

308917



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

2
2ej.

ESCUELA DE INGENIERIA

Con estudios incorporados a la Universidad Nacional Autónoma de México

CABLES MONOPOLARES Y SUS ACCESORIOS EMPALMES Y
TERMINALES PARA DISTRIBUCION SUBTERRANEA EN MEDIA TENSION

TESIS

Que para obtener el título de INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
Area: Ingeniería Mecánica

PRESENTA

Juan Enrique Arton Ambía.

Director de Tesis: Fis. Mariano Romero Valenzuela

México D.F.

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

268284



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me ha otorgado todas las capacidades de las que deberé responder.

A mis padres, por su participación con Dios al traerme a la vida, sus desvelos e insomnios a mis cuidados, la educación con la que me forjaron y las oportunidades que me han brindado

A mi esposa, Rosy, por su empeño y apoyo para que fuera posible que terminara este trabajo.

A mi director de tesis, por su apoyo y directrices para el buen término del presente.

DEDICATORIA

Al quien me juzgará al final de mis días por los frutos de mi trabajo.

A mi esposa, Rosy, mi futuro, con quien deseo aprovechar las ventajas de mi educación, en nuestra familia cristiana basada en el amor.

A mi hijo Juan, y a sus futuros hermanos, deseándoles la bendición de Dios, y procurándoles la mejor herencia que sus abuelos pudieran dejar... la educación.

A mis padres, quienes en mi bien, sienten el suyo propio.

A mis hermanas con todo mi cariño

A mis suegros, a quienes quiero agradecer su prudencia, consejos y grandes detalles además de mostrar el cariño y respeto que por ellos siento.

A mis cuñados, a quienes quiero como hermanos.

A mi abuelo, que en paz descansa, quien me dejó su autenticidad como compromiso, sus consejos como herencia y su carrera como modelo.



INDICE.

INTRODUCCION.....	4
1. TEORIA DE CABLES SUBTERRANEOS	10
1.1. El conductor	12
1.1.1. Selección del calibre por ampacidad.....	16
1.1.2. Selección del calibre por caída de tensión	21
1.2. La pantalla semiconductor de alivio de esfuerzos	24
1.3. El aislamiento Primario	26
1.3.1. Materiales	26
1.3.2. Características eléctricas	31
1.3.3. Características mecánicas	33
1.3.4. Nivel de aislamiento	34
1.4. Pantalla del aislamiento	35
1.4.1. Distribución radial y simétrica de los esfuerzos	37
1.4.2. Provisión de capacitancia uniforme al cable	38
1.4.3. Reducción del peligro de descargas eléctricas	39
1.4.4. Pantalla semiconductor sobre el aislamiento	39
1.4.5. Pantalla metálica	40
1.5. Cubierta del cable	41
2. ACCESORIOS EMPALMES	44
2.1 Definición y Generalidades	45
2.2 Normatividad en empalmes	46
2.2.1. Pruebas a las que debe ser sometido un empalme	46
2.2.2. Marco legal nacional e internacional	60
2.3. Pasos generales para la realización de un empalme	61
2.3.1. Preparación del cable	61
2.3.2. Conexión del conductor.....	62
2.3.3. Reconstrucción de la pantalla semiconductor	63
2.3.4. Reconstrucción del aislamiento primario	64
2.3.5. Reconstrucción de la pantalla electrostática	64
2.3.6. Reconstrucción de la cubierta del cable	65
2.4. Tecnologías	65
2.4.1. Tecnología encintada	65
2.4.2. Tecnología contráctil en frío	66
2.4.3. Tecnología de resinas	67
2.4.4. Tecnología termocontráctil	67
2.4.5. Tecnología premoldeada.....	68
3. ACCESORIOS TERMINALES	69
3.1. Definición y Generalidades.....	70
3.2. Normatividad para terminales.....	70
3.2.1. Pruebas a las que se somete una terminal	71

3.2.2. Marco legal nacional e internacional	78
3.3. Funciones de una terminal	79
3.4. Estudio sobre el efecto de la contaminación	81
3.4.1. Resumen.	81
3.4.2. Introducción.....	81
3.4.3. Antecedentes	82
3.4.4. Desarrollo	82
3.4.5. Pruebas físicas	84
3.4.6. Pruebas dieléctricas	84
3.4.7. Resultados	85
CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFIA	91
FIGURAS	93

FALTAN PAGINAS

De la:

4

A la:

6

INTRODUCCION

La energía eléctrica es en nuestros días prácticamente indispensable, y muchas veces no nos percatamos de todos los esfuerzos que se realizan detrás de un interruptor o de una clavija, desde la generación de la energía, su transmisión en líneas de alta tensión y su distribución dentro de las zonas urbanas, por lo cual quisiera comenzar haciendo un bosquejo del recorrido que lleva la luz para llegar hasta el usuario final (ya sea doméstico o industrial)

Este usuario, se ve afectado no solamente por la presencia del fluido eléctrico, sino también por la forma como la energía eléctrica llegue hasta él, pues su hábitat se modifica, tanto en el aspecto estético, como en rubros tan importantes como la seguridad. Es sabido que una línea aérea empobrece cualquier panorama, al mismo tiempo que es una grave amenaza durante sismos, o incluso por un simple accidente automovilístico, ya que en ambos casos, uno o varios de los postes pueden ser derribados, poniendo en riesgo la vida de quienes se encuentran cerca. Sin embargo, las líneas subterráneas no ofrecen dichos riesgos ni empobrecen el paisaje en tan alto grado.

En primer lugar, la energía eléctrica se obtiene en las plantas generadoras, las cuales más que generar transforman la energía disponible a energía eléctrica mediante una turbina conectada mecánicamente a una bobina generadora de energía. Dependiendo de la energía que se utilice para mover la turbina, la planta recibirá el siguiente nombre:

Tabla 1:

NOMBRE	FUENTE DE ENERGIA
Termoeléctrica	Vapor calentado a base de hidrocarburos.
Nucleoeléctrica	Vapor calentado a base de energía nuclear.
Geoeléctrica	Vapor caliente que emana del subsuelo.
Hidroeléctrica	Agua en precipitación.
Eólica (*)	Aire a velocidad.

(*) En este caso no se emplean turbinas, sino hélices múltiples en diferentes lugares para capturar la energía del aire.

A continuación se presentan las estadísticas de CFE de 1996 sobre la capacidad instalada en MW en cada una de las distintas formas de generación:

Hidroeléctrica	10,034
Termoeléctrica	24,755
Eoloeléctrica	2
Total	34,791

La generación a gran escala se lleva a cabo en niveles de tensión aproximados de 5,000V y 13,200 V. Sin embargo, si se transmitiera la energía eléctrica a esa tensión la eficiencia sería muy baja, lo cual es fácilmente demostrable:

La medida de la eficiencia clásica es lo que se obtiene sobre lo que se alimenta, en el sistema de transmisión, lo que se obtiene es la energía que llega al final de la línea, mientras que lo que se alimenta es la energía que se genera o entra a la línea, si hablamos de un análisis instantáneo, es válido hablar de potencia en lugar de energía.

Por otra parte, si recordamos el principio del balance de energía, sabremos que lo que sale de un sistema, es igual a lo que entra al menos lo que se queda en el, o expresándolo matemáticamente:

$$E_i = E_p + E_s$$

Donde:

- $E_i \Rightarrow$ Energía de ingreso.
- $E_p \Rightarrow$ Energía perdida.
- $E_s \Rightarrow$ Energía de salida o aprovechada.

Es obvio que a mayor energía de pérdida, la eficiencia del sistema será menor, por lo que debemos minimizar este valor, para tal fin, es equivalente a minimizar la potencia de pérdidas en la línea, la cual la podemos describir con el siguiente modelo matemático:

$$P_p = V_p \times I \times \cos(\psi)$$

Donde:

- $P_p \Rightarrow$ Potencia perdida.
- $V_p \Rightarrow$ Pérdida de tensión a lo largo de la línea
- $I \Rightarrow$ Corriente que atraviesa la línea.
- $\cos(\psi) \Rightarrow$ Factor de potencia debido a la configuración física de la línea.

El factor de potencia es una variable que depende a su vez de la inductancia y capacitancia mutua de la línea, la cual a su vez depende de la configuración física del sistema, por lo que en lo sucesivo no consideraremos a esta variable.

Aún cuando los materiales que se emplean para transmitir la electricidad son buenos conductores (ya sea aluminio o cobre), tienen una cierta resistividad, lo cual es una constante del sistema, independientemente de la tensión o corriente que pase por la línea.

Recordando la ley de ohm, el Voltaje será igual a la corriente que pase por un alambre por la resistencia del mismo, y dado que la resistencia es una constante, la variable a manipular para minimizar las pérdidas de tensión en la línea es la corriente, considerando también que la potencia a transmitir es una constante (dada por la demanda del sistema).

$$= R \times I$$

Donde: $V \Rightarrow$ Pérdida de tensión en la línea.

$R \Rightarrow$ Resistencia de la línea.

$I \Rightarrow$ Corriente que atraviesa la línea .

Al tener la fórmula simplificada de la potencia:

$$P = V \times I$$

$$P = R \times I^2$$

Por lo anterior podemos ver que al aumentar tensión, para la misma potencia, se reduce la corriente, y por lo tanto, se reducen las pérdidas en forma proporcional al cuadrado de la corriente reducida.

A continuación se presentan las estadísticas de las líneas de transmisión en la República Mexicana. (De acuerdo al boletín de información básica de CFE correspondiente al año de 1996, en su página 23)

Líneas Aéreas:

Tensión: (kV)	Kilómetros.
400	11,337
230	18,878
161	456
150	445
138	1,171
115	31,423
85	219

Líneas Subterráneas:

115 177 (*)

(*) Este dato se obtuvo directamente de la Gerencia de distribución, en base a información disponible hasta 1997.

Durante la transmisión, las zonas a atravesar son generalmente despobladas, o al menos lo fueron cuando se instaló la línea, lo cual permite que se considere un espacio de seguridad considerable necesario para los niveles de tensión que se utilizan (de hasta 400,000 V), no obstante, al llegar a los poblados o ciudades, no es posible reservar tal espacio para las líneas, razón por la cual se instalan subestaciones donde se reduce la tensión a niveles entre los 5 y los 35,000V. A esta etapa se le llama distribución.

La distribución dentro de las zonas urbanas se puede hacer por dos métodos, el de distribución aérea o la distribución subterránea, la primera es más económica, pero tiene

múltiples desventajas, mientras la segunda es más costosa pero es de todo punto de vista práctico superior, a continuación se mencionan algunas de estas ventajas: (Manual técnico de Cables de energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, MC Graw Hill, p. XIX)

-CONFIABILIDAD: Los cables subterráneos no están expuestos directamente a cargas de viento, granizo, descargas atmosféricas directas, ni a la imprudencia de los conductores de vehículos motorizados.

-MANTENIMIENTO REDUCIDO: Considerado como un factor de costo en los planes de inversión, el mantenimiento de redes subterráneas en fraccionamientos residenciales es mínimo, siempre y cuando se haya hecho una adecuada selección de los diversos elementos del sistema.

-ESTÉTICA: hay que recordar que el concepto de contaminación no se restringe exclusivamente a elementos extraños en el aire agua o tierra, sino que se extiende también a factores como el ruido y a obstáculos que empobrezcan el paisaje. En muchos fraccionamientos modernos, esta razón ha sido suficiente para justificar la inversión en la red subterránea de distribución de energía y otros servicios.

-PLUSVALIA: El precio de los terrenos de fraccionamientos residenciales con instalaciones subterráneas es más alto que el correspondiente a fraccionamientos con instalaciones aéreas convencionales.

No obstante, la distribución subterránea tiene una desventaja: El costo de instalación, es mayor, debido a la obra civil, el costo del cable y los accesorios que se necesitan para acoplar la línea subterránea, tales como terminales, empalmes, gabinetes, codos, etc.

-OBRA CIVIL: Mientras que en la distribución aérea se instalan postes de concreto con crucetas, en la distribución subterránea es necesario hacer una zanja a lo largo de todo el camino del conductor, colocar ductos de concreto apropiados, pozos de visita para las bifurcaciones o empalmes, y pozos de visita en donde se realice la transición aéreo-subterránea.

-CABLE: Mientras que en la distribución aérea se requiere un conductor desnudo, en la distribución subterránea se emplea un cable aislado para media tensión, el cual tiene varias capas o pantallas que deben ser extruidas una sobre otra, las cuales, comenzando desde el conductor son:

- Pantalla del conductor (semiconductora).
- Aislamiento primario. (XLP o EP).
- Pantalla electrostática: (semiconductora)
- Pantalla metálica (de cinta de cobre o hilos de cobre.)
- Cubierta exterior (PVC).

-ACCESORIOS: Mientras que en la distribución aérea se requieren aisladores de suspensión en cada poste, y conectores de barril largo para continuar una línea, en la distribución subterránea se requieren codos para cada seccionamiento y empalmes mucho más

sofisticados para reconstruir cada una de sus capas cuando se termina una bobina de cable. En el caso de la distribución subterránea también es necesario el uso de terminales para hacer la transición aéreo-subterránea, las cuales entre otras cosas efectúan el control de campo respectivo al final de las pantallas electrostáticas del cable subterráneo. Así mismo para reconstruir un daño sobre un cable desnudo, será suficiente reconectarlo, mientras que para un cable subterráneo se deberá emplear otro empalme que reconstruya cada una de sus capas.

Después de la distribución, generalmente se emplean transformadores para regular la tensión a la que se alimentará al usuario final, que dependiendo del tipo de usuario será a 127, 220 ó 440V, y en este punto es en donde se realizan las acometidas, la excepción a esto son las grandes industrias u hoteles, que solicitan su acometida directamente de la red de distribución, ya que ellos mismos cuentan con una subestación para alimentar eléctricamente sus instalaciones.

Expuestas las ventajas y desventajas que ofrece cada una de las alternativas de distribución, nos explicamos porqué en países subdesarrollados, donde se minimiza la inversión inicial, encontramos mucha más distribución aérea que subterránea, sin embargo, por fortuna, si contamos con múltiples fraccionamientos y en varias ciudades que cuentan con el sistema de distribución subterránea, a continuación se presentan las estadísticas de líneas de distribución. (En base al boletín de información básica de CFE de 1996)

Total Líneas aéreas.

Tensión: (kV)	Kilómetros	% Aéreas	% Total
69	11,337	3.8%	3.7%
34.5	54,897	18.4%	18.1%
23	20,505	6.8%	6.7%
13.8	211,533	70.7%	70%
6.6	425	0.1%	0.1%
4.16	156	.05%	.05%
2.4	102	.03%	.03%
TOTAL:	298,955	100%	98.87%
Total Líneas Subterráneas: (*)		% Subt.	% Total.
69	20	0.58%	.01%
34.5	198	5.78%	.07%
23	425	12.4%	.14%
13.8	2,782	81.18%	.92%
4.4	2	0.06%	0%
TOTAL	3,427	100%	1.13%

(*) Esta información se obtuvo directamente de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operaciones y Mantenimiento.)

Como podemos observar por las estadísticas, el porcentaje de líneas subterráneas instaladas en el país es muy pobre, y es propósito de este trabajo, el impulsar dichas

instalaciones exponiendo sus ventajas y mostrando la tecnología de los cables y principales accesorios para dichas instalaciones.

Este trabajo busca llamar la atención de las instituciones académicas, con el fin de reforzar dentro de la carrera de ingeniería mecánica-eléctrica el aspecto sobre redes subterráneas, ya que de continuar los planes de estudio como hasta ahora, este tipo de instalaciones se encontrarán con un obstáculo adicional a su costo, el de la ignorancia de los ingenieros que diseñan las redes de distribución, impidiéndoles implementar esta tecnología aún cuando sea viable. O bien, si la inercia internacional que empuja hacia las líneas subterráneas permea a México, los ingenieros sin conocimientos sobre ésta se verán en desventaja respecto a los extranjeros o los nacionales que aún sin siquiera ser ingenieros, tengan experiencia práctica.

Del mismo modo, este trabajo se plantea por objetivo, ser una referencia de consulta rápida sobre las condiciones actuales del mercado mexicano, y de las tecnologías disponibles para terminar y empalmar cables subterráneos, junto con el indispensable marco teórico que corresponde a los cables donde van instalados.

Se debe comentar que la problemática de los empalmes se encuentra mucho más resuelta que el de las terminales, ya que las segundas se ven afectadas por el medio ambiente, por lo que en este trabajo se expone un estudio realizado en conjunto con CFE y LyFC orientado a la normalización de terminales, justificando la introducción de una prueba de contaminación en la NMX-J-199-1997.

CAPITULO 1.- TEORIA DE CABLES SUBTERRANEOS

CAPITULO 1.- TEORIA DE CABLES SUBTERRANEOS

Los sistemas eléctricos pueden ser diseñados con propósitos de generación, transformación, transmisión y distribución y dependiendo de cada una de éstas, resultará más eficiente hacer uso de distintos niveles de voltaje. Para la transmisión de energía eléctrica, se conoce que mientras mayor sea el voltaje al que se transmita, encontraremos una mayor eficiencia en la transmisión de la energía eléctrica, mientras que resulta sumamente impráctico e inseguro manejar voltajes demasiado altos en instalaciones electrodomésticas. siguiendo un orden por el nivel de tensión requerido en la instalación eléctrica, éstas se clasifican en baja, media, alta y extra alta tensión de acuerdo al siguiente criterio: (IEEE-std-141-1986 Tabla 1)

Tabla 2.

CLASIFICACION	VOLTAJE DE OPERACION (Volts)
Baja tensión / Acometidas	0-1,000
Media tensión/ Distribución	1,001-69,000
Alta tensión / Transmisión.	69,001-230,000
Extra alta tensión	230,001-1,100,000
Ultra Alta Tensión	1,100,001 en adelante.

Para los cables de media tensión, es decir los que rebasan un voltaje nominal de operación de 1,000 Volts, los esfuerzos eléctricos formados ya son considerables, lo cual se justifica en la teoría electromagnética dado que existe una caída de potencial ruda entre el conductor y el plano de tierra, y con el fin de controlar mejor estos esfuerzos, los cables destinados a operar en tensiones iguales o superiores a los 1,000 Volts, se proveen con más elementos que los que conocemos en los cables de uso doméstico o de baja tensión. La excepción a esto se contempla en la NOM-001-SEMP, en su apartado 310-6, en la cual se indica que cuando un cable entre 5 y 8 kV puede prescindir de la pantalla electrostática, no obstante, aún en esos casos, dichos cables cuentan con una pantalla semiconductor sobre el conductor.

En el caso de los cables de media tensión, existen dos tecnologías para realizar sus construcciones, la actual es de tipo seco empleando materiales como el XLP (Poleolefina de cadena cruzada) o el EP (Etileno Propileno), a los anteriores se les llaman cables extruidos, mientras. La tecnología que se usaba antes de ésta es la de los cables llamados de

aislamiento laminado, que consisten en capas aislantes y semiconductoras elaboradas a base de papel impregnado en aceite, esa es una tecnología obsoleta, sin embargo aún existen muchos cables de esta naturaleza instalados en las redes del área metropolitana.

En los cables destinados a operar por voltajes iguales o superiores a 1,000 Volts, encontraremos diversas partes que componen el cable, más allá del simple conductor y el aislamiento, y cada una de éstas fue colocada ahí por una razón específica, a continuación se describen las partes que componen un cable de media y alta tensión.

1.1 El Conductor

El objetivo del conductor es el más claro de todos, y es el de transmitir la carga. La capacidad cable para soportar una determinada corriente dependerá del diámetro transversal del conductor que se emplee. El diámetro transversal del conductor, se denomina calibre y existen escalas estandarizadas para éstos, como la AWG, MCM, IEC, etc. En la actualidad la más usada a nivel mundial es la IEC (International Electrotechnical Commission) y consiste en proporcionar la medida directa de las áreas transversales de los calibres en milímetros cuadrados, sin embargo en gran parte de América Latina y en los Estados Unidos de América, se siguen usando con más frecuencia las escalas AWG y MCM.

En el caso Mexicano, el uso de la escala IEC se limita a LyFC, y las referencias complementarias en las normas posteriores al TLC, mientras que el resto de las empresas utilizan la escala AWG/MCM.

Hay una serie de reglas aproximadas pero útiles que deben recordarse y que son aplicables a la escala AWG:¹

1.- El incremento de tres números en el calibre (por ejemplo del 10 al 7) duplica el área y el peso, por lo tanto, reduce a la mitad la resistencia a la corriente directa, y a su vez duplica la capacidad de corriente.

2.- El incremento en seis números de calibre (Vg. del 10 al 4) duplica el diámetro.

3.- El incremento en 10 números de calibre (Vg. del 10 al 1/0) multiplica el área y el peso por 10, dividiendo entre 10 la resistencia y multiplicando por 10 la capacidad de corriente (ampacidad).

La forma en que se determinan los calibres AWG, se basa en sus dos valores extremos (4/0 y 36 AWG), los cuales tienen diámetros en pulgadas de 0.46 in y 0.005 in, y se deseaban 38 diámetros intermedios entre estos dos, de modo tal que se propuso el siguiente modelo matemático para hacer la progresión de diámetros en toda la escala AWG²:

¹ Publicación MEMOTEC, Grupo ConduMex, Selección de Cables de Energía, p. 7

² Manual Técnico de Cables de Energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Mc Graw Hill, p. 8

$$\sqrt[39]{\frac{0.4600}{0.0050}} = \sqrt[39]{92} = 1.229$$

$$\therefore D_n = 1.229^n \times D_0$$

Donde D_0 es 0.127mm (0.005 in), y D_n es el enésimo calibre de la escala y "n" va desde 0 a 39.

Para secciones superiores a 4/0, se define el cable directamente por su diámetro o área. Las unidades adoptadas en los EUA son los CM (Circular Mil) para áreas, esta unidad representa el área del círculo de una milésima de diámetro, de modo que se emplean las siglas MCM (Mil CM) ó KCM (Kilo CM), que equivale a mil circular mils, y que corresponde aproximadamente al doble de la escala IEC.

Existen diferentes tipos de arreglos de conductores, éstos arreglos son generalmente trenzados, y varían su nivel de compactamiento, ya que como se puede apreciar de la tabla anterior, siempre se componen de varios alambres, tomando la norma ASTM-B-250, encontramos una clasificación para los diferentes tipos de cableado ³

Tabla 3.

Clase	Aplicación
AA	Cable desnudo, generalmente para líneas aéreas.
A	Cable aislado, tipo intemperie, o cables desnudos que requieran mayor flexibilidad que la de la clase AA.
B	Cable aislado con materiales diversos tales como papel, hule, plástico, etc., o cables de tipo anterior que requieran mayor flexibilidad.
C y D	Cables aislados que requieran mayor flexibilidad que la clase B.
G	Cables portátiles con aislamiento de hule, para alimentación de aparatos o similares.
H	Cables cordones con aislamiento de hule que requieran mucha flexibilidad. Por ejemplo, cables que tengan que enrollarse y desenrollarse continuamente y tengan que pasar sobre poleas.
I	Cables para aparatos especiales.
J	Cordones para artefactos eléctricos.
K	Cables portátiles y para soldadoras.
L	Cordones portátiles y para artefactos pequeños que requieran mayor flexibilidad que los de las clases anteriores.
M	Cables para soldadoras (portaelectrodos), calentadores y lámparas.
O	Cordones pequeños para calentadores que requieran mayor flexibilidad.
P	Cordones más flexibles que en las clases anteriores.
Q	Cordón para ventiladores oscilantes, flexibilidad máxima.

³ Manual Técnico de Cables de Energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Mc Graw Hill, p. 6

Como podemos apreciar en la clasificación anterior, la flexibilidad es un elemento importante dentro de la selección adecuada de un conductor, ésta se logra de dos maneras, recociendo el material para suavizarlo, o aumentando el número de alambres que lo forman, en nuestro caso, dentro de la distribución subterránea, la clase que nos interesa es la B, y dentro de este tipo de arreglo, siempre encontraremos un conductor de varios hilos, es decir, nunca encontraremos un alambre, lo cual tiene por objeto mejorar la flexibilidad del conductor.

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran por orden de tamaño las escalas antes mencionadas con su área de la sección transversal en milímetros cuadrados, el número de alambres que más comercialmente se colocan así como su diámetro exterior nominal en milímetros⁴ (todo para construcción con cableado redondo compacto):

Tabla 4.

mm ²	AWG o MCM	Area de la sección transversal en mm ²	No. de alambres	Diám. ext. nominal mm.
	8	8.37	7	3.4
	6	13.3	7	4.29
	4	21.15	7	5.41
	2	33.6	7	6.81
	1	42.4	19	7.59
50		48.3	19	8.33
	1/0	67.4	19	8.53
	2/0	67.4	19	9.55
70		69	19	9.78
	3/0	85.0	19	10.74
	4/0	107.2	19	12.06
	250	126.7	37	13.21
150		147.1	37	14.42
	300	152.0	37	14.48
	350	177.3	37	15.65
	400	203	37	16.74
240		239	37	18.26
	500	253	37	18.69
	600	304	61	20.6
	750	380	61	23.1
	800	405	61	23.8
	1000	507	61	26.9

⁴ Manual Técnico de Cables de Energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Mc Graw Hill, p. 9

Los materiales más usados como conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, aunque el primero es superior en características eléctricas y mecánicas (la conductividad del aluminio es aproximadamente el 60% de la del cobre y su resistencia a la tensión mecánica el 40%, las características de bajo peso del aluminio han dado lugar a un amplio uso de ambos metales en la fabricación de cables aislados y desnudos⁵.

Propiedades de los materiales empleados como conductores en los cables:

Tabla 5.

Metal	Densidad	Temperatura de fusión	Coef. linal de dilatación	Resistividad eléctrica 20°C	Coef. térm. de resistiv. eléctrica	Conductividad eléctrica
Unidades	g/cm ³	°C	x10 ⁻⁶ /°C	Ω-mm ² /km	1/°C	% IACS*
Aluminio	2.7	660	24	25.264	0.00403	61.0
Cobre duro	8.89	1083	17	17.922	0.002383	96.2
Cobre suave	8.89	1083	17	17.241	0.00393	100.0

En el cobre usado para conductores eléctricos se distinguen principalmente tres grados de dureza, estos son: Suave o recocido, semiduro y duro. Tal como se describe por la mecánica de materiales, el de mejor conductividad es el suave, pero el de mejor resistencia tensil es el duro. El cobre suave tiene las aplicaciones más generales.

La principal ventaja del aluminio sobre el cobre es su peso menor (densidad de 2.7g/cm³ contra 8.89g/cm³ del cobre), en la siguiente tabla se presenta una comparación de características entre el cobre y el aluminio:

Tabla 6.

Características	Cobre	Aluminio.
Para igual volumen: relación de pesos	1.0	0.3
Para igual conductancia: relación de áreas	1.0	1.64
relación de diámetros	1.0	1.27
relación de pesos	1.0	0.49
Para igual ampacidad: relación de áreas	1.0	1.39
relación de diámetros	1.0	1.18
relación de pesos	1.0	0.42
Para igual diámetro: relación de resistencias	1.0	1.61
capacidad de corriente	1.0	0.78

⁵ Manual Técnico de Cables de Energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Mc Graw Hill, pp. 3-5.

Por la forma como se agrupan los hilos del conductor, los conductores también se clasifican en cables redondos y sectoriales (fig 1.)⁶ (usados solamente en cables trifásicos armados). Los conductores sectoriales tienen como ventaja el tener un menor diámetro, menor peso y un costo más bajo, sin embargo, tienen menor flexibilidad e implican una mayor dificultad en la ejecución de los empalmes, así como también implican una distribución de campo eléctrico más compleja.

A todo lo anterior, surge la lógica pregunta, de cómo seleccionar el calibre adecuado para una determinada instalación. En los proyectos de instalaciones eléctricas la selección adecuada de un determinado conductor que llevará corriente a un dispositivo específico se hace tomando en consideración dos factores:⁷

- 1.- La capacidad de conducción de corriente (Ampacidad).
- 2.- La caída de tensión.

Estos dos factores se deben tomar por separado, pero se consideran simultáneamente en la selección de un conductor, como es muy posible que el resultado que arroje cada uno de los factores es distinto, el conductor adecuado será el de mayor calibre, garantizando así que el conductor se comporte adecuadamente desde ambos criterios.

1.1.1. Selección de un conductor basado en el criterio de la conducción de corriente o ampacidad.

La capacidad de conducción de un conductor (ampacidad) se encuentra limitada por los siguientes factores:

- Conductividad del metal conductor.
- Capacidad térmica del aislamiento.

Desde el punto de vista de conductividad se han elaborado tablas que dan la resistencia eléctrica de los conductores de cobre, y que presentamos anteriormente en el trabajo, factor que es muy importante en virtud de que determina las pérdidas de potencia eléctrica al paso de una corriente según la fórmula:

$$W = R \times I^2$$

Donde:

R \Rightarrow Resistencia eléctrica en ohms.

I \Rightarrow Corriente eléctrica en amperes.

W \Rightarrow Potencia en Watts.

⁶ Manual Técnico de Cables de Energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Mc Graw Hill, pp. 7.

⁷ Manual de Instalaciones eléctricas residenciales e industriales, Enríquez Harper, Segunda pre-edición corregida y aumentada, Editorial Limusa, pp. 77-107.

Esta potencia por un período de tiempo determinado es una energía que se disipa en forma de calor.

Por otra parte se sabe que la resistencia eléctrica de los conductores varía por la temperatura de 60 °C, por lo que al calcular la resistencia de un conductor a cualquier otra temperatura se debe corregir mediante la fórmula:

$$R_T = R_{60^\circ C} [1 + \alpha(T - 60)]$$

Donde:

$R_T \Rightarrow$ Resistencia a la temperatura T deseada.

$T \Rightarrow$ Temperatura considerada.

$\alpha \Rightarrow$ Coeficiente de corrección en ohms/°C, para el cobre es de 0.00385.

Es conveniente aquí recordar también que los valores de resistencia indicados en las tablas están dados para una corriente directa, y cuando una corriente alterna circula por un conductor se produce lo que se conoce como el Efecto Superficial (Efecto *Skin*) produciendo una corriente en sentido contrario a la corriente normal que circula por el conductor, manifestándose esto como un aumento de resistencia.

De lo anterior se deduce que la resistencia de un conductor cuando circula por él una corriente alterna es mayor que cuando circula una corriente directa, debido a esto se han obtenido factores de corrección para obtener los valores de resistencia en corriente alterna a partir de los valores de resistencia en corriente directa.

Como se expresó en la ecuación 2.1 las pérdidas RI^2 se manifiestan en forma de calor que a su vez influye directamente en el aislamiento del conductor, factor que es muy importante ya que determina la temperatura máxima de operación a régimen permanente de un conductor .

De lo anterior se deduce que la capacidad de conducción de corriente de un conductor está íntimamente ligada a la capacidad de aislamiento a las temperaturas elevadas, esto considerando también que por lo general los conductores se encuentran dentro de canalizaciones en las instalaciones eléctricas, que se comportan como emisores de calor y también por temperaturas ambientes superiores a los 40°C.

Teóricamente un conductor desnudo soportado por aisladores de porcelana puede transmitir una gran corriente, hasta el punto en que por efecto de Joule se alcance la temperatura de fusión del material, en realidad esto no ocurre ya que los conductores conducen la corriente permisible de acuerdo a su capacidad, pero en el caso de sobrecargas, el calor producido es disipado por el aire circundante al conductor.

En el caso de las instalaciones eléctricas aisladas, los conductores se encuentran alojados en un medio de canalización en donde además se encuentran alojados otros

conductores, en este caso el calor generado tiende a disiparse en el medio envolvente, es decir, el propio aislamiento del conductor, el aislamiento de los conductores vecinos, el aire que está contenido en el ducto y el ducto mismo. en este caso el calor generado en el caso de sobrecargas prolongadas destruirá a los aislamientos mucho antes de que el conductor llegue a su temperatura de fusión, debido a que la capacidad térmica del aislamiento es mucho menor que la del metal conductor, por lo que es importante limitar la temperatura de trabajo de los conductores hasta el punto en que el calor que se genera no llegue a la temperatura de fusión del aislamiento, es decir que siempre se debe trabajar al conductor por debajo de la temperatura de fusión del aislamiento.

Para fines prácticos, se va un poco más abajo, y no se permite trabajar al conductor con temperaturas que excedan las de resblandecimiento del aislamiento con un régimen de trabajo permanente.

Desde el punto de vista teórico se pueden establecer las bases para el cálculo del calibre del conductor de acuerdo con su capacidad de conducción de corriente, considerando el efecto térmico en los términos que se establecieron anteriormente. Este cálculo establece una analogía con la ley de Ohm para circuitos eléctricos, y a semejanza de la ecuación conocida para la ley de Ohm que expresa la caída de voltaje en un circuito (V) cuando circula una corriente (I) a través de una resistencia, se tiene una ecuación para un medio en el cual está circulando calor y que establece un incremento de temperatura igual al calor circulante en el medio multiplicado por la resistencia térmica del mismo y que se expresa como:

$$\Delta T = R_x W$$

Donde:

$\Delta T \Rightarrow$ Incremento o caída de temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

$W \Rightarrow$ Calor circulante en Watts/m

$R_x \Rightarrow$ Resistencia térmica del medio en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{Watt}$.

Suponiendo el caso de un conductor aislado dentro de un ducto y que la temperatura ambiente T_a es menor que la producida por el conductor T_c , entonces el calor fluye del conductor hacia el medio ambiente pasando por su aislamiento, el aire contenido en el ducto y el ducto mismo. Cada uno de estos elementos tendrá una resistencia al paso del calor de acuerdo con sus características propias.

La variación de temperatura desde el punto más caliente hasta el punto más frío está dada como:

$$\Delta T = T_c - T_a$$

El calor que produce el conductor es exclusivamente el debido al efecto Joule

$$= RI^2 \frac{\text{Watts}}{\text{m}}$$

Donde:

$R \Rightarrow$ Resistencia del conductor en ohms/m

$I \Rightarrow$ Corriente que circula por el conductor en Amperes.

La resistencia térmica R_x es la suma de las resistencias térmicas de los distintos medios desde el punto más caliente hasta el punto más frío.

$$R_x = R_{x1} + R_{x2} + R_{x3} = \sum_{i=1}^n R_{xi}$$

Si se substituye:

$$T_c - T_a = (RI^2) \cdot \sum_{i=1}^n R_{xi} = RI^2 \cdot R_x$$

De la expresión anterior se puede despejar la corriente I , que representa el valor admisible de corriente en el conductor:

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R \cdot R_x}}$$

Donde:

I \Rightarrow Corriente máxima admisible por el cable.

T_c \Rightarrow Temperatura del punto más caliente, es decir, la temperatura máxima de operación continua del cable.

T_a \Rightarrow Temperatura del punto más frío.

R_x \Rightarrow Resistencia térmica total del medio donde se encuentra el conductor, la cual considera sus diferentes pantallas, aislamientos, cubiertas, y el ducto.

R \Rightarrow Resistencia total del conductor por metro a la temperatura máxima de operación del cable.

Finalmente substituyendo:

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_m}{R_x \cdot (R_B [1 + \alpha(T_c - B)])}}$$

Donde:

I \Rightarrow Corriente admisible por el conductor, o corriente máxima.

T_c \Rightarrow Temperatura máxima de operación continua del cable.

T_m \Rightarrow Temperatura del medio donde se encuentra el cable.

R_x \Rightarrow Resistencia térmica de los elementos partiendo del conductor hasta el medio donde se encuentra el cable.

α \Rightarrow Coeficiente de corrección de resistencia del material por incremento de temperatura.

R_B \Rightarrow Resistencia de material a una temperatura B dada.

B \Rightarrow Temperatura a la que está dada la resistencia del material.

A uno le gustaría poder calcular directamente la sección mínima del conductor, conociendo los datos del sistema, como tensión y potencia a suministrar, no obstante, dado que la resistividad térmica de los elementos aislantes depende de los diámetros de dichas pantallas, debemos alimentar a la ecuación los datos para cada sección, y entonces elaborar una tabla de acuerdo a las características de cada uno de los cables.

De ese modo tenemos que la resistencia eléctrica será dada por la siguiente ecuación:

$$R_B = \rho_B \cdot \frac{l}{s}$$

Donde:

$R_B \Rightarrow$ Resistencia eléctrica en Ohm/m a la temperatura B.

$\rho_B \Rightarrow$ Resistividad en (Ohm•m/mm²) a la temperatura dada B.

$l \Rightarrow$ Longitud del cable, que para nuestro propósito será de 1m.

$s \Rightarrow$ Sección del conductor en mm².

Mientras que la resistencia térmica se puede calcular considerando un elemento diferencial cilíndrico, por lo cual debemos seguir el siguiente modelo matemático:

$$R_t = \rho_t \frac{e}{S}$$

$$R_t = \rho_t \frac{dx}{2\pi x l}$$

$$R_t = \int_r^{r_u} \frac{\rho_t}{2\pi x} dx$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi} \rho_t \ln \frac{r_u}{r}$$

$$R_t = 0.159 \rho_t \ln \frac{D_a}{D}$$

Donde:

$R_T \Rightarrow$ Resistencia térmica obtenida del aislamiento.

$\rho \Rightarrow$ Resistividad del aislamiento.

$D_a \Rightarrow$ Diámetro sobre el aislamiento del cable.

$D \Rightarrow$ Diámetro sobre el conductor, incluyendo pantalla.

La tabla siguiente incluye la resistividad de los aislamientos típicos de los cables:

Tabla 7.

Aislamiento:	ρ (°C cm/W)
Papel	600
Polietileno	350
XLP	350
EPR	500
PVC	600

Más adelante veremos que por este fenómeno, el aislamiento XLP es preferido sobre los demás, ya que permite una mayor ampacidad en los cables, y por eso es ampliamente utilizado en media tensión.

En el caso de los cables de potencia de alta tensión, existen dos grandes familias de cables, los de aislamiento seco, como el XLP, EPR, Polietileno, etc. y la de el papel impregnado en aceite. Esta tecnología es muy antigua, sin embargo se sigue utilizando en México, de hecho el centro histórico de la Ciudad de México está alimentado con este tipo de

cable, por lo que todos sus valores y propiedades están disponibles, aún cuando ya no se encuentra disponible comercialmente, ya que la propia Compañía de Luz y Fuerza del Centro reutiliza los tramos de cable que han sido desechados de otra instalación hasta que la dimensión del tramo recuperable sea inútil.

1.1.2. Selección de un conductor basado en el criterio de caída de tensión.

No basta calcular los conductores con corriente únicamente, es decir, seleccionar el calibre de un conductor de acuerdo con la corriente que circulará por él, sino que debemos cuidar que las pérdidas debidas a la longitud del cable sean razonables. En el caso concreto de cables para alta tensión, los parámetros son estipulados por la propia compañía que distribuye la energía, en base a las pérdidas que debe calcular por los accesorios consecutivos y la tensión de alimentación, de modo que al usuario final llegue la tensión contratada no superior a 127V, de acuerdo a la NOM-001-SEMP-1996, artículo 210-6 (Tensión máxima de los circuitos derivados).

Para el caso de baja tensión, también es necesario que la caída de voltaje en el conductor no exceda los valores establecidos por la NOM-001-SEMP-1996, que establece en su artículo 210-19 (Conductores), Nota 4:

"La caída de tensión global desde el medio de desconexión principal hasta cualquier salida de la instalación (sea alumbrado fuerza, calefacción, etc.) no debe exceder del 5%. La caída de tensión se debe distribuir razonablemente en el circuito derivado y en el circuito alimentador, procurando que en cualquiera de ellos la caída de tensión, no sea mayor de 3%."

Sin embargo este criterio no es el mismo para los cables de alta tensión, ya que se trata de la distribución a cualquiera de estas dos zonas.

De hecho, una de las aplicaciones de los cables subterráneos, es la acometida a industriales, aún cuando la zona tenga distribución aérea. Es decir, se hace una transición aérea subterránea para alimentar la subestación privada de la industria a la que se le da servicio. En este caso particular, el cálculo de pérdidas o de caída de tensión resultaría innecesario debido a la corta longitud de cable que se utilizará, (generalmente entre 10 y 18 metros) este cálculo es interesante para las compañías encargadas de la distribución, ya que en los lugares donde se cuenta con distribución subterránea, las longitudes son realmente considerables, y por lo tanto, las pérdidas también deben ser calculadas.

En las fórmulas que se presentarán a continuación se empleará la siguiente nomenclatura:

$W \Rightarrow$ Potencia en Watts.

$I \Rightarrow$ Corriente en amperes por conductor.

$E_f \Rightarrow$ Tensión entre fases

$E_n \Rightarrow$ Tensión de línea a neutro.

$\cos \varphi \Rightarrow$ Factor de potencia.

$R \Rightarrow$ Resistencia de un conductor en ohms.

$\rho \Rightarrow$ Resistividad del cobre = $1/58$ ($\Omega\text{-m/mm}^2$)

$L \Rightarrow$ Longitud del conductor en metros.

$s \Rightarrow$ Sección del conductor en mm^2 ,

$e \Rightarrow$ Caída de tensión de fase a neutro en volts.

$e_f \Rightarrow$ Caída de tensión entre fases, en volts.

$C \Rightarrow$ Distancia entre los centros de los conductores.

$d \Rightarrow$ Diámetro medio de la pantalla metálica.

$\omega \Rightarrow 2\pi f$ ($f=60\text{Hz}$ para México... $\omega=377$)

$e\% \Rightarrow$ Caída de tensión en porcentaje:

$$e\% = \frac{e \times 100}{E_n} = \frac{e_f \times 100}{E_f}$$

1.1.2.1. Cálculo de la resistencia del cobre para un sistema monofásico:

La potencia que consume la carga es:

$$= E_n I \cos(\varphi)$$
$$I = \frac{W}{E_n \cos(\varphi)}$$

La caída de voltaje por resistencia en el conductor es:

$$e = 2RI$$

La resistencia del conductor es:

$$R = \frac{\rho L}{s} = \frac{1}{50} \frac{L}{s}$$

De donde obtenemos,

$$e = \frac{1}{25} \frac{LI}{s}$$
$$e\% = \frac{LI}{25 \times s} \frac{100}{E_n}$$
$$e\% = 4 \frac{LI}{E_n s}$$

1.1.2.2. Cálculo de la resistencia para un sistema trifásico en conexión delta (Tres hilos):

En este caso la potencia que se consume en la carga trifásica es:

$$= \sqrt{3} E_f I \cos(\varphi)$$
$$I = \frac{W}{\sqrt{3} E_f \cos(\varphi)}$$

Considerando la caída de voltaje entre fases y procediendo igual que antes:

$$e_f = \sqrt{3}RI$$

$$R = \rho \frac{L}{s} = \frac{L}{50 \times s}$$

$$e_f = \frac{\sqrt{3}LI}{50 \times s}$$

$$e\% = \frac{e_f}{E_f} \times 100$$

$$e\% = \frac{\sqrt{3}L}{50 \times sE_f} \times 100$$

De donde concluimos la siguiente ecuación:

$$e\% = 2\sqrt{3} \frac{LI}{E_f}$$

1.1.2.3. Cálculo de la resistencia para un sistema trifásico en conexión estrella (a cuatro hilos):

Procediendo de la misma forma, pero considerando que ahora la potencia del sistema se puede calcular de estas dos formas:

$$= \sqrt{3}E_f I \cos(\varphi) = 3E_n I \cos(\varphi)$$

$$I = \frac{W}{\sqrt{3}E_f \cos(\varphi)} = \frac{W}{3E_n \cos(\varphi)}$$

$$e_f = \sqrt{3}RI = \frac{\sqrt{3}LI}{50 \times s}$$

$$e\% = \frac{\sqrt{3}LI}{50 \times sE_f} \times 100 = 2\sqrt{3} \frac{LI}{sE_f}$$

$$e = RI = \frac{LI}{50 \times s}$$

$$e\% = \frac{e}{E_n} \times 100 = \frac{LI}{50 \times E_n} \times 100$$

De modo que refiriendo la caída de tensión al neutro:

$$e\% = 2 \frac{LI}{sE_n}$$

1.1.2.4. Cálculo de la reactancia debida al apantallamiento del cable:

En el caso concreto de los cables apantallados, esta pantalla provoca un fenómeno de reactancia considerable que debe ser calculada en conjunto para poder tener un criterio confiable en la selección del tamaño del conductor, y podemos tomar la magnitud de la tensión perdida

$$X = 4.6\omega \log \frac{2C}{d} 10^{-9} \frac{\Omega}{cm}$$

1.1.2.5. Cálculo de la tensión perdida conjuntando la resistencia con la reactancia:

Conjugando con el valor de la resistencia, tendríamos que la magnitud de la tensión perdida total dentro del sistema se calcula de la siguiente manera:

$$e = \sqrt{(RI)^2 + (XI)^2} \quad (\text{volts}).$$

En donde:

RI \Rightarrow Caída de tensión por resistencia.

XI \Rightarrow Caída de tensión por reactancia.

Finalmente procediendo de la misma manera, podemos obtener en definitiva lo siguiente:

$$e\% = \frac{e}{E_n} \times 100$$

1.2 La Pantalla semiconductor de alivio de esfuerzos de alta tensión.

Cuando se aplica una tensión entre un conductor y el plano de tierra (o entre dos conductores), el dieléctrico intermedio se somete a esfuerzos eléctricos. Estos esfuerzos, si son de magnitud elevada, pueden producir deterioro del material dieléctrico y producir otros efectos indeseables al no controlarse en forma adecuada. El control de estos esfuerzos eléctricos se logra gracias a las pantallas eléctricas.

Una definición ampliamente aceptada de la función de las pantallas eléctricas es la siguiente:

"Se aplican las pantallas eléctricas en los cables de energía con el fin de confinar en forma adecuada el campo eléctrico a la masa de aislamiento del cable o cables."⁸

Las pantallas usadas en el diseño de los cables de energía tienen diferentes funciones. dependiendo del material su localización pueden ser:

- Pantalla semiconductor sobre el conductor (La cual estamos tratando).
- Pantalla semiconductor sobre el aislamiento (La que trataremos posteriormente),

⁸ Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 23)

En circuitos con tensiones de 2KV y mayores se utiliza la pantalla semiconductora a base de cintas o extruida. Los materiales usados en la fabricación de estas pantallas dependen del diseño mismo del cable: En cables con aislamiento de papel impregnado se usan cintas de papel CB (*Carbon Black*), en el caso de cables con aislamiento seco se utilizan pantallas extruidas de material compatible con el utilizado con el aislamiento con agregado de carbón.

La función básica de esta pantalla es la de evitar concentraciones de esfuerzos eléctricos que se presentan en los intersticios de un conductor cableado, a consecuencia de la forma de los hilos. La inclusión de este elemento en el diseño del cable es con el fin de obtener una superficie equipotencial uniforme, a la cual las líneas de fuerzas del campo eléctrico sean perpendiculares.⁹ (Fig. 2)

Otra función es evitar ionización en los intersticios entre el conductor y el aislamiento. Si el aislamiento fuera extruido directamente sobre el conductor, la curvatura de los alambres de la corona superior darían lugar a la formación de hoquedades o burbujas de aire que al estar sujetas a una diferencia de potencial, provocaría la ionización del aire, al presentarse el fenómeno conocido como descargas parciales, con el consiguiente deterioro del aislamiento. La situación anterior se elimina al colocar la pantalla semiconductora, la cual presenta una superficie uniforme¹⁰ (Fig. 3)

Las pantallas sobre el conductor sirven también como elemento de transición entre aquél y el aislamiento. En cables con aislamiento de papel, el impregnante en contacto con el cobre da lugar a compuestos químicos denominados jabones metálicos que degradan las características dieléctricas en este tipo de cables. Las pantallas evitan la formación de estos compuestos nocivos a los aislamientos.

Al colocarse la capa semiconductora de alivio de esfuerzos de alta tensión el nivel de voltaje se iguala prácticamente al del conductor en toda la periferia externa de esta capa, y dada la geometría de la capa semiconductora, es posible que se extruya sobre de ella la pantalla aislante sin alojar burbujas de aire. Lo que a su vez ayuda a que los esfuerzos eléctricos dentro del aislamiento sean simétricos, aprovechando al máximo el material aislante y prolongando al máximo la vida del mismo.

Algunas de las propiedades básicas de estas pantallas, específicamente de sus materiales son las siguientes:

Resistividad AC	750 Ω-cm
Resistividad DC	750 Ω-cm
Ampacidad máxima	5mA/cm
Temperatura de operación	90°C
Temperatura de sobrecarga (1hr max)	130°C

⁹ Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 24

¹⁰ Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 24

1.3 El Aislamiento Primario

La función del aislamiento es confinar la corriente eléctrica en el conductor y contener el campo eléctrico dentro de su masa.

En principio, las propiedades de los aislamientos son con frecuencia más que adecuadas para su aplicación, pero los efectos de la operación, medio ambiente, envejecimiento, etc., pueden degradar al aislamiento rápidamente hasta el punto en que llegue a fallar, por lo que es importante seleccionar el más adecuado.

De manera similar al caso de los conductores, existen factores que deben ser considerados en la selección de los aislamientos, como son:

- Características eléctricas.
- Características mecánicas.

1.3.1. Materiales

Dada la diversidad de tipos de aislamiento que hasta la fecha existen para cables de energía, el diseñador deberá tener presentes las características de cada uno de ellos, para su adecuada selección tanto en el aspecto técnico como en el económico.

Tradicionalmente, el papel impregnado en aceite ha sido el aislamiento que por su confiabilidad y economía se empleaba en mayor escala; sin embargo, la aparición de nuevos aislamientos tipo seco, aunado al mejoramiento de algunos ya existentes, obligan al ingeniero de proyectos a mantenerse actualizado respecto a las diferentes alternativas disponibles.

Los aislamientos se pueden dividir en dos grupos principales:

- A) De papel impregnado en aceite.
- B) Aislamientos de tipo seco.

1.3.1.1. Aislamientos de papel impregnado en aceite.

Emplean un papel especial obtenido de pulpa de madera, con celulosa de fibra larga.

El cable aislado con papel sin humedad se impregna con una sustancia para mejorar las características del aislante. Las sustancias más usuales son los compuestos que se listan a continuación, y la que se elija dependerá de la tensión y de la instalación del cable.

- 1.- Aceite viscoso.
- 2.- Aceite viscoso con resinas refinadas.
- 3.- Aceite viscoso con polímeros de hidrocarburos.
- 4.- Aceite de baja viscosidad.
- 5.- Parafinas microcristalinas del petróleo.

El compuesto ocupa todos los intersticios, eliminando las burbujas de aire en el papel y evitando así la ionización en servicio. Es por esto que el papel es uno de los materiales más usados en cables de alta tensión y en cables de extra alta tensión.

El compuesto podrá ser migrante o no migrante, de acuerdo al tipo de instalación del cable: Con poco desnivel (hasta 10m) para el primer tipo y con niveles mayores para el segundo.

1.3.1.2. Aislamientos de tipo seco

A excepción del hule natural (ya en desuso), los aislamientos secos son compuestos cuya resina base se obtiene de la polimerización de determinados hidrocarburos. Según su respuesta al calor se clasifican en dos tipos:

1.- Termoplásticos: Son aquellos que al calentarse, su plasticidad permite conformarlos a voluntad, recuperando sus propiedades iniciales al enfriarse, pero manteniendo la forma que se les imprimió.

2.- Termofijos: A diferencia de los anteriores, después de un proceso inicial similar al anterior, los subsecuentes calentamientos no los reblandecen.

A continuación se describen las características de algunos de los aislamientos tipo seco:

El PVC para aislamiento de cables de alta tensión, adquirió una importancia especial, gracias a sus ventajas sobre los plásticos conocidos en el momento en que se lanzó al mercado.

La alta rigidez dieléctrica y su resistencia a la ionización o efecto corona permiten su operación en cables de energía de hasta 23 KV.

El fabricante en su momento argumentó que la estabilidad de características, como la resistencia de aislamiento, factor de potencia y constante dieléctrica en presencia de humedad, lo convertían en lo más adecuado para ambientes húmedos. En general los cables de energía de PVC resultan ligeros (No requieren cubierta de plomo para todas las aplicaciones, comparándolos con el cable de aislamiento de papel impregnado en aceite), fáciles de instalar y preparar para colocación de accesorios empalmes y terminales.

Actualmente este tipo de aislamiento no se utiliza en cables de media tensión, debido a la superioridad de los materiales mencionados a continuación.

1.3.1.2.1. Comparación del EP con XLP:

El hule etileno propileno (EP) y el polietileno de cadena cruzada (XLP) fueron introducidos en servicio comercial en cables de 5KV a principios de 1961, y en cables de mayores tensiones en el año de 1962. Desde entonces se han instalado muchos kilómetros de cables con ambos aislamientos.

En general, las estadísticas de servicio para los dos materiales han sido satisfactorias. La mayoría de las fallas se han debido a daños mecánicos o a condiciones particulares del ambiente (presencia de agua, etc.)

Se reconoce con amplitud que la presencia de agua representa la condición ambiental más severa que se puede encontrar en servicio, para cualquier tipo de material que se utilice como aislamiento en cables de energía.

En particular, se sabe que los cables aislados con XLP o EP, y complementados con pantalla sobre el aislamiento a base de cintas textiles semiconductoras, son susceptibles a la formación de arborecencias cuando se instalan en lugares húmedos. Y si bien con el uso de semiconductores extruidos parece haber disminuido la incidencia de las fallas de este tipo, en pruebas de larga duración en agua se ha encontrado que se continúan desarrollando arborecencias potencialmente peligrosas.

Aunque los especialistas dedicados a la investigación de los mecanismos que rigen la presencia de arborecencias todavía no tienen una especificación completa del fenómeno, han llegado a la conclusión de que en la gama de esfuerzos de operación adoptados en la práctica, las arborecencias son causadas por tres factores concurrentes:

- Agua en el aislamiento.
- Tensión aplicada de c.a.
- Irregularidades en el aislamiento (Cavidades, impurezas, protuberancias en las pantallas semiconductoras).

En general, la presencia de estos tres factores causa una disminución en la vida del cable.

1.3.1.2.2. Pruebas relacionadas con la operación:

La selección de cables aislados con EP o XLP también se puede basar en la comparación del comportamiento en pruebas que simulen las condiciones de operación normal, sobrecarga y sobretensiones.¹¹

La calificación real para la tensión y temperatura de un cable debe determinarse tomando en cuenta los factores de esfuerzo que pueden estar presentes durante el servicio. Estos factores se pueden considerar en los tres grandes grupos siguientes:

- Factores eléctricos.
- Factores térmicos.
- Factores ambientales.

En correspondencia, las pruebas de laboratorio usadas para simular las condiciones de servicio son las siguientes:

- Pruebas de ruptura en tensión de c.a. y de impulso.

¹¹ (Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, pp. 1415.)

- Pruebas de envejecimiento bajo ciclos térmicos.
- Pruebas eléctricas de larga duración en agua.

El primer factor, el esfuerzo eléctrico de ruptura se evalúa a través de pruebas de corto tiempo, de tal manera que las condiciones reales de servicio prácticamente no se toman en cuenta. Por el contrario, en las pruebas de envejecimiento cíclico y larga duración en agua se combinan los factores térmicos y ambientales en los factores eléctricos.

1.3.1.2.2.1. Pruebas de ruptura en tensión de c.a. y de impulso:

Un cable aislado con XLP puede soportar, a temperatura ambiente, mayores tensiones de c.a. y de impulso que el EP, a menos que contenga burbujas o cavidades de grandes dimensiones o que sus pantallas hayan sido dañadas en tal forma que se desarrollen descargas parciales.

Esta situación se invierte a medida que pasamos de la temperatura ambiente a la de operación (90°C), sobrecarga (130°C) y cortocircuito (250°C).

El aislamiento de XLP empieza a perder sus características de soportar tensiones de c.a. y de impulso conforme la temperatura sobrepasa la temperatura de operación normal de 90°C.

Aún más, el intervalo de la temperatura de emergencia por sobrecargas, las propiedades físicas del XLP están en su totalidad por debajo de aquellas de un buen aislamiento EP.

Por otro lado existe bastante información acerca de la vulnerabilidad del XLP y el EP al ataque de las descargas parciales. En la práctica, incluso la presencia de microcavidades que apenas pueden ser detectadas con los equipos más elaborados diseñados a mediados de los ochentas puede reducir en más de un 30% de la vida útil de los cables con aislamiento seco.

1.3.1.2.2.2. Pruebas de envejecimiento cíclico.

Estas pruebas constituyen el método más efectivo de laboratorio para comprobar la confiabilidad en servicio de cables de media tensión. el factor más importante es el tiempo que tarda en presentarse la ruptura, aunque también deben considerarse los niveles de descargas parciales y los cambios de la $\tan \delta$.

En conclusión, el envejecimiento eléctrico de un cable parece estar gobernado por la presencia de microcavidades de descargas parciales.

Cuando se prueban los cables bajo esfuerzos térmicos, debe considerarse que los cables de energía están diseñados para tres gamas de temperatura, cada una relacionada con una duración típica:

- Temperatura de servicio normal o continuo.
- Temperatura de emergencia por sobrecarga, hasta 100h por año.

- Temperatura de corto circuito, normalmente hasta de 1 seg.

Tanto los cables de energía aislados con EP como con XLP están calificados actualmente para temperaturas normales de 90°C en servicio continuo, 130°C en emergencias o sobrecargas y 250°C por corto circuito.

En particular, para las altas temperaturas, debe garantizarse estabilidad mecánica del sistema de pantallas.

Como el XLP tiene un mayor coeficiente de expansión térmica que la del EP, se expande y se contrae con los mismos cambios de temperatura en mayor grado que el aislamiento EP. Esto hace que sea más difícil lograr confiabilidad a largo tiempo en las pantallas, en cables con XLP, incluso con las más avanzadas tecnologías.

Cuando se combina con la superficie cerosa y deslizante del XLP, esta característica de expansión térmica dificulta la confección de empalmes y terminales confiables en campo.

Es más la tendencia del XLP a deslizarse y fluir durante los ciclos térmicos extremos, ha sido relacionada por algunos autores con el posible desarrollo consecuente de cavidades en los empalmes y terminales, los cuales muy probablemente pueden ser áreas para concentración de humedad y descargas parciales.

Como se menciona en diversos artículos, el EP no exhibe el mismo grado de concentración longitudinal, expansión radial y características de flujo que tiene el XLP a temperaturas superiores a 100°C.

1.3.1.2.2.3. Pruebas de larga duración en agua.

Los cables instalados en ductos y directamente enterrados con frecuencia se exponen a agentes en los que el agua es más frecuente.

El agua es una severa condición ambiental, debido a que, en su presencia la resistencia del cable a los esfuerzos térmicos y eléctricos se reduce.

La mejor prueba para comprobar y predecir la probabilidad de supervivencia de un cable, es una prueba acelerada de larga duración que simula el efecto de este ambiente sobre los cables. En esta prueba, ampliamente usada en muchos laboratorios industriales para calificar diferentes tipos de aislamiento, los cables con EP superan en todo caso a los cables con XLP, con un promedio de vida por lo menos del doble. Esta mayor resistencia al agua y al esfuerzo es otra importante razón para preferir los cables aislados con EP a los cables aislados con XLP.

Debido a la disminución de las expectativas de vida en agua, es necesario especialmente en el caso de cables con XLP, reducir tanto como sea posible las irregularidades (cavidades, inclusiones debidas a contaminaciones, etc.) y, para los enlaces más importantes, aplicar una cubierta metálica para prevenir la penetración de agua.

1.3.1.2.3. Instalación:

Algunos usuarios prefieren el EP, por su mayor flexibilidad, la cual lo hace superior al XLP al facilitar su manejo durante la instalación. Esta preferencia se hace más notable en el caso de cables de muy altas tensiones. La dureza de los cables XLP de grandes dimensiones ha forzado a algunos usuarios a precalentar los extremos de los mismos en los pozos, sólo para colocar el cable en posición adecuada para empalmar.

1.3.2. Características eléctricas

A continuación se presentan las definiciones y conceptos relativos de las principales características que identifican a los aislamientos. la comprensión de estas definiciones permitirá hacer una selección más adecuada. en la siguiente tabla se muestran los valores típicos de estas características para los diferentes aislamientos.¹²

Tabla 8.

CARACTERÍSTICAS	PVC	XLP	EP	Pimp.
Rigidez dieléctrica, KV/mm (Corriente alterna, elevación rápida.)	18	25	25	28
Rigidez dieléctrica, KV/mm, (impulsos)	47	50	50	70
Permitividad relativa SIC. (60 Hz, Temp. de op.)	7	2.1	2.6	3.9
Factor de potencia, % máx (60Hz, Temp. de op.)	9	0.1	1.5	1.1
Constante K de resistencia del aislamiento a 15.6°C (Megaohm-km) mínima.	750	6100	6100	1000
Resistencia a ionización	B	B	MB	B
Resistencia a la humedad	B	MB	E	M
Factor de pérdidas	M	B	E	B
Flexibilidad	R	M	E	R
Facilidad de instalación de accesorios	E	R	MB	R
Temperatura de operación normal (°C)	75	90	90	85
Temperatura de sobrecarga	100	130	130	100
Temperatura de cortocircuito	160	250	250	160

¹² Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 19

Material	Principales Ventajas	Principales Desventajas
PVC	- Bajo costo. - Resistente a la ionización. - Facilidad de instalación.	- Pérdidas dieléctricas relativamente altas.
XLP	- Factor de pérdidas bajo	- Rigidez mecánica. - Baja resistencia a la ionización.
EP	- Bajo factor de pérdidas. - Flexibilidad. - Resistente a la ionización.	- Es atacable por hidrocarburos a temperaturas superiores a 60°C
P Impreg.	- Bajo costo. - Experiencia de años. - Excelentes propiedades eléctricas	- Requiere tubo de plomo. - Accesorios más complicados.

1.3.2.1. Rigidez dieléctrica

La rigidez dieléctrica de un material aislante es el valor de la intensidad del campo eléctrico al que hay que someterlo para que se produzca una perforación en el aislamiento. Normalmente, este valor es cercano al del gradiente de prueba y de 4 a 5 veces mayor que el gradiente de operación normal. Las unidades en que se expresa este valor por lo común son KV/mm, ó KV/mil.

1.3.2.2. Gradiente de operación

El gradiente de esfuerzo de tensión de operación de un cable en cualquier punto "X" del aislamiento, se calcula con la siguiente expresión:¹³ (Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 17)

$$G = \frac{0.869V_n}{x \log_{10} \frac{d_n}{d_p}} \text{ KV/mm}$$

Donde: -

$V_o \Rightarrow$ Tensión al neutro del sistema (en KV)

$d_n \Rightarrow$ diámetro sobre el aislamiento (en mm).

$d_p \Rightarrow$ diámetro sobre la pantalla semiconductora sobre el conductor (en mm).

$x \Rightarrow$ distancia a la que se desea conocer el valor del gradiente (en mm).

De la fórmula anterior se puede obtener el gradiente máximo que se presenta en la parte interna del aislamiento, y el gradiente mínimo que se presenta en la parte externa del mismo.

¹³Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 17

$$G_{\max} = \frac{0.869V_u}{d_p \log_{10} \frac{d_u}{d_p}}$$

$$G_{\min} = \frac{0.869V_u}{d_u \log_{10} \frac{d_u}{d_p}}$$

1.3.2.3. Resistencia de aislamiento.

La diferencia de potencial entre el conductor y la parte externa del aislamiento hará circular una pequeña corriente llamada de fuga, a través del mismo; y la resistencia que se opone al paso de esta corriente se conoce como resistencia del aislamiento (R_a). El aislamiento perfecto sería entonces el que tuviera una resistencia de valor infinito y que, por tanto, inhibiría por completo el paso de esta corriente. El valor de R_a está dado por la siguiente expresión, por lo común en megaohms por kilómetro.

$$R_a = K \log_{10} \frac{d_u}{d_p}$$

Donde:

$K \Rightarrow$ Un valor constante característico del material aislante.

1.3.2.4. Factor de potencia.

Este factor nos permite relacionar y calcular las pérdidas del dieléctrico de los cables de energía.

1.3.2.5. Tan δ

Es también un factor que permite relacionar y calcular las pérdidas en el dieléctrico de los cables de energía y corresponde a la tangente del ángulo δ complementario del ángulo ϕ .

Se puede observar de las definiciones anteriores que para ángulos cercanos a 90° que, en general, es el caso de los aislamientos, el valor del factor de potencia y la tan δ son prácticamente el mismo, por lo que ambos factores se utilizan indistintamente para definir las pérdidas en el aislamiento.

1.3.3. Características mecánicas.

El esfuerzo inicial aplicado durante el desarrollo de compuestos aislantes fue dirigido a las características eléctricas. las características mecánicas jugaban un papel secundario, y estaban definidas por las propiedades intrínsecas de los materiales con que se había logrado la eficiencia máxima de las propiedades eléctricas. Tradicionalmente la protección mecánica está dada por las cubiertas metálicas, termoplásticas y termofijas.

Los desarrollos recientes realizados con base en las causas prevalecientes de fallas en cables, han sido enfocadas a resaltar las características mecánicas de los aislamientos.

considerándolas junto con las de la cubierta. A continuación se mencionan algunas de las más importantes:

1.3.3.1. Resistencia a humedad.

Los cables de energía frecuentemente entran en contacto con humedad y el cable absorbe agua a una velocidad que queda determinada por las temperaturas del medio ambiente, temperatura del conductor, temperatura en el aislamiento, y la permeabilidad del aislamiento y cubierta.

El método usual para cuantificar la resistencia a la penetración de humedad es la medición gravimétrica de la cantidad de agua absorbida por los aislamientos después de sumergirlos en agua caliente durante un cierto período.

Los aislamientos de papel resultan los más sensibles a la absorción de humedad, por lo que es prácticamente imposible utilizarlos sin cubierta metálica adecuada, con las consecuentes desventajas de manejo e instalación.

Para el caso de los aislamientos sólidos que se encuentran en contacto con el agua, el valor gravimétrico de absorción de humedad no es por sí solo un índice para calificar el comportamiento del material en presencia de humedad, sobre todo cuando al mismo tiempo se tiene un potencial aplicado en el mismo. La evidencia muestra que la absorción de humedad es causa de fallas, que se presentan en forma de ramificaciones conocidas como arborescencias. Sin embargo es difícil explicar por que hay aislamientos más resistentes que otros a las mismas, a pesar del contenido de agua. Esto es particularmente cierto al comparar el EP con el XLP. Las mediciones muestran que el agua penetra con mayor rapidez al EP, sin embargo, con un potencial aplicado en presencia del agua, el XLP muestra una probabilidad mayor de falla, por lo que en lugares húmedos el EP resulta mejor alternativa.

1.3.3.2. Flexibilidad.

Por supuesto que las características de flexibilidad del aislamiento deben ser compatibles con los demás elementos del cable. Por lo tanto, los conceptos que se mencionan a continuación son aplicables al cable en general.

La flexibilidad de un cable es una de las características más difíciles de cuantificar. De hecho, es uno de los conceptos comúnmente usados para describir la construcción de un cable; sin embargo, por sorprendente que parezca, no existe un estándar de comparación. No existe a la fecha ningún método de prueba para medir el grado o magnitud de flexibilidad.

Sin embargo, la mejor base para evaluar la flexibilidad es a través de las ventajas que da lugar en los cables de energía, la cual en última instancia, es una manera de apreciarla. A continuación se enuncian las ventajas de la flexibilidad:

- 1.- Mayor facilidad para sacar o meter el cable en el carrete, lo que minimiza la probabilidad de daño al momento de instalar.

2.- Mayor facilidad para colocar en posición en la instalación, especialmente en lugares estrechos.

3.- La construcción del cable permite dobleces y cambio de dirección en general, sin menoscabo de la integridad del mismo, conduce evidentemente a una instalación confiable.

4.- Un manejo sencillo de un material contribuye a que los instaladores trabajen con más rapidez y menos esfuerzo, evitando que pongan en práctica métodos que resultarían perjudiciales, como calentar el cable para permitir dobleces, etc.

1.3.4. Nivel del aislamiento.

Una vez seleccionado el material apropiado para el aislamiento del cable, es necesario determinar el espesor de acuerdo con el fabricante, tomando como base la tensión de operación entre fases y las características del sistema según la clasificación siguiente:

1.3.4.1. Nivel 100%

Quedarán incluidos en esta clasificación los cables que se usen en sistemas protegidos con relevadores que liberen fallas a tierra lo más rápido posible, en un tiempo no mayor a un minuto. Este nivel de aislamiento es aplicable a la mayoría de los sistemas con neutro a tierra y puede también aplicarse a otros sistemas (en los puntos de aplicación del cable) donde la razón entre la reactancia de secuencia cero y de secuencia positiva (X_0/X_1) no esté en el intervalo de -1 a -41 y que cumplan la condición de liberación de falla, ya que en los sistemas incluidos en el intervalo descrito pueden encontrarse valores de tensión excesivamente altos en condiciones de falla a tierra.

1.3.4.2. Nivel 133%:

Anteriormente, en esta categoría se agrupaban los sistemas con neutro aislado. En la actualidad, se incluyen los cables destinados a instalaciones en donde las condiciones de tiempo de operación de las protecciones no cumplen con los requisitos del nivel 100%, pero que, en cualquier caso se libera la falla en no más de una hora.

El nivel 133% se podrá usar también en aquellas instalaciones donde se desee un espesor de aislamiento mayor al 100%. Por ejemplo, cables submarinos, en los que los esfuerzos mecánicos propios de la instalación y las características de operación requieren un nivel de aislamiento mayor.

1.3.4.3. Nivel 173%:

Los cables de esta categoría deberán aplicarse en sistemas en los que el tiempo para liberar una falla no está definido. También se recomienda el uso de cables de este nivel en sistemas con problemas de resonancia, en los que se pueden presentar sobretensiones de gran magnitud.

1.3.4.4. Repercusión del nivel de aislamiento sobre un accesorio:

El nivel de aislamiento de un cable, repercutirá sobre la correcta selección de un determinado accesorio, ya que el ensanchamiento del aislamiento provocará que el accesorio requiera una capacidad adicional para cubrirlo. Sin embargo, el accesorio no deberá cambiar su nivel de aislamiento, es decir, si se tiene un cable de 15KV con nivel de

aislamiento del 133%, se deberá escoger un accesorio de 15KV con capacidad para un calibre ajustado.

1.4 Pantalla del aislamiento

En circuitos de 5KV y superiores se utilizan pantallas sobre el aislamiento que, a su vez se subdividen en:

- Pantalla semiconductor
- Pantalla metálica.

Existen excepciones al uso de esta pantalla, ya que dentro de los límites de 2 a 5KV inclusive, se puede no utilizar pantallas sobre aislamiento, de aquí que interviene una gran cantidad de dosis de sentido común para considerar la aplicación de las pantallas. 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 procurar e instalar.

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

Las pantallas sobre el aislamiento deben ser consideradas para cables de energía arriba de 5,000 Volts, cuando existan cualquiera de las siguientes condiciones:

- a) Conexiones a líneas aéreas.
- b) Transición a ambiente de diferente conductancia.
- c) Transición de terrenos húmedo a seco.
- d) Terrenos secos, de tipo desértico.
- e) Conduits anegados o húmedos.
- f) En donde se utilizan compuestos para facilitar el jalado del cable.
- g) Donde fácilmente se depositen en la superficie del cable materiales conductores tales como hollín, sales, etc.
- h) Donde pudieran presentarse problemas de radiointerferencia.
- i) Donde se involucre la seguridad del personal.

Así mismo existen situaciones donde se debe considerar el uso de cables sin pantalla, ya que el caso contrario crea graves situaciones de peligro:

- a) Cuando las pantallas no se pueden aterrizar adecuadamente.
- b) Cuando el espacio es inadecuado para terminar correctamente la pantalla.
- c) En cables monopolares:
 - 1.- Cuando se tienen cables sin empalmes en conduit metálico aéreo, en interiores y en lugares secos.
 - 2.- Instalados sobre aisladores en ambientes no contaminados.
 - 3.- Cables aislados en instalaciones aéreas sujetas a un mensajero aterrizado.
- d) En cables triplex:
 - 1.- Instalados en conduit aéreo o charolas, en interiores y lugares secos.
 - 2.- Cables aislados en instalaciones aéreas sujetas a un mensajero aterrizado.

De igual modo, la NOM-001-SEMP, en su apartado 310-6 indica lo siguiente:

" Blindaje. Los conductores aislados dieléctricos sólidos en instalaciones permanentes que funcionan a más de 2,000 volts, deben tener un aislamiento resistente al ozono y estar blindados. Todos los blindajes metálicos de aislamiento se deben poner a tierra por un método eficaz que cumpla los requisitos de la sección 250-51. El blindaje debe servir para el propósito de confinar los esfuerzos de voltaje al aislamiento.

Excepción: Se permite usar conductores aislados no blindados certificados por un laboratorio de ensayos calificado, en instalaciones de hasta 8,000 volts, con las siguientes condiciones:

a. Los conductores deben tener un aislamiento resistente a las descargas eléctricas y las corrientes parásitas superficiales o, si están aislados, deben ir recubiertos de un material resistente al ozono, a las descargas eléctricas y a las corrientes parásitas superficiales.

b. Cuando se usen en lugares mojados, los conductores aislados deben tener un forro no metálico que les cubra totalmente o un forro metálico continuo.

c. Cuando funcionen entre 5,001 y 8,000 volts, los conductores aislados deben llevar un recubrimiento no metálico sobre el aislamiento. El aislamiento debe tener una capacidad inductiva específica no mayor a 3.6 y el recubrimiento una capacidad inductiva no menor a 6 y no mayor a 10.

d. El grosor del aislamiento y del recubrimiento deben ser según la tabla 310-63."

Además en su artículo 310-7 habla sobre los conductores directamente enterrados indicando:

" Los conductores que vayan directamente enterrados deben ser de un tipo identificado para ese uso.

Los cables de más de 2,000 volts nominales deben ir blindados.

Excepción: Se permite usar cables multiconductores no blindados entre 2,001 y 5,000 volts si el cable tiene una armadura o forro metálico a todo lo largo. El blindaje, forro o armadura metálica se deben conectar a tierra por un método eficaz que cumpla los requisitos de la sección 250-51"

Finalmente, para hacer referencia a los requisitos antes mencionados, se transcribe la sección 250-51:

"Trayectoria efectiva de puesta a tierra: La trayectoria a tierra desde los circuitos, equipos y cubiertas metálicas de conductores debe ser (1) permanente y eléctricamente continua, (2) de capacidad suficiente para conducir con seguridad cualquier corriente de falla que pueda producirse y (3) de una impedancia suficientemente baja como para limitar la tensión a tierra y facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección del circuito."

En conjunto, las funciones de las pantallas sobre el aislamiento son:

- A) Crear una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos en la dirección de máxima resistencia del aislamiento.
- B) Proveer al cable de una capacitancia a tierra uniforme.
- C) Reducir el peligro de descargas eléctricas al personal o en presencia de productos inflamables.

1.4.1. Distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos en la dirección de máxima resistencia del aislamiento:

Los cables de energía, bajo el potencial aplicado, quedan sometidos a esfuerzos eléctricos radiales, tangenciales y longitudinales.

Los esfuerzos radiales están siempre presentes en el aislamiento de los cables energizados. El aislamiento cumplirá su función en forma eficiente si el campo eléctrico se distribuye uniformemente. Una distribución no uniforme conduce a un incremento de estos esfuerzos en porciones del cable, con el consecuente deterioro.¹⁴ (Fig. 4)

Esfuerzos tangenciales y longitudinales: Ahora bien, uno de los principios básicos de los campos eléctricos es que al aplicar una tensión a dieléctricos colocados en serie, con diferente permitividad relativa ($K_1 \neq K_2$) se dividirá en razón inversa a las permitividades relativas de ambos materiales.

En el caso de cables de energía desprovistos de 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 acercarse al potencial del conductor, si el del dieléctrico, cubierta y medio ambiente es de gran magnitud, y/o el potencial de tierra, cuando la superficie del aislamiento esté cerca de secciones aterrizadas.

Las diferentes tensiones superficiales que se presentarían 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 cables multiconductores, cuando cada uno de los conductores no está apantallado, y en cualquier parte del cable monopolar 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

El contacto íntimo entre la pantalla semiconductor con el aislamiento, la conexión física adecuada de la pantalla metálica a tierra y, en general, la correcta aplicación de las

¹⁴ Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 25

pantallas sobre el aislamiento asegura la eliminación de los esfuerzos longitudinales y tangenciales.¹⁵ (Fig 5.)

1.4.2. Provisión de una capacitancia a tierra uniforme para el cable.

Los cables que se instalan en ductos o directamente enterrados, por lo general pasarán por secciones de terreno húmedo y seco o ductos de características eléctricas variables. Esto da como resultado una capacitancia a tierra variable, y, como consecuencia, una impedancia no uniforme. (fig. 6) (Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 26)

Cuando se presentan en el sistema ondas de tensión debidas a descargas atmosféricas y operaciones de maniobra, viajan a través del cable produciéndose reflexiones en los puntos de variación de impedancia, lo que da lugar a ondas de sobretensión que producirán fallas en el cable.

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

- a) Al presentar una impedancia uniforme, evitando reflexiones y eliminando la posibilidad de producir sobre tensiones dañinas al aislamiento.
- b) Proveer al cable de la máxima capacitancia del conductor a tierra y, consecuentemente, reducir al mínimo las ondas de sobretensión.
- c) Absorber energía de las ondas de sobretensión al introducir en la pantalla una corriente proporcional a la del conductor
- d) Reducir el peligro de choque eléctrico al personal y proveer un drenaje adecuado a tierra de las corrientes capacitivas.

1.4.3. Reducción del peligro de descargas eléctricas al personal o en presencia de productos inflamables.

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

- a) 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 del cable se descargaran súbitamente en el punto de contacto. La pantalla aterrizada de modo adecuado proporciona la trayectoria necesaria para estas corrientes capacitivas.
- b) Aunque el contacto que se tuviera con la cubierta no fuera letal, el choque eléctrico puede dar lugar a caídas y accidentes de gravedad.
- c) La diferencia de potencial pudiera superar la rigidez dieléctrica del aire y producir descargas, que en presencia de materiales combustibles o explosivos fueran de características desastrosas.

¹⁵ Manual Técnico de Cables de Energía. V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, p. 26

Por otra parte, cuando se tiene el sistema adecuado de pantallas, se deberá buscar siempre que operen a los potenciales lo más cercanos a tierra como se pueda. Las situaciones de peligro que se derivan de no observar esta práctica resultan aún más críticas desde el punto de vista seguridad, que las que ocasionan los cables sin pantalla. El potencial que se induce en la pantalla en longitudes considerables puede alcanzar valores muy cercanos al potencial del conductor, lo que da lugar a una condición más peligrosa.

Por lo tanto la conexión física a tierra de las pantallas, en dos o más puntos, es una práctica que deberá observarse con especial cuidado.

1.4.4 Pantalla Semiconductora sobre el aislamiento.

La pantalla semiconductora sobre el aislamiento se encuentra en contacto inmediato con éste. Está formada por un material semiconductor compatible con el material del aislamiento. En adición a las funciones descritas, esta pantalla asegura el contacto íntimo con el aislamiento, aún en el caso de movimiento de la pantalla metálica (fig 7)

La pantalla semiconductora sobre el aislamiento, para cables con aislamiento seco está constituida por una capa de material termoplástico o termofijo semiconductor, o bien, por cinta semiconductora y/o barniz semiconductor. Para cables aislados con papel impregnado en aceite se emplean cintas de papel CB (Carbon Black) semiconductoras.

1.4.5 Pantalla metálica

La pantalla metálica puede constar de alambres, cintas planas o corrugadas o combinación de alambres y cinta. En el caso de cables aislados con papel, en ocasiones la cubierta de plomo hace las veces de la pantalla. El diseño de la pantalla metálica se debe efectuar de acuerdo al propósito de diseño, que puede ser:

- a) Para propósitos electrostáticos.
- b) Para conducir corriente de falla.
- c) Como pantalla al neutro.

A continuación se presentan las características de selección de acuerdo a cada propósito de diseño:

1.4.5.1. 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).

Las pantallas constituidas a base de cintas o de alambres son generalmente de cobre normal, aunque pueden utilizarse en ambos casos cobre estañado; éstas últimas se utilizan donde se pudiera prever problemas graves de corrosión derivados de las condiciones de instalación. En la tabla 3.1 se presenta el cuadro comparativo de pantallas a base de cintas con las de alambres. (fig 8.)

1.4.5.2. Pantallas para conducir corrientes de falla.

En la pantalla metálica se puede requerir una conductancia adicional para conducir corrientes de falla (Fig. 8), dependiendo de la instalación y características eléctricas del sistema, particularmente con relación al funcionamiento de dispositivos de protección por sobrecorriente, corriente prevista de falla fase a tierra y la manera en que el sistema puede ser aterrizado.

1.4.5.3. Pantalla neutro.

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

1.4.5.4 Pantallas para proveer hermeticidad.

Estas garantizan al cable una pantalla electrostática adecuada a lo largo de su vida útil, además de la hermeticidad que se deriva de tener una cubierta continua, la cual generalmente es de PVC, y en algunos casos particulares como el de Petróleos Mexicanos, se requieren pantallas de plomo adicionales, ya que los hidrocarburos presentes en las instalaciones penetran el PVC y en algunos casos lo pueden incluso desintegrar. La pantalla de plomo es particularmente necesaria para los cables aislados con papel impregnado en aceite, o con aislamiento sólido que operen en lugares contaminados. Por otra parte, la cubierta de plomo, por los espesores que se requieren desde el punto de vista mecánico, proporciona una ampacidad adicional aprovechable para conducir corriente de falla.

Tabla 9.

Tipo de pantalla	Ventajas	Desventajas.
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.
De alambres	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona una pantalla electrostática adecuada. - Las características eléctricas son consistentes y controlables. - Fácilmente se incrementa la capacidad modificando el número de alambres. - No 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.

1.5 Cubierta del cable.

La función básica de los cables de potencia puede resumirse en dos palabras: "transmitir energía". Para cubrir esta función en forma efectiva las características del cable deben preservarse durante el tiempo de operación.

La función primordial de las cubiertas en sus diferentes combinaciones es la de proteger el cable de los agentes externos del medio ambiente que lo rodea, tanto en la operación como en la instalación.

La selección del material de la cubierta de un cable dependerá de su aplicación de la naturaleza de los agentes externos contra los cuales se desea proteger el cable.

Las cubiertas pueden ser principalmente de los siguientes materiales:

- a) Metálicas
- b) Termoplásticas.

- c) Elastoméricas.
- d) Textiles.

Para definir los límites de aplicación de los materiales de las cubiertas o sus combinaciones es necesario conocer las exigencias a que pueden quedar expuestos los cables de energía por el medio ambiente de la instalación, exigencias que se pueden dividir de la siguiente manera:

1.- Térmicas: La temperatura de operación en la cubierta es de vital importancia, al igual que en el de los aislamientos. Sobrepasar los límites establecidos conduce a una degradación prematura de las cubiertas.

2.- Químicas: Los componentes de los cables son compuestos o mezclas químicas y, como tales, su resistencia ante ciertos elementos del medio donde se instalen son previsible y muy importantes de considerar para la selección del material de la cubierta.

3.- Mecánicas: Los daños mecánicos a que pueden estar sujetos los cables de energía se ceban, para cables en instalaciones fijas, a los derivados del manejo en el transporte e instalación como son: Radios de curvatura pequeños, tensión excesiva, compresión, cortes, abrasión, etc., los cuales reducen la vida del cable por completo.

A continuación se presentan las propiedades de las cubiertas en cuanto a los requisitos antes mencionados, contemplando que la cubierta de origen textil ya no se encuentra disponible en el mercado.

Tabla 10.

Características:	PVC	P bd	P ad	N	Hyp	Pb
Resistencia a la humedad	B	E	E	B	MB	E
Resistencia a la abrasión	B	B	E	MB	MB	M
Resistencia a golpes	B	B	MB	E	E	M
Flexibilidad	B	B	R	E	E	R
Doble en frío	R	E	MB	B	R	-
Propiedades eléctricas	MB	E	E	R	B	-
Resistencia a la intemperie	MB	E*	E*	B	E*	MB
Resistencia a la flama	MB	M	M	B	B	B
Resistencia al calor	B	M	R	MB	E	MB
Resistencia a la radiación nuclear	R	B	B	B	MB	E
Resistencia a la oxidación	E	R	R	MB	E	B
Resistencia al ozono	E	E	E	B	E	E
Resistencia al efecto corona	E	B	B	R	B	E
Resistencia al corte por compresión	B	B	B	MB	B	M
Resistencia a ácidos						
- Sulfúrico al 30%	E	E	E	R	R	E
- Sulfúrico al 3%	E	E	E	R	R	E
- Nítrico al 10%	R	E	E	R	R	M
- Clorhídrico al 10%	B	E	E	R	R	R
- Fosfórico al 10%	E	E	E	R	R	B
Resistencia a álcalis y sales:						

- Hidróxido de sodio al 10%	E	E	E	M	R	B
- Carbonato de sodio al 2%	B	E	E	R	R	B
- Cloruro de sodio al 10%	E	E	E	B	B	B
Resistencia a agentes químicos orgánicos.						
- Acetona	M	B	B	B	B	E
- Tetracloruro de carbono	B	B	B	M	M	E
- Aceites	E	B	B	B	B	E
- Gasolina	B	B	B	B	B	E
- Creosota	R	B	B	M	M	-
Temperatura de operación mínima (°C)	-55	-60	-60	-30	-30	-
Temperatura de operación máxima (°C)	+75	+75	-75	+90	+105	-
Densidad relativa	1.4	0.9	1.0	1.3	1.2	11.3

PVC=PVC P bc= Polietileno de baja densidad P ad= Polietileno de alta densidad.

N= Neopreno Hyp= " Clorosulfonado Hypalon Pb= Plomo.

E= Excelente MB= Muy Buena B=Buena

M= Mala *= Sólo en color negro, contenido negro de humo.

1.5.1. Cubiertas metálicas:

El material normalmente usado en este tipo de cubiertas es el plomo y sus aleaciones. Otrometal que también se emplea aunque en menor escala es el aluminio.

1.5.2. Cubiertas termoplásticas:

Las más usuales son fabricadas con PVC (Cloruro de Polivinilo) y polietileno de alta y baja densidad.

1.5.3. Cubiertas elastoméricas:

Básicamente se utiliza neopreno (Policloropreno) y Hypalon (Polietileno clorosulfonado).

1.5.4. Cubiertas textiles:

En este tipo de cubiertas se emplea una combinación de yute impregnado en asfalto y recubierto con un baño final de cal y talco, con el fin de evitar que se adhieran las capas adyacentes.

CAPITULO 2.- ACCESORIOS EMPALMES.

CAPITULO 2.- ACCESORIOS EMPALMES

2.1 Definición y generalidades:

2.1.1. Definición: (Empalme de media tensión)

Un empalme es el accesorio que une dos extremos de cable de potencia de media tensión reconstruyendo las funciones de cada una de las pantallas del mismo.

2.1.2. Aplicaciones:

Lo anterior puede ser con el fin de unir dos bobinas de cable (Ya que la longitud máxima de una bobina de cable es limitada para facilitar su transporte), o bien para reconstruir un tramo de cable que sufrió algún desperfecto y debe ser reconstruido.

Una de las principales causas de fallas de cables es la presencia de roedores que consideran el cable (PVC, XLP, etc.) como alimento y roen dichas pantallas hasta que sufren una descarga eléctrica. Una posible razón de esto es que al introducir el cable se emplean lubricantes de origen vegetal o animal, tales como grasa o manteca, ésto le da al cable un aroma atractivo a los roedores, por lo cual se recomienda utilizar lubricantes que no sean de origen animal o vegetal.

Se debe considerar que actualmente en las normas de las compañías de distribución eléctrica se excluye la posibilidad de aceptar empalmes en obras nuevas, lo cual indica que siempre es preferible tener un cable continuo que uniones a lo largo de éste.

2.1.3. Continuidad de pantallas:

No siempre la forma como trabajan los empalmes es dando continuidad a cada una de las pantallas del cable, esto es debido a que las únicas pantallas que requieren ser continuadas estrictamente son las siguientes:

- Conductor: Ya que por esta parte del cable corre la potencia que está siendo transmitida.
- Aislamiento: Debido a que no puede quedar ninguna parte del conductor sin aislamiento hasta llegar al accesorio terminal.
- Pantalla metálica electrostática: Debido a que por esta pantalla corren las señales de tierra y las que indican falla, además de que el no tener un correcto apantallamiento en cualquier punto del cable ocasionará una concentración de esfuerzos que derivarán en un decremento de la vida útil del cable.

- Cubierta del cable: No es conveniente el que cualquier parte del cable quede expuesto al efecto del medio ambiente, sino que se le debe dar una protección continua a todo lo largo del mismo para evitar que la abrasión, humedad y otros agentes del medio perjudiquen a las pantallas del cable, ya que como estudiamos en el capítulo anterior, el que las pantallas aislantes reciban el contacto de agua, generará en éstas una determinada absorción de líquido y su consiguiente pérdida en capacidad de aislamiento. Además de que un solo punto de penetración de humedad puede degradar muchos metros de cable, y provocar la interrupción de servicio a una gran cantidad de usuarios.

Las pantallas semiconductoras no requieren ser continuadas por fuerza, y de hecho no todas las tecnologías dan continuidad a la pantalla semiconductor adherida al conductor, sino que forman una jaula de Faraday la cual evita que se presente el efecto corona de una forma igual de eficiente que la pantalla completamente adherida al conductor, tal es el caso de las tecnologías premoldeada, termocontráctil y contráctil en frío.

De hecho todas las tecnologías sí le dan continuidad a la pantalla semiconductor electrostática, sin embargo esto se debe a que no se puede dejar ningún punto con aire encerrado entre la pantalla metálica electrostática y el aislamiento primario, de modo que para lograr esto es necesaria la presencia de la pantalla semiconductor electrostática en todo punto del cable/empalme.

2.2 Normatividad en empalmes.

En México la norma que rige las propiedades y pruebas de los empalmes es la NOM-J-158, la cual se revisó por última vez en 1979, por lo cual se considera obsoleta no obstante la mención que la NOM-001-SEMP hace de ésta. Actualmente existen proyectos de renovar esta norma en base a la norma IEEE-std-404 revisada en 1992. La misma norma IEEE es la que sirvió de base para elaborar la norma de 1979, pero en base a una versión mucho anterior.

2.2.1 Pruebas a las que debe ser sometido un empalme:

2.2.1.1. Pruebas de diseño o de prototipo:

2.2.1.1.1. Objetivo:

El objetivo de estas pruebas es determinar si el diseño de un nuevo empalme se encuentra en condiciones de trabajar adecuadamente sobre el cable para el cual fue diseñado, es por eso que la norma exige que las pruebas sean sobre el tipo de cable específico para el que se diseñó el empalme, con cada uno de los accesorios que deben integrarse a éste.

2.2.1.1.2. Listado de pruebas que solicita la norma y tren de pruebas:

2.2.1.1.2.1. Tren de pruebas de diseño correspondiente a empalmes para cables con aislamiento extruido: (Norma IEEE-std-404-1993, Tabla 4 . p. 8.)

Tabla 11.- Secuencia de pruebas de los empalmes para cable con aislamiento extruido.

Prueba	Número mínimo de muestras requeridas.					
	3	3	3	3	3	4
Descargas parciales	X					
Aguante de tensión de corriente alterna.	X					
Aguante de tensión de corriente directa	X					
Aguante de tensión de impulsos a 25°C	X					
Aguante de tensión de impulsos a temperatura de emergencia.	X					
Descargas parciales	X	X	X			
Ciclos de envejecimiento		X	X			
Descargas parciales		X	X			
Tiempo de alto voltaje		X	X			
Prueba de seccionadores (para más de 46KV).		X	X			
Prueba de corriente de corta duración				X		
Aguante de tensión alterna.				X		
Apantallamiento					X	
Prueba termomecánica del conector.						X

2.2.1.1.2.2. Tren de pruebas de diseño correspondiente a empalmes para cables con aislamiento laminado: (Norma IEEE-std-404-1993, Tabla 6, p. 9.)

Tabla 12.

Prueba	Número mínimo de muestras requeridas	
	3	4
Aguante de tensión de corriente alterna	X	
Aguante de tensión de corriente directa	X	
Aguante de tensión de impulsos a temperatura de emergencia	X	
Prueba termomecánica al conector		X

2.2.1.1.2.1. Tren de pruebas de diseño correspondiente a empalmes de transición: (Norma IEEE-std-404-1993, Tabla 5, p. 9.)

Tabla 13.

Prueba	Número mínimo de muestras requeridas		
	4	2	4
Aguante de tensión de corriente alterna	X		
Aguante de tensión de corriente directa	X		

Aguante de tensión de impulsos a 25°C	X		
Aguante de tensión de impulsos a la temperatura de emergencia	X		
Prueba de ionización.	X		
Prueba de envejecimiento.	X		
Prueba de ionización.	X		
Prueba de tiempo de alto voltaje	X		
Prueba de seccionadores	X		
Prueba de apantallamiento		X	
Prueba termomecánica del conector.			X

2.2.1.2. Pruebas de rutina.

2.2.1.2.1. Objetivo:

Existen dos principales objetivos al realizar estas pruebas, el primero es cuando se efectúan en la fábrica, y otro distinto se persigue cuando las pruebas se efectúan en campo.

En el primer caso, el objetivo es el de asegurarse de que cada uno de los empalmes que se han elaborado está libre de burbujas de aire atrapadas, las cuales, degradarían el aislamiento al momento de conectarse y disminuirían considerablemente la vida útil del empalme, las pruebas que se deben correr en fábrica en caso de ser moldeados desde ésta, a cada uno de los empalmes manufacturados son las siguientes:¹⁶

- a) Prueba de descargas parciales (corona).
- b) Prueba de aguante de corriente alterna o alternativamente aguante de impulso de onda completa.

La causa por la cual solamente estas pruebas se realizan solamente a los empalmes moldeados desde la fábrica es que si el empalme pertenece a la tecnología encintada o de resinas, el aislamiento aún no está ensamblado a ninguna otra capa, sino hasta el momento de la realización del empalme: Es lógico suponer que ésta es una gran fortaleza para los empalmes moldeados de fábrica, ya que eliminan errores en la transición de las pantallas semiconductoras y la reconstrucción del aislamiento primario del cable, a diferencia de las demás tecnologías, las cuales contienen un mayor grado de riesgo, el cual está directamente relacionado con la experiencia de la mano de obra que los instale.

En el segundo caso, (pruebas de rutina en campo), el objetivo que se persigue es el de verificar que la instalación se haya efectuado conforme a los procedimientos adecuados, sin dañar el cable durante su preparación y colocando los accesorios conforme a las recomendaciones del fabricante, las pruebas que se hacen en campo generalmente son dos:

- a) Hi-Pot: Esta es una prueba de alto voltaje con corriente directa, la cual ha demostrado deteriorar la capacidad de aguante de la instalación, determinando así que la instalación HUBIERA trabajado adecuadamente en caso de haberse conectado antes

¹⁶ Norma IEEE-std-404-1993, Sección 7.1 p. 6.

de la prueba, pero no garantizaba nada sobre el estado de las instalaciones después de la prueba, dado esto, era una práctica común el utilizar tensiones inferiores a las de la prueba prototipo, y basarse en el comportamiento de las corrientes de fuga con respecto al tiempo para determinar si la instalación fue adecuada o no. En caso de que la corriente de fuga no se estabilizara, se concluiría que el aislamiento se encuentra en proceso de degradación acelerada y por tanto la instalación no fue adecuada. Por el contrario, si la corriente llega a un punto determinado y ahí se estabiliza, se considera que esta corriente se debe al consumo capacitivo del cable (este varía dependiendo de las dimensiones de la instalación, como longitud, calibre del cable, etc.) y el aislamiento tiene un comportamiento aceptable, en virtud de lo cual se procedería a la conexión del sistema a la red.

Actualmente ya se encuentran normalizadas tensiones de prueba distintas para el campo que para el laboratorio, convirtiendo esta práctica de común a normalizada.

- b) Megger: Esta prueba no es de carácter destructivo, ni tampoco lesiona en grado alguno el aislamiento del cable, sin embargo, es equivalente a utilizar un multímetro dentro de un circuito, aunque la diferencia primordial con un multímetro, es que para este tipo de aislamiento, un multímetro convencional podría marcar resistencias infinitas aún cuando el aislamiento estuviera dañado, mientras que con un Megger, se utiliza alto voltaje para que de esta manera las corrientes aumenten y puedan ser medidas, obteniendo resistencias con valores muy superiores a las de un multímetro convencional. No obstante las ventajas mencionadas, esta prueba no es una garantía absoluta sobre el sistema, ya que es imposible detectar vacíos de aire atrapados dentro del aislamiento, y otra serie de factores que solamente reflejarán su impacto sobre la resistencia de aislamiento hasta mucho tiempo después de que el sistema se encuentre operando.

Se propone que para la revisión que se hará en la norma mexicana, seguramente a redactarse durante el año 1999, se consideren las pruebas de rutina por separado a las pruebas en campo, siendo las primeras las que correspondan al fabricante del cable, mientras que las segundas corresponden al contratista o instalador que realizó la aplicación de los productos.

2.2.1.3. Descripción de las pruebas que indica la norma:

2.2.1.3.1 Valores especificados para la ejecución de cada una de las pruebas sugeridas en la norma:

Todos los valores de tensión que aparecen a continuación son RMS.

2.2.1.3.1.1. Valores de tensión aplicables para empalmes diseñados para cable con aislamiento extruido.¹⁷

¹⁷ Norma IEEE-std-404-1993, Tablas 1 y 2, p. 4.

Tabla 14.

Tensión Nominal fase a fase.	Tensión Nominal Fase a tierra	Nivel básico de aislamiento (BIL)	Aguante de tensión de corriente alterna			Aguante de tensión de Corriente directa.	Tensión mínima Libre de descargas parciales.
			Columna A 1 minuto	Columna B 1 hora	Columna C 5 horas.		
5	2.9	75	18	27	18	35	5
8	4.6	95	23	35	23	45	7
15	8.7	110	35	53	35	70	13
25	14.4	150	52	78	52	100	22
35	20.2	200	69	104	69	125	31
46	27	250	80	66	66	165	40
69	40	350	120	100	100	240	60
115	66	550	200	166	166	300	100
138	80	650	240	200	200	315	120

2.2.1.3.1.2. Valores de tensión aplicables para empalmes diseñados para cable con aislamiento laminado.¹⁸

Tabla 15

Tensión Nominal fase a fase.	Tensión Nominal Fase a tierra	Nivel básico de aislamiento (BIL)	Aguante de tensión de corriente alterna		Aguante de Tensión de corriente directa.
			Tiempo (horas)	Múltiplo de E ₀	
2.5	1.4	60	6	5.5	(0.5 x BIL para todos los niveles de tensión nominal.
5.0	2.9	75	6	5.5	
8.7	5.0	95	6	4.0	
15.0	8.7	110	6	4.0	
25.0	14.14	150	6	4.0	
35.0	20.2	200	6	4.0	
46.0	26.6	250	6	4.0	
69.0	39.8	350	24	2.5	
115.0	53.1	450	24	2.5	
120.0	66.4	550	24	2.5	
138.0	79.7	650	24	2.5	
161.0	93.0	750	24	2.5	
230.0	132.8	1050	24	2.5	
345.0	199.2	1300	24	2.5	
500.0	289.0	1550	24	2.5	

¹⁸ Norma IEEE-std-404-1993, Tablas 3, p. 5.

2.2.1.3.1.3. Valores máximos permitidos de factor de ionización para empalmes de transición. ¹⁹

Tabla 16.

Empalmes de transición para cables cubiertos con pantalla de plomo (PILC)		Empalmes de transición para cables presurizados (PIPE).	
Nivel de tensión (KV)	Factor de Ionización Máximo.	Nivel de tensión (KV)	Factor de Ionización Máximo.
10-20	0.60	≤161	0.10
21-35	0.40	>161	0.05
36-46	0.20	--	--
47-69	0.20	--	--

2.2.1.3.2. Prueba de descargas parciales (Corona)²⁰:

Esta prueba se usa como prueba de producción para todos los empalmes premoldeados diseñados para cables de aislamiento extruido, y también se utiliza como prueba de diseño para todos los empalmes destinados a cables de aislamiento extruido. El propósito de esta prueba es la de verificar que la tensión de iniciación de descargas parciales sea superior a la que se presenta en la tabla 14 ó 15, según corresponda. La tensión de prueba se debe incrementar al 20% sobre el nivel de tensión de descargas parciales especificado en dichas tablas, si el nivel de descargas parciales excede los 3pC, el nivel de la tensión se debe disminuir hasta el valor indicado en las tablas, y debe mantenerse a ese nivel durante 1 minuto, durante el cual, el espécimen no debe exceder los 3 pC. En caso de que el nivel de descargas parciales sea excedido durante el último minuto de la prueba, se considera que el espécimen no satisface el requerimiento de la norma.

2.2.1.3.3. Prueba de ionización ²¹:

Esta prueba se aplica exclusivamente a empalmes de transición de cable con aislamiento extruido a cable con aislamiento laminado. El propósito de esta prueba es verificar el factor de disipación del empalme, para que éste quede dentro de lo especificado en la tabla 16. Para empalmes que contienen un cable laminado, el factor de ionización es la diferencia a 50 o 60 Hz, entre el factor de potencia del aislamiento medido en un esfuerzo eléctrico del cable de entre 100 y 20 V/milésima.

2.2.1.3.4. Prueba de aguante de tensión de corriente alterna ²²:

Esta prueba se aplica a todos los tipos de empalmes como prueba de diseño, y es una opción para satisfacer la segunda prueba de manufactura para los empalmes de construcción premoldeada en fábrica, dentro de los cuales entran los empalmes propiamente premoldeados, los termocontráctiles y los contráctiles en frío. El voltaje debe ser elevado a una velocidad de 5 ±3 KV/s hasta el valor especificado para la tensión nominal del empalme. En el caso de los empalmes de transición, éstos se deberán someter a la tensión más baja

¹⁹ Norma IEEE-std-404-1993, Tablas 7, p. 10.

²⁰ Norma IEEE-std-404-1993, Sección 7.4.1, p. 7.

²¹ Norma IEEE-std-404-1993, Sección 7.4.2, p. 8.

²² Norma IEEE-std-404-1993, Sección 7.5.1, p. 10.

entre los valores especificados a los empalmes para cable de aislamiento extruido y los valores especificados a los empalmes para cable de aislamiento laminado.

2.2.1.3.5. Prueba de aguante de tensión de corriente directa²³:

Esta prueba se aplica a todos los empalmes como prueba prototipo.

La tensión de prueba debe ser de polaridad negativa, (la terminal de polaridad negativa debe estar conectada al conductor del espécimen) y el voltaje debe ser elevado a lo especificado en la tabla 14, 15 o 16, y dicho nivel de tensión debe ser mantenido durante 15 minutos sin que el espécimen presente ninguna ruptura dieléctrica ni arqueo.

2.2.1.3.6. Prueba de aguante a impulsos (BIL)²⁴:

Esta prueba se aplica a todos los empalmes como prueba de diseño y es la otra opción para cumplir con el requisito de prueba de fábrica para los empalmes premoldeados y contráctiles en frío.

La forma de onda se especifica en la IEEE-std-4-1978, considerando una tensión de pico en dicha onda conforme a las tablas 14, 15 ó 16 según sea la aplicación del empalme.

El espécimen de prueba debe soportar 10 impulsos positivos y 10 impulsos negativos con tensión completa, aún cuando se permite acondicionar el espécimen con 3 impulsos con menor intensidad al cambiar la polaridad de los impulsos para evitar el efecto de la polarización.

En el caso de los empalmes para cables con aislamiento extruido, la prueba se debe efectuar primero a una temperatura de 25 ± 5 °C, y nuevamente con el conductor a la temperatura de emergencia máxima del cable, la cual debe determinarse conforme a las normas correspondientes que se exponen en la tabla 17, en el caso de los cables de usos especiales, se debe consultar al fabricante del cable para determinar este valor:

Tabla 17.- Normas de referencia para obtener las temperaturas de emergencia máxima de los cables. (Norma IEEE-std-404-1994, Tabla 8, p. 12.)

Tipo de cable	Norma
1-35KV PILC.	AEIC CS1-90.
69-500 KV cable PIPE	AEIC CS2-90
8-46 KV cable de baja presión aislado con gas	AEIC CS3-90
15-500 KV cable autocontenido	AEIC CS4-93
5-46 KV XLPE	AEIC CS5-94
5-69 KV EPR	AEIC CS6-87
69-138 KV XLPE	AEIC CS7-93
600 V - 28 KV Aislamiento barnizado	NEMA WC4-1988

²³ Norma IEEE-std-404-1993, Sección 7.5.2, p. 11.

²⁴ Norma IEEE-std-404-1994, Sección 7.5.3, p. 11.

Para el caso de los empalmes para cables con aislamiento laminado, la prueba solamente se debe realizar con el conductor del cable a la temperatura máxima de emergencia según las normas referidas en la tabla 17. La posición de referencia para determinar la temperatura del conductor es la parte media entre la base de la terminal y el final del empalme.

Para el caso de los empalmes de transición, la prueba se debe realizar a 25 ± 5 °C y a la temperatura máxima de emergencia del cable menos resistente, es decir, a la temperatura máxima de emergencia del cable con la mínima temperatura de emergencia entre los dos.

La elevación de temperatura de los conductores se debe obtener mediante la aplicación de corriente directa en el conductor del cable, más no debe circular ninguna corriente dentro de la pantalla electrostática del cable. En todos los casos se debe reportar la temperatura de prueba debe ser incluida en el reporte.

Sólo en el caso de la prueba de fábrica en vez de aplicar 10 impulsos de tensión positiva y otros 10 impulsos de tensión negativa, solamente bastará con aplicar un impulso de cada polaridad.

2.2.1.3.7. Prueba de corriente de corta duración²⁵:

El propósito de esta prueba es el verificar que el empalme es capaz de soportar corrientes de cortocircuito por lapsos pequeños. La magnitud debe ser igual a la corriente de cortocircuito que soporte el máximo calibre para el que el empalme fue diseñado. La magnitud de la corriente con una frecuencia de 50 o 60 Hz debe ser suficiente para elevar la temperatura del conductor hasta la temperatura de cortocircuito en el cable para el que el empalme fue diseñado (250°C para cables con aislamiento de cadena cruzada y 150°C para cables con aislamiento termoplástico). En cualquiera de los casos la corriente no puede exceder los 35 kA. Se puede utilizar la norma ICEA -P-32-382 para determinar el tiempo de duración del cortocircuito.

La magnitud de la corriente se debe probar de acuerdo a la norma IEEE C37.09-1979.

El fabricante debe verificar que la prueba de cortocircuito no cause cambios que impidan la capacidad del empalme para operar en campo confiablemente.

2.2.1.3.8. Ciclos de envejecimiento acelerado para empalmes con aislamiento extruido y empalmes de transición:

El objetivo de esta prueba es confirmar que la aplicación de cargas cíclicas no afectarán adversamente a los empalmes en serie.

2.2.1.3.8.1. Aplicable para empalmes diseñados para cables con aislamiento extruido y nivel de tensión de 5 a 35 KV.

²⁵ Norma IEEE-std-404-1994, Sección 7.6, p. 12.

Esta prueba puede realizarse individualmente, o bien con dos o más empalmes conectados en serie. Los conductores de los cables multiconductores se deberán conectar en serie.

Los empalmes deben instalarse en un cable que tenga el diámetro de aislamiento externo mínimo para el que fueron diseñados, y deben someterse a una tensión de corriente alterna del triple de la tensión nominal fase a tierra durante 30 días. La prueba debe ejecutarse en un mínimo de tres empalmes en aire y otros tres bajo el agua con el mismo tipo y tamaño de cable. El agua debe alcanzar una temperatura de $40 \pm 5^\circ\text{C}$ durante el ciclo de carga. En la mayoría de los casos, el agua necesitará una fuente de calor adicional para alcanzar esta condición. El empalme en agua debe estar sumergido un mínimo de 0.3 metros, medido desde la parte más alta del empalme. Se necesita un mínimo de 2m de longitud de cable entre el empalme y la base de cada terminal.

Los seis empalmes deben someterse a 30 ciclos de carga. Cada ciclo de carga se define de 24 horas que incluyen un período con corriente y otro libre de corriente. Durante el período con corriente, ésta debe pasar a través del conductor para alcanzar la temperatura de emergencia del cable $\pm 5^\circ\text{C}$ en un período mínimo de 6 horas. No debe haber corrientes en la pantalla electrostática. La temperatura de emergencia de los respectivos conductores debe determinarse en base a las normas de referencia (ver la Tabla 17). Se debe consultar al fabricante en caso de encontrar un cable especial.

La posición de referencia para monitorear la temperatura del conductor es la parte media entre el final del empalme y la base de la terminal para los empalmes colocados en aire, y para los sumergidos es la parte media entre la base de la terminal y la superficie del agua.

Se debe anexar la siguiente información al reporte de esta prueba:

- La máxima temperatura externa de los empalmes sumergidos en agua.
- La máxima temperatura externa de los empalmes en aire.
- La temperatura de la superficie de los cables en aire.
- La temperatura para la que clasifican los empalmes.

Durante el período sin corriente del ciclo, la temperatura del conductor debe bajar al menos a una temperatura 5°C superior a la del medio ambiente. En caso de que esta condición no pueda ser satisfecha, se deberá suspender el tren de pruebas después del ciclo número 5, 10, 15, 20 y 25. Durante estas interrupciones no deberá funcionar ninguna fuente de calor adicional, así como tampoco deberá aplicarse ninguna corriente ni tensión al espécimen durante 24 horas con el objeto de lograr que baje la temperatura en la medida de lo posible. Una vez terminadas las 24 horas de interrupción del tren de pruebas, se deberá restablecer la aplicación de tensión, corriente y fuente externa de calor en caso de que ésta se utilizara. Este procedimiento debe seguirse aún cuando la condición térmica se cumpla, es decir, la parte de corriente del ciclo se deberá efectuar al inicio de éste.

El espécimen deberá soportar 30 ciclos de carga. Los periodos de interrupción de 24 horas no deberán contabilizarse como parte de la prueba.

Si por cualquier razón el nivel de tensión o la temperatura del conductor bajara de los niveles especificados en cualquier momento del ciclo, este ciclo deberá repetirse. Los ciclos de carga pueden ser contiguos o bien, se puede interrumpir el tren de pruebas con el objeto de ajustarse a los horarios del laboratorio, o también para dar tiempo a reparar posibles fallas de los equipos.

2.2.1.3.8.2. Aplicable para empalmes diseñados para cable con aislamiento extruido y nivel de aislamiento de 46 a 138KV.

Esta prueba puede realizarse individualmente, o bien con dos o más empalmes conectados en serie.

Los empalmes deben instalarse en cable lo más cerca posible de la mínima sección de conductor para el que fueron diseñados. El diámetro del cable usado para la prueba deberá ser incluido en el reporte de prueba. En caso de que el diseño del empalme contemple los seccionadores de pantalla, éstos podrán estar incorporados al empalme, sin embargo deberán permanecer en corto hasta llegar a la prueba de seccionadores.

La prueba se debe realizar en cuatro empalmes, dos de los cuales deberán estar inmersos en agua y los otros dos suspendidos en aire. En caso de que el empalme cuente con una cubierta externa metálica soldada al cable, no serán necesarios los especímenes en el agua.

Los especímenes sumergidos en agua, deberán incluirse en un conduit. Éste podrá ser de cualquier material apropiado y deberá tener un diámetro interno de 50 a 80 mm mayor que el diámetro externo del empalme. Los conduits deberán estar centrados respecto del empalme, y deberán exceder longitudinalmente $0.3m \pm 25$ mm a partir del final del empalme.

Se requiere un mínimo de 2 metros de cable libre entre el final del empalme (para los empalmes suspendidos en aire) o entre el final del conduit (para los cables inmersos en agua) y la base de cada una de las terminales.

Se deberá instalar al conduit, otro tubo de 50 mm de diámetro interno mínimo, con la longitud necesaria para poder aplicar una columna de agua de un mínimo de $1m \pm 25$ mm a partir de la parte más alta del empalme. El agua no deberá contar con ningún control térmico, es decir, no se podrá aplicar ninguna fuente de calor o de enfriamiento adicional, sino que el agua deberá seguir libremente la temperatura que se genere de la aplicación de los ciclos en el cable.

A pesar de que los empalmes están diseñados para trabajar a mayores presiones de agua, se considera que la profundidad de 1m, es la que representa la peor condición, ya que

mayores profundidades permiten la generación de fuerzas radiales externas que colaboran en el sello del empalme contra el ingreso de agentes.

Los cuatro empalmes deben someterse a 30 ciclos de carga. Cada ciclo de carga se define de 24 horas que incluyen un período con corriente y otro libre de corriente. Durante el período con corriente, ésta debe pasar a través del conductor para alcanzar la temperatura de emergencia del cable $\pm 5^{\circ}\text{C}$ en un período mínimo de 6 horas. No debe haber corrientes en la pantalla electrostática. La temperatura de emergencia de los respectivos conductores debe determinarse en base a las normas de referencia (ver la Tabla 17). En caso de usar cables para aplicaciones especiales, se debe consultar al fabricante.

Los empalmes deben someterse a una tensión de corriente alterna del doble de la tensión nominal fase a tierra durante las 24 horas del ciclo. No debe haber corriente circulando a través de la pantalla electrostática.

La posición de referencia para monitorear la temperatura de los empalmes es la parte media entre el conduit y la base de las terminales para los cables inmersos en agua, o bien, para los cables suspendidos en aire, es la parte media entre el final del empalme y la base de las terminales. La temperatura en este lugar no debe estar influenciada por la temperatura del empalme ni por la de la base de las terminales.

Se debe anexar la siguiente información al reporte de esta prueba:

- La máxima temperatura externa de los empalmes sumergidos en agua.
- La máxima temperatura externa de los empalmes en aire.
- La temperatura de la superficie de los cables en aire.
- La temperatura para la que clasifican los empalmes.

Durante el período sin corriente del ciclo, la temperatura del conductor debe bajar al menos a una temperatura 5°C superior a la del medio ambiente. En caso de que esta condición no pueda ser satisfecha, se deberá suspender el tren de pruebas después del ciclo número 5, 10, 15, 20 y 25. Durante estas interrupciones no deberá funcionar ninguna fuente de calor adicional, así como tampoco deberá aplicarse ninguna corriente ni tensión al espécimen durante 24 horas con el objeto de lograr que baje la temperatura en la medida de lo posible. Una vez terminadas las 24 horas de interrupción del tren de pruebas, se deberá restablecer la aplicación de tensión, corriente y fuente externa de calor en caso de que ésta se utilizara. Este procedimiento debe seguirse aún cuando la condición térmica se cumpla, es decir, la parte de corriente del ciclo se deberá efectuar al inicio de éste.

El espécimen deberá soportar 30 ciclos de carga. Los períodos de interrupción de 24 horas no deberán contabilizarse como parte de la prueba.

Si por cualquier razón el nivel de tensión o la temperatura del conductor bajara de los niveles especificados en cualquier momento del ciclo, éste ciclo deberá repetirse. Los ciclos de carga pueden ser contiguos o bien, se puede interrumpir el tren de pruebas con el objeto

de ajustarse a los horarios del laboratorio, o también para dar tiempo a reparar posibles fallas de los equipos.

2.2.1.3.8.3. Aplicable para empalmes de transición.

Esta prueba puede realizarse individualmente, o bien con dos o más empalmes conectados en serie. Los conductores de los cables multiconductores se deberán conectar en serie.

Los empalmes deben instalarse en cable lo más cerca posible de la mínima sección de conductor para el que fueron diseñados. El diámetro del cable usado para la prueba deberá ser incluido en el reporte de prueba. En caso de que el diseño del empalme contemple los seccionadores de pantalla, éstos podrán estar incorporados al empalme, sin embargo deberán permanecer en corto hasta llegar a la prueba de seccionadores.

La prueba debe realizarse a cuatro empalmes, cada uno de los cuales deberá ser usado para todos los ciclos. Los empalmes multiconductores con una cubierta común, se consideran como un solo empalme. Dos empalmes deben estar suspendidos en aire y otros dos deben ser colocados en conduits llenados con agua. Los conduits pueden ser de cualquier material apropiado y deben tener un diámetro interno de 50 a 80 mm mayor al diámetro externo del empalme. Los empalmes que no puedan ser colocados dentro de un conduit, podrán utilizar cualquier tipo de cirre que tenga un diámetro entre 50 a 80 mm de diámetro interior superior al del empalme. Los empalmes inmersos en agua no son necesarios en el caso de que el empalme cuente con una cubierta metálica sólida unida o soldada al cable.

Los conduits deberán estar centrados respecto del empalme, y deberán exceder longitudinalmente $0.3m \pm 25$ mm a partir del final del empalme. Se requiere un mínimo de 2 metros de cable libre entre el final del empalme (para los empalmes suspendidos en aire) o entre el final del conduit (para los cables inmersos en agua) y la base de cada una de las terminales.

Se deberá instalar al conduit, otro tubo de 50 mm de diámetro interno mínimo, con la longitud necesaria para poder aplicar una columna de agua de un mínimo de $1m \pm 25$ mm a partir de la parte más alta del empalme. El agua no deberá contar con ningún control térmico, es decir, no se podrá aplicar ninguna fuente de calor o de enfriamiento adicional, sino que el agua deberá seguir libremente la temperatura que se genere de la aplicación de los ciclos en el cable.

A pesar de que los empalmes están diseñados para trabajar a mayores presiones de agua, se considera que la profundidad de 1m, es la que representa la peor condición, ya que mayores profundidades permiten la generación de fuerzas radiales externas que colaboran en el sello del empalme contra el ingreso de agentes.

Los cuatro empalmes deben someterse a 30 ciclos de carga. Cada ciclo de carga se define de 24 horas que incluyen un período con corriente y otro libre de corriente. Durante el período con corriente, ésta debe pasar a través del conductor para alcanzar la temperatura de emergencia del cable $\pm 5^{\circ}\text{C}$ en un período mínimo de 6 horas. No debe haber corrientes en la pantalla electrostática. La temperatura de emergencia de los respectivos conductores debe determinarse en base a las normas de referencia (ver la Tabla 17). En caso de usar cables para aplicaciones especiales, se debe consultar al fabricante.

Los empalmes deben someterse a una tensión de corriente alterna del doble de la tensión nominal fase a tierra durante las 24 horas del ciclo. No debe haber corriente circulando a través de la pantalla electrostática.

La posición de referencia para monitorear la temperatura de los empalmes es la parte media entre el conduit y la base de las terminales para los cables inmersos en agua, o bien, para los cables suspendidos en aire, es la parte media entre el final del empalme y la base de las terminales. La temperatura en este lugar no debe estar influenciada por la temperatura del empalme ni por la de la base de las terminales.

Se debe anexar la siguiente información al reporte de esta prueba:

- La máxima temperatura externa de los empalmes sumergidos en agua.
- La máxima temperatura externa de los empalmes en aire.
- La temperatura de la superficie de los cables en aire.
- La temperatura para la que clasifican los empalmes.

Durante el período sin corriente del ciclo, la temperatura del conductor debe bajar al menos a una temperatura 5°C superior a la del medio ambiente. En caso de que esta condición no pueda ser satisfecha, se deberá suspender el tren de pruebas después del ciclo número 5, 10, 15, 20 y 25. Durante estas interrupciones no deberá funcionar ninguna fuente de calor adicional, así como tampoco deberá aplicarse ninguna corriente ni tensión al espécimen durante 24 horas con el objeto de lograr que baje la temperatura en la medida de lo posible. Una vez terminadas las 24 horas de interrupción del tren de pruebas, se deberá restablecer la aplicación de tensión, corriente y fuente externa de calor en caso de que ésta se utilizara. Este procedimiento debe seguirse aún cuando la condición térmica se cumpla, es decir, la parte de corriente del ciclo se deberá efectuar al inicio de éste.

El espécimen deberá soportar 30 ciclos de carga. Los períodos de interrupción de 24 horas no deberán contabilizarse como parte de la prueba.

Si por cualquier razón el nivel de tensión o la temperatura del conductor bajara de los niveles especificados en cualquier momento del ciclo, éste ciclo deberá repetirse. Los ciclos de carga pueden ser contiguos o bien, se puede interrumpir el tren de pruebas con el objeto de ajustarse a los horarios del laboratorio, o también para dar tiempo a reparar posibles fallas de los equipos.

Al principio de la prueba y al término de los 30 ciclos, se debe medir el factor de ionización, satisfaciendo los niveles y procedimientos adecuados para esta prueba.

La presión interna de los cables con aislamiento laminado presurizado deberá mantenerse a el nivel de operación normal a lo largo de esta prueba, excepto para los cables con aislamiento laminado tipo sólido, los cuales deben tener una presión máxima de 103 kPa durante esta prueba.

2.2.1.3.9. Prueba de alta tensión durante 6 horas después de los ciclos de envejecimiento:

El propósito de esta prueba es verificar la integridad eléctrica de los empalmes para cable con aislamiento extruido y empalmes de transición después de ser sometidos a la prueba de ciclos de envejecimiento acelerado. Las tablas 11 y 13 especifican la secuencia del tren de pruebas. La tensión durante la prueba se aplica de acuerdo a lo siguiente:

- Para empalmes diseñados para cable con aislamiento extruido con nivel de tensión nominal de 5 a 35 kV:
 - La tensión de la columna C de la tabla 14 durante 5 horas.
 - La tensión de la columna B de la tabla 14 durante 1 hora.
- Para empalmes diseñados para cable con aislamiento extruido con nivel de tensión nominal de 46 a 138 kV:
 - La tensión de la columna B de la tabla 14 durante 6 horas.
- Para empalmes de transición:
 - La tensión de la columna de aguante de tensión de corriente alterna de la tabla 13 durante 6 horas.

Todos los empalmes que se sometan a esta prueba deberán estar sumergidos en agua a temperatura ambiente, con una profundidad mínima a partir de la parte más alta del empalme de 30cm para los empalmes de 5 a 35 kV de tensión nominal, y de $1m \pm 25$ mm para los empalmes de tensión nominal de 46 a 138 kV.

Los empalmes deben sumergirse al menos una hora antes de la aplicación de tensión. Los empalmes que fueron sometidos a la prueba de ciclos de envejecimiento sumergidos en agua, pueden permanecer en sus respectivos conduits, mientras que los que se probaron en el aire, pueden sumergirse en agua mediante cualquier método convencional.

2.2.1.3.10. Pruebas de seccionadores:

Esta prueba se aplica solamente para empalmes de nivel de tensión entre 46 y 138 kV y con aislamiento extruido.

Los empalmes con seccionadores deben probarse de acuerdo a los siguientes procedimientos. Todos los empalmes sometidos a esta prueba deben estar sumergidos en agua a temperatura ambiente. La profundidad a la que debe sumergirse el empalme debe ser de $1m \pm 25$ mm. Esta profundidad corresponde a la que se requiere para los ciclos de envejecimiento acelerado, y se mide a partir de la parte más alta del empalme.

Los empalmes deben sumergirse en agua por lo menos una hora antes de que se aplique la tensión. Las muestras previamente probadas en agua pueden permanecer dentro de su respectivo conduit. Las muestras que se probaron previamente en aire pueden ser introducidas en agua mediante cualquier método convencional.

2.2.1.3.10.1. Pruebas de seccionador con corriente alterna:

Se debe aplicar una tensión de 20 kV a cada una de las partes de los seccionadores en circuito abierto durante un mínimo de 1 minuto. Si el seccionador está diseñado para estar aislado de la tierra, éste debe estar en corto y se debe aplicar una tensión de 20 kV entre el seccionador y la tierra durante al menos 1 minuto. El seccionador debe soportar ambas pruebas sin arquear hacia la tierra.

2.2.1.3.10.2. Pruebas de seccionador con impulsos:

La tensión de la prueba de impulsos debe ser una onda de $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ de acuerdo a los requerimientos de la norma IEEE-std-4-1978. Se deben ejecutar a través del seccionador 10 impulsos positivos con una tensión de cresta de 60 kV, seguidos de 10 impulsos de la misma tensión pero de polaridad negativa. Posteriormente los seccionadores deberán quedar en corto y ser sometidos a otros 10 impulsos de cada polaridad pero con una tensión de cresta de 30 kV. Se considera que los seccionadores pasan satisfactoriamente la prueba si no se presenta ningún daño físico al empalme, al cable o al seccionador y si todos los impulsos fueron soportados.

2.2.2. Marco legal nacional e internacional.

El tipo de norma mexicana que regula los empalmes es NMX, es decir, norma voluntaria mexicana, lo que se distingue del rango anterior NOM, que indica Norma Obligatoria Mexicana. La razón de esta diferencia es que por el buen o mal funcionamiento de estos accesorios no se encuentra en riesgo la vida humana, ya que trabajan dentro de pozos que teóricamente deben estar resguardados en forma adecuada para evitar que una falla en la red provoque pérdidas humanas que lamentar.

De acuerdo con la Ley Federal de Metrología y Normalización, existen dos formas de que una norma mexicana se convierta en obligatoria:

a) Cuando existe referencia a esta norma desde una norma NOM.

(En este caso la NOM-001-SEMP)

b) Cuando el fabricante de un producto ostenta que cumple con dicha norma NMX. (Esto sólo aplica a los particulares que así lo manifiesten)

No obstante la obligatoriedad de los fabricantes para cumplir con esta normatividad esta latente, ya que las distintas compañías de distribución eléctrica en México (CFE y LyF) podrán especificar que todo accesorio empalme cumpla estas pruebas, de modo tal que la diferencia práctica entre una NOM y NMX en este caso específico estibaré en que el no certificar el cumplimiento de la norma no generará multas a pagar al gobierno, sin embargo, de cualquier forma no se podrá vender a los clientes sin satisfacer los requerimientos que indica la norma.

No obstante, en el caso de los particulares, donde sus acometidas también pueden sufrir daños y requerir de un empalme, si encontramos un vacío legal, en el que será difícil difundir la norma, y solamente mediante la labor de venta y convencimiento de los fabricantes que cumplen la norma, la Industria seleccionará los productos que satisfagan los requerimientos aquí expuestos, o bien, los de alguna otra normativa internacional que les satisfaga.

Respecto al marco internacional, es importante mencionar que estos accesorios rara vez son de manufactura nacional, por lo que las pruebas de la norma, deben estar en concordancia con las normas internacionales para los mismos accesorios, para este tipo de accesorios, la norma en la que se basó el comité fue la IEEE, que corresponde a la normatividad de los EUA.

Existen otras normas que aún cuando piden pruebas muy semejantes, los requerimientos y valores son inferiores, como en el caso de las pruebas de descargas parciales, que para la IEEE se solicita un ruido máximo de 3pC, mientras que las normas europeas consideran un ruido máximo de 20pC (Norma alemana VDE). En niveles de tensión semejantes o inferiores.

2.3 Pasos generales para la realización de un empalme:

Independientemente de la tecnología que se emplee para empalmar, existen algunos pasos típicos o característicos de la elaboración de un empalme, los cuales son:

- Preparación del cable (fig 9)
- Conexión del conductor.
- Reconstrucción de la pantalla semiconductora del conductor.
- Reconstrucción del aislamiento primario.
- Reconstrucción de la pantalla electrostática.
- Reconstrucción de la cubierta del cable.

2.3.1 Preparación del cable:

La preparación del cable se realiza en las puntas de cable que serán unidos o bien, se hace un corte en la parte lastimada del conductor y se realiza la preparación en los extremos que quedan después del corte.

El empalme que se seleccione podrá indicar algunas diferencias en la preparación del cable, tal como la punta de lápiz para los empalmes encintados y de resina, o bien en el caso de los empalmes premoldeados, la preparación de las diferentes puntas se deberá hacer con diferentes dimensiones entre sí.

Los pasos básicos de la preparación del cable son los inversos a los consecutivos:

Primero se retira la cubierta del cable, teniendo cuidado de no lastimar la pantalla metálica del mismo.

Posteriormente se procede a cortar la pantalla metálica del cable a una determinada dimensión adicional a la cubierta del cable, con el fin de dejar expuesta alguna parte de esta pantalla y facilitar su conexión al medio con el que se le dará continuidad. Como se mencionó en el capítulo anterior, existen diferentes tipos de pantalla metálica, en el caso de la pantalla de hilos, bastará con dejar una distancia recomendada por el fabricante del empalme y doblarlos hacia atrás, dejándolos a ras de la cubierta del cable, lo anterior se debe a que no deben quedar puntas filosas en dirección al conector, lo cual causaría una concentración de esfuerzos eléctricos en la dirección equivocada. En el caso de la pantalla de cinta de cobre, se deberá cortar ésta asegurándose de evitar que queden puntas filosas en dirección al conector y por supuesto evitando lastimar la pantalla semiconductor del cable, para lo cual basta retirar la cinta de cobre sin hacer grandes esfuerzos con la navaja o charrasca. Por último en el caso de la pantalla de hilos de neutro concéntrico, éstos se deberán conectar ya sea entre sí, o bien con un medio con capacidad capacitiva equivalente.

El siguiente paso, es el más difícil de la preparación y consiste en retirar la pantalla semiconductor del cable, la dificultad de este paso estriba en la semejanza de consistencia entre esta pantalla y la pantalla de aislamiento primario, además de que en caso de marcar dicho aislamiento, se fomenta la presencia de cavidades de aire atrapados entre el aislamiento y la pantalla semiconductor, lo cual implica la generación de descargas parciales, con su consecuente ionización y carbonización del aislamiento primario, produciendo la falla total del cable en un plazo menor al deseado.

La forma como se hace es análoga a la anterior, es decir, dejando un pequeño espacio adicional para facilitar que cada parte del aislamiento cuente con su correspondiente apantallamiento semiconductor. Existen herramientas especiales para llevar a cabo este procedimiento, con las cuales se evita lastimar el aislamiento primario y además facilita que la pantalla sea cortada en su mayor parte, tanto en forma longitudinal como en forma circular, realizando una instalación más rápida y confiable. En el caso de los empalmes premoldeados las distancias de preparación entre las dos puntas en este paso varían, ya que dado que la pieza premoldeada no puede ser muy elástica (debido al material y espesor del aislamiento que lo constituye) ésta deberá ser colocada sobre la pantalla semiconductor, con el fin de dejar libre el espacio del conductor y permitir su conexión con la otra punta, es decir, en el caso de los empalmes premoldeados, la distancia que se dejará expuesta de esta pantalla será mayor de un lado que del otro del empalme.

Después de retirar la pantalla semiconductor se procede a retirar el aislamiento primario del cable, para lo cual se recomienda utilizar un hilo cáñamo, ya que éste impedirá que se lastime el conductor del cable. El lastimar el conductor en este procedimiento es crítico, ya que el efecto piel que presenta la corriente hace que el lastimar la parte más externa del conductor derive en un calentamiento de éste, el cual a su vez quedaría cerca del área del conector, parte del empalme catalogada como crítica por la desviación de las líneas equipotenciales sobre el conector, generando una cierta concentración de esfuerzos. Existen herramientas especiales para ejecutar este procedimiento ahorrando tiempo y

garantizando una mejor preparación. En algunas de las tecnologías es necesario realizar una punta de lápiz (Fig. 9) en el aislamiento a escasos centímetros del conductor. Este paso es muy laborioso, difícil y lento, lo cual le da ventaja a las tecnologías que emplean lo que en adelante se explicará como jaula de Faraday evitando la necesidad de hacer dicha punta de lápiz.

En caso de que al retirar el aislamiento primario, queden partículas de la pantalla semiconductora sobre el conductor, es necesario lijar éste último para asegurar una apropiada conexión eléctrica con el conector a compresión o soldable que se utilizará para la conexión del conductor.

2.3.2 Conexión del conductor:

Después de la preparación del cable, los conductores se unen mediante un conector tubular que generalmente es de compresión, requiriéndose una herramienta especial de compresión. La marca más comercial de dichas herramientas es Burndy, y todos los accesorios especifican su compatibilidad con estas herramientas. La compresión del conector sobre el conductor, proporciona la resistencia a la tracción del empalme. La otra tecnología de conectores es la de conectores soldables, los cuales vienen en desuso debido a que tienen la gran desventaja de poner en riesgo el aislamiento primario del cable por sobrecalentamiento, degradándolo.

Es muy importante evitar improvisaciones y emplear conectores de tuerca o cualquiera que no sea de forma tubular, ya que de usar cualquier forma irregular para este paso, se generará una deformidad en las líneas de flujo eléctrico generando puntos de concentración de esfuerzos, los cuales derivarán en una falla a corto plazo.

2.3.3. Reconstrucción de la pantalla semiconductora del cable:

En realidad lo importante de este paso es reconstruir la función que lleva a cabo esta pantalla aunque no se le de continuidad a la misma. Y como mencionábamos en el capítulo anterior, la función de esta pantalla es la de evitar que se formen descargas parciales entre el conector y el aislamiento primario del cable.

La única tecnología que permite darle continuidad a esta pantalla es la encintada, so pena de requerir en su preparación una punta de lápiz en cada cable y el medio que usa es una cinta con propiedades eléctricas semejantes a las de la pantalla misma, la cual generalmente es de hule EP (Hule etileno propileno) suave. Su diseño debe ser no vulcanizable, es decir, libre de azufre con la intención de evitar la corrosión en el cobre. Por sus propiedades no debe afectar la conductividad de las pantallas semiconductoras propias del cable de media tensión. Varias de sus aplicaciones son las de redondeo eléctrico en conectores de media tensión minimizando los esfuerzos eléctricos; La reconstrucción de pantallas semiconductoras encontradas en cables de media tensión en cables de 5kV y superiores; Construcción de la porción conductora en conos de alivio elaborados en

terminales de media tensión sobre cables de aislamiento seco; Mejora el contacto eléctrico entre pantallas metálicas de alambre y accesorios premoldeados; También se aplica en el redondeo eléctrico en las conexiones atornilladas como en barras de distribución.

La otra opción es la de la jaula de Faraday, la cual aunque no da continuidad a la pantalla semiconductor del cable, es igualmente eficiente para evitar el efecto corona.

Revisemos un poco la teoría que acompaña a la jaula de Faraday; La ruptura dieléctrica del material, o iniciación del efecto corona, se da cuando el campo eléctrico al que se somete dicho material rebasa la capacidad dieléctrica de éste; el campo eléctrico entre dos puntos es directamente proporcional al nivel de tensión que exista entre éstos e inversamente proporcional a la distancia entre los mismos.

En el caso de la jaula de Faraday, concretamente aplicado a los empalmes, se asegura que en la parte interna del empalme, cualquiera que fuere su tecnología, quede un material semiconductor en contacto con el conductor, lo cual hará que el potencial de la pared interna del empalme sea muy semejante al potencial del conductor, es decir, la misma tensión nominal del cable. De esta forma, la diferencia de tensión entre los puntos donde se encuentra aire atrapado se ve disminuida y por lo tanto se evita la presencia de descargas parciales en esta parte del empalme.

2.3.4. Reconstrucción del aislamiento primario:

Estrictamente sobre el material semiconductor que da continuidad a dicha pantalla, o bien sobre el que realiza la jaula de Faraday debe quedar la reconstrucción del aislamiento primario del cable, ya que se deben evitar los espacios de aire que provocan descargas parciales, ionización y la carbonización del aislamiento causando la falla del cable.

En algunas de las tecnologías, esta parte ya viene aplicada directamente sobre el material semiconductor, que son exactamente las que utilizan el método de la jaula de Faraday, evitando así la posibilidad de que por una mala instalación se permita la presencia de espacios de aire dentro del aislamiento, sin embargo, en el caso de las tecnologías encintadas, es necesario que se tenga sumo cuidado en el procedimiento, lo cual se hace vigilando un continuo medio traslape de la cinta y evitando al máximo la ruptura de la misma.

El material con el que se realiza la reconstrucción del aislamiento primario debe tener las siguientes propiedades eléctricas:

Rigidez dieléctrica	800 V/mil.
Resistencia de aislamiento	$>1 \times 10^6 \text{ M}\Omega$

2.3.5. Reconstrucción de la pantalla electrostática.

Esta parte es fundamental para el adecuado control de esfuerzos del mismo, dentro de este paso se considera la reconstrucción de la pantalla semiconductora y la pantalla metálica.

En algunas de las tecnologías, la pantalla semiconductora ya viene aplicada directamente sobre el aislamiento del cable evitando la posibilidad de dejar espacios con aire atrapados debidos a la falta de experiencia o habilidad del instalador, no obstante en la encintada será necesario aplicar el mismo tipo de cinta que la que se utilizó para reconstruir la pantalla semiconductora del conductor, tendiendo mucho cuidado de no permitir que se queden atrapados vacíos de aire entre el aislamiento y la pantalla semiconductora electrostática.

2.3.6. Reconstrucción de la cubierta del cable.

Finalmente, para poder brindar al empalme una confiabilidad semejante a la del cable, así como también para evitar que el empalme sea la parte vulnerable del cable por donde puedan ingresar agentes externos al mismo, es necesario reconstruir la pantalla final del cable.

La forma como se reconstruya ésta, dependerá de la tecnología que se utilice para empalmar, el material puede ser desde una cinta de PVC, combinada con cinta de hule para brindar un sello hermético confiable, hasta una cubierta de resina rentrable o permanente. Lo importante es que este material sea resistente a la abrasión y que provea un sello al cable.

En el caso de los cables que cuenten con pantalla metálica de plomo, se recomienda que la reconstrucción de la cubierta en el empalme se realice con resina o con algún material resistente a los hidrocarburos.

2.4 Tecnologías:

Existen varias tecnologías para la elaboración de empalmes, las cuales compiten actualmente en el mercado, la lista de éstas es:

- Empalmes encintados.
- Empalmes contráctiles en frío.
- Empalmes a base de resinas.
- Empalmes termocontráctiles.
- Empalmes premoldeados.

2.4.1 Tecnología encintada:

Esta tecnología emplea cintas para reconstruir y dar continuidad a cada una de las pantallas del cable con materiales semejantes a los de éste.

Para poder dar continuidad a la pantalla semiconductora, emplea una cinta semiconductora que debe hacer contacto con el último punto de la pantalla semiconductora

del cable, por lo cual esta tecnología requiere que el cable sea preparado con punta de lápiz, haciendo esto una preparación más laboriosa y lenta.

No obstante las cintas tienen una gran ventaja, ya que con los mismos tipos de materiales se podrá hacer frente a cualquier calibre y tensión de cable entre los 5 y los 69 KV, de modo que aunque sea más lenta para su elaboración, en casos de emergencia facilitan mucho más la posibilidad de conseguir de inmediato los materiales que se requieren para trabajar a diferencia de las otras tecnologías en las que las piezas son de un tamaño y tipo específico para cada calibre y tensión del empalme, la mayoría de las tecnologías puede aplicarse a un determinado rango de calibres aunque deben ser los modelos específicos para cada tensión.

Las propiedades mecánicas óptimas para la instalación de las cintas son las siguientes:

Espesor	30 mils.
Esfuerzo a la tensión	8 lb/in
Elongación	1000%

Así mismo deberán contemplar la homogeneidad de resistencia térmica con el aislamiento primario del cable, teniendo valores semejantes a los siguientes:

Temperatura de operación	90°C
Temperatura de sobrecarga	130°C
Conductividad térmica	.12 BTU hrXft ²

Las cintas con las que se reconstruye el aislamiento del cable son generalmente de hule etileno propileno autofusionable para aislamiento en media tensión. Su diseño debe ser no vulcanizable, es decir, libre de azufre para permitirles ser aplicadas directamente sobre el cobre sin provocar corrosión. Sus propiedades físicas y eléctricas no se deben ver afectadas al estirarlas y deben ser compatibles con todos los aislamientos sólidos encontrados en cables de media tensión.

Las mismas cintas pueden ser aplicadas como aislamiento primario hasta 69kV en cables de aislamiento sólido; Como aislamiento primario en conos de alivio de terminales hasta de 35kV; También es usada como sello contra el agua en conexiones eléctricas y aislamiento de barras.

Las cintas se deben aplicar en capas sucesivas a medio traslape hasta alcanzar el espesor adecuado indicado por el fabricante, de acuerdo al voltaje de operación en que se instale. Para evitar la formación de burbujas de aire atrapadas dentro de la reconstrucción del aislamiento, es necesario estirar la cinta fuertemente, aproximadamente hasta que la cinta quede a 3/4 de su ancho original. El medio traslape asegura un encintado parejo que evite abultamientos.

Para la reconstrucción de la pantalla metálica electrostática puede usarse una cinta de malla de cobre (Fig. 10)

2.4.2 Tecnología contráctil en frío.

Esta tecnología consiste en tubos de material con memoria elástica preensanchados y colocados sobre un núcleo plástico removible, el cual se retira jalando un cordón.

La tendencia mundial es hacia este tipo de tecnología, la cual surgió hace 20 años en EUA, al vencimiento de la patente de la empresa que la inventó, la competencia rápidamente sacó al mercado nuevas versiones de este tipo de tecnología.

Esta tecnología es la más rápida, confiable y segura para instalarse, ya que no requiere la utilización de herramientas especiales, tampoco de una preparación complicada ni tampoco de labores que impliquen un cansancio físico, por lo cual las instalaciones tienen una mucho menor probabilidad de fallar.

Sin embargo el costo de esta tecnología aplicada a empalmes de media tensión es tan elevado que solamente se justifica su costo en altos calibres, que es cuando la tecnología premoldeada implica un gran esfuerzo de inserción y el tiempo de instalación se eleva, así como la probabilidad de lastimar las pantallas del cable.

Esta tecnología es capaz de proveer un sello hermético al cable, sin embargo no es recomendable para aplicaciones en cable que será sumergido a altas profundidades (mayores a 10m), a menos que se acompañe con una cubierta o encapsulado a base de resinas.

2.4.3 Tecnología de resinas.

Esta tecnología emplea resinas combinadas con cintas para la reconstrucción de las pantallas del cable, tiene la gran ventaja a diferencia de cualquier otra tecnología, que estos empalmes si pueden ser sumergidos a altas profundidades. Así como también presentan la más alta resistencia a impactos y abrasión comparándolos con los empalmes de las demás tecnologías.

Otra ventaja de esta tecnología, es que puede elaborarse con resinas epóxicas, las cuales son más resistentes a hidrocarburos que los materiales convencionales. O bien pueden elaborarse con resinas de poliuretano que proveen la capacidad de re-accesar el empalme, lo cual es necesario cuando por el cable de potencia, se anexan cables de control, los cuales pueden llegar a requerir una configuración distinta dentro de un cierto lapso.

La única desventaja de esta tecnología se encuentra en su elevado costo, lo que la limita a ser usada sólo cuando sus especiales facultades son indispensables.

2.4.4 Tecnología termocontráctil.

Esta tecnología emplea tubos termocontráctiles para reconstruir las capas del cable de potencia, tiene la gran desventaja de que al instalarlo se corre el riesgo de degradar el aislamiento primario del cable, ya que este último soporta una temperatura de 90°C y de emergencia hasta de 130°C durante una hora, mientras que los tubos termocontráctiles comienzan su contracción a partir de los 110°C, por lo que la probabilidad de un sobrecalentamiento por concentración de flama o la mínima distracción pueden ser fatales para la vida útil del cable en el que son instalados.

No obstante estos productos también proveen un sello confiable sobre el cable, tanto como los contráctiles en frío, aunque son un poco más resistentes a los cortes que los materiales de hule.

Esta tecnología se encuentra restringida en las áreas clasificadas, tal como refinerías e industrias que requieran/produzcan/manejen combustibles, ya que la necesidad de flama los convierte en una fábrica de accidentes poco deseable, o bien, en una grave dificultad para el departamento de mantenimiento para conseguir libranzas de operación y/o permisos para uso de fuego.

2.4.5 Tecnología premoldeada.

Esta tecnología emplea una pieza de hule EPDM moldeada al tamaño preciso del cable con la cual se reconstruyen las pantallas del cable, dentro de la pieza moldeada ya se incluye una jaula de Faraday para evitar el efecto corona o descargas parciales, el aislamiento primario y la pantalla semiconductor electrostática, la cual deberá aterrizararse posteriormente con ayuda de un elemento conductor partiendo de la pantalla metálica del cable.

CAPITULO 3.- ACCESORIOS TERMINALES

CAPITULO 3.- ACCESORIOS TERMINALES.

3.1 Definición y generalidades:

Dispositivo aislado para terminar cables de potencia de corriente alterna con aislamiento laminado o extruido de 2.5KV y tensiones superiores.²⁶

Como parte complementaria de los cables utilizados en la distribución de energía eléctrica se encuentran los accesorios terminales, los cuales harán posible efectuar las transiciones entre líneas de distribución aéreas a subterráneas y viceversa; de cable a equipo (ya sean transformadores, interruptores, seccionalizadores, etc.).

Ya que las terminales formarán parte de las mismas redes de distribución que los cables y el demás equipo periférico, y dada la importancia que tiene la continuidad del servicio, los accesorios deben estar diseñados, para asegurar un largo periodo de vida, de hecho un periodo equiparable a la vida del cable o superior, el cual se estipula aproximadamente de 20 años.

3.2 Normatividad para terminales:

En México, la norma que rige a las terminales de media tensión es la NMX-J-199-1997, la cual clasifica a las terminales en la misma forma que la norma IEEE-std-48 de 1996, y ésta se basa en las funciones que puede cumplir el accesorio, importándonos para su clasificación las tres siguientes funciones:

- 1.- Terminal clase 1: Es aquella que proporciona el control de los esfuerzos que se presentan en el aislamiento del cable al interrumpir y retirar la pantalla; proporciona aislamiento externo completo contra corrientes de fuga entre el conductor(es) y tierra; proporciona un sello al final del cable contra la entrada del ambiente externo y mantiene la presión de operación de diseño del sistema, si existe. Esta clase está dividida en tres, que son las siguientes:
 - a) Terminales Clase 1A: Para usarse en cable con aislamiento extruido.
 - b) Terminales Clase 1B: Para usarse en cable con aislamiento laminado (papel impregnado en aceite), Pero que no será sometido a presión.
 - c) Terminales Clase 1C: Para usarse en cable con aislamiento laminado y que será sometido a presión. (Cable tipo *Pipe*).

²⁶ Norma NMX-J-199-1997-ANCE, Sección 3.9, p.2/21.

- 2.- Terminal clase 2: Son aquellas que proporcionan el control de los esfuerzos eléctricos que se presentan en el aislamiento del cable al interrumpir y retirar la pantalla electrostática; proporciona aislamiento externo completo contra corrientes de fuga entre el(los) conductor(es) y tierra.
- 3.- Terminal clase 3: Son aquellas que proporcionan únicamente el control de los esfuerzos eléctricos que se presentan en el aislamiento del cable al interrumpir y retirar la pantalla electrostática del cable.

Se considera que la función primordial es la de realizar el control de esfuerzos al terminar la pantalla electrostática, puesto que de no realizar esta función, el accesorio NO se puede llamar terminal, dado que al energizar el cable, la concentración de esfuerzos de la que hablaremos más adelante, destruiría el aislamiento del cable al final de la pantalla electrostática.

3.2.1 Pruebas a las que se somete una terminal:

3.2.1.1 Pruebas prototipo:

3.2.1.1.1 Pruebas dieléctricas

3.2.1.1.1.1 Tensión de aguante a 60 Hz en seco, 1 minuto: El espécimen a probarse conforme a las condiciones normalizadas de prueba. Si el espécimen soporta la tensión de prueba especificada durante 1 minuto, debe considerarse que éste ha pasado la prueba. Si ocurre un flameo, la prueba debe repetirse, si al repetir la prueba, también resulta un flameo u otra ruptura dieléctrica, debe considerarse que el espécimen ha fallado. Si el espécimen no falla al repetir la prueba, debe considerarse que éste ha pasado la prueba.

3.2.1.1.1.2 Tensión de aguante a 60 Hz en húmedo, 10 segundos: Esta prueba se requiere únicamente para terminales de uso exterior, clases 1 y 2. El criterio de aceptación es idéntico al de la prueba de tensión de aguante a 60 Hz en seco, 1 minuto.

3.2.1.1.1.3 Tensión de aguante a 60 Hz en seco, 6 horas: Si el espécimen soporta la tensión de prueba especificada (Ver la columna correspondiente de las tablas 19 y 20), durante 6 horas, debe considerarse que éste ha pasado la prueba. Si la prueba es interrumpida, la duración total de la aplicación de tensión debe incrementarse por dos veces la duración de cada interrupción, sin exceder 6 horas de aplicación continua. En este caso, se contempla la posibilidad de repetición de prueba.

3.2.1.1.1.4 Tensión de radiointerferencia: La tensión de prueba aplicada debe ser la tensión de diseño máxima a tierra indicada en la columna correspondiente de la tabla de tensiones especificadas (tablas 19 y 20). El espécimen a probar pasa existosamente la prueba, si la tensión de radiointerferencia no excede el valor indicado en la columna 7 de la tabla 19, medida a 1 MHz. Algunos cables pueden desarrollar niveles de tensión de radiointerferencia a los especificados en la columna 7 de la tabla 19, en tales casos, puede

substituirse este cable por otro tramo de cable o mandril equivalente, para determinar las características reales de la terminal.

3.2.1.1.1.5 Descargas parciales (corona) aplicable a terminales de cable con aislamiento extruido: El espécimen debe ser probado conforme a las condiciones normalizadas de prueba. El aparato para detectar las descargas parciales debe ajustarse para tener una sensibilidad que le permita la detección de pulsos de descargas de por lo menos 5,0 pC. La tensión de prueba debe elevarse a por lo menos 120% del valor indicado en la columna 7 de la tabla 20 y debe mantenerse en este nivel por lo menos 3 segundos, pero no más de 60 segundos. Posteriormente el nivel de tensión debe bajarse al 100% de los especificado en la columna 7 de la tabla 20. El espécimen bajo prueba pasa exitosamente ésta si el nivel de descargas parciales no excede 5 pC, durante el período.

Para esta prueba es posible apoyarse de un osciloscopio, el cual nos puede dar más información sobre el origen de las descargas parciales, dependiendo de la deformación de la elipse que se obtenga en el mismo, resultado de orientar la onda senoidal dentro de una elipse, colocando en cada cuadrante de la misma, la cuarta parte de la onda senoidal (Fig 11), conociendo de donde procede cada uno de las partes de la elipse, se puede saber de donde procede el ruido, siguiendo los patrones típicos de elipse que se muestran en la Fig. 12.

Existen diferentes tipos de descargas parciales, las cuales se ilustran en la Fig. 13. Las que nosotros buscamos durante una prueba prototipo y de rutina, son las de tipo interno, principalmente por cavidades, aunque también se dan las de tipo de inconsistencia interna.

La forma para poder discriminar las descargas parciales que no forman parte del espécimen de prueba, mediante el uso del osciloscopio, es tomando en cuenta los patrones que se muestran en la Fig. 12, clasificándolos de la siguiente forma:

AI.- Formato saludable, no se presentan descargas parciales.

AII.- Descargas parciales causadas por puntos filosos en la parte de alto voltaje.

AIII.- Descargas parciales causadas por puntos filosos en la parte de bajo voltaje.

BI.- Descargas parciales causadas por falso contacto.

BII.- Descargas parciales causadas por vacíos dentro del aislamiento primario

BIII.- Descargas parciales causadas por vacíos dentro del aislamiento primario cerca del alto voltaje

CI.- Descargas parciales causadas por vacíos dentro del aislamiento primario cerca del bajo voltaje.

CII.- Patrón indescifrable, sin explicación certera, pero que aparece frecuentemente.

Los patrones que interesan para efectos de prueba son los referidos por BII, BIII y CI.

3.2.1.1.1.6 Tensión de aguante de impulso por rayo: El espécimen debe ser probado conforme a las condiciones normalizadas de prueba. La forma de onda debe ser la normalizada de 1.2 μ s, positiva y negativa. Las características de la onda de impulso deben ser las establecidas en la NMX-J-271, excepto el tiempo de frente de onda que no debe exceder de 5 μ s para los casos donde la capacitancia del espécimen es tal como para

alargar el frente de onda. Deben aplicarse 10 impulsos consecutivos de cada polaridad al espécimen bajo prueba. Si no ocurre ningún flameo u otro tipo de ruptura dieléctrica, se considera que el espécimen ha pasado. Si dos o más de los impulsos aplicados causan flameos, debe considerarse que el espécimen bajo prueba ha fallado. Si uno de los impulsos aplicados causa flameo, deben aplicarse 10 impulsos adicionales. Si no ocurre ningún flameo u otro tipo de ruptura dieléctrica al aplicar los 10 impulsos adicionales, debe considerarse que el espécimen ha pasado la prueba.

3.2.1.1.7 Tensión de aguante en corriente directa: Debe utilizarse una tensión de corriente directa de polaridad negativa cuyas variaciones en su amplitud sean menores que el 3% con respecto al valor de prueba requerido. El tiempo de duración de la prueba inicia a partir de que el valor de la tensión de prueba especificado haya sido alcanzado.

Si el espécimen bajo prueba soporta la tensión aplicada durante 15 minutos, sin que ocurra flameo o ruptura dieléctrica, se considera que éste cumple satisfactoriamente la prueba. Si se presenta flameo o ruptura dieléctrica, se repite la prueba. Si al repetir la prueba se presenta nuevamente flameo u otra ruptura dieléctrica, se considera que el espécimen no cumple la prueba.

3.2.1.1.8 Prueba de envejecimiento acelerado: Se deben ensamblar las terminales, ya sean monopolares o tripolares con al menos 2 metros de longitud entre éstas. Se aplica la tensión especificada en la columna 6 de la tabla correspondiente al tipo de cable (tabla 19 para cable con aislamiento laminado y tabla 20 para cable con aislamiento extruido). Los ciclos de carga deben durar 24 horas con un periodo de aplicación de corriente y un periodo sin ella. La corriente debe aplicarse una vez en cada ciclo con el tiempo necesario para calentar el cable entre terminales a su temperatura máxima de emergencia $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Durante el periodo sin corriente la temperatura del conductor debe descender por lo menos a la temperatura ambiente más 5°C . Si esta condición no se cumple, entonces, cada 5 ciclos la corriente y la tensión no deben aplicarse por 48 horas. Para cables con aislamiento extruido la tensión de extinción de descargas parciales debe medirse al empezar y al terminar los 30 ciclos de prueba.

Después de la prueba de envejecimiento acelerado y de descargas parciales en su caso, debe continuarse con la prueba de tensión de aguante de impulso por rayo, aplicando 10 impulsos de cada polaridad.

Las terminales clase 1B y 1C no deben presentar fugas visibles al terminar esta prueba.

Nota: Las terminales tipo 1A no pueden mostrar fuga alguna, debido a que no contienen aceite dentro de su aislamiento. En caso de que las terminales 1B o 1C presenten fugas, implica que el sello hermético cedió debido a un sobrecalentamiento, debido a su vez por una concentración de esfuerzos excesiva, es decir, por un mal diseño o una mala preparación del cable.

Si el espécimen bajo prueba cumple con los ciclos de envejecimiento debe considerarse que éste ha pasado la prueba. Si ocurre una ruptura dieléctrica en el espécimen se considera que éste no ha pasado la prueba.

3.2.1.1.2. Pruebas de hermeticidad:

Todas las terminales clase 1 deben probarse de acuerdo con el procedimiento y valores indicados en la tabla 18:

Tabla 18.- Prueba de hermeticidad para terminales clase 1:

Tipo de terminal	Pruebas					
	(a)		(b)		(c)	
	Presión aplicada (KPa)	Tiempo (h)	Presión de vacío (Pa)	recuperación (min)	Presión interna (KPa)	Tiempo (h)
CLASE 1 A	200 ó	1				
Para cables extruidos.	100 ó 50	2 6	67	30	--	--
CLASE 1 B	200	1	67	30	--	--
Clase 1 C	--	--	67	30	267 (ó 2.5 veces la presión interna)	1 Simple pres. 2 Multipresión

Para terminales 1 A o 1B se deben aplicar 200 KPa durante 1 hora a temperatura ambiente. Si se usa presión de gas el espécimen debe sumergirse en un líquido a una profundidad máxima de 5 cm, o bien cubrir la superficie exterior con una solución jabonosa. Si se usa presión con líquido, éste debe tener una viscosidad máxima de 125 su (Saybolt universales) a 25°C. Las áreas de sello deben cubrirse con talco el cual mostrará la presencia de fuga. La prueba puede realizarse a 100KPa durante 2h o 50 KPa durante 6 horas.

Para terminales 1 A y 1B, con el espécimen de prueba a una temperatura no mayor de 25 °C se aplica una presión de vacío no mayor de 670 Pa, después de lo cual se cierra la válvula y se retira el espécimen de la bomba. Durante los siguientes 30 minutos la presión no debe incrementarse más de 670 Pa. Para terminales clase 1C, el valor de la presión no debe ser mayor de 670 Pa aplicando el mismo procedimiento.

Para terminales 1C se llena el espécimen de prueba con un líquido aislante que tenga una viscosidad máxima de 125 s a 25°C. Aplicar 2.5 veces el valor de la presión interna nominal o 267 KPa, lo que sea mayor, para terminales de hasta 2,000 KPa. (para terminales mayores de 2,000 KPa, consulte con el fabricante para las pruebas de fuga de presión). La presión interna (o presiones) debe observarse y mantenerse a la presión de prueba hasta que la temperatura del espécimen y del fluido se han estabilizado. La prueba de temperatura presión debe tener una duración de 1h para terminales de simple presión y 24 horas para terminales multipresión. Las fugas deben detectarse al final de este período examinando

visualmente el talco en la superficie externa del espécimen de prueba y por la caída de presión o por la elevación en la zona de baja presión de las terminales de multipresión.

3.2.1.1.3. Resistencia a las corrientes de fuga:

También denominada prueba de la cámara de niebla salina. En esta prueba los especímenes se energizan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_p = \frac{D_f}{34.6}$$

Donde:

T_p \Rightarrow Tensión de prueba en Kilovolts.

D_f \Rightarrow Distancia de fuga en milímetros.

Además éstos deben de estar dentro de una cámara en la que se precipita una mezcla con las siguientes características:

- Flujo de agua: 0.4 ± 0.1 litro/($m^3 \times h$)
- Temperatura: $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.
- Tamaño de las gotas: de $5 \mu\text{m}$ a $10 \mu\text{m}$
- Contenido de sal en el agua de 10 ± 0.5 kg/ m^3 ($1,600 \mu\text{S/cm}$) (Para el caso de niebla salina)

Los especímenes deben soportar 1,000 horas de precipitación de niebla.

Es posible hacer interrupciones de 24 horas por cada 24 horas de precipitación de niebla, sin embargo, no es posible desenergizar las terminales por un período superior a 15 minutos por motivos de inspección. Ningún período de interrupción, ya sea de niebla o tensión se contabilizará dentro de las 1,000 horas de la prueba.

El criterio de evaluación indica que un espécimen se considera aprobado si no presenta caminos conductivos de carbón, si no se provocan cuatro o más sobrecorrientes en el circuito de prueba o si al final de la prueba el aislamiento del cable no es visible en la zona de la terminal.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Tabla 19.- Pruebas dieléctricas para terminales de cable laminado:

1	2	3	4	5	6	7	8
Tensión de designación (kV)	Tensión máxima de diseño a tierra (kV)	Pruebas de tensión a 60 Hz (1)					Tensión de aguante de impulso por rayo (4) kV cresta
		Tensión de aguante en seco 1 min. KV rcm	Tensión de aguante en húmedo 10s kV rcm	Tensión de aguante en seco 6 h. kV rcm	T. de prueba de envejecimiento acelerado kV rcm	Tensión de radio interferencia μ V	
2.5	1.6	20	20	10	3	50	60
5	3.5	25	25	15	6	50	75
8.7	5.5	35	30	25	10	50	95
15	9.5	50	45	35	17	50	110
25	16	65	60	55	29	100	150
34.5	22	90	80	75	40	150	200
46	29.5	120	100	100	53	200	250
69	44	175	145	120	80	300	350
115	73	205	190	160	133	400	450
120	73	260	230	190	140	450	550
138	88	310	275	210	160	500	650
161	102	365	315	250	186	500	750
230	146	390	380	320	265	500	900
230	146	460	445	320	265	500	1050

Tabla 20.- Pruebas dieléctricas para terminales de cable extruido:

1	2	3	4	5	6	7	8
Tensión nominal kV	Tensión máxima de diseño a tierra. kV	Pruebas de tensión a 60 Hz				Tensión de extinción de descargas parciales kV rcm	Tensión de aguante de impulso por rayo kV cresta
		Tensión de aguante en seco 1 min kV rms	Tensión de aguante en húmedo 10 s kV	Tensión de aguante en seco 6 h. kV	Tensión de prueba de envejecimiento acelerado kV		
2.5	1.6	20	20	10	4.5	2.0	60
5	3.2	25	25	15	9	4.5	75
8.7	5.5	35	30	25	15	7.5	95
15	9.5	50	45	35	26	13	110
25	16	65	60	55	43	21.5	150
34.5	22	90	80	75	60	30	200
46	29.5	120	100	100	53	40	250
69	44	175	145	120	80	60	350
115	73	205	190	145	133	80	450
120	73	260	230	175	140	100	550
138	88	310	275	200	160	120	650
161	102	365	315	230	186	140	750
230	146	460	445	320	265	200	1050

3.2.1.2. Pruebas de rutina:

3.2.1.2.1. Pruebas dieléctricas:

Los cuerpos de las terminales de porcelana deben cumplir con la prueba dieléctrica del aislador de la terminal.

3.2.1.2.2. Pruebas de descargas parciales:

Como opción a la prueba anterior puede aplicarse la prueba de descargas parciales, ésta se aplica sólo a aisladores en planta, en el campo no puede aplicarse.

3.2.1.2.3. Prueba de sello:

Debe aplicarse una prueba de sello en todas las partes herméticas y ensambladas en planta.

3.2.1.3. Pruebas de campo:

Las pruebas de campo deben realizarse de acuerdo a lo indicado en las especificaciones del tipo de cable y tensión de operación del sistema cableado. Puede aplicarse una prueba de tensión de aguante en corriente directa durante 5 minutos sin exceder los valores indicados en las siguientes tablas

Tabla 20.- Pruebas dieléctricas en campo para terminales con cable con aislamiento laminado:

Tensión de Designación: (kV)	Tensión de aguante en corriente directa durante 5 minutos máximo.			
	Durante la instalación (kV)		Después de la instalación (kV)	
	A	B	A	B
2.5	17	23	15	20
5	28	37	24	32
8.7	37	49	32	42
15	60	80	52	69
25	93	124	80	106
34.5	127	169	110	146
46	175	233	152	202
69	270	359	234	311
115	448	596	381	507
120	468	622	398	529
138	638	715	457	608
161	628	835	534	710
230	897	1193	762	1013

A: Aislamiento al 100%
B: Aislamiento al 133%

Tabla 21.- Pruebas dieléctricas en campo para terminales con cable extruido:

Tensión de Designación kV	Tensión de aguante en corriente directa durante 5 minutos máximo.					
	Durante la instalación (kV)		Después de la instalación (kV)			
	XLP y EP		XLP		EP	
	A	B	A	B	A	B
2.5	12	16	4	5	10	13
5	28	36	9	11	22	29
8.7	36	44	11	14	29	35
15	56	67	18	20	45	51
25	80	96	25	30	67	80
34.5	100	124	31	39	80	99
46	132	172	41	54	106	138
69	192	255	61	81	154	205
115	310	412	101	134	265	352
120	324	431	106	141	277	368
138	372	495	121	161	319	424
161	419	557	140	186	370	492
230	545	752	200	266	531	706

A: Aislamiento al 100%
B: Aislamiento al 133%

3.2.1.4. Pruebas de aceptación:

Las pruebas de aceptación consisten en inspección visual, acabado, contenido del conjunto (juego), y dimensional, de acuerdo a especificaciones del fabricante. Estas pruebas deben aplicarse a las terminales elegidas conforme a muestreo, recomendándose el uso de la NMX-Z-12.

3.2.2. Marco legal nacional e internacional.

El tipo de norma mexicana que regula los empalmes es NMX, es decir, norma voluntaria mexicana, lo que se distingue del rango anterior NOM, que indica Norma Obligatoria Mexicana. La razón de esta diferencia es que por el buen o mal funcionamiento de estos accesorios no se encuentra en riesgo la vida humana, ya que trabajan sobre postes o dentro de gabinetes especialmente diseñados para evitar que una falla en la red provoque pérdidas humanas que lamentar.

No obstante la obligatoriedad de los fabricantes para cumplir con esta normatividad está latente, ya que las distintas compañías de distribución eléctrica en México (CFE y LyF) podrán especificar que todo accesorio empalme cumpla estas pruebas, de modo tal que la diferencia práctica entre una NOM y NMX en este caso específico estibaré en que el no certificar el cumplimiento de la norma no generará multas a pagar al gobierno, sin embargo, de cualquier forma no se podrá vender a los clientes sin satisfacer los requerimientos que indica la norma.

No obstante, en el caso de los particulares, donde sus acometidas también pueden sufrir daños y requerir de un empalme, si encontramos un vacío legal, en el que será difícil difundir la norma, y solamente mediante la labor de venta y convencimiento de los fabricantes que cumplen la norma, la Industria seleccionará los productos que satisfagan los requerimientos aquí expuestos, o bien, los de alguna otra normativa internacional que les satisfaga.

Respecto al marco internacional, es importante mencionar que estos accesorios rara vez son de manufactura nacional, por lo que las pruebas de la norma, deben estar en concordancia con las normas internacionales para los mismos accesorios, para este tipo de accesorios, la norma en la que se basó el comité fue la IEEE, que corresponde a la normatividad de los EUA.

Existen otras normas que aún cuando piden pruebas muy semejantes, los requerimientos y valores son inferiores, como en el caso de las pruebas de descargas parciales, que para la IEEE se solicita un ruido máximo de 3pC, mientras que las normas europeas consideran un ruido máximo de 20pC. En niveles de tensión semejantes.

3.3 Funciones de una terminal:

Como se mencionaba desde la clasificación de las terminales, la primordial función de éstas es la de realizar un control de esfuerzos al terminar la pantalla electrostática del cable.

Durante la longitud ordinaria del cable, existe una correspondencia biunívoca entre longitud de conductor con alta tensión y longitud de pantalla electrostática aterrizada. Sin embargo, cuando el cable debe ser conectado, se debe exponer la pantalla electrostática. En caso de dejar la pantalla justo hasta el final del aislamiento del cable, la distancia entre el alto voltaje y la tierra será tan corto que automáticamente se presentará un arco eléctrico entre la parte viva y la pantalla, razón por la cual la pantalla debe retrasarse una longitud suficiente como para evitar este fenómeno.

Por otro lado, en cuanto la pantalla es retrasada, la correspondencia biunívoca de la que hablábamos se acaba, y toda la superficie cilíndrica del conductor restante, encontrará como punto más cercano a tierra el final de dicha pantalla electrostática, por lo cual en dicho punto se encuentra una concentración de esfuerzos que debe ser eliminada o controlada.

Los métodos para el control de esfuerzos que se utilizan a la fecha son dos:

- a) Método geométrico o de cono de alivio: Este consiste en ensanchar el aislamiento primario del cable en el área afectada y prolongar la pantalla semiconductor hasta el punto focal de dicho cono, esto se basa teóricamente en que el esfuerzo eléctrico será disminuido en cuanto la distancia de material aislante se incrementa, sin embargo la concentración de esfuerzos sigue presente aunque es más soportable dado el incremento de aislamiento.
- b) Método resistivo capacitivo: En este método, en vez de aumentar el aislamiento, lo que se utiliza es un material con una constante dieléctrica al menos 10 veces superior a la del aislamiento del cable, esto con dos fines, el primero es que este material soporte mucho mejor el esfuerzo eléctrico que pudiera presentarse, pero primordialmente, este método se basa en la teoría de refracción de campos, ya que en cuanto la línea de flujo pasa por la transición de materiales, ésta se refracta, según la ecuación que describe el fenómeno físico de la refracción, la cual se describe a continuación:

$$\frac{\tan(\alpha_2)}{\tan(\alpha_1)} = \frac{K_2}{K_1} \quad (\text{Ec.3.1})$$

La forma como se puede obtener la relación anterior es la siguiente:²⁷

En un medio isotrópico, D y E tienen la misma dirección. De acuerdo con las relaciones de frontera:

$$D_{n1} = D_{n2} \quad \text{y} \quad E_{t1} = E_{t2} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

De acuerdo a lo mostrado en la figura 7 (fig.7), encontramos que:

$$\begin{aligned} D_{n1} &= D_1 \cos(\alpha_1) & \text{y} & & D_{n2} &= D_2 \cos(\alpha_2) \\ E_{t1} &= E_1 \sin(\alpha_1) & & & E_{t2} &= E_2 \sin(\alpha_2) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Substituyendo Ec.3.3 en la Ec. 3.2, y dividiendo la ecuación resultante se obtiene:

²⁷ Electromagnetismo, John D. Kraus, Tercera Edición (Primera en español), De. Mc Graw Hill, pp 71-72.

$$\frac{D_1 \cos(\alpha_1)}{E_1 \sin(\alpha_1)} = \frac{D_2 \cos(\alpha_2)}{E_2 \sin(\alpha_2)} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Pero: $D_1 = \epsilon_1 E_1$ y $D_2 = \epsilon_2 E_2$ de manera que la Ecuación 3.4 se puede escribir también de esta forma.

$$\frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_0}{\epsilon_{r2} \epsilon_0} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (\text{Ec.3.5})$$

Donde:

- $\epsilon_{r1} \Rightarrow$ Permitividad relativa del medio 1
- $\epsilon_{r2} \Rightarrow$ Permitividad relativa del medio 2
- $\epsilon_0 \Rightarrow$ Permitividad del vacío.

De este modo no sólo se cuenta con un material que soporta mejor los esfuerzos eléctricos que se puedan generar, sino además las líneas de flujo se desvían de su trayectoria original, mejorando el desempeño ante impulsos de la terminal, ya que estas líneas de flujo se dispersan, aumentando la capacidad de la terminal para resistir impulsos por rayo o por maniobra.

Existe una norma mexicana para terminales, la NMX-J-199-1997, la cual es sumamente parecida a la norma americana generada por la IEEE, conocida como la IEEE-std-48-1996, en ambas normas se dedican varias pruebas prototipo y de rutina para analizar la efectividad de la terminal para realizar el control de esfuerzos, algunas de estas pruebas son las siguientes:

- 1.- Aguante de tensión alterna a 60Hz durante un minuto en seco.
- 2.- Aguante de tensión alterna a 60Hz durante 6 horas en seco.
- 3.- Prueba de descargas parciales.
- 3.- Aguante de tensión de impulsos.
- 4.- Aguante de corriente directa en seco durante 15 minutos.

Las pruebas en campo para este tipo de accesorios, son las mismas que las que se recomiendan para el cable de potencia, es decir, las de Hi-Pot y la del Megger, la primera consiste en aplicar una corriente directa con alta tensión al cable, sin embargo está demostrado que esta prueba deja cargas espaciales de larga permanencia, las cuales reducen la resistencia del cable respecto a su ruptura dieléctrica, de modo tal que más que decirnos si el cable durará lo que esperamos, nos dice que el cable hubiera durado lo que esperamos. Por el otro lado, la prueba de Megger, solamente nos indica si existe algún problema franco en la instalación, indicándonos la resistencia de aislamiento en Megaohms, por lo que no es realmente confiable aceptar una instalación haciendo solamente esta prueba. Las pruebas que nos pudieran decir el comportamiento de la instalación son de corriente alterna, concretamente la de descargas parciales, (aunque ésta tampoco lo dice todo del cable, es la más aproximada o de las que más puede predecir). No obstante, estas pruebas no pueden ser llevadas a cabo en campo debido a lo aparatoso y costoso de los equipos de alto voltaje de corriente alterna, así como lo delicado de la alimentación y condiciones en que debe hacerse la prueba de descargas parciales, además de que a grandes longitudes de cable, la capacitancia del espécimen para esta prueba es tan elevada que también reduciría su capacidad de determinar las condiciones del cable.

En segundo lugar, tenemos la capacidad de la terminal para resistir las corrientes de fuga, en este aspecto, se han realizado numerosos intentos por obtener una prueba que pueda predecir el comportamiento del aislador externo de la terminal en condiciones reales, sin embargo se ha reconocido que no existe tal prueba aún, sin embargo sería conveniente indicar que en la norma mexicana se están incluyendo dos métodos de prueba a nivel de recomendación, los cuales son:

- a) Cámara de Niebla Salina.
- b) Prueba de resistencia al "tracking" y erosión en el plano inclinado.

3.4 Estudio sobre el efecto de la contaminación sobre los accesorios terminales

Para justificar la inclusión de estas pruebas en la nueva norma de terminales, se procedió a efectuar un estudio a nivel nacional sobre los lugares más contaminados, mismo que se transcribe a continuación:

" ESTUDIO SOBRE TERMINALES DE MEDIA TENSIÓN EN AREAS CONTAMINADAS PARA SU NORMALIZACIÓN:

3.4.1 RESUMEN:

En este trabajo se reportan los resultados del estudio sobre contaminación en terminales de cable aislado en tensiones de distribución, realizado con la colaboración de CFE, LyF, ANCE y los principales fabricantes de terminales. Con la finalidad de establecer una prueba representativa que evalúe el desempeño de estos accesorios bajo condiciones usuales de contaminación salina, industrial, rural y urbana.

3.4.2 INTRODUCCIÓN:

El desarrollo de nuevas tecnologías y materiales ha venido a revolucionar el concepto de los aislamientos externos. Materiales que en su momento se consideraron "eternos" como la porcelana y el vidrio han venido a ser reemplazados por los nuevos materiales sintéticos. Especialmente en el caso de terminales de cable aislado, han quedado atrás prácticas antiguas de mantenimiento; desde la limpieza y rellenado periódico con resinas hasta el reencintado por carbonización. Los materiales poliméricos no sólo ofrecen una instalación más rápida y versátil sino que prometen una única instalación por la vida útil del cable. Sin embargo, aunque estos materiales han sido probados por varios años, con el uso y la experiencia se ha demostrado que no todos son iguales y desde luego no todos son buenos.

No solo la materia base como el EPDM, Hule silicón o EVA (Etil Vinil Acrilato) es importante en su desemeño, la formulación propia de cada fabricante puede hacer una diferencia significativa entre el desempeño de dos productos similares; más aún, factores de diseño como la forma y distancia de fuga juegan un papel determinante en el desempeño en

ambientes hostiles por contaminación. Sin embargo las normas actuales no contemplan un criterio único de selección.

Con la diversidad de nuevas tecnologías y marcas en el mercado y al no contar con una herramienta de selección adecuada, se ha optado por sobreaislar los sistemas con objeto de quedar protegidos ante los posibles efectos del medio ambiente; sin embargo esta práctica no sólo encarece el producto, sino que además no asegura el correcto desempeño de la terminal bajo condiciones severas.

Siendo México uno de los países con más problemas por contaminación y considerando que las normas internacionales de terminales no contemplan este problema, el subcomité de Terminales del ANCE consideró conveniente incluir en la Norma Mexicana de Terminales, algunos parámetros que ayuden a la selección adecuada de éstas en ambientes contaminados, realizando el presente estudio para determinar el efecto de los diferentes ambientes contaminados sobre terminales retiradas de campo.

3.4.3 ANTECEDENTES:

Se seleccionaron las muestras de lugares considerados clave por su problemática y representatividad, eligiendo terminales que tuvieron un cierto tiempo de instalación y se encontraran en condiciones similares de contaminación. Las pruebas a realizar serían las siguientes:

- 1.- Medición del DESD (Densidad equivalente de sal depositada).
- 2.- Tensión de aguante en seco en corriente alterna durante 1 minuto.
- 3.- Corriente de fuga.
- 4.- Tensión de aguante en húmedo en corriente alterna durante 10 segundos.
- 5.- Tensión de aguante al impulso por rayo.
- 6.- Tensión a la ruptura en 60 Hz.

3.4.4 DESARROLLO:

Se retiraron muestras de los siguientes lugares:

- Acapulco, Guerrero.
- Puerto Vallarta, Jal.
- Coatzacoalcos, Ver.
- Veracruz, Ver.
- Naucalpan, Edo de México.
- Xalostoc, Edo de México.
- Tacuba, D.F.

Tabla A- Tabla 22.- Terminales retiradas en diversos lugares de la República Mexicana.

Muestra	Lugar	Tipo de Terminal	Tiempo de instalación (Años)	Tensión de servicio KV	Clase de aislamiento KV	Distancia de fuga (mm)	Altitud s/ niv. Del mar. (m)
1	Acapulco, Gro.	Porcelana	1.8	13.6	15	505	100
2	Acapulco, Gro.	Polimérica	4.8	13.6	15	655	100
3	Acapulco, Gro.	Silicon	1.6	13.6	25	560	100
4	Puerto Vallarta	Polimérica	3.0	13.8	15	530	0
5	Puerto Vallarta	Silicon	3.0	13.8	15	470	0
6	Coatzacoalcoz	Polimérica	3.1	13.2	25	935	0
7	Coatzacoalcoz	Silicon	1.7	13.2	25	560	0
8	Veracruz.	Polimérica	5.0	13.2	35	1200	0
9	Veracruz.	Silicon	3.0	13.2	15	470	0
10	Naucalpan	Silicon	5.0	23.0	25	570	2280
11	Xalostoc	EPDM	3.3	23.0	25	520	2280
12	Xalostoc	Polimérica	7.7	23.0	25	825	2280
13	Tacuba	Porcelana	29.0	23.0	25	533	2280

La tabla A, muestra un resumen que incluye el número asignando a la terminal retirada para efectos de este estudio, el lugar de retiro, el tipo de terminal, el tiempo de instalación, la tensión de servicio, la clase de terminal, la distancia de fuga y la altitud sobre el nivel del mar.

En algunas de las terminales instaladas en zonas costeras se observaron señales importantes de deterioro (tales como erosión, fracturas y perforaciones en el aislamiento) así como prácticas de puesta a tierra no recomendables que favorecen la concentración de corrientes de fuga, acelerando la erosión de los materiales. También en algunas de las muestras de la zona metropolitana se observaron fracturas en el aislamiento y bandas secas.

3.4.5 PRUEBAS FÍSICAS

3.4.5.1 Medición de la densidad equivalente de sal depositada en sitio (DESD).

Para no afectar las condiciones originales de la terminal al efectuar la medición del DESD y alterar con ello los resultados de las pruebas a realizar posteriormente, se hizo la medición en una terminal adyacente a la que se retiró, en la misma transición, teniendo cuidado de que no existiera ninguna condición especial que influyera en mayor o menor grado sobre la contaminación depositada en ellas.

El DESD es una medida de proporcionalidad directa de la intensidad de contaminantes sobre aisladores, obtenida al transformar la conductividad real del depósito contaminante a una concentración equivalente de solución salina (NaCl + H₂O) de la misma conductividad. Es la medida más comúnmente empleada en análisis experimentales.

Las muestras retiradas fueron empacadas y enviadas al Lapem para la realización de las siguientes pruebas:

3.4.6 PRUEBAS DIELECTRICAS

3.4.6.1 Prueba de tensión de aguante en seco en corriente alterna durante 1 minuto.

En las condiciones en que se recibieron las terminales, se realizó esta prueba considerando de acuerdo a la NMX-J-199 el siguiente criterio: *Si el espécimen soporta la tensión de prueba especificada en la columna 2 de la tabla 3, durante 1 minuto, debe considerarse que éste ha pasado la prueba. Si ocurre un flameo, la prueba debe repetirse, si al repetir la prueba también resulta un flameo u otra ruptura dieléctrica, debe considerarse que el espécimen ha fallado. Si el espécimen no falla al repetir la prueba, debe considerarse que ésta ha pasado la prueba.*

3.4.6.2. Medición de corrientes de fuga superficiales.

Se realizó esta prueba en seco y en húmedo, aplicando a la terminal la tensión de fase a tierra según la tensión de operación en campo a la que fueran sometidas, obteniendo lecturas cada minuto durante 5 minutos.

Tabla B- Tabla 23.- Resultados de la medición del DESD en sitio:

Muestra	Conductividad corregida.	Resistividad Volumétrica	DESD medidos	Grado de contaminación retirada de la terminal (Clasificación LyF)	Observaciones.
1	185	4212	0.0259	LIGERO "A"	Lavado Periódico
2	230	4347	0.0259	LIGERO "A"	Lavado Periódico
3	*	*	*	*	Lavado Periódico
4	20	20	0	NO TIENE	Lavado Periódico
5	*	*	*	*	Lavado Periódico
6	279	2875	0.04	LIGERO "B"	Lavado Periódico
7	496	1602	0.0759	ALTO "D"	Lavado Periódico
8	260	3056	0.036	LIGERO "B"	Lavado Periódico
9	207	3914	0.0259	LIGERO "A"	Lavado Periódico
10	380	2410	0.048	MEDIO "C"	Lav. Nat./ Cont. Graso
11	119	8403	0.013	LIGERO "A"	Lav.Nat./adherido, sólo se desprende el 40%
12	405	2847	0.04	LIGERO "B"	Lavado Natural
13	160	6544	0.0189	LIGERO "A"	Lavado Natural

3.4.6.3 Prueba de tensión de aguante en húmedo en corriente alterna durante 10 segundos.

Después de realizar la medición de corrientes de fuga en seco y en húmedo, se procedió a efectuar esta prueba, considerando de acuerdo a la NMX-J-199 el siguiente criterio: *Si el espécimen soporta la tensión de prueba especificada en la tabla 2, durante 10 segundos, debe considerarse que éste ha pasado la prueba. Si ocurre un flameo, debe repetirse la prueba. Si al repetir la prueba también resulta un flameo u otra ruptura dieléctrica, debe considerarse que el espécimen bajo prueba ha fallado. Si el espécimen no falla al repetir la prueba, debe considerarse que éste ha pasado la prueba.*

3.4.6.4 Prueba de tensión de aguante de impulso por rayo.

Una vez realizada la prueba de tensión de aguante en húmedo en corriente alterna durante 10 segundos, se procedió a efectuar esta prueba, considerando de acuerdo a la norma de referencia, lo siguiente:

3.4.6.4.1. La forma de onda aplicada, fue la normalizada de 1.2 μ s x 50 μ s positiva y negativa.

3.4.6.4.2. Deben aplicarse 10 impulsos consecutivos en cada polaridad al espécimen bajo prueba. Si no ocurre un flameo y otro tipo de ruptura dieléctrica, se considera que el espécimen ha pasado la prueba. Si dos o más de los impulsos aplicados causan flameos, debe considerarse que el espécimen bajo prueba ha fallado. Si uno de los impulsos

flameo u otro tipo de ruptura dieléctrica, al aplicar los 10 impulsos, debe considerarse que el espécimen ha pasado la prueba.

3.4.7 RESULTADOS:

3.4.7.1 Pruebas Físicas:

Los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla C (Tabla 24), en la cual los valores corresponden a los depositantes encontrados en la terminal y no indican en modo alguno el grado de contaminación del lugar.

Se hace notar que en algunas muestras los contaminantes estaban muy adheridos y sólo se les retiró una pequeña cantidad para efectuar la medición.

Tabla C (Tabla 24).- Resultados de la medición del DESD en sitio.

Muestra No.	Conductividad Corregida μ mhos/cm	Resistividad Volumétrica a 18°C Ω -cm	DESD medido IEC207 mg/cm ³	Grado de contaminación (Clasific. LyF)	Observaciones:
1	183	6212	0.0259	Ligero "A"	Lavado periódico
2	230	4347	0.0237	Ligero "A"	Lavado periódico
3	230	4347	0.0237	Ligero "A"	Lavado periódico
4	20	20	0	No tiene	Lavado periódico
5	20	20	0	No tiene	Lavado periódico
6	270	2878	0.04	Ligero "B"	Lavado periódico
7	494	1602	0.0759	Alto "D"	Lavado periódico
8	260	2056	0.034	Ligero "B"	Lavado periódico
9	207	3914	0.0294	Ligero "A"	Lavado periódico
10	360	2110	0.048	Medio "C"	Lavado natural
11	119	6403	0.013	Ligero "A"	Lavado natural, la cont. no se desprende
12	409	2447	0.04	Ligero "B"	Lavado natural
13	149	4544	0.0143	Ligero "A"	Lavado natural

3.4.7.2 Pruebas dieléctricas:

Los resultados de las pruebas dieléctricas de tensión de aguante en seco, corrientes de fuga superficiales y de tensión de aguante al impulso por rayo, se muestran en la tabla D (Tabla 25).

Tabla D (Tabla 25).- Resultados de las pruebas dieléctricas

Muestra No.	Tensión de aguante a 60 Hz.				Corriente de fuga prom. (1 minuto)		Tensión de aguante de impulso por rayo	
1	50	-	-	-	0.025	0.231	-	-
2	50	-	-	-	0.013	0.022	-	-
3	50	PASA	36.5	PASA	0.016	0.312	89.5	PASA
4	50	PASA	36.5	PASA	0.010	0	89.5	PASA
5		PASA	36.5	PASA	0	0.276	89.5	PASA
6		PASA	36.5	PASA	0	0.142	89.5	PASA
7		PASA	36.5	PASA	0	0.248	89.5	PASA
8		PASA	36.5	PASA	0	0	89.5	PASA
9		PASA	36.5	PASA	0	0.012	89.5	PASA
10		PASA	36.5	PASA	0.011	1.338	120.34	PASA
11		PASA	36.5	PASA	0.001	1.385	120.34	PASA
12		PASA	36.5	PASA	0.003	1.364	120.34	PASA
13	65	-	-	-	0.025	-	-	-

3.4.7.3 Análisis de Resultados:

Las muestras 1,2 y 13 se encontraron con daños en el cable, los cuales fueron provocados durante el transporte, por lo que no fue posible probarlos.

La muestra número 11 presentó una cantidad excesiva de descargas durante la aplicación de la prueba de aguante de tensión en húmedo a 60Hz, asimismo se observó que su diseño favorece la formación de bandas secas que facilitan el establecimiento de arcos.

Las corrientes de fuga en número de la muestra número 13, fueron tan elevados que no pudieron ser medidos con el equipo disponible.

Esto implica que esta terminal genera pérdidas considerables en el sistema de redes de distribución subterránea, mismas que no son cuantificables directamente, ya que no se instalan medidores de consumo antes de las acometidas, que correspondan a cada circuito de distribución, sino que solamente estas pérdidas se prorratan entre todos los usuarios, elevando el costo del servicio, considerándose como parte de los costos de operación, los cuales pueden ser reducidos.

En las columnas correspondientes a las corrientes de fuga, se observa que éstas aumentan al incrementarse la tensión de operación. Su presencia acelera el deterioro del

material de las terminales y aumenta las pérdidas en el sistema. Su valor depende del diseño y material de la terminal.

La muestra número 7, a pesar de estar operando a un nivel de tensión inferior al de diseño (sobreaislada), presenta daños debidos a la contaminación del lugar donde se encuentra instalada.

Debido a que el problema de contaminación depositada en las terminales estudiadas no se reflejó durante la realización de las pruebas dieléctricas, ya que todas las muestras cumplieron con la secuencia de pruebas propuestas por el Comité, se vio la necesidad de incluir alguna prueba adicional que discrimine el efecto de la contaminación, sobre todo en la parte correspondiente al aislamiento. Se consideró la aplicación de la cámara de niebla salina con acondicionamiento QUV (ciclo de condensación, calentamiento y rayos ultravioleta) y abrasivo, así como la aplicación del TERT (Prueba de resistencia a la erosión y a la formación de caminos conductivos de carbón) optando por ésta última debido a que presenta las siguientes ventajas:

- Discrimina los factores que pueden influir en el desempeño del producto, concentrándose exclusivamente en la superficie que está sujeta a contaminación.
- Es una prueba de envejecimiento acelerado que provee información valiosa en un tiempo breve.
- Permite esforzar el material más allá de las propiedades que tiene como producto terminado.

Esta prueba se efectuó a varios tipos de materiales como fueron Silicón, EPDM, EVA de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D-2303, aplicando 6KV durante una hora y utilizando una solución contaminante de 0,9 mL/min con resistividad de 370 a 400 Ω cm (solución al 0.1% de cloruro de amonio con 0.02% de Tritón X-100 como agente humectante). Después de la aplicación de la tensión durante el tiempo indicado, no deben presentarse daños visibles por trayectorias de carbonización, arborescencias, fracturas o erosión en los materiales. "

CONCLUSIONES

Los cables de potencia subterráneos requieren de accesorios herméticos, debido a que la presencia de humedad y otros agentes externos causan la degradación de sus elementos.

Todas las consideraciones planteadas en esta sección llevan a la conclusión de que los cables aislados con EP son más confiables en servicio que los cables aislados con XLP debido a las siguientes ventajas:

- Mayor resistencia a las arborescencias en presencia de agua.
- Resistencia a las descargas parciales, aún cuando sean detectables.
- Mayor estabilidad del esfuerzo dieléctrico con el incremento de las dimensiones del cable.
- Mejor retención de las propiedades físicas y eléctricas a las temperaturas de emergencia y cortocircuito.
- Mayor tiempo de vida tanto en condiciones secas como bajo ciclos térmicos y en el agua.
- Menor coeficiente de expansión térmica, lo cual conduce a una mayor estabilidad de los sistemas de pantallas.
- Mayor flexibilidad y facilidad de instalación.
- Mayor confiabilidad de los empalmes y terminales.

La preparación de los cables para la colocación de los accesorios es un factor crítico para el buen funcionamiento de la instalación, ya que la generación de cortes demasiado profundos, principalmente sobre el aislamiento, causa el fenómeno de descargas parciales, y en consecuencia el fallo prematuro del cable y/o accesorios.

Los accesorios empalmes, deben diseñarse para soportar lo mismo o más que el cable, tanto en el aspecto eléctrico, como en el hermético, sin que se pierda flexibilidad el cable en el que se aplican. La principal diferencia entre las tecnologías existentes se debe a dos factores: Rapidez de instalación, seguridad y versatilidad, donde en la primera predomina la tecnología contráctil en frío, en la segunda también y en la tercera la tecnología encintada.

Las terminales que deben utilizarse en cualquier instalación que requiera confiabilidad (Prácticamente todas la requieren actualmente) son clase 1.

En caso de utilizar una terminal que no sea clase 1, de entrada, se perderá el sello hermético a todo lo largo del cable, lo cual abre la posibilidad de sufrir

fallas debidas a la penetración de agentes del medio ambiente al aislamiento, los cuales pueden ser desde agua, hasta compuestos de sulfuro o incluso ácidos, dependiendo de la ubicación de la instalación. Por otra parte, en caso de utilizar una terminal clase 3, además de correr el riesgo anterior, se agrega la posibilidad de sufrir un arco eléctrico externo, sobre la superficie aislada desde la parte energizada hasta la tierra, lo cual provocaría igualmente una interrupción de servicio en el sistema, y en ocasiones, la pérdida de grandes longitudes de cable (Cuando no se conservan los tramos de guarda correspondientes en los pozos de visita contiguos a cada transición o equipo).

Las terminales deben diseñarse en forma tal, que todos sus elementos, incluyendo cuerpo, zapata y sistema de puesta a tierra, el grado de contaminación del lugar en donde van a ser instaladas.

Al realizar la prueba de TERT, se obtuvieron resultados que reflejaron de manera muy aproximada los efectos de la contaminación observados en las muestras de terminales retiradas en campo, por lo cual es recomendable su inclusión en la norma NMX-J-199.

La aplicación de la cámara de niebla salina con acondicionamientos QUV y abrasivo, aunque por limitaciones de tiempo para el presente estudio no se aplicó, no se descarta como una buena alternativa para reflejar los efectos que la contaminación produce en campo sobre las terminales.

Es importante que las terminales sean marcadas con la fecha de fabricación.

Es también importante que los instructivos anexos a las terminales, indiquen claramente la forma de instalación de cada uno de sus elementos, incluyendo la conexión de puesta a tierra, indicando las prácticas que deben evitarse y que se pusieron de manifiesto al observar las conexiones de puesta a tierra inadecuadas, en varias muestras retiradas.

FIGURAS

Fig. 1 Forma de los conductores.

Fig. 2 Concentración de esfuerzos eléctricos en los instarsticios de un conductor cableado.

Fig. 3 Comparación de los aislamientos apantallados y no apantallados.

- a) Aislamiento directamente extruido sobre el conductor
- b) Pantalla semiconductor.

Fig. 4 Distribuciones de esfuerzos en: a)Cable sin pantalla b)Cable con pantalla.

Fig. 5 Disminución de la tensión a partir del conductor en:

- a)Cable sin pantalla
- b) Cable con pantalla aterrizada
- c) Cable con pantalla no aterrizada.

Fig. 6 Capacitancia variable a tierra debido a impedancia no uniforme.

Fig. 7 Partes de un cable subterráneo de media tensión.

Fig. 8 Diferentes tipos de pantalla electrostática en cables de media tensión.

Fig. 9 Preparación de un cable subterráneo de media tensión.

Fig. 10 Pasos para realizar un empalme de cable subterráneo de media tensión.

Fig. 11 Transformación de la onda senoidal en una elipse.

Fig. 12 Comportamiento de la elipse durante la prueba de descargas parciales

Fig. 13 Diferentes causas de las descargas parciales.

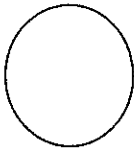
Fig. 14 Gráfica ilustrativa del principio de refracción de campos.

Fig. 15 Hidrofobicidad.

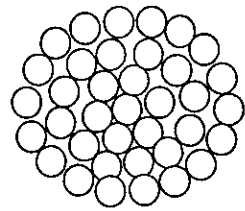
Fig. 16 Concentración de esfuerzos al final de la pantalla semiconductor.

Fig. 17 Métodos para el control de esfuerzos.

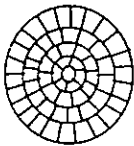
Fig 1.- Forma de los conductores



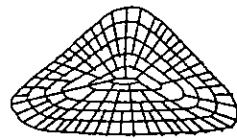
Conductor sólido.



Cable concéntrico

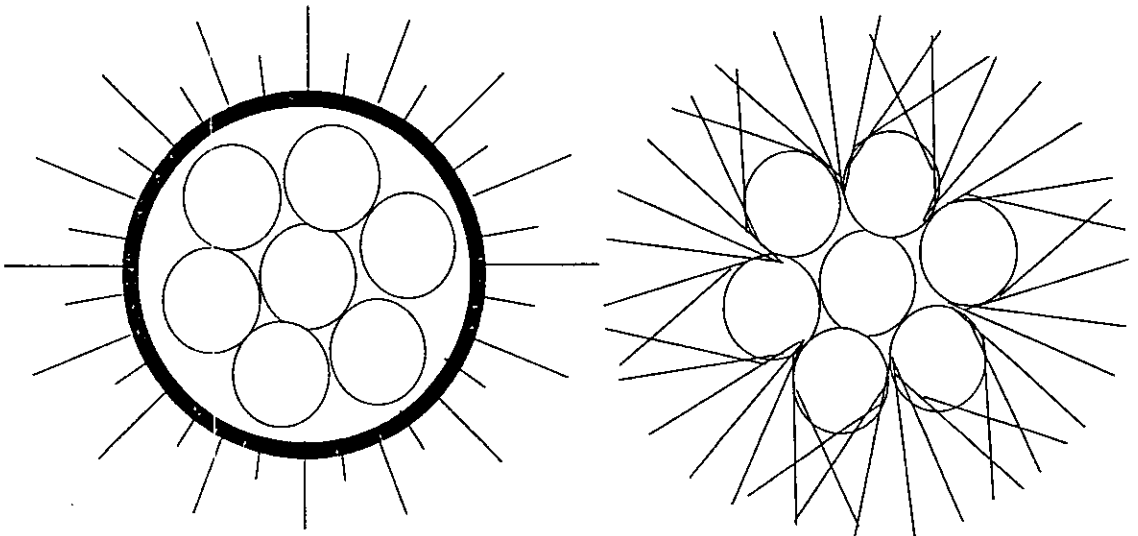


Conductor compacto



Cable sectorial

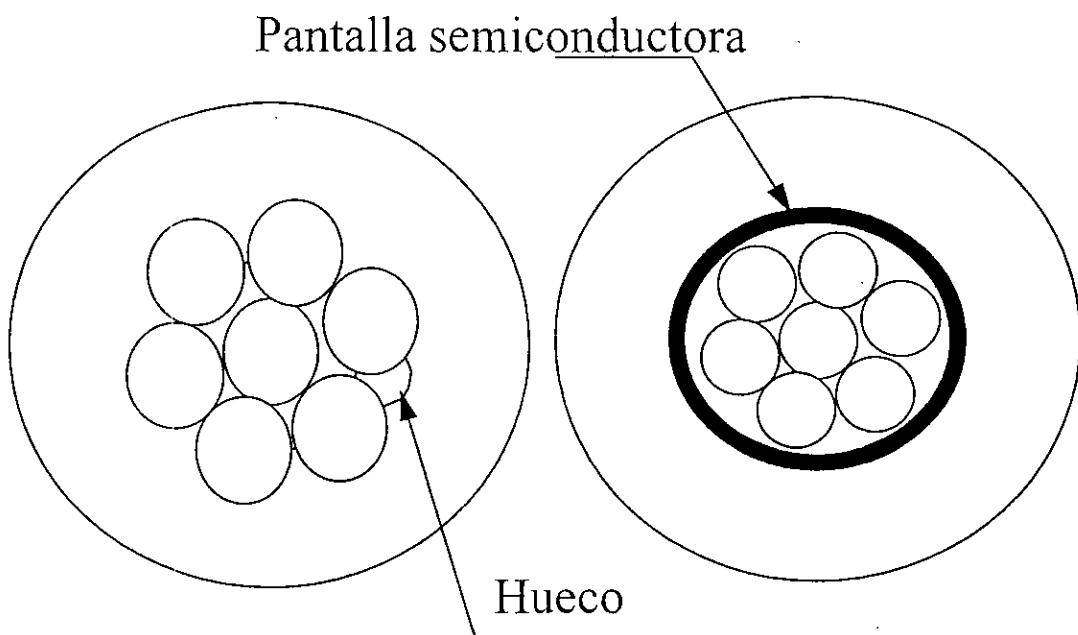
Fig 2.- Concentración de esfuerzos eléctricos en los instersticios de un conductor cableado



a) Cable apantallado

b) Cable no apantallado

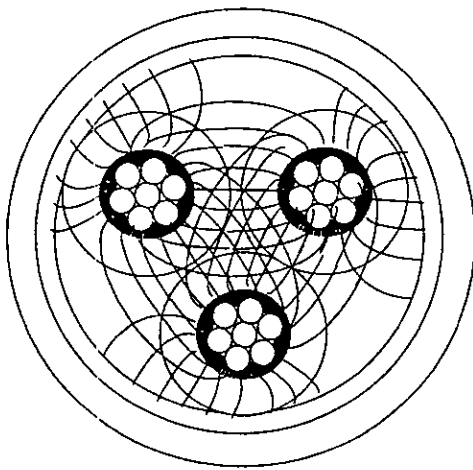
Fig 3.- Comparación de los aislamientos apantallados y los no apantallados



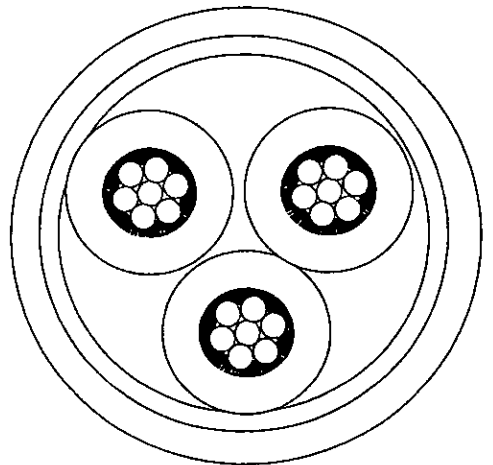
a) Aislamiento directamente extruido sobre el conductor

b) Aislamiento extruido sobre una pantalla semiconductor

Fig 4.- Distribuciones de esfuerzos en cables tripolares apantallados polarmente y no apantallados polarmente



a) Cable sin pantalla.

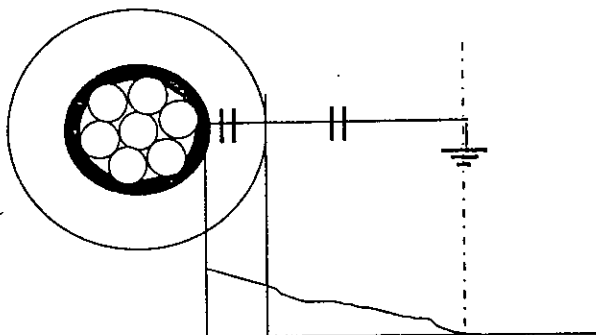


b) Cable con pantalla

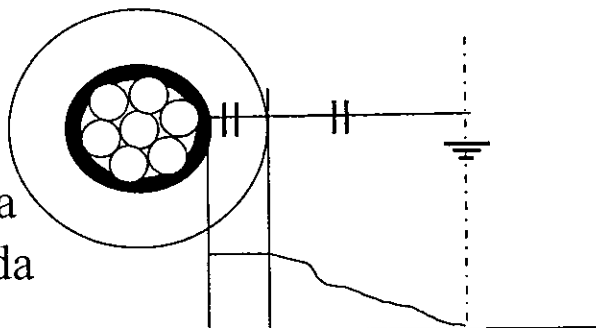
Fig 5.- Disminución de la tensión a partir del conductor

en:

a) Cable sin pantalla



a) Cable con pantalla no aterrizada



a) Cable sin pantalla aterrizada.

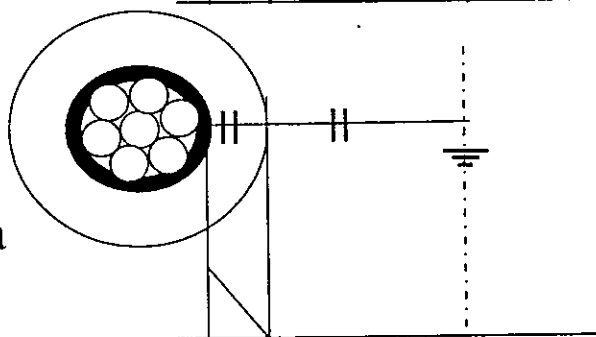


Fig 6.- Capacitancia variable debido a una impedancia no uniforme

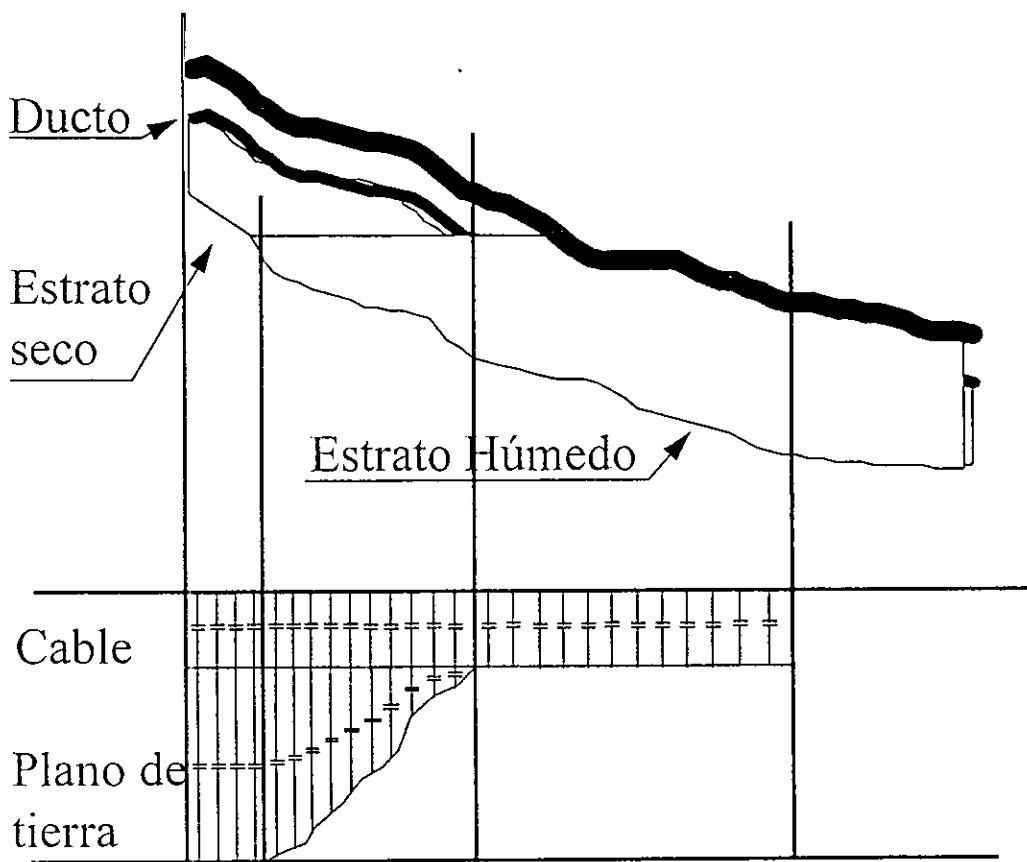


Fig 7.- Partes de un cable subterráneo de media tensión

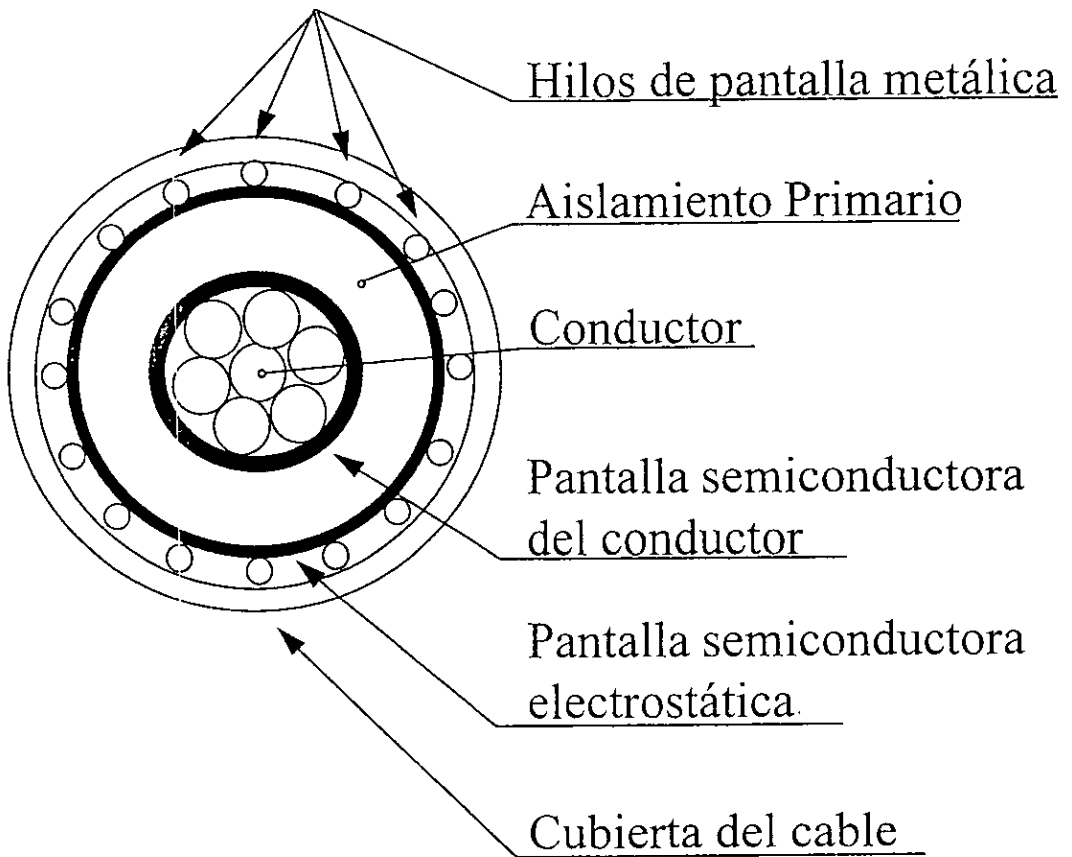
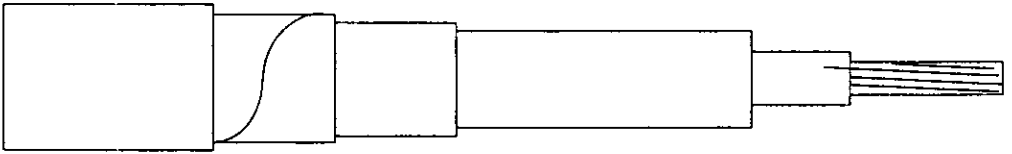
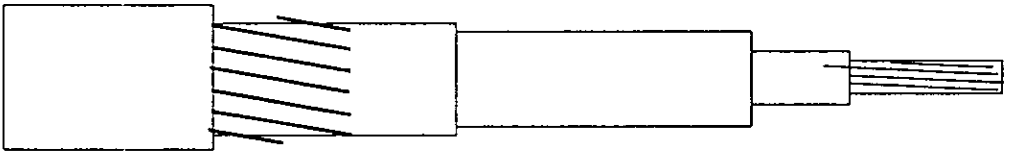


Fig 8.- Tipos de pantalla electrostática

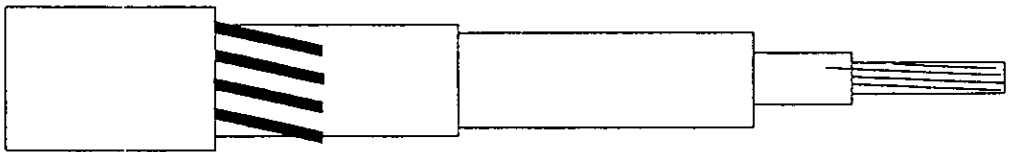
a) Pantalla de cinta de cobre



b) Pantalla de hilos suaves de cobre.



c) Pantalla de hilos gruesos de cobre o de neutro concéntrico



d) Pantalla metálica de plomo

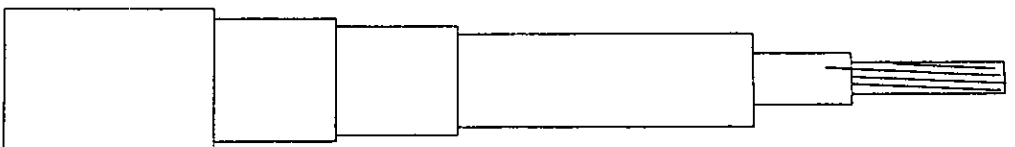
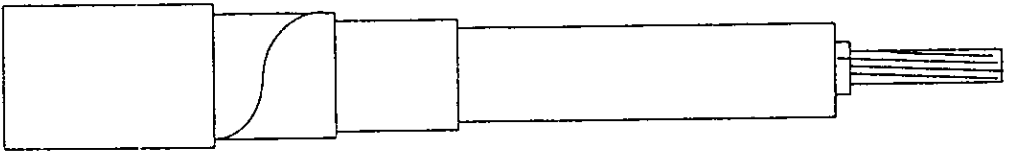


Fig 9.- Preparación de un cable de media tensión:

a) Preparación convencional de cable



b) Preparación con punta de lápiz

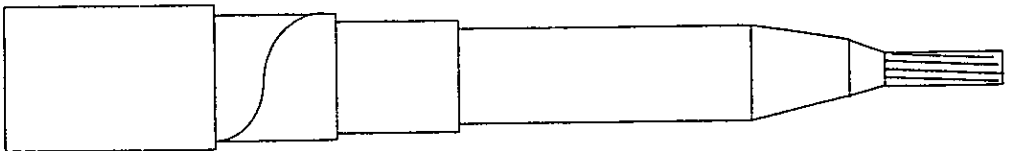
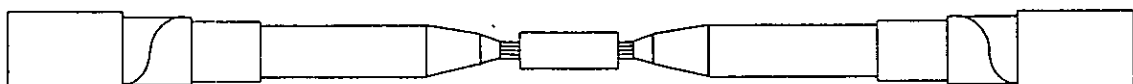


Fig 10.- Elaboración de un empalme encintado.

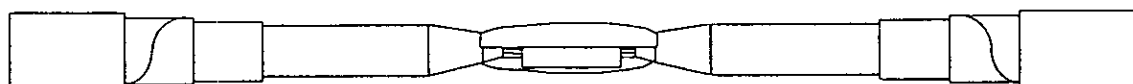
Preparación del cable



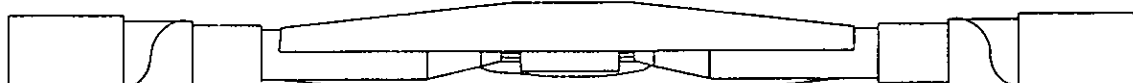
Conexión de los conductores



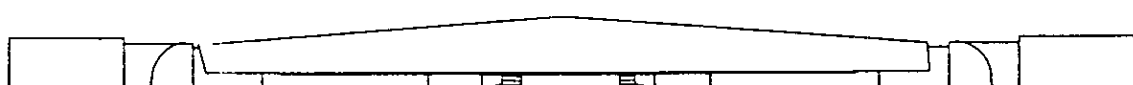
Reconstrucción de la pantalla semiconductora del conductor.



Reconstrucción del aislamiento primario.



Reconstrucción de la pantalla semiconductora electrostática.



Reconstrucción de la pantalla metálica electrostática.



Reconstrucción de la cubierta del cable.

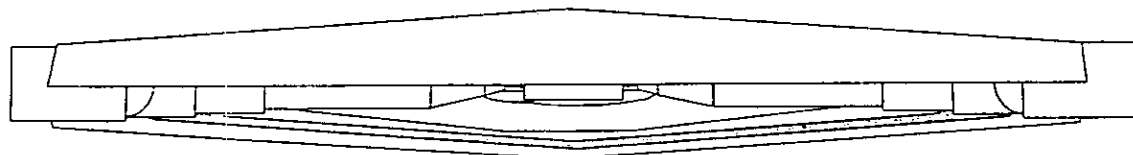


Fig 11.- Transformación de la onda senoidal en una elipse

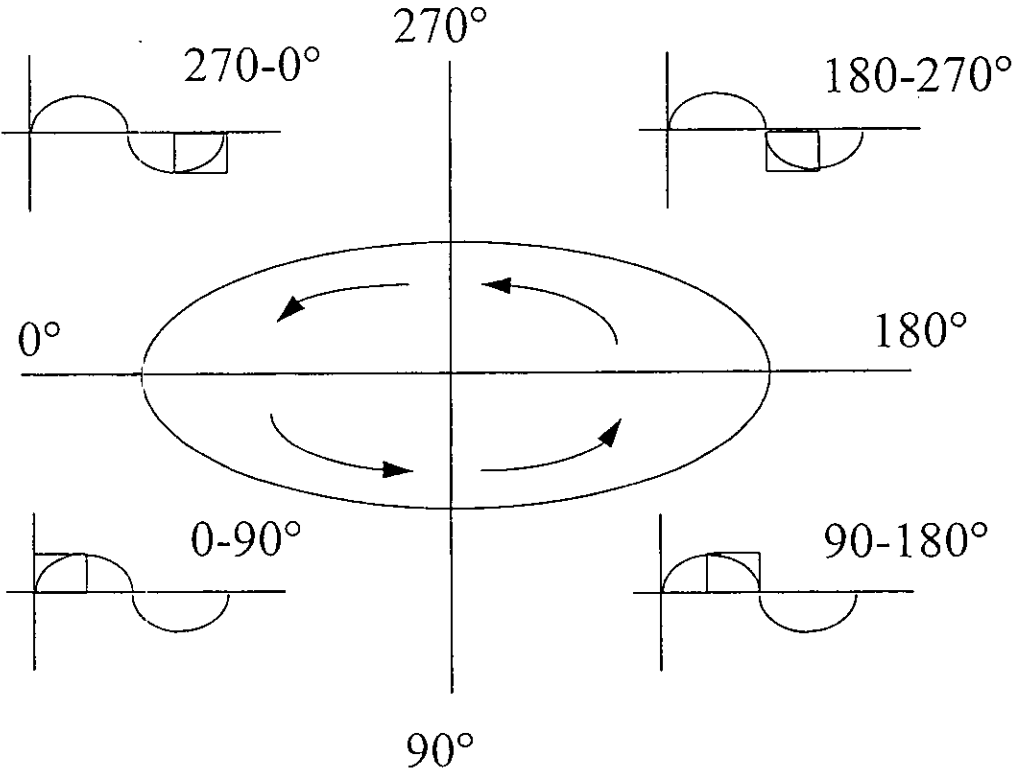
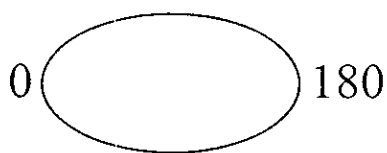
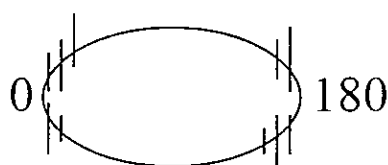


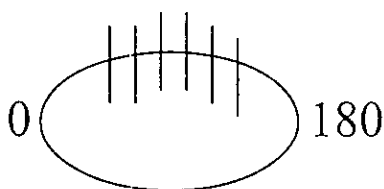
Fig 12.- Comportamiento de la elipse durante la prueba de descargas parciales



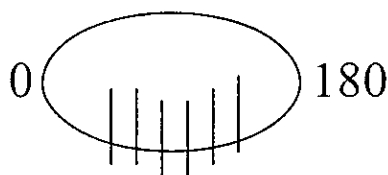
Elipse limpia, no se presentan descargas



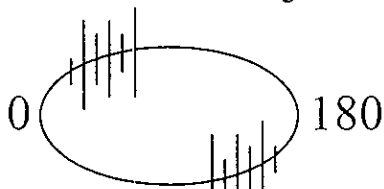
Ruido generado por el contacto eléctrico



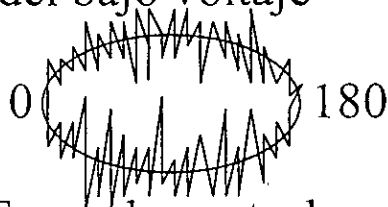
Puntos filosos cerca del alto voltaje



Puntos filosos cerca del bajo voltaje

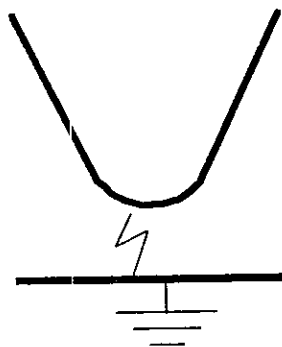


Vacíos en el aislamiento

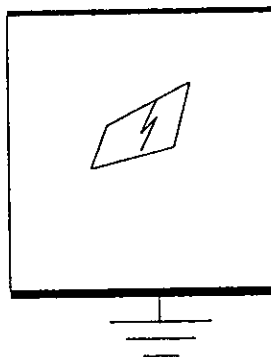


Fuera de control, varias causas posibles

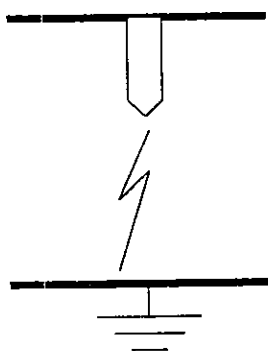
Fig 13.- Diferentes causas de las descargas parciales



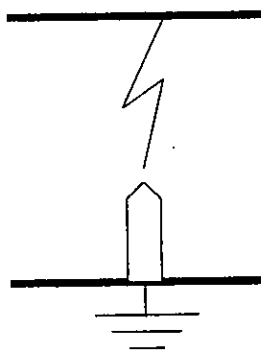
Cercanía excesiva.



Vacíos en el aislamiento



Puntos filosos en la alta tensión



Puntos filosos en la parte de tierra

Fig 14.- Gráfica ilustrativa del principio de refracción de campo.

$$\frac{\text{Tan } \alpha}{\text{Tan } \beta} = \frac{K_1}{K_2}$$

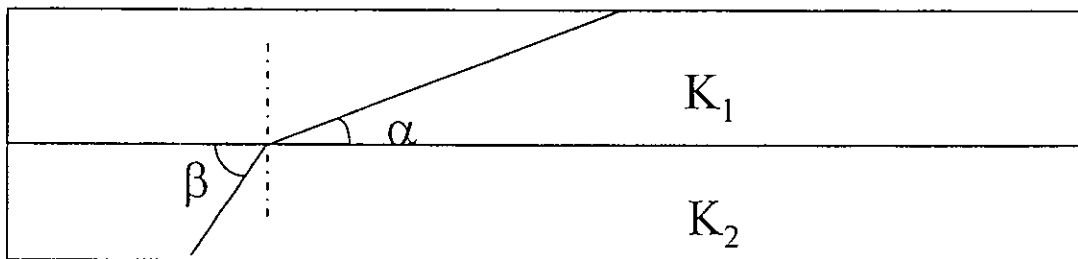
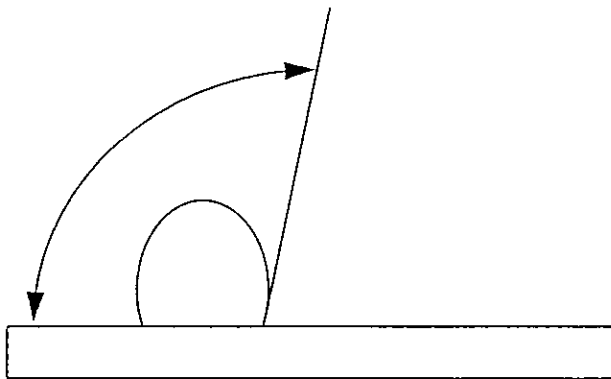
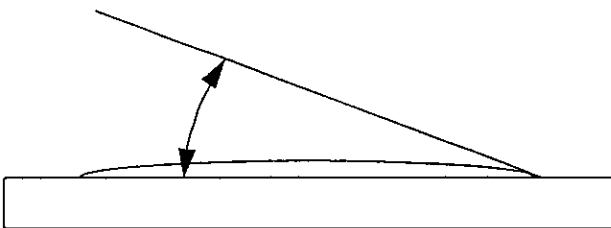


Fig 15.- Hidrofobicidad.



Material Hidrofóbico



Material Hidrofílico

Fig 16.- Concentración de esfuerzos al final del corte de la pantalla semiconductor

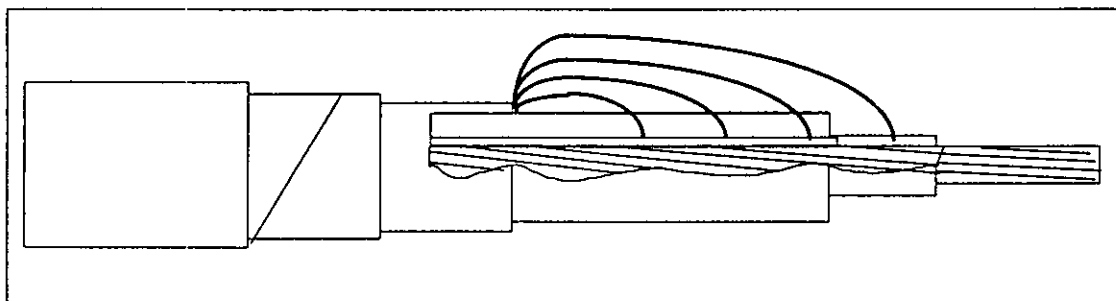
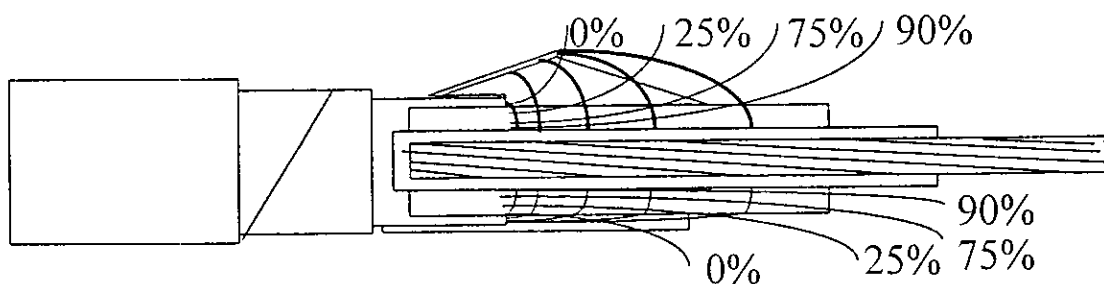


Fig 17.- Métodos para el control de esfuerzos.

Geométrico



Resistivo Capacitivo (Alta K)

Bibliografía

- Manual técnico de Cables de energía, V. Sierra Madrigal, Segunda Edición, MC Graw Hill, p. XIX
- Siguiendo las prácticas de transmisión y distribución de CFE y CLyF
- Publicación MEMOTEC, Grupo ConduMex, Selección de Cables de Energía,
- Manual de Instalaciones eléctricas residenciales e industriales, Enriquez Harper, Segunda pre-edición corregida y aumentada, Editorial Limusa, pp. 77-107.
- Norma IEEE-std-404-1993 High Voltage Splice Devices for Power Cables.
- Norma NMX-J-199-1997-ANCE, Norma Mexicana para Terminales de Media Tensión.
- Electromagnetismo, John D. Kraus, Tercera Edición (Primera en español), De. Mc Graw Hill, pp 71-72.
- IEEE Recommended Practice for electric power distribution for industrial plants, New York IEEE-1994.
- Stevenson William.- Elements of Power System analysis. 4a edición, New York.
- Westinghouse Electric Corporation.- Electric Utility Engineers Reference Book, East Pittsburgh 1959.
- Woodruff LF.- Principles of Electric Power Transmission and Distribution, New York 1928.
- Espinosa y Lara, Roberto.- Sistemas de Distribución, 1990, Limusa.
- Diario Oficial de la Nación del 22 de diciembre de 1997, secciones segunda a novena.
- Norma ASTM-D2303-1995: Prueba de Resistencia a la erosión y al Tracking.
- Boletín de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, sobre metros de líneas instalados clasificados por circuitos de distribución subterránea con datos de 1997.

- Boletín de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, sobre cantidad y capacidad instalada de transformadores de la distribución subterránea, con datos de 1997.
- Boletín de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, sobre metros de líneas instaladas clasificados por tensiones de la distribución subterránea con datos de 1997.
- Boletín de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, sobre metros de líneas instalados en las divisiones de distribución subterránea con datos de 1997.
- Boletín de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, sobre metros de líneas instalados en las divisiones por años en la distribución subterránea, con datos de 1997.
- Boletín de la Gerencia de Distribución, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, sobre instalaciones subterráneas existentes al primer semestre de 1997.
- Boletín de información general de CFE con datos de 1996.