de 2003 por la División Baja California de la CFE, este sistema de cableado constaba de 2 Circuitos enlazando la Subestación *Packard* y una bahía de transición en el entronque Mexicali II – Cety, con una longitud de tramo subterráneo de 2,162 m (aproximadamente 13,000 m de cable calibre 1x800 mm² de Cobre, con aislamiento XLPE, 12 terminales y 30 empalmes). El cable y los accesorios fueron fabricados por *Pirelli* e instalados por Condumex con recomendaciones de *Pirelli*.

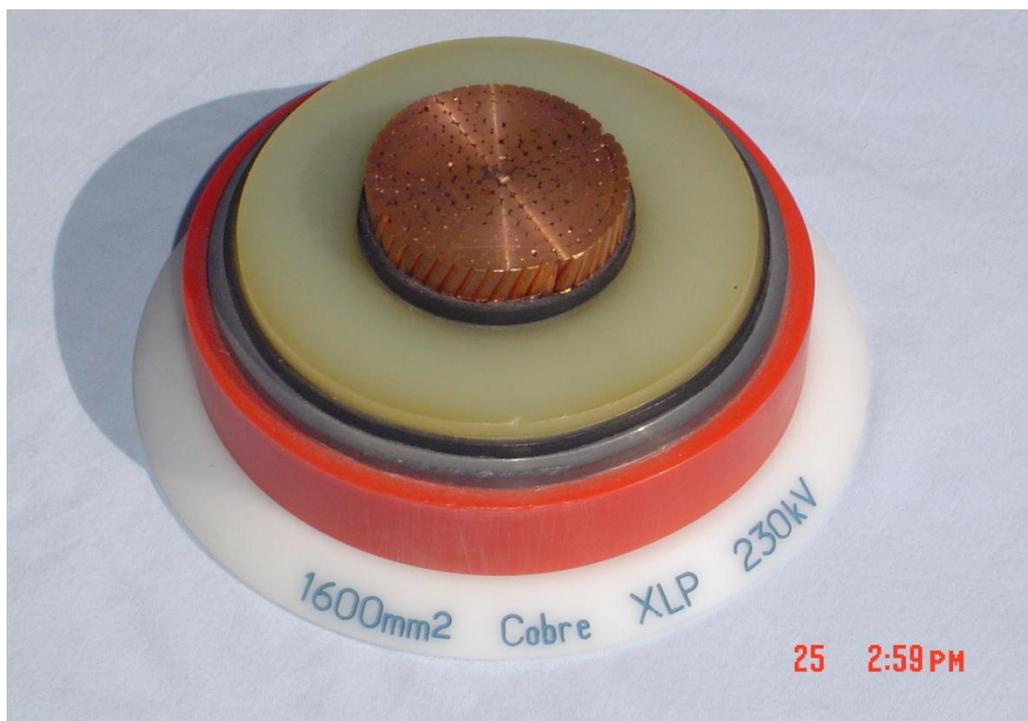


Fig. 1.6- Sección Transversal de un Cable tipo Aislamiento Extruido (XLPE) para 230kV.

Fuente: Fotografía Pirelli

N°	ENLACE ENTRE SUBESTACIONES	ENTRADA EN OPERACIÓN	VOLTAJE NOMINAL (kV)	AREA DEL CONDUCTOR		AISLAMIENTO	LONGITUD APROX. (KMS)	NUMERO DE CIRCUITOS
				(kcm)	(mm2)			
1	ESTRELLA - SANTA CRUZ	1993	230	1000 (AL)	500 (AL)	LDPE-PB(SILEC)	6.5	1
2	ESTRELLA - IZTAPALAPA	1993	230	1000 (AL)	500 (AL)	LDPE-PB(SILEC)	5.9	1
3	TECAMACHALCO - BOSQUES	1994	230	1600 (AL)	800 (AL)	LDPE-PB(SILEC)	1.5	2
4	MERCED - OCEANIA	1999	230	1000 (AL)	500 (AL)	HDPE-PB(PIRELLI)	2	1
5	PERALVILLO - OCEANIA	1999	230	1000 (AL)	500 (AL)	HDPE-PB(PIRELLI)	5	1
6	POLANCO - AZCAPOTZALCO	2004	230	1600 (Cu)	800 (Cu)	HDPE-PB(NEXANS)	2.7	
							23.6	

Tabla 1.6- Cables de Energía con Aislamiento Extruido de 230kV instalados por LyFC en la Ciudad de México entre 1993 y 2004.

Fuente: LyFC⁽¹⁾



1.1.5 Aspectos Generales

Del año de 1950 a 1975, se utilizaron en México cables con aislamiento a base de cintas de papel impregnado y aceite como medio aislante, en tensiones de 85, 115 y 230kV.

De 1976 a la fecha, se observa en México un notable y sostenido incremento en el uso de Sistemas de Cables Subterráneos de A.T. (69-230kV) con aislamiento extruido.

DIVISION	TENSION DE OPERACION ENTRE FASES (kV)						
	69	115	138	161	230	400	TOTAL
	ORIENTE		49,321				
JALISCO	19,353	8,792			29,400		57,545
PENINSULAR		211,302					211,302
GOLFO NORTE		52,964	7,200				60,164
BAJA CALIFORNIA	18,904			13,200			32,104
BAJIO							
NOROESTE		26,628					26,628
CENTRO SUR		10,040			76,800		86,840
CENTRO ORIENTE		48,678					48,678
CENTRO OCCIDENTE						3,666	3,666
NORTE							
SURESTE						5,535	5,535
GOLFO CENTRO		12,348					12,348
EN CONSTRUCCION			7,500	24,000	44,000		75,500
NACIONAL	38,257	420,073	14,700	37,200	150,200	9,201	669,631
PORCENTAJE APROX.	6%	63%	2%	6%	22%	1%	100%

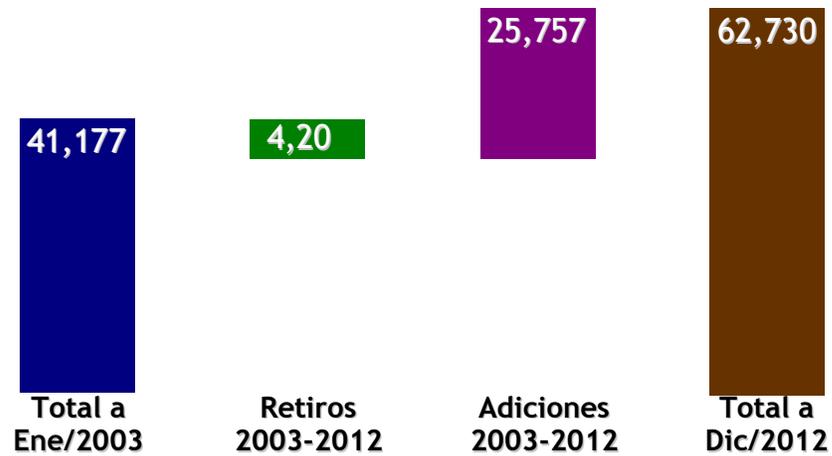
Tabla 1.7- Resumen de Cables de Energía de Alta Tensión Operados por CFE (longitudes en metros y %)

Fuente: LyFC⁽¹⁾

1.1.6 Futuro de México en materia de Cables de Energía Aislados para A.T.

Sin lugar a dudas el futuro de la energía en México se encuentra ocupada por el sector de cables de energía aislados, esto debido a sus enormes ventajas no sólo estéticas sino de seguridad, facilidad de operación, confiabilidad y rendimiento, el fenómeno de crecimiento social, económico y tecnológico del país perfila a este sector como uno de los más fuertes teniendo crecimiento en demanda año con año e irreversible en zonas cada vez más diversas desde el ambiente industrial, comercial hasta el residencial, lo cual abre una enorme área de oportunidad en el aspecto de ingeniería.





Gráfica 1.1- Evolución de la Capacidad de Generación Efectiva (XLPE)
 Fuente: LyFC⁽¹⁾

Para los fabricantes mexicanos de cables de energía de A.T. con aislamiento extruido, se prevé una demanda creciente e irreversible en el rango de tensiones de 69-138kV. De igual manera para los fabricantes de accesorios, equipos y herramientas que se utilizan en la instalación de estos cables también se ve un panorama favorable. Habrá gran demanda para los contratistas especializados en el montaje de sistemas de cables de energía de Alta Tensión por lo que se observa la necesidad de capacitar *urgentemente* a nuevos ingenieros y técnicos en esta especialidad, ya que no existe en este momento suficiente capacidad instaladora de calidad en el país para hacer frente a los proyectos presentes y futuros.

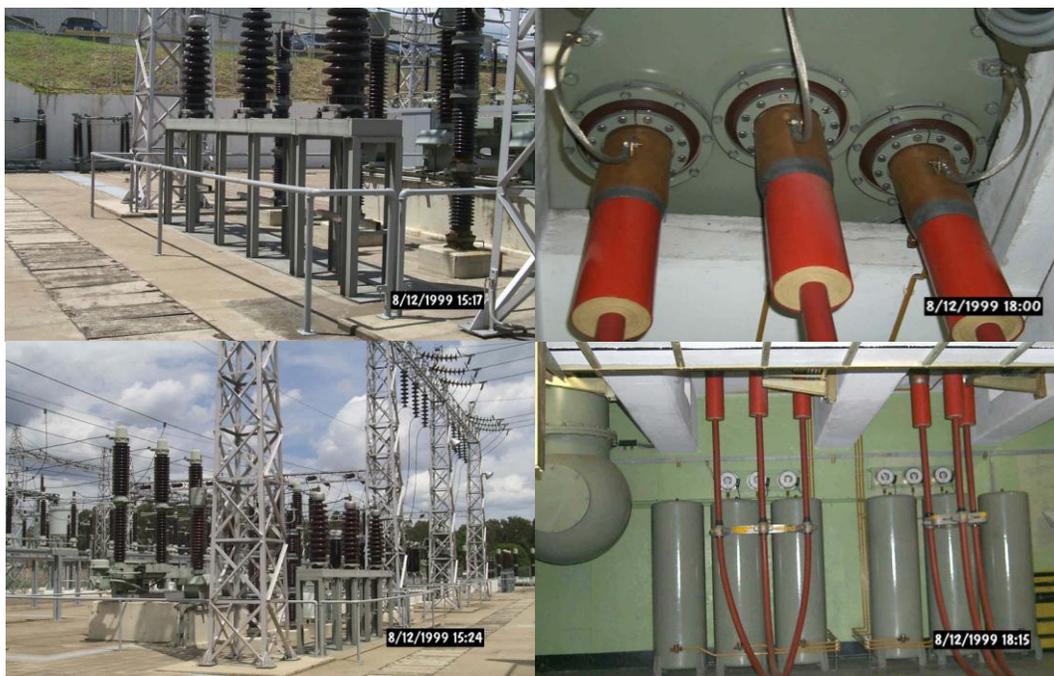


Fig. 1.7- Utilización masiva de Cables de tipo Aislamiento Extruido (XLPE) en México en el presente.

Fuente: Varias fotografías tomadas por COEMSA



1.2 Cables de energía subterráneos

En resumen un cable de energía sirve para transmitir la energía eléctrica de un lugar a otro, existen sistemas de transmisión aéreos y subterráneos, los primeros son menos costosos, más sencillos de instalar así como de detectar y reparar sus fallas, en cambio en los sistemas de cables subterráneos esto se complica y por lo tanto los costos aumentan notablemente. Aunque existen muchas desventajas en la utilización del cableado subterráneo, sobre todo económicas, esto no quiere decir que su uso no sea requerido, hoy en día los sistemas subterráneos son muy importantes, ya que aparte de proveer una instalación mucho más estética a la vista, nos garantiza la confiabilidad del servicio y nos ayuda a prevenir problemas o riesgos en industrias o lugares donde se requiere de un completo hermetismo como en refinerías de petróleo.

En la actualidad los cables XLPE son los más utilizados en México y en el mundo ya que su diseño permite que no se alteren sus características mismas para la transmisión de la energía en altas ampacidades, así como la de darle mayor protección mecánica al cable al ser instalado en lugares clasificados como peligrosos (ver Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas NOM-001 sede 2005), alta resistencia a tensiones inducidas y de protegerlo contra agentes externos del medio ambiente que lo rodea, tanto en la operación, como en la instalación. El diseño de estos cables se aprecia en la fig.1.8

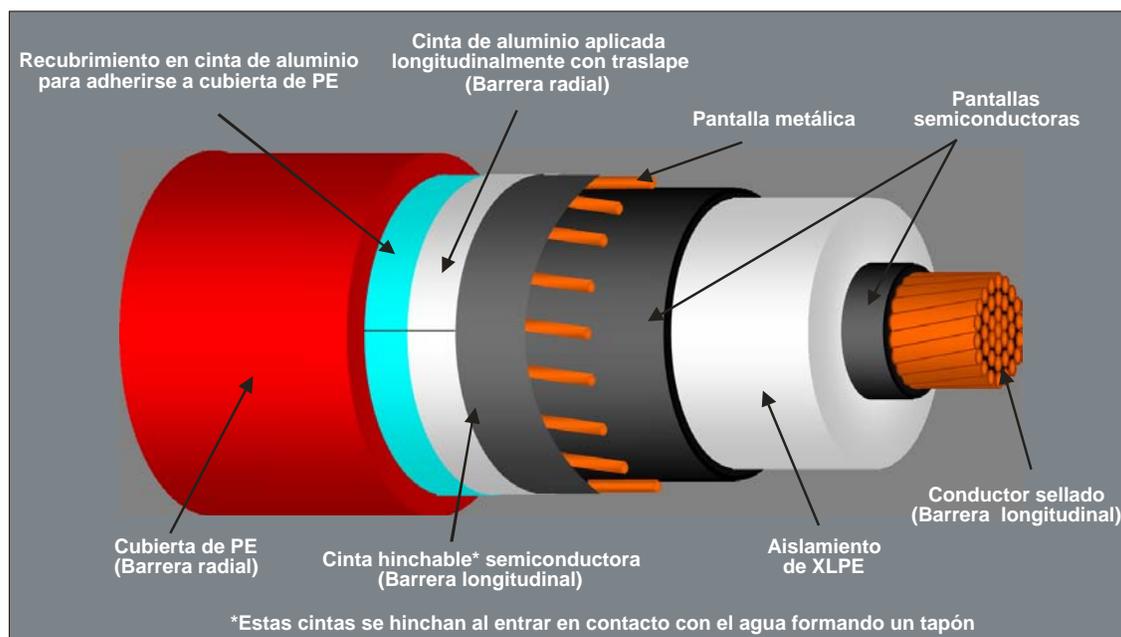


Fig. 1.8 - Nuevo diseño de cables de energía

Fuente: Condux Cables⁽³⁾

Componentes principales de un cable de energía:

- ✚ Conductor. Transmite la corriente ó energía eléctrica de un lugar a otro. A mayor área del conductor, mayor capacidad de transmisión de corriente eléctrica.



- ✚ Aislamiento. Soporta la tensión o el campo eléctrico. A mayor espesor de aislamiento, mayor soporte de tensión. Los aislamientos pueden ser de XLPE, XLPE-TR, PE y EPR.
- ✚ Cubierta. Proporciona protección contra los agentes externos: Mecánicos, Intemperismos, Agentes químicos. Estas cubiertas pueden ser metálicas, elastoméricas, termoplásticas.
- ✚ Pantalla semiconductora sobre conductor. Se usa en circuitos con tensiones de 2kV y mayores.
- ✚ Pantalla semiconductora sobre aislamiento. Se usa en circuitos con tensiones de 5kV y mayores, siempre junto con la pantalla metálica.
- ✚ Pantalla metálica. Conductor formado por hilos de cobre o aluminio. Se usa en circuitos con tensiones de 5kV y mayores.

Adicionalmente a las pantallas metálicas se colocan cintas hinchables, las cuales proporcionan un bloqueo contra el ingreso longitudinal de humedad en el cable a través de la pantalla metálica. Para evitar la penetración radial del agua en el cable cuando se rompe la cubierta, se ha desarrollado la aplicación en la cara interna de la cubierta de una cinta longitudinal de aluminio adherida a ésta. Con lo anterior se logra un diseño hermético del cable y podemos incrementar la confiabilidad en la operación de cables en ambientes húmedos y en aquellos lugares donde los niveles freáticos son elevados.

1.2.1 Función de las pantallas eléctricas

Cuando se aplica una tensión entre un conductor eléctrico y tierra, el aislamiento se somete a esfuerzos eléctricos, si estos esfuerzos son de magnitud elevada, pueden producir deterioro del material aislante y producir otros efectos indeseables al no controlarse en forma adecuada; el control de estos esfuerzos se logra gracias a las pantallas eléctricas. Una descripción del correcto funcionamiento de una pantalla es el siguiente: *“Se utilizan las pantallas eléctricas en los cables de energía con el fin de confinar en forma adecuada el campo eléctrico del aislamiento del cable o cables⁽⁴⁾”*.

Las funciones de las pantallas eléctricas de los cables de energía son las siguientes:

- ✚ Pantalla semiconductora sobre el conductor

Presenta al aislamiento una superficie cilíndrica equipotencial uniforme, para evitar concentraciones de campo eléctrico que se presentan en los intersticios de un conductor a consecuencia de la colocación de los hilos, y también presenta al aislamiento una superficie libre de huecos, para evitar descargas eléctricas que se pueden presentar en ellos. La idea de mantener una superficie uniforme es con el propósito de que las líneas de campo eléctrico sean perpendiculares a las líneas equipotenciales ver fig.-1.9



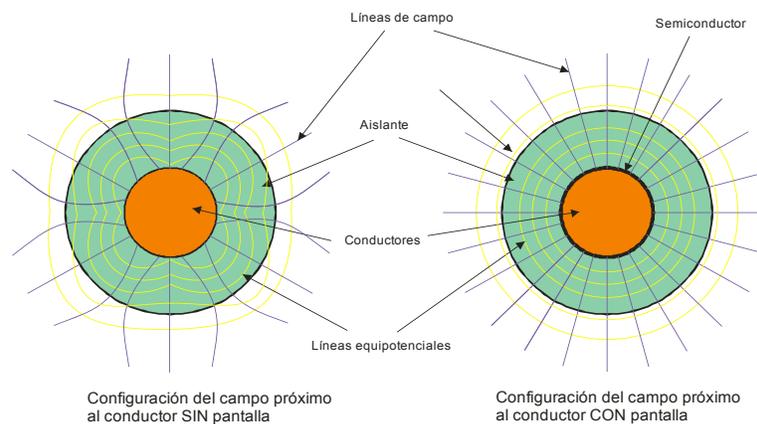


Fig.-1.9 Líneas equipotenciales y de campo eléctrico para conductores con y sin pantalla semiconductora sobre el conductor

Fuente: Condumex Cables⁽⁵⁾

✚ Pantalla semiconductora sobre el aislamiento

Asegura el contacto directo con el aislamiento, presenta al aislamiento una superficie cilíndrica equipotencial uniforme, para evitar concentraciones de campo eléctrico, y también presentan al aislamiento una superficie libre de huecos, para evitar descargas eléctricas que se pueden presentar en ellos. Esta pantalla puede ser de un material compatible con el material del aislamiento.

Las funciones de la pantalla semiconductora sobre el aislamiento junto con las pantallas metálicas son las siguientes:

a) Crear una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos en la dirección de máxima resistencia del aislamiento.

Los cables de energía al aplicarles una tensión entre el conductor y tierra, van a estar sometidos a esfuerzos que pueden ser radiales, tangenciales y longitudinales, los esfuerzos radiales se presentarán en todo momento en el aislamiento de los cables energizados, y el aislamiento cumplirá su función satisfactoriamente si el campo eléctrico se distribuye uniformemente, una distribución no uniforme causará un incremento en estos esfuerzos provocando deterioro del aislamiento y posibles fallas. En la fig. 1.10 se puede observar como se distorsiona el campo eléctrico por la cercanía de otros conductores o por una referencia a tierra cercana, como puede ser una canalización eléctrica, tuberías metálicas, hilos de tierra, etc.



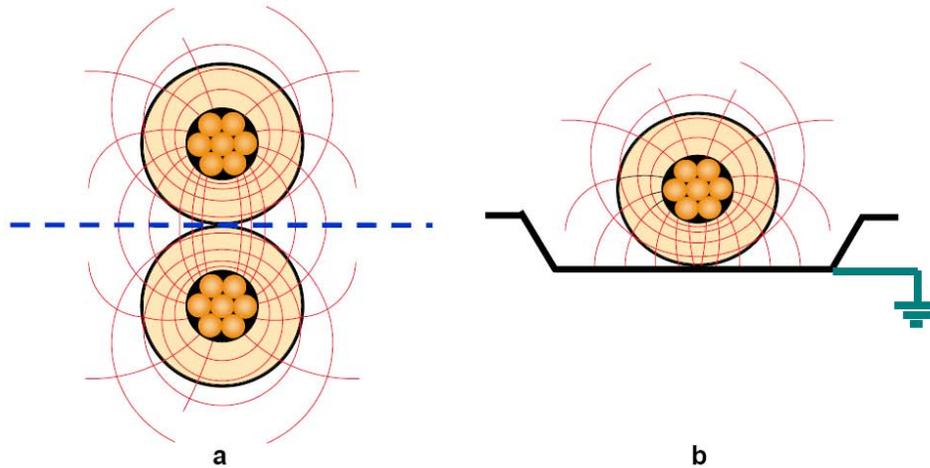


Fig. 1.10 - Distorsión del campo eléctrico por:
a) Presencia de otros conductores b) Presencia de una referencia a tierra
 Fuente: Condumex Cables⁽⁴⁾

Quando se tienen cables de energía sin pantalla, la cubierta y el medio que rodean al cable forman un dieléctrico en serie con el aislamiento, una porción de la tensión aplicada se presentará en este dieléctrico, la cual será igual al potencial que se presentará en la superficie del aislamiento, esta tensión superficial podría alcanzar el potencial del conductor, si el del dieléctrico, cubierta y el potencial de tierra es de gran magnitud, cuando la superficie del aislamiento esté cerca de secciones aterrizadas (ver fig.1.11)

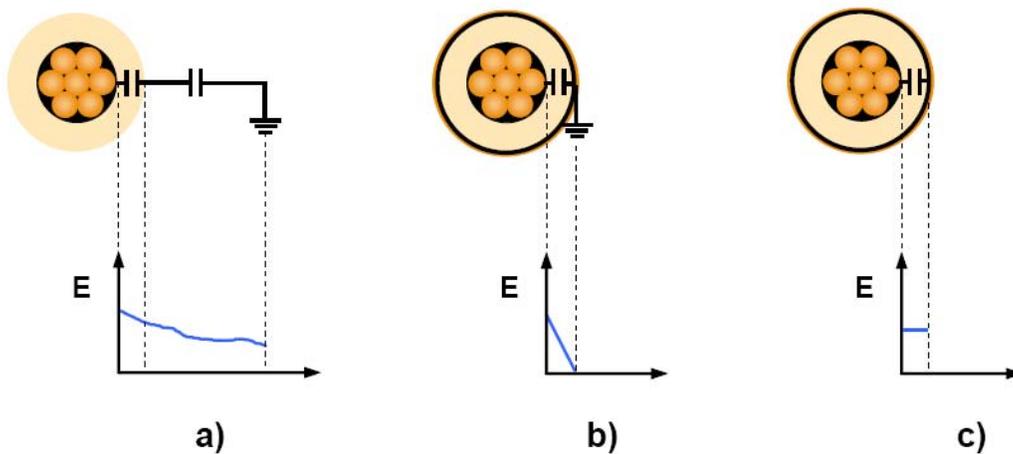


Fig. 1.11
a) Cable sin pantalla b) Cable con pantalla aterrizada c) Cable con pantalla no aterrizada
 Fuente: Condumex Cables⁽⁴⁾

Las diferentes tensiones superficiales que se presentan a lo largo del aislamiento incrementan los esfuerzos tangenciales y longitudinales que afectan la operación del cable, los esfuerzos tangenciales están asociados con campos radiales no simétricos y ocurren en cualquier cable sin pantalla, los esfuerzos longitudinales no necesariamente están asociados



con campos radiales asimétricos, y siempre lo están con la presencia de tensiones superficiales a lo largo del cable.

La conexión física adecuada de la pantalla metálica a tierra y en general la correcta aplicación de las pantallas sobre el aislamiento, asegura la eliminación de los esfuerzos longitudinales y tangenciales.

b) Proveer al cable de una capacitancia a tierra uniforme

Los cables que se instalan en ductos o directamente enterrados por lo general pasarán por secciones de terreno húmedo, seco o por ductos de características eléctricas variables, esto da como resultado una capacitancia a tierra variable y como consecuencia una impedancia no uniforme (ver fig.1.12).

Cuando se presentan en el sistema sobretensiones transitorias debidas a descargas atmosféricas o/a operaciones de maniobra, las ondas producidas por dicha sobretensión viajarán a través del cable produciéndose reflexiones en los puntos de variación de impedancia, lo que dará lugar a sobretensiones transitorias que podrían producir fallas en el cable.

Al colocar las pantallas sobre el aislamiento, se tendrán las siguientes ventajas en el cable:

- ✚ Presentar una impedancia uniforme, evitando reflexiones y eliminando la posibilidad de producir sobretensiones dañinas al aislamiento.
- ✚ Proveer al cable de la máxima capacitancia del conductor a tierra y, consecuentemente, reducir al mínimo las ondas de sobretensión.
- ✚ Absorber la energía de las sobretensiones transitorias al inducir en la pantalla una corriente proporcional a la del conductor.
- ✚ Reducir el peligro de choque eléctrico al personal y proveer un drenaje adecuado a tierra de las corrientes capacitivas.

c) Reducir el peligro de descargas eléctricas al personal en presencia de productos inflamables

Como se explicó con anterioridad, cuando la superficie externa del aislamiento de los cables con pantallas no está en contacto a tierra a lo largo de la trayectoria de la instalación, se puede presentar una diferencia de potencial considerable entre la cubierta del cable y tierra, lo cual representa una situación peligrosa, debido a las siguientes razones:

- ✚ El contacto del personal con la cubierta puede dar lugar a un choque eléctrico que pudiera incluso causar la muerte, si las corrientes de carga de una longitud considerable de cable se descargaran súbitamente en el punto de contacto. La pantalla aterrizada de modo adecuado proporciona la trayectoria necesaria para estas corrientes capacitivas.



- ✚ Aunque el contacto que se tuviera con la cubierta no fuera letal, el choque eléctrico puede dar lugar a caídas y accidentes de gravedad.
- ✚ La diferencia de potencial pudiera superar la rigidez dieléctrica del aire y producir descargas, que en presencia de materiales combustibles o explosivos serían de características desastrosas.

Por otra parte, cuando se tiene el sistema adecuado de pantallas, se deberá buscar siempre que operen a los potenciales lo más cerca a tierra como se pueda, el no conectar las pantallas a tierra o elegir un cable sin pantalla puede dar origen a las situaciones de peligro antes mencionadas. Las tensiones que se inducen en la pantalla a lo largo de la instalación puede alcanzar valores muy cercanos al potencial del conductor, lo que da lugar a una condición más peligrosa, por lo tanto, por seguridad las pantallas metálicas deben conectarse a tierra al menos en un punto, los métodos de conexión de pantalla a tierra deben observarse con especial cuidado ver Capítulo. 3 de este documento.

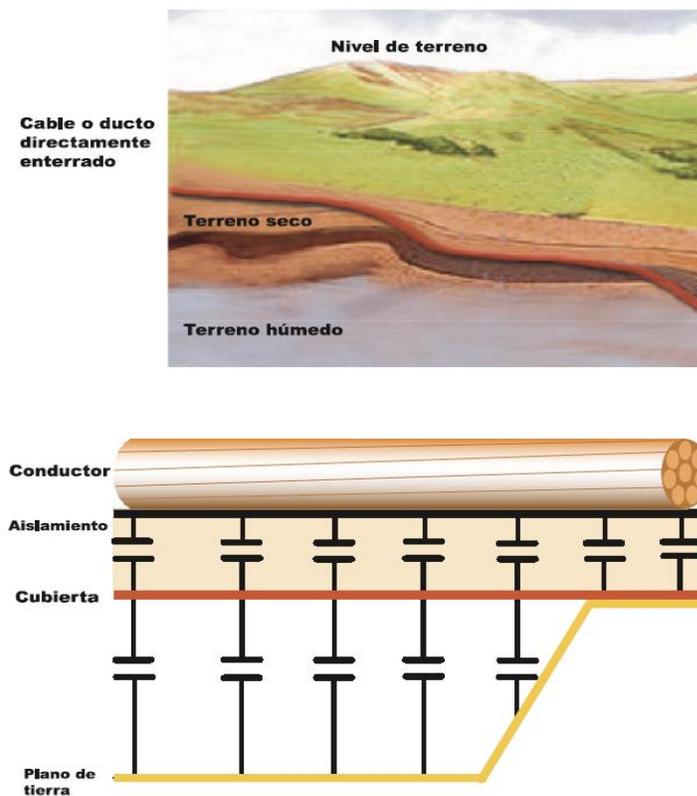


Fig.1.12 - Capacitancia variable a tierra debido a una impedancia no uniforme.

Fuente: Condumex Cables⁽⁴⁾



1.2.2 Diseño y selección de la Pantalla Metálica

Los diseños de las pantallas metálicas más comunes pueden ser de alambres de cobre o aluminio, de plomo extruido, de cintas planas de aluminio o corrugadas, o de combinación de alambres y cintas (ver fig.1.13). En el caso de cables con aislamiento de papel impregnado, la cubierta de plomo hace las veces de la pantalla. La combinación de alambres con cintas durante el diseño de pantallas metálicas se realiza con el propósito de incrementar la capacidad, para llevar las corrientes de cortocircuito al presentarse una falla en el aislamiento. Los diseños de las pantallas metálicas se realizan según las especificaciones y condiciones de uso y estos pueden ser para:

- ✚ Propósitos electrostáticos.
- ✚ Conducir la corriente de falla.
- ✚ Como neutro.

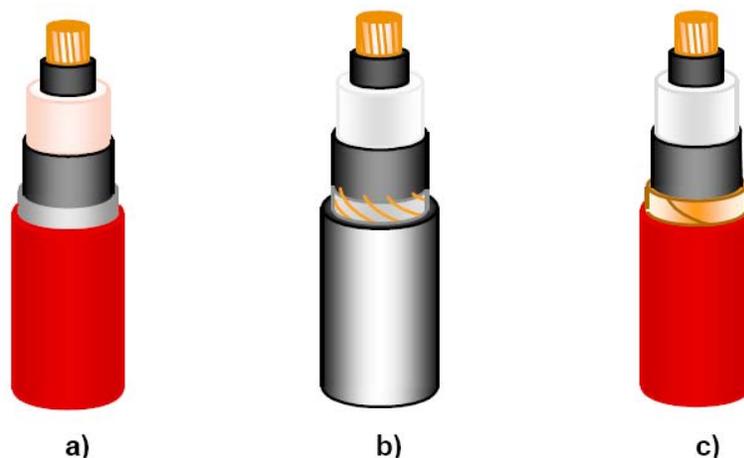


Fig. 1.13 - Tipos de pantallas metálicas.

a) Plomo b) Alambres de cobre c) Cintas de cobre o aluminio

Fuente: Condumex Cables⁽⁴⁾

A continuación se mencionan las características que se deben tomar en cuenta para la selección de pantalla de acuerdo con cada condición de uso:

a) Pantalla para propósitos electrostáticos

Estas pantallas deben ser en general de metales no magnéticos y pueden estar constituidas de cintas, alambres, o bien pueden ser cubiertas metálicas (plomo o aluminio), sin embargo las pantallas de plomo extruidas pueden perder con el tiempo su protección de hermeticidad debido al calentamiento durante la operación, vibración y a las características termo mecánicas⁽⁶⁾ que afectan y quiebran a la pantalla de plomo después de expirar su vida útil. Las pantallas constituidas a base de cintas o de alambres son generalmente de cobre normal, aunque puede utilizarse en ambos casos cobre estañado; estas últimas se utilizan donde se pudieran prever problemas graves de corrosión derivados de las condiciones de



instalación. En la tabla 1.8 se presenta el cuadro comparativo de pantallas a base de cintas con las de alambres.

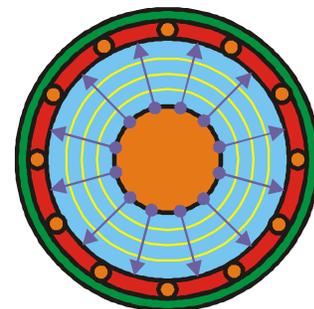
Tipo de pantalla	Ventajas	Desventajas
A base de cintas	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona una pantalla electrostática adecuada. - Reduce el ingreso de humedad en el aislamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Propiedades eléctricas inconsistentes, debido a que en el manejo se afecta el traslape. - Requiere de radios de curvatura mayores que para cables con pantalla de alambres. - Construcción vulnerable durante la instalación. - En empalmes y terminales se requiere de mayor tiempo y habilidad para ejecutar adecuadamente los cortes.
A base de alambres	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona una pantalla electrostática adecuada. - Las características eléctricas de la pantalla son consistentes y controlables. - Fácilmente se incrementa la capacidad modificando el número de alambres. - No se requiere de gran destreza para realizar cortes en empalmes y terminales. - Son menos vulnerables durante la instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permite el paso de la humedad libremente. - Requiere precauciones para evitar desplazamiento de los alambres durante la instalación.

Tabla 1.8 -Comparación de pantallas a base de cintas con las de alambres.

Fuente: Condux Cables⁽⁴⁾

Fig. 1.14 -Las pantallas metálicas confinan el campo eléctrico al interior del aislamiento.

Fuente: Características Eléctricas Condux Cables⁽⁵⁾



b) Pantallas para conducir la corriente de falla

En la pantalla metálica se puede requerir una conductancia adicional para conducir corriente de falla, dependiendo de la instalación y características eléctricas del sistema, particularmente con relación al funcionamiento de dispositivos de protección por



sobrecorriente, corriente prevista de falla monofásica a tierra y la manera en que el sistema puede ser aterrizado.

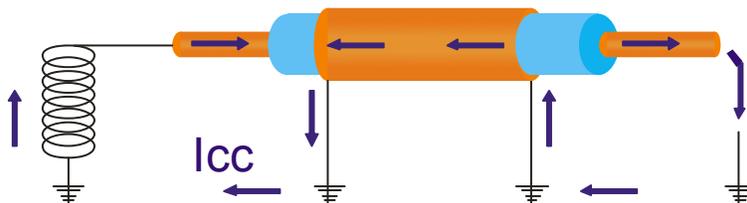


Fig 1.15 -Pantalla conectada a tierra

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

c) Como neutro

Con las dimensiones apropiadas se puede diseñar la pantalla para que en adición a las funciones descritas opere como neutro; por ejemplo, en sistemas residenciales subterráneos monofásicos.

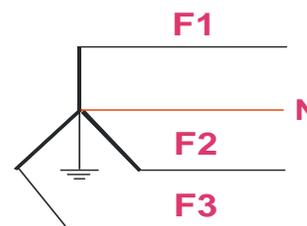


Fig. 1.16 -Funcionamiento de la pantalla neutro

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

En relación a las cubiertas metálicas, solamente los metales pueden proporcionar al cable una pantalla electrostática adecuada, además de la barrera perfecta contra la humedad que se deriva de tener una cubierta continua. Esta última característica es particularmente necesaria para los cables aislados con papel impregnado o con aislamiento sólido que operan en lugares contaminados. Por otra parte, la cubierta de plomo proporciona una conductancia adicional aprovechable para conducir corriente de falla, por los espesores que se requieren desde el punto de vista mecánico.

1.2.3 Aplicaciones de las pantallas

Como se mencionó anteriormente en circuitos con tensiones superiores a 2kV se requiere el uso de pantallas sobre el conductor, y en circuitos con tensiones de 5kV y superiores es necesario el uso de pantallas sobre el aislamiento junto con pantallas metálicas, esto quiere decir, que dentro de los límites de 2kV y 5kV, se puede no utilizar pantallas sobre el aislamiento. Es innegable que un cable con pantalla, instalado en forma apropiada, ofrece las condiciones óptimas de seguridad y confiabilidad, sin embargo, un cable con pantalla es más costoso y más difícil de manejar e instalar.

A continuación se resumen las recomendaciones de aplicaciones en que se deberá hacer uso o prescindir de las pantallas de acuerdo con las normas ICEA.



Las pantallas sobre aislamiento deben ser consideradas para cables de energía arriba de 5kV cuando exista cualquiera de las siguientes condiciones:

- ✚ Donde se involucre la seguridad del personal.
- ✚ Conexiones a líneas aéreas.
- ✚ Transición a ambiente de diferente conductancia.
- ✚ Terrenos secos de tipo desértico.
- ✚ Donde fácilmente se depositen en la superficie del cable materiales conductores, tales como hollín, sales, etc.
- ✚ Donde pudieran presentarse problemas de radio interferencia.

Existen situaciones donde se debe considerar el uso de cables sin pantalla, ya que en caso contrario crearía graves situaciones de peligro, por ejemplo:

- ✚ Cuando las pantallas no se pueden aterrizar adecuadamente.
- ✚ Cuando el espacio es inadecuado para terminar correctamente la pantalla.
- ✚ Para cables en sistemas por debajo de los 5kV.
- ✚ Cuando se tienen cables sin empalmes en tubo (conduit) metálico aéreo en interiores y en lugares secos.
- ✚ Instalados sobre aisladores en ambientes no contaminados.

1.3 Pérdidas en los cables

Básicamente las pérdidas que existen en los cables XLPE se deben a la conversión de energía eléctrica a energía en forma de calor, estas pérdidas ocurren en tres elementos que conforman el cable: Aislante, Conductor y Pantalla metálica; nosotros basando este documento en las últimas, y más adelante proponiendo mediante los métodos especiales de conexión de pantallas disminuir costos y mejorar la eficiencia de los sistemas de potencia.

1.3.1 Pérdidas en el Aislante

Estas pérdidas de energía son causadas por efectos de polarización en el aislante, y dependen fundamentalmente de las características del material y del factor de potencia. Partiendo de la hipótesis de que ningún material aislante es perfecto, esto es, que todo material conocido sujeto a una diferencia de potencial permite una circulación de corriente activa entre dos puntos de diferente potencial, podemos establecer que esa corriente eléctrica también producirá calor. La expresión para calcular las pérdidas en el aislante es la siguiente

$$P_A = V_0^2 \cdot w \cdot C_b \cdot \tan\delta \quad (1 \times 10^{-3}) \text{ [kW/km]} \dots (\text{EC.1.1})$$

Donde:

V_0 = Tensión de operación en [V]

w = Frecuencia del sistema en [Hz]

C_b = Capacitancia de operación del cable. Ésta depende del tipo de aislamiento y de su geometría.



$\tan\delta$ = Factor de pérdidas del aislamiento a la frecuencia y temperatura de operación. Los valores más típicos son los siguientes:

Tipo de aislamiento	Factor de pérdidas	SIC
XLPE	0.001	2.1
EPR	0.015	2.6
Papel impregnado	0.011	3.9

Tabla 1.9 Valores de los factores de pérdidas para diferentes tipos de aislamientos.
Fuente: Conduxmex Cables⁽⁷⁾

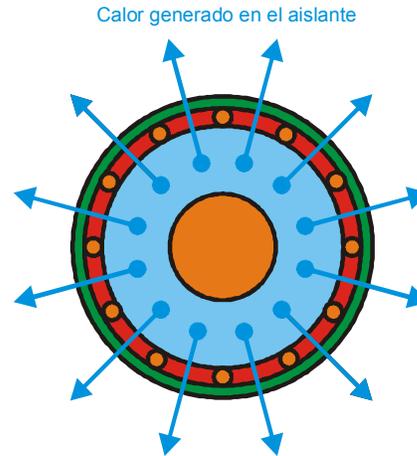


Fig.1.17 -Calor generador por el aislante.
Fuente: Características Eléctricas Conduxmex Cables⁽⁵⁾

$$C_b = \frac{0.0241 \cdot SIC}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} (\mu F / km) \quad \dots \text{(EC. 1.2)}$$

Donde:

SIC= Constante dieléctrica del aislamiento sin unidades

D = Diámetro sobre el aislamiento [mm]

d = Diámetro bajo el aislamiento [mm]

Es importante mencionar que mientras las pérdidas en el conductor y las pantallas están ligadas a las variaciones de corriente, las pérdidas en el aislante son constantes, y bastara energizar al cable, aun sin la carga para que éstas se presenten. En sistemas de cables de media tensión (5-35kV) de corta longitud (menores a 2Km), las pérdidas en el dieléctrico son despreciables.

1.3.2 Pérdidas en el Conductor

Las pérdidas por el calor generado en el conductor se describen por medio del “efecto Joule” y son función del cuadrado de la corriente que circula por él y de la resistencia efectiva que éste ofrece al paso de la corriente. Esta resistencia efectiva (R_E) deberá ser calculada a la temperatura de operación del conductor y se deberá tomar en cuenta para su cálculo los efectos de piel y de proximidad, según las condiciones de instalación y de operación. La expresión para calcular estas pérdidas es la siguiente:

$$P_C = I^2 \cdot R_E (1 \times 10^{-3}) [kW/km] \dots \text{(EC.1.3)}$$

Donde:

$$R_E = R(1+Y_S+Y_p) \dots \text{(EC.1.4)}$$



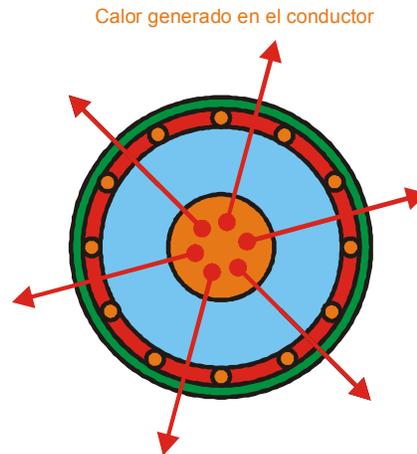


Fig.1.18 -Calor generado en el conductor.
Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

De lo comentado anteriormente desglosamos los siguientes puntos:

a) Efecto Óhmico

Dentro de los límites normales de operación de los conductores eléctricos, los únicos cambios apreciables en los materiales son los incrementos en la resistencia y la longitud que éstos sufren en virtud de cambios en su temperatura. El incremento en la longitud sólo es importante en el caso de líneas aéreas con grandes tramos entre postes. En cables aislados bastará con usar una técnica adecuada de instalación que permita absorber el cambio en las dimensiones del conductor. Lo que si es importante para los cables aislados es el cambio en el valor de la resistencia, y está depende del mismo material y de la temperatura de operación.

La resistencia del conductor a 20 °C (R_0) debe ser transformada a la temperatura (θ) de operación del cable. Así obtendremos la Resistencia del conductor corregida.

$$R = R_0 [1 + \alpha(\theta - 20^\circ\text{C})] \text{ [}\Omega/\text{km]... (EC.1.5)}$$

α = coeficiente de corrección por temperatura [$1/^\circ\text{C}$]

$\alpha = 0.00393$ para cobre

$\alpha = 0.00403$ para aluminio

$\alpha = 0.00410$ para plomo



AWG (kcmil)	(R_0) Cu Suave, 20°C [Ω /km]
2	0.523
1/0	0.329
2/0	0.261
3/0	0.207
4/0	0.164
250	0.139
300	0.116
350	0.0992
400	0.0867
500	0.0694
700	0.0496
750	0.0463

Tabla 1.10 Resistencia a corriente directa a 20°C en conductores de cobre suave con cableado concéntrico, compacto y segmental.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

b) Efecto piel

Estas pérdidas se conocen como el desplazamiento de la corriente hacia la superficie del conductor.

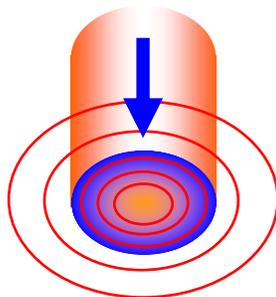


Fig.1.19 -Efecto piel en el conductor.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

Como la diferencia de potencial entre los extremos de todos los filamentos tiene que ser igual, ya que están conectados en paralelo, tendrá que verificarse que las caídas de tensión sean iguales y, por lo tanto, las corrientes en los filamentos centrales en los que la fuerza contraelectromotriz inducida es mayor tendrán que ser menores que las corrientes en los filamentos superficiales, o sea, que la densidad de corriente es mayor en la superficie del conductor que en el centro. A este fenómeno también se le conoce como "efecto pelicular" o "efecto Kelvin".

Este efecto puede ser disminuido gracias a la construcción adecuada del conductor, un ejemplo es el conductor segmentado. Con ello engañamos al flujo de la corriente (ver fig.1.20).



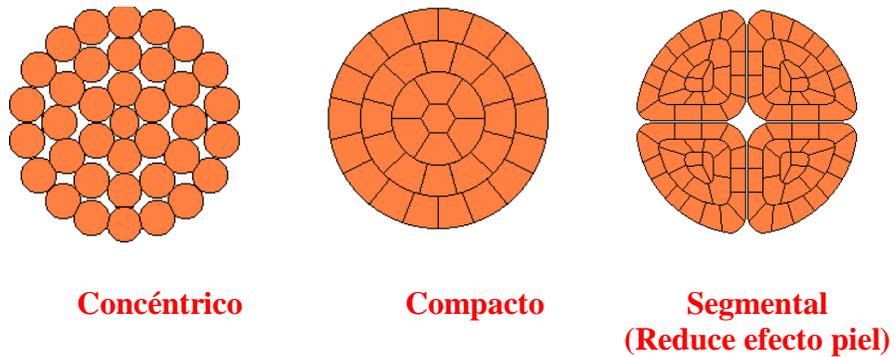


Fig. 1.20 -Diferentes construcciones para un conductor.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

El factor Y_s del efecto pelicular se calcula por medio de:

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \dots \text{(EC.1.6)}$$

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R} (1 \times 10^{-4}) K_s \dots \text{(EC.1.7)}$$

Donde:

Y_s = Factor de corrección de la resistencia por efecto piel

f = Frecuencia del sistema en [Hz]

R = Resistencia del conductor corregida

Conductor	K_s
Concéntrico	1.0
Compacto	1.0
Segmental (4segmentos)	0.435

Tabla 1.11 Valores de K_s para diversas construcciones de un conductor.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

c) Pérdidas por efecto de proximidad



Cuando por un conductor por el que fluye una corriente se encuentra cercano a otro que transporta corriente de las mismas características pero de sentido contrario, se crea una resta vectorial de la densidad de flujo, originando una reducción en la inductancia en las caras próximas y un aumento en las diametralmente opuestas, dando por resultado una distribución no uniforme de la densidad de corriente y un aumento aparente de la resistencia efectiva, la cual se calcula afectando la resistencia original por un factor Y_p . Y esto es válido para cables paralelos que alimentan cargas monofásicas y trifásicas.

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \dots(\text{EC.1.8})$$

Con:

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R} (1 \times 10^{-4}) K_p \dots(\text{EC.1.9})$$

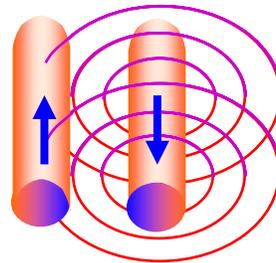


Fig.1.21 -Efecto de proximidad en dos conductores.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

Donde:

Y_p = Factor de corrección de la resistencia por efecto de proximidad

d_c = Diámetro del conductor en [cm]

s = Distancia entre ejes de los conductores en [cm]

R = Resistencia del conductor en c.d corregida a la temperatura de operación en [ohm/km]

Conductor	K_p
Concéntrico	1.0
Compacto	1.0
Segmental (4 segmentos)	0.37

Tabla 1.12 -Valores de K_p para diversas construcciones de un conductor.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁵⁾

1.3.3 Pérdidas en la pantalla metálica



Los cables de energía de A.T con aislamiento sólido son fabricados con pantallas metálicas, las cuales deberán ser aterrizadas adecuadamente para evitar pérdidas en las mismas.

Al conectar las pantallas en sus extremos, aparecen las pérdidas en pantalla provocadas por la elevada circulación de corrientes en dichas pantallas, lo cual reduce la ampacidad del cable, así que para evitar dichas pérdidas, se deberán utilizar de manera adecuada los métodos especiales de conexión.

De manera similar al conductor, las pérdidas en las pantallas metálicas se deben al “efecto Joule”, es decir, son función del cuadrado de la corriente I_p que circulan por las pantallas y de la resistencia R_p que ésta ofrece al paso de la corriente. Estas pérdidas se calculan con la siguiente expresión:

$$P_p = I_p^2 \cdot R_p (1 \times 10^{-3}) \text{ [kW/km]} \dots (\text{EC.1.10})$$

Donde:

I_p = Corriente que circula por la pantalla en [A]. Esta se puede calcular dependiendo del método de conexión a tierra usado (Ver 2.7.3 Caso de estudio).

La siguiente tabla describe los métodos especiales de conexión de pantallas metálicas a tierra.

Método de conexión	Tensión inducida en terminales del cable	Requerimiento de limitadores de tensión (LT's)	Aplicaciones típicas
Dos o más puntos	No	No	Subestaciones, circuitos de media tensión
Un solo punto	Si	Si	Circuitos de hasta 1km
Cruzada (Cross Bonding)	Solo en los puntos del Cross Bonding	Si	Circuitos de largas distancias

Tabla 1.13 -Métodos especiales de conexión de pantallas metálicas a tierra.

Fuente: High Voltages Underground Power Cables XLPE Insulated Cables⁽⁸⁾

R_p = Resistencia de la pantalla en [ohm/km]

En la tabla B1 del anexo B se mencionan los proyectos realizados por CFE entre 1999 y 2008. En estos proyectos se mencionan los métodos especiales de conexión de pantallas realizados en diferentes regiones de México.

La siguiente tabla muestra las expresiones para el cálculo de la resistencia eléctrica de pantalla y cubiertas metálicas.



Pantallas de alambres	$R_p = \rho \frac{1.07}{0.7854 \cdot n \cdot d^2} [\Omega / km]$
Tubo de plomo	$R_p = \frac{\rho}{\pi \cdot d_m \cdot t} [\Omega / km]$
Cintas de cobre traslapadas	$R_p = \rho \frac{1.02 \cdot K}{\pi \cdot d_m \cdot t} [\Omega / km]$

Tabla 1.14 -Cálculo de la resistencia eléctrica de pantalla.

Fuente: Características Eléctricas Conдумex Cables⁽¹⁰⁾

Donde:

dm =Diámetro medio de la pantalla o forro metálico en [mm]

d = Diámetro de los alambres de la pantalla en [mm]

t = Espesor de la pantalla o forro metálico en [mm] (aproximadamente 0.12 mm para cintas de cobre).

n = Número de alambres

K = Factor para incrementar la resistencia debido al contacto en el traslape (K = 1 para cables nuevos; K = 2 para cables que han estado en servicio)

ρ = Resistividad eléctrica del material de la pantalla metálica a su temperatura de operación en [ohm-mm²/km]:

$$\rho = \rho_o [1+\alpha(\theta-20^\circ\text{C})] [\Omega/\text{km}] \dots(\text{EC.1.11})$$

α = Coeficiente térmico de resistividad eléctrica de la pantalla metálica a 20 °C

θ = Temperatura de operación de la pantalla metálica.

Material	(ρ_o) Resistividad eléctrica a 20°C [Ω-mm ² /km]	(α) coeficiente de corrección por temperatura a 20°C [1/°C]
Aluminio	28.264	0.00403
Cobre suave	17.241	0.00393
Plomo	221	0.00410

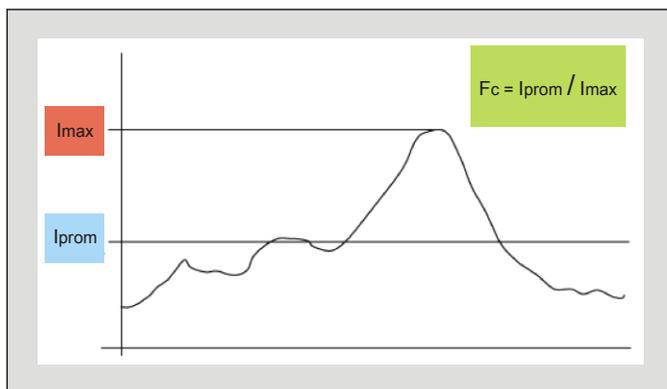
Tabla 1.15- Resistividad y coeficiente de corrección para diferentes materiales.

Fuente: Características Eléctricas Conдумex Cables⁽⁹⁾



1.3.4 Pérdidas totales en el cable

Las pérdidas en el conductor y la pantalla no son constantes, ya que la carga varía en el ciclo diario, mensual y anual; el factor de pérdidas nos permite relacionar las variaciones de carga en un ciclo (factor de carga) y calcular las pérdidas correspondientes.



Gráfica 1.2 Representación del factor de carga

Fuente: Conдумex Cables⁽⁷⁾

Las pérdidas serán entonces función de esta variación de corriente y estarán ligadas al factor de carga por el llamado factor de pérdidas F_p que se calcula con la siguiente expresión:

$$F_p = 0.3F_c + 0.7F_c^2 \dots(\text{EC.1.12})$$

Para totalizar las pérdidas, se deberán considerar, pues, ciclos diarios de operación; generalmente las pérdidas totales se toman en cuenta según periodos anuales, por lo que la expresión para evaluar pérdidas en el periodo anual quedaría:

$$P_t = [(P_C + P_P)F_p + P_A] LNH \text{ [kW} - \text{h / año]} \dots(\text{EC.1.13})$$

Donde:

L = Longitud del circuito en [km]

N = Número de cables en el sistema

H = Horas de operación en el año

F_p = Factor de pérdidas

1.3.5 Ejemplo del costo de pérdidas en pantalla metálica

Para ejemplificar lo ya mencionado se pueden calcular las pérdidas en la pantalla metálica (ver 2.7.3 Caso de estudio). Éstas pérdidas en la pantallas son nulas cuando se conecta en “Un solo punto” ya que no existe una corriente que circule por la pantalla; y para el caso de “Cross-Bonding” en el caso “ideal” (*donde el sistema se divide en secciones mayores que a su vez están divididas en tres secciones menores, donde todas estas secciones deben ser exactamente iguales en longitud, cosa que en la práctica es difícil de lograr*).

Existen pérdidas en una pantalla metálica siempre y cuando circule por la misma una corriente inducida por otro conductor, estas pérdidas son debidas a “corrientes circulantes”, dicho fenómeno se presenta en los métodos especiales de conexión: Dos o más puntos y Cross-Bonding (Cuando las secciones que lo forman son de distintas longitudes).



En este ejemplo se tomarán en cuenta las características de instalación y corrientes calculadas en el caso de estudio (Ver 2.7.3) para las conexiones en dos o más puntos y para Cross-Bonding.

DOS O MÁS PUNTOS:

Calculando la resistividad eléctrica de la pantalla metálica mediante la EC.1.11 y Tabla 1.15.

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha(\theta - 20^\circ\text{C})] \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

Donde la temperatura de operación de la pantalla es 10°C menos que la del conductor.

$$\rho = 17.241(1 + 0.00393(80 - 20))$$

$$\Rightarrow \rho = 21.3064 \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

De la tabla 1.14 se procede a calcular la resistencia para pantallas de alambre.

Donde $n=18$, $d=0.779 \text{ [mm]}$ y $\rho = 21.3064 \text{ [}\Omega/\text{km]}$

$$R_p = 21.3064 * (1.07 / (0.7854 * 18 * 0.7229^2))$$

$$\Rightarrow R_p = 3.085844 \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

Entonces con el valor de R_p se calculan las pérdidas para el método de dos o más puntos utilizando la EC.1.10, y tomando en cuenta la corriente circulante en pantallas que se obtuvo en el capítulo 2

$$P_p = I_p^2 \cdot R_p (1 \times 10^{-3}) \text{ [kW/km]}$$

$$P_p = (35.81)^2 \cdot 3.085844 (1 \times 10^{-3}) \text{ [kW/km]}$$

$$\therefore P_p = 3.957 \text{ [kW/km]}$$

Ahora se procede a calcular las pérdidas en términos de energía utilizando la EC.1.12 y EC.1.13.

$$W_p = P_p L N H F_p \text{ [kW}\cdot\text{h/año]}$$

Donde:

$$L = 3 \text{ [Km]}, N = 3$$

$$H = 24 * 365 = 8760 \text{ (con desconexión por mantenimiento deben ser aprox. } 8000)^{(7)}$$

$$F_p = 0.3 F_c + 0.7 F_c^2$$

$$F_c = I_{prom} / I_{max}$$



Considerando:

$$I_{\max}=728[\text{A}] \quad \text{ver tablas de ampacidad 1.4.5}$$

$$I_{\text{prom}}=546[\text{A}] \quad \Rightarrow F_c=75\%$$

Sustituyendo en EC.1.12.

$$F_p=(0.3*0.75)+(0.7*(0.75)^2)$$

$$F_p=0.61875$$

Finalmente sustituyendo en EC.1.13

$$W_p=(3.957)*(3)*(3)*(8760)*(0.61875)$$

$$\therefore W_p=193,031.36 [\text{KWH/AÑO}]$$

Se calcula el costo anual, suponiendo que para el periodo comprendido entre Sep07 a sep08 el costo promedio del KWH es de \$ 1.13 considerando que el circuito del ejemplo se encuentre en la zona Centro del país facturando con CFE una tarifa tipo H-T. (Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel transmisión).

$$M_p = W_p * \text{Costo /KWH}$$

$$M_p = 193,031.36 * (\$1.13)$$

Por lo tanto, el costo de las pérdidas en 1 año por corrientes circulantes en pantallas en dos o más puntos es:

$$M_p = \$ 218,125.40$$

PARA CROSS-BONDING

Tomando en cuenta el mismo valor de la Resistencia calculado en 2 o más puntos:

$$R_p=3.085844 [\Omega/\text{km}]$$

Entonces se calculan las pérdidas para Cross Bonding tomando en cuenta el valor de las corrientes circulantes en pantalla calculadas en el capítulo 2.

$$P_p = I_p^2 \cdot R_p (1 \times 10^{-3}) [\text{kW/km}]$$

$$P_p = (6.88)^2 \cdot 3.085844 (1 \times 10^{-3}) [\text{kW/km}]$$

$$\therefore P_p=0.146066 [\text{kW/km}]$$

Ahora se procede a calcular las pérdidas en términos de energía utilizando la EC.1.12 y EC.1.13. Considerando los mismo valores $L=3\text{Km}$, $N=3$ y $F_c=75\%$ y $F_p=0.61875$

$$\Rightarrow W_p=(0.146066)*(3)*(3)*(8760)*(0.61875)$$



$$\therefore W_p = 7125.4561 \text{ [KWH/AÑO]}$$

Ahora si se calcula el costo anual, suponiendo que para el periodo comprendido entre Sep07 a sep08 el costo promedio del KWH es de \$ 1.13 entonces tenemos que:

$$M_p = W_p * \text{Costo/ KWH}$$

$$M_p = 7125.4561 * (\$1.13)$$

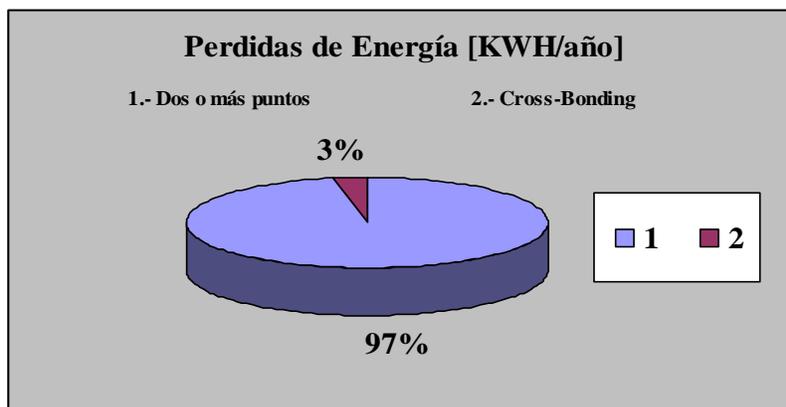
Por lo tanto, el costo de las pérdidas en 1 año por corrientes circulantes en pantallas en Cross-Bonding es:

$$M_p = \$ 8051.77$$

Finalmente el ahorro anual utilizando Cross Bonding

$$M_{pT} = \$ 218,125.40 - \$ 8051.77$$

$$\therefore \text{AHORRO} = \$ 210,073.7$$



Gráfica 1.3 – Pérdidas de energía en % si se elige el método de conexión en dos o mas puntos sobre Cross Bonding para el ejemplo planteado



1.4 Ampacidad

Es la capacidad que tiene un conductor instalado para conducir corriente. La determinación de dicha capacidad se basa en la transferencia de calor, es decir, el calor generado en cada uno de los componentes de un cable se tiene que disipar al medio ambiente a través de las resistencias térmicas del cable y del medio que lo rodea.

1.4.1 Cálculo de la ampacidad

Para nuestro caso la determinación de la capacidad de conducción dependerá de los posibles métodos especiales de conexión de pantallas metálicas a tierra mencionados en el capítulo 3 de este documento.

Por otro lado, para el cálculo de la ampacidad se tienen que conocer los valores de resistencia térmica, resistencia eléctrica y temperaturas máximas de operación del conductor, y bajo condiciones de operación dadas se puede obtener la ampacidad I , es decir:

$$T_{conductor} = T_{ambiente} + \Delta T_{dieléctrico} + I^2 R_{eléctrica} R_{térmica} \dots \text{(EC.1.14)}$$

Donde:

$$R_{térmica} = (R_i + q_s R_{sc} + q_e R_e) \dots \text{(EC.1.15)}$$

R_i = Resistencia térmica de aislamiento por unidad de longitud en [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$].

q_s = Es la razón de la suma de las pérdidas en el conductor y la pantalla metálica entre las pérdidas en el conductor.

R_{sc} = Resistencia térmica entre la pantalla metálica y el ducto por unidad de longitud, en [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$].

R_e = Resistencia térmica entre el ducto y el ambiente por unidad de longitud, en [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$].

q_e = es la razón de la suma de las pérdidas en el conductor, la pantalla metálica y el ducto entre las pérdidas en el conductor.

$\Delta T_{dieléctrico}$ = Incremento de temperatura en el conductor debido al calor generado en el aislamiento, en [$^{\circ}\text{C}$].

$$\Delta T_{die} = W_{dielec} R_{térmica\ efectiva} \dots \text{(EC.1.16)}$$

Por lo que:

$$I = \sqrt{\frac{T_{cond} - T_{amb} - \Delta T_{die}}{R_{elec} R_{ter}}} \dots \text{(EC.1.17)}$$

Como se puede apreciar el cálculo de la ampacidad de los conductores es una tarea bastante complicada, es por esta razón, que en muchos artículos técnicos y normas se incluyen tablas que indican las capacidades de conducción de corriente, bajo las condiciones más comunes (Métodos de conexión de pantallas y factor de carga), como es el caso de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005 para diversas tensiones. Al final de este capítulo se muestran las tablas para diversas capacidades de conducción de corriente para las tensiones de operación más comunes (69kV y 115kV) en México en cables



instalados y operados por CFE, tomando en cuenta la configuración de los cables, la conexión a tierra de las pantallas metálicas y el factor de carga.

1.4.2 Factores que afectan a la ampacidad

Son varios los factores que afectan la capacidad de conducción de un cable de energía, a continuación se mencionaran los más importantes:

Temperatura

La temperatura de operación de un cable varía de acuerdo al lugar de instalación, estaciones del año y profundidad de la instalación del cable. También fuentes externas de calor como tuberías de vapor y ductos incrementan la temperatura del terreno lo cual reduce la ampacidad de los cables.

La temperatura máxima de operación para conductores se menciona en la tabla 310-13.- Conductores- aislamientos y uso, de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, la temperatura de operación permisible en el conductor es de 90 °C en condiciones normales de operación, y en condiciones de falla es de 105 °C. La temperatura nominal de operación del conductor, asociada con su capacidad de conducción de corriente, debe seleccionarse y coordinarse de forma que no exceda la temperatura de operación de cualquier elemento del sistema como conectadores, otros conductores o dispositivos que tengan una temperatura menor de operación. Se permite el uso de conductores con temperatura nominal superior a la especificada para las terminales, mediante ajuste o corrección de su capacidad de conducción de corriente o ambas. Asegurando que la temperatura de operación no exceda a la del elemento de menor temperatura de operación.

Para cables con aislamiento XLPE, cuando se sobrepasa la temperatura de operación 90 °C, las características del aislamiento se ven deterioradas y por consiguiente se ve afectada la ampacidad de los cables.

La humedad es otro factor que afecta la ampacidad, en especial para cables con aislamiento XLPE y EPR con pantallas sobre el aislamiento a base de cintas textiles semiconductoras ya que este tipo de aislamientos son susceptibles a arborescencias cuando se instalan en lugares húmedos.

Pérdidas

Las pérdidas en el aislamiento, conductor y pantallas metálicas son otros factores que afectan la ampacidad de los cables de energía como ya se mencionaron anteriormente.

Resistencias térmicas

Las resistencias térmicas del aislamiento y de la cubierta de los cables dependen de sus dimensiones y de su resistividad térmica.



1.4.3 Flujo de calor

Como el calor que se genera en el conductor es función de la corriente que circula por el mismo conductor, la temperatura máxima permisible de operación en dicho conductor determina la corriente máxima que puede transmitir el cable.

La siguiente figura muestra las resistencias térmicas que debe atravesar el calor generado entre el conductor, pantalla y ducto hasta llegar al medio ambiente.

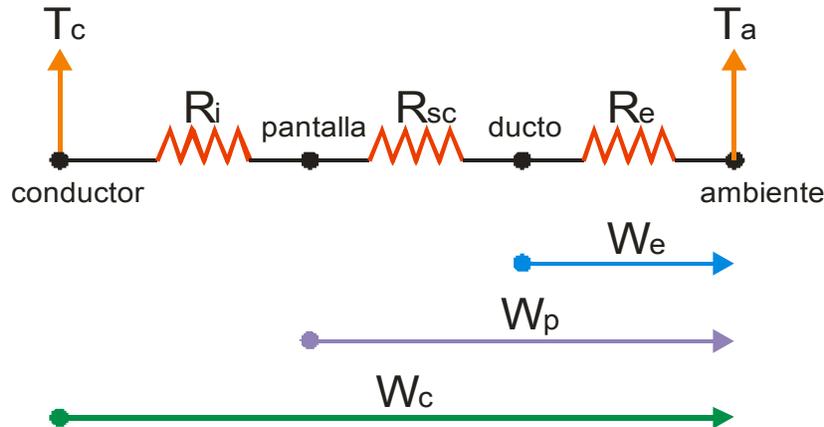


Fig. 1.22 -Flujo del calor generado en el conductor, la pantalla metálica y el ducto.
Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽¹⁰⁾

Como se menciona anteriormente el calor generado en el aislamiento siempre será constante y se producirá en todo su volumen aún sin la presencia de carga alguna, por lo que la siguiente figura nos muestra las resistencias térmicas que debe atravesar dicho calor generado en el aislamiento.

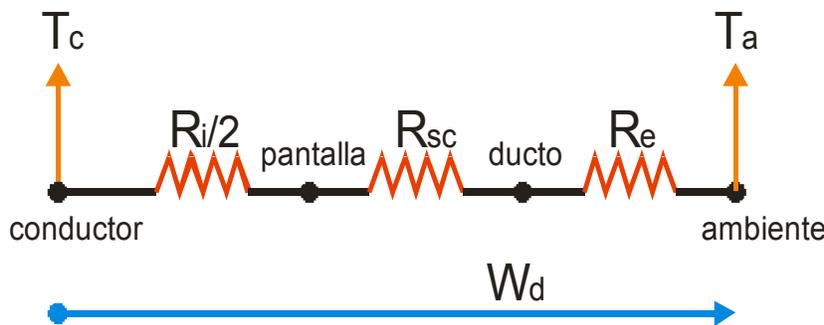


Fig. 1.23 -Flujo del calor generado en el aislamiento.
Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽¹⁰⁾

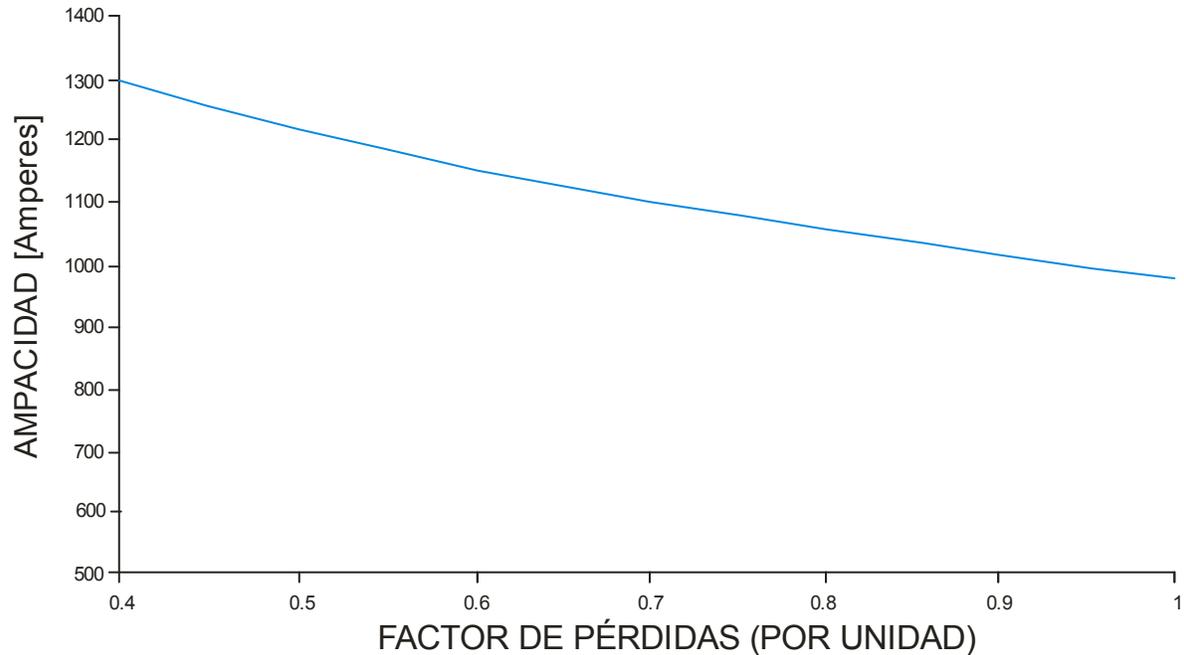
Por otro lado, para cables instalados en ductos, la resistencia térmica de la cubierta y el ducto puede dar como resultado ampacidades del 10 al 20% menor en comparación con cables que son directamente enterrados.



1.4.4 Otros factores

Factor de carga

Como se mencionó anteriormente, el factor de pérdidas está relacionado con los ciclos de cargas en un periodo, y nos permiten calcular las pérdidas, por lo que un factor de carga mayor da como resultado mayor pérdidas y por consiguiente disminución en la ampacidad. Ver tablas al final de este documento sobre ampacidad para cables de diferente sección transversal, y diversos factores de carga.

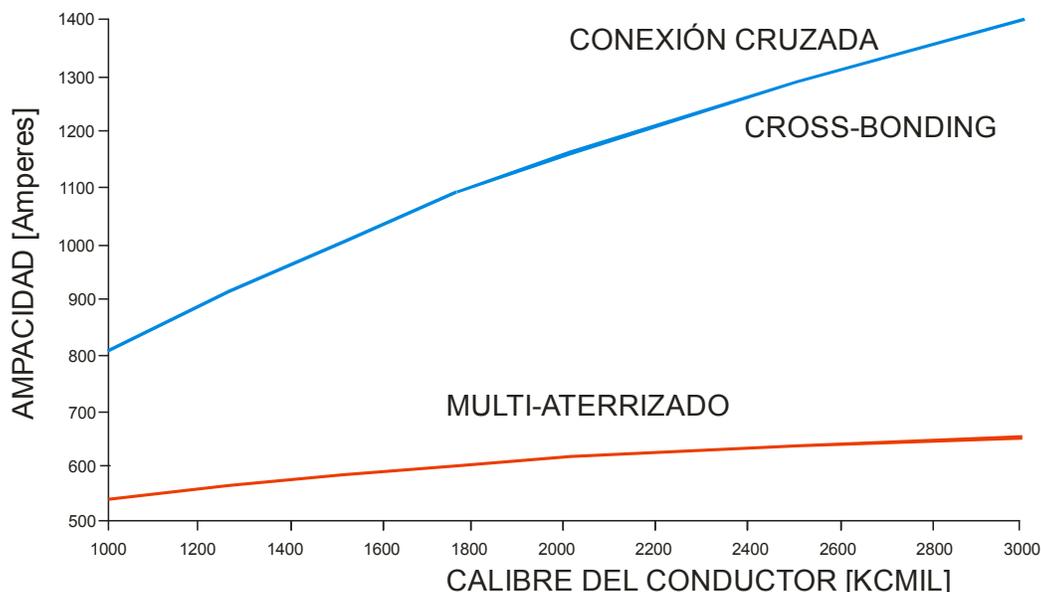


Gráfica 1.4 Ampacidad vs factor de pérdidas
Fuente: Serie Temas Selectos sobre Cables de Energía⁽¹¹⁾

Conexión de pantallas

Cuando circula corriente en las pantallas existe una generación de calor por efecto Joule (I^2R), esta generación de calor se suma al calor generado en el conductor también por efecto Joule (I^2R), debido a esto, cuando circulan corrientes en las pantallas, se debe reducir el calor generado en el conductor, para no sobrepasar la temperatura máxima de operación del cable, por lo tanto, la capacidad de conducción de corriente de cables con las pantallas aterrizadas en dos ó más puntos es menor que la de los cables con las pantallas aterrizadas en un solo punto. Sin embargo, en cables que tienen pantallas metálicas con un área transversal pequeña, esta reducción de la capacidad de conducción de corriente del conductor puede ser prácticamente despreciable.





Grafica 1.5 Ampacidad para conexión de pantallas metálicas a tierra.

Fuente: Serie Temas Selectos sobre Cables de Energía⁽¹¹⁾

Tensiones inducidas

Como se verá mas adelante en el cálculo de tensiones inducidas, el permitir que haya flujo de corriente en pantallas metálicas generará pérdidas que reducen la ampacidad del cable de un 30 a 40%; es por ello la importancia de la conexión de pantallas de este documento.

1.4.5 Tablas de Ampacidad para las tensiones de operación de 69kV y 115kV

Las siguientes tablas muestran las diversas ampacidades para cables con tensiones de operación de 69kV y 115kV instalados y operados por CFE, tomando en cuenta la configuración de los cables, la conexión a tierra de las pantallas metálicas y el factor de carga.

Fuente:CFE, Normas de Distribucion-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽¹³⁾

TABLA 1.15-CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE PARA UNA LINEA EN CONFIGURACION TREBOL CON CONEXION A TIERRA DE LA PANTALLA METALICA EN UN SOLO PUNTO Y CON UN FACTOR DE CARGA AL 50%					
CONDUCTOR		TENSIONES			
CALIBRE	SECCION	69 kV		115kV Y 138 kV	
		Al	CU	Al	CU
KCM	EN MM2				
500	253.4	507	646	N.D	N.D
750	380	732	929	630	800
1000	506.7	863	1087	745	938
1250	633.4	988	1234	852	1064
1500	760.1	1089	1345	940	



1750	886.73	1217	1543	1209	1535
2000	1010.4	1312	1658	1305	1651

TABLA 1.16-CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE PARA UNA LINEA EN CONFIGURACION TREBOL CON CONEXION A TIERRA DE LA PANTALLA METALICA EN UN SOLO PUNTO Y CON UN FACTOR DE CARGA AL 75%

CONDUCTOR		TENSIONES			
CALIBRE	SECCION	69 kV		115kV Y 138 kV	
KCM	EN MM2	Al	CU	Al	CU
500	253.4	397	573	N.D	N.D
750	380	559	710	556	705
1000	506.7	654	824	650	819
1250	633.4	743	928	738	922
1500	760.1	815	1007	811	1002
1750	886.73	907	1151	901	1143
2000	1010.4	982	1332	968	1224

TABLA 1.17-CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE PARA UNA LINEA EN CONFIGURACION TREBOL CON CONEXION A TIERRA DE LA PANTALLA METALICA EN UN SOLO PUNTO Y CON UN FACTOR DE CARGA AL 100%

CONDUCTOR		TENSIONES			
CALIBRE	SECCION	69 kV		115kV Y 138 kV	
KCM	EN MM2	Al	CU	Al	CU
500	253.4	397	506	N.D	N.D
750	380	542	668	491	624
1000	506.7	631	795	574	723
1250	633.4	712	889	648	810
1500	760.1	779	962	710	955
1750	886.73	865	1096	873	1108
2000	1010.4	927	1172	937	1185

TABLA 1.18-CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE PARA UNA LINEA EN CONFIGURACION TREBOL CON CONEXION A TIERRA DE LA PANTALLA METALICA EN DOS PUNTOS Y CON UN FACTOR DE CARGA AL 50%

CONDUCTOR		TENSIONES			
CALIBRE	SECCION	69 kV		115kV Y 138 kV	
KCM	EN MM2	Al	CU	Al	CU
500	253.4	483	600	N.D	N.D
750	380	690	849	578	697
1000	506.7	799	970	694	844
1250	633.4	874	1031	761	901



1500	760.1	951	1109	827	1121
1750	886.73	1042	1227	1005	1172
2000	1010.4	1108	1296	1066	1233

TABLA 1.19-CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE PARA UNA LINEA EN CONFIGURACION TREBOL CON CONEXION A TIERRA DE LA PANTALLA METALICA EN DOS PUNTOS Y CON UN FACTOR DE CARGA AL 75%

CONDUCTOR		TENSIONES			
CALIBRE	SECCION	69 kV		115kV Y 138 kV	
KCM	EN MM2	Al	CU	Al	CU
500	253.4	426	528	N.D	N.D
750	380	519	635	521	641
1000	506.7	595	717	601	728
1250	633.4	641	749	651	767
1500	760.1	694	801	704	819
1750	886.73	755	879	767	900
2000	1010.4	805	924	813	948

TABLA 1.20-CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CORRIENTE PARA UNA LINEA EN CONFIGURACION TREBOL CON CONEXION A TIERRA DE LA PANTALLA METALICA EN DOS PUNTOS Y CON UN FACTOR DE CARGA AL 100%

CONDUCTOR		TENSIONES			
CALIBRE	SECCION	69 kV		115kV Y 138 kV	
KCM	EN MM2	Al	CU	Al	CU
500	253.4	374	463	N.D	N.D
750	380	502	613	443	532
1000	506.7	572	689	527	638
1250	633.4	611	713	567	666
1500	760.1	660	761	612	776
1750	886.73	715	832	693	795
2000	1010.4	756	872	729	830



CAPITULO 2

TENSIONES Y CORRIENTES INDUCIDAS EN PANTALLAS METÁLICAS

2 Tensiones Inducidas en las Pantallas Metálicas

El problema de cuantificar y minimizar las tensiones inducidas en las pantallas de los cables de A.T, se refiere fundamentalmente a los cables de un solo conductor, ya que las variaciones del campo magnético en los cables trifásicos o cables de un sólo conductor en configuración trébol se anulan a una distancia relativamente corta del centro geométrico de los conductores y consecuentemente, las tensiones que se inducen en sus pantallas son tan pequeñas que pueden despreciarse. Analizaremos este fenómeno para el caso de circuitos que utilicen cables de un sólo conductor.

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 cortarán al otro conductor y se inducirá una tensión en este último, como se ilustra en la figura 2.1.

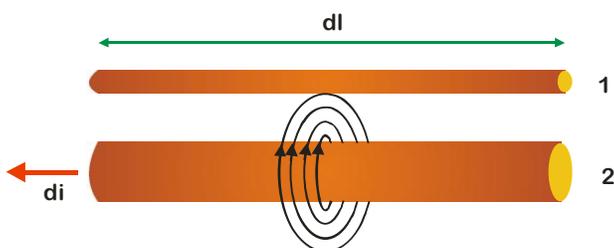


Fig. 2.1 -Tensión inducida entre dos conductores paralelos.

Fuente: Condux Cables⁽¹⁾

Las variaciones del campo magnético en el conductor 2 harán que la tensión inducida en 1 varíe en función del tiempo y de la magnitud de la corriente en el conductor 2. Esto es de manera general, para el caso particular de cables con aislamiento sólido como se verá a continuación.

En la figura 2.2 la corriente alterna i que circula por el conductor central crea un campo magnético cuyas líneas de flujo enlazan a la pantalla metálica, induciéndose en ella una tensión a tierra cuya magnitud aproximada está dada por ecuaciones, cuyas variables están en función de la posición relativa que guardan entre sí el conductor y la pantalla metálica.



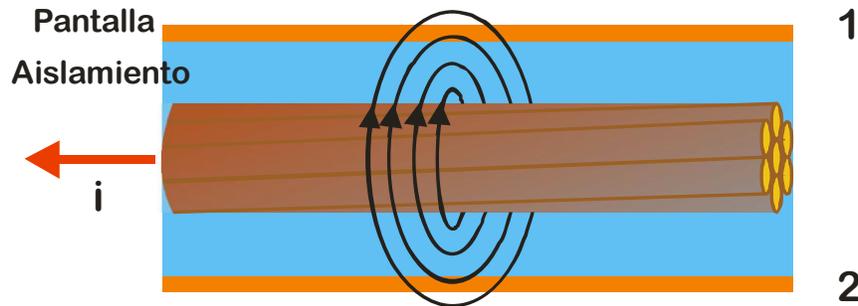


Fig. 2.2 -Tensión inducida en la pantalla metálica de un cable de media tensión.
Fuente: Conдумex Cables⁽¹⁾

2.1 Conexión a Tierra

La conexión de las pantallas metálicas a tierra es de gran importancia, si los extremos no se conectan, se inducirá en la pantalla una tensión muy cercana al potencial del conductor, de manera similar al secundario de un transformador; por lo que se debe procurar aterrizar las pantallas (o cubierta metálica), para que de esta forma se evite peligros de choque eléctrico al personal y posible daño al cable, por efecto de sobretensiones inducidas en las pantallas que pudieran perforar las cubiertas.

Usualmente, las conexiones se realizan en un punto, ver figura 2.3(a), o en dos o más puntos, figura 2.3(b). El tipo de conexión a tierra debe analizarse con especial cuidado, en función de la tensión máxima que se pudiera alcanzar.

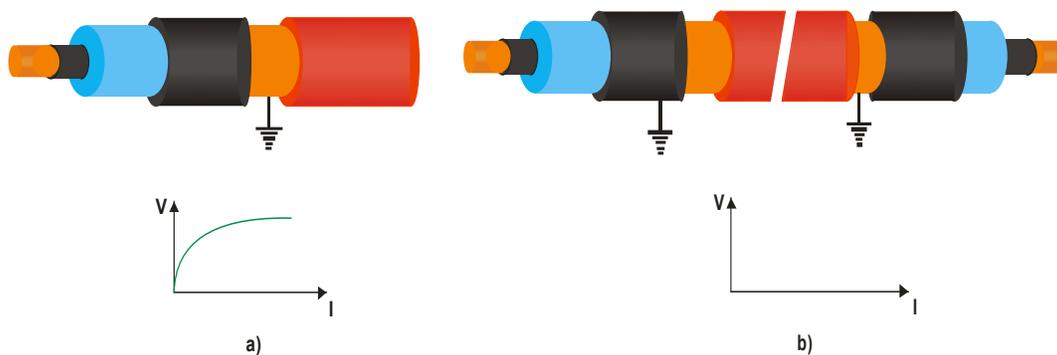


Fig. 2.3 -Tensión inducida en la pantalla metálica cuando se aterriza en:
a) un punto b) dos o más puntos
Fuente: Conдумex Cables⁽¹⁾

Cuando la pantalla del cable está aterrizada en ambos extremos, como sucede en la mayoría de los casos encontrados en la práctica, la tensión inducida producirá la circulación de corriente a través de la pantalla. Esta corriente inducida produce a su vez una caída de tensión que, punto a punto, es igual a la tensión inducida, y el efecto total de ambos fenómenos es igual a cero.



Por lo anterior, el potencial a tierra de las conexiones de los extremos se mantiene a lo largo de la pantalla del cable, sin embargo, es conveniente aterrizar la pantalla en el mayor número de puntos posibles, por si llegara a abrirse alguna de las conexiones.

Se conectan a tierra las pantallas metálicas de los cables en todos aquellos puntos accesibles al personal (principalmente en los empalmes y en las terminales), garantizando una diferencia de potencial nula entre pantalla y tierra en esos puntos; sin embargo, el hecho de conectarlas entre sí y a tierra en dos o más puntos del circuito permite la circulación de corriente, cuya magnitud esta en función de la impedancia de la pantalla, esta corriente produce tres efectos desfavorables en el cable:

- ✚ Produce pérdidas.
- ✚ Puede reducir notablemente la ampacidad de los cables sobre todo en calibres grandes (350 kcmil y mayores).
- ✚ Produce calentamientos que pueden llegar a dañar los materiales que lo rodean (cubierta del cable o del aislamiento que interrumpe la pantalla en los empalmes).

A pesar de las desventajas arriba mencionadas, se recomienda conectar entre sí y a tierra las pantallas metálicas de los cables de A.T., en todos aquellos puntos accesibles al personal de operación y mantenimiento.

Cuando el cable está aterrizado en un punto, es importante conocer cuál es la tensión máxima alcanzada en el extremo no aterrizado para procurar el aislamiento necesario en ese punto.

2.2 Valores de las tensiones inducidas

Los valores de las tensiones inducidas pueden ser encontrados utilizando la gráfica 2.1. Para un circuito típico teniendo una corriente I .

$$\frac{S}{d} \dots(\text{Razón.2.1})$$

Donde:

S Es el espacio entre cables de centro a centro en [mm]

d es el diámetro medio de la pantalla ($2r_o$) en [mm]

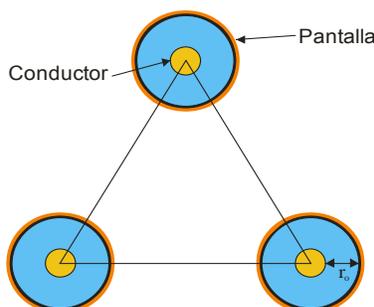
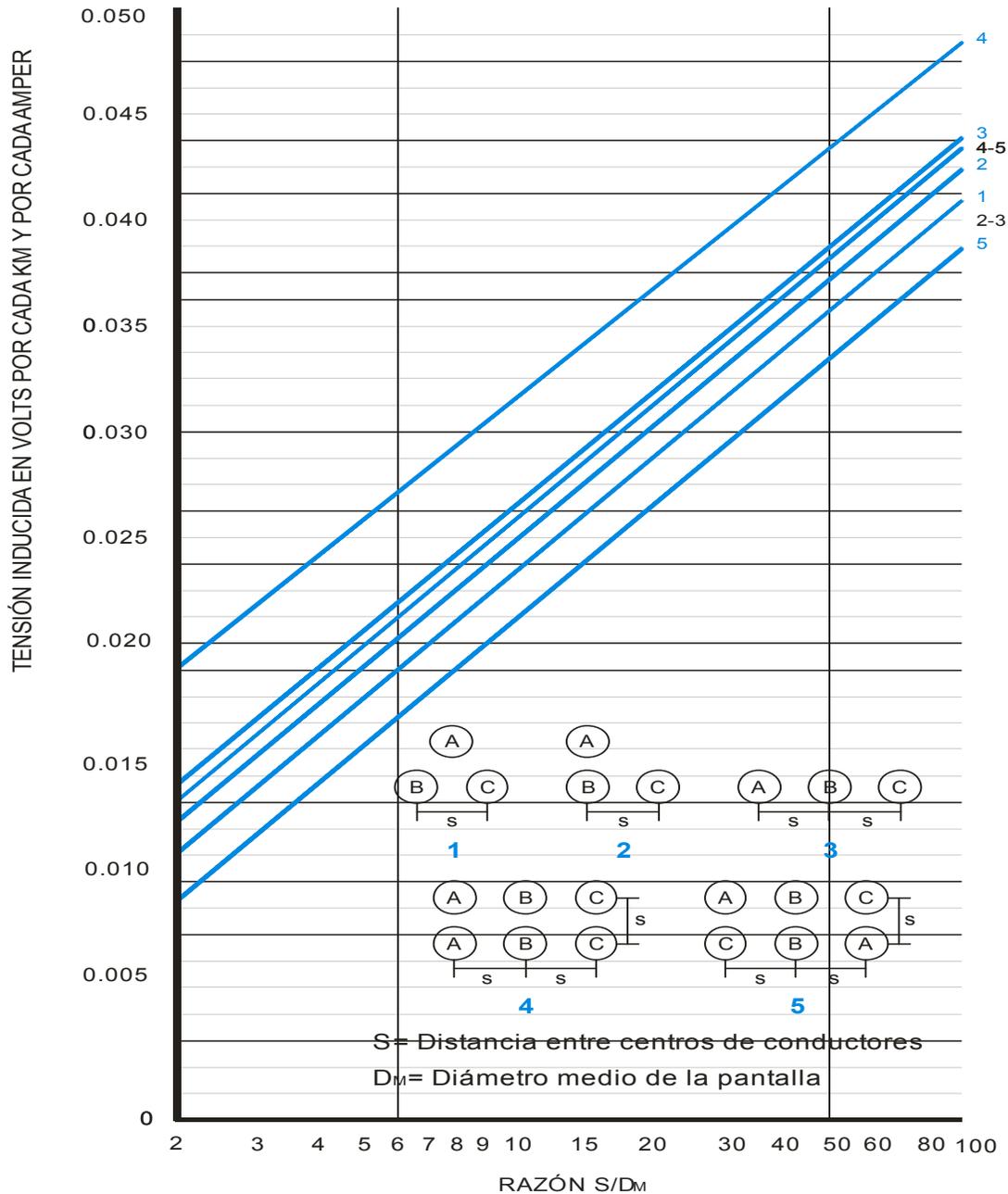


Fig. 2.4 - Configuración trébol.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾



En algunos puntos la pantalla puede quedar expuesta, y entrar en contacto con el personal de instalación quien puede estar cerca de ese potencial a tierra que podría resultar muy peligroso; es por eso, que en la práctica se debe especificar la tensión máxima permitida durante la operación a plena carga y de esta manera, se podrá detectar la tensión que exceda los límites durante los transitorios que se presenten en el sistema debidos a sobretensiones de origen interno y externo (ver anexo D). La tensión máxima permitida a plena carga puede variar dependiendo de cada país.



Grafica 2.1 - Tensión inducida en pantallas metálicas.

Fuente: Condux Cables⁽¹⁾



Para encontrar el potencial con respecto a tierra alcanzado en cada kilómetro de longitud del cable, para la configuración trébol con el método de conexión en un sólo punto podemos utilizar la gráfica 2.1 así como las tres ecuaciones mostradas en el formulario para el configuración trébol, sin olvidar que éstas ecuaciones se tienen que multiplicar por la longitud del conductor.

Otra forma de ver esta expresión para obtener la tensión inducida en la pantalla metálica de cables de A.T en configuración trébol se calcula en forma general con la siguiente fórmula:

$$E_p = X_m IL \quad \dots(\text{EC.2.2})$$

Donde:

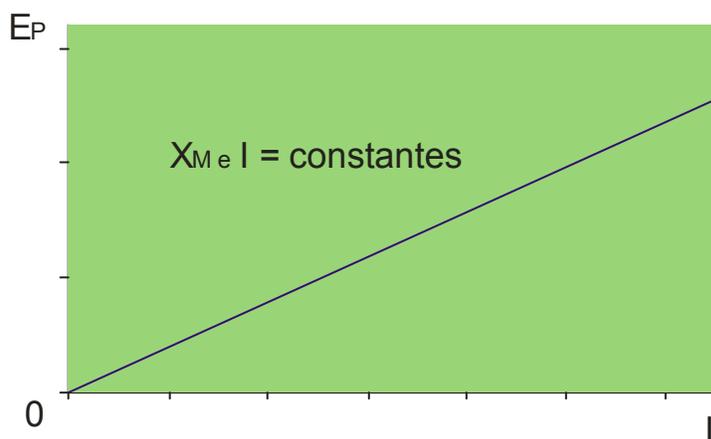
E_p = Tensión inducida en la pantalla de un cable en [V]

L = Longitud del cable en [Km]

X_m = Reactancia Inductiva mutua entre el conductor y las pantallas en [Ohm/Km]

I = Corriente en el conductor en [A]

Como se puede apreciar en la ecuación, la tensión inducida depende de la corriente en el conductor, a mayor corriente, mayor tensión inducida. La tensión inducida también depende de la reactancia inductiva mutua (X_m), a mayor reactancia inductiva mutua⁽²⁾ (ó a mayor separación entre cables), mayor tensión inducida. En la grafica 2.2 se presenta una gráfica E_p contra L , con X_m e I constantes, en esta gráfica se aprecia que al aumentar L aumenta E_p , es decir al aumentar la longitud de los cables del circuito, cuando las pantallas están aterrizadas en un sólo punto, aumenta linealmente la tensión inducida en las pantallas.



Gráfica 2.2 - Gráfica de E_p contra L , con X_m e I constantes.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

2.3 Tensiones inducidas y su relación con los métodos de conexión

La tensión inducida en las pantallas metálicas de una conexión especial a tierra aparece cuando las corrientes a plena carga (balanceadas) fluyen a través del conductor del cable, esta tensión aumenta a lo largo de la pantalla a partir del extremo conectado directamente a tierra, para conexiones en un sólo punto, mientras que para conexiones cruzadas esta tensión es mayor en los empalmes; en el caso en que las tensiones en cada una de las tres



fases sea diferente, debe tomarse como referencia la mayor para establecer los límites de tensión utilizados, normalmente las pantallas metálicas cuentan con un potencial a tierra despreciable, pero en los métodos especiales de conexión de pantallas esta tensión aumenta por lo que debe considerarse, esta consideración servirá para aspectos de seguridad y diseño, el uso de conexiones especiales trae consigo un aumento en las sobretensiones de pantalla durante los transitorios del sistema, donde las magnitudes de estas sobretensiones deben ser consideradas.

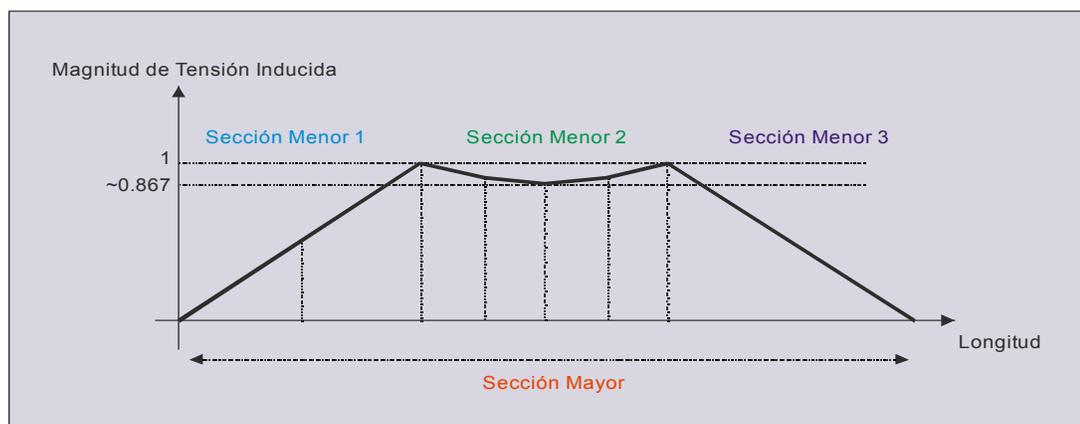
2.3.1 Conexión en un sólo punto

En la gráfica 2.1 se muestran las tensiones inducidas en pantallas metálicas en cables de A.T bajo condiciones normales de operación.

2.3.2 Conexión cruzada en secciones

Para el caso de la conexión cruzada en secciones, en la sección menor 1 y 3 de la gráfica 2.3, se muestran los valores máximos de tensión inducida en pantalla que se presentan en dichos puntos, y para el cálculo de la máxima tensión inducida se utilizara la sección menor de mayor longitud; para la conexión cruzada en secciones “modificada” esta tensión máxima calculada se reduce a un 13% (ver anexo C), esta reducción solo aplica cuando las dos secciones menores (subsecciones) son iguales (esto es $L_1=L_2=0.5L$). (Para más detalles de estas conexiones ver capítulo tres, sección 3.4.4).

Cuando la sección mayor no es igual, la tensión inducida en pantalla puede tomarse de los cálculos de la mayor de las dos secciones menores aterrizadas, por otro lado, cuando la sección mayor no es exactamente igual se generará una corriente significativa en la pantalla y podría haber reducción de la tensión inducida en la pantalla metálica.



Grafica 2.3 - Magnitud de la tensión inducida para la conexión cruzada en secciones.

Fuente: Single Core Cable Screen Bonding⁽³⁾

La magnitud de la tensión inducida a lo largo de las tres secciones menores, para la conexión cruzada con transposición también se puede interpretar mediante un diagrama fasorial como se muestra en la figura 2.5



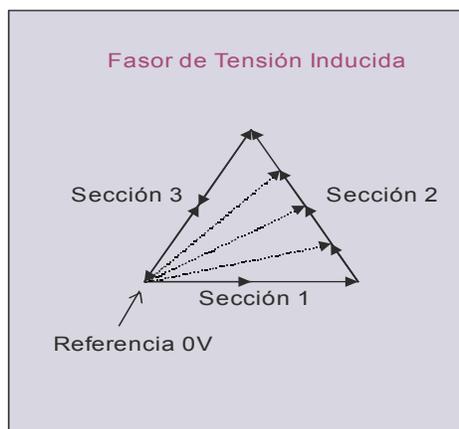


Fig. 2.5 - Diagrama fasorial de la tensión inducida en cables en conexión cruzada en secciones con transposición.

Fuente: Single Core Cable Screen Bonding⁽³⁾

2.3.3 Conexión cruzada continua

Cuando el sistema de cables de A.T. consiste en un número de secciones menores exactamente divisible entre tres, y los cables están transpuestos, para que cada uno en sus tres posiciones ocupe un tercio del total de la longitud de cada sección mayor, entonces no habrá flujo de corriente en la pantalla y las máximas tensiones inducidas en la pantalla para cada una de las secciones están dadas la gráfica 2.3; en un sistema real las secciones menores varían en su longitud, y la tensión inducida en la pantalla puede tomarse de los cálculos de la sección menor de mayor longitud, cuando el flujo de corriente en la pantalla es considerable, las tensiones inducidas en la misma se reducen considerablemente.

2.4 Análisis de tensiones transitorias

Las tensiones transitorias pueden ocurrir en las pantallas de los cables de A.T. que están conectadas en un solo punto o en conexión cruzada. Estas tensiones transitorias son causadas normalmente por:

- ✚ Impulsos de corriente causadas por descargas atmosféricas que entran al sistema de cables subterráneos desde las líneas aéreas.
- ✚ Condiciones de falla.
- ✚ Transitorios debidos a maniobras de interruptores (Ver anexo D).

Los limitadores de tensión de pantallas (LT's) se utilizan normalmente para limitar las sobretensión en pantallas de los cables durante transitorios, sin embargo, la cantidad de energía que los limitadores deben disipar se incrementa con un nivel bajo de protección y con distancias grandes entre los limitadores.



Las sobretensiones en pantalla son fundamentalmente el resultado de dos factores: el primero se debe a la unión entre fases en un registro en la cual se crea un flujo magnético, el segundo es causado por la discontinuidad de ondas presentes en los empalmes con interrupción de pantalla, estas ondas son creadas por descargas atmosféricas, maniobras de interruptores y fallas en las interrupciones de pantallas.

Por lo general, para el cálculo de las sobretensiones transitorias se utilizan programas de computo que son capaces de modelar efectos que dependen de la frecuencia nominal, los cuales son requeridos para el cálculo exacto de los requerimientos de la disipación de energía de los LT's cuando se utilizan los métodos especiales de conexión de pantallas. En la actualidad para realizar el cálculo de los transitorios en las pantallas, así como la energía que debe ser disipada, se utiliza la simulación por computadora con infinidad de softwares, donde sólo es necesario introducir las características de la instalación, así como características del transitorio para que el programa calcule en forma automática los datos deseados; cabe destacar que la mayoría de estos programas son caros y hay que pagar una licencia de costo elevado para poder utilizarlos.

2.5 Corrientes inducidas en las pantallas metálicas

A pesar de que el cálculo de corrientes inducidas en las pantallas metálicas de cables de A.T es conocido desde hace muchos años, y se han presentado diversas metodologías de cálculo, hemos encontrado que en México en general no se comprende el fenómeno y se diseñan sistemas de cables de A.T. sin tomarlo en cuenta de manera adecuada. Para entender el fenómeno de tensiones y corrientes inducidas (TCI) es primordial comprender algunos conceptos electromagnéticos, los cuales se describen a continuación.

2.5.1 Campo Magnético

El campo magnético es producido por cargas eléctricas en movimiento, donde al movimiento de cargas se le llama corriente eléctrica, la corriente eléctrica en materiales conductores es producida por el movimiento de electrones con carga eléctrica negativa. En la figura 2.6 se muestra el campo magnético producido por el paso de la corriente eléctrica a través de un conductor cilíndrico.

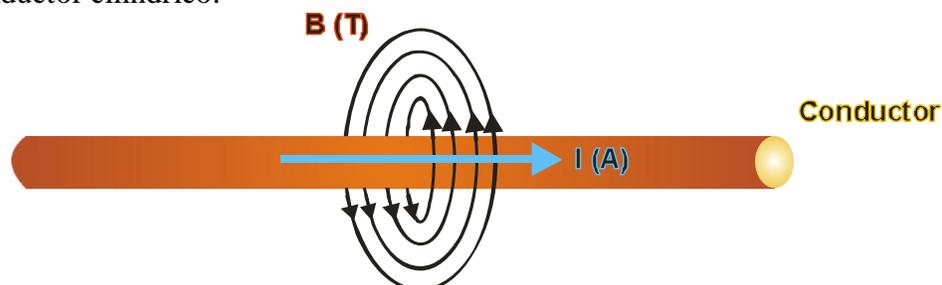


Fig. 2.6 - Campo magnético producido por una corriente eléctrica.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾



2.5.2 Flujo Magnético

Cuando un campo magnético atraviesa una superficie se forma un flujo magnético, el cual se define como el producto del campo magnético perpendicular a la superficie por el área de la superficie que atraviesa.

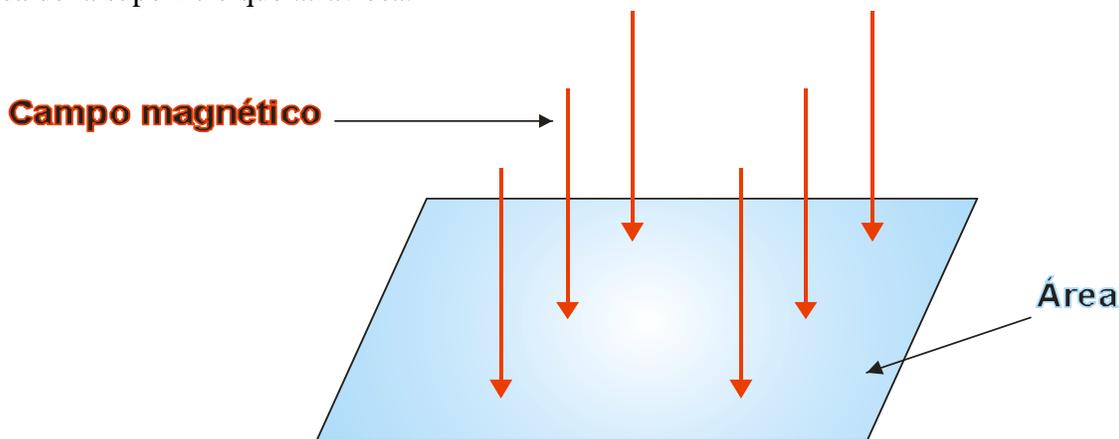


Fig. 2.7- Flujo magnético.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

Esto se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$\Phi = B_{\perp} A \dots (\text{EC.2.3})$$

Donde:

ϕ = Flujo magnético en weber [Wb]

B_{\perp} = Campo magnético perpendicular a la superficie en tesla [T]

A = Área de la superficie en [m²]

En caso de que el campo magnético perpendicular a la superficie no sea constante en toda su área, la fórmula anterior se substituye por una integral:

$$\phi = \int B_{\perp} dA \dots (\text{EC.2.4})$$

Donde:

dA = Diferencial de área en [m²]

2.5.3 Fuerza Electromotriz y Corriente Inducida

Cuando el flujo magnético a través de una superficie varía con el tiempo se induce en el perímetro de la superficie una fuerza electromotriz o tensión eléctrica, como se aprecia en la figura 2.8.



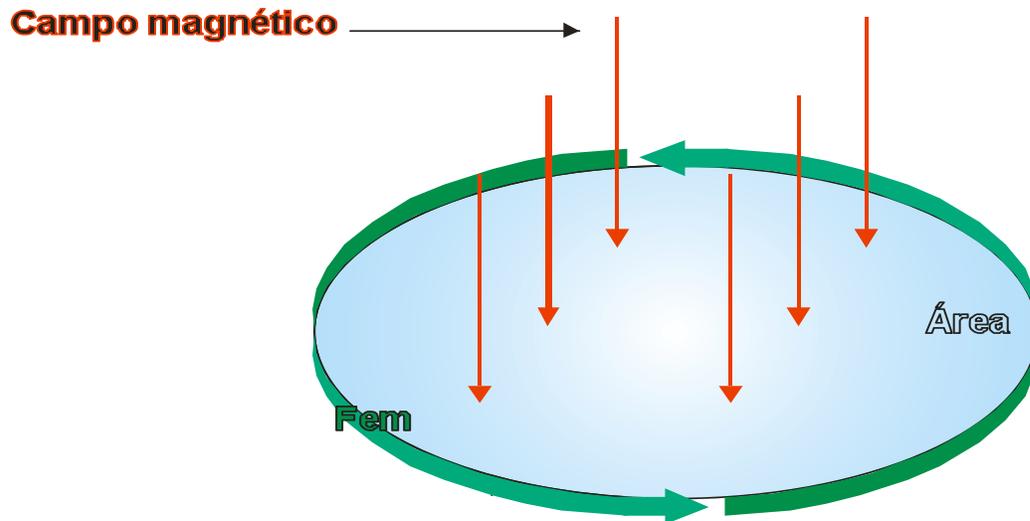


Fig. 2.8.- Fuerza Electromotriz generada por un flujo magnético variable en el tiempo.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

La Fuerza electromotriz generada es igual a la razón negativa de la variación del flujo magnético con respecto al tiempo. Esto se conoce como la ley de Faraday y se representa con la siguiente fórmula:

$$Fem = - \frac{d\phi}{dt} \dots(\text{EC.2.5})$$

Donde:

Fem = Fuerza electromotriz generada en [V]

$\frac{d\phi}{dt}$ = Variación del flujo magnético con respecto al tiempo en [Wb/s].

Si en el perímetro de la superficie, en la cual se produce el flujo magnético variable en el tiempo existe una trayectoria conductora, como por ejemplo un alambre metálico, se va a inducir una corriente eléctrica, como se aprecia en la figura 2.8.



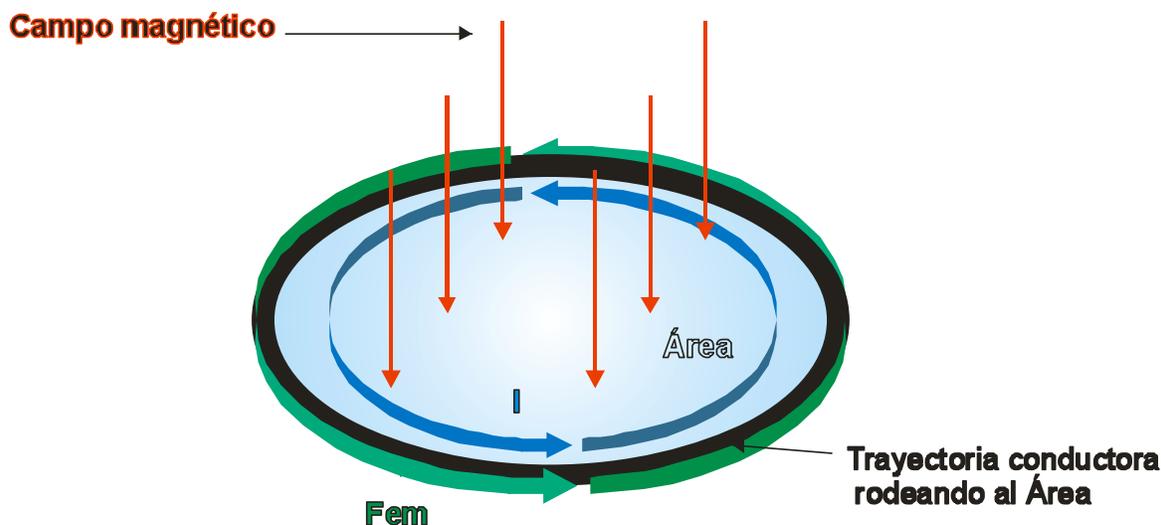


Fig. 2.9 -Inducción de corriente de una trayectoria conductora alrededor de un flujo magnético variable en el tiempo.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

2.6 Aplicación de los conceptos generales al caso de pantallas metálicas

Tomando en cuenta estas leyes básicas del magnetismo vamos a analizar como se relacionan con el fenómeno de tensiones y corrientes inducidas en las pantallas de cables de A.T. En el caso de dos cables con pantalla metálica, donde uno de ellos transporta corriente eléctrica alterna, esta corriente produce un campo magnético que rodea al conductor, y como las pantallas están separadas físicamente, existe un flujo magnético en la superficie que las une, este flujo magnético es variable en el tiempo, ya que la corriente que lo produce es variable en el tiempo por ser alterna, por lo que induce una fuerza electromotriz en el circuito de las pantallas. Relacionando esto con la instalación del cable, si las pantallas están unidas en dos puntos o más puntos, como se muestra en la figura 2.3(b), se va a formar un circuito conductor cerrado y se va a inducir una corriente en ellas, y si las pantallas están unidas en un solo punto, el circuito conductor no es cerrado y únicamente se va a inducir una tensión eléctrica en el extremo no aterrizado entre ellas, y entre cada una de ellas y tierra. Vimos que la inducción de corriente o tensión en las pantallas tiene que ver con su unión y no con el aterrizaje, la relación con el aterrizaje es porque cuando se aterrizan las pantallas se unen entre sí.

2.6.1 Impedancia, Resistencia y Reactancia Inductiva

Una forma simplificada de determinar los efectos de las corrientes que circulan en pantallas y cubiertas metálicas es considerar un cable imaginario sin pantalla, que presente una resistencia y reactancia comparable a la que presenta un conductor real, incluidos los efectos de la pantalla.

A la resistencia y a la reactancia de este cable imaginario se les conoce como resistencia y reactancia aparentes, y los valores obtenidos de estos parámetros permiten de manera directa el cálculo de la impedancia de la línea, caída de tensión, etc.



El valor final de la resistencia aparente se obtiene de sumar, a la resistencia efectiva a la c.a. determinada, un término (ver tabla 2.1) que incluye los efectos de la corriente inducida en la pantalla o cubierta metálica.

De forma análoga, la reactancia aparente se obtiene al restar, a la reactancia que se obtendría de un cable idéntico sin pantalla o cubierta metálica, un término similar de naturaleza inductiva.

La reducción aparente en la reactancia inductiva, debido a las corrientes que circulan por la pantalla o cubierta metálica, es de poca magnitud y de ninguna manera comparable al incremento aparente que afecta a la resistencia, por lo que es de esperarse en estos casos valores mayores de caída de tensión e impedancia que en los cables desprovistos de éstas.

En la figura 2.10 se muestra el circuito equivalente de una fase de un cable sin pantalla metálica o con la pantalla metálica aterrizada en un solo punto. Para fines de cálculo de la impedancia para cables con pantalla metálica aterrizada en un solo punto, se puede considerar que el cable no tiene pantalla, ya que no hay circulación de corriente por pantalla.

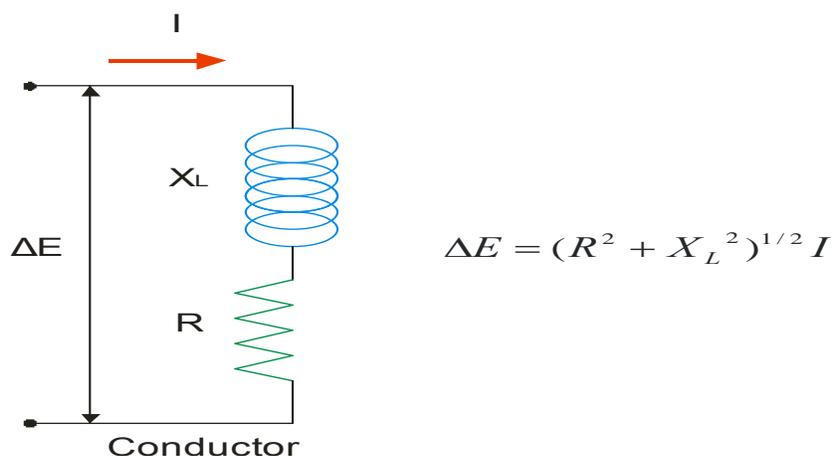


Fig. 2.10 -Cables sin pantalla o con la pantalla metálica aterrizada en un solo punto.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

$$\Delta E = \sqrt{R^2 + X_L^2} I \dots(\text{EC.2.6})$$

Donde:

ΔE = Tensión en el conductor en [V/Km]

I = Corriente en el conductor en [A]

R = Resistencia del conductor en corriente alterna a la temperatura de operación en [Ω /Km]

X_L = Reactancia inductiva del conductor en [Ω /Km] = $2\pi fL$

L = Inductancia del conductor en [Henry/Km]

f = Frecuencia del sistema en [Hz]



Para este caso la impedancia se calcula con la siguiente fórmula:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \dots(\text{EC.2.7})$$

Donde:

Z = Impedancia del cable en [Ω/Km]

R= Resistencia del conductor del cable en corriente alterna a la temperatura de operación en [Ω/Km]

X_L = Reactancia inductiva en [Ω/Km]

La expresión anterior para el cálculo de la impedancia no se puede utilizar para cables con las pantallas aterrizadas en dos o más puntos, ya que circula corriente por las pantallas. En la figura 2.11 se muestra el circuito equivalente de una fase de un cable con las pantallas aterrizadas en dos o más puntos. Para calcular la impedancia en este caso tenemos que determinar una resistencia y reactancia aparentes, como se indica en la siguiente figura.

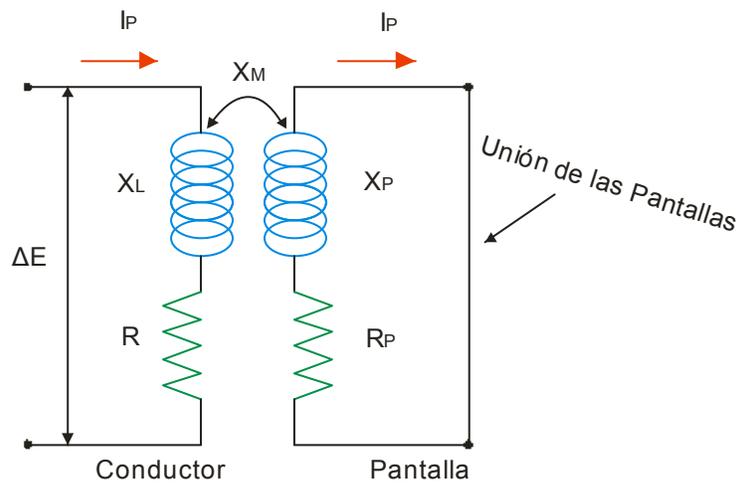


Fig. 2.11 - Cables con las pantallas aterrizadas en dos o más puntos.
Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

X_L, X_P = Reactancia inductiva propia de conductor y pantalla en [Ω/Km]

R, R_P = Resistencia de conductor y pantalla en [Ω/Km]

I = Corriente en el conductor en [A]

X_M = Reactancia inductiva mutua entre el conductor y las pantallas en [Ω/Km]

I_P = Corriente inducida en la pantalla en [A]

ΔE = Tensión en el conductor en [V/Km]



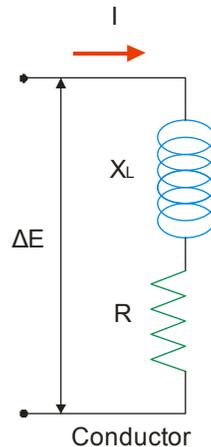


Fig. 2.12 - Resistencia y reactancia aparentes en cables con las pantallas aterrizadas en dos ó más puntos.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

ΔE = Tensión en el conductor en [V/Km]

I = Corriente en el conductor en [A]

R = Resistencia aparente del conductor en corriente alterna a la temperatura de operación en [Ω /Km]

X_L = Reactancia inductiva aparente del conductor en [Ω /Km]

2.6.2 Resistencia y Reactancia Aparentes en Configuración Trébol

A continuación se van mencionar las ecuaciones para calcular la resistencia y reactancia aparente para el caso de un circuito trifásico en configuración trébol, ya que por la simetría que presenta es el más sencillo de analizar.

Para el caso de un cable en configuración trébol, la resistencia aparente se calcula de la siguiente manera:

$$R_A = R + \frac{X_M^2 R_P}{X_M^2 + R_P^2} \dots(\text{EC.2.8})$$

Donde:

R_A = Resistencia aparente en corriente alterna del conductor a la temperatura de operación en [Ω /Km]

R = Resistencia del conductor en corriente alterna a su temperatura de operación en [Ω /Km]

R_P = Resistencia de la pantalla metálica a su temperatura de operación en [Ω /Km]

X_M = Reactancia inductiva mutua entre los conductores y las pantallas en [Ω /Km]

Y donde la reactancia mutua se calcula con la siguiente fórmula:

$$X_M = 2\pi f M \dots(\text{EC.2.9})$$

Donde



f = Frecuencia de operación del sistema en [Hz]

M = Inductancia mutua entre los conductores y las pantallas metálicas en [Henry/Km]

$$M = 2 \times 10^{-4} L_n \left(\frac{S}{r_0} \right) \dots (\text{EC.2.10})$$

Donde:

S = Separación entre centros de cables en [mm]

r_0 = Radio medio de la pantalla metálica en [mm]

Por otro lado, el cálculo de la reactancia inductiva aparente para cables aislados en configuración trébol se calcula con la siguiente fórmula:

$$X_{LA} = X_L - \frac{X_M^3}{X_M^2 + R_p^2} \dots (\text{EC.2.11})$$

Donde:

X_{LA} = Reactancia inductiva aparente en [Ω /Km]

X_L = Reactancia inductiva propia del conductor en [Ω /Km]

Donde la reactancia inductiva propia del conductor se calcula con la siguiente fórmula:

$$X_L = 2\pi f L \dots (\text{EC.2.12})$$

Donde

f = Frecuencia de operación del sistema en [Hz]

L = Inductancia propia de los conductores en [Henry/Km]

Los demás símbolos significan lo mismo que en la ecuación 2.8.

Como se puede apreciar en la ecuación 2.8 la resistencia de cables con las pantallas aterrizadas en dos puntos o más puntos (R_A) es mayor que la de los cables con las pantallas aterrizadas en un sólo punto (R). Lo opuesto sucede con la reactancia inductiva, como se puede apreciar en la ecuación 2.11, ya que la reactancia inductiva de cables con las pantallas aterrizadas en dos o más puntos (X_{LA}) es menor que la reactancia inductiva de cables con las pantallas aterrizadas en un sólo punto (X_L). Debido a esto la impedancia de cables con las pantallas metálicas aterrizadas en dos o más puntos es diferente a la de cables con las pantallas metálicas aterrizadas en un sólo punto, y por consiguiente las caídas de tensión también van a ser diferentes.



2.7 Corrientes Inducidas en los Métodos de Conexión

2.7.1 Conexión en dos o más Puntos

Corrientes Inducidas en Configuración Trébol

La corriente inducida en la pantalla metálica de cables de A.T. de circuitos trifásicos en configuración trébol se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_p = I \sqrt{\frac{X_M^2}{X_M^2 + R_p^2}} \dots(\text{EC.2.13})$$

Donde:

I_p = Corriente inducida en la pantalla metálica de un cable en [A]

I = Corriente en el conductor central en [A]

Los demás términos significan lo mismo que en la ecuación (2.8)

A continuación se va mencionar un nuevo concepto para entender el fenómeno de las corrientes inducidas en las pantallas:

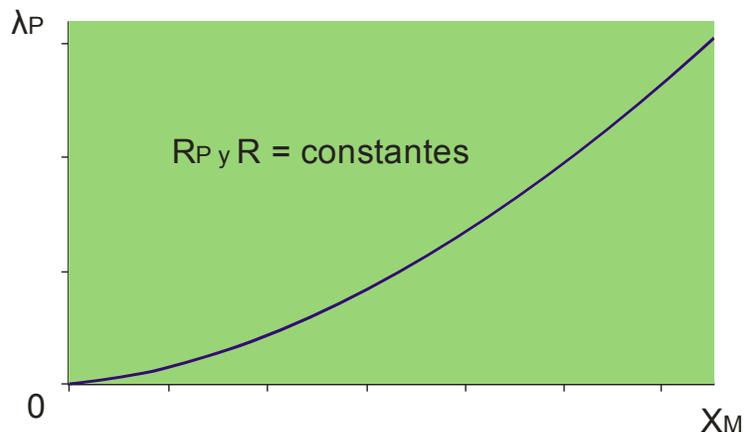
$$\lambda_p = \frac{I_p^2 R_p}{I^2 R} = \frac{R_p}{R} \frac{X_M^2}{X_M^2 + R_p^2} \dots(\text{EC.2.14})$$

Donde:

λ_p = Razón de pérdidas por efecto joule ($I^2 R$) entre la pantalla y conductor sin unidades.

Los demás términos significan lo mismo que en las ecuaciones (2.8) y (2.13).

La siguiente gráfica nos muestra la razón de pérdidas λ_p contra X_M con R y R_p constantes. En esta gráfica se aprecia que al aumentar X_M aumenta λ_p , es decir, al aumentar la inductancia mutua, ó la separación entre los cables, aumentan las pérdidas en la pantalla.

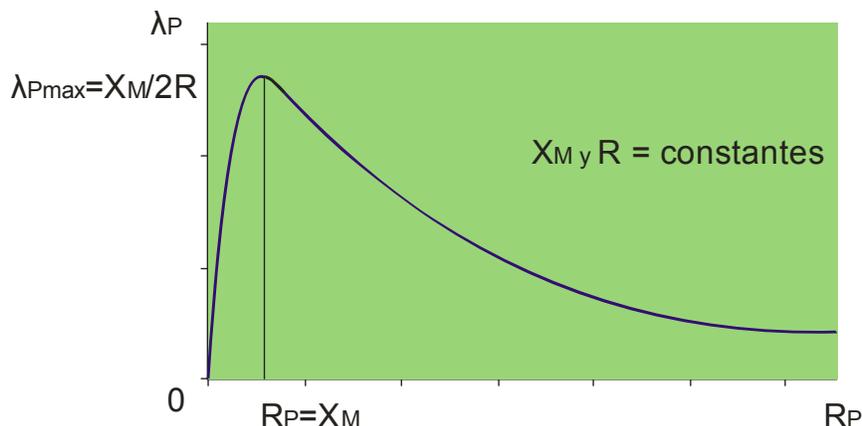


Gráfica 2.4- λ_p contra X_M con R y R_p .

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾



En la grafica 2.5 se presenta la razón de pérdidas λ_p contra R_p , con X_M y R constantes. Esta gráfica tiene un máximo cuando R_p es igual X_M . Generalmente R_p es mayor a X_M , por lo que al disminuir la resistencia de las pantallas, aumenta su área transversal, y también aumentan las pérdidas por efecto Joule o generación de calor en ellas.



Gráfica 2.5- λ_p contra R_p con X_M y R constantes.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

Como se menciona en el capítulo 1 en relación a la capacidad de conducción de corriente que puede transmitir un cable de A.T, se deben de considerar las condiciones de instalación del cable, ya que esto repercutirá en su temperatura de operación y por consiguiente en su ampacidad. Se menciona que cuando circula corriente en las pantallas existe una generación de calor por efecto Joule ($I_p^2 R_p$) en ellas. Esta generación de calor se suma al calor generado en el conductor también por efecto Joule ($I^2 R$). Debido a esto, cuando circula corriente en las pantallas, se debe reducir el calor generado en el conductor, para no sobrepasar la temperatura máxima de operación del cable, por lo tanto, la capacidad de conducción de corriente de cables con las pantallas aterrizadas en dos ó más puntos es menor que la de los cables con las pantallas aterrizadas en un sólo punto.

Ejemplo de cálculo de corrientes circulantes en pantallas conectadas en 2 o más puntos

X_M =Reactancia inductiva mutua entre conductores y pantallas en [Ohm/Km]

$$X_M = 2\pi f M$$

M = Inductancia mutua entre conductores y pantallas en [Henry/Km].

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \ln (s/r_0)$$

S = Separación entre centros de los cables en [mm]

R_0 = Radio medio de la pantalla metálica en [mm]

Pantalla de cobre de 18 hilos.

Diámetros de cada alambre= 0.7229 [mm]

R_0 = 25 [mm]

S = 200 [mm]



$$M= 0.00041588 \text{ [henry/Km]}$$

$$X_M = 2\pi f M$$

$$X_M = 2\pi (60) (0.00041588) = 0.1567861 \text{ [Ohm/Km]}$$

$$I_p = I ((X_m^2)/(X_m^2 + R_p^2))^{\text{exp } 0.5}$$

Donde:

$$I= 728 \text{ [A]} \text{ Con } F_c= 75\% \text{ ver tablas de ampacidad 1.4.5 capítulo 1.}$$

De tablas 1.15 del capítulo 1

$$\rho_o = 17.241 \text{ [Ohm-mm}^2\text{/Km]}$$

$$\alpha = 0.00393$$

$$\rho = \rho_o [1+\alpha(\theta-20^\circ\text{C})] \text{ [}\Omega\text{/km]} = 21.98$$

$$n=18, D= 0.7229 \text{ [mm]}$$

$$R_p = \rho * (1.07 / (0.7854 * n * D^2)) \text{ [Ohm/Km]}$$

$$R_p = 3.1834 \text{ [Ohm/Km]}$$

Por lo tanto, la corriente inducida en las pantallas es:

$$I_p = 35.81 \text{ [A]}$$

Configuraciones Diferentes a la Trébol

Para el caso de circuitos con configuraciones diferentes a la configuración trébol, la resistencia y reactancia aparentes se calculan con las fórmulas de la tabla 2.1

	Resistencia Aparente	Reactancia Aparente
Fase A	$R + \frac{R_p}{4} \left[\frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}+P)}{(P^2+1)} + \frac{(1-\sqrt{3}Q)}{(Q^2+1)} \right]$	$X_L - X_M + \frac{R_p}{4} \left[\frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}P-1)}{(P^2+1)} + \frac{(Q+\sqrt{3})}{(Q^2+1)} \right]$
Fase B	$R + \frac{R_p}{(Q^2+1)}$	$X_L - X_M + \frac{R_p Q}{Q^2+1}$
Fase C	$R + \frac{R_p}{4} \left[\frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-P)}{(P^2+1)} + \frac{(1+\sqrt{3}Q)}{(Q^2+1)} \right]$	$X_L - X_M + \frac{R_p}{4} \left[\frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}P+1)}{(P^2+1)} + \frac{(Q-\sqrt{3})}{(Q^2+1)} \right]$
Promedio	$R + R_p \left[\frac{P^2+Q^2+2}{2(P^2+1)(Q^2+1)} \right]$	$X_L - X_M + R_p \left[\frac{Q(P^2+1)+P(Q^2+1)}{2(P^2+1)(Q^2+1)} \right]$

Tabla 2.1 Resistencia y reactancia aparentes en configuraciones diferentes a la trébol.

Fuente: Conдумex cables⁽⁴⁾

Donde:

P y Q son determinados de acuerdo a la tabla 2.2

Los demás términos significan lo mismo que en las ecuaciones (2.7) y (2.10).

Las corrientes y tensiones inducidas en las pantallas metálicas de cables de A.T. de circuitos con diversas configuraciones, se calculan de acuerdo a la tabla 2.2



Formulario para el cálculo de las tensiones y corrientes inducidas en pantalla respecto a tierra, por cada 1000 m de longitud del cable

CONFIGURACION	I MONOFASICA	II EQUILATERA	III RECTANGULAR	IV PLANA	V DOBLE CIRCUITO	VI DOBLE CIRCUITO
Pantallas en circuito abierto (Los valores de tensión inducida son por cada km de circuito)						
1- $\frac{Ep1}{l}$	X_m	X_m	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - \frac{a}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - a)^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$
2- $\frac{Ep2}{l}$	X_m	X_m	X_m	X_m	$(X_m + \frac{a}{2})$	$(X_m + \frac{a}{2})$
3- $\frac{Ep3}{l}$		X_m	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - \frac{a}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - a)^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$
Pantalla aterrizadas en dos o más puntos						
$\frac{I^2_{P1}}{I^2}$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$	$\frac{(P^2 + 3Q^2) + 2\sqrt{3}(P-Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$ $\frac{1}{(Q^2 + 1)}$ $\frac{(P^2 + 3Q^2) - 2\sqrt{3}(P-Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$ $\frac{P^2 + Q^2 + 2}{2(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$			
$\frac{I^2_{P2}}{I^2} =$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$				
$\frac{I^2_{P3}}{I^2} =$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$				
$\frac{I^2_{P1} + I^2_{P2} + I^2_{P3}}{3I^2} = I^2_{PROMEDIO} =$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$	$\frac{X_m^2}{R_p + X_m^2}$				
$P = \frac{R_l}{Y}$	Y=	X_m	$(X_m + \frac{a}{2})$	$(X_m + a)$	$(X_m + a + \frac{b}{2})$	$(X_m + a - \frac{b}{2})$
$Q = \frac{R_l}{Z}$	Z=	X_m	$(X_m - \frac{a}{2})$	$(X_m - a)$	$(X_m - a - \frac{b}{2})$	$(X_m - a + \frac{b}{2})$
<p>$X_m = 2\pi f 2 \times 10^{-4} \ln(\frac{S}{r_0})$ $a = 2\pi f 2 \times 10^{-4} \ln(2)$ $b = 2\pi f 2 \times 10^{-4} \ln(3)$ A,B,C= Fases de los cables</p> <p>A 60 Hz y en ohm/Km: $X_m = 0.0754 \ln(\frac{S}{r_0})$ $a = 0.0523$ $b = 0.1214$ Rp=Resistencia de pantalla, en ohm/Km</p> <p>f: frecuencia del sistema, en Hertz r_0=Radio medio de la pantalla en mm</p> <p>Ep1, Ep2, Ep3, Ip1, Ip2 y Ip3= Tensiones y corrientes inducidas en las pantallas de las fases A,B y C en Volts/Km y Amperes respectivamente</p> <p>l=corriente en el conductor de cada fase, Amp</p> <p>S=Separación entre los centros del cable, mm</p>						

Tabla 2.2 Tensiones y corrientes inducidas en las pantallas metálicas de cables de A.T para varias configuraciones.

Fuente: Conдумex cables⁽⁴⁾

Donde:

Ip1, Ip2 e Ip3 = Corrientes inducidas en las pantallas metálicas de las fases A, B y C, respectivamente, en amperes. Ep1, Ep2 y Ep3 = Tensiones inducidas en las pantallas metálicas de las fases A, B y C, respectivamente, en volts/km. Para calcular la tensión total inducida en las pantallas se deben multiplicar estos valores por la longitud del circuito en km. El significado de los demás términos es igual que en la ecuación 2.13



2.7.2 Corriente inducida en las pantallas metálicas con conexión cruzada (Cross Bonding)

(Conexión cruzada de pantallas)

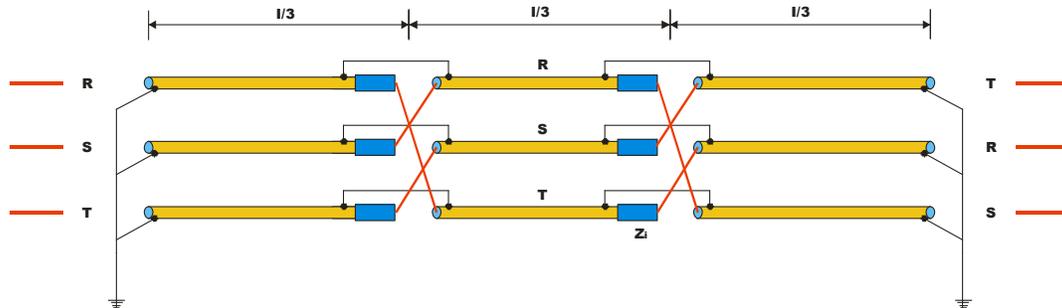


Fig. 2.13 -Conexión Cruzada: Circuito Básico

Fuente: Single Core Cable Screen Bonding⁽³⁾

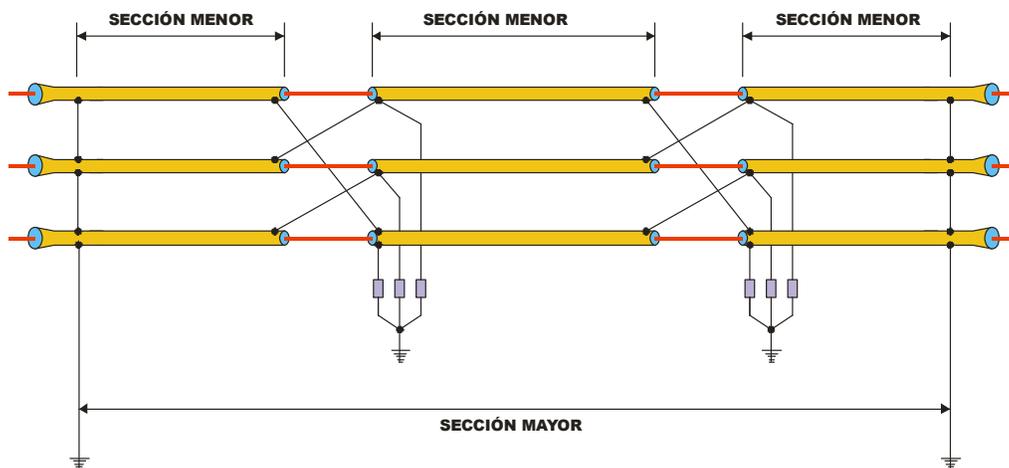


Fig. 2.14 -Conexión Cruzada en Secciones (Kirke-Searing)

Fuente: Single Core Cable Screen Bonding⁽³⁾

Para los conductores en configuración plana y trébol, la solución para reducir pérdidas es utilizar el Cross Bonding mostrado en las figuras 2.13 y 2.14, el objetivo con este método es limitar la tensión inducida en cada sección menor, sumándole una tensión inducida a la otra sección (desfasada), cuando los conductores están transpuestos cambian cíclicamente su posición en el tendido con lo que se simetrizan sus parámetros (inductancia).

La conexión cruzada de pantallas elimina o reduce significativamente la circulación de corriente en las pantallas. El reto es asegurar que todas las secciones menores sean de la misma longitud, lo cual en la práctica ésta resulta imposible ya que las condiciones de instalación son diferentes en cada proyecto.



2.7.3 Caso de estudio utilizando MATLAB

La figura 2.15 muestra un esquema de la instalación de un cable en conexión cruzada. La figura 2.16 es un circuito eléctrico equivalente, en los cuales podemos aplicar las leyes de Kirchhoff.

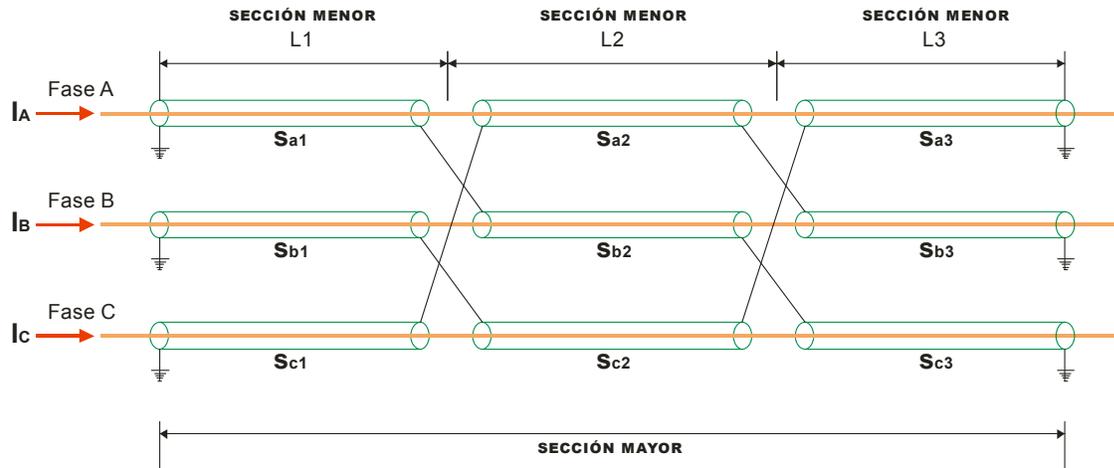


Fig. 2.15 -Conexión cruzada de pantallas
Fuente: General Cable, ICAT Barcelona (SPAIN)⁽⁶⁾

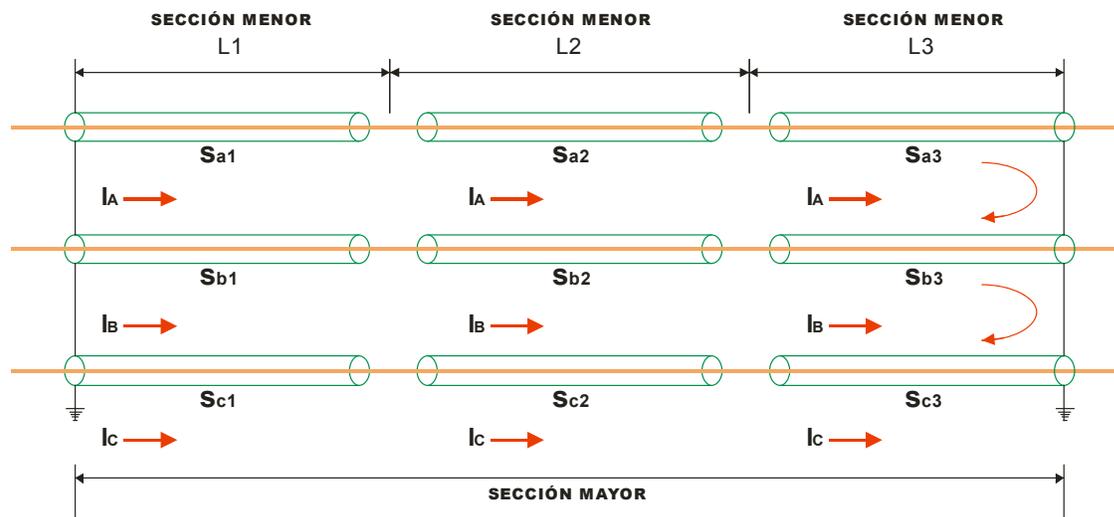


Fig. 2.16 -Circuito eléctrico equivalente de la conexión cruzada
Fuente: General Cable, ICAT Barcelona (SPAIN)⁽⁶⁾

Para la malla formada por la pantalla que pertenece inicialmente a la fase A y a la pantalla que pertenece inicialmente a la fase B, por medio de la segunda ley de Kirchhoff obtenemos:



ECUACION 1

$$(L1+L2+L3)*Znana*I_{na} - (L1+L2+L3)*Znbnb*I_{nb} + L1*Zana*I_{a} + L2*Zanb*I_{a} + L3*Zanc*I_{a} + L1*Zbna*I_{b} + L2*Zbnb*I_{b} + L3*Zbnc*I_{b} + L1*Zcna*I_{c} + L2*Zcnb*I_{c} + L3*Zcnc*I_{c} + L1*Znanb*I_{nb} + L2*Znbnc*I_{nb} + L3*Znanc*I_{nb} + L1*Znanc*I_{nc} + L2*Znanb*I_{nc} + L3*Znbnc*I_{nc} - L1*Zanb*I_{a} - L2*Zanc*I_{a} - L3*Zana*I_{a} - L1*Zbnb*I_{b} - L2*Zbnc*I_{b} - L3*Zbna*I_{b} - L1*Zcnb*I_{c} - L2*Zcnc*I_{c} - L3*Zcna*I_{c} - L1*Znanb*I_{na} - L2*Znbnc*I_{na} - L3*Znanc*I_{na} - L1*Znbnc*I_{nc} - L2*Znanc*I_{nc} - L3*Znanb*I_{nc} = 0$$

La ecuación para las pantallas de las fases B y C se obtienen de la misma forma.

ECUACION 2

$$(L1+L2+L3)*Znbnb*I_{nb} - (L1+L2+L3)*Zncnc*I_{nc} + L1*Zanb*I_{a} + L2*Zanc*I_{a} + L3*Zana*I_{a} + L1*Zbnb*I_{b} + L2*Zbnc*I_{b} + L3*Zbna*I_{b} + L1*Zcnb*I_{c} + L2*Zcnc*I_{c} + L3*Zcna*I_{c} + L1*Znanb*I_{na} + L2*Znbnc*I_{na} + L3*Znanc*I_{na} + L1*Znbnc*I_{nc} + L2*Znanc*I_{nc} + L3*Znanb*I_{nc} - L1*Zanc*I_{a} - L2*Zana*I_{a} - L3*Zanb*I_{a} - L1*Zbnc*I_{b} - L2*Zbna*I_{b} - L3*Zbnb*I_{b} - L1*Zcnc*I_{c} - L2*Zcna*I_{c} - L3*Zcnb*I_{c} - L1*Zbnc*I_{na} - L2*Zncna*I_{na} - L3*Znbna*I_{na} - L1*Znbna*I_{nb} - L2*Znbnc*I_{nb} - L3*Zncnc*I_{nb} = 0$$

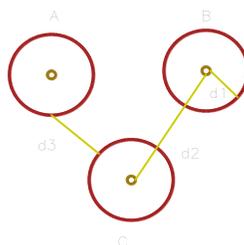
Y por medio de la primera ley de Kirchhoff obtenemos:

ECUACION 3

$$I_{na} + I_{nb} + I_{nc} = 0$$

Cálculo de Impedancias:

$R_p=3.0858$ [Ohm/Km] calculada del ejemplo del punto 2.7.1



Las siguientes expresiones se tomaron de la referencia 9 del capítulo 5.

$$\begin{aligned} Z_{ana} &= 0.000989 f + j 0.0029 f \ln(D/r) && [\text{Ohm/Km}] \\ Z_{anb} &= 0.000989 f + j 0.0029 f \ln(D/S) && [\text{Ohm/Km}] \\ Z_{nana} &= R_{ac} + 0.000989 f + j 0.0029 f \ln(D/r) && [\text{Ohm/Km}] \\ Z_{nanb} &= 0.000989 f + j 0.0029 f \ln(D/S) && [\text{Ohm/Km}] \dots(\text{ECS. 2.15}) \end{aligned}$$

Donde:



Zana= Es la impedancia entre el conductor y su pantalla

Zanb= Es la impedancia entre el conductor y la pantalla de los otros cables

Znana= Es la impedancia propia de la pantalla

Znanb= Es la impedancia entre las pantallas de los cables

Sustituyendo valores:

$$Zana = 0.05934 + j 1.0489 \quad [\text{Ohm/Km}]$$

$$Zanb = 0.05934 + j 0.07055 \quad [\text{Ohm/Km}]$$

$$Znana = 0.1831 + j 1.0489 \quad [\text{Ohm/Km}]$$

$$Znanb = 0.05934 + j 0.07055 \quad [\text{Ohm/Km}]$$

Distancias de las Secciones menores.

CASO IDEAL.

Donde la longitud de las 3 secciones menores es exactamente idéntica, por lo que la teoría se cumple y las corrientes circulantes en pantallas se nulifican en su totalidad.

$$L1=1 \text{ [Km]}$$

$$L2=1 \text{ [Km]}$$

$$L3=1 \text{ [Km]}$$

Completando un total de sección mayor de 3 [Km].

Sustituyendo los valores en las ecuaciones 1, 2 y 3 antes mostradas para cálculo de corrientes.

ECUACION 1:

$$\begin{aligned} & (1+1+1) \cdot (0.1831+1.0489 \cdot i) \cdot I_{na} - \\ & (1+1+1) \cdot (0.1831+1.0489 \cdot i) \cdot I_{nb} + 1 \cdot (0.05934+1.0489 \cdot i) \cdot (600+0 \cdot i) + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (600+0 \cdot i) + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300+519.6152 \cdot i) + 1 \cdot (0.05934+1.0489 \cdot i) \cdot (-300+519.6152 \cdot i) + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300+519.6152 \cdot i) + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300-519.6152 \cdot i) + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{nb} + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{nc} + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{nc} + 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{nc} - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (600+0 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (600+0 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+1.0489 \cdot i) \cdot (600+0 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+1.0489 \cdot i) \cdot (-300+519.6152 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300+519.6152 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300+519.6152 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300-519.6152 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+1.0489 \cdot i) \cdot (-300-519.6152 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot (-300-519.6152 \cdot i) - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{na} - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{na} - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{nc} - 1 \cdot (0.05934+0.07055 \cdot i) \cdot I_{nc} = 0 \end{aligned}$$

ECUACION 2:



$$\begin{aligned}
& (1+1+1)*(0.1831+1.0489*i)*Inb- \\
& (1+1+1)*(0.1831+1.0489*i)*Inc+1*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)+1*(0.05934+0.07055 \\
& *i)*(600+0*i)+1*(0.05934+1.0489*i)*(600+0*i)+1*(0.05934+1.0489*i)*(- \\
& 300+519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(-300+519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
& 300+519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)+1*(0.05934+1.0489*i)*(- \\
& 300-519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(-300- \\
& 519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*Ina+1*(0.05934+0.07055*i)*Ina+1*(0.05934+0.070 \\
& 55*i)*Ina+1*(0.05934+0.07055*i)*Inc+1*(0.05934+0.07055*i)*Inc+1*(0.05934+0.07055 \\
& *i)*Inc-1*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)-1*(0.05934+1.0489*i)*(600+0*i)- \\
& 1*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*(-300+519.6152*i)- \\
& 1*(0.05934+0.07055*i)*(-300+519.6152*i)-1*(0.05934+1.0489*i)*(-300+519.6152*i)- \\
& 1*(0.05934+1.0489*i)*(-300-519.6152*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)- \\
& 1*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*Ina- \\
& 1*(0.05934+0.07055*i)*Ina-1*(0.05934+0.07055*i)*Ina-1*(0.05934+0.07055*i)*Inb- \\
& 1*(0.05934+0.07055*i)*Inb-1*(0.05934+0.07055*i)*Inb = 0
\end{aligned}$$

ECUACION 3:

$$Ina + Inb + Inc = 0$$

Donde resolviendo el sistema 3x3 utilizando MATLAB tenemos que las corrientes circulantes en las pantallas son:

$$Ina = 0$$

$$Inb = 0$$

$$Inc = 0$$

Anulando en su totalidad las mismas.

 **CASO PRÁCTICO**

Donde las distancias de las 3 secciones menores que conforman el circuito son diferentes, debido a las características del terreno y de especificaciones que debe cumplir la instalación físicamente.

$$L1 = 0.98 \text{ [Km]}$$

$$L2 = 1.02 \text{ [Km]}$$

$$L3 = 1.00 \text{ [Km]}$$

Completando un total de sección mayor de 3 [Km].

Sustituyendo los valores en las ecuaciones 1, 2 y 3 antes mostradas para cálculo de corrientes.

ECUACION 1:

$$\begin{aligned}
& (0.98+1.02+1)*(0.1831+1.0489*i)*Ina- \\
& (0.98+1.02+1)*(0.1831+1.0489*i)*Inb+0.98*(0.05934+1.0489*i)*(600+0*i)+1.02*(0.059 \\
& 34+0.07055*i)*(600+0*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)+0.98*(0.05934+0.07055*i)
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
&*(-300+519.6152*i)+1.02*(0.05934+1.0489*i)*(- \\
&300+519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
&300+519.6152*i)+0.98*(0.05934+0.07055*i)*(-300- \\
&519.6152*i)+1.02*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)+1*(0.05934+1.0489*i)*(-300- \\
&519.6152*i)+0.98*(0.05934+0.07055*i)*Inb+1.02*(0.05934+0.07055*i)*Inb+1*(0.05934 \\
&+0.07055*i)*Inb+0.98*(0.05934+0.07055*i)*Inc+1.02*(0.05934+0.07055*i)*Inc+1*(0.05 \\
&934+0.07055*i)*Inc-0.98*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)- \\
&1.02*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)-1*(0.05934+1.0489*i)*(600+0*i)- \\
&0.98*(0.05934+1.0489*i)*(-300+519.6152*i)-1.02*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
&300+519.6152*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*(-300+519.6152*i)- \\
&0.98*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)-1.02*(0.05934+1.0489*i)*(-300- \\
&519.6152*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)-0.98*(0.05934+0.07055*i)*Ina- \\
&1.02*(0.05934+0.07055*i)*Ina-1*(0.05934+0.07055*i)*Ina- \\
&0.98*(0.05934+0.07055*i)*Inc-1.02*(0.05934+0.07055*i)*Inc- \\
&1*(0.05934+0.07055*i)*Inc = 0
\end{aligned}$$

ECUACION 2:

$$\begin{aligned}
&(0.98+1.02+1)*(0.1831+1.0489*i)*Inb- \\
&(0.98+1.02+1)*(0.1831+1.0489*i)*Inc+0.98*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)+1.02*(0.059 \\
&34+0.07055*i)*(600+0*i)+1*(0.05934+1.0489*i)*(600+0*i)+0.98*(0.05934+1.0489*i)*(- \\
&300+519.6152*i)+1.02*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
&300+519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
&300+519.6152*i)+0.98*(0.05934+0.07055*i)*(-300- \\
&519.6152*i)+1.02*(0.05934+1.0489*i)*(-300-519.6152*i)+1*(0.05934+0.07055*i)*(-300- \\
&519.6152*i)+0.98*(0.05934+0.07055*i)*Ina+1.02*(0.05934+0.07055*i)*Ina+1*(0.05934+ \\
&0.07055*i)*Ina+0.98*(0.05934+0.07055*i)*Inc+1.02*(0.05934+0.07055*i)*Inc+1*(0.059 \\
&34+0.07055*i)*Inc-0.98*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)- \\
&1.02*(0.05934+1.0489*i)*(600+0*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*(600+0*i)- \\
&0.98*(0.05934+0.07055*i)*(-300+519.6152*i)-1.02*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
&300+519.6152*i)-1*(0.05934+1.0489*i)*(-300+519.6152*i)-0.98*(0.05934+1.0489*i)*(- \\
&300-519.6152*i)-1.02*(0.05934+0.07055*i)*(-300-519.6152*i)-1*(0.05934+0.07055*i)*(- \\
&300-519.6152*i)-0.98*(0.05934+0.07055*i)*Ina-1.02*(0.05934+0.07055*i)*Ina- \\
&1*(0.05934+0.07055*i)*Ina-0.98*(0.05934+0.07055*i)*Inb- \\
&1.02*(0.05934+0.07055*i)*Inb-1*(0.05934+0.07055*i)*Inb = 0
\end{aligned}$$

ECUACION 3:

$$Ina + Inb + Inc = 0$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones 3x3 en MATLAB tenemos que las corrientes circulantes en pantallas son:

$$Ina = 6.336803283 - 2.662503976*i \quad [A]$$

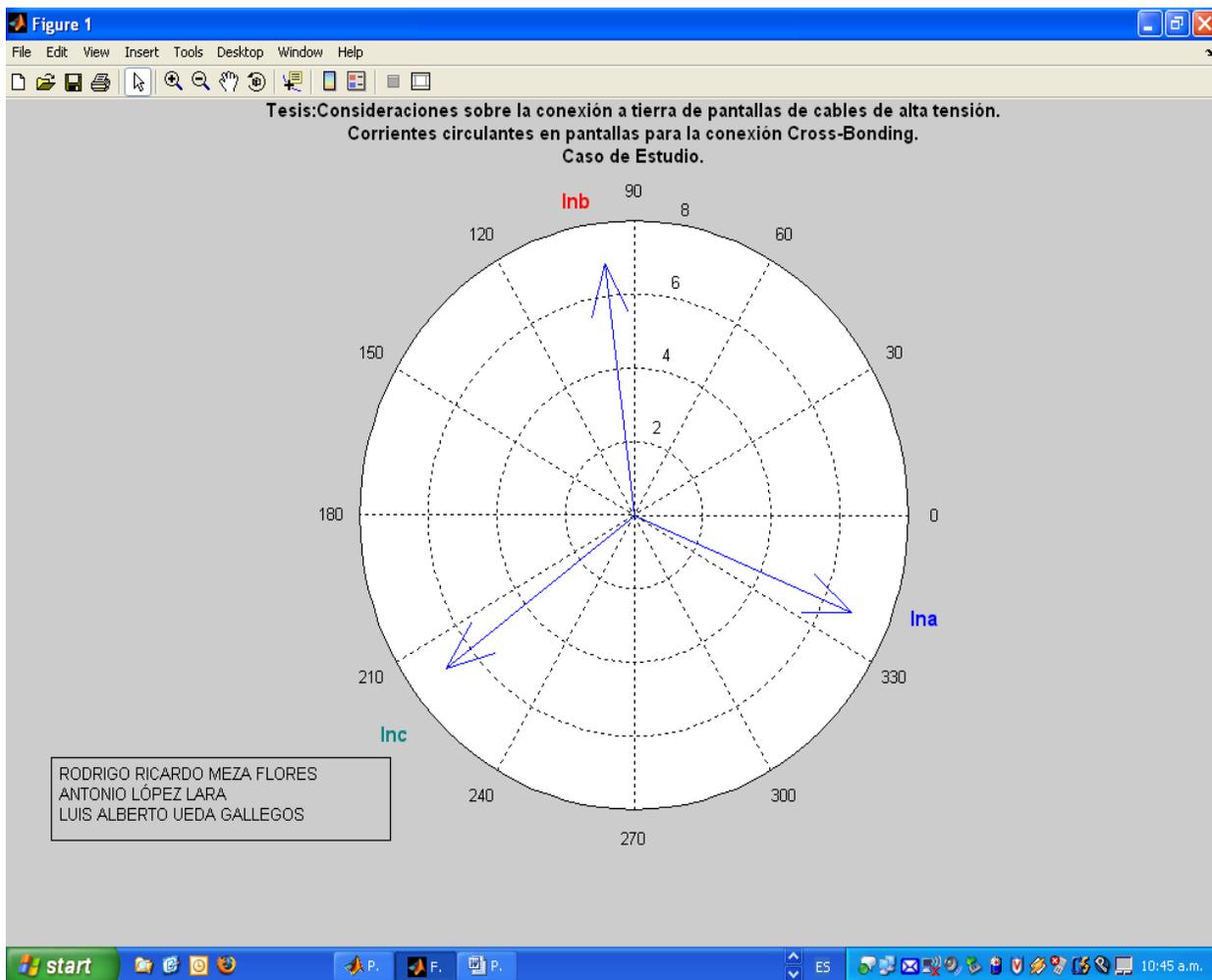
$$Inb = -0.862605268 + 6.819084224*i \quad [A]$$

$$Inc = -5.474198016 - 4.156580248*i \quad [A]$$



En polares tenemos que:

$$\begin{aligned} I_{na} &= 6.9022 \angle -22.69^\circ & [A] \\ I_{nb} &= 6.873426 \angle 97.209^\circ & [A] \\ I_{nc} &= 6.873427 \angle -142.7904^\circ & [A] \end{aligned}$$



Gráfica 2.6- Corrientes circulantes para Cross Bonding (Caso de estudio práctico).



2.8 Software Utilizado para Simulación y Cálculo de Tensiones y Corrientes en Pantallas Metálicas.

Calculo de Parametros Electricos en Cables de Energia - Condux

Características Generales
 Descripción del cable: Energía 15 kV 100 % N.A. 500 kCM Cobre
 Voltaje de fase a fase del sistema (V): 15000 Tipo de Cable: Monofasico

Características del Conductor
 Material: Cobre Tipo: Redondo Diametro (mm): 18.7
 Área transversal (mm²): 253.4 Número de alambres: 37

Características del Aislamiento
 Material: XLPE Diametro (mm): 29

Características de la Pantalla o Cubierta Metalica Individual
 Tipo: Alambres Material: Cobre Numero de alambres: 16
 Diametro de cada alambre (mm): 0.643 Paso de alambres (mm): 263.408

Características de la Cubierta Externa
 Material: PVC Diametro (mm): 36.9

Características de la Instalacion
 Tipo de instalacion: Equilatera Separacion entre centros de cables (mm): 200 Temperatura ambiente (°C): 25
 Temperatura de operacion del conductor (°C): 90 Corriente en el conductor (A): 500 Frecuencia del sistema (Hz): 60

Salida del programa

Resultados

Generales

Resistencia del conductor en c.c. a 20 °C (ohm/km): 6.94E-02	Inductancia (H/km): 6.65E-04	Perdidas en el conductor por fase (W/km): 2.25E+04
Resistencia del conductor en c.c. a la temperatura de operacion (ohm/km): 8.85E-02	Capacitancia (F/km): 3.77E-07	Perdidas en el dielectrico por fase (W/km): 8.54E+01
Resistencia del conductor en c.a. a la temperatura de operacion (ohm/km): 8.98E-02	Reactancia inductiva (ohm/km): 2.51E-01	
	Reactancia Capacitiva (ohm-km): 7.03E+03	

Pantallas conectadas en un solo punto

Voltaje inducido en la pantalla de la fase A (V/km): 9.49E+01
Voltaje inducido en la pantalla de la fase B (V/km): 9.49E+01
Voltaje inducido en la pantalla de la fase C (V/km): 9.49E+01

Pantallas conectadas en dos ó más puntos

Resistencia aparente promedio (ohm/km): 9.79E-02	Corriente inducida promedio en las pantallas (A): 2.12E+01	Reactancia inductiva aparente promedio (ohm/km): 2.51E-01
Resistencia aparente de la fase A (ohm/km): 9.79E-02	Corriente inducida en la pantalla de la fase A (A): 2.12E+01	Reactancia inductiva aparente de la fase A (ohm/km): 2.51E-01
Resistencia aparente de la fase B (ohm/km): 9.79E-02	Corriente inducida en la pantalla de la fase B (A): 2.12E+01	Reactancia inductiva aparente de la fase B (ohm/km): 2.51E-01
Resistencia aparente de la fase C (ohm/km): 9.79E-02	Corriente inducida en la pantalla de la fase C (A): 2.12E+01	Reactancia inductiva aparente de la fase C (ohm/km): 2.51E-01
		Perdidas promedio en la pantalla por fase (W/km): 2.01E+03

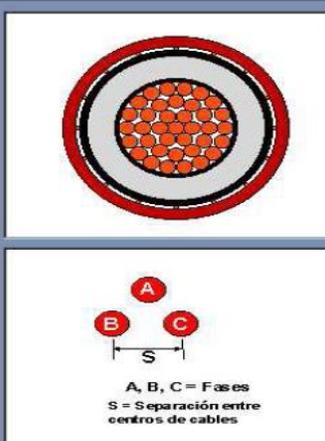


Fig. 2.17 -Pantalla principal de software de CONDUMEX para cálculo de corrientes inducidas.

Pantalla principal de la aplicación donde se ingresan en la parte superior los datos y características de la instalación o del cable a instalar y posteriormente en la parte de abajo se muestran los resultados obtenidos tanto para el conductor principal como para LAS PANTALLAS METALICAS.

El programa muestra los siguientes datos.

- * **Pantallas conectadas en un sólo punto.**
 - Tensiones inducidas en cada una de las fases.
- * **Pantallas conectadas en dos o más puntos.**
 - Tensiones inducidas en cada fase.
 - Resistencia aparente promedio y por fase.
 - Reactancia inductiva aparente promedio y por fase.
 - Corriente inducida en las pantallas promedio y por fase.
 - Pérdidas promedio en la pantalla.

Nota: No realiza cálculo de corrientes para Cross Bonding.



CAPÍTULO 3

MÉTODOS ESPECIALES DE CONEXIÓN

3. Métodos de conexión de pantallas a tierra

Las pantallas metálicas de los cables de A.T, actúan como el secundario de un transformador, la corriente en el conductor induce una tensión en las pantallas, cuando las pantallas del cable se conecta en más de un punto (conexiones multi-punto), la tensión inducida causa un flujo de corriente en todo el circuito, esto provoca una disminución de tensión en las pantallas, pero a su vez se generan pérdidas a causa de corriente circulante en las pantallas de los cables. Para minimizar estas pérdidas en las pantallas se pueden utilizar varios métodos especiales de conexión a tierra, lo cual se tratará más adelante en este capítulo.

Los métodos que se empleaban anteriormente en cables sin cubierta con pantallas de plomo, daban como resultado una menor protección contra la corrosión para la pantalla de plomo, y se requería por lo tanto en la conexión un diseño para limitar la magnitud de tensiones inducidas en pantalla, por lo que se utilizaban límites de tensión inducida en pantalla muy pequeños para prevenir la corrosión en la pantalla debido a la electrólisis.

Hace tiempo se establecieron varios niveles de tensión permitidos que iban desde los 12V hasta los 17V con el fin de prevenir la corrosión ocasionada por la electrólisis en las pantallas de plomo de los cables sin cubierta. En la actualidad, los cables son elaborados con una cubierta aislante (Polímeros), por lo que las tensiones inducidas ya no provocan corrosión en las pantallas metálicas, estas pantallas por lo general, se fabrican de alambres o cintas de cobre o aluminio (ver Capitulo 1) y los niveles de tensión establecidos dejaron de ser requeridos. Los problemas de pérdidas en las pantallas adquieren importancia cuando las pantallas se conectan a tierra en varios puntos (multi-punto) y llevan corrientes muy grandes, así como si están colocados a poca distancia entre ellos (ej. cuando los cables son colocados en ductos separados, o cuando son directamente enterrados en una configuración separada que disminuye los efectos de calor entre cables), bajo estas condiciones de espacio, si existen corrientes lo suficientemente grandes en las pantallas de un sistema de cables sin conexión especial, se tienen grandes pérdidas en las pantallas, por lo que cabe destacar que el propósito de las conexiones especiales a tierra para pantallas en sistemas de cables de A.T. es precisamente el prevenir o reducir las pérdidas en las pantallas.

En la actualidad el diseño de los cables de A.T. con pantalla metálica cuentan con varias capas protectoras, una de estas capas sirve exclusivamente como medida contra la corrosión de la pantalla operando bajo condiciones normales, las propiedades de la cubierta han evolucionado con base en las necesidades de las instalaciones modernas, por lo que la cubierta del cable se ha convertido en un aislante, aunque permanecen las restricciones de niveles elevados de tensiones inducidas en la cubierta del cable, estas tensiones son las siguientes:



- a) Tensión de ruptura de la cubierta aislante bajo condiciones de falla
- b) Tensión de arqueo de los empalmes con interrupción de pantalla

Los métodos especiales de conexión a tierra de las pantallas deben cumplir las siguientes funciones⁽¹⁾:

- a) Limitar las tensiones para empalmes con interrupción de pantalla según sea requerido.
- b) Reducir o eliminar las pérdidas en las pantallas.
- c) Mantener la continuidad en los circuitos de las pantallas (o en las conexiones a tierra) para permitir de manera adecuada el regreso de corrientes de falla y la protección en caso de presentarse sobretensiones transitorias debidas a maniobra de interruptores o descargas atmosféricas.

Para satisfacer de manera adecuada estas funciones, las pantallas están divididas en cierto número de secciones por medio de empalmes con interrupción de pantalla, la longitud de estas secciones esta determinada por los niveles de tensión permisibles en las pantallas, tanto para condiciones normales de operación como en caso de falla.

Cabe destacar que la interrupción de pantalla normalmente se realiza en los empalmes⁽²⁾, la colocación de estos puede afectar las tensiones y corrientes de pantalla en el sistema y en algunos casos esto afecta también la selección del método de conexión a tierra de las pantallas.

Para todos los casos, se asume la utilización de cable XLPE aislamiento muy utilizado en la actualidad en todo el mundo.

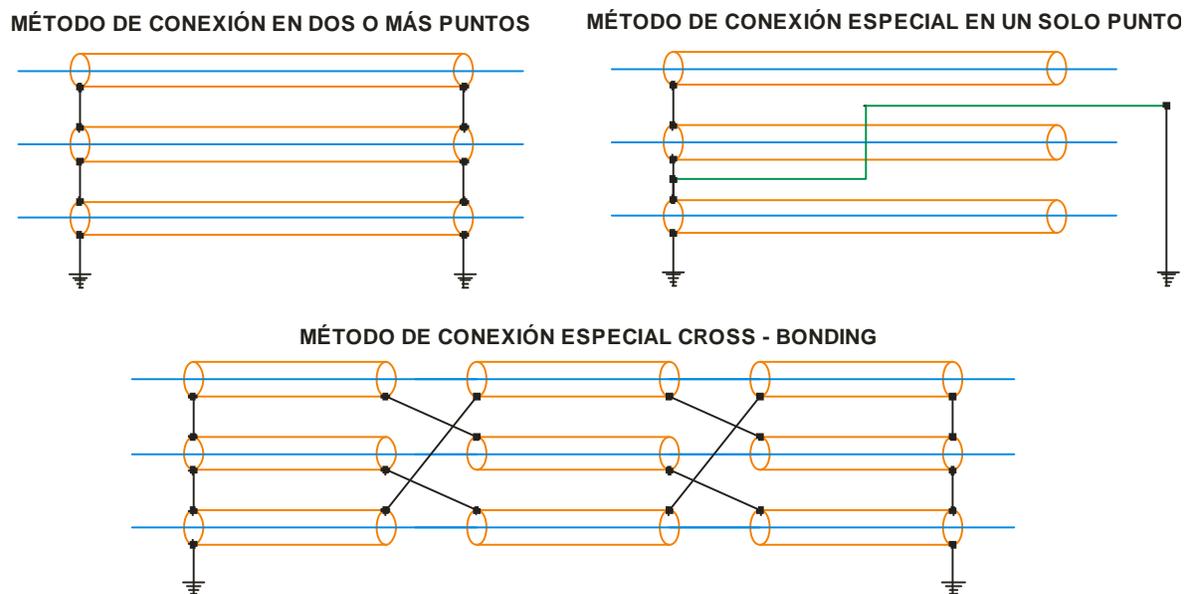


Figura 3.1 – Métodos de conexión de pantallas.

Fuente: High Voltages Underground Power Cables XLPE Insulated Cables⁽³⁾



3.1 Diseño

En el diseño de arreglos especiales para conexión de pantallas, deben considerarse los siguientes aspectos:

- a) La elección de un método de conexión de pantalla en específico.
- b) Las pantallas cuentan normalmente con un potencial a tierra despreciable pero en los sistemas especiales de conexión a tierra de pantallas esta tensión aumenta, por lo que debe considerarse. Esta consideración debe tomarse en cuenta para mantener la seguridad del personal. Los valores máximos de tensiones inducidas en las pantallas metálicas, permitidas o recomendadas, son diferente en cada país, por ejemplo en México la Norma Oficial de Instalaciones Eléctricas NOM-001-Sede 2005 recomienda 55V.
- c) La eliminación total de las corrientes circulantes a través de la pantalla no es siempre posible debido a las dificultades que se presentan a la hora de elegir la longitud del cable y el espacio donde se instalará el mismo. Es por esto que se vuelve necesario el cálculo de las corrientes en la pantalla así como los efectos que estas causan en el rendimiento del cable.
- d) El uso de conexiones especiales trae consigo un aumento en las sobretensiones de pantalla durante los transitorios del sistema y durante fallas, por lo que deben tomarse en cuenta los valores de estas sobretensiones. Para sistemas de A.T. es necesario colocar un limitador de tensión en la pantalla (LT's)⁽³⁾, y en todos los casos deben coordinarse los niveles de aislamiento en la cubierta del cable con relación a las sobretensiones al que será sometido.
- e) El daño en alguna parte de la cubierta del cable o la falla en los LT's puede dar lugar a grandes corrientes en la pantalla y por resultado pérdidas, causadas por dichas fallas, ya que los conductores se sobrecalienta reduciendo su ampacidad; es por eso, que se debe de tomar en cuenta los niveles de tensiones inducidas tanto en condiciones normales de operación como de falla para la adecuada selección y uso correcto de los LT's; también se tiene que elegir un método de monitoreo y mantenimiento del sistema, para diagnosticar la condición de los cables aislados y de todos sus componentes para prevenir problemas a futuro tomando acciones de acuerdo al nivel de condición en que se encuentre los cables⁽⁴⁾.

Los circuitos de cables de A.T. llevan grandes corrientes que superan los 500A; la conexión especial es económicamente viable en muchos casos, pues la reducción de pérdidas en el sistema permite utilizar conductores más pequeños, sin tomar en cuenta el ahorro generado a lo largo de la vida útil del sistema por la utilización de estos métodos especiales de conexión.

En el aspecto económico existe un punto muy importante a resaltar para los métodos especiales de conexión, principalmente para la instalación, esto es, que para las conexiones especiales de pantallas existe un costo extra, debido a que para realizarlas es necesaria una



cantidad mayor de cable, principalmente para el método de conexión en varios puntos (multi-punto), ya que a estos costos se deben sumar los precios de equipo adicional (cajas de conexión, LT's, abrazaderas de cobre, cable coaxial para conectar las pantallas, etc.) y el de mantenimiento; los cuales se incrementarán paulatinamente según se incremente la complejidad de la conexión especial. Se debe tomar en cuenta que el sistema de conexión en multi-punto requiere la instalación de cajas de conexión (Link-boxes) con enlaces removibles los cuales permiten realizar pruebas de integridad a la cubierta, aunque por otro lado no requiere de LT's.

3.2 Conexión en un solo punto

El método más simple de conexión especial de pantallas a tierra consiste en un arreglo para que cada una de las pantallas de los tres cables se conecten a tierra en un sólo punto a lo largo de su longitud, con esto en todos los demás puntos a lo largo de la pantalla aparecerá una tensión entre esta y tierra, la cual tendrá un máximo en el punto más alejado de la unión a tierra de las pantallas; por lo tanto, las pantallas deben estar adecuadamente aisladas de tierra, para este caso no está cerrado el circuito de pantalla, excepto por los (LT's), por lo que no existe una corriente a lo largo de las pantallas, y no hay por lo tanto pérdidas por corriente circulante en pantalla, los LT's sólo se deben utilizar si el diseño para el nivel de tensión inducida excede el 75% del BIL de la cubierta o del empalme con interrupción de pantalla, este método para una sola sección se aprecia en la figura 3.4(a). A continuación se mencionan las ventajas y desventajas de esta conexión:

Ventajas:

- ✚ No hay circulación de corrientes por pantallas.
- ✚ No hay calentamiento en los cables de las pantallas.
- ✚ Método económico.

Desventajas:

- ✚ Aumento de tensión en el extremo no aterrizado.
- ✚ Se requiere de LT's si existe aumento de la tensión en caso de presentarse una falla en el sistema de cables.
- ✚ Se requiere adicionalmente de un conductor paralelo de tierra para el regreso de la corriente de falla ya que el regreso de la corriente por tierra resulta ser peligroso debido a las altas tensiones inducidas en el extremo no aterrizado.
- ✚ El campo magnético alrededor del conductor es mayor en comparación con la conexión multi-punto.



3.2.1 Varias Secciones (múltiples longitudes)

Cuando la longitud del circuito es tal que el límite de tensión inducida en la pantalla se excede al momento de conectar a tierra un extremo del circuito, esta conexión debe hacerse en cualquier otro punto, por ejemplo, al centro de la longitud total del cable⁽⁵⁾, con esto la tensión inducida de pantalla en cada una de las dos secciones menores formadas se reduce a la mitad como se puede ver en la figura 3.4(b), por otro lado, puede existir el caso de que el circuito sea demasiado largo como para ser dividido, por lo que deben utilizarse empalmes con interrupción de pantalla (conexión en un sólo punto múltiple) de esta manera la tensión inducida en pantalla para cada sección menor estará dentro de los límites de tensión permitidos como se muestra en la figura 3.5. Este tipo de conexiones también requiere el uso de cajas de conexión con sus LT's para proteger a la cubierta del cable, además, del conductor paralelo de tierra para el regreso de las corrientes de falla que pudiesen presentarse en el sistema.

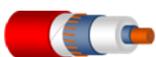
Por otro lado, es importante mencionar que mientras la conexión en un solo punto a la mitad de la longitud del circuito los máximos valores de tensiones inducidas se presentan en los extremos, para la conexión en solo punto con empalmes con interrupción de pantalla los máximos valores de tensiones se van a presentar en dichos empalmes.

3.2.2 Conductor paralelo de tierra

Se sabe que durante una falla a tierra en un sistema de cables de A.T., la corriente de secuencia cero llevada por el cable conductor regresa a través del neutro del transformador⁽⁶⁾ por cualquier camino que este disponible como por ejemplo, la malla a tierra, solamente por las pantallas metálicas, y en muchas ocasiones podría regresar a través de líneas de agua, telecomunicaciones, etc.. Con la conexión en un solo punto, las pantallas del cable se conecta a tierra en un sólo punto, por lo que no pueden ser utilizadas para conducir la corriente de falla, debido a este inconveniente se tiene que utilizar un conductor externo paralelo para fungir como camino de regreso, con lo que la corriente de falla (secuencia cero) tomará la misma vía de tierra como el mejor camino de regreso. Porque la resistividad de la tierra es muy alta en comparación con la de un buen conductor, la corriente de regreso fluye a través de tierra por lo que las componentes en frecuencia de la energía fluyen a varios cientos de metros. Ya que la corriente de falla (secuencia cero) es mucho mayor a la corriente nominal del conductor, los gradientes de tensión inducida son muy grandes a lo largo del conductor paralelo y de la pantalla del cable.

Se debe tomar en cuenta que si no se coloca el conductor paralelo a tierra durante una falla, se puede causar una tensión a tierra mayor en los extremos del cable más cercano, y dependiendo de las características de operación de los LT's esto puede causar algún accidente al personal de mantenimiento o daño al equipo. Para mas detalle sobre los LT's ver capítulo 4.

Por lo mencionado anteriormente es muy recomendable que las conexiones especiales en un solo punto y en múltiples puntos tengan el conductor paralelo a tierra conectado en ambos extremos de la ruta como se muestra en la figura 3.2, el espacio entre este conductor paralelo y el cable del circuito (fase) debe ser lo suficientemente pequeño para limitar la tensión inducida en la pantalla a un nivel aceptable durante una falla



monofásica a tierra, el tamaño (calibre) de este conductor debe ser adecuado para soportar las corrientes esperadas de falla en el sistema de cables de A.T.

Aunque el conductor a tierra no se requiere en sistemas en conexión cruzada, ya que las pantallas del cable forman una trayectoria cerrada para corrientes de falla, algunas compañías, especialmente en los Estados Unidos, utilizan los conductores a tierra para asegurarse de tener una conexión sólida de extremo a extremo, brindando una conexión de baja impedancia⁽⁵⁾ a tierra para los LT's y las pantallas ver figura 3.5. Cabe destacar que las corrientes circulantes pueden inducirse en el conductor paralelo y causar pérdidas, por lo que deben ser consideradas al calcular la ampacidad del cable.

El conductor paralelo a tierra debe estar aislado para prevenir cualquier riesgo de corrosión debido a que estará sujeto a tensiones inducidas debidas a los cables de A.T, también existen los casos en los que se instala un cable paralelo sin aislar para disminuir los costos de la instalación, aunque esto no es recomendable por los riesgos ya mencionados. Para evitar corrientes circulantes y pérdidas en el conductor, es preferible que cuando los cables de A.T. no estén transpuestos, se transponga el conductor paralelo para disminuir la tensión inducida en el mismo, debe colocarse a la mitad de su trayectoria en una posición opuesta a la configuración inicial respecto a la formación del sistema (trébol), como se muestran en las figuras 3.2 y 3.3.

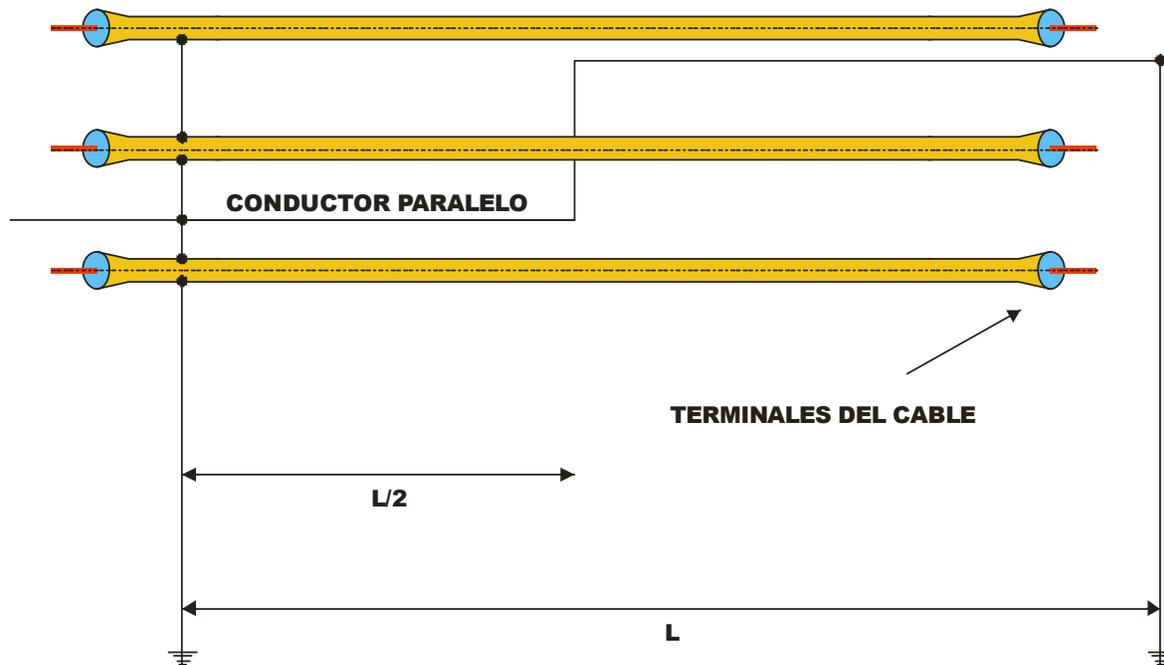
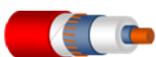


Figura 3.2 – Conductor paralelo y su transposición, para reducir tensiones inducidas en cables de A.T. en configuración plana o trébol.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾





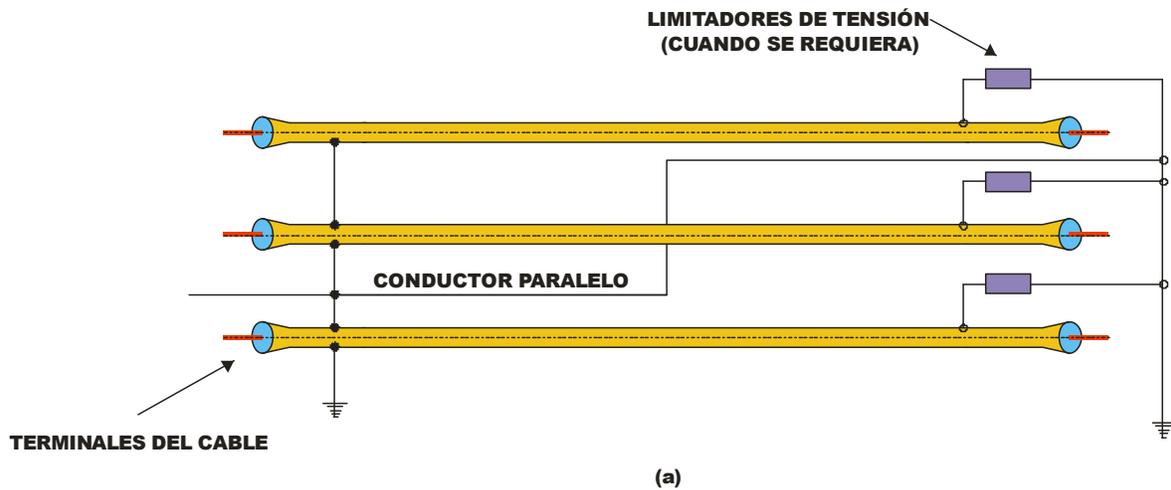
CONDUCTOR PARALELO

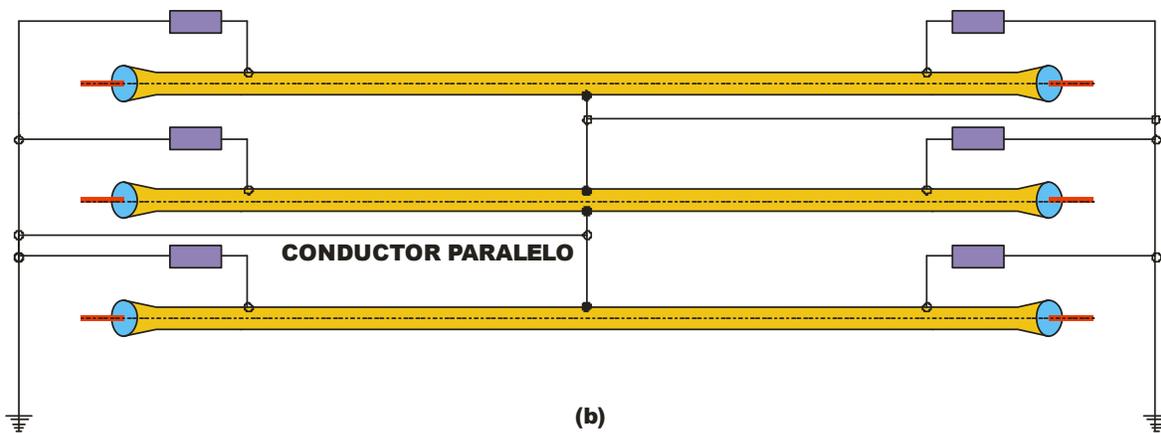
Figura 3.3 – Colocación del conductor paralelo de tierra en sistemas con pantallas aterrizadas en un solo punto.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽⁷⁾

3.2.3 Arreglos

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran la aplicación de las conexiones en un solo punto, para una sola sección y para varias secciones respectivamente. (Estos diagramas no muestran las cajas de conexión “link-boxes”)





(a) Conexión en un extremo

(b) Conexión en un punto medio

Figura 3.4 – Diagramas de conexión en un solo punto para circuitos de una sola longitud.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

NOTA: Pueden usarse otros patrones de transposición del conductor paralelo de tierra. Ver Anexo C, C4

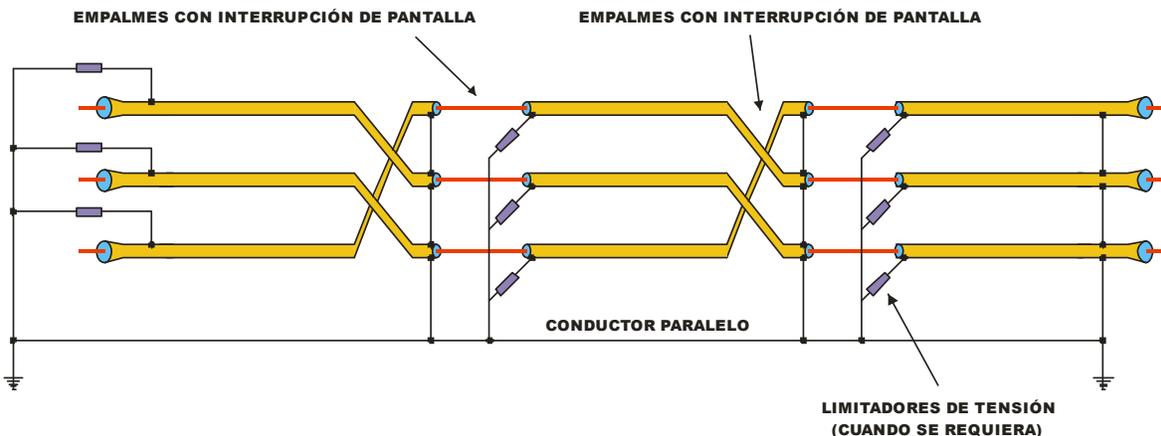


Figura 3.5 – Diagrama de conexión en un solo punto para circuito de tres longitudes.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

3.3 Métodos de conexión de transformadores (Impedancias)

En los métodos de conexión de transformadores, las secciones de pantalla interrumpida están conectadas mediante un transformador, este método consiste en la utilización de transformadores simples, transformadores saturables o transformadores de conexión de pantallas (SBT's)⁽⁸⁾. Debido al funcionamiento básico de estos dispositivos se puede saber que aunque se minimizan las tensiones inducidas y las pérdidas en pantallas, para cables de un solo conductor, no se anulan del todo las corrientes circulantes. Para que se puedan establecer las conexiones a tierra, estos transformadores se diseñan normalmente con tap central o puntos a tierra.



En un tiempo fueron usados resistores, sin embargo, la utilización de resistencias no resultó ser muy práctico, ya que estas tenían que ser muy grandes para soportar las corrientes de falla.

Aunque se eliminan casi en su totalidad las tensiones inducidas en pantallas utilizando este método; existen un buen número de desventajas que limita la aplicación de estos métodos, las principales desventajas son las siguientes:

- a) Se requiere de espacio adicional en los registros.
- b) Los SBT's son muy costosos ya que estos están diseñados para soportar corrientes de falla. Su tamaño y peso son muy grandes, lo cual es un factor importante en la elevación del costo.
- c) Existen en el mercado pocos fabricantes de este tipo de dispositivos.
- d) El diseño de estos dispositivos resulta poco práctico ya que éste, depende de las características particulares de cada circuito (instalación).
- e) En operación normal estos dispositivos pueden introducir armónicos (tercera armónica) a las pantallas metálicas, y a su vez estas pueden causar interferencia en líneas telefónicas cercanas.

3.3.1 Descripción de la conexión del transformador de pantalla (SBT's)

El método especial de conexión de pantallas para reducir las corrientes inducidas en las pantallas es llamado "Conexión de transformadores de pantalla", en este método ambos extremos de cada pantalla están conectados a un transformador de pantalla trifásico como se muestra en la figura 3.6.

El transformador de pantalla es un dispositivo especial (figura 3.7) que es eléctricamente idéntico a un transformador en zig-zag⁽⁸⁾, este tipo de transformadores esta diseñado para brindar una gran impedancia entre las tres conexiones de pantallas (A,B y C) y tierra (N) cuando las tensiones aplicadas a las terminales A, B y C son tensiones trifásicas balanceadas; el transformador de pantalla tiene una baja impedancia entre cualquiera de las tres terminales de la conexión de pantallas (A, B y C) y tierra (N) si en una sola fase se aplica una tensión de secuencia cero. En general el transformador de pantalla tiene una alta impedancia a tierra para tensiones de secuencia positiva y una baja impedancia a tierra para tensiones de secuencia cero aplicadas a las terminales A, B y C.



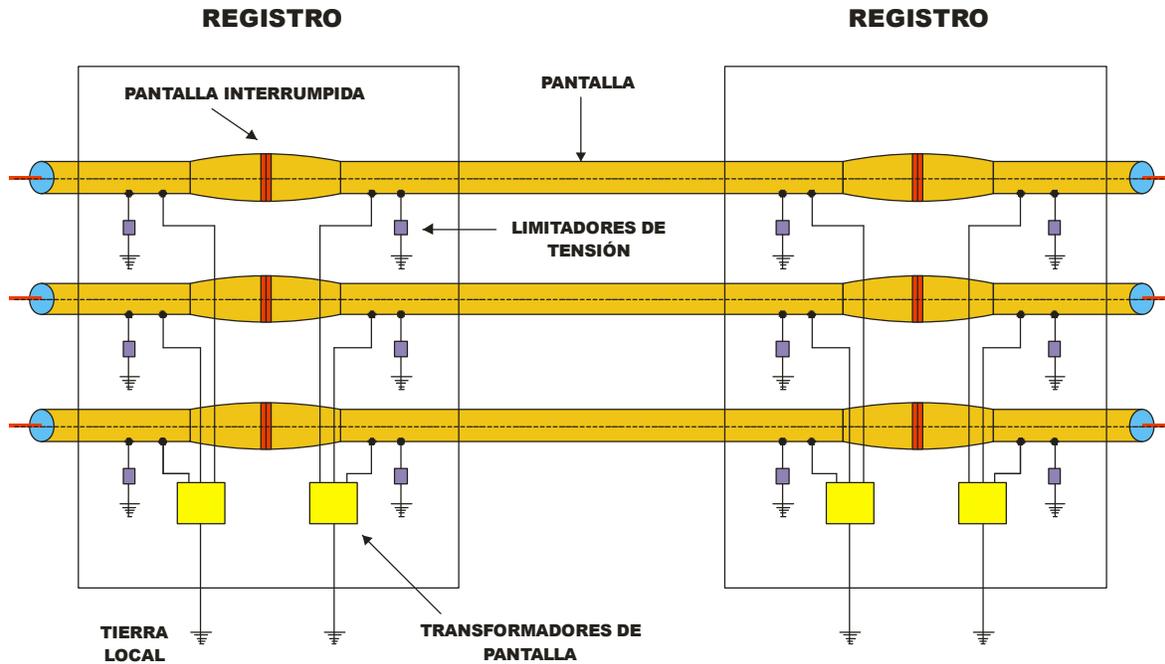


Figura3. 6 – Esquema de la conexión del transformador de pantalla.
Fuente: Sheath Bonding Transformer⁽⁸⁾

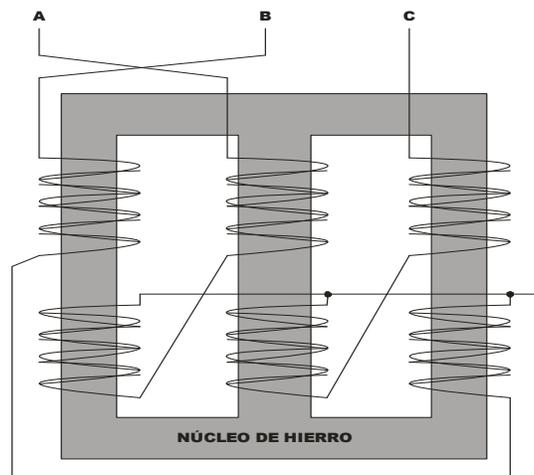


Figura 3.7 – Esquema del transformador de pantalla.
Fuente: Sheath Bonding Transformer⁽⁸⁾

En condiciones normales de operación en el sistema de cables de A.T., las tensiones inducidas en las pantallas de las tres fases son aproximadamente iguales y desfasadas 120°; en consecuencia, existe una pequeña corriente que fluye a través de las pantallas con dirección a tierra por medio del transformador de pantalla, y en condiciones de una falla monofásica a tierra se produce una tensión de secuencia cero a través del transformador de pantalla, y la corriente de falla a tierra fluye a través de una impedancia relativamente pequeña. Los transformadores de pantalla deben diseñarse de manera que no se saturen



debido a las tensiones inducidas que se pueden presentar en las pantallas, tanto para corrientes nominales como de falla.

Las pantallas de los cables están conectadas a tierra, por medio de LT's, ver figura 3.6), los cuales protegen e interrumpen a estas últimas de sobretensiones causadas por transitorios.

La principal ventaja del método de conexión del transformador de pantalla, es que es verdaderamente efectivo limitando las corrientes inducidas en las pantallas sin importar si las distancias entre registros son equivalentes o no, por otro lado, la principal desventaja de este esquema es el espacio adicional requerido en los registros para colocar los componentes adicionales, el costo del equipo para implementar la conexión de transformador de pantalla es generalmente alto en comparación con los métodos especiales de conexión en un solo punto y en conexión cruzada (Cross Bonding). Este tipo de transformadores se diseñan específicamente para un caso en especial, por lo que generalmente no se encuentran en el mercado fácilmente.

3.4 Conexión cruzada (Cross Bonding)

3.4.1 Arreglo para circuito básico

La conexión cruzada consiste esencialmente en dividir las pantallas en tres secciones menores (iguales) y colocarlas en conexión cruzada entre sí, para de esta manera eliminar casi por completo las tensiones inducidas, tal como se muestra en la figura 3.8.

Sin transponer los cables, como se muestra en la figura 3.8, es imposible lograr que sean iguales las tensiones inducidas de pantalla a menos que los cables estén colocados en configuración trébol. Cuando por razones dadas en el anexo C. C3, los cables se transponen en cada empalme, entonces las tensiones inducidas en pantalla serán eliminadas sin importar la configuración del cable propuesto, ni si las tres secciones menores son iguales; la figura 3.9 muestra como puede resolverse esto, para un circuito de tres secciones menores las pantallas están conectadas y aterrizadas en ambos extremos de la ruta, en este arreglo las tres secciones menores juntas forman una sección mayor⁽⁵⁾.

Se deben transponer los cables al final de cada sección menor para lograr que sean iguales las tensiones de pantalla en cada una de las secciones, sin embargo, en la práctica la instalación de cables de extra-A.T. se realiza sin transponer los cables debido a la dificultad que esto representa a los cables.



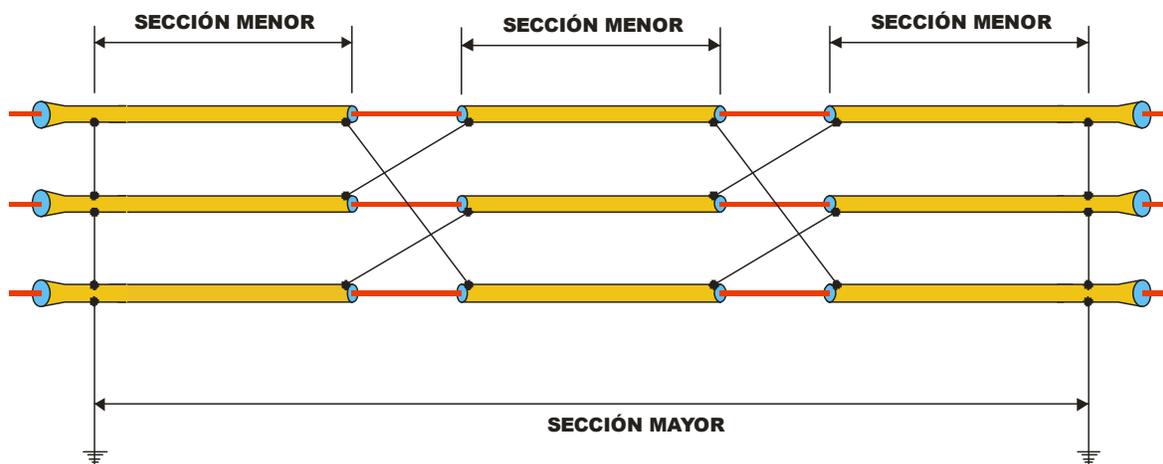


Figura 3.8 – Cables en conexión cruzada sin transposición.
 Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

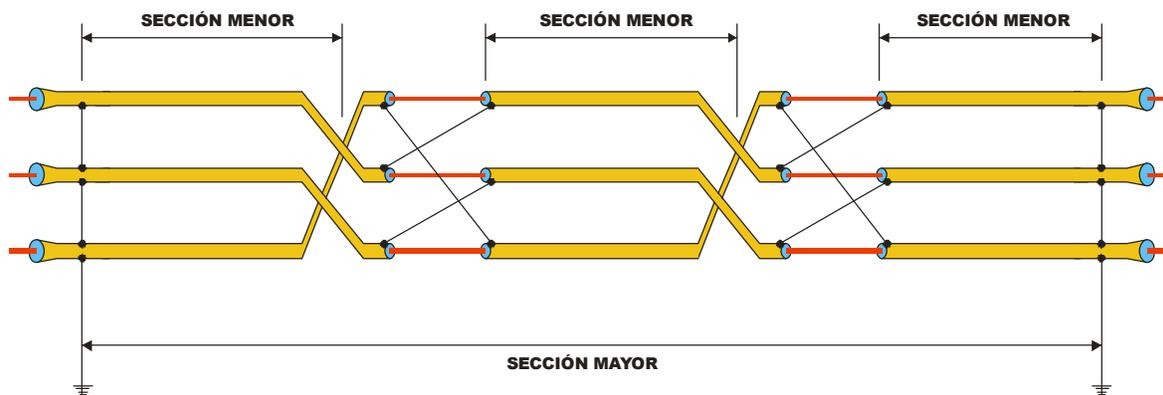


Figura 3.9 – Cables en conexión cruzada con transposición.
 Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

3.4.2 Circuitos largos

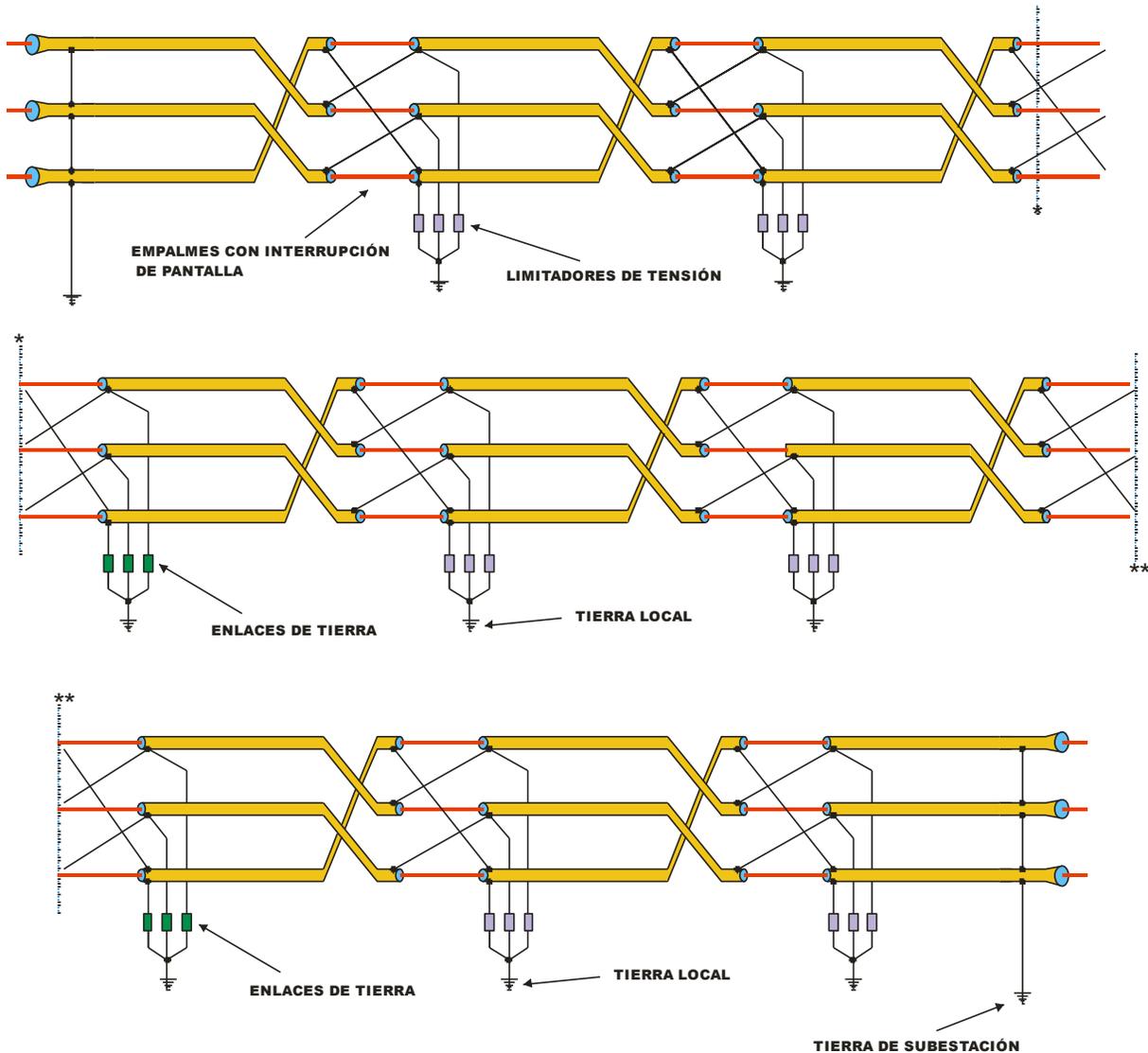
La conexión cruzada puede ser ampliada para circuitos con cables muy largos para los métodos descritos a continuación.

3.4.3 Conexión cruzada en secciones (Cross Bonding en secciones)

Estos sistemas de conexión cruzada son también llamados conexiones Kirke-Searing, estos sistemas utilizados por H.R. Searing y W.B. Kirke no incluyen transposición de cables. Cuando el número de secciones menores es divisible exactamente entre tres, el circuito puede modificarse para implementar una o más secciones mayores consecutivas, en cada unión de dos secciones mayores (enlaces de tierra), y en los extremos del circuito las pantallas están conectadas juntas y aterrizadas, mientras que las tierras generalmente se



conectan al electrodo de tierra. (Ver figura 3.10 donde cada una de las secciones mayores está conectada como en la figura 3.9).



* En estos puntos los empalmes pueden realizarse sin interrupción de pantalla sin olvidar realizar la conexión a tierra por medio de los enlaces de tierra.

Figura 3.10 – Conexión cruzada en secciones con tres secciones mayores.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾



3.4.4 Conexión cruzada en secciones “modificada”

El sistema de conexión cruzada en secciones puede ser modificado de tal manera, que no sea necesario tener un número de secciones menores divisible exactamente entre tres, por ejemplo: una sección mayor formada por cuatro secciones menores con tensiones inducidas iguales cada una, se puede sustituir por una sección mayor formada por tres secciones menores donde una de las secciones menores sea dividida en dos partes o “subsecciones”, como sigue:

- a) La sección mayor estaría formada por una parte de la sección menor (o subsección L1), seguida de dos secciones menores (L) terminando con la otra parte de la sección menor (o subsección L2); la combinación de distancias de dos subsecciones (L1+L2), serian iguales a la distancia de una sección menor como se muestra en la figura 3.11 y 3.12.

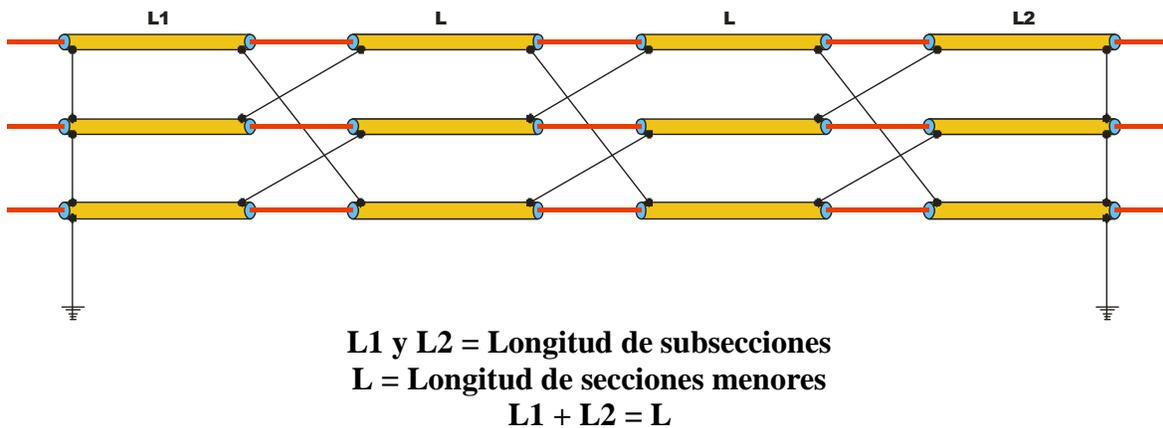


Figura 3.11 – Conexión cruzada en secciones “modificada” tipo 1 sin transposiciones.
 Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

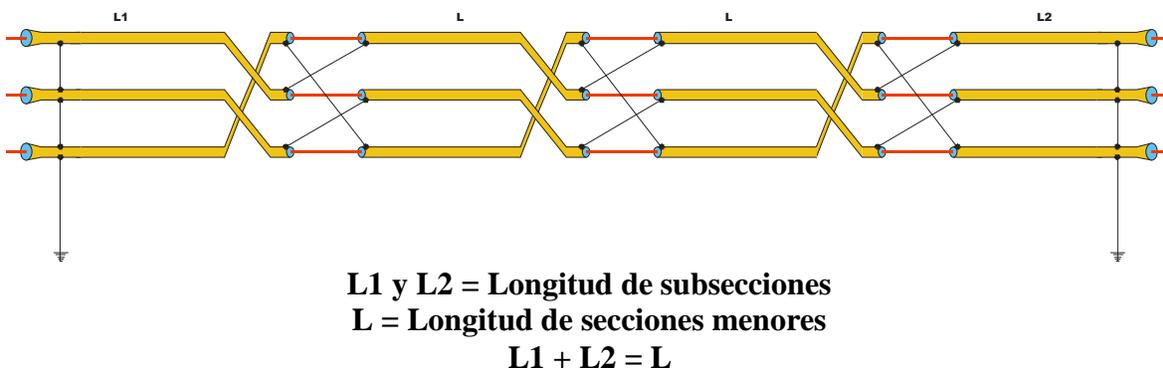
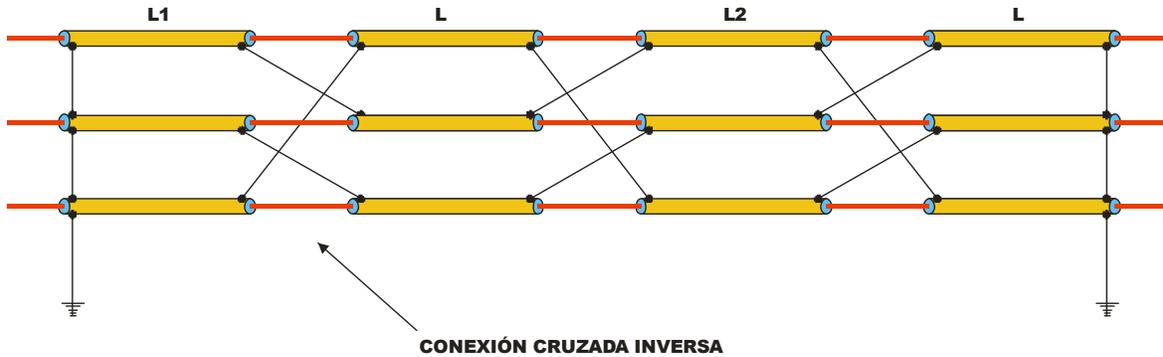


Figura 3.12 – Conexión cruzada en secciones “modificada” tipo 1 con transposiciones.
 Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾



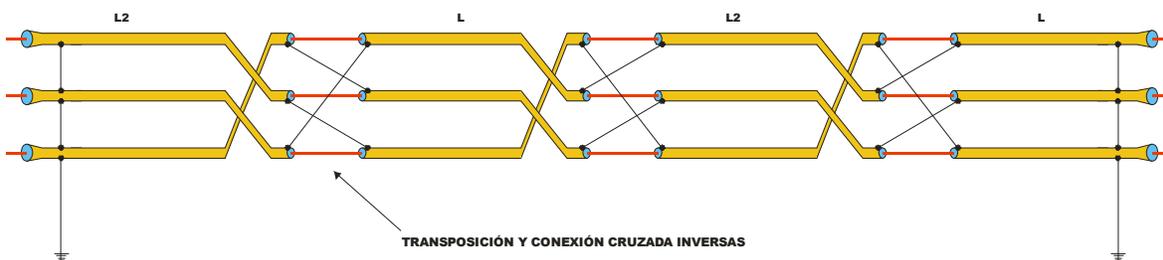
- b) Otra configuración para este ejemplo puede ser: Una sección mayor formada por una parte de la sección menor (subsección L1), seguida por una sección menor (L) y la otra parte de la sección menor (subsección L2) terminando con una sección menor (L) para completar la sección mayor. Las dos secciones menores deben ser iguales y la combinación de las dos subsecciones (L1+L2) deben ser iguales a la longitud de una sección menor, como se muestra en las figuras 13 y 14. En este caso la primera conexión cruzada debe ser inversa.



L1 y L2 = Longitud de subsecciones
L = Longitud de secciones menores
 $L1 + L2 = L$

Figura 3.13 – Conexión cruzada en secciones “modificada” tipo 2 sin transposiciones.

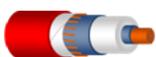
Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾



L1 y L2 = Longitud de subsecciones
L = Longitud de secciones menores
 $L1 + L2 = L$

Figura 3.14 – Conexión cruzada en secciones “modificada” tipo 2 con transposiciones.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾



3.4.5 Conexión cruzada continua

En este sistema al igual que en los anteriores, las pantallas están conectadas de forma cruzada al término de cada sección menor a lo largo de todo el circuito, las tres pantallas están conectadas y aterrizadas en ambos extremos del circuito como se muestra en la figura 3.15. Es deseable de nuevo que los cables estén transpuestos para que cada uno ocupe las tres posiciones posibles a lo largo de cada sección mayor, el número total de secciones menores preferiblemente debe ser divisible entre tres para evitar que el circuito este desbalanceado (ver 3.4.7).

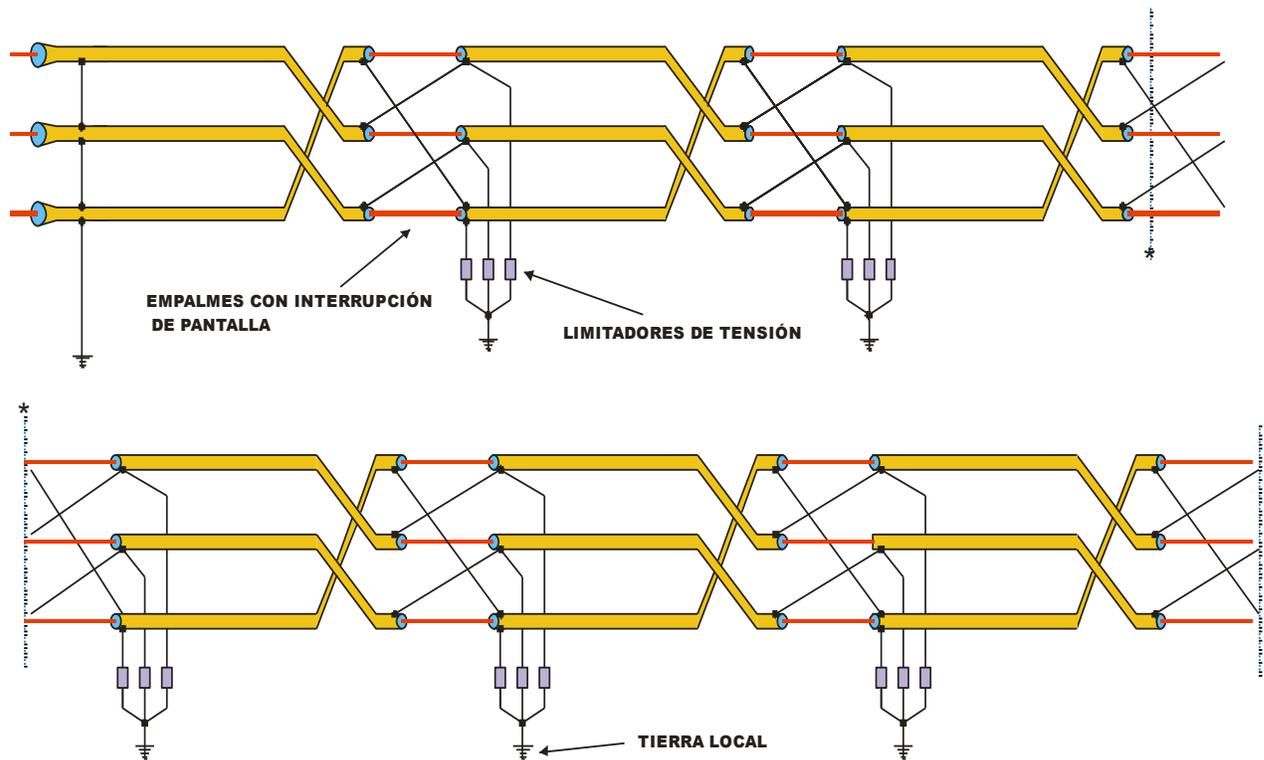


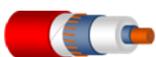
Figura 3.15 – Conexión cruzada continua.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

3.4.6 Sistemas mixtos

Cuando el número de secciones menores no es divisible exactamente entre tres, el sistema puede consistir en una mezcla de sistemas Kirke-Searing (normal y modificado), y sistemas de conexión en un solo punto.

Cuando es necesario contar con un número grande de secciones menores teniendo distancias diferentes, la conexión cruzada puede ser del tipo continuo, la figura 3.16 muestra el arreglo de una conexión en un solo punto en el extremo de un sistema en conexión cruzada.



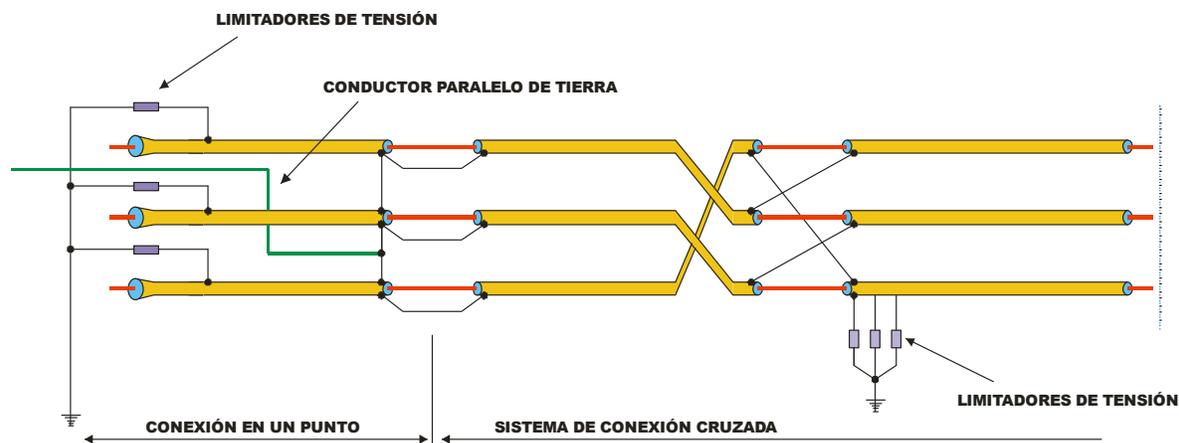


Figura 3.16 – Terminal de un sistema en conexión cruzada con conexión en un solo punto.

Fuente: Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System⁽⁵⁾

3.4.7 Sistemas desbalanceados

En general no es posible dividir el cable en secciones menores que sean exactamente iguales, tampoco es posible mantener siempre una misma separación entre los cables a lo largo del sistema. Como ya mencionamos, esto es deseable en el sistema con conexión cruzada continua, ya que lo que se desea es tener un número de secciones menores que sea divisible exactamente entre tres; en la práctica esto no es siempre posible, muchas veces existen sistemas en los que estas características no se cumplen, a este tipo de arreglos se les llama sistemas desbalanceados, en los cuales es necesario calcular las corrientes circulantes a lo largo de las pantallas y el efecto que causan estas en el desempeño del cable.

3.5 Elección de un sistema de conexión

Los métodos de conexión con transformadores son considerados generalmente poco satisfactorios o poco rentables con respecto a los demás métodos ya mencionados, por esta razón estos métodos no son recomendados para su uso en general.

Los transformadores de pantalla pueden ser económicamente viables en algunos casos aislados como cuando:

- Es imposible un balance adecuado para la conexión cruzada, y cuando no puede ser utilizada la conexión en un solo punto (considerando, que el ducto es adecuado para él paso del conductor de tierra).



- b) En el caso de ser necesaria la instalación de un cable de respaldo (un cuarto cable para un circuito simple o un séptimo cable para un circuito doble) en un sistema con conexión cruzada, se puede instalar este cable también con conexión cruzada lo cual es una operación larga y difícil, por lo que conectar este cable con transformadores de pantalla resulta una opción mucho más viable, fácil y directa de hacer.

3.5.1 Uso de la conexión en un solo punto

Se necesitan un mínimo de tres secciones menores para formar un sistema en conexión cruzada, por lo que es necesaria la utilización de empalmes con interrupción de pantalla únicamente en los puntos de empalme, por lo que no se aplica normalmente el método de conexión cruzada a circuitos de cables que abarcan únicamente una o dos secciones, para tales circuitos, la conexión en un solo punto es el método más recomendable. En el anexo B de este documento se mencionan las distancias para conexión en un solo punto en proyectos realizados en México por CFE entre 1999 y 2008.

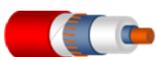
Para circuitos largos se puede emplear la conexión en Varias Secciones (múltiples longitudes) en lugar de la conexión cruzada, esto se utiliza especialmente cuando se instala un cable de respaldo adicional a los cables de fase (Un cuarto cable para un circuito simple o un séptimo cable para un circuito doble) o en la sección que tenga una longitud diferente a las demás.

3.5.2 Ventajas de la conexión cruzada

Aunque las pantallas de los cables en sistemas con conexión en un solo punto generalmente tienen una sección transversal y una conductividad que las hace capaces de llevar las corrientes de cortocircuito debido a fallas en el sistema de cables de A.T., no son capaces de realizarlo porque están aterrizadas únicamente en un punto, por lo que es altamente recomendable utilizar un conductor paralelo de tierra (ver 3.2.2), cabe destacar que la utilización de este conductor a tierra incrementa considerablemente el costo del sistema.

La principal ventaja de la conexión cruzada es que mientras las corrientes inducidas de la pantalla son casi eliminadas durante condiciones normales de operación, las pantallas forman una trayectoria continua de extremo a extremo en el circuito de cables de A.T., estando aterrizadas en ambos extremos; debido a que las pantallas forman un circuito cerrado que está conectado a tierra, en el caso de una falla la corriente generada por esta puede regresar por la pantalla hacia tierra, por lo que ya no es necesario el conductor paralelo de tierra, con esta medida se disminuyen los costos de instalación debido a la eliminación del mismo.

En comparación con los conductores paralelos a tierra, las pantallas conectadas de este modo (conexión cruzada) son mucho más eficientes durante fallas a tierra, por lo tanto las tensiones inducidas durante fallas a tierra en los cables paralelos, líneas de



comunicación, tuberías, cercas, etc., son menores en un sistema de conexión cruzada que en un sistema con conexión en un solo punto.

3.5.3 Elección del sistema en conexión cruzada

Para circuitos largos, la mejor elección está entre sistemas de conexión cruzada en secciones (ver 3.4.3 y 3.4.4) y sistemas de conexión cruzada continua (ver 3.4.5). Las ventajas de cada uno son las siguientes:

3.5.3.1 Ventajas de la conexión cruzada en secciones

- a) Cada una de las secciones mayores forman una red eléctrica separada, en la que es relativamente fácil el cálculo de las corrientes en pantalla cuando el tamaño de las secciones menores no es igual.

En una sección no uniforme, teniendo una configuración trébol, la relación de las pérdidas en pantalla en conexión cruzada y en conexión sólida (dos puntos o más puntos) esta dada por:

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

Donde

- x pérdidas en conexión cruzada
 y pérdidas en conexión dos o más puntos

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ son las longitudes por unidad para las tres secciones menores; esto es: $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$

EJEMPLO: Cuando, $\lambda_1 = 0.4$ $\lambda_2 = 0.2$ $\lambda_3 = 0.4$

Las pérdidas en pantallas en conexión cruzada son aproximadamente el 4% de las pérdidas en pantallas en conexión sólida. Ver 1.3.5 Ejemplo del costo de pérdidas en pantalla metálica

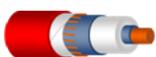
- a) La conexión de pantalla en el empalme de cada sección mayor permite que la corriente de falla en el cable pueda ser distribuida entre las tres pantallas excepto por la sección mayor donde ocurre la falla.
- b) Las conexiones de pantalla y tierra en los empalmes de las secciones mayores tienden a reducir las tensiones transitorias en pantalla.
- c) El número de LT's requeridos se reduce.



- d) Las conexiones de pantalla en los empalmes de las secciones mayores aseguran que no habrá flujo de corriente (debida a que las longitudes de las secciones menores sean diferentes) más allá de cada enlace de tierra.

3.5.3.2 Ventajas de la conexión cruzada continua

- a) Los efectos que causa el tener secciones menores con diferentes longitudes pueden reducirse utilizando un número de secciones menores que no sea exactamente divisible entre tres.
- b) Es posible limitar las corrientes en la pantalla a lo largo de todo el circuito sin importar el número de secciones menores que conformen el sistema.
- c) La prueba de nivel de aislamiento del cable y de limitadores de tensión se vuelve fácil ya que sólo existen dos uniones a tierra para ser removidas, inclusive para circuitos largos, estas pruebas son validas al aplicarse en los extremos del circuito.



CAPÍTULO 4

4. Accesorios para la conexión a tierra

En cualquier sistema eléctrico en el que intervengan conductores aislados, serán necesarios los accesorios para cables. Los accesorios más frecuentes que se precisarán en una red subterránea son los siguientes:

- ✚ Empalmes
- ✚ Limitadores de tensión (LT's)
- ✚ Cajas de conexión
- ✚ Terminales

4.1 Empalmes con interrupción de pantalla

Cuando las pérdidas en las pantallas metálicas deben ser minimizadas o eliminadas en su totalidad mediante los métodos especiales de conexión de pantallas, los empalmes con interrupción de pantalla son necesarios para interrumpir la continuidad eléctrica en el circuito de pantalla. Para llevar a cabo satisfactoriamente esta función los empalmes deben cumplir con ciertas características de diseño: mecánicamente deben ser robustos, resistentes a la humedad, repelentes al agua y ser resistentes bajo cualquier condición de operación; eléctricamente deben estar diseñados para resistir tensiones por encima de la nominal que ocurren durante fallas en el sistema eléctrico debidas a descargas atmosféricas, así como durante maniobras de operación de interruptores. La selección de los materiales que conforman los empalmes debe estar apoyada en pruebas de evaluación para incorporarlos a la geometría del diseño y hacer que los esfuerzos eléctricos presentes en los cables durante su operación sean de magnitudes tolerables. Uno de los factores que se tiene que tomar en cuenta en el diseño de los empalmes es asegurar que los gradientes de esfuerzos presentes sean soportables por los materiales utilizados.

Hay que tener presente que los puntos donde se concentran los mayores esfuerzos eléctricos en los empalmes son en el hombro del conector, la base de la punta de lápiz del aislamiento y la sección cónica del aislamiento repuesto⁽¹⁾.

Por otra parte, la resistencia eléctrica en el aislamiento del empalme es una característica que debe tomarse en cuenta antes de que el empalme pueda ser usado en un esquema de conexiones, esta característica se determina calculando la tensión máxima que aparece en el empalme debido a fallas en el sistema eléctrico ocasionadas por descargas atmosféricas y durante maniobras de operación de interruptores.

Existen tres tipos específicos de empalmes en función del material a emplear en el aislamiento externo:

- ✚ Premoldeados: estos empalmes están hechos de materiales aislantes y semiconductores a altas tensiones, la conexión de los conductores puede ser por compresión o soldable. Presenta excelentes características mecánicas y térmicas; su cubierta asegura una perfecta protección del empalme. Estos empalmes pueden ser con o sin pantalla interrumpida como se muestra en la figura 4.1.



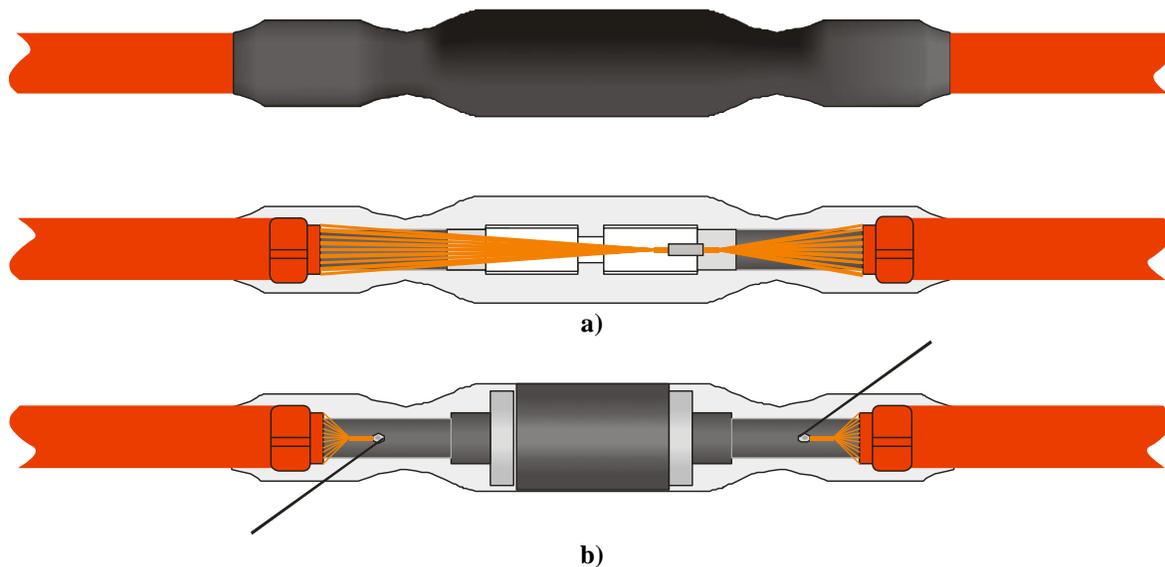


Figura 4.1 – Empalmes.

a) Sin interrupción de pantalla b) Con interrupción de pantalla

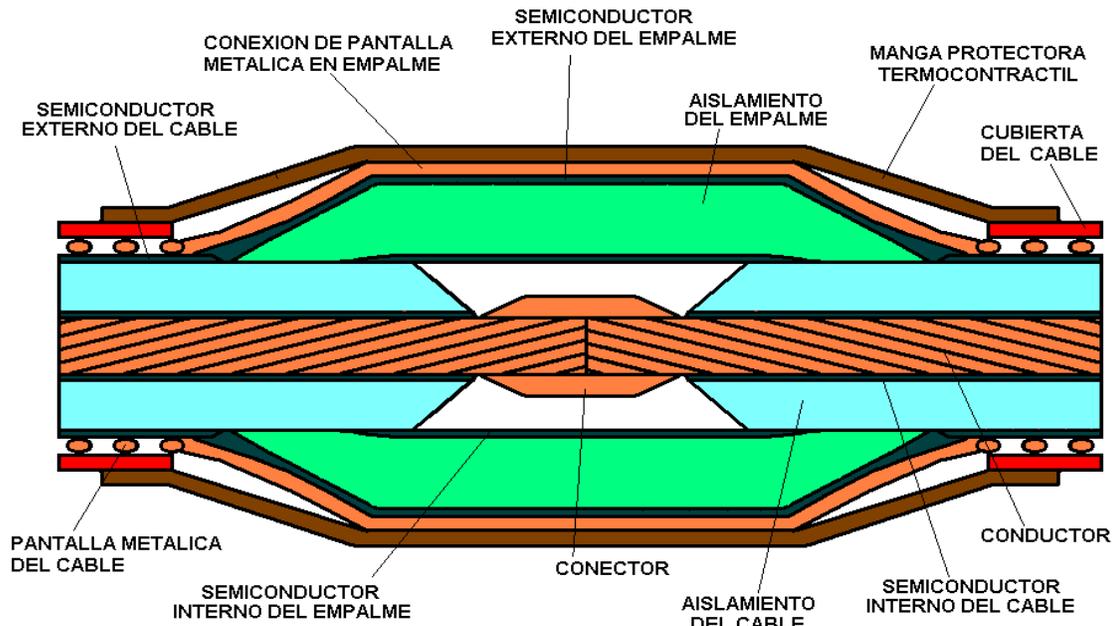
Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

- ✚ Termocontráctil: en este tipo los componentes a reconstruir del cable, como la semiconductora sobre el conductor, el aislamiento, y la semiconductora sobre el aislante se le aplica la tecnología retráctil, que por medio del calor suministrado con un equipo diseñado para este fin se logra la reconstrucción del cable. En la actualidad, el uso de empalmes elaborados con esta tecnología, se restringe a cables con aislamiento extruido.
- ✚ Contráctil en frío: estos empalmes restituyen la pantalla semiconductora sobre el conductor, el aislamiento, y la semiconductora sobre el aislante, aplicando los elementos reconstitutivos al retirar del cuerpo del empalme los soportes que los mantiene expandidos, hasta llegar a contraerse y alcanzar una dimensión en reposo que al igual que la tecnología termocontráctil⁽³⁾.

En la figura 4.5 se muestran las partes principales que integran los empalmes para cables con aislamiento extruido.



CORTE LONGITUDINAL DE UN EMPALME



CORTE LONGITUDINAL DE UN EMPALME CON INTERRUPCION DE PANTALLA

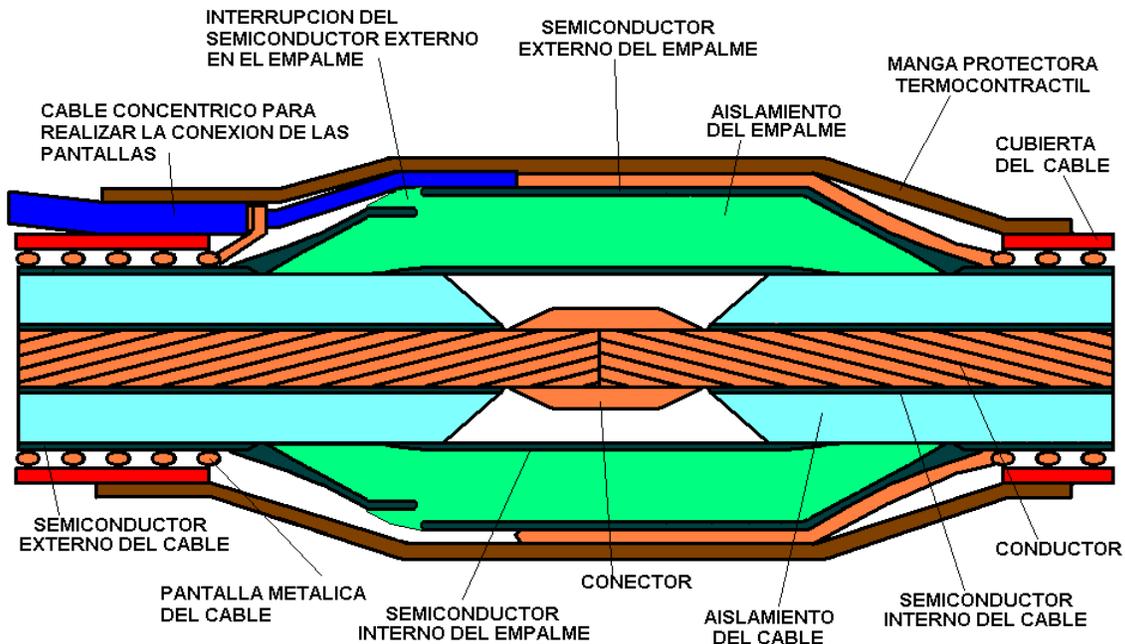


Figura 4.2 – Corte longitudinal de empalmes.
 Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾



4.2 Limitadores de tensión (LT's)

Los limitadores de tensión son unos dispositivos que se encargan de limitar la tensión en las pantallas metálicas durante sobretensiones generadas por descargas atmosféricas, operación de interruptores, o fallas en el sistema eléctrico, esto, para evitar perforación de la cubierta de los cables o de los empalmes en sistemas de conexión cruzada y en sistemas con conexión en un solo punto, ya que esto ocasionaría que circularan corrientes en las pantallas con el consiguiente sobrecalentamiento de los cables, además de corrosión en las pantallas metálicas, por lo tanto, es necesario proporcionar protección en caso de los transitorios mencionados. En la actualidad, los limitadores de tensión (LT's) se utilizan para este fin, los principales tipos son:

- a) Resistencias no lineales
- b) Resistencias no lineales en serie con Spark gaps
- c) Spark gaps

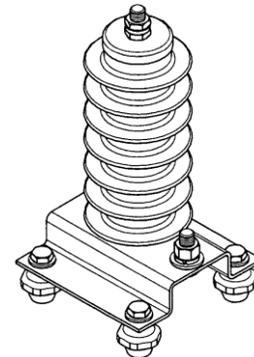


Figura 4.3.- Limitador de tensión de pantalla.
Fuente ABB⁽⁶⁾

El limitador de tensión opera de la siguiente manera: el limitador está conectado entre la pantalla metálica y tierra, y al estar el sistema trabajando en condiciones normales de operación el limitador debe comportarse como un aislador; al aplicarle una sobretensión de cierta magnitud debe convertirse en conductor y al desaparecer esa sobretensión debe convertirse de nuevo en aislador, interrumpiendo la corriente de baja frecuencia consecutiva a la corriente transitoria que se estableció a través de él.

4.2. Tipos de limitadores de tensión

4.2.1.1 Resistencias no lineales

En conjunto la resistencia no lineal se comporta como una resistencia variable, tal que para tensiones altas su resistencia es baja y para tensiones bajas es alta; en el extremo del sistema donde se desean limitar las sobretensiones se conectan los limitadores entre cada una de las pantallas y tierra, estas resistencias no lineales trabajan en condición normal, o sea como aislador, tanto para tensiones nominales como para sobretensiones de baja frecuencia, donde estas últimas se presentan en las pantallas donde no ocurrió la falla, esta condición junto con la capacidad de absorción de energía que tiene el limitador son definitivas para la elección del mismo, las resistencias no lineales tienen una capacidad limitada para absorber energía, que a su vez permite descargar las corrientes debidas a sobretensiones transitorias, sin embargo no cuentan con la capacidad de absorción de energía necesaria para descargar corrientes debidas a sobretensiones de baja frecuencia⁽⁵⁾.



Esta clase de limitadores son por lo regular del tipo SiC (Carburo de Silicio) y brindan una buena protección contra sobretensiones transitorias, las cuales al ser demasiado altas provocan la destrucción del mismo, en este punto el limitador permite el flujo a tierra de la energía asociada a este tipo de sobretensiones.

El exceso de humedad reduce significativamente la eficiencia de las resistencias no lineales, y por lo tanto, deben ser protegidas contra esta, a través de una caja de conexión.



Figura 4.4 – LT's de diversas capacidades con aislamiento de silicona.
Fuente ABB⁽⁶⁾

MOV's

En la actualidad los LT's de estado sólido emplean en general la tecnología MOV-ZnO (Varistor de Óxido Metálico-Óxido de Zinc). El MOV proporciona una operación ininterrumpida bajo tensión nominal y tiene una disipación de energía despreciable, en la práctica se desconectan los LT's antes de realizar pruebas en la cubierta, sin embargo, dado que la resistencia en la cubierta del cable es normalmente superior a 100MΩ, el uso de MOV's permite pruebas en la cubierta sin necesidad de desconectar físicamente los LT's, si la corriente en el momento de la prueba es menor a 3mA.

Avances tecnológicos en el desarrollo de MOV-ZnO han eliminado el uso de resistencias no lineales y spark gap, en la actualidad se dispone de LT's MOV compactos que tienen la capacidad de resistir alta energía (kJ/kV) y permiten una conexión directa de LT's entre la pantalla metálica y el conductor de tierra. Una característica a resaltar de estos limitadores sobre los demás, es que algunos diseños son completamente encapsulados, sin explosores los cuales los hace más eficientes, son utilizados en instalaciones de distribución en gas SF₆ (GIS), brindan un alto nivel de protección contra sobretensiones transitorias⁽⁶⁾.

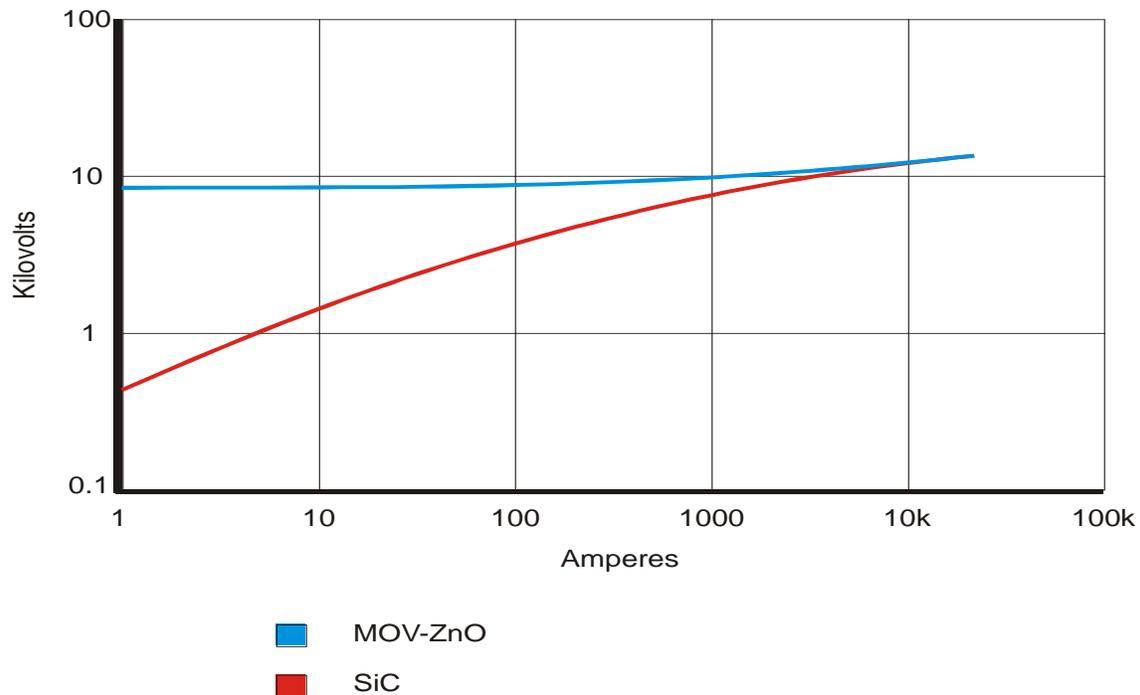
Con esta clase de tecnología se simplifica la construcción del limitador, obteniendo además de un tamaño más pequeño, un nivel de protección más preciso y efectivo, ver figura 4.5.





Figura 4.5 MOV's.
Fuente ABB⁽⁶⁾

En la Gráfica 4.1 se muestran las características de tensión-corriente de un limitador de tensión de 6kV de carburo de silicio y de óxido de zinc.



Gráfica 4.1 – Característica Tensión-tiempo de LT's de 6Kv de SiC y MOV-ZnO.
Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

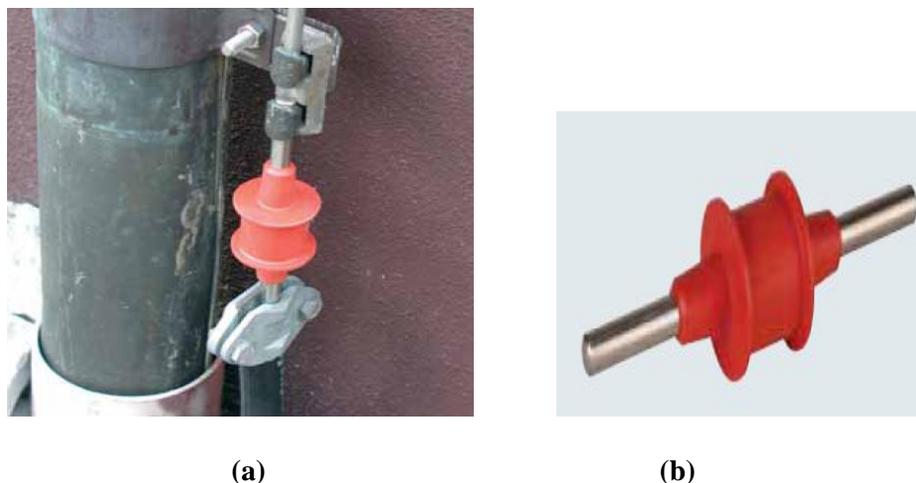


4.2.1.2 Spark gaps

El spark gap es el más sencillo de los LT's, pero tiene la desventaja de que puede ser dañado por grandes corrientes producidas por un arqueo, y su respuesta es lenta, sobre todo en el aumento abrupto de sobretensiones transitorias. La longitud del spark gap puede incrementarse para que las corrientes en caso de falla no mantengan un arco, sin embargo, esto podría reducir la capacidad de protección de los spark gaps, en particular cuando se presentan sobretensiones transitorias.

Los spark gaps proporcionan una protección de alta confiabilidad en las terminales para las pantallas metálicas; el arreglo del electrodo del spark gap está diseñado para provocar un desplazamiento del arco, lo cual elimina los problemas de corrosión de los electrodos, estos spark gaps son capaces de conducir arcos de alta densidad de corriente, sin deterioro de los electrodos, y se utilizan para la protección de pantallas metálicas en las terminales de circuitos de hasta 10km de longitud. Es importante mencionar que el tipo de Spark gap a utilizar va estar en función de la tensión de impulso del arco producida por una sobretensión transitoria. El grado de protección de estos dispositivos eléctricos esta referido a la clasificación IP (Ingress Protection) que puede ser IP 54 o IP67, para más detalles de esta clasificación ver tabla de grados IP al final de este capítulo.

Los spark gaps requieren inspección y mantenimiento periódicos, y por lo tanto, se sugiere que se utilicen sólo para proteger circuitos con conexión en un solo punto en las terminales donde se tenga fácil acceso al spark gap, se recomienda que no se utilicen en sistemas de conexión cruzada donde los spark gaps son instalados en cajas de conexiones y son relativamente inaccesibles. La figura 4.6 (b) muestra el diseño de un spark gap y la figura 4.6 (a) es la instalación del mismo spark gap a un cable.



(a) (b)
Figura 4.6 – Spark gap y su instalación.
Fuente: Lightning equipotential bonding⁽⁸⁾



4.2.1.3 Resistencias no lineales en serie con spark gap

Cuando son usadas resistencias no lineales tipo SiC (Carburo de Silicio), deben ser usados spark gaps en serie, en contraste con los limitadores de tensión (MOV-ZnO) descritos en 4.2.1.1, estos tienen la ventaja que el flujo de corriente será interrumpido y por lo tanto, la potencia disipada en estas resistencias será menor, sin embargo, este tipo de limitadores a pesar de ser modernos arquean fácilmente con una sobretensión transitoria muy pequeña y tienen la desventaja de que su respuesta es muy lenta en comparación con una resistencia no lineal sin spark gap en serie.

El nivel de tensión aumenta en el spark gap dependiendo de la contaminación externa en el limitador, el aumento de la contaminación externa o la humedad son factores desfavorables en los limitadores ya que disminuyen su capacidad de absorción, lo cual podría causar falla en el limitador, por lo tanto, el diseño del limitador debe evaluarse cuidadosamente para una buena aplicación y un margen de protección amplio.

4.2.2 Criterios para la selección de los limitadores de tensión

En la selección de un limitador de tensión, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- a) El limitador debe ser apropiado para una operación ininterrumpida con una tensión aplicada igual a la tensión inducida en la pantalla bajo condiciones normales de operación y en caso de emergencia.
- b) El limitador debe ser capaz de soportar sobretensiones como consecuencia de fallas que se pudieran presentar en el sistema. Se debe tener precaución en la selección del limitador tipo resistencia no lineal debido a los problemas asociados con sobretensiones discutidos en 4.2.1.1.
- c) Para los limitadores tipo resistencia no lineal, debe especificarse un tiempo máximo; esto es usualmente el doble del máximo tiempo de liberación de falla del sistema para permitir su restablecimiento.
- d) Al calcular las tensiones que aparecen a través de los LT's, esto debe de realizarse tanto para limitadores conectados en estrella o en delta.
- e) Los limitadores deben ser capaces de soportar las corrientes de impulso de la misma duración, tal como se especifica en los requerimientos de las pruebas de impulso para los limitadores.



Un limitador tipo resistencia no lineal debe ser capaz de absorber, sin daños, la energía disipada debido a switcheo, incluyendo switcheo asociado con una falla externa al sistema; la experiencia y los cálculos indican que la energía disipada en las resistencias no lineales debido al switcheo no es un criterio importante de diseño para circuitos en conexión cruzada, sin embargo, para circuitos largos conectados en un punto, el switcheo incrementa los transitorios de forma importante, y los cálculos deberán hacerse para estos casos. Los cálculos deben realizarse con ayuda de una computadora, ya que los métodos tradicionales no pueden ser utilizados fácilmente debido a la presencia de elementos no lineales en el circuito, se puede asumir que estas sobretensiones transitorias son las típicas generadas por switcheo.

4.2.3 Uso de los limitadores de tensión

4.2.3.1 Conexión en un solo punto

Los LT's están conectados en el extremo de la pantalla metálica que no se encuentra aterrizada sólidamente, donde en caso de tener circuitos largos como por ejemplo, circuitos de tres longitudes con empalmes con interrupción de pantalla (ver figura 3.5 del capítulo 3) los limitadores se conectan en el extremo de los empalmes que no está aterrizado sólidamente⁽⁹⁾; en general, se debe aterrizar el extremo del cable que esté sometido a la mayor cantidad de tensiones transitorias, debido a tormentas eléctricas o maniobras de interruptores.

Cuando el terreno tiene mucho menor resistencia en uno de sus extremos, es preferible poner a tierra la pantalla en ese extremo, también es recomendable instalar el limitador de tensión dentro de un registro a través de una caja de conexiones, en vez de un lugar accesible al público, ya que existe cierto riesgo de explosión por falla del mismo limitador de tensión, así pues, deben considerarse todos estos factores..

4.2.3.2 Conexión cruzada

En instalaciones de cables subterráneos directamente enterrados, las conexiones de pantallas metálicas en conexión cruzada son hechas en cajas de conexión superficiales, de modo que las pantallas metálicas pueden fácilmente ser aisladas para las pruebas de tensión en las cubiertas del cable; los LT's se encuentran en las cajas de conexiones mencionadas anteriormente, donde se tiene un fácil acceso para darles mantenimiento y supervisión; en este tipo de instalación las conexiones del cable que va del empalme a la caja de conexión pueden llegar a ser de una longitud superior a los 10m, pero, en cualquier caso, no debe exceder de 15m; los cables de tierra pueden ser de tipo coaxial con bajo aumento de impedancia y lo más corto posible, ver figura 4.7, en ésta figura se muestra una instalación de dos circuitos en conexión cruzada para un sistema de cables de transmisión, donde lo importante de dicha figura es ver que la longitud de los cables coaxiales de tierra que van conectados hacia la caja de conexión es grande. Para minimizar el efecto de las conexiones en la eficiencia de los LT's, estos cables de tierra deben ser capaces de llevar las corrientes de cortocircuito que se pudieran presentar en el sistema de cables de A.T.





Figura 4.7 – Arreglo para un sistema de cables de transmisión en conexión cruzada.

Fuente: Boxes Cross Bonding and Sectionalisation For High-Voltage Cable System ⁽¹⁰⁾

En túneles, ductos, u otras instalaciones, donde los empalmes se encuentran en registros, los LT's pueden ser conectados con cables de tierra relativamente cortos, los cables de tierra de una conexión cruzada deben ser lo más cortos posibles para minimizar las elevaciones de magnitudes iníciales, y la sección transversal del conductor debe ser la adecuada para llevar corrientes de cortocircuito en el sistema.

Por otra parte, para evitar que las pantallas resulten dañadas se deben dimensionar para que puedan transmitir ésta corriente de corto circuito, la cual se va a dividir entre las pantallas de las tres fases⁽²⁾. El dimensionamiento de las pantallas se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{T_f B}{T_i B}}} \dots \text{(EC. 4.1)}$$

Donde:

I = Corriente de cortocircuito que va a circular por cada pantalla en [A]

K = Constante que depende del material de la pantalla [$A s^{1/2}/mm^2$], ver tabla 4.1

t = Duración del cortocircuito en [s]

S = Área de la sección transversal de cada pantalla metálica en [mm^2].

T_f = Temperatura final que soportan los elementos que rodean a la pantalla metálica en [°C]. Generalmente se usa 200 °C

T_i = Temperatura inicial en [°C], ver tabla 4.2.

B = Constante que depende del material de la pantalla metálica en [°C], ver tabla 4.1.



Material	A s1/2/mm2	B (°C)
Cobre	226	234.5
Aluminio	148	228
Plomo	41	230
Acero	78	202

Tabla 4.1- Valores de constantes para diversos materiales.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

Tensión nominal del cable (kV)	Temperatura inicial de la pantalla (°C)
5 a 35	85
35 a 46	80
69 a 115	75

Tabla 4.2-Temperatura inicial de la pantalla para cables con temperatura del conductor a 90°C.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

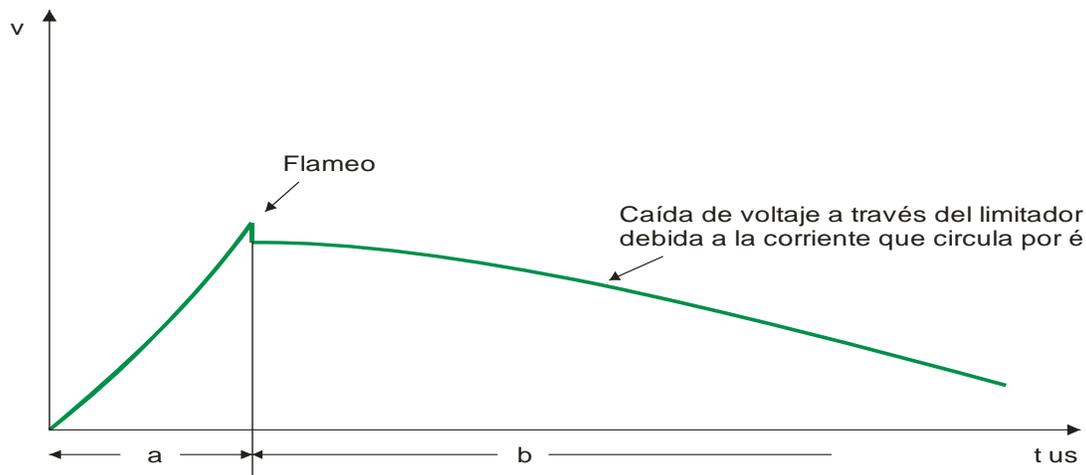
En general, los LT's se deberán instalar en:

- ✚ En los empalmes con interrupción de pantalla para Cross Bonding, y en las terminales del extremo no aterrizado para conexiones en un solo punto.
- ✚ En terminales no aterrizadas, conectadas directamente a cubierta metálica.
- ✚ En cualquier tipo de terminal no aterrizada.
- ✚ Bajo ciertas circunstancias será necesario instalar LT's en terminales conectadas a tierra, cuando éstas estén instaladas a través de cubiertas metálicas

4.3 Características de operación y especificaciones de los pararrayos

En la Figura 4.8 se muestra la característica de operación del LT's. El LT se comporta como un aislador hasta que la tensión alcanza un valor suficiente para producir el cebado o flameo de los explosores, a partir de ese momento se convierte en conductor; la característica de resistencia variable del LT limita la caída de tensión a través del mismo, y produce una característica de descarga bastante plana, que puede coordinarse con la característica Tensión-tiempo de los aislamientos⁽⁵⁾.





En el intervalo de tiempo a no hay corriente de descarga a través del limitador, este se comporta como aislador. En el intervalo b si hay corriente de descarga a través del limitador, este se comporta como una resistencia variable.

Figura 4.8 – Característica de operación de los LT's.

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

El comportamiento de un limitador queda definido por los siguientes valores:

Tensión de cebado o flameo: es la magnitud de tensión que causa el cebado de los explosores y por lo tanto, la descarga a través del limitador, esta tensión depende de la forma de onda de tensión aplicada, por lo que se especifican los siguientes valores.

- Tensión de cebado para frente de onda $1200 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (kV cresta)
- Tensión de cebado para tensión de impulso de $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ (kV cresta)
- Tensión de cebado para onda de alta frecuencia (kV cresta)
- Tensión de cebado para onda de baja frecuencia (50 o 60 ciclos por segundo) (kV eficaz)

Tensión de descebado o de corte: después de que la sobretensión ha sido eliminada, el limitador debe ser capaz de interrumpir la corriente de baja frecuencia al primer paso por cero y recobrar su condición de aislador. La tensión de descebado o de corte es el valor eficaz de la máxima tensión de baja frecuencia (50 o 60 cps) aplicado al LT, para el cual éste puede interrumpir la corriente y mantenerse en un estado no conductor.

La tensión de descebado es generalmente igual a la tensión nominal del LT, aunque algunos LT's de diseño reciente tienen una tensión de descebado mayor que su tensión nominal.

Tensión máxima de descarga. La tensión de descarga del LT, o sea la caída de tensión IR producida por la circulación de corriente a través del LT, depende de la forma de onda de la corriente y de la magnitud de la corriente. Por esta razón se especifica la tensión máxima de descarga en kilovolts, valor de cresta, para un impulso de corriente de $8 \times 20 \mu\text{s}$ y para tres magnitudes de corriente: 5000A, 10000A y 20000A.



La corriente de descarga a través del LT no depende sólo de las características del LT sino también de las características del sistema al que está conectado. Supóngase un LT colocado al final de una línea de impedancia característica Z_0 como se muestra esquemáticamente en la figura 4.9. Por la línea se propaga una onda de tensión de magnitud $V_i^{(5)}$.

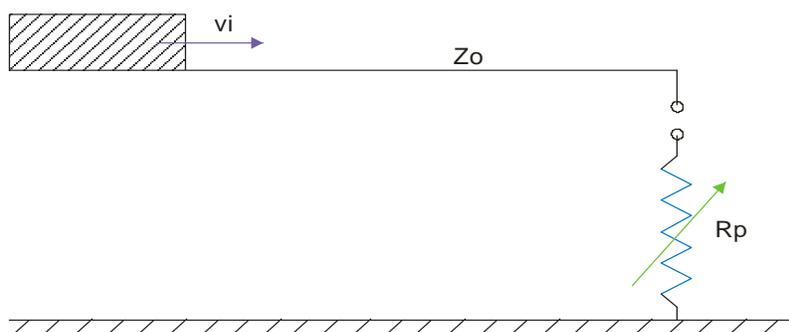


Figura 4.9 – LT colocado al final de una línea.

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

El LT empieza a descargar en el instante en que el frente de la onda de tensión llega al punto donde está instalado.

Las condiciones al final de la línea pueden representarse mediante el circuito equivalente que se observa en la figura 4.10.

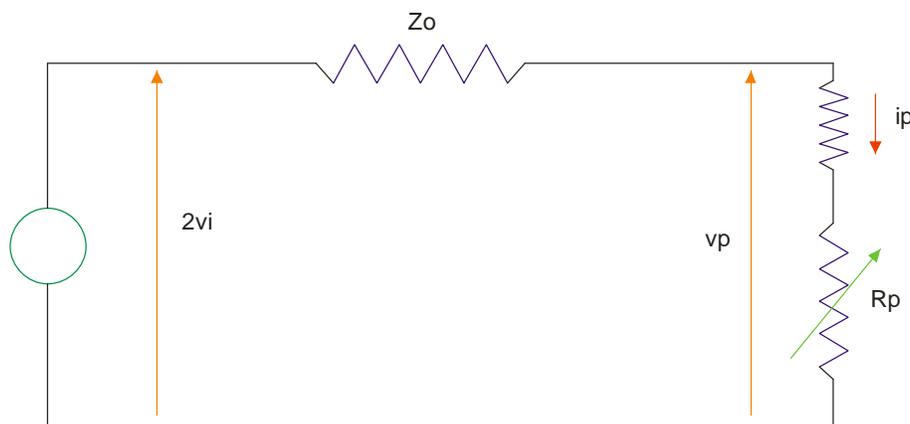


Figura 4.10 – Circuito equivalente de Thevenin para representar las condiciones de una línea terminada en un LT.

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

De acuerdo con el circuito equivalente de la figura anterior, la tensión aplicada al LT está dada por la siguiente expresión:

$$v_p = 2v_i - i_p Z_0 \quad \dots(\text{EC. 4.2})$$



y la corriente que circula por el LT es:

$$i_p = \frac{2v_i}{Z_0 + R_p} \dots \text{(E.C. 4.3)}$$

Capacidad de descarga. Un LT debe tener la capacidad térmica suficiente para descargar las corrientes que pueden llegar a circular por él.

Se definen los siguientes tres valores de capacidad de descarga, para los cuales se han normalizado las pruebas correspondientes:

- a) Capacidad descarga de corrientes de gran intensidad y corta duración. Esta condición corresponde a la descarga de corrientes debidas a rayos. En la prueba normalizada se considera una onda de corriente de $(4 \text{ a } 8) \times (10 \text{ a } 20) \mu\text{s}$ y se define esta capacidad de descarga como el valor de cresta, en amperes, de la mayor corriente que debe poder descargar el LT.
- b) Capacidad de descarga de corrientes de baja intensidad y larga duración. Esta condición corresponde a descargas debidas a transitorios producidos por la conexión o desconexión de circuitos. La prueba normalizada específica que el LT debe poder soportar 20 descargas de ondas de corriente rectangulares de $2000 \mu\text{s}$ de duración y de un valor de cresta determinado⁽⁵⁾.

Otra manera de definir la capacidad del LT para este tipo de descargas es especificando la longitud de línea de una tensión determinada que puede descargar el LT.

- c) Capacidad del LT para un ciclo de descargas sucesivas. La prueba normalizada que define esta capacidad específica que el LT debe soportar un ciclo de trabajo consistente en 20 descargas sucesivas de ondas de corriente de $8 \times 20 \mu\text{s}$ de un valor de cresta determinado.

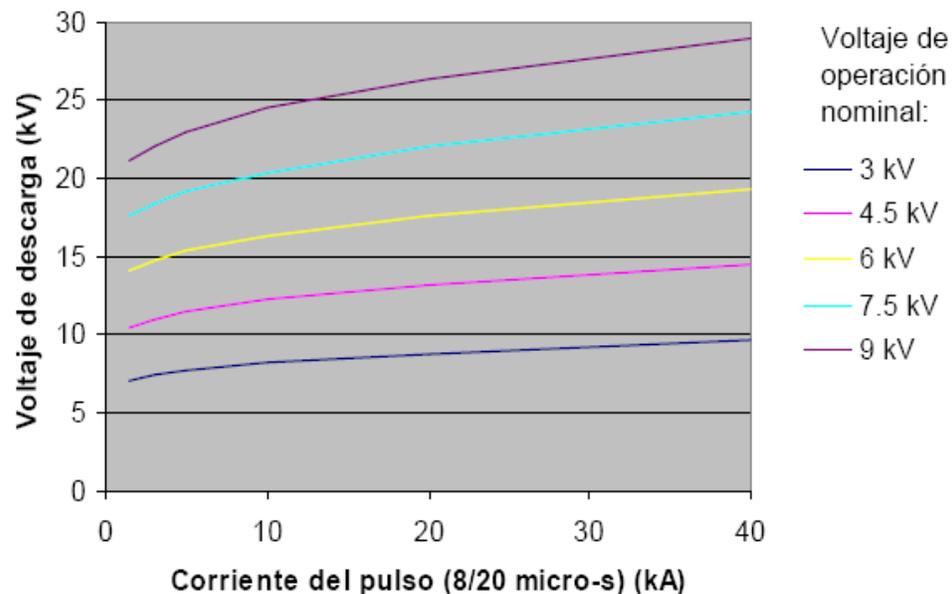
Selección de los LT's

El punto de partida para la selección de los LT's es la determinación de la máxima sobretensión de baja frecuencia que puede presentarse en el punto del sistema en el que van a instalarse los LT's. En efecto, la tensión de descebado de los LT's debe ser siempre superior a la máxima sobretensión de baja frecuencia al que puede quedar sometido el LT; si no fuese así, el LT no podría interrumpir la corriente de baja frecuencia que tiende a circular por él, una vez que se ha convertido en conductor, debido a una sobretensión transitoria de suficiente magnitud. La capacidad térmica de un LT es limitada, suficiente para disipar la energía producida por la descarga a tierra de un transitorio con duración de microsegundos, pero la descarga de una corriente de baja frecuencia durante unos cuantos ciclos excedería esa capacidad térmica y produciría la destrucción del LT.



Para la correcta selección de los LT's, se deberá tener presente, que siempre la tensión de operación nominal deberá ser mayor o igual tensión inducida en las pantallas metálicas en condiciones de cortocircuito. También se debe considerar que la tensión de descarga del limitador deberá ser menor al BIL de la cubierta⁽⁴⁾.

En la grafica 4.2 se muestra las curvas de descarga de los LT's para pulsos de corriente de 8/20 μ s (correspondiente a pulsos de tensión de 1.2/50 μ s por la no linealidad del limitador).

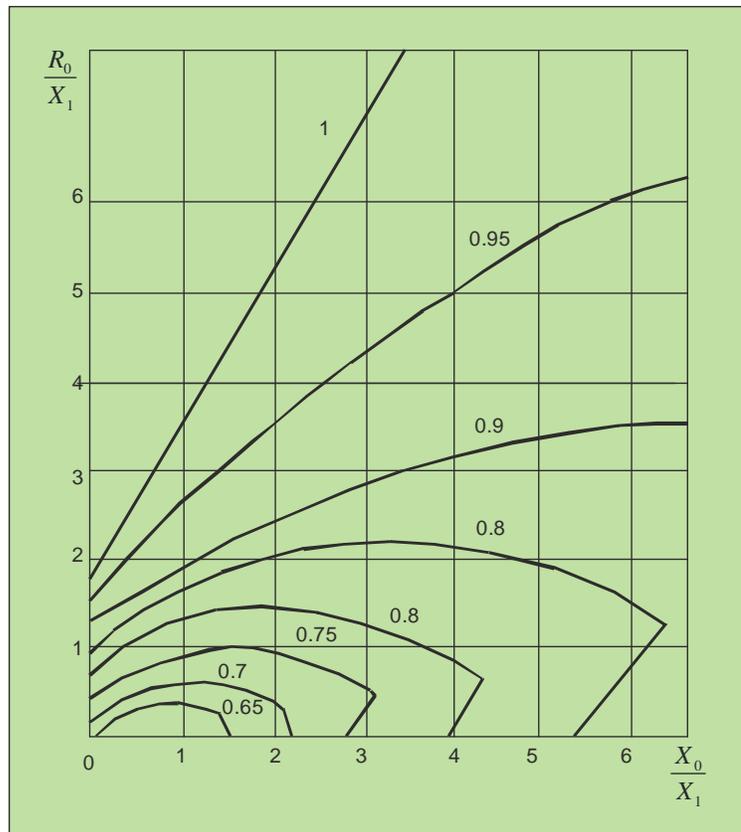


Grafica 4.2 – Curvas de descarga de los LT's para pulsos de corriente de 8/20 μ s.

Fuente: Características Eléctricas Conдумex Cables⁽⁴⁾

Las sobretensiones de baja frecuencia de mayor magnitud que pueden presentarse en un sistema, se deben en la mayor parte de los casos, a cortocircuitos monofásicos a tierra, que producen una elevación de tensión en las fases que no han fallado. También se sabe que la magnitud de esas sobretensiones dependen de las características del sistema y especialmente de la forma en que estén conectados los neutros de los transformadores y generadores; los dos parámetros principales que definen la magnitud de estas sobretensiones son las relaciones X_0/X_1 y R_0/X_1 , donde X_1 es la reactancia positiva del sistema vista desde el punto considerado, X_0 es la reactancia de secuencia cero y R_0 la resistencia de secuencia cero⁽⁵⁾.





Gráfica 4.3- Tensiones a tierra debidas a fallas monofásicas a tierra en sistemas con neutros conectados a tierra.

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

En la gráfica 4.3 se muestra la magnitud de las sobretensiones a tierra durante un cortocircuito monofásico a tierra, expresada en por unidad, con respecto a la tensión entre fases existente antes de ocurrir la falla, en función de X_0/X_1 y R_0/X_1 . Partiendo del conocimiento de estas tensiones, o lo que es equivalente, del valor de las relaciones X_0/X_1 y R_0/X_1 , pueden seleccionarse los pararrayos como se explica a continuación.

Los sistemas eléctricos se clasifican, desde el punto de vista de la forma de conectar los neutros y en función de las relaciones X_0/X_1 y R_0/X_1 , en cinco grupos: A, B, C, D, E (véase tabla 4.3 y gráfica 4.4). Los sistemas de los tipos A y B son sistemas con los neutros conectados directamente a tierra y en los que se verifica que:

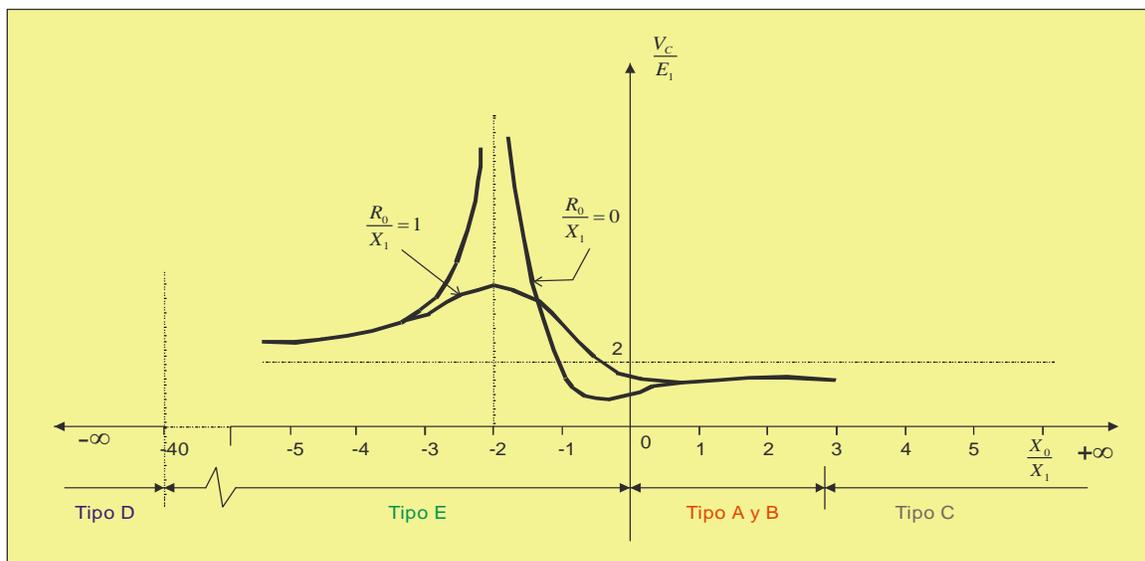
$$0 < \frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad \text{y} \quad 0 < \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$



Tipo de conexión a tierra	Estado del neutro	$\frac{X_0}{X_1}$	$\frac{R_0}{X_1}$
A	Conectado	$0 < \frac{X_0}{X_1} < 3$	$0 < \frac{R_0}{X_1} < 1$
B	Conectado	$0 < \frac{X_0}{X_1} \leq 3$	$0 < \frac{R_0}{X_1} \leq 1$
C	Conectado	$\frac{X_0}{X_1} > 3$	$\frac{R_0}{X_1} > 1$
D	Aislado	$-\infty < \frac{X_0}{X_1} < -40$	---
E	Aislado	$-40 < \frac{X_0}{X_1} < 0$	---

Tabla 4.3- Tipo de sistema de acuerdo con las relaciones R_0/X_1 y X_0/X_1

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾



Gráfica 4.4- Valor absoluto de $\frac{V_c}{E_1}$ en función de $\frac{X_0}{X_1}$.

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

Como puede verse en la gráfica 4.3 las sobretensiones de baja frecuencia que pueden producirse en estos sistemas a causa de una falla monofásica a tierra no exceden del 80% de la tensión entre fases existente antes de la falla. Por lo tanto, en estos sistemas podrán utilizarse pararrayos cuya tensión nominal (que es igual a la tensión de descebado) sea 80% de la máxima tensión de operación entre fases. Para tomar en cuenta las elevaciones de la tensión de operación que pueden producirse para varias condiciones de operación, por ejemplo, al final de una línea larga en vacío o con poca carga, o bien a causa



de una pérdida súbita de carga de un generador, se suele tomar como tensión máxima de operación una tensión 5% mayor que la tensión normal de operación.

Como ejemplo, considérese un sistema eléctrico cuya tensión normal de operación entre fases es de 230kV y que corresponde al tipo B. Los pararrayos que se utilicen en este sistema deberán tener la siguiente tensión nominal:

$$230 \times 1.05 \times 0.8 = 193.2kV$$

En la práctica se tomará el valor normalizado inmediatamente superior que es de 195kV.

Los sistemas tipo A corresponden a sistema de distribución con transformadores conectados en estrella con los neutros conectados directamente a tierra. En ellos se verifica que

$$0 < \frac{X_0}{X_1} < 3 \quad \text{y} \quad 0 < \frac{R_0}{X_1} < 1$$

De acuerdo con las curvas de la gráfica 4.3, para este tipo de sistemas pueden usarse pararrayos cuya tensión nominal sea 75% de la tensión máxima de operación, entre fases.

Los sistemas del tipo C son aquéllos en los que se verifica que

$$\frac{X_0}{X_1} > 3 \quad \text{ó} \quad \frac{R_0}{X_1} > 1 \quad \text{o ambas condiciones}$$

Y generalmente corresponden a sistemas con el neutro conectado a tierra a través de una impedancia. De acuerdo con la gráfica 4.3, las sobretensiones debidas a fallas monofásicas a tierra pueden alcanzar valores de 100% de tensión entre fases y aún algo mayores. Las curvas de la gráfica 4.3 se han trazado suponiendo $R_1 = R_2 = 0$. Para valores de R_1 y R_2 distintos de cero las sobretensiones de baja frecuencia son ligeramente inferiores a los indicados. De todo lo anterior se concluye que en este tipo de sistema pueden usarse pararrayos cuya tensión nominal sea igual al 100% de la tensión máxima de operación entre fases. Por ejemplo, para un sistema cuya tensión nominal de operación entre fases es de 230kV y en el cual los neutros de los transformadores están conectados a través de una impedancia, o sea que corresponde al tipo C, se usarán pararrayos del siguiente valor nominal:

$$230 \times 1.05 \times 1 = 241.5kV$$

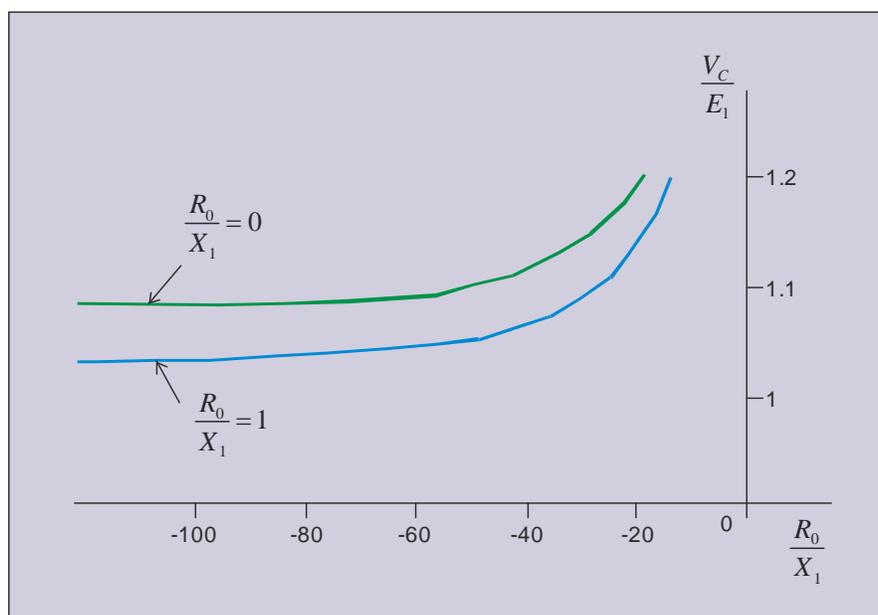
En la práctica se tomará el valor normalizado inmediatamente superior que es 242kV.

Los sistemas tipo D son sistemas con los neutros aislados de tierra, en los que se verifica que

$$-\infty < \frac{X_0}{X_1} < -40$$



La gráfica 4.5 muestra la magnitud de la sobretensiones a tierra durante un cortocircuito monofásico a tierra, expresados en por unidad con respecto a la tensión entre fases, que existía antes de ocurrir la falla, en función de X_0/X_1 y para $R_0/X_1 = 0$ y $R_0/X_1 = 1$. Como puede verse en las curvas gráfica 4.5, en este tipo de sistemas con neutro aislado y $X_0/X_1 < -40$ las sobretensiones de fase a tierra en las fases no afectadas por la falla pueden ser mayores que la tensión entre fases antes de la falla. Por tanto es recomendable usar pararrayos cuya tensión nominal sea 110% de tensión máxima de operación entre fases.



Gráfica 4.5 -Tensiones a tierra debidos a fallas monofásicas a tierra en sistemas con neutro aislado.

Fuente: Redes eléctricas⁽⁵⁾

Por último los sistemas tipo E son sistemas con el neutro aislado y en los que se verifica que

$$-40 < \frac{X_0}{X_1} < 0$$

En este tipo de sistema, las sobretensiones que pueden presentarse durante una falla a tierra en las fases no afectadas por la falla son muy altas, especialmente si el valor de X_0/X_1 es del orden de -2, como puede verse en la gráfica 4.4. Por tanto, para este tipo de sistemas no es posible establecer una regla general para la elección de pararrayos y cada caso ameritará un estudio especial.



4.4 Cajas de conexión

Las cajas de conexión (link boxes) son utilizadas con el fin de facilitar la instalación, la protección y la conexión de los LT's, y/o las conexiones a tierra de las pantallas metálicas de los cables subterráneos, existen diversos tipos de cajas de conexión, estas se seleccionan dependiendo su uso, tomando en cuenta básicamente el tipo de instalación y características del sistema de cables de A.T., así como el método especial de conexión de pantallas metálicas a tierra que se utilice en el mismo, en la actualidad, se utilizan básicamente los siguientes tipos de cajas de conexión:

- ✚ Caja metálica con cubierta de fibra vidrio.
- ✚ Caja metálica.

Una de las principales características de las cajas de conexión es que proporcionan un sello contra el agua, el grado de impermeabilidad se especifica en base a la presión externa del agua⁽¹¹⁾ (NEMA tipo 4X o IEC 60059, clase IP). Las cajas de conexión deben ser resistentes contra la corrosión y se deben adaptar a los requisitos de la instalación, considerando si estas van a ser instaladas en postes, vigas, sobre la pared, o ya sea colocadas en registros o en ocasiones incluso llegan a ser directamente enterradas.

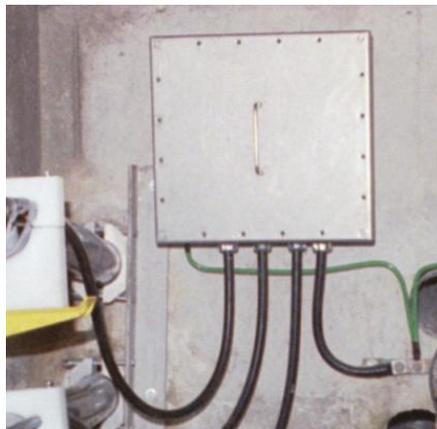


Figura 4.11 – Representación real de una caja de conexión.

Fuente: Serie Temas Selectos sobre Cables de Energía⁽¹²⁾

4.4.1 Caja metálica con cubierta de fibra de vidrio

Es una caja metálica con tapa de fibra de vidrio que protege los LT's, abrazaderas de cobre, terminales del cable a tierra y los conectores de entrada del cable que se encuentran dentro de la caja metálica, la entrada para el cable debe estar diseñada para adaptarse a las conexiones del cable coaxial aislado a tierra y/o al cable aislado de un solo conductor, según sea necesario; todas las abrazaderas en la caja deben estar hechas de acero inoxidable para evitar posibles problemas de corrosión, las terminales de la entrada para el cable de tierra deben ser a prueba de agua y estar completamente selladas, los sellos contra agua deben probarse para una presión externa de 100kPa como máximo; cuando se diseña adecuadamente, la caja metálica con tapa de fibra de vidrio puede estar enterrada



directamente o colocada dentro de un registro de concreto para protección mecánica y fácil acceso; la caja debe estar siempre cerrada, de modo que proporcione el acceso a los componentes sólo con la herramienta o llave adecuada para su ingreso, y también para impedir conexiones inapropiadas.

4.4.2 Caja metálica

Todas las cajas metálicas deben contar con un grado de protección tal como IP54 o IP68 según se requiera, que va depender de las condiciones de la instalación como por ejemplo, si éstas van a estar sumergidas, enterradas, al aire libre, etc. Estas cajas deben ser de acero inoxidable que al igual que las cajas con cubierta de fibra de vidrio protegen a los LT's, y accesorios de conexión que se encuentra dentro de dicha caja. Igualmente, la entrada para los cables debe estar diseñada para adaptarse a las conexiones del cable coaxial aislado a tierra y/o al cable aislado de un solo conductor, según sea necesario y de la misma manera, todas las abrazaderas en la caja deben estar hechas de acero inoxidable para evitar posibles problemas de corrosión. El aislamiento de los accesorios puede ser epoxy o Transparent methyl methacrylate⁽⁹⁾.

Las terminales de la entrada para el cable de tierra deben ser a prueba de agua, y estar completamente selladas, los sellos contra agua deben probarse para una presión externa de 100kPa como máximo.

Las cajas colocadas en forma vertical reciben el nombre cajas tipo pedestal, y deben de tener las siguientes características:

- ✚ La parte trasera de esta caja deberá contar con tornillos o pernos de sujeción para colocarse sobre la pared, poste o estructura metálica de una subestación.
- ✚ Las puertas deberán contar con un método de seguridad para el ingreso a sus componentes de conexión. Si es posible deberán contar con un sistema de interrupción, para que en el momento de abrirse se aíslen todas las partes internas que se encuentren en operación, para que de esta forma se prevengan posibles daños por ráfaga de arco.
- ✚ Cada circuito deberá tener sus propios cables para la correcta conexión de las pantallas, LT's y cables de tierra. Los accesorios de las cajas de conexión no deberán usarse para más de un circuito⁽⁹⁾.

Cuando las cajas de conexiones están colocadas dentro de un área importante de red de tierra (por ejemplo una subestación), la barra interna del neutro de la caja y la misma caja metálica deberán ser colocadas a esta red de tierras.

Las cajas metálicas siempre deben ser puestas a tierra por medio de un conector independiente de los elementos conectados a tierra que se encuentran dentro de la caja conexión (conectores de pantalla o de los LT's), estos cables deben tener un nivel de aislamiento suficiente contra sobretensiones causadas por cortocircuitos. Una falla produciría calentamiento y aumento de la presión al interior de las cajas, lo cual resultaría



desfavorable, ya que estas podrían reventarse y causar daños en general al sistema de cables de A.T.

Las cajas metálicas deben ser conectadas a tierra por medio de una conexión adyacente a los electrodos principales de tierra o al conductor paralelo de tierra. Estas cajas se pueden conectar a tierra justo en el sistema de tierra local independiente de la malla de tierra principal, siempre y cuando el nivel de aislamiento interno de estas cajas garantice un nivel apropiado de seguridad.

Estas cajas deben de contar con los accesorios suficientes para colocarlos en forma vertical u horizontal, también deben contener un diagrama de las conexiones y arreglos de los cables a conectar.

Las cajas colocadas en forma horizontal deben contar con protección contra el ingreso de agua, y estas cajas por lo general se instalan en galerías, y las cajas colocadas en forma vertical son colocadas en poste, paredes, estructuras metálicas de una subestación⁽⁹⁾. Cuando las cajas son de tipo pedestal, estas se deben colocar a una altura no muy elevada del nivel del suelo.

4.4.3 Conexiones del cable de tierra

La conexión entre los LT's y la pantalla de un cable de A.T. debe ser realizada preferentemente mediante un cable coaxial de tierra de baja impedancia, cuando el uso de conductores coaxiales no es práctico, debido al equipo u otras limitaciones físicas, se proponen las siguientes recomendaciones para tener una conexión bien protegida.

1. Para cables de tierra con longitudes hasta de 3m (10'); se emplean generalmente cables monofásicos, sin necesidad de emplear alguna protección.
2. Para cables de tierra con longitudes entre 3 y 10m (10' y 33'); se puede emplear cable monofásico tipo par trenzado, de forma alternativa, cuando no es práctico utilizar tipo par trenzado, se pueden utilizar cables de tierra colocados en paralelo sujetos periódicamente.
3. Para cables de tierra con longitudes entre 10 y 15m (33' y 50'); o para cables de tierra que requieran baja impedancia o rápida respuesta para transitorios, es recomendado el uso de cables coaxiales.
4. Debe evitarse el uso de cables de tierra con longitudes superiores a 15m (50').

Estos cables deben estar aislados para soportar un mínimo de 600V y tener la capacidad para transportar corrientes de falla⁽¹³⁾, la publicación ICEA, pp. 32-382, proporciona un método para determinar el tamaño del conductor en función de los requerimientos adecuados del cortocircuito.

La cubierta del cable debe ser resistente a la radiación UV, y estar recubierta con una capa semiconductor de grafito, o una capa semiconductor polimérica extruida, con el fin de facilitar las pruebas de campo a la cubierta del cable.



Por otro lado, el material de estos cables es de cobre recocido con aislamiento XLPE, que puede ser un cable de un solo conductor o concéntrico, durante la etapa de diseño de estos cables, se tiene que determinar la tensión nominal de operación y los niveles de las corrientes de cortocircuito que se pudiesen presentar en el sistema para la correcta selección de la sección transversal de estos cables.

4.4.4 Conexión del cable de tierra al neutro corrido

El cable del neutro corrido o también conocido como hilo de tierra debe ser de cobre desnudo semiduro o de acero recocido con bajo contenido de carbono y recubierto de cobre según la especificación CFE E0000-33. El calibre de este cable se debe determinar de acuerdo al cálculo de las corrientes de falla que se pueden presentar en el bus de la subestación, y como mínimo debe ser de una sección transversal de 85.01 mm^2 (3/0AWG). El nivel de aislamiento de este cable es del 100%, y se pueden instalar en ductos independientes a las fases o directamente enterrados cuando el tipo de suelo presente características no corrosivas.

Por otro lado, el cable que va de la caja de conexión se deberá conectar al neutro corrido o hilo a tierra en varios puntos, para garantizar que en los puntos donde se instalen empalmes y terminales se tenga una resistencia inferior a 10Ω en época de estiaje y menor a 5Ω en época de lluvia⁽²⁾.

4.5 Cajas de conexión según los métodos especiales

Las cajas de conexiones se pueden clasificar en diferentes tipos dependiendo de:

Característica	Observación
Número de fases	Tipo monofásica o trifásica
Localización	Enterrada o sobre tierra
Esquema de conexión	Bajo tierra o puesta sobre tierra
Pantalla metálica interrumpida / continua	Sistema conectado en un solo punto o conexión cruzada

Tabla 4.4 – Clasificación de las cajas de conexión.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾

Dependiendo del esquema de conexión empleado se pueden elegir diferentes tipos de cajas de conexión; este esquema está siempre diseñado de manera óptima para minimizar la longitud de la conexión del cable de tierra; las cajas de conexión del tipo trifásico son empleadas en terminales subterráneas, debido a la corta distancia entre terminales.

A continuación se presentan los esquemas de las cajas de conexión dependiendo el tipo de conexión de la pantalla metálica:



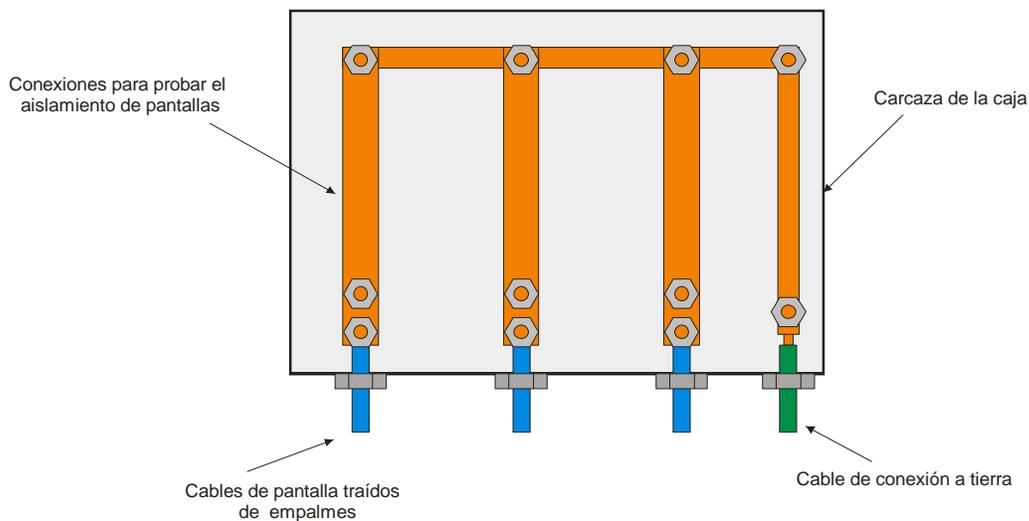


Figura 4.12 - Caja de conexión en conexión sólida en un punto sin LT's.
 Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾

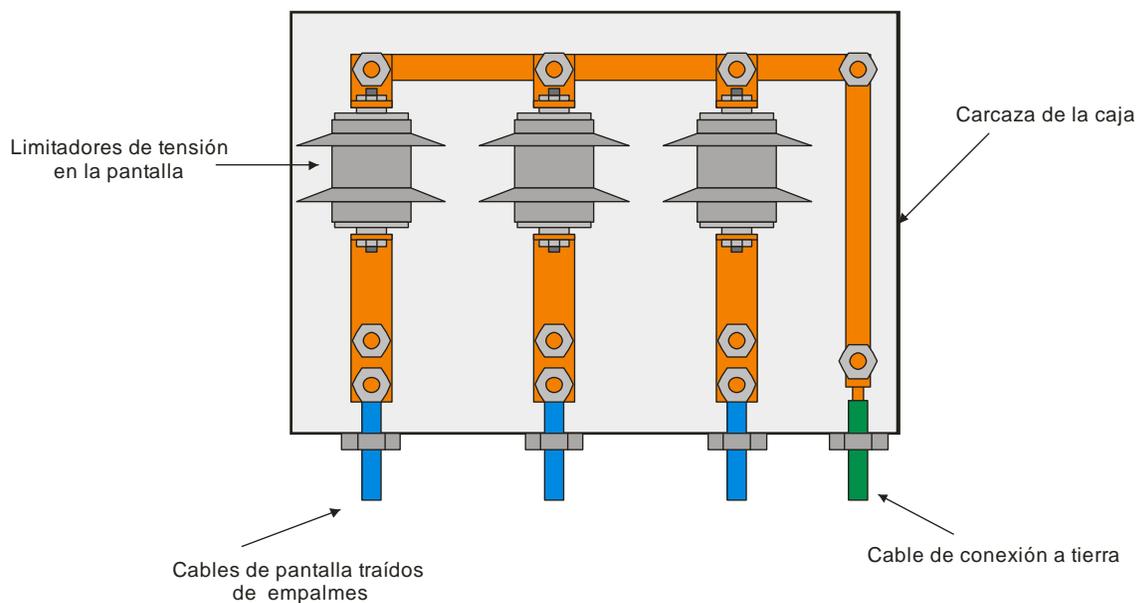


Figura 4.13 - Caja de conexión en conexión en un solo punto con LT's.
 Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾



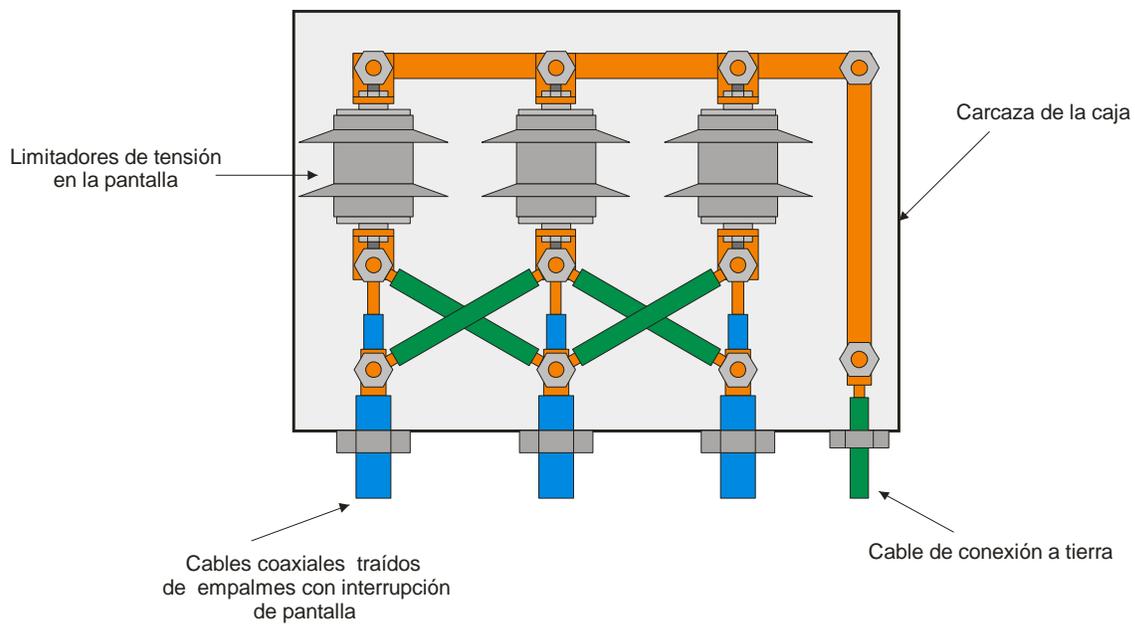


Figura 4.14 - Caja de conexión en Cross bonding con cable coaxial y LT's.
 Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾

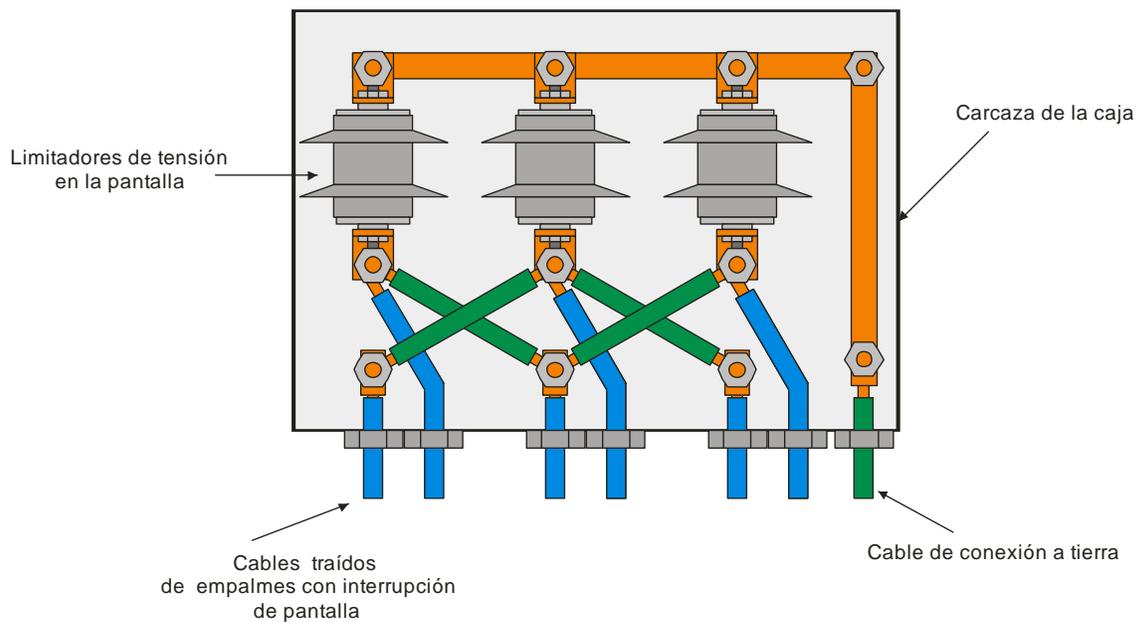


Figura 4.15 - Caja de conexión en Cross Bonding con cable mono conductor con LT's
 Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾



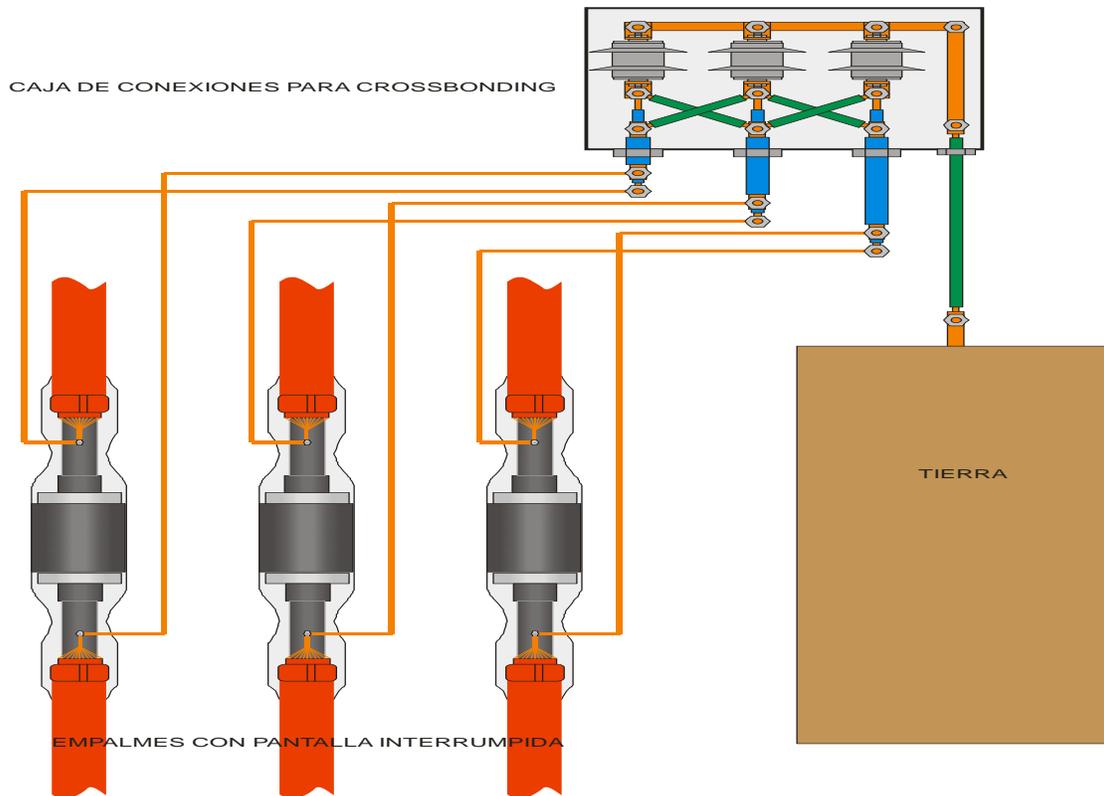


Figura 4.16 – Diagrama de conexión de un sistema de cables con aislamiento extruido conectada a una caja de conexión en Cross Bonding con cable mono conductor y con LT's.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾

4.6 Terminales

La función principal de las terminales es confinar los esfuerzos eléctricos que se presenta en el aislamiento de los cables de A.T. por la interrupción o retiro de la pantalla semiconductor sobre el aislamiento. De esta forma se tiene una distancia de fuga aislada adicional y de hermeticidad. Esta distancia de fuga aislada es la distancia que esta entre las pantallas conectadas a tierra y la superficie de las terminales.

Las terminales se instalan en las transiciones del cable subterráneo con el cable aéreo, y dependiendo de las condiciones de la instalación se podrán instalar estas terminales en el punto de transición o en una estructura acondicionada dentro de la subestación.

Para cables con tensiones de 115kV o superiores, se requiere de terminales con un sistema de llenado interior por medio de silicón, compuesto de Polibuteno o SF6 considerando las recomendaciones del fabricante.

Tipos de terminales

- ✚ Encapsuladas: son terminales tipo GIS



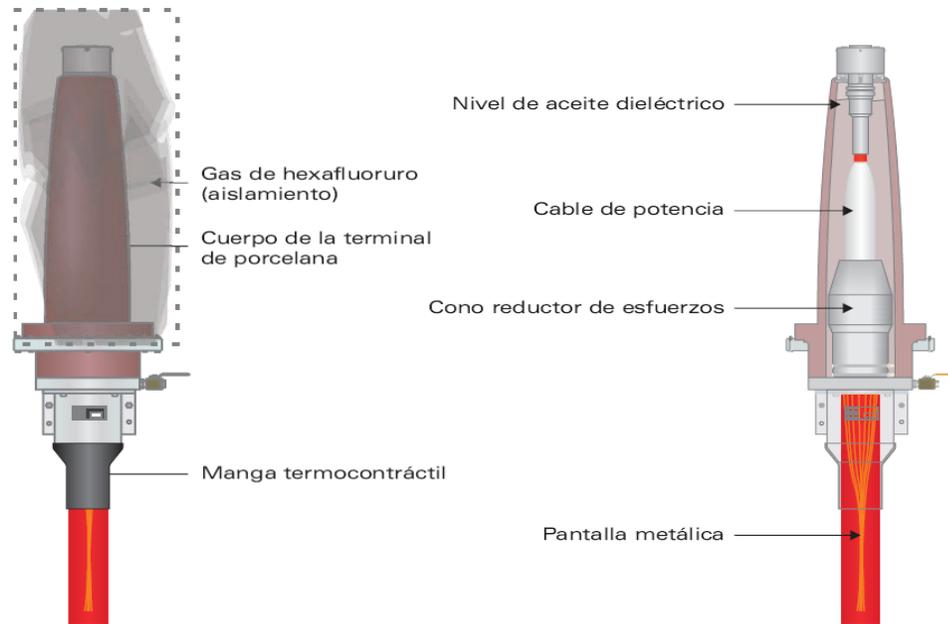


Figura 4.17 – Terminal tipo Gis.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

✚ Intemperie que puede ser de porcelana, termocontráctil y premoldeada.

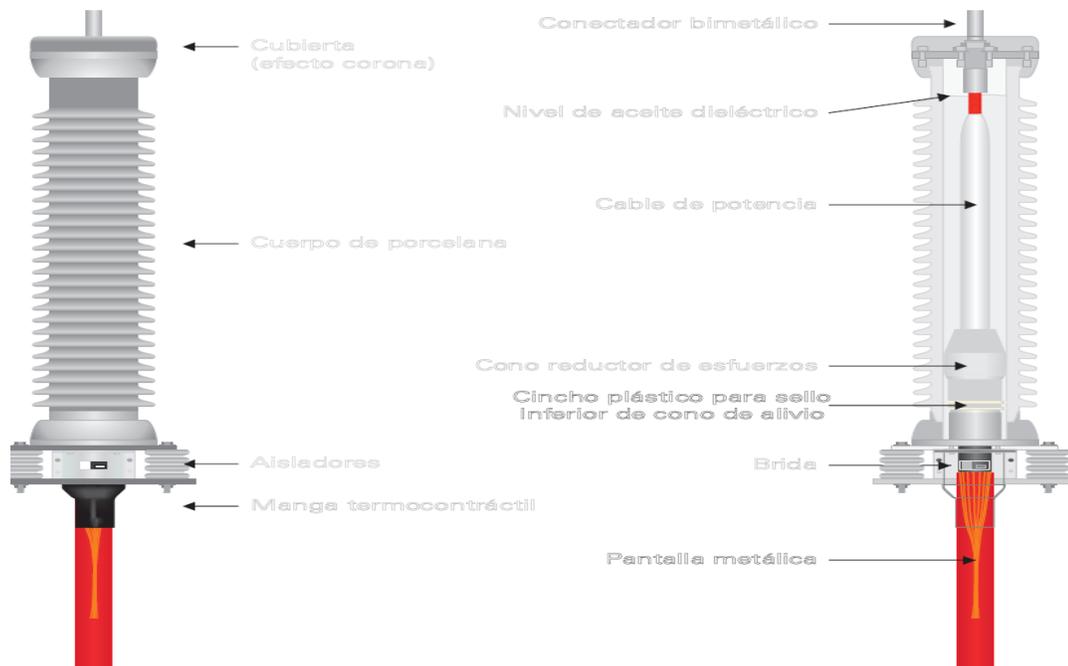


Figura 4.18 – Terminal de porcelana.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾



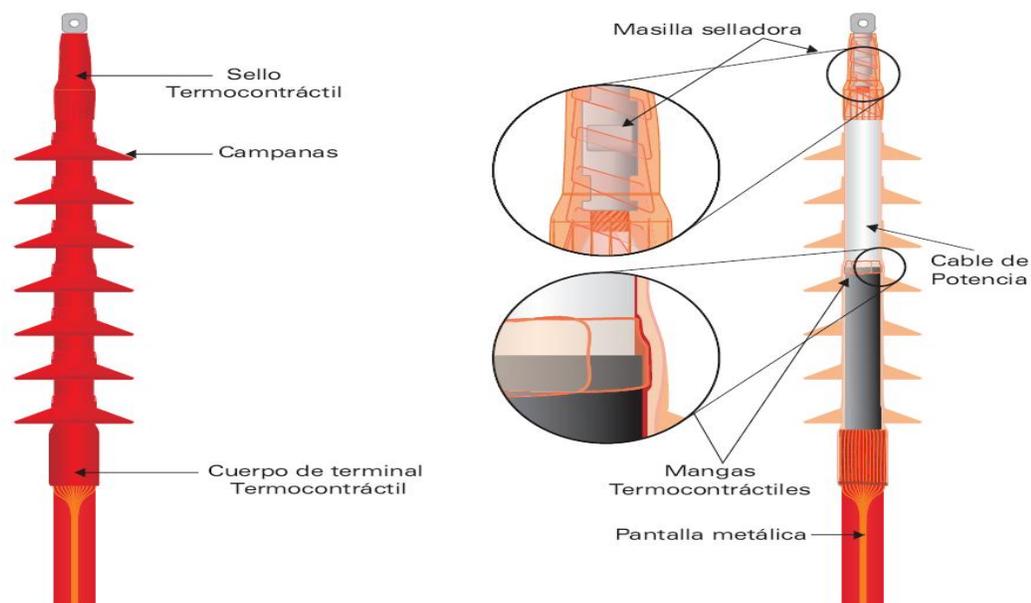


Figura 4.19 – Terminal termocontráctil.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾

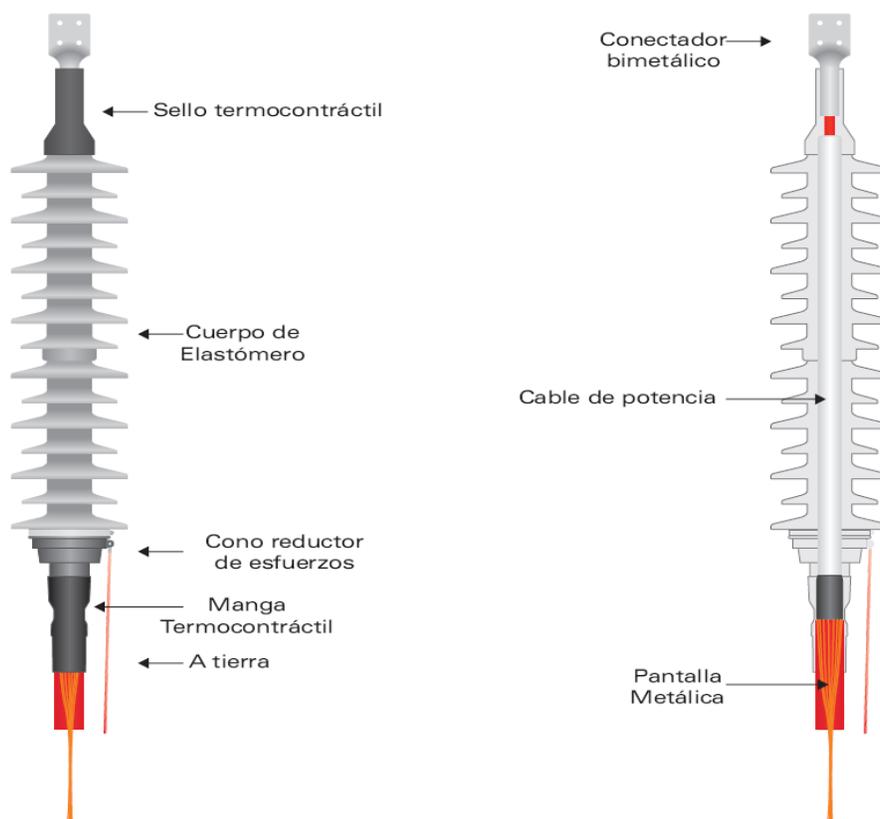


Figura 4.20 – Terminal premoldeada.

Fuente: CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP⁽²⁾



4.7 Pruebas a los accesorios

La prueba de impulso atmosférico ($1.2 \times 50 \mu\text{S}$) a la cubierta de los cables se debe realizar de acuerdo a IEC 229.

Impulso nominal de soporte del aislamiento principal del cable BIL (Voltaje pico) kV	Tensión de prueba al impulso (Voltaje pico) (10 impulsos + y 0 -) kV
$V < 380$	20
$380 \leq V < 750$	37.5
$750 \leq V < 1175$	47.5
$1175 \leq V < 1550$	62.5
$V \geq 1550$	72.5

Tabla 4.5 – Prueba de impulso a la cubierta de los cables.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾

Tensión nominal del cable entre fases (kV)	BIL (kV)
5	60
15	110
25	150
35	200
46	250
69	350
115	550
230	1050
400	1425

Tabla 4.6 – Prueba de impulso entre fases.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾

El Nivel Básico al Impulso (BIL) mínimo recomendado en pantallas interrumpidas es el siguiente:

Sistema en kV	BIL establecido para empalmes con interrupción de pantalla kV pico de onda en $1.2 \times 50 \mu\text{s}$	
	A la mitad	Cada mitad y a tierra
69 - 138	60	30
161 - 230	80	40
345 - 500	120	60

Tabla 4.7 – Nivel Básico de impulso para empalmes con interrupción de pantallas.

Fuente: Características Eléctricas Condumex Cables⁽⁴⁾



4.7 Tabla de grado IP

	Primer Número - Protección contra sólidos		Segundo Número - Protección contra líquidos		Tercer Número - Protección contra impactos mecánicos (generalmente omitido)
0	Sin Protección	0	Sin Protección	0	Sin Protección
1	Protegido contra objetos sólidos de más de 50mm	1	Protegido contra gotas de agua que caigan verticalmente	1	Protegido contra impactos de 0.225 joules
2	Protegido contra objetos sólidos de más de 12mm	2	Protegido contra rocíos directos a hasta 15° de la vertical	2	Protegido contra impactos de 0.375 joules
3	Protegido contra objetos sólidos de más de 2.5mm	3	Protegido contra rocíos directos a hasta 60° de la vertical	3	Protegido contra impactos de 0.5 joules
4	Protegido contra objetos sólidos de más de 1mm	4	Protegido contra rocíos directos de todas las direcciones - entrada limitada permitida	4	Protegido contra impactos de 2.0 joules
5	Protegido contra polvo - entrada limitada permitida	5	Protegido contra chorros de agua a baja presión de todas las direcciones - entrada limitada permitida	5	Protegido contra impactos de 6.0 joules
6	Totalmente protegido contra polvo	6	Protegido contra fuertes chorros de agua de todas las direcciones - entrada limitada permitida	6	Protegido contra impactos de 20.0 joules
7		7	Protegido contra los efectos de la inmersión de 15cm - 1m	7	
8		8	Protegido contra largos periodos de inmersión bajo presión	8	

Así, por ejemplo, una terminal con IP-64 está totalmente protegida contra la entrada de polvo y contra rocíos directos de agua de todas las direcciones.

Fuente: Estándares de protección “IP” y “NEMA



CAPITULO 5

EFECTOS EN CABLES PARALELOS

5 Efectos en cables paralelos

A causa de las corrientes nominales y de falla que se generan en las líneas aéreas y subterráneas de A.T se inducen tensiones en tuberías, cables de comunicación y en otros cables o líneas paralelas, el resultado de esta tensión puede ocasionar mal funcionamiento y daños a los equipos conectados y puede poner en riesgo la vida de las personas al entrar en contacto con estos conductores.

En la práctica, eliminar el efecto de tensiones inducidas en muchas ocasiones es imposible, ya que los cables de comunicación normalmente viajan por el mismo camino o cerca de las líneas de A.T, y en algunos casos se utilizan los mismos registros. Los ingenieros deben asegurar que el diseño del sistema de tierras sea el correcto ya que éste puede tener un impacto significativo en la magnitud de las tensiones inducidas sobre las líneas paralelas, así mismo, se tendrá que asegurar que los cables de A.T cumplan con los estándares de diseño, de tal manera que las tensiones inducidas en los conductores paralelos estén dentro de los límites aceptados, para proteger a las personas y al equipo conectado.

En este capítulo se explica el origen, las consecuencias de esta tensión, los efectos de los campos inducidos en los lugares de trabajo y riesgos durante la instalación.

5.1 Efecto sobre los cables paralelos de comunicación

Como se vio en el capítulo 2 de tensiones y corrientes inducidas, el campo electromagnético es creado alrededor de un conductor como resultado del paso de la corriente a través de dicho conductor, este campo induce una tensión en el conductor paralelo cuya magnitud depende de la distancia que los separe, de la longitud compartida y de otras condiciones específicas del conductor, tal como la conexión de las pantallas metálicas a tierra.

Las corrientes inducidas en las pantallas de los cables de comunicación se presentan por la influencia de cables de A.T. en el sistema, es por eso, que el propósito esencial de la conexión de pantallas a tierra es reducir las corrientes en pantallas y por consiguiente las pérdidas en las mismas; estas corrientes son utilizadas para elegir el sistema de protección más eficaz y por lo tanto, la magnitud de las tensiones inducidas en cables de comunicación se deben analizar bajo condiciones normales de operación y bajo condiciones de falla. Cuando exista y se conozca el efecto de paralelismo entre las líneas de A.T se deberá realizar un estudio de coordinación inductiva, para ver detalles de este estudio se sugiere consultar el IEEE Std.776 y el NACE Std.RP0177.

Durante el diseño de los cables de comunicación, los ingenieros encargados de su construcción deben considerar los límites de tensiones inducidas sobre estos conductores, estos límites se fijan mediante estándares y son llevados a cabo, a través, de la colaboración de industrias de energía y telecomunicaciones.

Para asegurar que las tensiones estén dentro de los límites de seguridad se deben realizar pruebas de los efectos eléctricos de los conductores de A.T sobre cables de



comunicaciones antes de energizarse, posteriormente se necesitan realizar pruebas periódicas para asegurar que las tensiones inducidas se mantengan en un rango de seguridad para las personas y el equipo conectado.

Como se mencionó anteriormente el análisis de las tensiones inducidas sobre los cables de comunicación se debe realizar bajo condiciones normales de operación y bajo condiciones de falla. En condiciones normales de operación, las personas en general pueden entrar en contacto con cables que tienen una tensión inducida de hasta 60 Vrms⁽¹⁾ con referencia a tierra, en cables con tensión de hasta 150 Vrms en condiciones normales de operación las personas en general no pueden tener acceso a ellos solamente los técnicos, por otro lado, cuando ocurre una falla eléctrica debido a la falla del aislamiento puede causar un aumento rápido del flujo de corriente a través del conductor, este exceso de corriente crea un cambio en el campo magnético, el cual genera una tensión inducida muy grande sobre los conductores paralelos, bajo estas condiciones, la tensión inducida de hasta 440 V, va de acuerdo con los límites permitidos países como Canadá y Estados Unidos.

En estos países se ha permitido que los valores de tensiones excedan los límites establecidos ya que proporcionan la probabilidad de que las altas tensiones inducidas disminuyan y las protecciones en caso de falla funcionen en un tiempo muy rápido, si las dos condiciones antes mencionadas se conocen, entonces la tensión inducida permitida puede ir hasta los 1000 Vrms si la protección opera dentro de 350 mseg a 500 mseg; en casos donde una falla se corrige en un tiempo menor a 350 mseg, se permite un límite hasta 1500 Vrms, estos límites de tensión permitidos se resumen en la tabla 5.1

Clasificación de la línea	Descripción	Límite de tensión
A	Línea de alta confiabilidad con equipo de protección, que puede liberar una falla a tierra dentro de los 0.35 seg.	1500 Vrms
B	Línea de alta confiabilidad con equipo de protección, que puede liberar una falla a tierra de 0.35 seg a 0.5 seg.	1000 Vrms
C	Línea clasificada como no segura, ya que el equipo de protección no podría liberar la falla a tierra en los primeros 0.5 seg.	440 Vrms
Todos	Condiciones normales de operación, sólo los técnicos pueden tener contacto con el cable.	110 Vrms
Todos	Condiciones normales de operación, todo el público en general puede tener contacto con el cable.	60 Vrms

Tabla 5.1 Clasificación de líneas y límites de tensión.

Fuente: Longitudinal Induction Voltage Measurement On Communication Cables Running Parallel to Overhead Lines⁽¹⁾



5.2 Factores de inducción

5.2.1 Acoplamiento

El acoplamiento de un circuito de A.T. a un circuito de comunicación se evalúa en términos de la impedancia mutua (separación entre cables) es decir, el nivel de tensión inducida aumenta cuando disminuye la distancia entre el cable de comunicación y el cable de A.T., cuando aumenta la resistividad del terreno, y también cuando aumenta la corriente y la frecuencia en los cables de A.T. debido a fallas a tierra. En cables subterráneos la mayor parte de las componentes de secuencia cero regresan al transformador de la subestación a través del neutro corrido o hilo a tierra, o en todos los caminos paralelos⁽²⁾ que existan como son: las pantallas metálicas o por el conductor paralelo de tierra, algunas de estas componentes también pueden tener regreso por tierra. Estos factores introducen incertidumbres en los cálculos de la impedancia mutua, sin embargo, se puede realizar el cálculo exacto utilizando la ecuación de Carson⁽³⁾, puesto que la magnitud del regreso de la corriente por tierra tiene un efecto relativamente importante sobre la impedancia mutua.

Mientras que el acoplamiento de los sistemas de cables a frecuencia nominal, bajo condiciones balanceadas puede reducirse al mínimo con una adecuada transposición, se podrían presentar armónicos⁽⁴⁾ impares triples (3^a, 9^a, 15^a, etc.) en cada fase, y por lo tanto, estos no se podrían eliminar por la configuración del circuito.

En el Anexo D, D4 se mencionan las consecuencias desfavorables de la conexión cruzada de pantallas de cables de A.T., y también se menciona la optimización (por transposición) de la configuración del circuito para reducir los niveles de tensión inducida.

5.2.2 Blindaje

El diseño de la pantalla del cable de comunicación y otros revestimientos exteriores son factores fundamentales para la reducción de la tensión inducida en el cable de comunicación tipo par, el factor de reducción (a menudo denominado factor de blindaje) se define como la relación de la fuerza electromotriz inducida (fem) entre los conductores y tierra y la fuerza electromotriz longitudinal (fem), que se induce cuando los revestimientos metálicos del cable están ausentes; esto se puede expresar (se utilizan materiales no magnéticos) como:

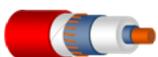
$$r_u = \frac{R}{\sqrt{R + (\omega L_e)^2}} \dots \text{(EC.5.1)}$$

Donde:

r_u : es el factor de reducción del cable de comunicación.

R : es la resistencia dc de los revestimientos metálicos del cable aterrizados incluyendo las resistencias del terreno en [Ω /km].

ω : es la frecuencia angular = $2\pi f$



L_e es la inductancia del circuito de tierra, H/km (aproximadamente 2 mH/km)

De la expresión anterior, se puede observar que la tensión inducida longitudinal sobre el cable de comunicación tipo par, es igual a la caída de tensión en el circuito con pantalla conectada a tierra que incluyen las resistencias del terreno, por lo que es fundamental, proporcionar baja resistencia del terreno. El uso de materiales magnéticos para revestimientos exteriores, mejora sustancialmente la eficiencia del blindaje, a menos que la intensidad del campo magnético este saturado^(5 y 6).

5.2.3 Tensión longitudinal

La tensión longitudinal es la tensión que se presenta entre el par de cables y tierra a lo largo de su trayectoria, la magnitud de esta tensión se tiene que considerar para proteger al personal, al equipo conectado, y principalmente se tiene que considerar cuando se presentan fallas en el sistema de cables de A.T.

5.3 Calculo de tensión inducida longitudinal en cables paralelos

Como se menciona en el anexo D de este documento, las fallas a tierra causan que el flujo de corriente de falla crezca rápidamente, y que dicha corriente circule por pantalla o a través del conductor paralelo de tierra, que a su vez generan tensiones inducidas en los conductores cercanos.

La magnitud de las tensiones inducidas se calcula utilizando la siguiente formula:

$$V=CLiK \dots (\text{Ec.5.2})$$

Donde:

V: tensión inducida longitudinal en [V]

C: impedancia mutua por unidad de longitud en [Ohm/Km]

L: longitud de exposición entre línea y cable de comunicación en [Km]

i: corriente de falla [A]

K: factor de blindaje [K=1Sin blindaje]

La impedancia mutua **C** de dos circuitos paralelos teniendo conductor paralelo de tierra esta dado por:

$$C = 2\pi f \left| \log_e \left(1 + \frac{6 \times 10^5 \rho}{d^2 f} \right) \right| \times 10^{-4} [\text{ohm} / \text{km}] \dots (\text{EC.5.3})$$

Donde

d= separación geométrica entre el conductor paralelo de tierra en metros

ρ : es la resistividad en [ohm-m]

f: es la frecuencia del sistema en [Hz]



Es evidente que los efectos inductivos sobre cables paralelos de comunicación dependen de muchos factores, incluidos la configuración del circuito, la impedancia mutua, frecuencia, resistividad del terreno, tipos de blindaje, la forma de onda y diseño de los equipos conectados; se puede realizar una estimación de estos efectos mediante la ayuda de una computadora, sin embargo, en situaciones especiales donde en la practica estas estimaciones no son aplicables, es necesario realizar pruebas de campo.

5.4 Relación entre los métodos especiales de conexión de pantallas a tierra y cables paralelos

La tensión inducida sobre líneas paralelas próximas y la seguridad del personal de operación, son las consideraciones más importantes durante la conexión a tierra de las pantallas metálicas de los sistemas de cables de A.T, a continuación se menciona de manera rápida la relación de estos métodos con los cables paralelos.

Pantallas conectadas en un solo punto

En este tipo de conexión las tensiones inducidas sobre líneas paralelas resultan ser muy grandes debido a que las corrientes de falla de fase a tierra deben regresar a través de la fuente del conductor desnudo exclusivamente.

Pantallas conectadas en dos o más puntos

En este tipo de conexión las tensiones inducidas resultan ser escasas sobre las líneas paralelas. La mayor parte de las corrientes de secuencia cero (falla de fase a tierra) regresan a través de las pantallas metálicas del cable.

Pantallas cruzadas (Cross Bonding)

En esta conexión los niveles de tensiones inducidas resultan ser muy bajos. La mayor parte de las corrientes de secuencia cero regresan a través de las pantallas metálicas del cable conectadas al cable desnudo de tierra⁽⁷⁾.

Como se puede ver, la elección del diseño de la conexión será fundamental para determinar las tensiones inducidas sobre las líneas próximas a los conductores.

5.5 Tensión inducida en líneas de ferrocarriles

De la misma forma las tensiones inducidas sobre las líneas de los ferrocarriles se deben al paso de la corriente de los cables de A.T. que comparten el mismo recorrido, y pueden causar daños en las señales y en las protecciones de las líneas férreas bajo condiciones normales de operación y bajo condiciones de falla.

Es importante considerar esta tensión inducida debida al aumento de las corrientes de carga en los cables de A.T, ya que estas, incrementan las tensiones inducidas en las líneas de los ferrocarriles⁽⁸⁾; la conexión a tierra de las líneas férreas se tiene que realizar



adecuadamente, ya que generalmente tienen contacto con el agua, y las corriente inducidas podrían fluir y afectar la operación normal de las señales y protecciones del sistema; las consecuencias de estas tensiones son accidentes en los equipos de los trenes.

Se han realizado estudios de los niveles de tensión inducida a través de un modelado por computadora entre las líneas de A.T y las líneas férreas, mediante el uso de programas especializados para el estudio de tales efectos, sin embargo, el estudio es complicado y lleva demasiado tiempo. En estos estudios se tienen que considerar factores como la configuración de los conductores, las características eléctricas entre los cables de A.T., y las líneas férreas, los parámetros de los sistemas eléctricos, y las estructuras a tierra; también se tiene que considerar las condiciones y características del terreno donde se encuentran instalados los cables, ya que las características de los conductores, y distancia entre los cables y las líneas férreas varían a lo largo de la instalación; posteriormente se tiene que realizar cálculos de los parámetros de línea, también se tienen que simular fallas a tierra en los conductores para analizar los niveles de tensión inducida y finalmente todos los parámetros se usarán en el modelado por computadora para determinar los máximos niveles de tensión inducida en el sistema bajo condiciones normales de operación y lo mas importante bajo condiciones de falla en todos los lugares específicos.

5.6 Equipo de medición de corriente en pantalla

Para cuantificar la cantidad de corriente que circula por pantalla, se debe emplear un equipo especial diseñado para tal propósito, la siguiente figura muestra las partes principales de este equipo, que se conoce con el nombre de “Analizador de corrientes en cables de A.T.”⁽⁹⁾.

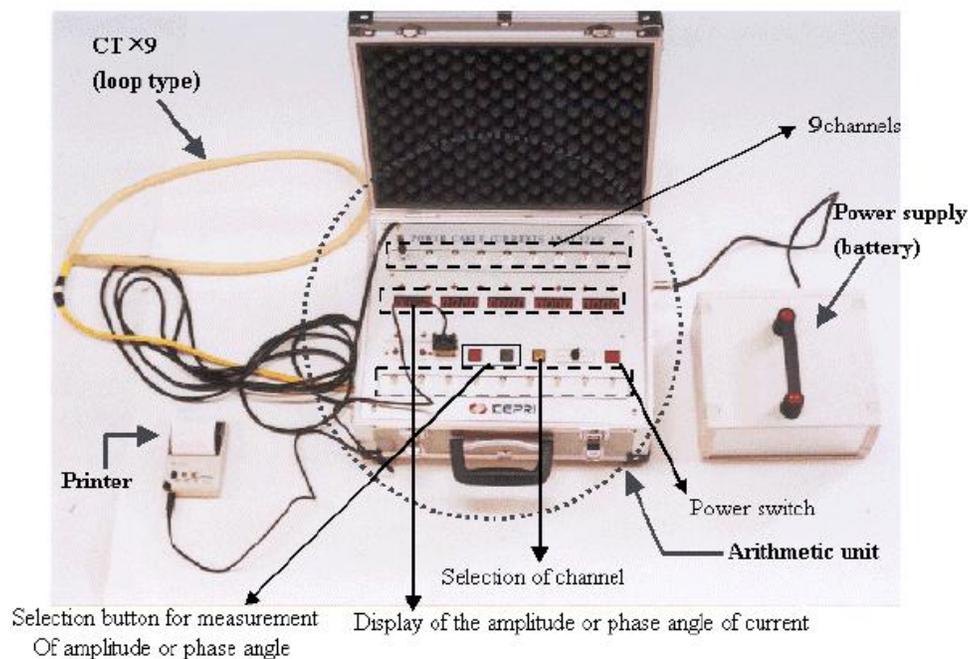


Fig 5.1 Diagrama del equipo de medición de la circulación de corriente en pantalla.

Fuente: Characteristics and Reduction of Sheath Circulating Currents in Underground Power Cable Systems⁽⁹⁾



El equipo consta de tres partes: un sensor, una unidad de procesamiento y dispositivos de salida; el sensor es un transformador de corriente (TC) el cual mide la circulación de corriente en pantalla, la unidad de procesamiento muestra la magnitud de la corriente y el ángulo de fase, también analiza la corriente en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada rápida de Fourier y nos muestra las componentes armónicas como la 3rd, 5th, 7th y la 9th; el equipo tiene un puerto de conexión para un osciloscopio digital que nos muestra las formas de onda de la corriente, y también tiene un puerto para una impresora que imprime los resultados arrojados por la medición. El equipo tiene la capacidad para medir arriba de 9 corrientes al mismo tiempo⁽⁹⁾. Las especificaciones del equipo son las siguientes:

- ✚ Medición de la corriente máxima: 500 A ($\pm 1\%$) a frecuencia nominal
- ✚ Medición de la corriente mínima: 0.1 A ($\pm 3\%$) a frecuencia nominal
- ✚ Tensión de operación: DC 24 V (de batería)
- ✚ Funciones adicionales: amplitud y ángulo de fase de la corriente, incluye componente armónica

5.7 Seguridad y precauciones durante la instalación

5.7.1 Seguridad

Las tensiones inducidas representan un riesgo para los trabajadores, la magnitud de estas tensiones dependen de diferentes parámetros, algunos de estos parámetros son la configuración de los cables de A.T., el diseño de pantalla y adicionalmente durante el proceso de la instalación se tendrá que considerar la distancia entre la línea energizada y la nueva línea a instalar, la longitud de las secciones individuales y donde se va colocar el empalme; se debe tener cuidado al aterrizar los conductores durante la instalación así como las pantallas de los mismos. La conexión a tierra al neutro corrido o conexión a tierra local (hilo de tierra) en los registros son buenos lugares para este fin. Se debe tener mucho cuidado al elegir tanto el tamaño como las características del electrodo de puesta tierra (aislamiento y capacidad) para el regreso de las corrientes de falla a tierra que se vayan a manejar en el sistema en cada uno de los registros.

5.7.2 Normas Nacionales de seguridad aplicadas en los centros de trabajo

Antes de la instalación de cables de A.T., el responsable de la instalación debe establecer un Programa de seguridad eléctrica⁽¹⁰⁾ para reducir los riesgos eléctricos durante la instalación, este programa debe incluir diagramas unifilares de los circuitos, manual de procedimientos (límites de acercamientos, equipo de protección personal, peligros eléctricos, etc...), y lo más importante debe ser escrito con un lenguaje apropiado de tal forma que las personas calificadas comprendan los procedimientos de seguridad eléctrica a seguir durante la instalación.

Todos los aspectos relacionados con la seguridad de los trabajadores durante la instalación y mantenimiento que se desarrollen en las líneas aéreas y subterráneas, se debe realizar bajo el seguimiento de normas y estándares; a continuación mencionamos de



manera general las Normas Oficiales Mexicanas vigentes y las Normas Internacionales relacionadas con los requerimientos de seguridad aplicadas en todos los centros de trabajo del territorio nacional.

NOM-001-SEDE-2005. Instalaciones eléctricas.

NOM-029-STPS-2005. Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo-condiciones de seguridad.

NOM-017-STPS-2001. Apéndice A relativo al análisis de riesgo para determinar el equipo de protección personal, selección, uso y manejo en los centros de trabajo.

Equipo de protección personal para los operadores

- ✚ Ropa resistente a las llamas.
- ✚ Zapatos de seguridad aislante, ver estándar ASTM F1117 para la selección del aislamiento.
- ✚ Guantes para 5kV se deben utilizar guantes con aislamiento.
- ✚ Lentes (los armazones de los lentes hechos de material conductivo no se deben utilizar).
- ✚ Casco ver ANSI Z89.1, define el criterio de aislamiento para el diseño y prueba del equipo de protección de la cabeza.



Fig 5.2- Equipo y herramienta de protección personal.

Fuente: Seguridad eléctrica⁽¹⁰⁾



Normas de equipos de protección

Tema	Número y Título
Protección de la cabeza	ANSI Z89.1. Requirements for Protective Headwear for Industrial Workers 1997.
Protección de ojos y cara	ANSI Z87.1. Practice for Occupational and Educational Eye and Face Protection, 1989.
Guantes	ASTM D 120. Standard Specification for Rubber Insulating Gloves, 1995.
Mangas	ASTM D 1051. Standard Specification for Rubber Insulating Sleeves, 1995.
Guantes y mangas	ASTM F 496. Standard Specification for In Service Care of Insulating Gloves and Sleeves, 1997.
Protectores de cuero	ASTM F 696. Standard Specification for Leather Protectors for Rubber Insulating Gloves and Mittens, 1997.
Calzado	ASTM F 1117. Standard Specification for Dielectric Overshoe Footwear, 1993. ANSI Z41. Standard for Personnel Protection, Protective Footwear, 1991.
Inspección visual	ASTM F 1236. Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products, 1996.
Ropa/vestimenta	ASTM F 1506. Standard Specification for Protective Wearing Apparel for Use by electrical Workers when Exposed to Momentary Electric Arc and Related Thermal Hazards, 1998.

ASTM: American Society For Testing and Materials
ANSI: American National Standard Institute

Tabla 5.2 Estándares para la selección de EPP

Fuente: Norma NFPA 70E⁽¹¹⁾

NOM-022-STPS-1999. Electricidad estática en los centros de trabajo-condiciones de seguridad e higiene. Esta norma es muy importante para la instalación de sistemas de tierras, sistemas de pararrayos, equipos y dispositivos para proteger al centro de trabajo de la acumulación de cargas eléctricas estáticas y descargas eléctricas atmosféricas.

Se deberá medir y registrar al menos cada doce meses, los valores de resistencia de la red de tierras y la continuidad en los puntos de conexión a tierra en el equipo que pueda generar o almacenar electricidad estática, como por ejemplo cajas de conexiones. Los valores de la resistencia del electrodo de puesta a tierra que se obtengan en esta prueba, deben estar comprendidos entre 0 y 25 ohms, y para sistemas de pararrayos, la resistencia de la red de tierras debe tener un valor no mayor a 10 ohms.



NOM-025-STPS-1999. Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.

NOM-026-STPS-1998. Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.

El NEC (National Electrical Code) de Estados Unidos, trata de la seguridad eléctrica en las instalaciones eléctricas; su contenido es muy amplio.

NFPA 70E: estándar que contiene las partes más importantes del NEC y de otras partes importantes de otros estándares de seguridad eléctrica.

OSHA (Occupational Safety and Health Association) estándar que incluye la protección contra los peligros de lesión eléctrica o electrocución.

Tanto la NFPA 70 E y la OSHA prohíben a las personas trabajar con equipo sin aislamiento cuando se trabaja sobre o cerca de conductores energizados expuestos. El objetivo es evitar contacto con partes vivas, de lo contrario el resultado será descarga y quizá una falla por arco.

Es importante para los trabajadores entender que las corrientes y tensiones inducidas se presentan cuando hay más de un circuito en un banco de ductos, las tensiones se inducen en el circuito desenergizado a través del circuito energizado. La razón de la conexión a tierra en las terminales es proporcionar protección en caso de que la línea este energizada inadvertidamente, el resultado de esta conexión es circulación de corriente en el conductor y en la pantalla metálica, por ejemplo, se han realizado estudios de estos efectos a través de modelados por computadora en circuitos de 230kV, y estos estudios muestra una inducción de corriente en el conductor alrededor de 100A y de 50A para las pantallas del circuito desenergizado en un banco de ductos convencional con un circuito energizado de 1000A; por otro lado, si se efectuara algún tipo de operación al cable como por ejemplo, un corte en el cable entonces dará lugar a chispas y pondrá en una situación peligrosa a las personas con la herramienta de corte en caso de que la persona llegue a estar en trayectoria paralela a la corriente.

Durante la instalación de un cable, las tensiones inducidas no se presentan únicamente sobre los cable, sino también sobre el cable de acero del malacate que se encuentra dentro del ducto, es por eso la importancia de la conexión a tierra del cable del malacate, del motor eléctrico del malacate (rodillo) y de los accesorios del carrete de cable tales como gatos mecánicos y la barra que se encuentra en el orificio central del carrete para contrarrestar posibles riesgos de choque eléctrico al personal de la instalación.

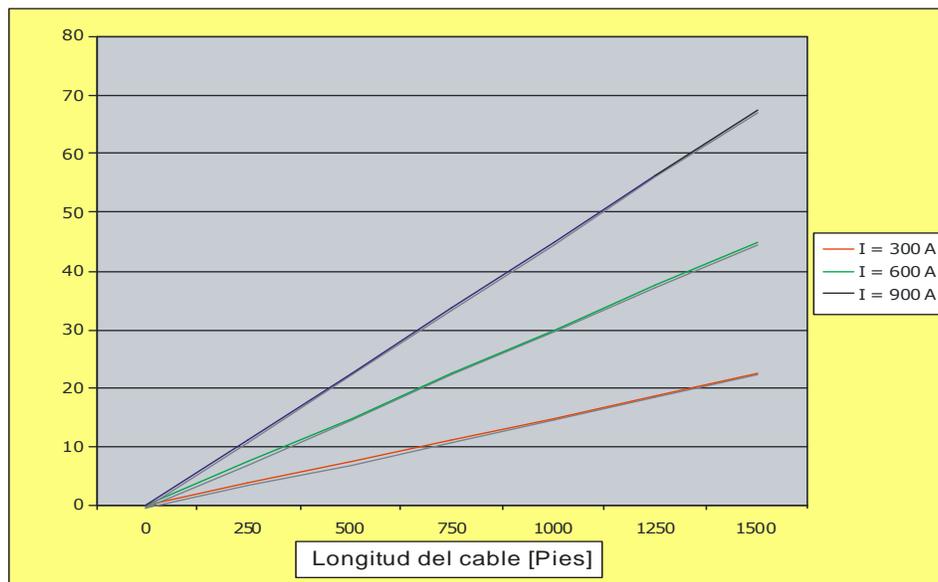
5.7.3 Tensiones inducidas durante el jalado del cable

La magnitud de las tensiones inducidas de un cable que se esta instalando depende de la configuración del banco de ductos, del número de cables en el banco y de la corriente que fluye en los conductores paralelos.

Para la configuración de circuitos dobles, la regla generalmente aceptada es que la tensión inducida es del orden de 50V para 100A por cada 1000 pies⁽¹²⁾, para la instalación convencional de cables en ductos, el cable esta enrollado en un carrete de acero y el jalado de este cable se realiza en la salida del cable del carrete a través de un malacate, que cuenta con un cable de acero que se va enrollar en los rodillos de dicho malacate durante el jalado del cable.



A medida que el malacate jala al cable dentro del ducto, la longitud de dicho cable aumenta paralelamente con el cable energizado, y esto conduce al incremento de tensiones inducidas en las pantallas metálicas del cable que se esta instalando, la siguiente gráfica muestra la tensión inducida en un cable que se esta instalando, se asume una tensión inducida de 50Volts/100 000 Amperes-pies para los casos cuando 300, 600 y 900A están fluyendo en el circuito paralelo.



Gráfica 5.1 Tensión inducida durante el jalado del cable.

Fuente: Guideline For Working Procedures On Underground Transmission Circuits With Induced Voltage⁽¹²⁾.

El aumento de corriente en el conductor paralelo causa altas tensiones inducidas en el cable que se esta instalando, y estas tensiones pueden excederse nuevamente dependiendo de las condiciones al momento de la instalación.

Una vez que el cable en su totalidad ha sido instalado, se deberá desconectar el cable de acero que se encuentra conectado a un manguito atornillado al conductor del cable que dispone de una argolla donde se fijará dicho cable de acero y donde se efectuara el jalado⁽¹³⁾, lo más apropiado es que el cable deba ser cortado en el registro dependiendo de la cantidad de cable disponible en el carrete del cable.

Es recomendado medir la cantidad de tensión inducida a tierra durante el jalado en la argolla con un voltímetro, esta tensión inducida es a frecuencia nominal y por lo tanto puede ser medida con un voltímetro de AC.

Si la tensión inducida en pantallas es menos de 15V ninguna precaución especial se deberá tomar.

Si la tensión inducida supera los 15V entonces se tendrá que aplicar las siguientes recomendaciones:

1. Para tensión de 600V se deberán usar guantes
2. Aterrizar el cable de acero de la argolla durante el jalado
3. Aislar la argolla a tierra usando una manta o cinta aislante



De la misma forma, el personal encargado del jalado necesita estar seguros que disponen del equipo de protección y de las conexiones a tierra necesarias para contrarrestar los efectos inducidos durante el proceso de jalado del cable. La máxima corriente inducida se utilizara para determinar el tamaño del cable de tierra.

5.7.4 Precauciones

Se deben colocar señalamientos de riesgo alrededor del motor del malacate, del carrete de cable y en la entrada de los registros durante el proceso de jalado del cable; antes de realizarse cualquier maniobra esta información se tiene que dar a conocer al personal para asegurarse que entendieron la importancia del porque colocar estos señalamientos para protegerse a ellos mismos, y al personal en general que puede tener contacto con estos equipos.

Las siguientes consideraciones se tendrán que tomar en cuenta durante la instalación de los cables.

- ✚ El equipo deberá estar identificado y etiquetado.
- ✚ El uso del equipo de seguridad se debe llevar puesto para cualquier maniobra o interrupción de actividades.
- ✚ Se deberá hacer uso de: “Prueba antes de tocar”, la intención será que siempre la persona pruebe con un aparato el conductor antes de tocarlo en toda ocasión y principalmente cuando se ausente del lugar de trabajo.
- ✚ Límites de acercamiento: si la distancia (espacio) de un peligro eléctrico y una persona decrece, el grado de sufrir un accidente incrementa, por lo que uno de los mejores caminos para prevenir una lesión es **mantener la distancia**.

El concepto de límite es que cualquier punto A sobre un conductor o parte del circuito eléctrico energizado sirve como un centro de un círculo imaginario alrededor del punto.

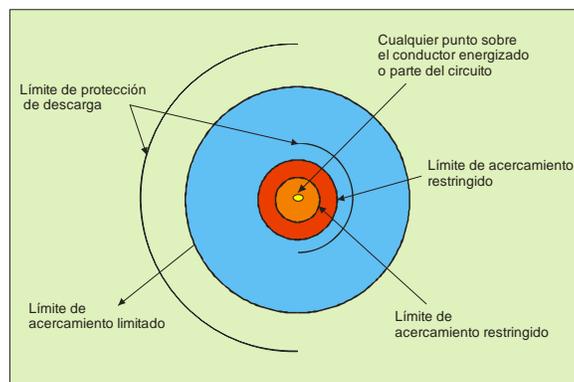
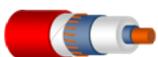


Fig.5.3 Límites de aproximación

Fuente: Seguridad eléctrica⁽¹⁰⁾

Los circuitos imaginarios son varias distancias alrededor del punto A.



La **distancia del límite de acercamiento limitado** es el punto donde la persona a pesar de sus calificaciones y habilidades, esta expuesto a una descarga eléctrica. Cualquier persona fuera de este límite se considera segura de la exposición de una descarga.

La **distancia del límite de acercamiento restringido** es el punto donde los controles se deberán realizar por personas calificadas. También es el punto donde cualquier persona a pesar de su calificación esta suficientemente cerrada por el grado de exposición a ser mayor.

La **distancia del límite de acercamiento prohibido** es la distancia de rompimiento y es muy corta, y cualquier acercamiento con las manos o herramienta esta prohibido, solamente las personas calificadas que cubren los requerimientos de controles y que usan el EPP pueden atravesar este límite.

Posición del cuerpo: antes de empezar un trabajo, la persona deberá pensar como debe tener la posición del cuerpo antes de empezar a trabajar, y así disminuir posibles riesgos.

Límites de aproximación a partes energizadas para protección contra choque.
(Todas las dimensiones son las distancias entre la parte energizada y el empleado)

1	2 Frontera límite de aproximación		3	4 Frontera de aproximación restringida:		5
Rango de la tensión nominal del sistema, fase	Conductor expuesto móvil	Parte de circuito fija expuesta	Incluye movimiento involuntario	Frontera de aproximación prohibida		
0 to 50	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado		
51 to 300	10 pies 0 pulgada	3 pies 6 pulgadas	Evitar el contacto	Evitar el contacto		
301 to 750	10 pies 0 pulgada	3 pies 6 pulgadas	1 pies 0 pulgada	0 pies 1 pulgada		
751 to 15 kV	10 pies 0 pulgada	5 pies 0 pulgada	2 pies 2 pulgada	0 pies 7 pulgada		
15.1 kV to 36 kV	10 pies 0 pulgada	6 pies 0 pulgada	2 pies 7 pulgada	0 pies 10 pulgada		
36.1 kV to 46 kV	10 pies 0 pulgada	8 pies 0 pulgada	2 pies 9 pulgada	1 pies 5 pulgada		

Tabla 5.3 Límites de aproximaciones a partes energizadas para protección contra choque
(Todas las dimensiones son la distancia entre la parte energizada y el empleado).

Fuente: Seguridad eléctrica⁽¹⁰⁾

La columna 1 muestra los rangos de tensión.

La columna 2 se basa en la regla de OSHA para personas no calificadas.

La columna 3 tabla 110-26 (a) y 110-34(a) de la NOM y el NEC condición 2.

La columna 4 se agrega las dimensiones del arco.

La columna 5 se muestra la tabla 230-51(c) del NEC y de la NOM



300 V y menos - 1mm
Más de 300 V, no más de 750 V-0 ft 0.07 Pulgadas-2mm
Más de 750 V, no más de 2kV-0 ft 0.19 pulgadas-5mm
Más de 2kV, no más de 15kV- 0 ft 1.5 pulgadas
Más de 15 kV, no más de 36kV- 0 ft 6.3 pulgadas
Más de 36 kV, no más de 48.3kV-0 ft 10.0 pulgadas
Más de 48.3 kV, no más de 72.5kV- 1 ft 3.0 pulgadas
Más de 72.5 kV, no más de 121kV-2 ft 1.2 pulgadas
Más de 138 kV, no más de 145kV-2 ft 6.6 pulgadas
Más de 161 kV, no más de 169kV - 3 ft 0.0 pulgadas
Más de 230 kV, no más de 242kV - 4 ft 2.4 pulgadas
Más de 345kV, no más de 362kV - 7 ft 5.8 pulgadas

Tabla 5.4 Distancia mínima de aislamiento al aire que se requiere para evitar un arco.

Fuente: Seguridad eléctrica⁽¹⁰⁾

5.8 Campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de A.T. y sus efectos en el cuerpo humano

Los efectos de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano han sido estudiados desde hace mucho tiempo sin embargo, es poca la importancia que se le ha dado al problema, pues aunque las principales industrias eléctricas y de instalaciones no lo ignoran y manejan una muy buena cultura de prevención, también es verdad que ignoran los principales daños que estos campos generan en la salud, estas aseveraciones son fundamentadas en innumerables artículos y estudios médicos que se han elaborado desde hace décadas.

Gracias a estos estudios médicos podemos saber como se manifiestan estos campos electromagnéticos en el cuerpo. Cada uno de los órganos del cuerpo es afectado de manera diferente como se verá más adelante sin embargo, se puede manejar de manera general, el hecho de que estas exposiciones son relacionadas en los estudios ya mencionados con la aparición de las siguientes enfermedades:

- ✚ Cáncer de próstata
- ✚ Cáncer de Testículos

En el tema siguiente se desarrollará el análisis de estos efectos y de sus posibles consecuencias en el cuerpo principalmente en adultos, para el caso de trabajadores del ramo eléctrico.

Desde finales de la década de los 1970's diversos estudios han mencionado la existencia de una asociación entre la presencia de líneas eléctricas de A.T en los lugares de trabajo, se ha generado una enorme cantidad de bibliografía sobre los posibles efectos en la salud que ocasionan los campos electromagnéticos de frecuencia baja. Periódicamente han ido apareciendo revisiones realizadas por grupos de expertos, que han tratado de evaluar si



los estudios publicados ofrecen evidencias de una relación causal entre campos electromagnéticos y sus efectos sobre la salud.

5.8.1 Campos electromagnéticos y su interacción con la materia

Las líneas de alta tensión generan a su alrededor campos eléctricos y magnéticos variables de frecuencia baja 60 Hz.

Para una determinada tensión, la intensidad del campo eléctrico puede variar de unas líneas a otras dependiendo de las características de la línea, el número de circuitos y su configuración, el campo magnético en una línea también cambia según la intensidad de corriente que circula en función de la demanda de potencia; las medidas realizadas para las líneas de mayor tensión en México (400 kV) proporcionan valores de 3-10 kV/m para el campo eléctrico y 1-20 μ T para el campo magnético. Estos valores decrecen cuando la distancia a la línea aumenta, de manera que el rango de valores a 100 metros de distancia es de 0.02-0.15 kV/m para el campo eléctrico y de 0.02-0.30 μ T para el campo magnético, además, el campo eléctrico se atenúa fácilmente debido a los elementos usados en la construcción, por lo que su intensidad en el interior de un inmueble puede ser menor que en el exterior.

Debido a que la resistencia eléctrica de los tejidos biológicos es mucho menor que la del aire, el campo eléctrico interno se reduce significativamente con respecto al campo exterior. Por el contrario, el campo magnético apenas sufre atenuación en los tejidos del cuerpo humano y, por tratarse de un campo variable, induce corrientes circulantes cuya intensidad depende de las dimensiones y la conductividad eléctrica de los tejidos implicados.

Se han realizado numerosas investigaciones acerca de los procesos físicos que podrían explicar posibles efectos biológicos derivados de la exposición a campos electromagnéticos de frecuencia baja. El incremento de temperatura debido a la absorción directa de A.T. a una frecuencia de 60 Hz queda muy por debajo de los niveles debidos al metabolismo basal de las células, así mismo, campos a esta frecuencia no son capaces de romper o alterar enlaces químicos ni ejercer una fuerza apreciable sobre proteínas, enzimas u otras moléculas implicadas en la actividad biológica, no obstante, existen otros mecanismos bien establecidos de interacción entre los campos electromagnéticos y los tejidos biológicos, como son la acumulación de carga superficial, la inducción de corriente eléctrica, la formación de dipolos eléctricos y la fuerza sobre cargas en movimiento, sin embargo, los últimos estudios al respecto coinciden en que las señales inducidas por los campos de frecuencia baja, con intensidades semejantes a las producidas por líneas eléctricas, son inferiores al nivel de ruido eléctrico existente como consecuencia de la agitación térmica y la actividad biológica.

Los mecanismos propuestos para justificar posibles efectos a intensidades muy bajas, basados en procesos de resonancia, han resultado ser incompatibles con las condiciones que se dan en un organismo vivo además son difíciles de justificar debido a la distinta frecuencia usada en Europa (50 Hz) y EE.UU y América Latina. (60 Hz) para las líneas eléctricas⁽¹⁴⁾.



5.8.2 Estudios sobre la salud. Estudios epidemiológicos

Gran parte de la controversia suscitada durante las últimas décadas acerca de los posibles efectos sobre la salud derivados de la exposición a campos electromagnéticos de frecuencia baja 60 Hz se inició a finales de los años setenta y a principio de los ochenta, a raíz de la publicación de varios estudios epidemiológicos que sugerían un incremento en la incidencia de algunos tipos de cáncer en las poblaciones expuestas, a partir de ese momento distintos autores emprendieron nuevos estudios, en entornos laborales, que tienden a contrastar la hipótesis inicial.

Los estudios basados en exposiciones en ambientes laborales se han centrado en el análisis del riesgo de cáncer en los propios trabajadores, y en algunos casos en el riesgo entre sus descendientes.

El objetivo perseguido por estos estudios epidemiológicos es determinar si existe una asociación entre los campos electromagnéticos y el cáncer, a través de la comparación de las tasas de aparición de la enfermedad en dos poblaciones, una expuesta a los campos y otra no expuesta, o entre poblaciones sometidas a diferentes niveles de exposición, en definitiva se trata de comprobar si existe un incremento en la probabilidad de padecer la enfermedad como consecuencia de la exposición, y de ser así, cuantificarlo.

Dado que en la vida cotidiana, debido al empleo intensivo de la electricidad, todas las personas se encuentran expuestas en mayor o menor medida a la acción de campos electromagnéticos de frecuencia baja 60 Hz, existen grandes dificultades para caracterizar con precisión la exposición a los mismos. En la práctica resulta imposible medir de forma directa el campo al que ha estado sometida una persona a lo largo de un período más o menos prolongado de su vida, además, al no haberse identificado ningún mecanismo de interacción físico o biológico relevante para la producción de los posibles efectos adversos, resulta extremadamente difícil definir el parámetro más idóneo para evaluar la exposición. Como consecuencia, los epidemiólogos se han visto obligados a recurrir a distintos estimadores de la exposición, tales como el denominado

“código de líneas” (basado en el diseño de las líneas y su distancia a los lugares de trabajo) (ver tabla.5.5 y 5.6), las medidas que se obtienen por medio de este método en los lugares de trabajo no siempre reflejan de forma real tal exposición y por lo tanto, pueden introducir incertidumbres y errores en la estimación de la probabilidad de aparición del efecto. El código de líneas, a pesar de ser el método de estimación más empleado comúnmente en ambientes laborales, al haberse creado para su utilización en áreas urbanas de los EUA., no es fácilmente aplicable en otros países, además, se ha comprobado empíricamente que el código de líneas no refleja fielmente el nivel de exposición al campo magnético medido.

Clasificación de Código de Líneas.			
Wertheimer-Leeper			
Construcción de la Línea	Distancia	Clasificación	Antigüedad del lugar
Cable Grueso, utilizado para Transmisión y Distribución primaria, trifásicos	<39.624m	Alto	Combinación
	>=39.624m	Bajo	Nuevo
Cable delgado utilizado para distribución primaria, trifásicos	<19.812m	Alto	Viejo
	>=19.812m	Bajo	Combinación
Primer Cable para distribución secundaria con un solo conductor.	<15.24m	Alto	Viejo
	>=15.24m	Bajo	Viejo
Primer Cable para	<15.24m	Alto	Nuevo



distribución secundaria con más de un conductor.	>=15.24m	Bajo	Nuevo
Otro Cable para distribución secundaria con un solo conductor.	--	Bajo	Viejo
Otro Cable para distribución secundaria con más de un conductor.	--	Bajo	Nuevo
Otros tipos de Cables a una distancia de 45.72 m	--	Bajo	Nuevo
Cable Grueso, utilizado para Transmisión y Distribución primaria , trifásicos	<39.624m >=39.624m	Alto Bajo	Combinación Nuevo

Tabla 5.5 Clasificación del código de líneas de Wertheimer-Leeper.
Fuente: **ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)⁽¹⁴⁾

Clasificación de Código de Líneas.			
Kaune-Savitz (Nuevo código de líneas)			
Construcción de la Línea	Distancia	Clasificación	Antigüedad del lugar
Cable Grueso, utilizado para Transmisión y Distribución primaria , trifásicos	<19.812m	Alto	Viejo
	19.812m – 39.624m	Medio	Combinación
Cable delgado utilizado para distribución primaria, trifásicos	<19.812m	Alto	Viejo
	19.812m – 39.624m	Medio	Combinación
Primer Cable para distribución secundaria con un solo conductor.	<25.908	Medio	Viejo
	>=25.908	Bajo	Viejo
Primer Cable para distribución secundaria con más de un conductor.	--	Bajo	Nuevo
Otro Cable para distribución secundaria con un solo conductor.	<25.908	Medio	Viejo
	>=25.908	Bajo	Viejo
Otro Cable para distribución secundaria con más de un conductor.	--	Bajo	Nuevo
Otros tipos de Cables a una distancia de 45.72 m	--	Bajo	Nuevo

ANTIGÜEDAD.

Viejo: Edificación de 50 años o más.

Nuevo: Edificación con menos de 50 años.

Combinación: Edificación que combina ambas anteriores.

CLASIFICACIÓN. (Estas son solo probabilidades deducidas de estudios realizados por médicos hace años.)

Alto: Alta probabilidad de riesgo de contraer las enfermedades mencionadas

Medio: Alto: Menor probabilidad de riesgo de contraer las enfermedades mencionadas

Baja: Poca probabilidad de riesgo de contraer las enfermedades mencionadas

Tabla 5.6 Clasificación del código de líneas Kaune-Savitz (Nuevo código de líneas).

Fuente: **ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)⁽¹⁴⁾

Los resultados aportados por el conjunto de los estudios epidemiológicos muestran importantes discrepancias. El análisis de los estudios publicados hasta 1996 sugería un ligero incremento del riesgo para el caso de enfermedades asociadas a los ambientes de trabajo con exposición a estos campos, sin embargo, esta relación no ha podido ser confirmada a partir de los resultados de los estudios que han estimado la exposición por



medios diferentes (medidas directas del campo magnético, reconstrucción retrospectiva de los valores de campo y distancia a las instalaciones eléctricas) que constituyen, en muchos casos, indicadores más reales de la exposición ver tabla 5.7

Descripción de estudios realizados con anterioridad, donde se tomaron en cuenta tanto medidas tomadas como análisis estadístico.			
Primer Autor	Localización	Medidas	Factores de relación en individuos estudiados.
Coghill	Inglaterra	Directas	Edad y Sexo
Dockerty	Nueva Zelanda	Directas	Fecha de nacimiento y Sexo
Fajardo-Gutiérrez	México	Basado en Código de líneas	Edad y Sexo
Feychting	Suecia	*Cálculos, algunos directos	Fecha de nacimiento y Sexo
Fulton	Rhode Island	Basado en Código de líneas	Fecha de nacimiento
Green	Ontario	Basado en Código de líneas	Fecha de nacimiento y Sexo
Linnet	Este de los E.U.A.	Directas y algunas basadas en código de líneas	Edad, raza
London	Los Ángeles	Directas y Código de líneas	Edad, sexo, raza
McBride	Canadá	Directas y Código de líneas	Edad, sexo, área
Michaelis	Alemania	Directas	Fecha de nacimiento, Sexo y localidad
Olsen	Dinamarca	*Cálculos.	Fecha de nacimiento, Sexo y fecha de diagnóstico de la enfermedad.
Savitz	Denver	Código de líneas, algunas directas	Edad y Sexo
Tomenius	Suecia	Directas	Fecha de nacimiento y Sexo
Tynes	Noruega	*Cálculos	Fecha de nacimiento, Sexo y localidad
Verkasalo	Finlandia	*Cálculos	Edad y Sexo
Wertheimer	Denver	Código de líneas	Fecha de nacimiento, algunos por país

*Cálculos: Exposición al campo magnético obtenida de ciertas configuraciones y carga eléctrica.

Tabla 5.7 Descripción de estudios realizados con anterioridad, donde se tomaron en cuenta tanto medidas tomadas como análisis estadístico.

Fuente: ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)⁽¹⁴⁾

El estudio realizado en 2002 nombrado **HUMAN BODY EXPOSURE TO POWER LINES: RELATION OF INDUCED QUANTITIES TO EXTERNAL MAGNETIC FIELDS (Exposición del cuerpo humano a líneas de alta tensión: Relación de cantidades inducidas de campo magnético.)**⁽¹⁵⁾, realiza un estudio sobre la cantidad de campo magnético que es inducido en el cuerpo de los trabajadores de compañías del ramo eléctrico por medio de una simulación por computadora que ejemplifica fielmente algunos de los casos mas comunes de exposición a estos campos de frecuencias extremadamente bajas (60 Hz), donde se encuentra no sólo el hecho de que estas cantidades pueden ser cuantificables más allá del llamado “código de líneas” sino también que estas cantidades de campo son bastante considerables, aunque el estudio realizado sólo se limita a la simulación y medición de los campos inducidos, no se realiza algún análisis estadístico en el que se encuentre correlación alguna entre la exposición a estos campos y la aparición de algunos de los cánceres antes mencionados.

Los valores de un campo eléctrico así como de su correspondiente densidad de corriente pueden ser medidas y cuantificadas numéricamente por medio de una computadora, utilizando un modelo heterogéneo y anatómicamente correcto, estas simulaciones por computadora son validas para campos magnéticos uniformes que rodean



al cuerpo en varias direcciones, los niveles más altos de exposición ocurren para el caso de campos magnéticos irregulares, muchos o la mayoría de estos se dan en los lugares de trabajo, por medio de estudios realizados anteriormente se sabe que pequeñas cantidades de campo magnético se inducen de diferente manera en varios órganos del cuerpo, lo cual puede ser cuantificado por medio de modelos digitales, sin embargo existe una enorme complejidad al realizar estos modelos, esto, sumado a que la simulación es mucho más difícil para campos eléctricos irregulares que para uno regular.

En este estudio se describe, utiliza y valida un método simplificado para la cuantificación de la inducción de estos campos magnéticos, este método está basado en la evaluación de la exposición del cuerpo a una determinada densidad de flujo magnético (externo) en cada uno de los órganos descritos más adelante, esto en determinados lugares de trabajo. Las simulaciones por computadora son relativamente sencillas inclusive si se trata de configuraciones complejas de cables de A.T., y no olvidando que estas simulaciones son válidas únicamente para campos electromagnéticos externos (al cuerpo) debido a que estos pueden ser medidos.

El modelado de los principales órganos del cuerpo (disimetría) realizado anteriormente en otros análisis se utiliza en este estudio para llevar a cabo el método simplificado propuesto, para ello es preciso el utilizar la simulación por computadora para cuatro escenarios diferentes de exposición a estos campos. Para los órganos no modelados en este método propuesto simplemente se da una estimación bastante confiable, únicamente en algún caso extraño donde algún órgano se encuentre en exposición a un campo electromagnético muy débil se tomará como la exposición promedio de el resto del cuerpo, las medidas calculadas por este método pueden variar hasta en un 10%. Otra excepción es el máximo campo eléctrico inducido en tejidos distribuidos a lo largo del cuerpo como lo son los huesos, los músculos o la piel, cuando parte de algún miembro se encuentra en un campo magnético muy fuerte cerca del cable de A.T. (conductor).

La exposición humana a campos eléctricos y magnéticos de bajas frecuencias (60Hz) resulta en la inducción del campo eléctrico y la densidad de corriente asociada directamente al tejido, esto debido a la naturaleza cuasi-estática de los campos electromagnéticos a estas frecuencias, la exposición a cada uno de los campos se considera por separado, y los valores totales inducidos pueden ser encontrados aplicando superposición, la relación entre la exposición en el ambiente y las cantidades de campo eléctrico inducidas en el cuerpo se *denomina dosimetría*. A pesar de que se han propuesto muchas explicaciones biofísicas para los efectos de los campos eléctricos de baja frecuencia, la explicación que se asume para la realización de la dosimetría de una manera confiable es en la que el potencial se induce a la membrana de la célula, sin embargo esta definición del campo inducido es útil para cualquier fenómeno donde se induzca un campo eléctrico (o densidad de corriente) inducido en cualquier tejido biológico.

La dosimetría se ha utilizado en varios estudios realizados donde ha servido de base para medición de la exposición a los campos electromagnéticos. Además, las cantidades de campo inducidas en algún lugar en específico del cuerpo (ganglios, glándula pineal, etc) realizan una mejor caracterización de la respuesta entre la interacción del tejido biológico y un campo externo, esto ayuda a saber el efecto de la vulnerabilidad biológica.

Durante la última década algunos laboratorios de investigación han desarrollado algunos modelos por computadora de los campos eléctricos inducidos y densidad de corriente en modelos heterogéneos del cuerpo humano en campos eléctricos o magnéticos



uniformes a 60 Hz. En este punto es donde se unen los resultados obtenidos por varios de estos grupos en donde las medidas realizadas muestran cuantificaciones que pueden tomarse como válidas. Muchas dosimetrías por computadora han sido realizadas considerando campos uniformes, de cualquier manera los altos niveles de exposición son debidos a campos irregulares en lugares de trabajo, particularmente en el caso del campo magnético, las evaluaciones de la exposición a campos magnéticos han sido estudiadas en ubicaciones cercanas a líneas de transmisión de alta tensión y en otras dos ubicaciones.

Modelo del Cuerpo Humano

Los modelos del cuerpo utilizados en este trabajo están basados en modelos realizados por imágenes de resonancia magnética (MRI), los modelos están definidos en coordenadas cartesianas orientados de la siguiente forma: los ejes x,y & z van de izquierda a derecha, de atrás hacia delante y de pies a cabeza respectivamente, la resolución de los modelos es de 3.6mm de área alineada con los ejes cartesianos, para el caso de posturas más realistas para los modelos en escenarios de trabajo, los miembros del modelo fueron articulados utilizando un software especial desarrollado en el laboratorio de el departamento de Ingeniería Eléctrica y en Computación, Universidad de Victoria Canadá. Conjuntamente con los modelos revisados, se realizó una cuidadosa inspección visual, así como la realización de una edición manual para lograr un modelo fiel a la anatomía humana.

Los modelos anatómicos comprenden alrededor de 90 materiales diferentes, de estos 81 están asociados a tejidos y los restantes con cavidades y otras partes del cuerpo. Varios tipos de tejidos están clasificados dando un total de 33 diferentes tipos de órganos para el análisis final de la dosimetría, debido a las limitaciones de la base de datos de conductividades sobre diferentes tejidos se origina una cierta incertidumbre o error en las medidas obtenidas por computadora para las cantidades de campo inducida en el tejido, de cualquier manera la magnitud de este error es analizado en otro estudio mencionado también en las referencias. El modelo del cuerpo humano utilizado en este estudio es similar a los modelos utilizados en otros laboratorios.

Escenarios de exposición.

También se asume que la ropa y equipo que lleva el trabajador no reduce el efecto del campo inducido en su cuerpo, así como el hecho de que no existe algún otro conductor ajeno al ejemplo que afecte o induzca campo sobre el mismo, el cuerpo del trabajador no esta aterrizado, cabe destacar que si existe algún otro conductor, este no estaría energizado para cualquiera de las configuraciones.

La configuración de la figura de abajo muestra un escenario de mantenimiento en un registro subterráneo, cada uno de los conductores están separados 52 cm , los cables de la parte baja están a 1.8 m del suelo mientras que los de la parte alta están a 2.1 m del suelo, cada una de las fases lleva 500 A rms, el centro de gravedad del trabajador se encuentra a 30cm a la derecha del conductor mas cercano.



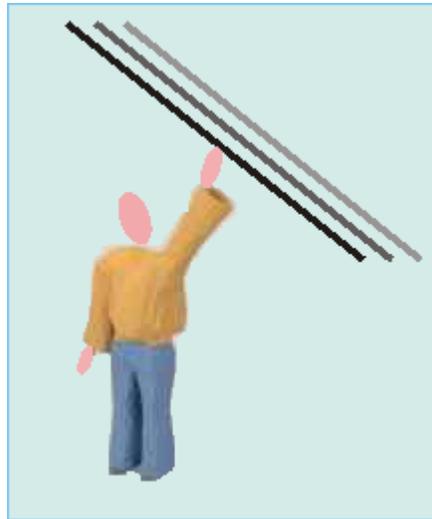


Fig 5.4 Posición de un trabajador en una estación subterránea realizando labores de mantenimiento.

Fuente: HUMAN BODY EXPOSURE TO POWER LINES: RELATION OF INDUCED QUANTITIES TO EXTERNAL MAGNETIC FIELDS⁽¹⁵⁾

Resultados Obtenidos para el Escenario simulado C, el cual representa una estación de servicio en un registro subterráneo, se toma en cuenta principalmente este escenario debido a que las características que representa son las equivalentes a un sitio de trabajo o instalación de un cable de A.T. del tipo subterráneo.\

Densidad de Flujo Magnético (mT) inducido a cada parte del cuerpo. Para el Caso de un Registro Subterráneo con corriente de carga (500 A). En configuración trébol.						
Órgano	Promedio	Rms	L50	L92	L99	Max.
Médula Ósea	0.040	0.100	0.025	0.064	0.621	1.125
Cerebro	0.049	0.050	0.049	0.060	0.063	0.0625
Corazón	0.038	0.038	0.038	0.042	0.043	0.044
Riñones	0.025	0.025	0.025	0.028	0.029	0.030
Pulmones	0.035	0.035	0.035	0.044	0.046	0.048
Músculo	0.045	0.111	0.030	0.095	0.436	2.630
Próstata	0.017	0.017	0.017	0.018	0.018	0.018
Bazo	0.032	0.032	0.032	0.036	0.037	0.037
Testículos	0.018	0.018	0.018	0.019	0.019	0.020
Resto del Cuerpo	0.051	0.147	0.027	0.082	0.797	3.665

*L(n): Medida realizada correspondiente al n-ésimo percentil del total de las mediciones tomadas.

Tabla 5.8 Densidad de Flujo Magnético (mT) inducido a cada parte del cuerpo. Para el Caso de un Registro Subterráneo con corriente de carga (500 A). En configuración trébol⁽¹⁵⁾

Por otro lado el estudio del mismo año (2002) titulado **ELECTROMAGNETIC FIELDS, POLYCHLORINATED BIPHENYLS, AND PROSTATE CANCER MORTALITY IN ELECTRIC UTILITY WORKERS (Campos electromagnéticos, PCB o bifenilos policlorados, y la mortalidad por cáncer de próstata en trabajadores del sector eléctrico)⁽¹⁶⁾**, realiza un estudio sobre diversas poblaciones de trabajadores del ramo eléctrico que por muchos años han estado expuestos a los campos electromagnéticos generados por los cables de A.T., comparándolos con poblaciones de trabajadores no expuestos directamente a estos campos, donde se observa una correlación entre los



trabajadores expuestos y la aparición de cáncer de próstata, siendo este sólo un estudio de asociación estadístico donde se puede deducir que las probabilidades de adquirir alguna de estas enfermedades por exposición aumenta si se está expuesto a estos campos de bajas frecuencias generados por cables de A.T..

Hasta el momento no se han podido identificar los factores que pudieran explicar la asociación hallada en algunos estudios entre código de líneas y algún tipo de cáncer. No se cuenta con suficientes indicios para considerar la exposición a los campos electromagnéticos en el medio laboral como causante del mismo. Otros factores que podrían dar cuenta de esta asociación, tales como la antigüedad de las instalaciones o la densidad de tráfico en sus inmediaciones, se correlacionan de forma más estrecha con los niveles altos de la clasificación de código que los propios campos magnéticos medidos.

Los datos epidemiológicos disponibles no aportan pruebas convincentes para establecer una relación entre el resto de los cánceres, y la exposición a los campos electromagnéticos, con independencia del método utilizado para su estimación. Tampoco se ha podido identificar una asociación entre cánceres infantiles y exposición laboral paterna. Los resultados aportados por los estudios sobre cáncer en el adulto en ambientes laborales no muestran, en conjunto, incremento del riesgo de cáncer en relación con la exposición a campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión.

Por último, otros estudios se han interesado por los efectos sobre la reproducción y el desarrollo (incremento en las tasas malformaciones congénitas) como consecuencia de la exposición en los lugares de trabajo y un número más limitado se han ocupado de otro tipo de efectos como los trastornos mentales y de la conducta (suicidio, depresión y cefaleas). De su análisis se desprende que no se dispone de evidencias epidemiológicas que avalen la relación postulada entre la exposición a campos electromagnéticos y un incremento en el riesgo de defectos en los procesos de reproducción y desarrollo o de alteraciones mentales y del comportamiento.

5.8.3 Efectos sobre la salud. Estudios experimentales

Los estudios experimentales realizados in vivo e in vitro sobre los posibles efectos biológicos promovidos por la exposición a campos electromagnéticos, incluyen un gran número de ámbitos biológicos, destacan los relacionados con la carcinogénesis (formación del cáncer por medio de los carcinógenos o de enfermedades genéticas), si bien se han estudiado también efectos sobre reproducción y desarrollo, comportamiento, sistema nervioso central, estrés y sistema cardiovascular, la mayor parte de los estudios experimentales realizados con campos electromagnéticos de baja frecuencia 60Hz utilizan intensidades muy superiores a las generadas por las líneas de alta tensión. Esto responde a la aproximación experimental clásica de utilizar dosis tan altas como sea necesario del agente que se está ensayando, para que se produzca el efecto, y una vez observado éste ir reduciendo las dosis hasta alcanzar el nivel de no efecto.

Los estudios relacionados con la carcinogénesis han ido dirigidos, bien a conocer la capacidad de los campos electromagnéticos (por sí mismos o en combinación con un iniciador químico) para inducir cáncer en modelos animales, o bien a caracterizar posibles mecanismos biológicos por los que los campos electromagnéticos pudieran influir en el proceso carcinogénico.



Los resultados obtenidos en modelos animales, no aportan pruebas convincentes de que exista una relación entre exposición a campos electromagnéticos e incidencia de cáncer en animales de experimentación, tampoco se han descrito efectos sobre la promoción de cánceres de piel, hígado, o sistema hematopoyético (es el sistema encargado de la formación de la sangre), en animales en los que se ha iniciado un cáncer mediante tratamiento con un agente químico.

La caracterización de los mecanismos biológicos que pudieran explicar los posibles efectos de los campos electromagnéticos de frecuencia baja en el proceso carcinogénico, se ha centrado en el análisis de capacidad genotóxica (Capacidad de las células de soportar sin respuesta la exposición a ciertas sustancias o efectos que representan un riesgo carcinogénico importante), alteraciones en el proceso de transmisión de señales, inducción de proliferación celular y efectos sobre el sistema inmunológico y endocrino.

Los resultados del conjunto de estudios de genotoxicidad sugieren que los campos electromagnéticos de frecuencia baja no tienen capacidad para producir daño en el ADN. En ocasiones se han descrito alteraciones en alguno de los sistemas celulares implicados en la transmisión de señales, asociadas a la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia 60Hz, sin embargo, en todos los casos las intensidades de campo a las que tenían lugar estos efectos eran muy superiores a las existentes en entornos residenciales y laborales. La exposición a campos electromagnéticos de frecuencia baja no produce efectos sobre la proliferación celular a intensidades inferiores a 50 μT , así mismo, no se han descrito alteraciones en la respuesta inmunitaria a intensidades de campo inferiores a 200 μT . El conjunto de estudios relacionados con la melatonina (hormona encontrada en todos los organismos vivos, en concentraciones que varían de acuerdo al ciclo diurno/nocturno) pone de manifiesto que, si bien en algunos casos y especies animales se han observado alteraciones en los niveles de esta hormona, esto siempre ocurre a intensidades de campo muy superiores a las existentes en ambientes residenciales o laborales. En humanos, primates y ovejas, no se han descrito alteraciones en la concentración de melatonina nocturna como consecuencia de la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia 60Hz.

Los estudios sobre efectos de los campos electromagnéticos en la reproducción y el desarrollo de mamíferos han constatado que la exposición a intensidades de campo eléctrico de hasta 250 kV/m y campo magnético de hasta 500 μT no produce alteraciones en fertilidad, tamaño de las crías, supervivencia, proporción de sexos e incidencia de malformaciones.

No se han observado alteraciones en el comportamiento de los animales de experimentación como consecuencia de la exposición a campos electromagnéticos a intensidades en el rango de las generadas por líneas eléctricas de alta tensión. En algún caso se han descrito cambios selectivos, pequeños en magnitud y de duración limitada, que no han podido relacionarse con alteraciones en la morfología, neurofisiología o neuroquímica del sistema nervioso central. En relación a los posibles efectos producidos por los campos electromagnéticos en la respuesta de estrés y el sistema cardiovascular, los cambios observados en ambos casos son de una magnitud insuficiente para constituir un riesgo para la salud.



5.8.4 Normas y recomendaciones internacionales.

Las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y la Internacional Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) se basan, a la hora de limitar la exposición, en los efectos inmediatos y a corto plazo sobre la salud, tales como estimulación nerviosa y muscular, absorción de energía, descarga eléctrica y quemaduras producidas por el contacto con objetos conductores. A la frecuencia de 60 Hz, dichos efectos están relacionados con la densidad de corriente inducida en el organismo y se observan a partir de 10 mA/m². Puesto que esta magnitud no es directamente medible, los límites para el campo eléctrico y magnético externo se calculan a partir de modelos y cálculos aproximados de la corriente inducida en el cuerpo humano por campos externos, por lo que los valores recomendados varían ligeramente dependiendo del modelo y del factor de seguridad utilizados.

Con respecto a los posibles efectos a largo plazo, tales como un incremento en el riesgo de cáncer, la posición adoptada por los organismos que han formulado las distintas normas y recomendaciones es que, aunque la investigación epidemiológica ha proporcionado alguna indicación de posibles efectos carcinogénicos, los datos disponibles no son suficientes para servir como base sobre la que establecer límites de exposición.

Los límites recomendados por el ICNIRP para la exposición continua del público a campos de 50 Hz son de 100 μ T para la inducción magnética y 5 kV/m para la intensidad de campo eléctrico⁽¹⁸⁾.

En el caso de exposición laboral, dichos límites son 500 μ T y 10 kV/m, respectivamente. Estos límites han sido adoptados en la Propuesta de

Recomendación del Consejo de las Comunidades Europeas⁽¹⁷⁾ COM (1998) 268

La información científica y técnica más significativa, actualmente disponible a nivel internacional, no proporciona evidencias de que la exposición a campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión suponga un riesgo para la salud de las personas.

Los estudios epidemiológicos y experimentales no demuestran que estos campos produzcan cáncer, efectos sobre la reproducción y el desarrollo o alteraciones mentales y del comportamiento. Desde el punto de vista físico y biológico, no se han podido identificar mecanismos que expliquen cómo estos campos podrían producir efectos adversos en el organismo.



CONCLUSIONES

Como se ha visto, a lo largo de los últimos 50 años se han instalado una gran cantidad de cables de energía aislados en el país, donde proliferan algunas tensiones sobre otras, como lo son: los cables para 115kV y 69kV, los cuales desde los inicios de la utilización de los cables en México han sido los más utilizados desde entonces; en un principio fueron empresas extranjeras las que instalaban o diseñaban las instalaciones en el país pero con el paso del tiempo esta tarea paso a manos de los mexicanos, con sus excepciones.

Gracias al crecimiento poblacional, económico y tecnológico y por consecuencia aumento en la demanda de energía en México, se pronostica que la demanda de cables aislados crecerá significativamente, ya que estos tienen grandes ventajas tanto eléctricas como mecánicas, a parte de que garantizan la confiabilidad del sistema, facilita la puesta de operación, son más seguros, la instalación es mucho más estética y presentan gran rendimiento a lo largo de su vida. En México, los nuevos diseños de cables XLPE presentan cubiertas herméticas, lo cual incrementa la confiabilidad del sistema y los hace ser más eficientes, en la actualidad son los más utilizados ya que permiten la transmisión de energía en grandes ampacidades, además que presentan grandes ventajas sobre los cables con aislamiento de gas.

Diversos estudios han indicado a lo largo de la historia que resulta mucho más rentable el ahorro de energía que la generación de la misma, este punto como un beneficio directo al país sumado al gran ahorro económico que puede significar para una empresa el correcto manejo de su energía dan como resultado un gran motivo para optimizar los sistemas de cables en el país.

Anteriormente los métodos especiales de conexión no eran conocidos, en la actualidad diversos sectores industriales ya tienen conocimiento de estos métodos, sin embargo, a veces, y por lo general, estos no se aplican ya sea porque resultan bastante caros o debidos a la falta de conocimiento por parte de los contratistas y de los usuarios finales.

La elección de un método especial de conexión de pantallas es fundamental para el correcto funcionamiento de un sistema de cables de energía de alta tensión, en este documento se mencionaron los diversos métodos que en la actualidad existen, sin embargo, consideramos que la mejor elección de un método de conexión es aquella que se apegue a los requerimientos de seguridad, conservación del medio ambiente y condiciones de la instalación según el tipo de proyecto; puesto que cada proyecto es diferente, cada uno necesita el análisis de transitorios, el estudio de mecánica de suelos, de mediciones de resistividad del terreno, de mediciones de la resistencia eléctrica con el sistema de tierras instalado para que de esta manera se garantice un óptimo rendimiento a lo largo de la vida del cable

En general se recomienda que se debe conectar a tierra las pantallas metálicas en todos los puntos donde pueda entrar en contacto toda persona ya que las tensiones que se inducen en la pantalla a lo largo de la instalación puede alcanzar valores muy cercanos al potencial del conductor, lo que da lugar a una condición peligrosa, se deberán aterrizar las pantallas



principalmente en los registros y terminales, y por seguridad del personal calificado las pantallas metálicas deben conectarse a tierra al menos en un punto.

Como se mencionó en este documento relacionado con el fenómeno de las tensiones inducidas, se sabe que en México este fenómeno es bien conocido sin embargo, no se comprende en su totalidad ya que se diseñan sistemas eléctricos sin tomarlo en cuenta, lo cual resulta ser un factor desfavorable durante la operación del cable y esto reduce significativamente la ampacidad que en un futuro reduce la vida del cable. Un correcto entendimiento de este fenómeno en el momento del proyecto de la instalación puede ayudar a evitar riesgos y costos innecesarios.

El campo electromagnético generado por un cable de energía afecta de igual manera a todo a su alrededor, este es el caso de los seres humanos, principalmente de los trabajadores de mantenimiento que día a día tienen que laborar cerca de estos cables, para corregir fallas o realizar mediciones, es por eso que en relación a este fenómeno concluimos que aunque existen algunos casos de enfermedades presentadas en trabajadores o personas cercanas a estos cables, no se puede probar verazmente que esto sea causa de alguna enfermedad. Sin embargo las precauciones en el sitio de trabajo deben ser obligatorias, así como las indicaciones de seguridad que el personal especializado indique.

Por otro lado, durante la planeación de un sistema de cables es importante considerar que todo sistema de cables cuente con el equipo necesario para realizar una correcta instalación del sistema subterráneo, durante este documento se menciona la importancia de la confiabilidad y continuidad del sistema, se sabe que todo sistema eléctrico es vulnerable a sufrir fallas de origen interno y externo, es por eso la importancia del uso de accesorios que cumplan con los requerimientos mencionados tanto en las normas nacionales como extranjeras, tal como los niveles de aislamiento.

En cuanto a las pérdidas por efecto Joule se sabe que en todo sistema de cables estas van estar presentes, en nuestro caso de estudio se demostró que evidentemente la elección de un método especial de conexión elimina casi en su totalidad las tensiones en pantalla, por ejemplo se demostró que la solución para reducir las pérdidas en pantalla es utilizar el método de Cross Bonding, ya que las pérdidas que se obtuvieron tanto de diseño como de practica resultaron ser menores y los costos económicos también fueron menores, lo cual resulta ser una propuesta bastante atractiva y rentable para toda empresa que desee tener un sistema eléctrico eficiente. ***Cabe mencionar que este método es muy poco utilizado en instalaciones de este tipo en México debido al incremento en costos de instalación, sin saber que por falta de conocimiento o sentido común, a la larga, el ahorro de estos costos de instalación resultan en pérdidas mucho mayores para las empresas.***

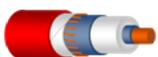
Al igual que la elección del método especial de conexión de pantallas depende de las características específicas de cada instalación, la elección del tipo de cable depende en su totalidad de estas características, donde la correcta elección del cable es de vital importancia no sólo para un funcionamiento correcto del sistema sino para que las pérdidas sean siempre mínimas.

Es muy importante hacer énfasis en que mientras en más puntos se aterrice la pantalla es mejor, aunque el costo de la instalación aumenta y no siempre es factible debido a las



características de la instalación, en caso de ser necesario como ya se mencionó en este documento deben utilizarse limitadores de tensión para evitar daños al sistema.

Al final cada caso es diferente, y lo importante es realizar el estudio que lleve a la elección del método de conexión que más convenga a cada caso, ya que es muy difícil y aventurado decir que un solo método de conexión de pantallas es el ideal para todas las instalaciones de cables en el país, al final este documento sólo busca proveer una sólida herramienta que ayude a los expertos en esta difícil decisión.



ANEXO A

Tensiones inducidas en pantalla- perspectiva histórica de práctica y problemas

A.1 Retrospectiva de Estados Unidos

En un principio los cables estaban aislados con una combinación de aceite y papel impregnado, eran construidos con una pantalla metálica, que actuaba como barrera contra la humedad y como vía de regreso de las corrientes de falla. Los cables eran instalados usualmente en ductos, y empalmados en registros con fácil acceso, el material más común en las pantallas era el plomo, y la mayoría de los cables eran instalados sin cubierta y con las pantallas sólidamente aterrizadas.

Con el aumento de la capacidad de los sistemas se incrementaron las tensiones y corrientes, y las pérdidas adquirieron mayor importancia, y diversos métodos de reducción de pérdidas en las pantallas fueron desarrollados entre los años de 1910 a 1930. La mayoría de estos métodos requerían el uso de aisladores insertados en las pantallas para interrumpir el circuito de la pantalla en secciones eléctricas más pequeñas. Estos sistemas fueron bastante exitosos, sin embargo las pantallas eran a menudo una fuente de problema debido a los agujeros que estos aisladores provocaban, que permitían la fuga del aceite del cable, y a la vez penetraba la humedad en dichos cables.

Debido a factores tales como la corrosión y seguridad del personal, se adoptó que el límite de tensión para una pantalla fuera aproximadamente de 12 a 17V para pantallas en conexión especial.

A finales de la década de 1960, este límite de casi 17V se mantuvo para la utilización de cables con pantalla de plomo sin cubierta, con el propósito de proteger el plomo desnudo contra la corrosión electrolítica. Posteriormente, cuando se mejoraron los diseños y materiales de la cubierta del cable, los límites de tensión en pantalla se incrementaron de 65V a 90V, aunque no hubo muchas pruebas para fundamentar este uso en el pasado.

A.2 Práctica Canadiense

Hasta la década de 1990, la práctica ha sido la de limitar la conexión a tierra de las pantallas y sus arreglos, de tal forma que la tensión inducida en la pantalla con carga máxima de corriente no exceda los 100V de tierra en cualquier punto a lo largo de la pantalla. Actualmente se han utilizado valores de 100 a 400V.

A.3. Práctica Mexicana

En México los primeros cables instalados fueron con aislamiento de papel impregnado con cubierta de plomo (PILC) y se instalaron poco antes de la década de los 60's. El fenómeno de las tensiones inducidas en las pantallas metálicas tomó importancia pocos años después con el aumento de la demanda y de las pérdidas en los sistemas.



Actualmente la Norma Oficial de Instalaciones Eléctricas NOM-001-Sede 2005 recomienda 55V. Ver artículo 923-Lineas Subterráneas, sección D. Tensiones inducidas en pantallas metálicas, pp: 745.

A.4 Experiencia Británica previa a 1970

Los primeros cables en el Reino Unido tenían algún tipo de cubierta externa sobre su pantalla, los cables eran enterrados directamente y eran protegidos cubriéndolos con varias capas de vulcanización de caucho y PVC, en combinación con cintas impregnadas en bitumen. Estas cubiertas se consideraron eléctricamente adecuadas aun cuando entraron los métodos especiales de conexión a tierra, ya que se consideraba que habría pocas posibilidades de tensiones inducidas lo suficientemente altas como para perforar este tipo de cubiertas anticorrosivas. Cloruro de polivinilo, polietileno, y cubiertas de polietileno extruido de alta densidad sustituyeron las viejas técnicas ya mencionadas. Estas prácticas fueron contrarias a las primeras prácticas en los Estados Unidos, donde las pantallas de plomo desnudo estaban en uso regular y las tensiones en pantalla se limitaban hasta 17V.

Los circuitos de conexión especiales se introdujeron en el Reino Unido a finales de 1950, momento en que la máxima tensión inducida se limitaba a 50V para aplicaciones subterráneas y a 25V en las terminales. Estos fueron los niveles máximos permisibles establecidos por la Central Electricity Generating Board (CEGB) en 1959. Ya en 1965, se incrementaron los niveles de tensiones inducidas en cables subterráneos a 65V, el cable del río Severn se instaló con tensiones inducidas de pantalla de hasta 100V en plena carga en diversas partes a lo largo de la ruta, pero en las terminales se limitó a 25V.

A.5 Práctica en otros países de Europa, previa a 1980

En Europa, no se ha establecido una práctica estandarizada, pero a continuación se indican acontecimientos que tuvieron lugar en algunos países en su momento.

- ✚ En los Países Bajos no ha sido establecido un límite de tensión inducida en pantallas.
- ✚ En Francia se impuso un límite de 25V para tensiones en terminales abiertas, pero no se ha fijado ningún límite para tensiones en pantalla para cables con aislamiento sólido.
- ✚ En Noruega, no se ha establecido un límite fijo, pero en la práctica se acordó un límite de tensión en pantalla de 60V.
- ✚ En Italia, no se acordó un valor fijo, pero la tensión en pantalla se limitó a 25V.



Anexo B

Tensiones inducidas en pantallas – información actual

B1. Práctica actual en Estados Unidos

En la actualidad no existen límites preestablecidos para tensiones inducidas en los Estados Unidos, debido a la falta de estos límites en normas industriales las características de las instalaciones eléctricas varían significativamente; a pesar de que estos límites no están establecidos existe una tendencia desde hace años a ir incrementando poco a poco estos valores de tensión. Por citar un ejemplo, la mayoría de las instalaciones de cables de A.T subterráneos de un solo conductor con longitudes de más de un kilómetro están siendo diseñadas para una tensión en pantallas que oscila entre los 100 y 200V en condiciones normales de operación, y en condiciones de falla esta tensión aumenta, normalmente se manejan valores con un límite de 275V, sin embargo existen sistemas en los que estos límites de tensión en condiciones de falla han llegado a superar los 440V.

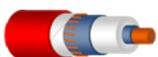
Otros ejemplos de instalaciones en los Estados Unidos se mencionan a continuación:

- a) Un sistema de cables de 138kV con aislamiento XLPE instalado por una empresa, con pantallas en conexión cruzada fue diseñado para un máximo de tensión inducida de 202V, la máxima longitud de sección en pantallas de este sistema de cable fue 925m (1Km aproximadamente) y la corriente nominal fue de 1400A.
- b) Un sistema de cables XLPE a 120kV instalado por otra empresa, conectó las pantallas a tierra en un solo punto con un máximo de tensión inducida de 163V durante condiciones normales de operación, y la máxima tensión en pantalla en condiciones de falla se incrementó hasta los 447V, la máxima longitud de sección en pantallas para este sistema de cables fue 2218.639 m., la corriente máxima durante las condiciones normales de operación y de falla fueron 510A y 1400A respectivamente.

B2. Práctica actual en Canadá

Las características específicas de cada instalación varían de un lugar a otro, por ejemplo, una empresa utiliza en sus instalaciones un cable de energía (LPFF) con el método de conexión cruzada en secciones, para de esta manera minimizar las pérdidas en las pantallas y establecer una ruta adecuada para la corriente de falla. Se instalaron LT's para descargas atmosféricas de 3kV en cada uno de los puntos de conexión cruzada para minimizar los efectos de sobretensiones transitorias en la pantalla y en las cubiertas de los empalmes.

Hasta la década de los 90's en las instalaciones de cables de energía la conexión de pantallas se enfocó a establecer límites de tensión inducida a un máximo de 100V en cualquier punto a lo largo del cable, para condiciones máximas de operación. En la actualidad las instalaciones de cables de energía de un solo conductor están siendo instalados y operados a un límite máximo de tensión inducida en pantalla de hasta 600V; para garantizar que el sistema soporte adecuadamente sobretensiones transitorias todos los



componentes del sistema especialmente los LT's son probados a niveles ya especificados en lo que respecta a AC y pruebas de tensiones de impulso.

Otro ejemplo, una empresa ha instalado sistemas de cables de energía con conexión cruzada sin ninguna protección en el empalme con interrupción de pantalla, el resultado fue el daño que sufrió dicho empalme, por lo que este sistema se considera ineficiente, posteriormente la empresa adoptó el uso de la conexión a tierra en un solo punto con spark gap en las terminales, y con este sistema las tensiones inducidas en pantalla de 300V a 400V en casos de falla a tierra se permitieron en las terminales.

Con el aumento de la demanda de carga, los sistemas de cables de energía han aumentado el número de instalaciones, con el subsecuente tamaño y mejoramiento del diseño de los cables, los niveles de tensión inducida en pantalla ha llegado a ser hasta 600V. Un sistema poco usual de conexión a tierra fue empleado por una empresa para un sistema de cables con diferentes longitudes entre cada uno de los registros, el sistema usado se puede describir como "conexión cruzada modificada" este sistema se describe detalladamente en el Capítulo 3 de este documento.

B3. Prácticas actuales internacionales

Algunos ejemplos de las tensiones inducidas en pantalla utilizadas en diversos países son:

- ✚ La máxima tensión en pantallas que actualmente se está utilizando en Holanda para cables con dieléctrico extruido de 400kV con cubierta PVC es de 400V.
- ✚ En Japón es común el empleo de niveles de tensión inducida de 200V como máximo.
- ✚ En Francia el límite de tensión inducida es de 400V para instalaciones de cable de A.T.



B4. Práctica actual en México

TABLA B1 - OBRAS SUBTERRÁNEAS CON CONEXIONES ESPECIALES CFE DEL 1999-2000 (115-400kV)								
No	Proyecto	kV	C	km	Cable con aislamiento XLPE	Fecha Terminación	Sist. Puesta a tierra en P.M	Estátus
BAJA CALIFORNIA								
1	PACKARD ENTO. MEXICALLI II. CETYS	161	2	2.1	800 mm2, Cu, PM-Pb	2003	P.T. TODOS PUNTOS SIN SVL's	CONSTRUIDA
2	SANTA ISABEL ENTO. RIO NUEVO-NACAZARI	161	2	3.3	1200 mm2, Cu, PM-Al	2007	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
3	PRESIDENTE JUAREZ, PANAMERICANA FRACCIONAMIENTO	115	2	0.3	1000 mm2,Cu, PM-Al	2007	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
BAJA CALIFORNIA SUR								
4	TRES VIRGENES- SANTA ROSALÍA	115	1	2.5	380 mm2, Cu, PM-Cu	2001	P.T. TODOS PUNTOS SIN SVL's	CONSTRUIDA
5	CABO REAL- EL PALMAR (CABLE C/PROTECCION ANTI-TERMITAS)	115	2	1.6	800 mm2,Cu, PM-Cu/at	2007	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
NORESTE								
6	HERMOSILLO 4- ESPERANZA I	115	1	6.8	1000 mm2, Al, PM-Cu/At	2007	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
NORTE								
7	PLANTA CHIHUAHUA- ROBINSON	115	1	5.1	2000 mm2, Cu, PM-Al+Cu	2006	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
8	GOMEZ PALACIO - ABASTOS	115	2	12.8	800 mm2, Cu,PM-Cu	2005	P.T. TODOS PUNTOS SIN SVL's	CONSTRUIDA
9	ABASTOS- CALIFORNIA	115	2	5.2				
10	GOMEZ PALACIO- LA LAGUNA	115	2	6.1				
11	GOMEZ PALACIO- ALLENDE	115	1	11.5				
NORESTE								
12	TECNOLOGICO - PLAZA	115	2	6.1	2000 mm2, Cu,PM-Al+Cu	2006	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
13	LLANO GRANDE - CENTRAL	138	1	9.1	1000 mm2, Cu, PM-Al+Cu	2007	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
14	LLANO GRANDE - ORIENTE	138	1	5	1200 mm2, Cu, PM-Pb	2005	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
15	RIO ESCONDIDO - PIEDRAS NEGRAS POTENCIA	230	1	1.2				
16	PIEDRAS NEGRAS POT. ACUNA II	138	1	2.5				
17	CUMBRES ENTO. REYNOSA - JUAREZ	138	2	1.2				
18	RIO BRAVO - PARQUE INDUSTRIAL REYNOSA	138	2	1.2	506 mm2, Cu, PM-Cu	2002	P.T. TODOS PUNTOS SIN SVL's	CONSTRUIDA
19	TERRANOVA - GRANJERO	138	2	2.2	506 mm2, Cu, PM-Cu	2004	P.T. TODOS PUNTOS SIN SVL's	CONSTRUIDA
CENTRAL								
20	MODERNIZACIÓN CTOS. OLIVAR-AGUILAS Y OLIVAR-SAN BERNABE	230	2	0.7	1600 mm2, Cu, PM-Pb	2005	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
21	SAN BERNABE ENTO. AGUILAS-TOPILEJO	230	4	6.1	1600 mm2, Cu, PM-Pb	2003	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
OCCIDENTE								
22	SECTOR JUAREZ ENTO. GUADALAJARA I - GUAD. II	230	2	6.5	1200 mm2, Cu, PM-Pb	2005	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
23	AGUA AZUL ENTO. ATEQUIZA - ALAMOS	230	2	5.1	1000 mm2, Cu, PM-Pb	2003	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
24	MODERNIZACIÓN SE MANZANILLO II (SUB.GIS SF6)	400	3	0.2	1000 mm2, Cu, PM-Pb+Al	2006	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
PENINSULAR								
25	BALAM- BONAMPAK	115	1	16.5	380 mm2, Cu, PM-Pb	1999	P.T. TODOS PUNTOS SIN SVL's	CONSTRUIDA
26	NIZUC- PLAYA DEL CARMEN (CABLE C/PROTECCION ANTI-TERMITAS)	115	1	5	1000 mm2, Cu, PM-Cu/at	2007	CROSS BONDING CON SVL's	CONSTRUIDA
CENTRALES TERMOELÉCTRICAS								
27	CCC VALLE DE MÉXICO (ESTADO, MÉXICO)	230	2	0.5	800 mm2, Al, PM-Al+Cu	2005	SINGLE POINT CON SVL's	CONSTRUIDA
28	CCC BAJA CALIFORNIA (ROSARITO, BAJA CALIFORNIA)	230	2	0.8	1000mm2, Al, PM-Al	2008	SINGLE POINT CON SVL's	EN CONST.
29	CCE PACÍFICO (PETACALCO GUERRERO)	400	1	0.4	1600mm2, Al, PM-Al	2008	SINGLE POINT CON SVL's	EN CONST.
30	CCC EL SAUZ	230	1	0.3	400mm2, Al, PM-Pb+Cu	2004	SINGLE POINT SIN SVL's	CONSTRUIDA



Anexo C

Cálculo de tensiones inducidas

C.1 Tensiones inducidas

Cualquier conductor p, colocado junto a un sistema trifásico en formación paralela con corrientes balanceadas tendrán un gradiente de tensión E_p inducido a lo largo de su longitud, teniendo que:

$$E_p = j \omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left[\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{S_{ap} S_{cp}}{S_{bp}^2} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{S_{cp}}{S_{ap}} \right) \right] \text{ V/m} \quad (C1)$$

Donde:

- I_b es la corriente rms en el conductor b en [A].
- ω es la frecuencia angular del sistema ($2 \pi f$).
- S_{ap} es la separación del conductor paralelo y la fase a.
- S_{bp} es la separación del conductor paralelo y la fase b.
- S_{cp} es la separación del conductor paralelo y la fase c.

Estas separaciones pueden estar en cualquier unidad según se requiera.

Se asume que el defasamiento es tal que; $I_a = a I_b$ y $I_c = a^2 I_b$

Donde:

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (C2)$$

$$I_b = I_0 (1 + j 0) \text{ Corregido}$$

I_0 es la magnitud de la corriente de carga.

Evidentemente, como las separaciones del conductor paralelo aumentan en relación a las separaciones mutuas del grupo de cables, la tensión inducida tiende a cero, del mismo modo, si los tres cables del grupo se transponen en intervalos similares, las tensiones inducidas en el conductor paralelo suman cero a lo largo de un ciclo completo.

C.2 Gradientes de tensión inducidos en pantalla

El gradiente de tensión inducido en la pantalla metálica de un cable puede considerarse de manera similar a lo tratado anteriormente para un conductor paralelo, donde la separación entre el conductor y la fase es el equivalente al radio medio de la



pantalla; cuando no existe otro conductor con circulación de corriente cerca del sistema los gradientes de tensión se calculan de la siguiente forma:

C.2.1 Caso general para cualquier configuración de cable

$$E_a = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{2S_{ab}^2}{dS_{ac}} \right) + j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{2S_{ac}}{d} \right) \right] \text{ V/m} \quad (C3)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left[\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{4S_{ab}S_{bc}}{d^2} \right) + j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{S_{bc}}{S_{ab}} \right) \right] \text{ V/m} \quad (C4)$$

$$E_c = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{2S_{bc}^2}{dS_{ac}} \right) - j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{2S_{ac}}{d} \right) \right] \text{ V/m} \quad (C5)$$

Donde

d es el diámetro medio geométrico de la pantalla (media aritmética).

S_{ab} es la separación de las fases a y b.

S_{bc} es la separación de las fases b y c.

S_{ac} es la separación de las fases a y c.

C.2.2 Configuración trébol

Para cables en configuración trébol cuando $S_{ab} = S_{bc} = S_{ac}$ estas ecuaciones se reducen a:

$$E_a = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \quad (C6)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \quad (C7)$$

$$E_c = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \quad (C8)$$

C.2.3 Configuración plana

Para cables en configuración plana, en la cual la separación de cables S , los gradientes de tensión en pantalla están dados por:



$$E_a = j \omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \text{ V/m} \quad (\text{C9})$$

$$E_b = j \omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{2S}{d} \text{ V/m} \quad (\text{C10})$$

$$E_c = j \omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \text{ V/m} \quad (\text{C11})$$

C3. Transposición y Conductor independiente paralelo

Los gradientes de tensión calculados anteriormente en C2 se deben únicamente al campo magnético generado por las corrientes trifásicas, cuando cualquier otro conductor con flujo de corriente está cerca, estas tensiones podrían modificarse. En particular, si el conductor paralelo esta conectado al sistema a fin de llevar la corriente inducida, entonces el gradiente de tensión para el conductor que se encuentre cerca se reducirá, esta reducción depende de la configuración de los conductores y de la impedancia del circuito del cual forma parte el conductor paralelo.

Los cables de energía frecuentemente comparten el mismo registro con los cables de comunicación o protección por lo tanto, es conveniente reducir al mínimo las tensiones inducidas en estos cables. Cuando las pantallas de cables de energía no están interrumpidas y aterrizadas en ambos extremos, adoptan las características de un conductor paralelo, por lo tanto, reducen su tensión inducida, sin embargo, las pantallas de los cables de energía no llevan grandes corrientes, por lo tanto los efectos provocados en cables paralelos cercanos no existen, esto es en condiciones normales de operación, por otro lado, durante cargas desbalanceadas o fallas, para el caso de conexión cruzada existe un flujo de corriente en la pantallas, y solo si así ocurre, se presentarán los efectos en los cables paralelos cercanos, y el mismo efecto ocurrirá en la cubierta del cable paralelo.

La tensión inducida en los cables paralelos puede ser reducida o eliminada por la transposición de fases, y es deseable para los cables con conexión especial por las razones mencionadas anteriormente, la transposición tiene la ventaja adicional de balancear las impedancias de los cables trifásicos, sin embargo en la practica la misma no es conveniente para cables de A.T cuyo calibre y peso del cable no lo permiten, es por eso, que la transposición completa de las fases requiere de tres secciones para poder llevarse a cabo; para circuitos formados por una o dos secciones, no se recomienda la transposición de los cables de energía debido a los problemas de sobretensión que estas producirían, sin embargo, el conductor paralelo puede ser transpuesto como se indica a continuación.

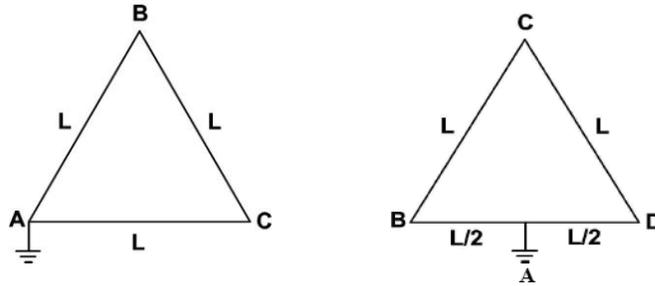
En la Figura 3.2 del Capitulo 3 se muestran los métodos que se utilizan para la transposición del cable o conductor paralelo de tierra, cuando los cables de energía están colocados en configuración plana con una separación grande, el conductor paralelo debe estar entre los cables de energía como se muestra en la fig. 3.2, si no hay suficiente espacio entre los cables de energía para adoptar precisamente está posición, el conductor paralelo



debe colocarse aun lado de los cables de energía, por ejemplo, si los cables están en contacto en formación cerrada o en configuración trébol, el conductor paralelo debe colocarse junto a los cables de energía. En todos los casos, el conductor paralelo debe ser transpuesto a la mitad de cada sección del circuito a una posición idéntica al otro lado de la formación.

C4. Tensiones inducidas en pantallas

Los dos diagramas vectoriales para cada sección en conexión cruzada son:



Para figura 3.8 y figura 3.9 (Cap. 3) Para figura 3.11 y figura 3.12 (Cap. 3)

Figura C1 – Diagramas vectoriales para cada sección en conexión cruzada.

En ambos diagramas, el punto A corresponde a los puntos de conexión a tierra, en el primer diagrama la máxima tensión inducida se producirá en el punto B, y es de magnitud E , mientras que en el segundo diagrama la máxima tensión inducida tendrá lugar en el punto C y es de magnitud $\sqrt{3}/2 E$, entonces la reducción de tensión es $(1 - \sqrt{3}/2) 100\%$ o 13.4%.



Anexo D

Tensiones transitorias, requerimientos de tensiones en cubiertas protectoras

D.1 Sobretensiones en redes eléctricas

La elección del nivel de aislamiento del sistema de cables subterráneo y de las características de los LT's, dependen de la magnitud y forma de las sobretensiones que pueden producirse.

Estas sobretensiones pueden clasificarse en tres grupos:

- ✚ Sobretensiones temporales de baja frecuencia debidas a desequilibrios en las redes.
- ✚ Sobretensiones transitorias de alta frecuencias debidas a la operación de interruptores.
- ✚ Sobretensiones transitorias debidas a descargas eléctricas atmosféricas.

Los dos primeros grupos de sobretensiones son causadas por fenómenos que tienen su origen en el sistema mismo, y pueden agruparse bajo el nombre de sobretensiones de origen interno.

El tercer grupo de sobretensiones tienen su origen en fenómenos exteriores al sistema eléctrico y pueden llamarse sobretensiones de origen externo.

Sobretensiones temporales de baja frecuencia debidas a desequilibrios en las redes

La aparición de un cortocircuito en algún punto del sistema de cables, debido a una falla de aislamiento, produce un cambio en las corrientes y tensiones del sistema, que pasan de los valores que tenían antes del cortocircuito a nuevos valores determinados por el lugar de falla, el tipo de falla y sus características del sistema de cables. Este cambio va acompañado de un periodo transitorio de corta duración.

La magnitud de las sobretensiones de baja frecuencia depende del tipo de falla es decir, estas sobretensiones se producen a causa de fallas monofásicas o bifásicas a tierra o a la apertura de una o dos fases; la duración de estas sobretensiones es relativamente larga y éstas persistirán mientras no se hagan desaparecer las condiciones de desequilibrio que las han producido, es decir su duración dependerá del tiempo de liberación de la falla a tierra.

Los cortocircuitos monofásicos y bifásicos a tierra pueden producir sobretensiones a tierra en las fases no afectadas por el cortocircuito. En cambio los cortocircuitos trifásicos y bifásicos no producen sobretensiones a tierra debido a que no hay conexión a tierra en el punto donde ocurrió la falla, y por lo que no habrá flujo de corriente de secuencia cero. Por otro lado, las sobretensiones a tierra debidos a cortocircuitos bifásicos a tierra producen sobretensiones generalmente de menor magnitud que lo cortocircuitos monofásicos a tierra.



Sobretensiones transitorias de alta frecuencias debidas a la operación de interruptores

Son oscilaciones de alta frecuencia (de 400 a 3000 ciclos por segundo) que se amortiguan en un tiempo del orden de mil microsegundos, su amplitud de oscilación depende, entre otros factores, de la tensión de operación del sistema. En los casos más desfavorables, por ejemplo desconexión de transformadores o líneas de transmisión largas, la amplitud de la oscilación transitoria puede alcanzar valores del orden de tres veces y media de la tensión normal de operación, si no se toman las medidas necesarias para limitarla. El procedimiento más eficaz para limitar la amplitud de estas sobretensiones a valores de dos o dos y media veces la tensión de operación, es la inserción de LT's.

Sobretensiones transitorias debidas a descargas eléctricas atmosféricas

Las sobretensiones producidas por rayos son impulsos unidireccionales de muy corta duración (decenas de microsegundos) que alcanzan su valor de cresta en uno o dos microsegundos y decae a un valor de la mitad del valor de cresta en unos diez a cien microsegundos. El valor de cresta puede ser del orden de unos 100,000 A.

D1.1 Sobretensiones en pantallas

Como se menciona anteriormente, las sobretensiones transitorias que se presentan en los cables de energía se deben a fallas de aislamiento producidas por descargas parciales y a la interrupción o a la conexión de circuitos a la red. Las sobretensiones transitorias de alta frecuencia se presentan en las pantallas y son causadas por el paso de la corriente de falla, esta sobretensión que se presenta en las pantallas no es lo suficientemente importante en comparación con las sobretensiones que se pueden presentar en la cubierta de los cables o del aislamiento que interrumpe la pantalla en los empalmes, sin embargo, si la duración y magnitud de la sobretensión persiste, entonces está se debe de considerar para la correcta selección de los limitadores de sobretensión en pantalla (LT's). Como se vio en el capítulo 4, la correcta selección de la magnitud del LT's, es de interés practico, puesto que tiene una influencia sobre las longitudes de las secciones principales, por ejemplo para el caso de la conexión cruzada en secciones las longitudes de las secciones menores se podrían incrementar y esto tendrá un impacto en el costo debido a la disminución del número de secciones en el circuito.

La instalación de los cables de energía debe ser capaz de resistir con seguridad los efectos que se pueden presentar al ocurrir una falla en el sistema debido a factores externos en los cable (fallas producidas en líneas aéreas, torres de transmisión, fallas en la carga), una falla en el mismo implicara trabajos de reparación, pero si se daña la cubierta del cable debido a la falla, estos trabajos se les debe agregar la necesidad del cambio de cable; la conexión de pantallas debe evitar el daño en cascada que se puede presentar en otras partes del sistema de cables al presentarse una falla, ya que los LT's podrían dañarse, requiriendo inspección y posible reemplazo, los gradientes de tensión de pantalla debido a fallas de tipo externo son de tres tipos:

D1.1 Falla simétrica trifásicas

D1.2 Falla bifásica



D1.3 Falla monofásica a tierra

Sus ecuaciones están dadas en: D1.3.1, D1.3.2 y D1.3.3

Y en relación a estas ecuaciones, se asume lo siguiente:

- a) Se conoce la corriente de cortocircuito y su magnitud no se ve afectada por las características físicas del sistema de cables.
- b) Para fallas de tipo D1.2 y D1.3 la corriente de cortocircuito es superior en comparación con la corriente nominal del sistema, excepto para el caso de la conexión del neutro a través de una impedancia.
- c) Ningún otro conductor paralelo esta presente (excepto el conductor paralelo de tierra para el caso de fallas del tipo D1.3 en sistemas conectados en un solo punto).
- d) El sistema consta de secciones menores y mayores balanceadas en el caso de conexión cruzada en secciones, y un número de secciones menores iguales, exactamente divisibles entre tres en el caso de conexión cruzada continua. (Para propósitos de diseño, es deseable utilizar estas ecuaciones simplificadas también en la práctica donde normalmente los sistemas son desbalanceados debido a los requerimientos de espacio).

D1.2 Conexiones del neutro a tierra

Para fallas del tipo D1.1 y D1.2 no hay flujo de corriente de secuencia cero, las ecuaciones dadas en D1.3 para fallas de este tipo son igualmente aplicables a sistemas que tienen el neutro conectado directamente a tierra, o a sistemas que tienen el neutro conectado a través de una impedancia o resonancia.

Para fallas del tipo D1.3 en sistemas que tienen el neutro conectado a través de una impedancia o resonancia, las corrientes nominales de carga en el sistema son muy importantes, el cálculo de tensiones en pantalla durante una falla monofásica a tierra, requiere por lo tanto la superposición de las tensiones debidas a las corrientes de carga de secuencia positiva causadas por la corriente de cortocircuito. Las tensiones producidas por las corrientes de falla también se pueden calcular considerando una corriente de falla asimétrica, mediante la superposición de un sistema de secuencia positivo asimétrico y uno de secuencia cero con corrientes de la misma magnitud, la superposición de estas corrientes da como resultado dos corrientes de igual magnitud pero defasadas 60° y estas circulan a través de las fases donde no ocurrió la falla, mientras que la fase donde se presentó la falla permanece sin corriente. El resultado de las tensiones en pantalla debido a estas corrientes se pueden calcular a partir de las siguientes ecuaciones, sin embargo, en general, para sistemas que tienen el neutro conectado a través de una impedancia o resonancia, las tensiones en pantallas, resultado de fallas del tipo D1.3 serán mucho menores que las debidas a fallas del tipo D1.1 y D1.2, y por lo tanto, para fines de diseño, las tensiones en pantallas producidas por fallas del tipo D1.3 en estos sistemas pueden considerarse como despreciables.



D1.3 Conexión en un solo punto**D1.3.1 Falla trifásica**

Los gradientes de tensión en pantalla se indican en el Anexo C, C2, tomando en cuenta que debe conocerse el valor de la corriente.

D1.3.2 Falla de bifásica

Para cualquier configuración de cables, suponiendo una falla entre las fases a y b sin flujo de corriente a tierra, cuando I es la corriente de falla, los gradientes de tensión en pantalla son:

$$E_a = j\omega I_{ab} (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{ab}}{d} \quad \text{V/m} \quad (\text{D1})$$

$$E_b = j\omega I_{ab} (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{ab}}{d} \quad \text{V/m} \quad (\text{D2})$$

$$E_c = j\omega I_{ab} (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{S_{bc}}{S_{ac}} \quad \text{V/m} \quad (\text{D3})$$

D1.3.3 Falla monofásica a tierra (Con neutro conectado directamente a tierra)

Para calcular de forma precisa las sobretensiones en pantalla cuando se presenta una falla a tierra, es necesario conocer muy bien la trayectoria del regreso de las corrientes de falla que fluyen por el sistema de tierras, así como el regreso de las corrientes que fluyen por el conductor paralelo de tierra, esto depende de una serie de factores, los cuales no son muy conocidos. Afortunadamente, sin embargo, las sobretensiones de interés prácticos son las que se presentan entre las pantallas y el conductor paralelo de tierra, y estas se pueden calcular suponiendo que éste conductor lleva toda la corriente de falla.

Para una falla a tierra en la fase a, y en el caso general de cualquier configuración del cable, cuando I_{ag} es la corriente de falla, las tensiones en pantalla del conductor a tierra son:

$$E_a = I_{ag} \left[R_g + j\omega (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{2S_{ag}^2}{dr_g} \right] \text{V/m} \quad (\text{D4})$$

$$E_b = I_{ag} \left[R_g + j\omega (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{S_{ag} S_{bg}}{r_g S_{ab}} \right] \text{V/m} \quad (\text{D5})$$

$$E_c = I_{ag} \left[R_g + j\omega (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{S_{ag} S_{cg}}{r_g S_{ac}} \right] \text{V/m} \quad (\text{D6})$$



Donde

S_{ag}, S_{bg}, S_{cg} : es la separación media geométrica entre cables a b y c respectivamente, y el conductor de tierra.

R_g : es la resistencia del conductor de tierra en [Ω/m]

rg : es el radio medio geométrico del conductor de tierra, en [mm] (para conductores cableados multiplicar el radio exterior por 0.75)

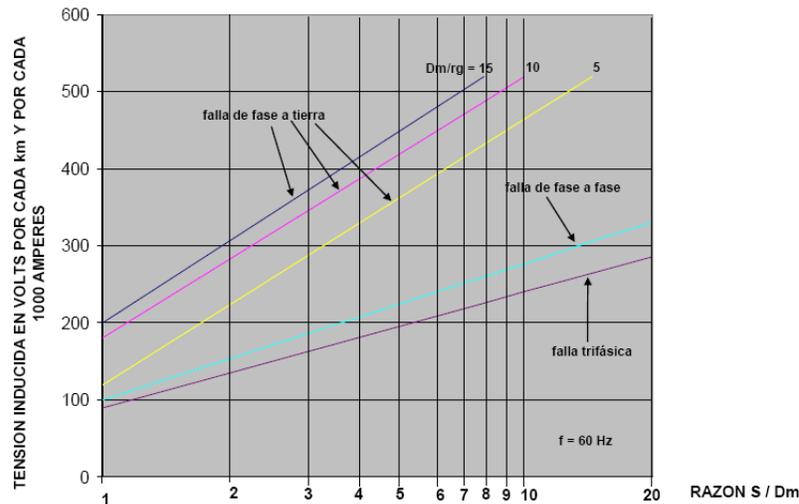


Fig.D1- Tensión inducida en la pantallas metálicas de cables de energía (de pantalla a conductor de tierra) para varios tipos de fallas, en sistemas con las pantallas aterrizadas en un solo punto (Cables en configuración plana).

D1.3.4 Magnitud de tensiones

Los típicos valores máximos de tensiones en pantallas calculados a partir de estas ecuaciones se muestran en la figura D1, para un circuito en configuración plana, con una corriente de 1000A, teniendo un conductor a tierra transpuesto. Para una falla simétrica trifásica, la máxima tensión es alcanzada en el exterior de los cables y es la misma que en la gráfica 2.1 del cap.2 de este documento, pero incrementada para corrientes más altas; para la falla bifásica, la máxima tensión en la pantalla se produce cuando la falla esta entre el exterior de los cables así que $S_{ac} = 2S$, y para el caso de una de falla a tierra se supone que el conductor de tierra se debe establecer como se muestra en la figura 3.2 del cap.3 de este documento.

$$S_{ag} = S_{cg} = S$$

$$S_{bg} = 0.7S \quad (D7)$$

Las tensiones más altas de las tres pantallas para la falla a tierra se presentan en la pantalla de la fase a, y por lo tanto, el efecto de R_g se puede despreciar, y la ecuación anterior E_a puede ser expresada como:



$$E_a = j\omega\omega_{ag} (2 \times 10^{-7}) \log_e \left[\left(\frac{S}{d} \right)^2 \frac{d}{r_g} \right] \text{V/m} \quad (\text{D8})$$

La figura D1 muestra el efecto de variación Dm/r_g sobre un rango de valores típicos, es claro que las sobretensiones por metro debido a fallas monofásicas son mucho mayores que para otros tipos de fallas en sistemas que tienen el neutro conectado directamente a tierra. Para sistemas que tienen el neutro conectado a través de una impedancia o resonancia a tierra, la falla bifásica es la más importante.

D1.4 Conexión cruzada

D1.4.1 Falla simétrica trifásica

Los gradientes de tensión en la pantalla están dados en el anexo C, C2.3, ecs C9, C10 y C11 con los apropiados valores de I y utilizando la longitud más larga de la sección menor para el caso de conexión cruzada en secciones o conexión cruzada continua.

D1.4.2 Falla bifásica

Suponiendo que el sistema se encuentra en condición equilibrada en relación a las tensiones inducidas en pantallas, entonces no habrá flujo de corriente en pantalla debido a que no existe conexión a tierra, y los gradientes de tensión en pantalla en los puntos de conexión cruzada son dados por las ecuaciones D1.3.2, utilizando la longitud más larga de la sección menor en el caso de conexión cruzada en secciones o conexión cruzada continua.

D1.4.3 Falla monofásica a tierra

En este caso, el regreso de la corriente de falla se divide entre las pantallas y tierra, y el cálculo de las tensiones en pantalla es más complicado, los efectos de las corrientes de tierra son importantes en relación con las tensiones entre pantallas y tierra, y para calcular éstas es necesario conocer los valores de resistividad del terreno y la resistencia apropiada del sistema de tierras del circuito. Las tensiones entre pantallas pueden ser calculadas como sigue para un sistema en conexión cruzada en secciones (El comportamiento de los cables en conexión cruzada continua durante fallas de este tipo todavía se están estudiando).

D1.4.3.1 Cables en configuración trébol

La figura D2 muestra la trayectoria de la corriente de cortocircuito para una falla monofásica a tierra en un sistema con conexión cruzada para una sola sección mayor para cables en configuración trébol que tienen las pantallas conectadas a tierra en ambos extremos.



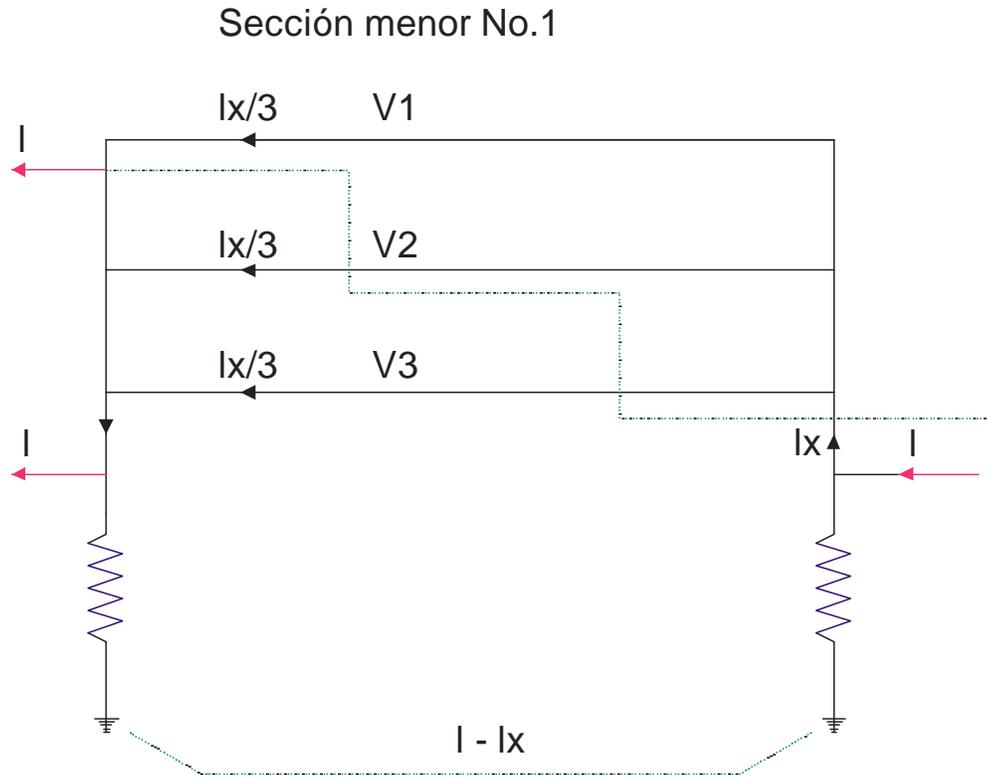


Figura D2 – Trayectoria de las corrientes de cortocircuito en conexión cruzada durante una falla monofásica a tierra.

Una corriente I_x circula en la trayectoria formada por las tres pantallas y tierra, y se divide igualmente entre los tres circuitos de la pantalla.

Las tensiones inducidas en las tres pantallas de la figura D2, para la sección menor N° 1 son las siguientes:

$$E_a = \frac{I_x}{3}(Z_{ss} + 2Z_{sg}) - I(Z_{ss} - R_s) \quad \text{V/m}$$

$$E_b = \frac{I_x}{3}(Z_{ss} + 2Z_{sg}) - IZ_{sg} \quad \text{V/m}$$

$$E_c = E_b \quad \text{V/m}$$

Donde

I es la corriente de falla que se muestra en la figura D2

Las tensiones entre pantallas en los puntos de conexión cruzada son entonces:

$$V_{ab} = I l (Z_{sg} - Z_{ss} + R_s) \quad \text{V}$$



$$V_{bc} = 0 \text{ V}$$

$$V_{ac} = I (Z_{sg} - Z_{ss} + R_s) \text{ V}$$

Donde

Z_{ss} es la impedancia propia de la pantalla de regreso a tierra en Ω/m , por definición:

$$j\omega (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2}{d} \right)$$

Donde

Z_{ag} es la impedancia mutua de la pantalla con regreso a tierra en Ω/m

R_s es la resistencia de la pantalla en Ω/m

L es la longitud de sección menor en m

Estas impedancias son funciones de la frecuencia y de la resistividad de la tierra pero en estas ecuaciones este factor desaparece y

$$V_{ab} = j\omega I l (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V}$$

$$V_{bc} = 0 \text{ V}$$

$$V_{ac} = -V_{ab} \text{ V}$$

D1.4.3.2 Cables en configuración plana

Cuando los cables se colocan en configuración plana, la corriente I no se divide equitativamente entre las pantallas, pero se puede suponer que va tener menor error. Asumiendo también que las resistencias del sistema de tierra son cero

$$I_x = I \left(\frac{3Z_{ss} - 3R_s + 2Z_{oog} + 4z_{oig}}{3Z_{ss} + 2Z_{oog} + 4z_{oig}} \right) \text{ A}$$

Donde

Z_{oog} es la impedancia mutua entre pantallas de cables externos con regreso a tierra en Ω/m

$$j\omega (2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{1}{2S}$$



Z_{oig} es la impedancia mutua entre pantallas de cables internos (cámaras, ductos) y externos (líneas de gas, de ferrocarriles, de comunicación) con regreso a tierra en Ω/m .

$$j\omega(2 \times 10^{-7}) \log_e \frac{1}{S}$$

Entonces las tensiones en las tres pantallas son:

$$E_a = \left[\frac{I_x}{3} (Z_s + Z_{oog} + Z_{oig}) - I(Z_s - R_s) \right] \text{ V/m}$$

$$E_b = \frac{I_x}{3} (Z_s - 2Z_{oig}) - IZ_{oig} \text{ V/m}$$

$$E_c = \frac{I_x}{3} (Z_{ss} + Z_{oog} + Z_{oig}) - IZ_{oog} \text{ V/m}$$

$$V_{ab} = l \left[\frac{I_x}{3} (Z_{oog} - Z_{oig}) + I(Z_{oig} - Z_{ss} + R_s) \right] \text{ V}$$

$$V_{bc} = l \left[\frac{I_x}{3} (Z_{oig} - Z_{oog}) + I(Z_{oog} - Z_{oig}) \right] \text{ V}$$

$$V_{ac} = l [I(Z_{ss} - R_s - Z_{oog})] \text{ V}$$

y sustituyendo I en las ecuaciones V_{ab} , V_{bc} se tiene:

$$V_{ab} = \frac{Il}{3} [(Z_{oog} + 2Z_{oig} - 3Z_{ss} + 3R_s F)] \text{ V}$$

$$V_{bc} = \frac{Il}{3} [2(Z_{oog} - Z_{oig}) + 3R_s F] \text{ V}$$

Donde

$$F = \frac{(Z_{oig} - Z_{oog})}{3Z_{ss} + 2Z_{oog} + 4Z_{oig}}$$

y todos los términos que contienen R_s pueden ser omitidos, y por lo tanto se tienen las tensiones entre pantallas para cables en configuración plana:



$$V_{ab} = j\omega \Pi (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2(2)^{\frac{1}{3}} S}{d} \right) \text{ V}$$

$$V_{bc} = j\omega \Pi (2 \times 10^{-7}) \log_e (2) \text{ V}$$

$$V_{ac} = j\omega \Pi (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{4S}{d} \right) \text{ V}$$

D1.4.4 Magnitud de tensiones

La figura D3 muestra las tensiones entre pantallas en sistemas en conexión cruzada en secciones por cada metro de longitud de la sección menor calculada de las ecuaciones anteriores para fallas monofásicas y comparadas con las tensiones debidas a fallas simétricas trifásicas y para fallas bifásicas con corrientes de cortocircuito de 1000A. Como se puede ver en la figura D3 la tensión inducida debido a la falla bifásica es la más grande.

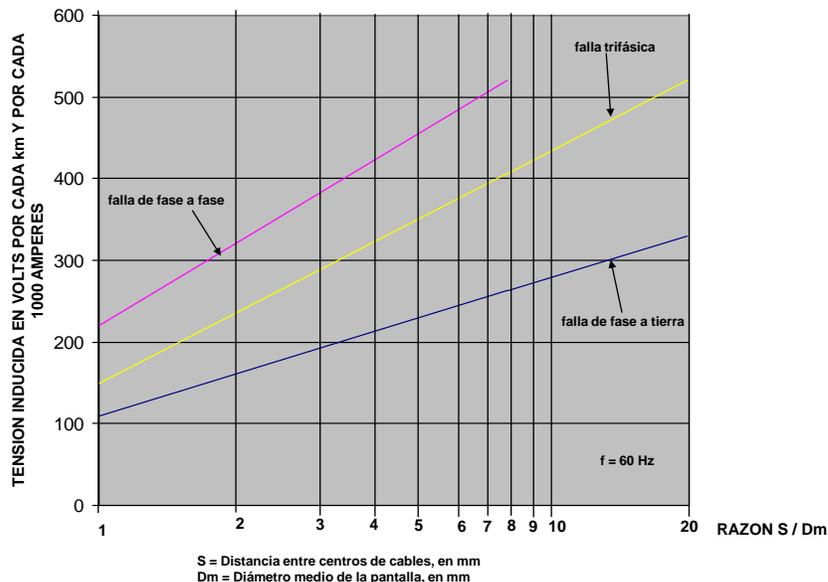


Figura D3 - Tensión inducida en pantallas metálicas (de pantalla a pantalla) para varios tipos de fallas, en sistemas de cables con conexión cruzada en secciones (cables en configuración plana).

El LT's, consisten de un dispositivo que esta generalmente conectado en estrella y su neutro deberá ser aterrizado a una tierra local o al neutro de la subestación. La resistencia del sistema de tierras local es a menudo alta pero cuando se presenta una falla monofásica a tierra, la corriente de falla fluirá por dicho sistema. El cálculo de estas corrientes, de las tensiones entre las pantallas y el sistema de tierras es complicado y requiere conocimientos de la resistencia del sistema de tierra y la resistividad del terreno a



lo largo de la ruta del cable. Estos valores generalmente no son conocidos especialmente en la etapa de diseño, y por lo tanto es común considerar la función del LT's solamente en términos de la sobretensión entre pantallas. La experiencia y las mediciones indican que el aumento de la tensión de la pantalla a tierra, generalmente no es suficiente para dañar al LT's, pero, cuando existe cualquier duda, el punto de la estrella no se debe aterrizar, cuando esto es permitido, con respecto a sobretensiones transitorias, por lo que se deberá optar por la conexión en delta



GLOSARIO GENERAL DE CABLES

Cables eléctricos

- ☞ **Conductor desnudo:** Conductor de metal en el que el alambre o alambres no están recubiertos con un metal adicional.
- ☞ **Conductor aislado:** Conjunto formado por un conductor con su propio aislamiento (y pantallas si tuviera), y que tiene un nivel de aislamiento igual o superior a la tensión de utilización del circuito.
- ☞ **Conductor estañado:** Conductor recubierto por una capa metálica de estaño.
- ☞ **Conductor circular con capas concéntricas:** Conductor cableado en el que los alambres individuales están agrupados en forma helicoidal, en una o más capas concéntricas distintas y generalmente con un cableado alterno.
- ☞ **Conductor sectorial:** Conductor perfilado cuya sección transversal se aproxima a un sector de un círculo.
- ☞ **Conductor compacto:** Conductor cableado en el que los espacios entre los alambres han sido reducidos por compresión mecánica o por diseño o por una acción que se induce a la forma y disposición de los alambres.
- ☞ **Conductor segmentado:** Conductor cableado formado por un conjunto de cables perfilados, ligeramente aislados uno de otro.
- ☞ **Conductor hueco:** Conductor fabricado de manera tal que tenga un canal central.
- ☞ **Conductor de tierra o Conductor de puesta a tierra:** Conductor de baja impedancia que provee una conexión eléctrica entre un punto dado del equipo (o instalación o sistema) y un electrodo de tierra.
- ☞ **Conductor de tierra no aislado:** Conductor desnudo protegido, si así se requiere, de la corrosión, en contacto directo con el suelo, con la finalidad de asegurar la puesta a tierra a lo largo de la instalación. El conductor de tierra no aislado puede comportarse como un conductor de tierra y/o de un electrodo de tierra.
- ☞ **Conductor independiente paralelo:** Conductor separado o cable de un solo conductor colocado en paralelo a un cable o circuito de un cable y a si mismo forma parte de un circuito cerrado en el que las corrientes inducidas podrían fluir y cuyo campo magnético se opondrá al campo generado por la corriente en el cable(s).



Aislamientos

- ☞ **Aislamiento de un cable:** Materiales aislantes incorporados a un cable con la función específica de soportar tensión. Permite aislar un conductor de los otros conductores o de partes conductoras a tierra.
- ☞ **Aislamiento del conductor:** Aislamiento aplicado sobre un conductor o pantalla de un conductor.
- ☞ **Aislamiento encintado:** Aislamiento consistente en cintas aplicadas en forma helicoidal en capas concéntricas.
- ☞ **Aislamiento de papel impregnado:** Aislamiento en el que las cintas de papel son impregnadas antes del encintado.
- ☞ **Aislamiento extruido:** Aislamiento que consiste generalmente en una capa de un material termoplástico o termoindurente y se aplica mediante un proceso de extrusión.
- ☞ **Aislamiento termoplástico:** Aislamiento hecho con un plástico capaz de ser ablandado repetidamente por calentamiento y endurecido por enfriamiento por medio de un rango de temperatura característica del plástico, y en estado ablandado, capaz de ser repetidamente perfilado por extrusión.
- ☞ **Aislamiento termofijo:** Aislamiento formado por un plástico que, cuando se cura al calor o por otros medios, tales como la radiación, catálisis, etc., prácticamente se convierte en un producto infusible e insoluble.
- ☞ **Aislamiento (de tipo calcetín) para empalme:** Aislamiento externo (de tipo calcetín) aplicado al empalme metálico para una conexión especial de cable.
- ☞ **EPR:** Cable de energía para alta tensión con aislamiento extruido a base de Etileno-Propileno.
- ☞ **XLPE (Cross-Linked-Polyethylene):** Cable de energía para alta tensión con aislamiento extruido. Polietileno de cadena cruzada.

Pantallas eléctricas y pantallas de protección

- ☞ **Hilo a tierra:** Alambre sin aislar puesto en contacto con una pantalla o cubierta metálica.
- ☞ **Pantalla:** Este término es utilizado en este documento para describir la pantalla metálica (no magnética) de los cables subterráneos de A.T, y tienen la función de controlar el campo magnético al interior del aislamiento. También podría



proporcionar superficies uniformes en los límites del aislamiento y favorecer la eliminación de espacios en estos límites. Las pantallas metálicas de los cables son mencionadas en este documento, incluidos varios tipos de pantallas no magnéticas fabricadas de cobre, aluminio y plomo, que forman cintas o cuerdas colocadas helicoidal o longitudinalmente (o varias combinaciones de ambas).

Cubiertas (Revestimientos)

- ☞ **Armadura:** Revestimiento formado por una cinta(s) metálicas o alambres de sección circular o rectangular colocadas sobre un cable, generalmente utilizadas para protegerlo de efectos mecánicos externos.
- ☞ **Blindaje:** Son cintas, tiras o alambres, generalmente metálicos aplicados sobre una cubierta para serla capaz de soportar las tensiones mecánicas generalmente causadas por la presión interna.
- ☞ **Cubierta exterior:** Cubierta no metálica aplicada sobre un revestimiento metálico, asegurando la protección del cable desde afuera. Pueden ser láminas, trenzas, armaduras, conductores concéntricos puestos a tierra cuyas funciones son servir como pantallas de protección mecánicas.
- ☞ **Cubiertas elastoméricas:** Cubiertas hechas a base se polímeros elásticos y parecida al caucho natural.

Cables

- ☞ **Cable con presión interna de gas:** Cable con presión en el que el fluido presurizante es un gas en contacto con el aislamiento: podría ser un cable en tubo o un cable con presión bajo cubierta metálica, ejemplos de estos son los siguientes:
- ✚ **HPGF (High Pressure Gas Filled):** Son cables aislados con cintas de papel impregnado en aceite dentro de un tubo de acero con aceite a alta presión.
- ✚ **LPOF (Low Pressure oil Filled):** Son cables con las mismas características que HPGF pero a baja presión.
- ☞ **Cable de control:** cable multipolar para la transmisión de control, señal de medición e indicación de las instalaciones eléctricas.

Accesorios para cables

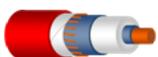
- ☞ **Empalme:** Accesorio que conecta dos cables de manera tal que forme un circuito cerrado.



- ☞ **Empalme con interrupción de pantalla:** Empalme en el cual la pantalla metálica y la cubierta están eléctricamente separadas (interrumpidas). La interrupción en la cubierta del empalme comienza en el aislamiento de la pantalla seccionada.
- ☞ **Empalme elástico:** Empalme prefabricado que se expande y autocontrae por elasticidad después de colocarlo en dos cables que serán conectados.
- ☞ **Empalme encintado:** Conexión en la que el aislamiento se realiza mediante capas de papel impregnado.
- ☞ **Capuchón de protección:** Dispositivo aislante que se coloca en el extremo no conectado de un cable energizado.
- ☞ **Conector separable enchufable:** Conector separable en el que el contacto eléctrico se realiza por medio de un dispositivo deslizante. También se puede realizar el contacto mediante un tornillo.
- ☞ **Terminal de cable:** Dispositivo adaptado en el extremo de un cable para asegurar la conexión eléctrica con otras partes del sistema y para mantener el aislamiento hasta el punto de conexión.
- ☞ **Terminal retráctil:** Terminal prefabricado diseñado para encogerse en el extremo de un cable preparado.
- ☞ **Terminal elástica:** Terminal prefabricado expandible y retráctil por elasticidad después de aplicarlo a un extremo de un cable preparado.

Instalación de cables

- ☞ **Configuración plana:** Tres cables puestos en forma plana con espacios iguales entre cada uno de los cables adyacentes (en forma paralela).
- ☞ **Transposición de los cables asilados:**
 - a) **En relación a cables de energía:** La práctica de colocar cables de un solo conductor de manera tal que cada fase ocupe sucesivamente, en tramos del circuito aproximadamente iguales, cada posición geométrica en la formación del cableado.
 - b) **En relación al conductor paralelo a tierra:** La práctica de colocar un conductor paralelo a tierra a un costado, a lo largo de una sección elemental (sección menor) sin transposición de manera tal, en relación al plano de simetría de colocación de los cables, el conductor sobre la mitad del largo de la sección ocupe una posición simétricamente opuesta.
- ☞ **Sección mayor:** Una combinación de secciones menores entre las terminales sólidamente aterrizadas.



- ☞ **Sección menor:** Longitud del sistema de cables entre las puntos de interrupción de la pantalla o entre las mismas y las terminales.
- ☞ **Sección mayor uniforme:** Una sección mayor consistente en tres secciones menores similares equidistantes entre si.
- ☞ **Trébol:** Formación de tres cables colocados triangularmente mutuamente equidistantes. Vistos transversalmente, las líneas que unen los centros de los cables forman un triángulo equilátero.

Conexiones de pantalla

- ☞ **Circuito de cables con pantallas aisladas::** Sistema de cables en el cual la pantalla de protección de cada cable se encuentra aislada individualmente en su totalidad excepto donde sea necesaria la puesta a tierra o donde se hagan conexiones entre pantallas.
- ☞ **Conexión especiales de pantalla:** Método de conexión y puestas a tierra de pantallas de cables de un solo conductor de manera tal que se minimice las corrientes circulantes a través de la pantalla resultado de la inducción de corriente del conductor.
- ☞ **Conexión directa o sólida:** Conexión entre pantallas de una impedancia prácticamente mínima.
- ☞ **Conexión en un solo punto:** Una forma especial de conexión en la cual las tres pantallas de los cables de la sección menor se conectan entre si sólidamente y son posteriormente conectadas a tierra en un sólo punto. Para sistemas de cables muy largos este procedimiento puede ser repetido cuantas veces sea necesario.
- ☞ **Conexión cruzada:** Una forma especial de conexión en la cual las pantallas de los cables están conectadas de forma cruzada en secciones menores consecutivas, de manera que cada circuito de pantalla continua rodee los conductores de las tres fases consecutivas.
- ☞ **Conexión cruzada en secciones:** Forma de conexión cruzada en la cual las tres secciones menores consecutivas se toman para formar una sola sección “llamada sección mayor”. Las tres pantallas se conectan sólidamente en ambos extremos de la sección mayor y podrían ponerse a tierra en estos puntos. En las dos posiciones intermedias, los cables generalmente se transponen y las pantallas se interconectan de manera tal, que cada circuito de pantalla continua hacia la sección mayor ocupe la misma posición geométrica en la posición del cable. Para instalaciones muy largas de cables podría haber varias secciones mayores.



- ☞ **Conexión cruzada continua:** Forma de conexión cruzada aplicable a circuitos formados de al menos cuatro secciones en el que las pantallas están en conexión cruzada sucesivamente y los cables generalmente se transponen en cada empalme entre las secciones mayores adyacentes a lo largo de la ruta del cable. En cada extremo de esta ruta, las pantallas se conectan sólidamente y se ponen a tierra.
- ☞ **Conexión de pantallas/aterrizaje de pantallas en puntos múltiples:** Las tres pantallas están unidas y conectadas a tierra en los extremos, primordialmente en puntos adicionales a lo largo de la ruta. Las tensiones inducidas en las pantallas se reducen considerablemente, pero inducen corrientes circulantes en la pantalla generando calor y reduciendo el desempeño de la misma.
- ☞ **Conexión sólida a tierra:** Se refiere a una conexión sólida entre la pantalla y tierra.
- ☞ **Múltiples conexiones en un solo punto:** Forma especial de conexión en la cual las tres pantallas de los cables son unidas sólidamente y conectadas a tierra mediante el conductor paralelo de tierra; en un extremo de la sección y conectado a su vez a través de limitadores de tensión en el otro extremo de esta manera se realizara en diversas ubicaciones a lo largo del sistema.
- ☞ **Sección elemental:** Longitud del sistema de cables entre cualquier par adyacente de los siguientes elementos: empalmes con interrupción de pantalla, conexiones entre pantallas y terminales.
- ☞ **Tensión de pantalla en régimen permanente:** Tensión a tierra que aparece en la pantalla de un cable en conexión especial cuando se equilibran las corrientes de carga completa que fluyen en los conductores del cable, generalmente se consideran los puntos a lo largo del cable con máximo valor nominal (es decir, el extremo no puesto a tierra de una sección menor en el caso de la conexión a tierra en un solo punto y en punto de cruce para la conexión cruzada). Cuando las tensiones son diferentes en las tres fases, generalmente se toma en cuenta el valor más alto.

Accesorio para conexión de pantallas

- ☞ **Aislamiento de manguito del empalme:** Aislamiento externo que se aplica al manguito del empalme metálico de un cable conectado de manera especial.
- ☞ **Caja de conexiones (para circuitos con pantallas aisladas):** Caja en la cual las conexiones de enlace y/o conexiones a tierra se realizan mediante enlaces desmontables, y que también podrían contener de sobretensiones en pantalla.
- ☞ **Conductor de tierra paralelo:** Un conductor colocado paralelamente a lo largo de la ruta del cable para conexión cruzada o en un solo punto, que provee una conexión metálica a tierra continua y de baja impedancia entre los sistemas de puesta a tierra en los extremos de la ruta del cable.



- ☞ **Conductor de conexión de pantalla:** Conductor aislado que hace la conexión entre la pantalla del cable o del manguito de empalme y un enlace en la caja de conexiones.
 - ☞ **Cono de alivios:** Dispositivo en forma de cono que incrementa el diámetro de la pantalla de aislamiento de un cable de A.T, con el propósito de mantener la tensión eléctrica de una conexión o una terminal dentro de los límites de diseño establecidos.
 - ☞ **Conector de pantalla:** Dispositivo utilizado para conectar a la pantalla o cubierta de un cable con la finalidad de continuidad o de poner a tierra.
 - ☞ **Conexión del cable de tierra:** El conductor aislado forma la conexión entre la pantalla de un cable enterrado o no enterrado o empalme y una conexión en las cajas de conexión
- NOTA: en instalaciones donde no son necesarias las cajas de conexión, la conexión del cable de tierra es la conexión formada entre el conductor aislado y cualquiera de los siguientes componentes del sistema, pantalla, empalme, bus de tierra y varilla de tierra.
- ☞ **Limitadores de sobretensión de pantalla (LT's):** Dispositivo conectado a la pantalla(s) de los cables en conexión especial con la finalidad de limitar las sobretensiones en las pantallas por transitorios.
 - ☞ **Manguito (de cables):** Dispositivo metálico que conecta dos tramos consecutivos de un conductor.

Diversos

- ☞ **Bobina de cable:** Cilindro con bridas en las que se enrolla el cable durante su fabricación, para almacenamiento, transporte e instalación.
- ☞ **Cloruro de polivinilo:** Adicionado con estabilizantes, lubricantes, pigmentos, colorantes y eventuales cargas puede trabajar como estampado, y extrusión. Se utiliza en cables subterráneos como medio de protección.
- ☞ **Dipolo eléctrico:** Es un sistema de dos cargas de signo opuesto e igual magnitud cercanas entre sí. Los dipolos aparecen en cuerpos aislantes o dieléctricos. A diferencia de lo que ocurre en los materiales conductores, en los aislantes los electrones no son libres. Al aplicar un campo eléctrico a un material dieléctrico este se polariza dando lugar a que los dipolos eléctricos se reorienten en la dirección del campo disminuyendo la intensidad de éste.



- ☞ **Electrólisis:** Método por el cual se puede producir reacciones de oxidación-reducción en una solución electrolítica o en sales fundidas utilizando energía eléctrica.
- ☞ **Enlaces removibles:** accesorios que se encuentran dentro de la caja de conexiones, estos enlaces sirven para poder realizar pruebas a la cubierta de los cables de energía.
- ☞ **Epoxy:** Tipo de aislamiento utilizado en dispositivos de conexión de pantallas.
- ☞ **Frecuencia en cables de AT:** La frecuencia de operación de los sistemas de cables de ac. Ejemplos en este documento asumen sistemas a un valor de 60Hz. De cualquier manera los principios básicos presentados en este documento pueden ser fácilmente aplicados a sistemas operando a valores de 50Hz.
- ☞ **Hermetismo:** Propiedad característica de los recipientes o tuberías perfectamente cerrados, que no permite la entrada o escape de un fluido.
- ☞ **Llave en mano:** es la realización del proyecto de instalación de cable subterráneo que va desde el diseño de la instalación, el suministro de materiales hasta el montaje y la aplicación de pruebas al sistema ya instalado.
- ☞ **Nivel freático:** También conocido como manto freático, son las aguas subterráneas que existen en el planeta, son corrientes de aguas dulces, y por lo general nunca se encuentran a la misma profundidad debido a las fuentes de agua terrestre, estaciones del año y al nivel del mar.
- ☞ **Polietileno:** Resina termoplástica obtenida por polimeración del etileno. Es una resina incolora, translúcida similar a la parafina pero de propiedades un tanto diferentes por su magnitud molecular mucho mayor. Por sus buenas propiedades y bajo coste, tiene muchas aplicaciones en muchos sectores, por ejemplo en la industria eléctrica se utiliza como aislante (cables coaxiales y submarinos).
- ☞ **Profundidad de instalación:** Distancia entre la superficie superior de un cable directamente enterrado o un conducto aprobado para el uso y el nivel suelo o del piso terminado.
- ☞ **Puesta a tierra:** conexión física al terreno natural, intencionalmente, a través de una conexión o conexiones con impedancia suficientemente baja y capacidad de conducción de corriente eléctrica, que prevengan la formación de tensiones eléctricas peligrosas para las personas o los equipos conectados.
- ☞ **Zona de trabajo:** lugar donde se desarrolla el mantenimiento en las instalaciones eléctricas por uno o más trabajadores. Sus límites serán fijados por el jefe de trabajo.



CAPÍTULO I

- (1) “Historia de los cables de energía aislados para alta tensión en México”, Ing. Armando Ríos Cosío, Constructora Electromecánica S.A de C.V,2004.
- (2) “Sistemas de cables de potencia para A.T. en México a partir de 1975 evolución y tendencias”, Viakon Conductores Monterrey, 2004.
- (3) “Manual técnico de cables de energía”, Generalidades, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (4) “Manual técnico de cables de energía”, Sección I Capitulo 3, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (5) “Características de cables de energía de media y alta tensión”, Características eléctricas, Grupo Condumex.
- (6) “Metallic Sheaths for HV XLPE Insulated Cable”, FORTE Power System, Technical Information # 1, A South wire Company 2005.
- (7) “Manual técnico de cables de energía”, Sección 3 Capitulo 9, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (8) “60-500kV High Voltage Underground Power Cable”, XLPE Insulated Cable, Nexans France 2004.
- (9) “Manual técnico de cables de energía”, Sección 2 Capitulo 6, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (10) “Manual técnico de cables de energía”, Sección 3 Capitulo 10, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (11) “Serie Temas Selectos sobre Cables de Energía”, Ing. Armando Ríos Cosío, Constructora Electromecánica S.A de C.V,2007.
- (12) “CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP”, Diseño y Proyecto Alta Tensión, Pp.: 13-16 .

CAPÍTULO II

- (1) “Manual técnico de cables de energía”, Sección 3 Capitulo 12, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (2) “CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP”, Diseño y Proyecto Alta Tensión.
- (3) “Single Core Cable Screen Bonding”, Mitton Consulting Limited
- (4) “Manual técnico de cables de energía”, Sección 2 Capitulo 6, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (5) “Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System”, General Cable, ICAT Barcelona (SPAIN), 2005.



CAPÍTULO III

- (1) “Notas sobre conexión de pantallas de cables de energía”, Ing. Armando Ríos Cossío. S.A de C.V, 2004.
- (2) “Video PIRELLI, Empalmes ”, Video No 11, PIRELLI CABLES Y SISTEMAS
- (3) “60-500kV High Voltages Underground Power Cables XLPE Insulated Cables”, Nexans France.
- (4) “Evaluación en línea de la condición de sistemas de cables aislados para transmisión y distribución (5-345kV) ”, Cable Wise Service, DTE Energy Technologies, COEMSA.
- (5) “Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System”, General Cable, ICAT Barcelona (SPAIN), 2005.
- (6) “The Effect Of Earthing Of Cable Sheaths On Fault Current Distribution”, Neil McDonagh ESB International, Ireland, 2004.
- (7) “CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP”, Diseño y Proyecto Alta Tensión.
- (8) “Sheath Bonding Transformer”, Herman Halperin & Kenneth W Miller, Chicago, III, Application March 27, 1936, Serial No. 71,136.
- (9) “Single Core Cable Screen Bonding”, Mitton Consulting Limited.

CAPÍTULO IV

- (1) “Manual técnico de cables de energía”, Sección 4 Capitulo 14, 3ra edición, Grupo Condumex.
- (2) “CFE, Normas de Distribución-Construcción-Líneas Subterráneas, CFE-AT-CTDP”, Diseño y Proyecto Alta Tensión.
- (3) “Accesorios para cables de media tensión”, Cuaderno técnico No. 5, Primer Trimestre 2001, PIRELLI CABLES Y SISTEMAS, S.A.
- (4) “Características de cables de energía de media y alta tensión”, Características eléctricas, Grupo Condumex.
- (5) “Redes eléctricas”, Jacinto Viqueira Landa, UNAM, Tomo II, Capitulo 6, Primera edición por la Facultad de Ingeniería, 2004.
- (6) “Pararrayos”, Programa de productos, ABB Suiza S.A.,High Voltage Products
- (7) SPAR GAP. BUSCAR.
- (8) “Lightning equipotential bonding”, Spark Gap, DEHN, 2006.
- (9) “Connection Of Earthing Circuits in High Voltages System”, General Cable, ICAT Barcelona (SPAIN), 2005.
- (10) “Link Boxes Cross Bonding and Sectionalisation For High-Voltage Cable System”, Tyco Electronics Energy Division.
- (11) “Estándares de protección “IP” y “NEMA”, TEC ELECTRÓNICA, S.A DE C.V., Filial del grupo TOSHIBA TEC CORPORATION.



- (12) “Serie Temas Selectos sobre Cables de Energía”, Ing. Armando Ríos Cosío, Constructora Electromecánica S.A de C.V,2007.
- (13) “Short Circuit Current Calculation Overview”, General Cable SPEC F125, January 2008.

CAPÍTULO V

- (1) “Longitudinal Induction Voltage Measurement On Communication Cables Running Parallel to Overhead Lines”, Dean Sharafi MIEAust, CPEng, NPER Western Power Corporation, IEEE T&D Chicago April 2008.
- (2) “The Effect Of Earthing Of Cable Sheaths On Fault Current Distribution”, Neil McDonagh ESB International, Ireland, 2004.
- (3) “Wave, Propagation in Overhead Wires with Ground Return”, Carson,. J. R., Bell System Technical Journal vol 5, pp. 539-554, Oct.1926.
- (4) “Distorsión Armónica”, Ing. Eugenio Téllez Ramíres, Programa de Ahorro de Energía, Automatización Productividad y Calidad S.A. de C.V. 2002.
- (5) “Estudio del blindaje magnético por láminas conductoras”, Nicolás Di Fiori – Federico Foieri – Matías Rodríguez, Laboratorio 5 – FCEyN – UBA, Octubre de 2001.
- (6) <http://www.serviciencia.es/pantalla.htm>.
- (7) “Serie Temas Selectos Sobre Cables de Energía”, Ing. Armando Ríos Cosío, COEMSA.
- (8) “Automated Analysis Of Electromagnetic Interference Between Power Lines And Neighboring Railways”, Yexu Li, Farid Paul Dawalibi and Robert D. Southey, Safe Engineering Services & technologies ltd.
- (9) “Characteristics and Reduction of Sheath Circulating Currents in Underground Power Cable Systems”, C.K. Jung , J.B. Lee , J.W. Kang , Xinheng Wang, and Yong-Hua Song, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 1 2004, Iss. 1, Art. 1005.
- (10) “Seguridad eléctrica”, Modulo III.
- (11) “Norma NFPA 70E”, requisitos de seguridad eléctrica de los empleados en los lugares de trabajo.
- (12) “Guideline For Working Procedures On Underground Transmission Circuits With Induced Voltage”, Albertt Kong & Pierre Argaut, IEEE P1727/D3 , February 27, 2008.
- (13) “Consideraciones sobre el manejo de cables eléctricos subterráneos”, PIRELLI CABLES Y SISTEMAS, Instrucciones No 12-G.
- (14) “**ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ”. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (Up to 300 GHz). Health Physics 1998; 74(4): 494-522.



- (15) **“HUMAN BODY EXPOSURE TO POWER LINES: RELATION OF INDUCED QUANTITIES TO EXTERNAL MAGNETIC FIELDS”**, M. A. Stuchly and T. W. Dawson, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, Box # 3055, Stn. CSC, Victoria, BC Canada., Septiembre de 2002.
- (16) **“ELECTROMAGNETIC FIELDS, POLYCHLORINATED BIPHENYLS, AND PROSTATE CANCER MORTALITY IN ELECTRIC UTILITY WORKERS”**, Luenda E. Charles¹, Dana Loomis, Carl M. Shy, Beth Newman, Robert Millikan, Leena A. Nylander-French and David Couper, Department of Epidemiology, School of Public Health, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC., Department of Environmental Sciences and Engineering, School of Public Health, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC., Noviembre de 2002.
- (17) **“COM”** (1998) 268. Propuesta de Recomendación del Consejo relativa a la limitación de la exposición de los ciudadanos a los campos electromagnéticos 0 Hz-300 GHz.
- (18) **“ICNIRP”** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (Up to 300 GHz). Health Physics 1998; 74(4): 494-522.

INSTITUCIONES Y ORGANIZACIONES RELACIONADAS

AEIC (Association of Edison Illuminating Companies): Asociación de las compañías Edison de Iluminación.

ICEA (Insulated Cable Engineers Association): Nombre actual de la IPCEA(Power) Asociación Norteamericana para la Normalización de Conductores Eléctricos.

IEC (International Electrotechnical Commission): Denominacion Francesa para la Comisión Electrotécnica Internacional, encargada de la normalización de productos eléctricos.

IEEE (Institute of Electric and Electronics Engineers): Principal asociación a nivel mundial de ingenieros en electricidad, electrónica y materias a fines.

ANCE : Asociación Nacional de Normalización y Certificación Asociación Civil.

ASTM (American Society For Testing and Materials): Organización dedicada a la publicación de normas, métodos de prueba y recomendaciones sobre materiales.

ANSI (American National Standard Institute): Instituto Americano de Normalización.



NEC (National Eléctric Code): Código Nacional Eléctrico, Norma general sobre productos e instalaciones eléctricas publicada por la NFPA, bajo los lineamientos de la OSHA.

NMX: Normas Mexicanas para la industria.

NEMA (National Electrical Manufactures Association): Asociación de fabricantes de equipo eléctrico en apoyo de normalización y tecnología de manufactura.

NFPA (National Fire Protection Association): Asociación Americana para la protección contra incendios, responsable de la publicación del NEC.

NOM: Norma Oficial Mexicana, documento publicado por la DGN para normalización y especificación de productos.

OSHA (Occupatioanl Safety and Health Administartion): Oficina Norteamericana del Departamento de trabajo encargado de la reglamentación de los factores de seguridad requeridos en los lugares de trabajo.

UL (Underwriters Laboratories, Inc): Institución (privada) dedicada al reconocimiento y aprobación de productos eléctricos y electrónicos, acorde a sus propias normas.

