

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA



EVALUACION Y PRUEBAS PARA CABLES DE 115 KV. CON AISLAMIENTO SOLIDO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

PEDRO JAVIER FELISART TRIAS



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.

EVALUACION Y PRUEBAS PARA CABLES DE 115 kV
CON AISLAMIENTO SOLIDO

1. I N T R O D U C C I O N
2. CLASIFICACION DE LOS CONDUCTORES ELECTRICOS
3. DISEÑO DE UN CABLE DE ENERGIA
4. FABRICACION DE UN CABLE DE ENERGIA
5. PARAMETROS ELECTRICOS
6. EXPERIMENTACION
 - 6.1. Evaluación de Aislamientos Mediante Modelos
 - 6.2. Pruebas de Calificación
 - 6.3. Pruebas Especiales
 - 6.4. Pruebas a los Componentes
 - 6.5. Pruebas de Aceptación
 - 6.6. Pruebas de Campo
7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES
8. BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUCCION

La historia de los cables de alta tensión con aislamiento de hule comienza aproximadamente en el año de 1930, con un cable para 5,000 Volts que consistía en un conductor normal con cuatro milímetros de espesor de aislamiento, una cinta de hule de protección y una cubierta exterior de asfalto o plomo. Estos cables eran producidos y probados en las mismas instalaciones usadas para la fabricación de cables de baja tensión. Alrededor de 1948 se incorporan importantes cambios, tales como la fabricación de un tipo de aislamiento en forma de butilo, el descubrimiento con más fundamentos, del efecto de las condiciones ambientales en las cubiertas, el reconocimiento de la importancia de los demás componentes del cable aparte del aislamiento y el mejoramiento de los equipos de fabricación y pruebas.

El término "hule" se aplicó originalmente a los sólidos resistentes que se obtenían de la coagulación del látex de ciertos árboles. Con el avance de la tecnología de materiales el nombre se amplió para cubrir a materiales con características físicas similares incluyendo a la familia de los sólidos elásticos. Así al butilo y al silicón se les denominó hules y se incrementó el uso del término "polímeros" (nombre derivado de su proceso de fabricación), para los hules manufacturados. Sin embargo con el propósito de establecer un antecedente, la terminología exacta no es de vital importancia por lo cual se designará indistintamente como hule, polímero, elastómero o compuesto.

Ningún hule ya sea natural o manufacturado se utiliza solo, todos son una mezcla de cargas, plastificantes, endurecedores,

pigmentos, acelerantes, agentes antioxidantes o resistentes - al envejecimiento. Esto nos brinda la posibilidad de obtener compuestos que varían de suaves a duros, y de semiconductores a aislantes. Esta variedad de posibilidades y su alta procesabilidad los convierten en una materia prima ideal para cables de energía.

En México la utilización de este tipo de compuestos se inició alrededor de 1960 con aislamientos a base de hule butilo (Iso butilo-Isopreno), Polietileno de cadena cruzada (XLP) y Etileno Propileno (EP).

La versatilidad de los hules, el avance tecnológico en la maquinaria para fabricación y equipos de prueba, y la creciente necesidad de transmisión de energía eléctrica a tensiones elevadas han originado una investigación constante para mejorar los aislamientos elastoméricos, desarrollándose así los compuestos para cables de 115,000 Volts. En contraposición a este tipo de aislamientos para alta tensión existen los laminares en base a capas de papel impregnadas en aceite. Este aislamiento es el que mayor confiabilidad ha proporcionado ya -- que se ha utilizado por años con un índice de fallas casi nulo. Su desventaja fundamental es el elevado costo inicial, mayor costo de instalación y de mantenimiento. Esto ha motivado un interés creciente en los aislamientos elastoméricos.

Debido a la corta experiencia de estos cables en operación y al elevadísimo costo que representa la falla de un cable en funcionamiento se han desarrollado complejos sistemas de evaluación y prueba para todos los elementos del cable desde diseño hasta pruebas en campo, para asegurar una operación confiable.

2. CLASIFICACION DE LOS CONDUCTORES ELECTRICOS

El campo de aplicación de los conductores se va acrecentando día a día a medida que surgen nuevas necesidades de transmitir energía, motivo por el cual no se puede establecer una clasificación definitiva. Sin embargo, para fines prácticos, podemos clasificar a los conductores según su aplicación, re marcando que dicha clasificación no es limitativa.

2.1. Cables de Energía.

Su función primordial es transportar energía eléctrica a una corriente y tensión preestablecida, desde una --- fuente de generación hasta los puntos de consumo durante cierto tiempo.

A su vez los cables de energía se pueden subdividir en:

U S O	TENSION NOMINAL kV	TIPOS DE CABLE	
		AEREOS	SUBTERRANEOS
TRANSMISION	440	ACSR	LPOF
	230		HPOF - LPOF
SUBTRANSMISION	115	ACSR,AAC	HPOF
	69	ACSR	LPOF
DISTRIBUCION ALTA TENSION.	46	ACSR	EP
	35	ACSR	XLP
DISTRIBUCION MEDIA TENSION.	25	AAC	PILC
	15	AAC	
	5	AAC	
DISTRIBUCION BAJA TENSION.	0.6	Cu ó Al + Polietileno	PVC ó XLP

ACSR: Conductor de Aluminio con Refuerzo de Acero.,

AAC : Conductor de Aluminio.

LPOF: Cable con Aislamiento de Papel Impregnado, Baja Presión de Aceite.

HPOF: Cable con Aislamiento de Papel Impregnado, Alta Presión de Aceite.

PILC: Cable con Aislamiento de Papel Impregnado y Cubierta de Plomo.

EP : Cable con Aislamiento de Etileno Propileno.

XLP : Cable con Aislamiento de Polietileno de Cadena Cruzada.

2.2. Cables de Telecomunicaciones:

Su función es la de transmitir señales (voz, sonidos, datos), utilizando la energía eléctrica como medio que se modula para la comunicación.

En base a la frecuencia de operación los podemos subdividir en:

FRECUENCIA KHz	S I S T E M A S	C A B L E S
0.8 - 1.0	Teléfonos Telégrafos Datos Baja Velocidad	Telefónicos en pares SCPO, SCPOe, SCPOF ICeVO, ICeRV
1.0	Música	ACEEg
10	Teléfonos Radio Navegación Aeronavegación	Coaxiales
100 - 1000	Radiodifusión	
50,000-270,000	T.V. Comercial	

La designación de los cables telefónicos está definida en la norma NOM I 50 y consiste en varias siglas.

La primera sigla se refiere al tipo de instalación:

- A.- Aéreo
- I.- Interior
- S.- Subterráneo

La segunda sigla es el material del conductor:

- A.- Acero
- L.- Aluminio
- La.-Aluminio Acero

- B.- Bronce
- C.- Cobre
- Ca.-Cobre Acero
- Ce.-Cobre Estañado
- N.- Níquel
- P.- Plata

La tercera letra es el aislamiento

- H.- Elastómero (hule)
- P.- Papel
- E.- Polietileno
- R.- Polipropileno
- V.- Polivinilo

La cuarta letra se refiere a la cubierta

- H.- Elastómero (hule)
- E.- Polietileno
- R.- Polipropileno
- V.- Polivinilo
- O.- Plomo
- T.- Textil

Si el cable contara con una segunda cubierta le correspondería una letra minúscula para ésta.

En el caso de una protección adicional se puede recurrir a una sigla adicional.

- B.- Blindaje
- F.- Fleje
- H.- Repelente a la humedad
- G.- Guía o refuerzo mecánico

*NOM.- Norma Oficial Mexicana

2.3. Cables de Control y Señalización.

Su función es la de transmitir señales o datos para control, telecomando, telemedición, control de tráfico y -- transporte.

Se clasifican de acuerdo con las normas * ICEA en:

TIPO A.- Cables de señales y control para monitores, registro de datos y conducción de información, ta les como: comunicaciones, telemedición, temperatura, presión, flujo, luces indicadoras y semáforos.

Tensión nominal de operación 300 Volts.

TIPO B.- Cables de control de operación e interconexión de dispositivos protectores. Tensión nominal - 600 Volts.

TIPO C.- Cables para conexión a circuitos de disparo magnético o interruptores donde puedan ocurrir sobretensiones por inducción. Tensión nominal -- 1,000 Volts.

TIPO D.- Cables de control piloto de señalización, instalados paralelamente a líneas de alta tensión y que les pueden ser inducidas altas tensiones. Tensión nominal 600 Volts, aislamiento a tierra de 5,000 Volts.

* I.C.E.A.- Insulated Conductor Engineering Association.

2.4. Alambre Magneto.

Su función es la formación de campos magnéticos útiles - para el aprovechamiento de energía eléctrica.

NEMA clasifica al alambre magneto en base al grado térmico de su aislamiento en:

TEMPERATURA DE OPERACION	A I S L A M I E N T O
90°C	Algodón, Seda, Nylon, Papel.
105	Esmalte, Poliuretano, Polivinil.
130	Epoxy, Poliuretano-Nylon.
155	Poliéster, Fibra de Vidrio.
180	Poliéster modificado, Fibra de Vidrio cubierta con barniz orgánico para alta temperatura.
200	Poliéster con cubierta de poliamida, Fibra de Vidrio con silicón.
220	Poliamida aromática

NEMA.- National Electrical Manufacturers Association.

2.5. Cables de Uso Pesado.

Son cables utilizados en la industria minera o en aplicaciones industriales donde se requiera una protección --- excesiva contra agentes externos.

Los podemos dividir en:

a.- Cables uso rudo utilizados para conectar herramien--

tas manuales, maquinaria, etc.

- b.- Cables Tiro de Mina que sirven para la alimentación de energía eléctrica a palas mecánicas excavadoras y maquinaria móvil.
- c.- Cables Galería de Mina que son los cables para la -- distribución de energía eléctrica en el interior de una mina.

2.6. Cables para la Construcción.

Son los utilizados para el alambrado de circuitos en edificios, casas, etc. Según el Reglamento de Instalaciones Eléctricas, emitido por la Dirección General de Normas (DGN) se dividen en:

T I P O	CLASE TERMICA	UTILIZACION
TW (Thermoplastic Wire)	60°C	Ambientes Secos o Húmedos
THW (Thermoplastic Heat Wire)	75-90	Ambientes Secos a 90° ó Húmedos a 75°.
THWN (Thermoplastic Heat Wire Nylon)	75	Ambientes Secos o Húmedos
THHN (Thermoplastic Heat Heat Nylon)	90	Ambientes Secos

2.7. Varios.

Son otros tipos de conductores no incluidos en los grupos anteriores, tales como: Cables para alambrado de tableros, para transportes (Metro, FFCC, Barcos), cables para línea electrónica, cables automotrices, etc.

tas manuales, maquinaria, etc.

b.- Cables Tiro de Mina que sirven para la alimentación de energía eléctrica a palas mecánicas excavadoras y maquinaria móvil.

c.- Cables Galería de Mina que son los cables para la -- distribución de energía eléctrica en el interior de una mina.

2.6. Cables para la Construcción.

Son los utilizados para el alambrado de circuitos en edificios, casas, etc. Según el Reglamento de Instalaciones Eléctricas, emitido por la Dirección General de Normas (DGN) se dividen en:

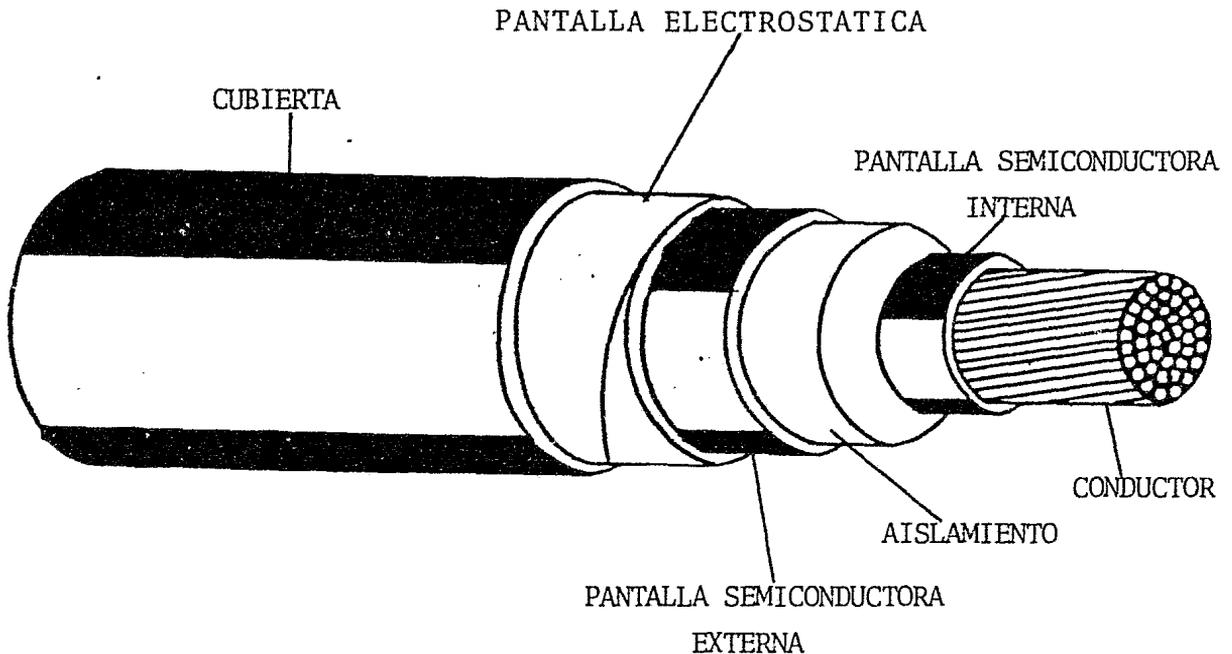
T I P O	CLASE TERMICA	UTILIZACION
TW (Thermoplastic Wire)	60°C	Ambientes Secos o Húmedos
THW (Thermoplastic Heat Wire)	75-90	Ambientes Secos a 90° ó Húmedos a 75°.
THWN (Thermoplastic Heat Wire Nylon)	75	Ambientes Secos o Húmedos
THHN (Thermoplastic Heat Heat Nylon)	90	Ambientes Secos

2.7. Varios.

Son otros tipos de conductores no incluidos en los grupos anteriores, tales como: Cables para alambrado de tableros, para transportes (Metro, FFCC, Barcos), cables para línea electrónica, cables automotrices, etc.

3. DISEÑO DE CABLES DE ENERGIA

Los elementos constructivos básicos de un cable de energía -- aislado son:



CABLE DE ENERGIA
FIGURA No. 1

3.1. Conductor.

Es el componente metálico por medio del cual se transmite la energía eléctrica.

3.1.1. Tipos de metales usados en los conductores.

Dentro de la gran variedad de metales los que presentan mejor conductividad son la plata (Ag), el cobre (Cu) y el aluminio (Al). La plata por ser -

un metal precioso y presentar una diferencia en conductividad relativamente baja en relación con su elevado precio lo limita para aplicaciones muy especiales. (Ver Tabla No.1).

La selección entre cobre o aluminio dependerá de:

- a. Dimensiones
- b. Peso del cable
- c. Costo
- d. Flexibilidad requerida

El cobre se presenta en tres temple o grados de suavidad que corresponden a las siguientes propiedades:

T E M P L E	CONDUCTIVIDAD % IACS	ESFUERZO DE TENSION A RUPTURA Kg/mm ²	ALARGAMIENTO A RUPTURA. %
Cobre Suave	100	25	25 - 30
Cobre Semiduro	96.66	35.4 a 40.3	1.04-5
Cobre Duro	96.16	45.6	0.85-2.5

El cobre duro se emplea normalmente para alambres o cables desnudos usados en líneas de transmisión en las que se requiere una alta resistencia a la tracción.

El cobre semiduro se utiliza en alambres o cables de cierta flexibilidad sujetos a esfuerzos mecánicos de tensión.

El cobre suave tiene aplicaciones generales en alambres o cables por su alta conductividad y facilidad de realizar conexiones.

TABLA No.1

PRINCIPALES PROPIEDADES DE METALES USADOS EN CONDUCTORES ELECTRICOS

M E T A L	DENSIDAD gr/cm ³	TEMPERATURA DE FUSION °C	RESISTIVIDAD A 20°C <i>μΩ</i> -cm	CONDUCTIVIDAD % IACS	COEFICIENTE DE DILA- TACION LINEAL °C X 10 ⁻⁴
ALUMINIO	2.703	650	2.828	61.0	22.9
COBRE	8.89	1083	1.7241	100	16.5
PLOMO	11.35	327.4	20.65	7.71	28.7
PLATA	10.50	960.8	1.62 (18°)	104.6	18.8
ACERO	7.6 - 7.8	1300 - 1475	10.4 - 11.9	--	10.5
ESTAÑO	7.3	231.89	11.5	14.8	26.92
ZINC	7.14	419.47	5.92(0°)	30.0	26.28

IACS.- International Annealed Copper Standard

El aluminio tiene una densidad 30% menor que la del cobre, por lo que lo hace recomendable en cables para líneas aéreas de transmisión. Para mejorar la resistencia a la tracción del aluminio se le refuerza con uno o varios alambres de acero (cable ACSR).

El aluminio se presenta en las siguientes opciones:

NOMBRE	ISO ANSI	RESISTIVIDAD ELECTRICA		CONDUCTIVIDAD % IACS	ESFUERZO TENSION A RUPTURA Kg/mm ²
		Ω mm ² /m	Ω g/m ²		
Duro	HH H19	--	--	--	16-19
3/4 Duro	HF H16	0.028126	0.076025	61.3	11.7-15.3
1/2 Duro	HD H14	0.028080	0.075901	61.4	10.7-14.3
1/4 DURO	HB H12	0.028035	0.075778	61.5	8.7-11.7
Suave	O O	0.027899	0.075410	61.8	6.1- 9.7

ANSI.- American National Standard Institute.

ISO .- International Standard Organization.

O .- Aluminio recocido ductilidad máxima, esfuerzo de tensión bajo.

H .- Aluminio endurecido por trabajo mecánico.

El cable se forma por capas concéntricas de alambres para cumplir con una sección de metal determinada. La flexibilidad está en función del número y diámetro de alambres que lo formen.

Para una mayor flexibilidad para un mismo calibre se aumenta el número de alambres que lo constituyen.

Las diferentes clases de cableado normalizadas --
son las siguientes:

<u>CLASE DE CABLEADO</u>	<u>A P L I C A C I O N</u>
AA	Cable desnudo líneas aéreas
A	Cable aislado o desnudo más -- flexible que el AA.
B	Cable aislado (papel, hule, -- plástico)
C y D	Cable aislado más flexible que B.
G	Cable portátil aislamiento de hule, alimentación de aparatos.
H	Cable con mucha flexibilidad - (que pase por poleas)
I	Cables para aparatos especia-- les.
J	Cordones para aparatos eléctri-- cos.
K	Cables portátiles y para solda-- doras.
L	Cables portátiles con mayor -- flexibilidad.
M	Cables para soldadoras, calen-- tadores, lámparas, planchas.
O	Cordones pequeños
P	Cordones más flexibles
Q	Cordones de ventiladores osci-- lantes flexibilidad máxima.

3.1.2. Tipos de Conductor.

Por su construcción los conductores los podemos -- agrupar en los siguientes tipos:

- a. Redondo
- b. Redondo Compacto
- c. Sectorial
- d. Anular
- e. Segmental

- a. Conductor Redondo.- Es un cable o alambre cuya sección transversal es circular. Los conductores de calibres pequeños (8AWG y menores) suelen ser de alambre sólido, mientras los calibres mayores generalmente son cables.

El conductor comprimido es un conductor al que se le ha hecho pasar por un dado que le proporciona una reducción en diámetro de hasta un 2%. (Esta construcción se considera como una alterativa del conductor redondo).

- b. Conductor Redondo Compacto.- Con el fin de ahorrar material en cables de gran calibre y evitar penetraciones, al momento de formar el cable se le comprime en un dado para reducir los intersticios entre alambres. Se obtiene una reducción de 8% del diámetro.
- c. Conductor Sectorial.- Está formado por 3 ó 4 cables cuya sección transversal es un sector de círculo. Se emplea en cables trifásicos -- obteniéndose gran ahorro en cubiertas debido a la reducción del diámetro final del cable.

VENTAJAS

Menor diámetro
Menor peso
Menor costo

DESVENTAJAS

Menor flexibilidad
Dificultad en realizar uniones.

- d. Conductor Anular.- Es el formado por alambres torcidos alrededor de un núcleo central (textil, metálico o hueco). Se emplea en calibres muy grandes (1000 kCM y mayores), debido a la

presencia del efecto superficial o "piel". También se emplea en cables autocontenidos, siendo este hueco central el conducto por donde circula el aceite aislante.

e. Conductor Segmental. Se utiliza en grandes calibres y para conducción de altas corrientes (mayor a 500 Amperes). Estos conductores están divididos en cuatro segmentos separados entre sí por cintas aislantes, reduciendo así el efecto superficial.

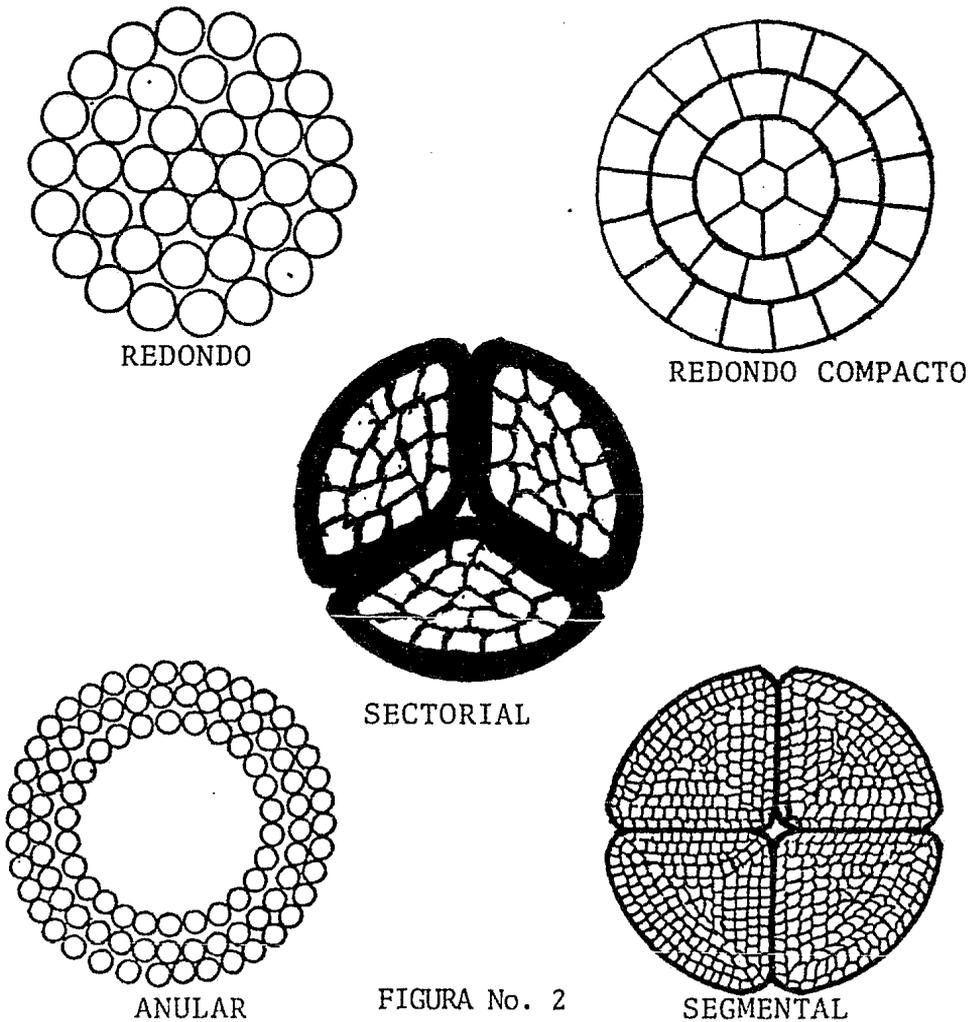


FIGURA No. 2
TIPOS DE CONDUCTORES

3.1.3. Dimensiones.

Las dimensiones de los conductores se expresan -- por su diámetro o sección transversal. Es muy común el uso de calibres para denominar el tamaño - de los conductores.

En México se emplean dos escalas, la AWG (American Wire Gage), y la milimétrica (aprobada por la Comisión Electrotécnica Internacional).

La escala AWG también conocida como Brown & Sharp Gage, fue ideada en 1857 por J.R. Brown. Sus dimensiones representan aproximadamente los pasos - sucesivos del proceso de trefilado del alambre y es retrogresiva, es decir a mayor número de calibre menor diámetro de conductor. Se formó fijando dos diámetros y estableciendo una progresión - para los intermedios. Los seleccionados fueron - 0.4600 pulgadas (4/0 AWG), y 0.0050 pulgadas (36 AWG).

Hay 38 divisiones entre ellos por lo tanto la progresión es la siguiente:

$$\sqrt[39]{\frac{.460}{.005}} = \sqrt[39]{92} = 1.1229$$

Para calibres mayores de 4/0 AWG se acostumbra de finir el tamaño de conductor en base a su área, - comparándola con el número de veces que contiene un área de un círculo de una milésima de pulgada de diámetro comúnmente llamado Circular Mil (CM).

En la escala internacional milimétrica los conductores se definen directamente por el área de su -sección transversal.

En la Tabla No.2 se indican los calibres AWG y -- las secciones milimétricas equivalentes más comunes en cables de energía.

CONSTRUCCIONES PREFERENTES DE CABLES DE COBRE O ALUMINIO
CON CABLEADO REDONDO COMPACTO

TABLA No. 2

DESIGNACION		AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL mm ²	NUMERO DE ALAMBRES	DIAMETRO EXTERIOR NOMINAL mm	RESISTENCIA ELECTRICA NOMINAL A CD ohm/km A 20°C		PESO NOMINAL kg/km	
mm ²	AWG 6 kCM				Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
---	8	8.37	7	3.40	2.100	3.44	75.9	23.1
10	--	9.58	7	3.64	1.836	3.01	86.9	26.4
---	6	13.30	7	4.29	1.322	2.17	120.7	36.7
16	--	15.90	7	4.77	1.106	1.813	142.2	43.8
---	4	21.15	7	5.41	0.830	1.363	191.9	58.3
25	--	25.4	7	5.93	0.692	1.135	230	70.0
---	2	33.6	7	6.81	0.523	0.858	305	92.6
35	--	34.9	19	6.99	0.504	0.839	316	94.8
---	1	42.4	19	7.59	0.415	0.682	385	116.9
50	--	48.3	19	8.33	0.364	0.597	438	133.2
---	1/0	53.5	19	8.53	0.329	0.539	485	147.5
---	2/0	67.4	19	9.55	0.261	0.428	612	185.8
70	--	69.0	19	9.78	0.255	0.418	626	190.2
---	3/0	85.0	19	10.74	0.207	0.339	771	234.4
95	--	93.3	19	11.45	0.188	0.309	846	257
---	4/0	107.2	19	12.06	0.164	0.269	972	296
120	--	119.8	37	12.92	0.147	0.241	1087	330
---	250	126.7	37	13.21	0.139	0.228	1149	349
150	--	147.1	37	14.42	0.120	0.196	1334	406
---	300	152.0	37	14.48	0.116	0.190	1379	419
---	350	177.3	37	15.65	0.0991	0.163	1609	489
185	--	184	37	16.02	0.0956	0.159	1659	501
---	400	203	37	16.74	0.0867	0.142	1839	559
240	--	239	37	18.26	0.0727	0.119	2200	669
---	500	253	37	18.69	0.0695	0.114	2300	698
300	--	299	61	20.4	0.0588	0.0963	2710	825
---	600	304	61	20.6	0.0578	0.0948	2760	838
---	700	355	61	22.3	0.0496	0.0813	3220	978
---	750	380	61	23.1	0.0463	0.0759	3450	1050
400	--	389	61	23.3	0.0452	0.0741	3530	1071
---	800	405	61	23.8	0.0434	0.0716	3680	1119
---	900	456	61	25.4	0.0386	0.0632	4140	1259
500	--	491	61	26.4	0.0358	0.0588	4450	1352
---	1000	507	61	26.9	0.0347	0.0569	4590	1399

3.2. Pantalla Semiconductora Interna.

Su aplicación es en cables de tensiones de 5 kV y mayores, Tiene como finalidad la de uniformizar el campo eléctrico alrededor del conductor evitando zonas de altas concentraciones de esfuerzos, (ver Figura No.3).

Se constituye por una capa de compuesto semiconductor aplicada por extrusión, la cual debe ser tersa, estable con el tiempo y de baja resistividad.

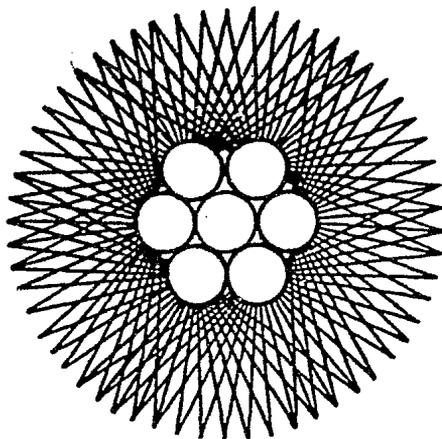


Figura No.3 Concentración de esfuerzos en el conductor.

3.3. Aislamiento.

El aislamiento de un cable de energía debe ser adecuado para un servicio largo y confiable bajo las condiciones más adversas. Debe tener una buena rigidez dieléctrica, excelente resistencia al impulso eléctrico, buena resistencia a sobrecarga térmica, flexibilidad para facilitar su instalación.

Los aislamientos eléctricos más importantes utilizados en cables de energía son:

3.3.1. Papel Impregnado.

Obtenido de pulpa de madera de celulosa de fibra larga, preferentemente de coníferas tales como abetos o pinos.

La materia prima para este aislamiento son rollos de papel que se cortan en cintas, estas a su vez se van colocando sobre el conductor traslapándolas un 30% del ancho, hasta formar el espesor de aislamiento requerido. Posteriormente se le extrae la humedad mediante vacío y se le impregna con aceite aislante.

3.3.2. Aislamientos sólidos.

Son obtenidos de la polimerización de hidrocarburos, existen dos grandes variedades:

a. Termoplásticos. Al calentarse, su plasticidad permite conformarles a voluntad. Al enfriarse recuperan sus propiedades iniciales, manteniéndose la forma que se les imprimió. Al calentarse se vuelve a reblandecer. (PVC, Polietileno).

b. Termofijos. Una vez conformados no recuperan su forma inicial, no se reblandecen con la aplicación de calor. (XLP, EP, Polietileno clorosulfonado).

Las principales propiedades de los aislamientos más comunes están indicados en la Tabla No.3 .

3.4. Pantalla Semiconductora Externa.

Es aplicable en cables para tensiones de 5 kV y mayores.

Tiene como finalidad el confinar el campo eléctrico en el aislamiento exclusivamente haciéndolo radial. (Ver Figura No.4).

Está constituida por una capa de compuesto semiconductor aplicado por extrusión, la cual debe ser tersa y estar adherida al aislamiento, pero debe ser fácilmente retirable para efectuar empalmes o terminales, y debe además tener una resistividad baja y estable.

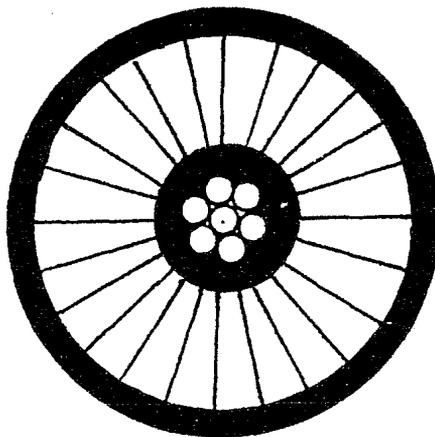


Figura No.4 Campo eléctrico en un cable de energía con semiconductores sobre el conductor y el aislamiento.

TABLA No.3

PROPIEDADES DE LOS AISLAMIENTOS

CARACTERISTICAS	PAPEL IMPREGNADO	P.V.C. ALTA TENSION	POLIETILENO VULCANIZADO XLP	ETILENO PROPILENO EP
Rigidez dieléctrica kV/mm (corriente alterna, elevación rápida).	22	16	20	18
Rigidez dieléctrica kV/mm (Impulso)	73	47	60	54
Constante dieléctrica SIC (a 60 ciclos, 75°C)	3.5	5.5	2.3	2.4
Factor de Potencia % (a - 60 ciclos, 75°C)	0.8	3.0	0.05	0.06
Constante K de resistencia de aislamiento a 15.6 °C (Meg Ohm-km)	3,000	750	6,100	6,100
Resistencia a la ionización	buena	excelente	regular	muy buena
Resistencia a la humedad	mala	buena	excelente	excelente
Factor de pérdidas	buena	regular	excelente	excelente
Flexibilidad	regular	regular	mala	excelente
Facilidad de instalación de empalmes y terminales (problemas de humedad o ionización)	regular	excelente	regular	excelente
Temp.de operación normal (°C)	75-85	75-90	90	90
Temp.de sobrecargas (°C)	100	100	130	130
Temp.de cortocircuito(°C)	160	160	250	250
Espesor de aislamiento -- comparativo(cable unipolar 15 kV)	100%	125%	125%	125%
Principales ventajas	Bajo costo experiencia de años comprobada. Excelentes propiedades eléctricas.	Bajo costo, resistente a la ionización. Fácil de instalar.	Factor de pérdida bajo.	Bajo factor de pérdidas. Flexibilidad Resistencia a la ionización.
Principales inconvenientes.	Requiere tubo de plomo y terminales herméticos.	Pérdidas comparativamente altas.	Rigidez. Baja resistencia a la ionización.	Es estable -- por hidrocarburos a temperaturas superiores a 60°C.

3.5. Pantalla Electrostática.

Es aplicable en cables para tensiones de 5 kV y mayores y funciona como conductor para las corrientes de secuencia "cero" en caso de corto circuito, además de proteger al personal contra descargas eléctricas. Está formada por cintas o hilos de cobre o por una cubierta metálica de Plomo o Aluminio.

3.6. Cubierta.

La cubierta de un cable de energía debe ser adecuada para cumplir con una gran variedad de condiciones ambientales desfavorables: resistente al tiempo, a los agentes químicos, no contaminante, resistente a la flama, resistente al envejecimiento por la vida útil del cable.

La selección del tipo de cubierta depende de la aplicación y medio ambiente del que se debe proteger al cable.

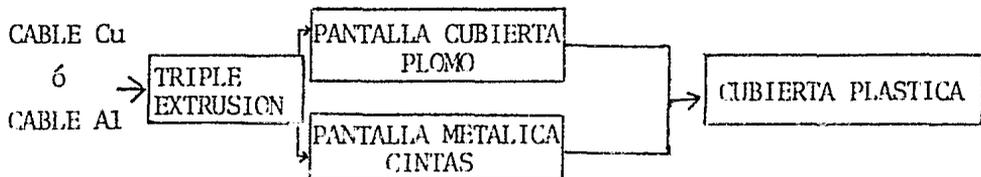
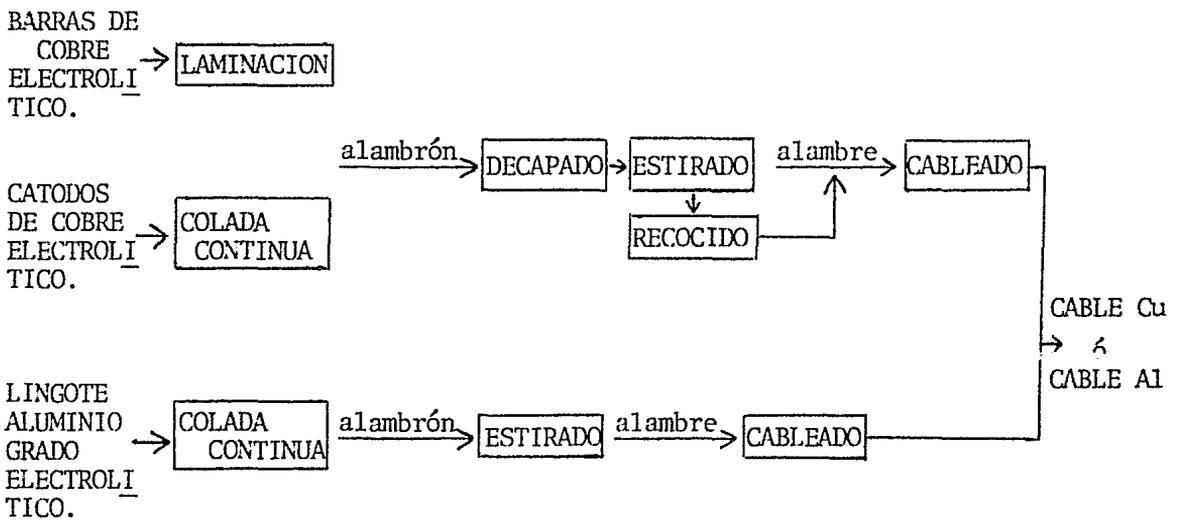
Las cubiertas pueden ser metálicas (Pb) o sintéticas, y estas a su vez pueden ser termoplásticas (PVC, Polietileno alta o baja densidad), o termofijas (Policloropreno - Polietileno clorosulfonado, Clorobutadieno).

Las principales propiedades de los diferentes tipos de cubiertas se indican en la Tabla No.4.

CARACTERISTICAS	P.V.C.	POLIETILENO BAJA DENSIDAD	POLIETILENO ALTA DENSIDAD	NEOPRENO POLICLOROPRE- NO.	POLIETILENO CLOROSULFONA- DO.	F I O M O
Resistencia a la humedad	B	E	E	B	MB	F
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	-
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 al corte por compresión.	B	B	B	MB	B	M
Resistencia a ácidos:						
30% sulfúrico	E	E	E	R	B	E
3% sulfúrico	E	E	E	R	R	E
10% nítrico	R	E	E	R	R	M
10% clorhídrico	B	E	E	R	R	R
10% fosfórico	E	E	E	R	R	B
Resistencia a álcalis y sa- les:						
10% hidróxido de sodio	E	E	E	M	R	B
2% carbonato de sodio	B	E	E	R	R	B
Resistencia a agentes quími- cos orgánicos:						
Acetona	M	B	B	B	B	E
Tetracloruro de carbón	B	B	B	M	M	E
Aceites	E	B	B	B	B	E
Gasolina	B	B	B	B	B	E
Peso específico	1.4	0.9	1.0	1.5	1.2	11.5
Principales aplicaciones:	Uso general, cables para interiores y exteriores cubiertos.	Cables aéreos a la intemperie. Cubiertas sobre plomo.	Idem, pero cuando se requiera mayor resistencia a la abrasión.	Cables Flexibles, Cables para Minas.	Cables Flexibles de alta calidad.	Cables con aislamiento de papel impregnado. - Cables para refinerías de petróleo y plantas petroquímicas.
E= Excelente	MB= Muy Buena	B= Buena	R=Regular	M= Mala	+Sólo en color negro conteniendo negro de humo.	

4. PROCESOS DE FABRICACION

En la fabricación de un cable de energía con aislamiento elástico intervienen los siguientes procesos:



4.1. Alambrón

El Alambrón de cobre se obtiene principalmente mediante dos diferentes procesos:

- a. Laminación en Caliente. Es uno de los procesos de trabajo al que se somete el metal. La materia prima se presenta en barras de cobre electrolítico de 110 kg de peso con una pureza de 99.9%. Las principales impurezas que puede contener el cobre son:

ELEMENTO	ppm
Bi	2
Te	5
Se	5
As	10
Rb	20
S	10
O ₂	600
Sb	20
Co	1
Fe	2
Si	10
Mn	10
Ag	24
Sn	5
Zn	10

Las barras se calientan en un horno a 900°C y se les hace pasar por un proceso de laminación de varios pasos hasta obtener alambrón de 5/16 de pulgada de diámetro.

- b. Colada Continua. En este proceso se funde el metal y se vierte a una rueda de colada donde se solidifi-

ca con un perfil determinado. A continuación pasa -- por un proceso de laminación continuo para obtener el alambrón del diámetro deseado.

4.2. Decapado.

Debido al calentamiento del cobre en presencia de oxígeno, éste sufre una oxidación, por lo que es necesario -- eliminar la capa de óxido que se forma. Esto se realiza mediante el proceso de Decapado, que consiste en someter al alambrón a un baño de una solución de ácido sulfúrico de baja concentración. Posteriormente se agrega una sustancia para evitar o retardar futuras oxidaciones.

4.3. Estirado o Trefilado.

Es un trabajo en frío en el cual se transforma plásticamente al alambrón variando sus dimensiones y propiedades mecánicas y eléctricas. Consiste en circular al alambrón o alambre por uno o más dados de menor diámetro que el alambre.

La escala de calibres AWG se basa en los pasos sucesivos de estirado.

Para obtener un proceso continuo de estirado es necesario soldar mediante fusión por arco eléctrico los rollos de alambrón entre sí.

4.4. Recocido del Alambre de Cobre.

El proceso de recocido es una operación durante la cual se le suministra energía en forma de calor al cobre, pa-

ra reconstruir los cristales que fueron deformados durante el estirado. El tratamiento de recocido comprende -- tres partes:

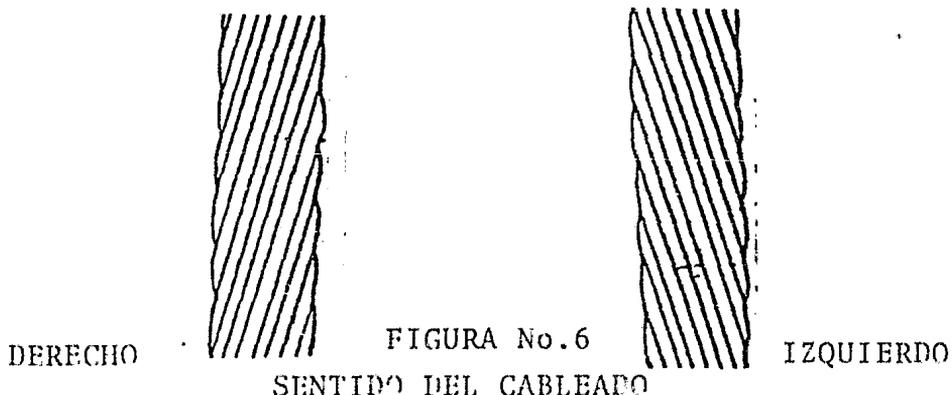
- a. Aumento de energía interna. Recuperación.
- b. Formación del nuevo cristal (grano). Recristalización.
- c. Crecimiento del cristal (grano).

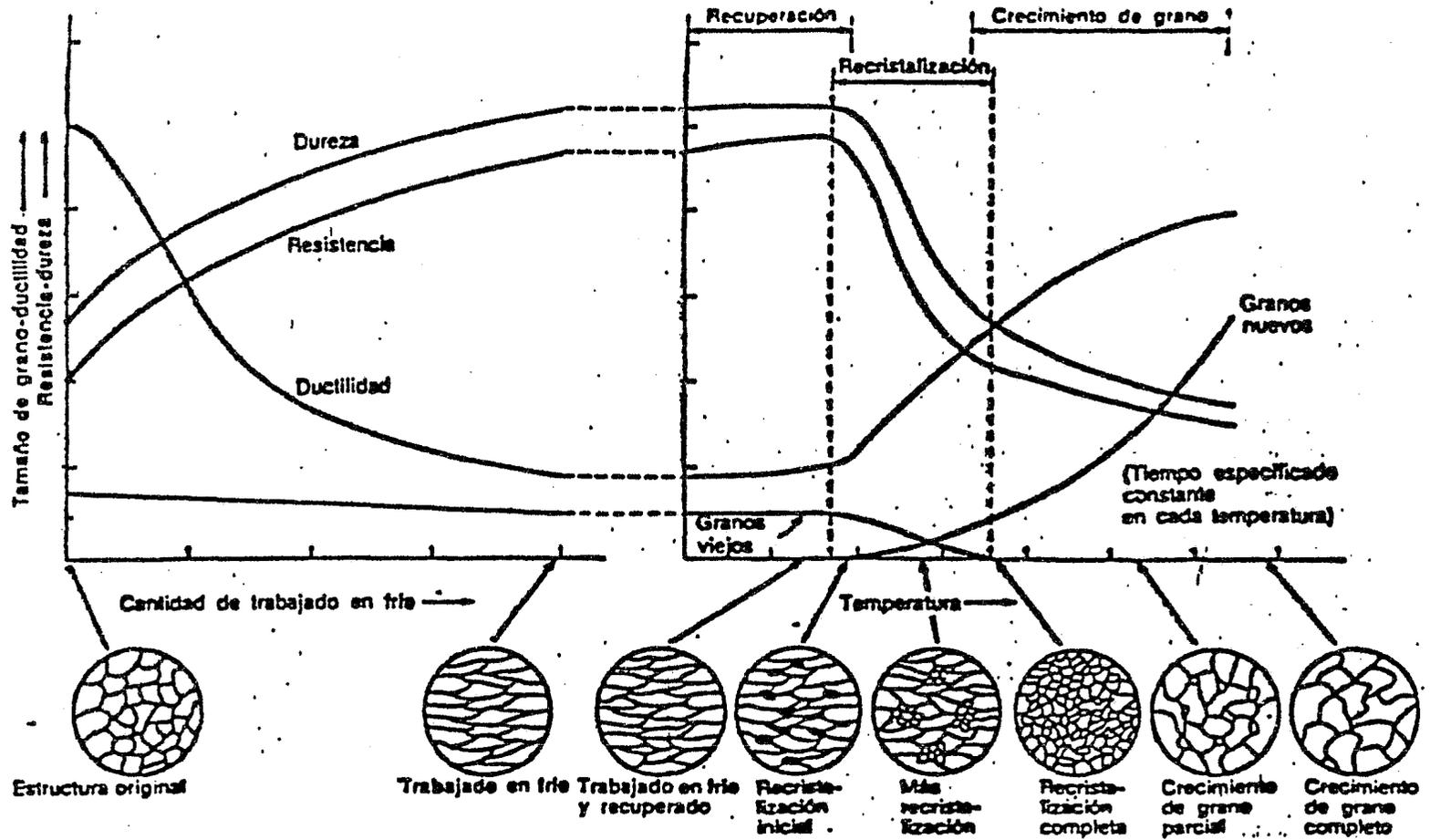
Existen dos procedimientos para efectuar el recocido, el primero es en forma continua aplicando una tensión eléctrica entre dos poleas de la estiradora de tal forma que circule una corriente suficiente para provocar un calentamiento por efecto Joule, por arriba de la temperatura de recristalización. Este recocido es llamado electro--resistivo. El otro método es calentar el alambre en un horno con ambiente neutro, en ausencia de oxígeno, para evitar la oxidación. (Ver Figura No. 5).

4.5. Cableado.

En este proceso se aplican capas de alambres helicoidalmente sobre un alambre central hasta obtener la sección transversal requerida.

Las capas están formadas, la primera por 6 alambres y -- posteriormente en múltiplos de 6 (6 + 12 + 18 + 24), -- siempre alternando el sentido de aplicación de los alambres.





TRABAJO EN FRÍO Y RECOCIDO

FIGURA N.5

4.6. Extrusión.

Es un proceso en el cual se calienta al compuesto aislante hasta plastificarlo, posteriormente por medio de un tornillo se le hace pasar por un dado que dará la forma y dimensiones finales.

En el caso de aislamiento para cables de energía se realiza la aplicación de tres elementos del cable en el mismo proceso llamándose por eso triple extrusión. Consiste en tres extrusoras, la primera aplica el semiconductor interno poco después la segunda extrusora aplica el aislamiento y la tercera aplica el semiconductor externo.

Los aislamientos y semiconductores termofijos o elastoméricos, requieren de una vulcanización posterior, la cual puede realizarse por cualquiera de los siguientes sistemas:

- a. Vapor a Presión
- b. Irradiación
- c. Sales Fundidas
- d. Dado Largo
- e. Gas Caliente

La vulcanización se efectúa por la acción del calor suministrado por medio de cualquiera de los anteriores sistemas, que producen uniones químicas estables en el compuesto.

4.7. Aplicación de la Pantalla Electrostatica.

La pantalla metálica dependiendo del diseño del cable puede aplicarse por cualquiera de los siguientes procesos:

- a. Aplicación helicoidal de hilos de cobre, cintas de cobre traslapadas o hilos de cobre y una cinta de cobre helicoidal discontinua. El número y diámetro de los hilos dependerá de la conductancia requerida en el -- sistema.

- b. Extrusión de Plomo. Este proceso se realiza mediante una tubuladora o prensa de plomo, en la cual se funde el metal en un crisol y se hace pasar el plomo por un dado para dar las dimensiones requeridas.

4.8. Cubierta Final.

Esta cubierta generalmente termoplástica se aplica por - extrusión. Al salir de la extrusora se graba el mate--- rial en alto relieve, con la identificación del cable y fabricante.

5. PARAMETROS ELECTRICOS

Los principales parámetros eléctricos a considerar en un cable de energía son:

5.1. Resistencia del Conductor.

Es la oposición que presenta el conductor metálico al paso de la corriente.

Está dada por la siguiente fórmula:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [\text{Ohm}]$$

Donde: R = resistencia en ohms
 L = longitud en km
 A = área en mm^2
 ρ = resistividad del metal

$$\rho_{\text{Cu}} = 17.241 \quad [\text{Ohm}^{\text{mm}^2} / \text{km}] \quad \text{a } 20^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Al}} = 28.26 \quad [\text{Ohm}^{\text{mm}^2} / \text{km}] \quad \text{a } 20^\circ\text{C}$$

La resistividad de los metales no es constante, sino -- que varía con la temperatura. (Ver Figura No.6).

Dicha variación se puede representar por la sucesión:

$$\rho = \rho_0 + at + bt^2 + ct^3 + \dots$$

Donde: ρ_0 = resistividad a 0°C
 $a, b, c,$ = constantes propias de cada metal
 t = temperatura en $^\circ\text{C}$

Para las temperaturas de operación de los conductores ρ_0

demostramos despreciar los términos bt^2 , ct^3 , ... quedando:

$$\rho = \rho_0 + at = \rho_0 \left(1 + \frac{a}{\rho_0} t\right) = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

$$\alpha = \text{Coeficiente corrección temperatura} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$$

Debido a que la resistencia es proporcional a la resistividad:

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

El coeficiente de corrección por temperatura se obtiene de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1}{T + t_r}$$

Donde: t_r = temperatura de referencia

T = Es el punto de intersección de la prolongación de la parte lineal de la curva -- con el eje y es constante para cada material (ver Figura No.7)

Metal	T (°C)
Cu suave	-234.5
Cu semiduro	-241.0
Aluminio	-228.0

La corrección por temperatura de la resistencia medida, se obtiene multiplicando dicha resistencia por el factor de corrección a la temperatura de la medición. En la Tabla No.5 se indican los factores de corrección para los diferentes tipos de metales usados como conductores.

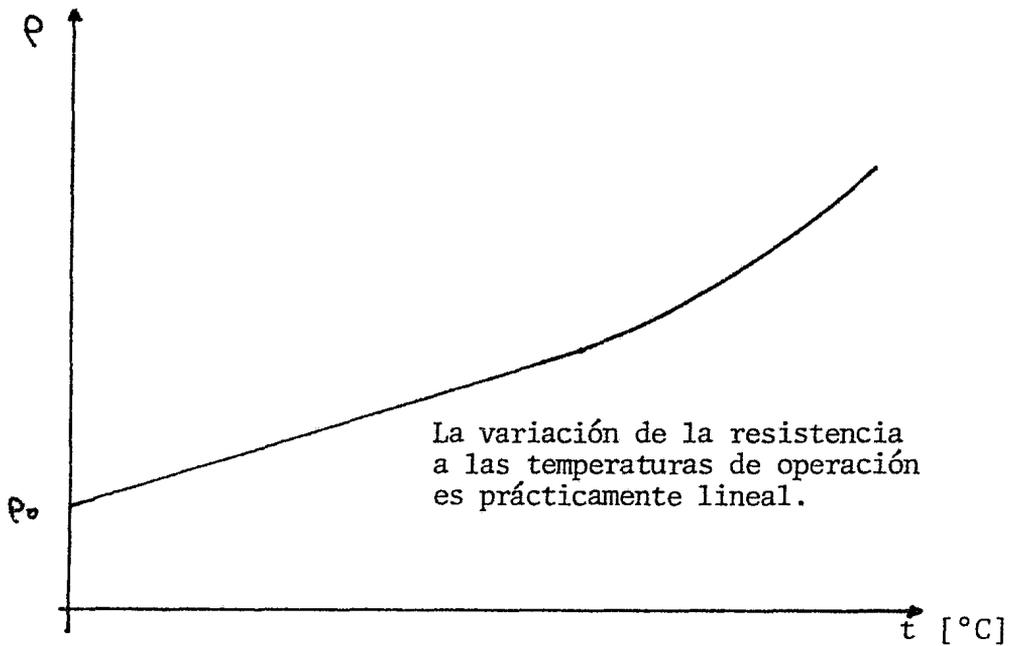


FIG. No.6 VARIACION TEMPERATURA-RESISTIVIDAD

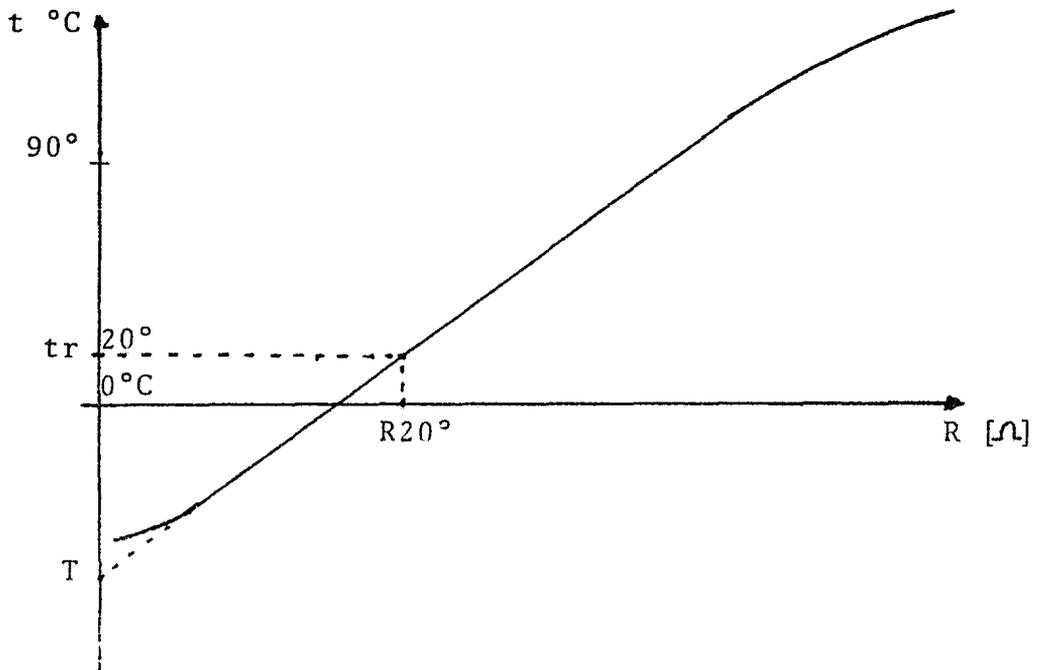


FIG. No.7 VARIACION DE LA RESISTENCIA CON LA TEMPERATURA

TABLA No.5

FACTORES DE CORRECCION DE LA RESISTENCIA POR TEMPERATURA

FACTORES DE CORRECCION POR TEMPERATURA REFERIDA A 20°C				
TEMPERATURA °C	C O B R E			ALUMINIO
	DURO	SEMIDURO	SUAVE	
15.0	1.0193	1.0194	1.0200	1.0207
15.5	1.0173	1.0174	1.0180	1.0185
16.0	1.0154	1.0154	1.0160	1.0164
16.5	1.0134	1.0135	1.0139	1.0143
17.0	1.0115	1.0115	1.0119	1.0122
17.5	1.0095	1.0096	1.0099	1.0102
18.0	1.0076	1.0077	1.0079	1.0081
18.5	1.0057	1.0057	1.0059	1.0061
19.0	1.0038	1.0038	1.0039	1.0040
19.5	1.0019	1.0019	1.0020	1.0020
20.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
20.5	0.9981	0.9981	0.9980	0.9980
21.0	0.9962	0.9962	0.9961	0.9960
21.5	0.9944	0.9943	0.9941	0.9940
22.0	0.9925	0.9925	0.9922	0.9920
22.5	0.9906	0.9906	0.9903	0.9900
23.0	0.9883	0.9887	0.9883	0.9881
23.5	0.9869	0.9869	0.9864	0.9861
24.0	0.9851	0.9850	0.9845	0.9841
24.5	0.9833	0.9832	0.9826	0.9822
25.0	0.9815	0.9814	0.9807	0.9802
25.5	0.9796	0.9795	0.9788	0.9783
26.0	0.9778	0.9777	0.9770	0.9764
26.5	0.9760	0.9759	0.9751	0.9745
27.0	0.9742	0.9741	0.9732	0.9726
27.5	0.9724	0.9723	0.9714	0.9707
28.0	0.9706	0.9705	0.9695	0.9688
28.5	0.9689	0.9687	0.9677	0.9669
29.0	0.9671	0.9669	0.9658	0.9650
29.5	0.9653	0.9652	0.9640	0.9631
30.0	0.9636	0.9634	0.9622	0.9613
30.5	0.9618	0.9616	0.9604	0.9594
31.0	0.9601	0.9599	0.9586	0.9576
31.5	0.9583	0.9581	0.9568	0.9557
32.0	0.9566	0.9564	0.9550	0.9539
32.5	0.9540	0.9547	0.9532	0.9520
33.0	0.9532	0.9529	0.9514	0.9502
33.5	0.9514	0.9512	0.9496	0.9484
34.0	0.9497	0.9495	0.9478	0.9466
34.5	0.9480	0.9478	0.9461	0.9448
35.0	0.9463	0.9461	0.9443	0.9430

5.1.1. Corrección por Cableado.

La resistencia de un cable es igual a la resistencia de cada uno de sus alambres dividida entre el número de estos.

$$R = \frac{\sum R}{n}$$

Como la longitud de cada alambre en el cable varía dependiendo de la capa en que se encuentre, se ha definido un factor de cableado K_c .

TIPO DE CABLEADO	K_c
Redondo normal	0.02
Redondo compacto	0.02
Sectorial	0.015
Segmental	0.02

Y la resistencia corregida por cableado se obtendrá con la siguiente fórmula:

$$R_c = R (1 + K_c)$$

Donde: R_c = Resistencia corregida por cableado
 R = Resistencia medida
 K_c = Factor de cableado

5.2. Resistencia a la Corriente Alterna.

La resistencia a la corriente alterna es ligeramente mayor que la resistencia a la corriente directa debido a la variación que presenta la corriente alterna con el tiempo. Esto se manifiesta en forma diferente en cada

elemento del cable y por lo tanto conviene definir una serie de factores para calcularla:

$$R_{cA} = R_{cD} (1+Y_c+Y_s+Y_p)$$

Donde: R_{cA} = Resistencia a la corriente alterna en Ohms

R_{cD} = Resistencia a la corriente directa en Ohms

Y_c = Factor de incremento de la resistencia al nivel del conductor.

Y_s = Factor de incremento de la resistencia al nivel de la pantalla.

Y_p = Factor de incremento de la resistencia al nivel del ducto metálico.

Los términos: Y_s , Y_p son despreciables
por lo tanto:

$$R_{cA} = R_{cD} (1+Y_c)$$

a su vez

$$Y_c = Y_{cs}+Y_{cp}$$

Donde: Y_{cs} = Factor de pérdidas por efecto superficial

Y_{cp} = Factor de pérdidas por proximidad

$$R_{cA} = R_{cD} (Y_{cs}+Y_{cp})$$

5.2.1. Pérdidas por efecto superficial o piel. (Y_{cs})

Cuando una corriente de magnitud variable con el tiempo fluye por un conductor eléctrico, la densidad de corriente en su cara transversal no es uniforme, es decir los Amperes por unidad de área -- perpendicular al flujo no son constantes y va decreciendo al acercarse al centro del conductor.

Esto es debido al campo magnético creado por la inductancia propia del conductor. Este factor se calcula mediante las siguientes fórmulas:

$$Y_{cs} = \frac{X_s^4}{192 + 0.8 X_s^4}$$

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-4} K_s$$

Donde: f = Frecuencia en Hz
 R' = Resistencia a la corriente directa a la temperatura de operación [Ohm/km]

5.2.2. Pérdidas por proximidad. (Y_{cp})

Las pérdidas por proximidad son motivadas por la distribución no uniforme de densidad de corriente propiciada por la inductancia mútua entre dos conductores.

Estas pérdidas se calculan con la siguiente fórmula:

$$Y_{cp} = \frac{X_p^4}{192 + 0.8 X_p^4} \frac{dc^2}{S} \left[0.312 \frac{dc^2}{S} + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8 X_p^4} + 0.27} \right]$$

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-4} K_p$$

Donde: dc = Diámetro del conductor en cm
 S = Separación entre el eje de los conductores en cm
 f = Frecuencia en Hz
 R' = Resistencia a la corriente directa a la temperatura de operación Ohm/km

FACTORES Ks y Kp	Ks	Kp
Conductor redondo compacto Cobre	1.0	0.6
Conductor redondo Cobre	1.0	0.8
Conductor segmental de Cobre	0.39	0.46
Conductor redondo Aluminio	1.0	0.5

5.3. Capacitancia.

Es la propiedad que tiene cualquier arreglo de dos electrodos separados por un dieléctrico, de almacenar energía eléctrica, cuando se someten los electrodos a una diferencia de potencial. Este arreglo se define como capacitor. Un cable de energía es también un capacitor debido a que uno de los electrodos es el conductor y el otro la pantalla metálica del cable, siendo el dieléctrico obviamente el aislamiento del cable.

- a. Constante dieléctrica (ϵ , SIC ó permitividad relativa). Es la relación de la capacitancia (C) entre un capacitor con dieléctrico conocido y un capacitor que tiene como dieléctrico el vacío absoluto (C_0).

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}$$

- b. Capacitancia de un cable de energía. La capacitancia de un cable de energía se deriva de la siguiente fórmula:

$$C = \frac{q}{V} \text{ [F]} \quad \dots (1)$$

Donde; $q = \epsilon_0 EA$

$V =$ Diferencia de potencial entre electrodos

$q =$ Magnitud de Carga

$\epsilon_0 =$ Constante de permitividad $8.85418 \times 10^{-12} \text{Coul}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$

$A =$ Area del electrodo

$E =$ Intensidad del Campo Eléctrico

Como se consideran superficies cilíndricas $A = 2\pi r l$ y

$$q = \epsilon_0 E (2\pi r l) \dots (2)$$

Despejando E de la ecuación (2).

$$E = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 r l}$$

$$V = \int_{dc}^{da} E dr = \int_{dc}^{da} \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \ln \frac{da}{dc} \dots (3)$$

Sustituyendo la ecuación(3) en la ecuación (1).

$$C = \frac{q}{\frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \ln \frac{da}{dc}} = \frac{2\pi \epsilon_0 l}{\ln \frac{da}{dc}} \dots (4)$$

Simplificando la ecuación (4) e introduciendo la constante dieléctrica del aislamiento se obtiene:

$$C = \frac{.0241 \epsilon}{\log \frac{da}{dc}}$$

Donde: C = Capacitancia del cable en $\mu F/km$
 ϵ = Constante dieléctrica del aislamiento
 da = Diámetro sobre el aislamiento
 dc = Diámetro sobre el conductor.

c. Efecto de la Capacitancia. En un aislamiento perfecto - siempre fluirá una corriente capacitiva a través del dieléctrico y resulta un adelanto de 90° con respecto a la tensión aplicada.

$$I_c = 2\pi f C E_0 \times 10^{-6}$$

Donde I_c = Corriente capacitiva en Amp/km
 f = Frecuencia en Hz
 C = Capacitancia del cable en F/km
 E_o = Tensión a tierra en Volts

Pero como en realidad no existe un aislamiento perfecto, además de I_c , existe una corriente de pérdidas I_p que sumada nos da la corriente total real I_t adelantada con respecto a V un ángulo menor a 90° .

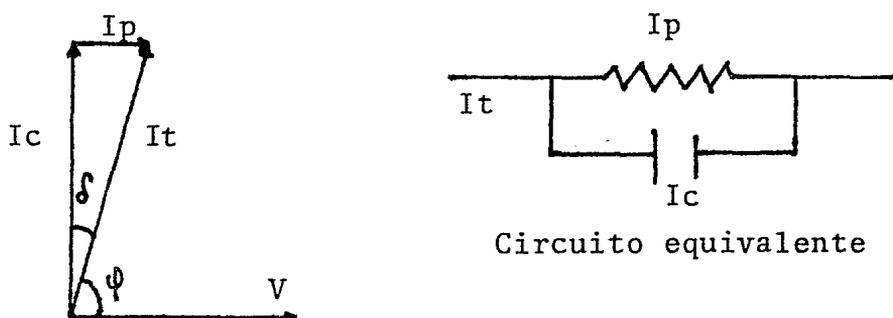


FIGURA No.8

De la figura No.8 se obtiene

$$\delta + \phi = 90^\circ$$

$$\text{Cot } \phi = \tan \delta$$

- d. Factor de Potencia (F.P.).- es la relación de la Potencia activa entre la potencia aparente del dieléctrico

$$\text{F.P.} = \frac{P_a}{PA} = \frac{I_c V \cos \phi}{I_c V} = \cos \phi$$

cuando $\phi \rightarrow 90^\circ$ $\cos \phi \approx \cot \phi$

y el factor de potencia se considera igual al factor de disipación.

- e. Factor de Disipación (F.D.).- Es la tangente δ expresada en %.

$$\text{F.D.} = \tan \delta \times 100$$

- f. Factor de pérdidas (f.p.).- Es igual a la constante dieléctrica del aislamiento multiplicada por el factor de disipación.

$$\text{f.p.} = \epsilon \times \text{F.D.}$$

5.4. Inductancia.

La inductancia es proporcional a la variación del flujo magnético con el tiempo e inversamente proporcional a la corriente con el tiempo.

Cuando en un conductor eléctrico circula una corriente de magnitud variable con el tiempo se crea un flujo magnético variable.

La inductancia de un cable está dada por la suma de la inductancia propia o interna más la externa o mutua.

El valor de la inductancia propia (L_c), de un conductor es constante e independiente al arreglo geométrico de los cables.

5.5. Resistencia de Aislamiento.

Es la oposición al paso de la corriente que presenta el aislamiento de un cable de energía.

El dieléctrico de un cable se puede representar en forma simplificada mediante el siguiente circuito:

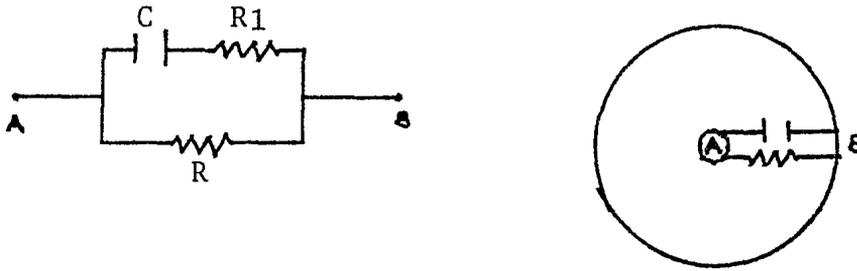


FIGURA No.9

La resistencia de aislamiento se calcula con la siguiente fórmula:

$$R = K \log \frac{da}{dc}$$

Donde: R= Resistencia de Aislamiento en Mohm-km
K= Constante del aislamiento en Mohm- km
da= Diámetro sobre aislamiento
dc= Diámetro sobre conductor

5.6. Rigidez Dieléctrica.

Es el gradiente o esfuerzo de ruptura del aislamiento. Los gradientes eléctricos mínimo y máximo en un cable se muestran en la Figura No.10.

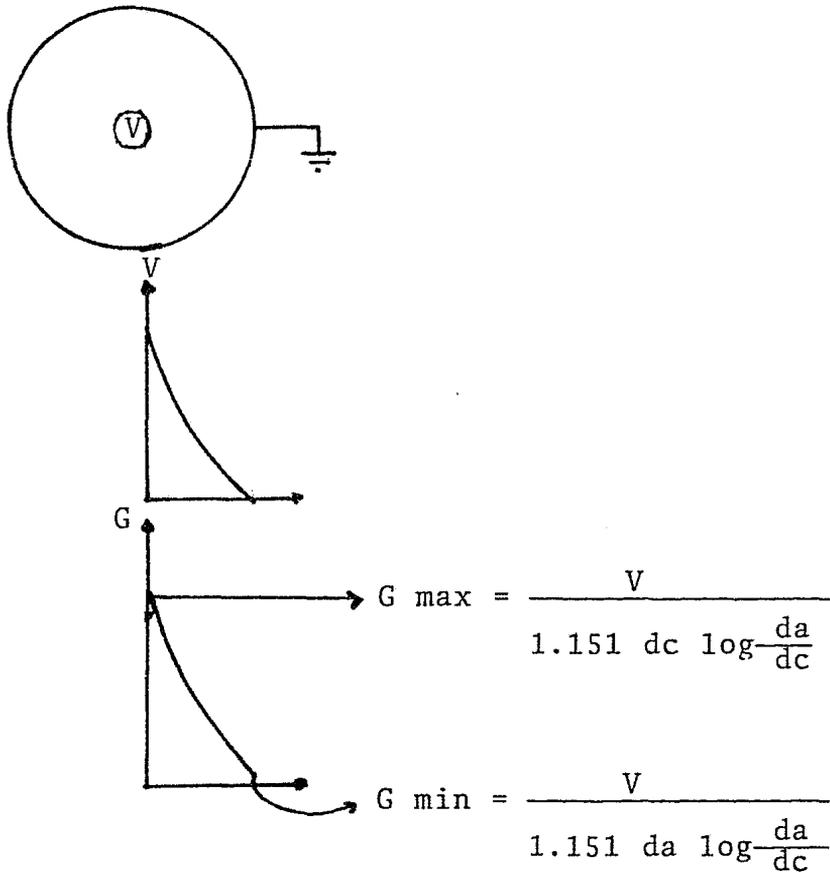


FIGURA No.10

5.7. Pérdidas.

Las pérdidas totales en un cable de energía están dadas por la suma de las pérdidas en cada uno de sus elementos.

- a. En el conductor las pérdidas se presentan por efecto Joule.

$$P_c = i^2 R$$

Donde: P_c = Pérdida en el conductor en W/cm

i = Corriente que circula por el conductor

R = Resistencia del conductor en Ohm/cm

- b. En el aislamiento. Debido a que ningún aislamiento es perfecto, se presentan pérdidas que se calculan con la siguiente fórmula:

$$P_a = 2 \pi f C E_o^2 \tan \delta \times 10^{-6}$$

Donde: P_a = Pérdida en el aislamiento en W/cm
 f = Frecuencia en Hz
 C = Capacitancia del cable en μ F/cm
 E_o = Tensión al neutro en Volts
 $\tan \delta$ = Factor de disipación.

c. En las pantallas o cubiertas metálicas.

Debido a que la corriente que circula por el conductor induce una corriente en la pantalla o cubierta metálica cuando estas se encuentran conectadas a tierra en sus extremos, se presentan pérdidas por efecto Joule.

$$P_p = I_p^2 R_p$$

Donde: P_p = Pérdida en la pantalla en W/cm
 I_p = Corriente que circula por la pantalla en Amperes.

R_p = Resistencia de la pantalla en Ohm/cm

Estas pérdidas se ven afectadas por la disposición de los otros cables en el sistema.

Entonces las pérdidas totales serán:

$$P \text{ totales} = P_c + P_a + P_p$$

$$P \text{ totales} = i^2 R + 2 \pi f C E_o^2 \tan \delta \times 10^{-6} + I_p^2 R_p \text{ [W/cm]}$$

5.8 Causas de Fallas en Cables de Energía.

La falla de un cable de energía generalmente es originada por uno o más de los siguientes factores:

1. Daño mecánico
2. Mala instalación o ejecución de empalmes o terminales
3. Alta resistividad en las pantallas semiconductoras a temperatura elevada.
4. Imperfecciones en el aislamiento (Huecos, Contaminantes).
5. Irregularidades en las pantallas
6. Desarrollo de arborescencias debido al ingreso de humedad aunado a las causas 3, 4 y 5.
7. Temperaturas excesivas.

Un*90% de las fallas de los cables de energía en operación son motivadas por los dos primeros factores, que se pueden eliminar fácilmente con una adecuada supervisión durante la instalación de los mismos.

Existen cierto tipo de fallas en los cables de energía, no obstante haber cumplido con las pruebas en fábrica y en el campo. Esto se debe principalmente a la presencia de humedad en el aislamiento que origina un fenómeno eléctrico conocido como arborescencias.

Las arborescencias son un fenómeno de prerruptura eléctrica y consiste en cierto tipo de daño en el aislamiento -- que progresa en presencia de un esfuerzo eléctrico. En aislamientos transparentes se manifiesta en ramificaciones que parten de un punto, similares a un árbol o arbus-to.

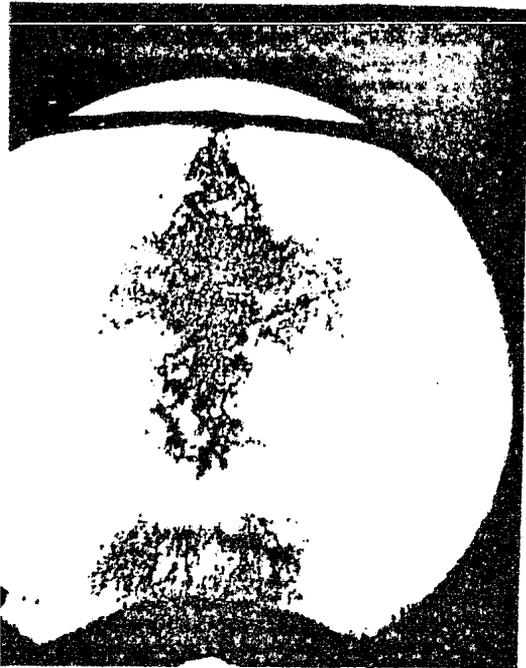
Las arborescencias pueden presentarse y crecer lentamente por descargas parciales periódicas, por la presencia de humedad o pueden desarrollarse rápidamente como resultado de una tensión de impulso.

Se han definido dos tipos de arborescencias:

- a. Eléctricas.- Consisten en canales huecos que se forman por la descomposición del material. Se originan en puntos de alto esfuerzo y conducen al aislamiento a la falla. La estructura de la arborescencia es densa.
- b. Electroquímicas.- Consisten en caminos muy finos en los cuales ha penetrado humedad por la acción de un gradiente eléctrico. Se originan también en puntos de alto esfuerzo no presentando descargas parciales. Se presentan en largo tiempo. Su estructura es fina. Cuando se elimina el gradiente eléctrico y la fuente de humedad, el árbol desaparece por evaporación del agua. (Ver Figura No.11).

Se han realizado diversos estudios en este campo en todo el mundo, aunque no se han aclarado todos los mecanismos de iniciación y crecimiento de las arborescencias, se ha observado que:

- Existen muchas estructuras y formas de arborescencias electroquímicas pero todas se orientan en dirección -- del campo eléctrico.
- Los "árboles" se inician en huecos o contaminantes, sin embargo se pueden encontrar huecos y contaminantes sin evidencia de arborescencias.



- Las arborescencias electroquímicas requieren menor gradiente para su formación que las eléctricas.
- Muchas fallas prematuras de cables son resultado de deficiencias en el diseño o en el aislamiento, lo que --permite el crecimiento de arborescencias.

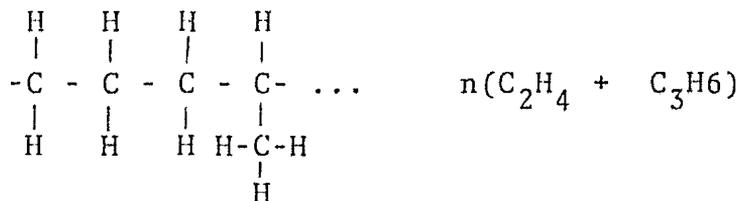
Hay mucho por investigar en este campo, sin embargo además de la investigación y del estudio de las arborescencias en las pruebas de calificación, se están mejorando los diseños de los cables, sellando los espacios libres del conductor con silicón u otros medios para evitar ingreso de humedad. Se recomienda el uso de pantallas metálicas herméticas (Pb), para evitar ingreso de humedad y esto aunado a las pruebas aquí descritas podrán garantizar la operación confiable durante la vida esperada --del cable. Es importante también el desarrollo de com--puestos aislantes que presenten un mejor comportamiento en fenómenos de este tipo.

*Según varias investigaciones realizadas en los Estados Unidos de Norteamérica.

5.9. Comparación EP - XLP.

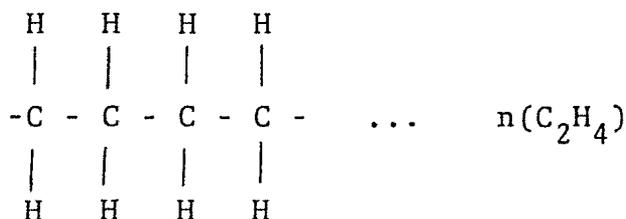
De los diferentes tipos de aislamientos elastoméricos --los que mejores características ofrecen para cables de --energía son el EP y el XLP.

El Etileno Propileno (EP) es un copolímero de etileno y propileno al cual se agregan agentes vulcanizantes, cargas, aditivos, etc. Su fórmula básica es:



Ultimamente se ha experimentado con formulaciones de EP que contienen también hexadieno que le ha dado más ventajas en la utilización de este aislamiento en cables de energía.

El polietileno de Cadena Cruzada (XLP), es un polietileno de baja densidad al que se agrega algún peróxido como agente vulcanizante, el cual reacciona a una temperatura de 240 a 260°C, formando uniones cruzadas entre las moléculas de polietileno. Su fórmula básica es:



Después de 20 años de experiencia en el uso del polietileno de cadena cruzada (XLP), en cables de alta tensión en los Estados Unidos de Norteamérica, se ha demostrado que sus excelentes propiedades eléctricas iniciales no son suficientes para esta aplicación. Un estudio reciente en las compañías eléctricas ha arrojado un índice de fallas de 1.89 cada 100 millas de cable instalado y peor aún este índice se incrementará en los próximos años. Al parecer el compuesto que brinda mayor seguridad no es precisamente el XLP, no obstante sus mejores características eléctricas iniciales.

5.9.1. Propiedades Físicas y Condiciones de Sobrecarga.

Los cables durante la operación normal generan calor, el cual aumenta en condiciones de sobrecarga. Esta situación es muy común que se presente en -- las líneas de transmisión, debido a la creciente demanda de energía.

Es muy importante, por tal motivo, las características eléctricas y físicas de los aislamientos en estos períodos.

Se han realizado diversos estudios para evaluar - el comportamiento de los aislamientos desde temperaturas ambiente hasta la temperatura de sobrecarga de 130°C. Los resultados encontrados se resumen en la Tabla No.6.

TABLA No.6 PROPIEDADES FISICAS EP - XLP

TEMP.	PROPIEDADES	EPR		XLP
		SEMICRISTALINO	AMORFO	
22°C	Esfuerzo de Tensión MPa	12.4	8.6	16.7
	Alargamiento %	320	305	500
	Módulo MPa	4.7	2.1	7.9
90°C	Módulo MPa	1.8	1.9	3.4
130°C	Módulo MPa	1.5	1.8	0.2
	Deformación %	8	5	20
	Recuperación %	5	2	43

Los valores del módulo de elasticidad a temperaturas elevadas muestra la dependencia del XLP con - su cristalinidad para obtener valores aceptables de esfuerzo.

A la temperatura de sobrecarga el XLP se debilita considerablemente y es más vulnerable por la deformación.

Un compuesto con mayor módulo de elasticidad a temperaturas elevadas es más resistente a la formación de huecos durante cualquier esfuerzo.

La mayor flexibilidad del EPR a la temperatura de instalación lo convierte en un cable más fácil de instalar.

5.9.2. Conductividad Térmica.

La conductividad térmica es la capacidad de un material de conducir calor. En los cables se prefiere que los aislamientos tengan una alta conductividad térmica para facilitar la disipación del calor generado.

La siguiente tabla muestra una comparación de la conductividad térmica de muestras de XLP y de EPR a 90 y 130 °C.

TEMPERATURA °C	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/m °C	
	<u>X L P</u>	<u>E P R</u>
90	.226	.268
130	.205	.264

El EP es 30% más eficiente en la disipación del calor generado por el cable que el XLP.

5.9.3. Expansión Térmica.

El aumento de dimensiones del XLP a la temperatura de sobrecarga nos conduce a serios problemas - (Ver Figura No.12). El dramático cambio en dimensiones cerca de la temperatura de transición, generan una gran presión en la pantalla del aislamiento. Este problema puede originar la aparición de huecos entre aislamiento y pantalla al recobrar las dimensiones originales. A su vez los huecos originarán descargas parciales.

Otro problema importante relacionado con la expansión del XLP en las temperaturas de sobrecarga es la diferencia entre su expansión y la de los empalmes y terminales (la mayoría de los empalmes y codos son de EP), ya que causa la formación de huecos entre los dos tipos de aislante que eventualmente conducirán a la falla.

5.9.4. Resistencia a la Formación de Huecos.

Durante el proceso de vulcanización de ambos compuestos, existe una alta probabilidad de formación de burbujas, debido en gran medida a que los subproductos (agua, metano, hidrógeno), de la descomposición del peróxido, son gases a temperatura elevada, los cuales tienen una cierta solubilidad en el aislamiento a altas temperaturas y presiones. Durante el enfriamiento tienden a escapar del aislamiento, aunque no completamente.

El mayor módulo en caliente del EP tiende a minimizar la formación de burbujas y las que se presentan son menores en número y tamaño que las del XLP.

Expansión

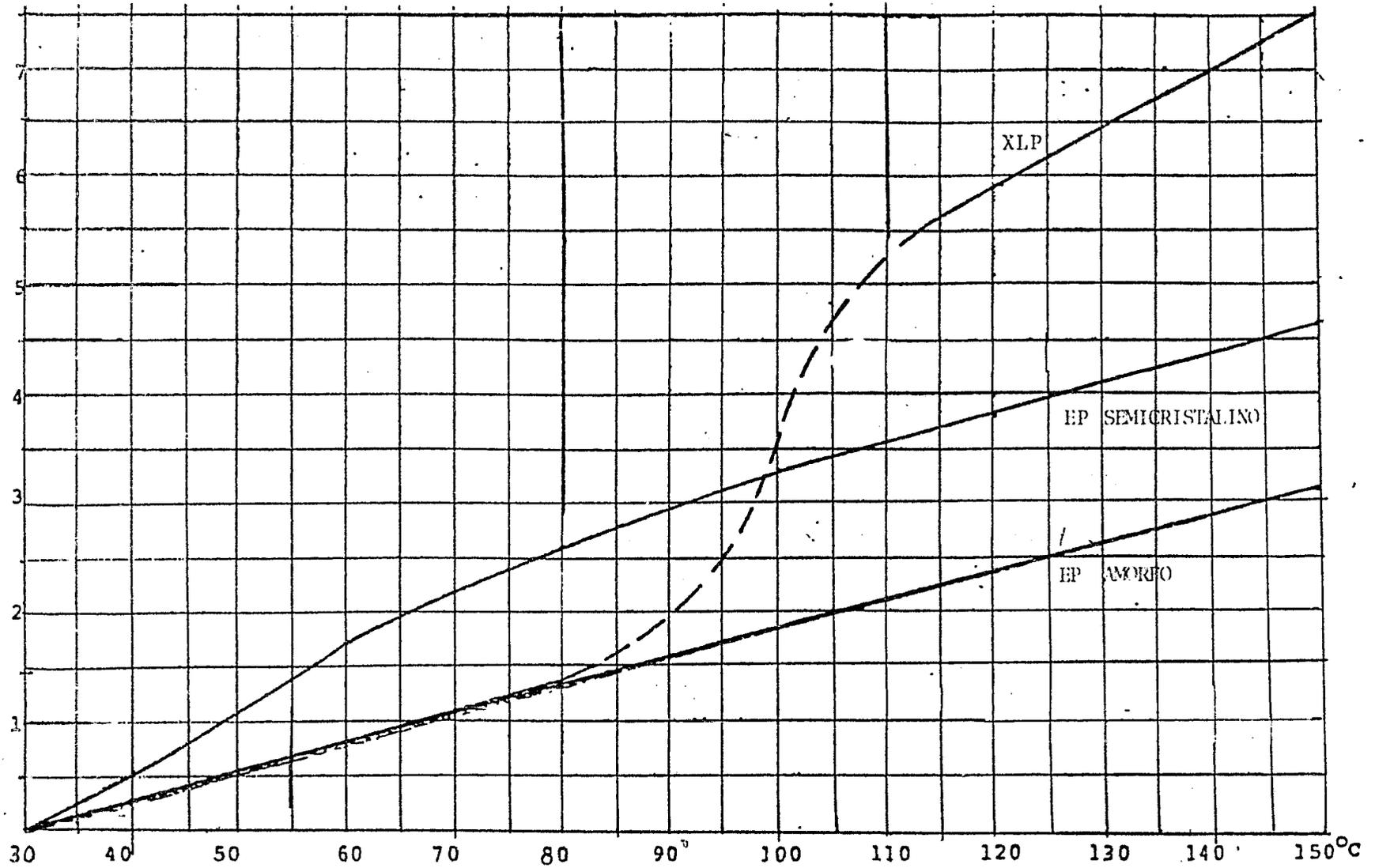


FIGURA No.12

EXPANSION EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

5.9.5. Estudio de Arborescencias.

Las arborescencias se pueden generar en el laboratorio aplicando un esfuerzo eléctrico en el aislamiento expuesto en agua. Otro método para la formación de arborescencias en ausencia de humedad, es el método de doble aguja (ASTM*D-37567).

El más representativo es el AEIC*CS 6-79 (ver punto número 6.2.7.).

Los resultados de estas experimentaciones se resumen en la tabla siguiente.

*ASTM.- American Society of Testing Materials

*AEIC.- Association of Edison Illuminating Companies.

AISLAMIENTO	METODO BAJA TEMP. (% DEL ESF.RUPT. ORIGINAL)	METODO ALTA TEMP. (% DEL ESF.RUPT. ORIGINAL)
XLP	4 min 79.5 kV (53.5)	FALLO
XLP	29min 87.5 (62.5)	57.5 81.5kV 5min
EP	16min 101.5 (72.5)	108.5 kV 22 min (77.5%)
EP	27min 89 (62.5)	108.5 kV 11 min (89.0)

Los resultados de esta prueba indican la superioridad del EP en instalaciones subterráneas húmedas. Esto se hará más evidente en condiciones de elevada temperatura.

Conclusiones.

El XLP presenta propiedades eléctricas iniciales superiores a las del EP (Ver Figuras Nos. 13, 14 y 15). Sin embargo el EP ha demostrado características superiores en condiciones de sobrecarga y humedad. Estas características aunadas a su flexibilidad y facilidad para realizar empalmes y terminales, provocan que esté recibiendo mayor importancia por las Compañías Eléctricas.

Las pruebas de laboratorio demuestran que el EP es el -- único compuesto resistente a la iniciación y crecimiento de arborescencias, lo que lo hace extraordinario para -- trabajar en condiciones severas como sobrecargas y humedad.

Sin duda alguna se han abierto alentadoras expectativas en los cables de energía aislados con EP para disminuir los índices de fallas en cables de energía instalados.

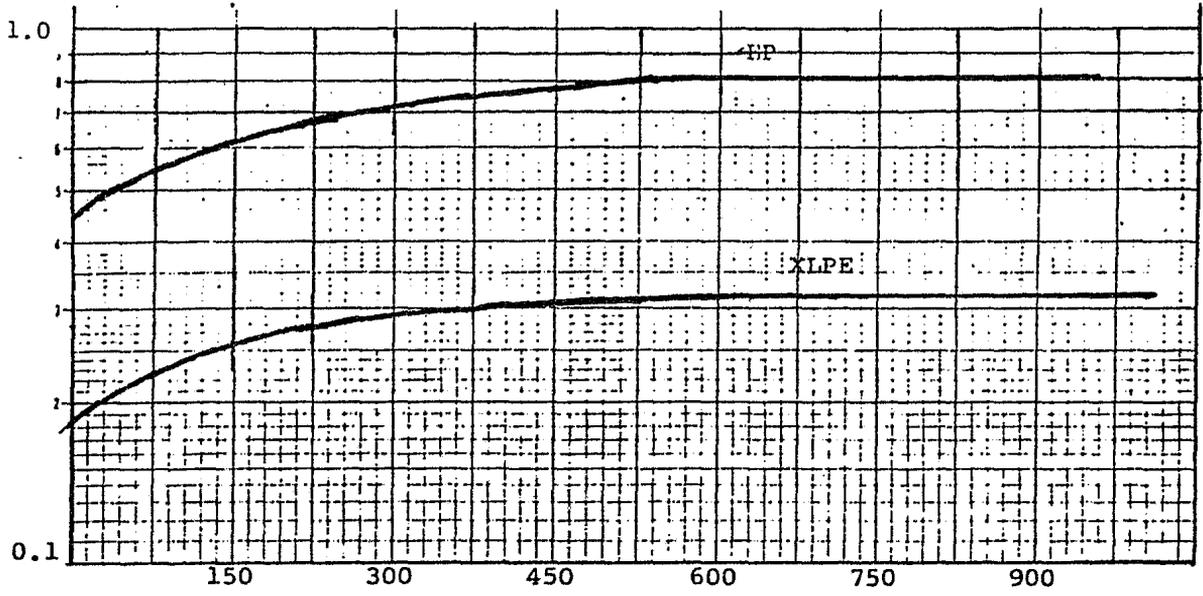


Figura No.13 FACTOR DE POTENCIA CONTRA TIEMPO EN DIAS.

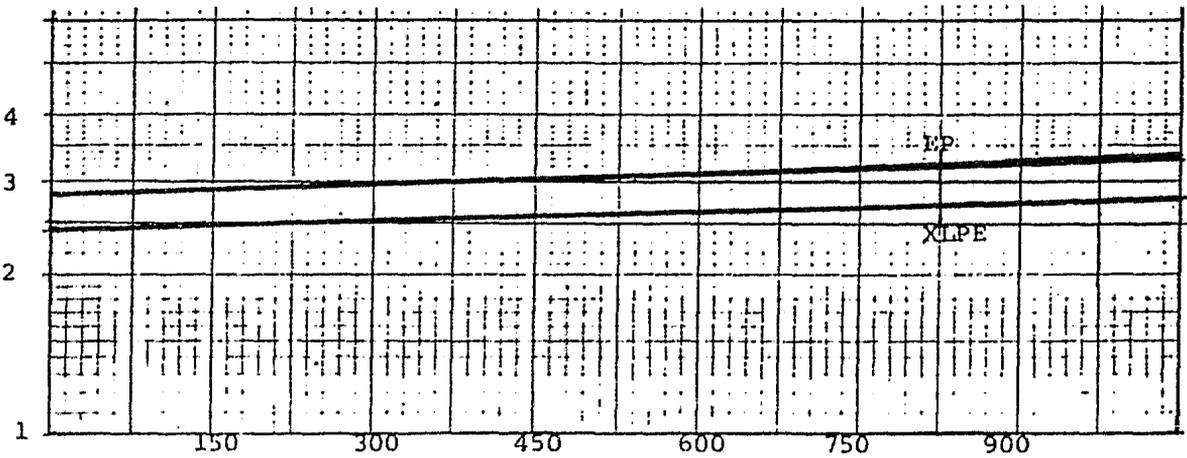


Figura No.14 CONSTANTE DIELECTRICA CONTRA TIEMPO EN DIAS.

RESISTENCIA AISLAMIENTO

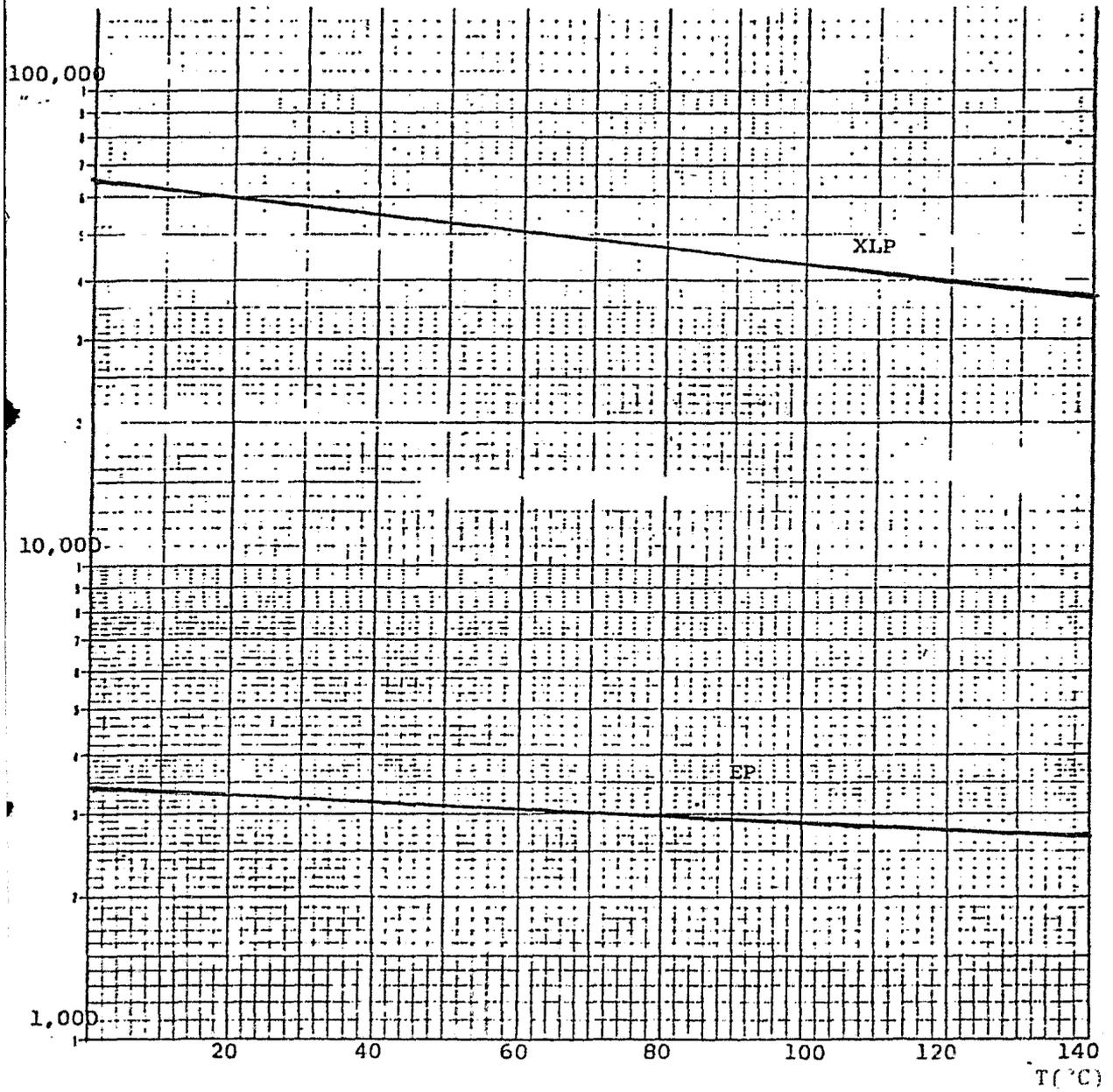


Figura No.15 RESISTENCIA DE AISLAMIENTO CONTRA TEMPERATURA

6. EXPERIMENTACION

La metodología para demostrar la confiabilidad de un compuesto aislante determinado se divide en varias etapas. La primera de estas etapas y la más importante consiste en la evaluación del compuesto aislante mediante modelos miniatura de cables.

6.1. Evaluación de aislamientos mediante modelos.

Debido a la escasez de información sobre el comportamiento de los cables de aislamiento extruido en operación, se ha desarrollado un método estadístico que permite correlacionar la evaluación, con el comportamiento real de los cables en operación a un costo reducido.

Con este fin se fabrican cables miniatura de diferentes dimensiones:

MODELO 1 .- Se debe fabricar un cable con un diámetro bajo aislamiento de 2.8 mm y 7.8 mm sobre el aislamiento a evaluar.

MODELO 2 .- El diámetro bajo aislamiento es de 12.8 mm y sobre aislamiento 23 mm

MODELO 3 .- Debe ser un cable con una tensión nominal mayor a 60 kV.

Como se trata de un método estadístico de evaluación se requiere de un buen número de pruebas para obtener una información más confiable.

Un muestreo recomendable para cada prueba es el siguiente:

	<u>No. MUESTRAS</u>	<u>LONGITUD (m)</u>
MODELO 1	20	1
	20	15
MODELO 2	10	3
	10	20
MODELO 3	3	20

Al cortar un cable en muestras más pequeñas y someter estas muestras a pruebas de tensión a ruptura, los valores de tensión de perforación no serán iguales, presentándose una cierta dispersión.

Cada material tiene un comportamiento típico diferente y se debe estudiar por métodos estadísticos. El modelo matemático más aproximado a la distribución de fallas de cables de energía es el de Weibull cuya expresión es:

$$P(E,t) = e^{-CE^b t^a} \quad \dots(1)$$

La ecuación 1 nos indica la probabilidad de supervivencia de un cable sometido a un esfuerzo eléctrico E durante un tiempo t, (b y a son constantes para cada caso en particular de aislamiento y C depende de las dimensiones del cable y del tipo de aislamiento).

Como nos interesa más la probabilidad de falla, obtenemos:

$$F = 1 - P$$

$$F(E,t) = 1 - e^{-CE^b t^a} \quad \dots(2)$$

La ecuación 2 es la probabilidad de falla de un cable sometido a un esfuerzo eléctrico E durante un tiempo t.

Estudiando separadamente el esfuerzo eléctrico E y el tiempo t.

$$F(E) = 1 - e^{-KE^b} \quad t = \text{cte} \quad \dots(3)$$

$$F(t) = 1 - e^{-Kt^a} \quad E = \text{cte} \quad \dots(4)$$

De la ecuación (3) a t=cte podemos realizar las siguientes pruebas a los aislamientos :

- a. Rigidez dieléctrica C.A., Incremento uniforme. La tensión se aplica en forma constante y uniforme hasta la ruptura del aislamiento.
- b. Rigidez dieléctrica C.A., Incremento por etapas. La prueba se inicia con el 50% de la tensión de ruptura obtenida por incremento uniforme y se mantiene por 10 minutos con un incremento de 10% de la tensión inicial.
- c. Rigidez dieléctrica al impulso, Incremento por etapas. La tensión inicial es de 75, 150 y 350 kV para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. Se aplican tres impulsos de cada polaridad con ondas normales 1.2/50 μ Seg. Posteriormente se incrementa la tensión en etapas de 20% aplicando los impulsos en ambas polaridades hasta la ruptura.

La ecuación 3 es doble exponencial y se puede transformar sacando doble logaritmo de cada miembro:

$$\begin{aligned} \ln F(E) &= \ln (1 - e^{-KE^b}) \\ \ln F(E) &= -\ln e^{-KE^b} = KE^b \ln E = KE^b \\ \ln \ln F(E) &= \ln KE^b = \ln K + b \ln E \\ \ln \ln F(E) &= \ln K + b \ln E \quad \dots(3') \end{aligned}$$

Como podemos observar esta ecuación se puede representar por una recta en una gráfica con ordenadas doble logarítmicas indicando la probabilidad de falla y con abscisas logarítmicas para el esfuerzo eléctrico.

El esfuerzo de ruptura E generalmente se expresa en función del espesor de aislamiento o sea mediante su gradiente eléctrico, el cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$G = \frac{E}{1.151 d \log \frac{D}{d}}$$

Donde: G = Gradiente de ruptura en kV/mm.
 E = Tensión de ruptura en kV.
 D = Diámetro sobre aislamiento en mm.
 d = Diámetro bajo aislamiento en mm.

La probabilidad de falla F de cada muestra se calcula ordenando los gradientes de ruptura de mayor a menor con la fórmula:

$$\% F = \frac{i - 0.305}{n + 0.39} \times 100$$

Donde: i = número de orden
 n = cantidad de muestras.

Se grafican los valores de gradiente y probabilidad de falla para cada muestra probada y se traza una recta promedio cuya pendiente es el valor de "b". (Ver Figura No. 16)

Si se comparan dos longitudes diferentes de cables aislados con el mismo compuesto y con dimensiones diferentes

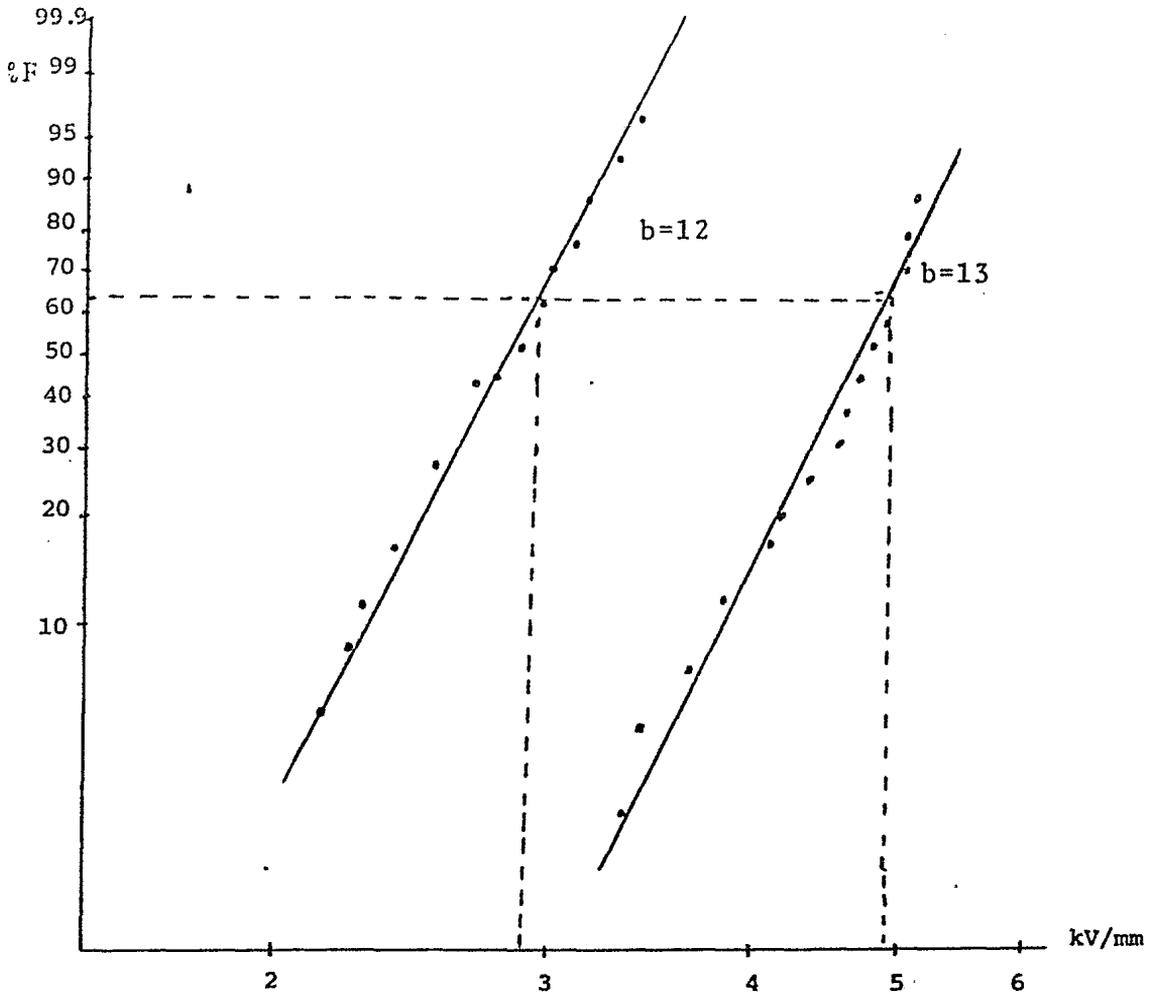


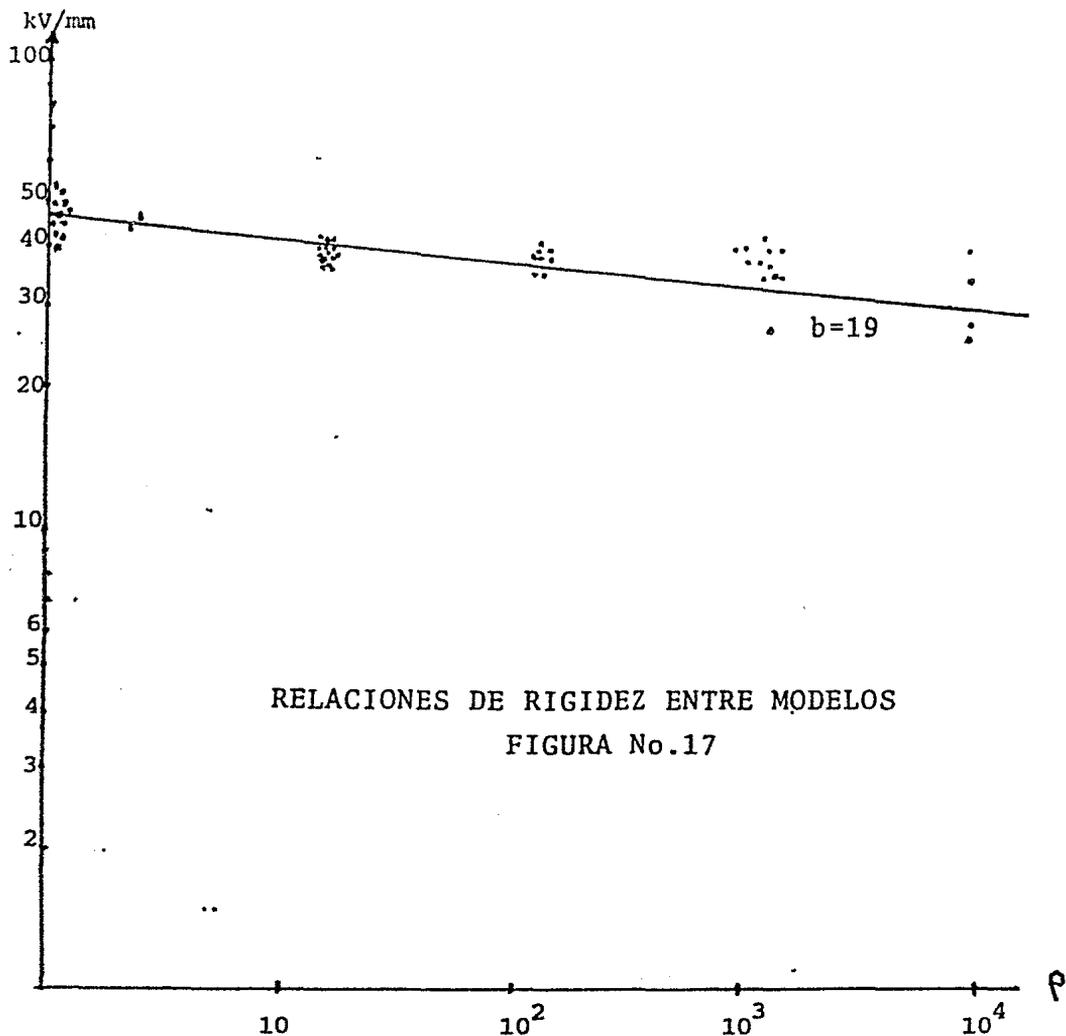
FIG.No.16 GRADIENTE DE RÚPTURA CONTRA PROBABILIDAD DE FALLA $t=cte$.

se obtiene que: $E_2 = E_1 \left[\frac{(L1/L2) (d1/d2)^2}{L2 d2^2} \right]^{1/b} \dots (5)$

$$e = \frac{L1 d1^2}{L2 d2^2}$$

De aquí se deduce que a mayor longitud o diámetro del conductor se tendrá una misma probabilidad de falla sólo que este último cable trabaje a menor esfuerzo eléctrico. Si trabajan al mismo esfuerzo la probabilidad de falla será mayor.

Esto nos permite relacionar los diferentes modelos entre sí obteniéndose una pendiente b al graficar en escala \log en las ordenadas a los gradientes de ruptura -



y en las abscisas en escala lineal la relación de dimensiones (ρ). Ver Figura No.17.

Es muy conveniente fijar un valor de referencia E_0 y t_0 a una probabilidad de falla determinada. Para esto en la ecuación 1 se acepta 1 como exponente obteniéndose:

$$F(E_0, t_0) + 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{e} = 0.632 \dots (6)$$

Por lo tanto E_0 y t_0 son el gradiente y el tiempo de ruptura a una probabilidad de falla del 63.2%

De la ecuación 6 obtenemos que:

$$CE_0^b t_0^a = 1$$

$$C = \frac{1}{E_0^b t_0^a}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$F(E, t) = 1 - e^{-\left[\frac{E}{E_0}\right]^b \left[\frac{t}{t_0}\right]^a}$$

De la ecuación 5 se puede calcular la pendiente "b" para modelos diferentes:

$$b = \frac{\log \frac{L_2}{L_1}}{\log \frac{E_1}{E_2}}$$

Una vez terminada la evaluación de los modelos a tiempo constante se debe analizar el valor de "b". Si este es mayor o igual a trece se debe continuar la experimentación.

Para analizar la ecuación 4 con esfuerzo eléctrico constante, se someten muestras de los tres modelos de cable a una prueba de vida. Esta prueba consiste en aplicar un gradiente determinado fijo hasta que falle cada muestra.

La ecuación 4 se puede transformar como en el caso de tiempo constante en:

$$\ln \ln F(t) = \ln K + a \ln t \quad \dots(4')$$

También en este caso conviene graficar en las ordenadas en escala doble logarítmica la probabilidad de falla y en las abscisas en escala logarítmica sencilla, el tiempo de ruptura. Se traza una pendiente promedio cuya pendiente es el valor de "a". El valor de a recomendable es 0.8 como máximo para un buen aislamiento.

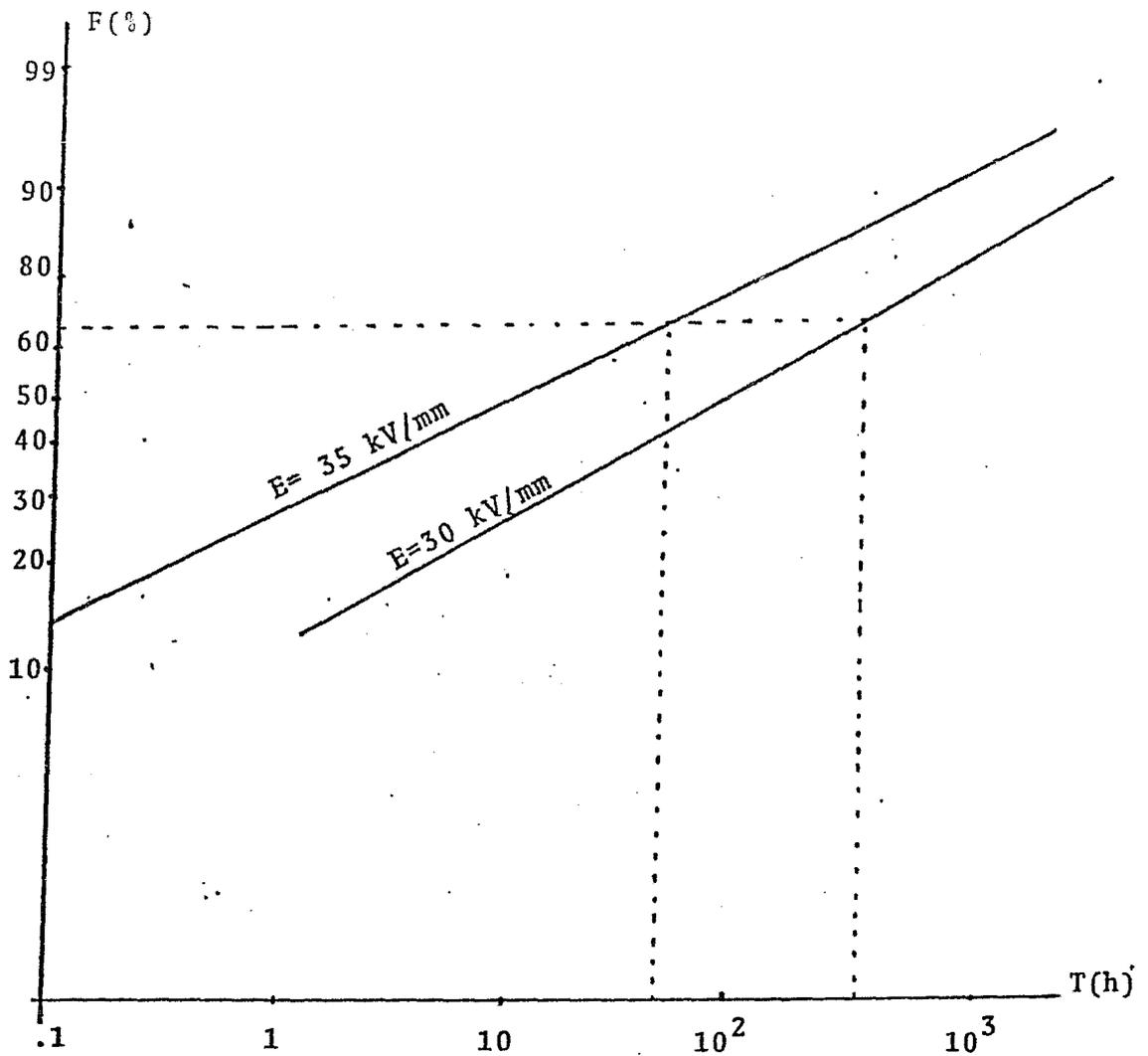


FIGURA No.18 TIEMPO DE RUPTURA CONTRA PROBABILIDAD DE FALLA

Si ahora consideramos la probabilidad de falla constante (63.2%)

$$F(E,t) = 1 - e^{-CE^b t^a} = \text{constante}$$

$$E^b t^a = \text{constante}$$

$$E^{b/a} t = \text{constante}$$

Donde: $b/a=N$ = exponente de vida del compuesto.

De los dos tipos de experimentaciones se toman los pares de valores de E y t a la misma probabilidad de falla (63.2%) y se grafican en papel logarítmico, en las ordenadas el gradiente eléctrico y en las abscisas el tiempo de ruptura. Se traza una recta entre los dos puntos y la pendiente de la misma es -

el exponente de vida. (Ver Figura No.19).

El exponente de vida del compuesto evaluado deberá ser - mayor o igual a 15.

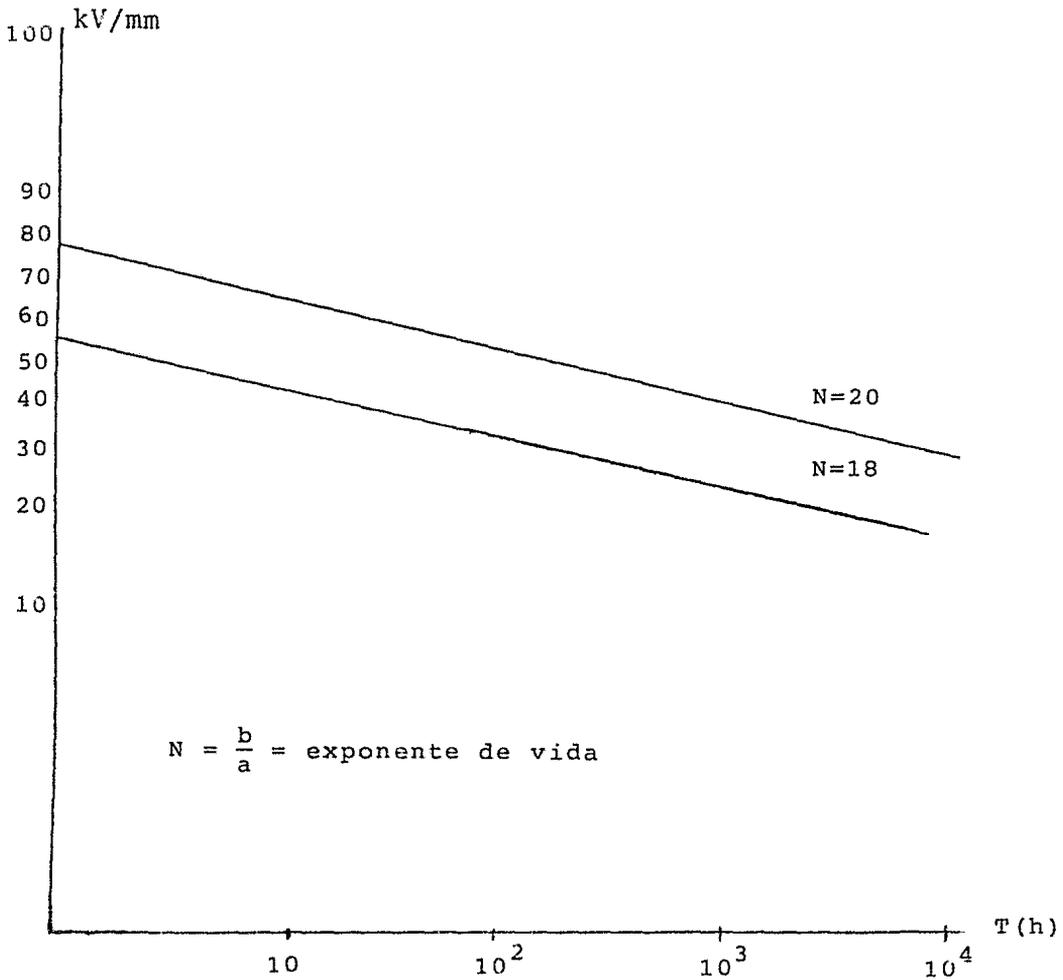


FIGURA No.19 CURVAS DE VIDA

Una vez terminadas todas las experimentaciones en los modelos y que se obtienen resultados satisfactorios se procede a fabricar el cable definitivo para iniciar las pruebas de calificación.

6.2. Pruebas de Calificación.

Las Pruebas de Calificación se realizan para demostrar la capacidad de un fabricante para elaborar un cable de alta calidad con características de funcionamiento adecuadas, y son las siguientes:

- Alta Tensión Tiempo
- Impulso
- Envejecimiento Cíclico
- Estabilidad de la Resistencia
- Absorción de Humedad
- Módulo en Caliente
- Arborescencias

Estas pruebas deben realizarse al inicio de la fabricación de cada diseño de cable, cuando menos una vez cada 24 meses subsecuentes o cuando se cambie la pantalla -- sobre el conductor, aislamiento o pantalla sobre el -- aislamiento.

La prueba de Estabilidad de la Resistencia debe efectuarse inicialmente y cuando se cambie el compuesto de las pantallas sobre el conductor o sobre el aislamiento no siendo indispensable efectuarla cada 24 meses.

Las muestras para las pruebas de Alta Tensión Tiempo e Impulso deben tener una longitud mínima de 7.5 m entre terminales y deben de acondicionarse previamente como -- en la prueba de Estabilidad Estructural (6.3.1.)

El calibre del conductor de las muestra debe ser de -- 500 a 2,000 kCM.

Estas pruebas de calificación están basadas en las normas A.E.I.C.(Association Edison Illuminating Companies) y han sido adoptadas en México por la Comisión Federal de Electricidad y la Dirección General de Normas.

6.2.1. Alta Tensión Tiempo.

La muestra seleccionada para esta prueba debe someterse a un preacondicionamiento durante seis horas a 90°C, después seis horas a 130°C y posteriormente dejarse enfriar a temperatura ambiente. Una vez alcanzadas estas condiciones se le aplica una tensión de corriente alterna de 200 V/mil --- (7.87 kV/mm), durante cuatro horas, una segunda etapa a 300 V/mil (11.81 kV/mm), durante una hora y se incrementa luego a 360 V/mil (14.17 kV/mm), por una hora. Finalmente se sigue aumentando la tensión en etapas con incrementos de 40 V/mil -- (1.57 kV/mm), con duración de media hora cada -- uno hasta llegar a la ruptura. Lo mínimo aceptable es cubrir hasta la segunda etapa.

6.2.2. Impulso.

La prueba se efectúa sobre dos muestras, una de las cuales debe estar a temperatura ambiente y la otra a 130°C. Los resultados de esta última son informativos.

Se deben aplicar en esta prueba impulsos de onda 1.2/50 μ seg. A cada muestra se le deben aplicar tres impulsos de cada polaridad, con un Nivel Básico de Impulso de 550 kV y después solamente tres impulsos con polaridad negativa con tensiones que se vayan incrementando en etapas del 25% de NBI aproximadamente (137 kV), hasta -

llegar a la ruptura.

La muestra a temperatura ambiente, debe soportar la etapa con tensión de 125% del NBI, esto es -- 687.5 kV aproximadamente.

6.2.3. Envejecimiento Cíclico.

Una muestra de cable terminado debe someterse durante un primer período de 21 días a una tensión del doble de la nominal a tierra del cable y diariamente hay que aplicarle durante seis horas -- una corriente que le produzca una temperatura de 90°C.

Después de eso , durante un segundo período de - 21 días se incrementa la tensión al triple de la nominal a tierra del cable y la corriente se eleva para producir un temperatura de 130°C aplicada también durante seis horas cada día.

Sin embargo en ningún caso la tensión aplicada - deberá exceder a la tensión de prueba de corriente alterna de tramo completo y por tanto las tensiones de prueba deben ser en este caso de 133 - kV y 165 kV para el primero y segundo período -- respectivamente.

Antes de iniciar el primer período y después de cada siete días, cuando la muestra está a la temperatura de calentamiento (90 y 130°C), y cuando está a temperatura ambiente, se le deben determinar las descargas parciales a las tensiones de - 150, 200 y 300% de la tensión nominal a tierra - del cable. No se deben efectuar con tensiones --

que superen a la de prueba en corriente alterna de cada tramo, así que sólo se determinará a 100 133 y 165 kV y las descargas parciales no deberán exceder de 5 pC, 20 pC y 27 pC respectivamente para mediciones efectuadas a temperatura ambiente. Las mediciones a 90 y 130°C son sólo informativas.

También debe determinarse el factor de potencia en las mismas etapas anteriores pero únicamente a temperatura ambiente y aplicando la tensión nominal a tierra del cable. Se pueden determinar también los factores de potencia a temperaturas de 90 y 130°C pero sólo como información.

Al finalizar los 42 días de prueba la muestra debe ser diseccionada para determinar alguna variación en sus componentes. Al aislamiento se le deberán aplicar pruebas de esfuerzo de tensión y alargamiento, aunque sólo serán informativas.

6.2.4. Estabilidad de la Resistencia.

Para esta prueba se determina inicialmente la resistividad de los semiconductores a temperatura ambiente. Después se coloca una muestra en un horno, el cual debe estar a 120°C para determinar la resistividad del semiconductor sobre el aislamiento; otra muestra se coloca en un horno a 130°C para determinar la resistividad del semiconductor sobre el conductor. Se calculan las resistividades al 1er. día, a los 14, 28, 42 y 56 días o más si se considera necesario, y se compara el Log_{10} de la resistividad final (al día 56), con los Log_{10} de las resistividades a los días -

14, 28 y 42, mediante la siguiente fórmula, debiendo cumplirla.

$$\text{Log}_{10} P_{56} = \frac{\text{Log}_{10} P_{42} + \text{Log}_{10} P_{28} + \text{Log}_{10} P_{14}}{3} + 0.1$$

6.2.5. Absorción de Humedad.

La muestra consiste en un alambre calibre 14 AWG aislado con un espesor de 0.047" (1.19 mm) del compuesto a calificar. La muestra debe ser sumergida en agua a 90°C durante 6 meses aplicándole durante ese tiempo una tensión de 600 Volts - CA excepto cuando se realicen las mediciones que a continuación se indican: después de 24 horas y al final de los 6 meses se determinan el factor de potencia y la constante dieléctrica aplicando 40 Volts/mil (1880 Volts), 1.57 kV/mm.

6.2.6. Módulo en Caliente.

Se retiran del cable muestras del aislamiento y se preparan tres probetas dejándose ambientar por 15 minutos a 130°C. A esta temperatura se alargan al 100% en una máquina de tensión y se calcula su esfuerzo. El esfuerzo de tensión mínimo debe ser de 175 lb/pulg² (0.123 kg/mm²).

6.2.7. Arborescencias.

Se toman dos muestras de 5 m mínimo de un cable 15 kV 1/0 AWG, se retira la cubierta, se aplican 200 V/mil (7.87 kV/mm), durante 5 minutos y se introducen las muestras en un tubo plástico de 3 pulgadas (7.62 cm) de diámetro.

Preacondicionamiento:

Muestra 1: 15 kV durante 200 horas a una temperatura de 90°C.

Muestra 2: 15 kV durante 50 horas a 90°C

15 kV durante 150 horas a 130°C

Después de este preacondicionamiento se deberán llenar de agua todos los intersticios del conductor quedando en estas condiciones durante toda la prueba. Posteriormente se sumergen las muestras de un 50 a un 75% de su longitud en agua.

Existen dos métodos de prueba:

Método A. Aplicar 85 Volts/mil (3.35 kV/mm) a -- 1000 Hz, 8 horas diarias, 6 de las cuales deberá alcanzar el conductor la -- temperatura máxima especificada, durante 5 días a la semana y un total de 30 días.

Temperatura del Conductor:

Muestra 1 75°C

Muestra 2 90°C

Método B. Aplicar 150 Volts/mil (5.91 kV/mm), a 60 Hz, 8 horas diarias, 6 de las cuales deberá alcanzar el conductor la -- temperatura máxima especificada, durante 5 días a la semana y un total de -- 120 días.

Temperatura del Conductor:

Muestra 1 75°C

Muestra 2 90°C

Se llevan a ruptura las muestras, aplicando 100 - Volts/mil (3.94 kV/mm), 1 hora e incrementando en

pasos de 40 Volts/mil (1.57 kV/mm), 0.5 horas --

Se cortan rodajas en ambas muestras cerca de la falla para analizarlas al microscopio con 25 ampli-
ficaciones. Se deben registrar las arbores--
cencias observadas.

6.3. Pruebas Especiales.

Estas pruebas se determinan sobre muestras del cable --
terminado. Se deben efectuar a cada lote de cable fa--
bricado.

6.3.1. Estabilidad Estructural.

Una muestra de cable terminado con una longitud
mínima de 9.15 m se somete durante seis horas a
90°C y después otras seis horas a 130°C y final-
mente se le deja enfriar a temperatura ambiente.

Antes de iniciar el calentamiento, cuando la ---
muestra está a temperatura ambiente, al final --
del período de 90°C cuando aún está a esa tempe-
ratura y cuando regresa a la temperatura ambien-
te se le determinan las descargas parciales al -
150, 200 y 300 % de la tensión nominal a tierra
del cable, excepto que no se deben efectuar con
tensiones que superen la de prueba del tramo --
completo; por tanto en este caso será a 100 y --
133 kV. También se le determina en las mismas -
etapas, el factor de potencia a la tensión nomi-
nal a tierra del cable.

Los valores determinados a las temperaturas de -
90 y 130 °C son únicamente informativos, en tan-
to que los obtenidos a temperatura ambiente, no
deberán superar lo siguiente:

Descargas parciales al 150%	5 pC Máximo
Descargas parciales al 200%	20 pC Máximo
Descargas parciales al 300%	27 pC Máximo
Factor de Potencia	1.5 % Máximo

6.3.2. Estabilidad Dimensional.

Se determina el aumento o disminución de la longitud del aislamiento en una muestra de 30.5 cm de cable, después de someterla a una temperatura de 121°C durante 20 horas.

6.3.3. Burbujas y Contaminantes.

De una muestra de cable de 2 pulgadas (5.08 cm) de longitud se cortan 80 rodajas de la sección transversal del aislamiento con un espesor aproximado de 25 mils (0.63 mm).

Estas rodajas se analizan visualmente para detectar la presencia de burbujas o contaminantes en el aislamiento o entre semiconductor y aislamiento. Posteriormente se analizan 20 rodajas en un microscopio con micrómetro, con 15 aumentos y se tabulan las burbujas y contaminantes con una dimensión mayor de 2 mils (0.05 mm).

La mayor burbuja y el mayor contaminante se examinan con 40 aumentos y se registra su mayor dimensión.

El tamaño máximo permitido es 5 mils (0.125 mm) para burbujas y 10 mils (0.25 mm) para contaminantes e irregularidades. Además no debe haber más de 2 burbujas por cm^3 entre 2 a 4 mils (0.05 y 0.1 mm), ni 1 contaminante por cm^3 entre 2 y 4 mils (0.05 y 0.1 mm).

6.4. Pruebas a los Componentes.

Este grupo de pruebas son las que se realizan en forma rutinaria durante la fabricación de cada elemento, por tal motivo las dividimos por tipo de elemento del cable en:

6.4.1. Pruebas al Semiconductor sobre el Conductor.

- A. Resistividad Volumétrica
- B. Alargamiento después de Envejecimiento
- C. Fragilidad en Frío

6.4.2. Pruebas al Aislamiento.

- A. Esfuerzo de Tensión a Ruptura
- B. Alargamiento a Ruptura
- C. Esfuerzo de Tensión al 100% de Alargamiento
- D. Retención del Esfuerzo de Tensión después de Envejecido en Horno.
- E. Retención de Alargamiento después de Envejecido en Horno.
- F. Capacidad Inductiva Específica (SIC) y Factor de Potencia.
- G. Absorción de Humedad Método Eléctrico y Gravimétrico.
- H. Deformación Térmica
- I. Extracción por Solventes

6.4.3. Pruebas al Semiconductor sobre Aislamiento.

- A. Resistividad Volumétrica
- B. Alargamiento después de Envejecido
- C. Fragilidad en Frío.

6.4.4. Pruebas a la Cubierta

- A. Esfuerzo de Tensión a Ruptura
- B. Alargamiento a Ruptura
- C. Retención de Esfuerzo de Tensión después de Envejecido en Horno

- D. Retención de Alargamiento después de Envejecido en Horno.
- E. Retención de Esfuerzo de Tensión Después de Envejecido en Aceite.
- F. Retención de Alargamiento después de Envejecido en Aceite.
- G. Deformación Térmica.
- H. Choque Térmico
- I. Doblez en Frío

6.4.1. Pruebas al Semiconductor sobre el Conductor.

A. Resistividad Volumétrica

Se mide la resistencia del semiconductor formando dos electrodos espaciados dos cm como mínimo. Se calcula la resistividad con las siguientes fórmulas:

$$P = \frac{R (D^2 - d^2)}{L} \quad \text{Para el semiconductor sobre el conductor.}$$

$$P = \frac{2R (D^2 - d^2)}{L} \quad \text{Para el semiconductor sobre el aislamiento.}$$

Donde: P= Resistividad Volumétrica en ohm-cm
 R= Resistencia en Ohms
 D= Diámetro sobre Semiconductor Externo en cm.
 d= Diámetro sobre Semiconductor Interno en cm
 L= Distancia entre Electrodos en cm

Las mediciones deben hacerse a la temperatura correspondiente según la siguiente tabla, no debiendo exceder los valores indicados en la misma.

	RESISTIVIDAD EN OHM-cm		
	90°C	100°C	130°C
S/C SOBRE CONDUCTOR	100,000	--	100,000
S/C SOBRE AISLAMIENTO	50,000	50,000	-----

B. Alargamiento Después de Envejecido.

Esta prueba se realiza en una placa moldeada del compuesto semiconductor.

Se someten las probetas a un envejecimiento - acelerado en un horno con circulación forzada de aire por 168 horas a 121°C. Posteriormente se someten a una prueba de alargamiento a ruptura calculando el porcentaje de alargamiento.

C. Fragilidad en Frío

Esta prueba se realiza en probetas obtenidas de una placa moldeada del compuesto semiconductor y consiste en determinar en forma estadística la temperatura a la cual el 50% de los especímenes se fracturarán cuando sean sometidos a un impacto simple.

6.4.2. Pruebas de Aislamiento.

A. B. y C. Esfuerzo de Tensión a Ruptura.

Consiste en preparar tres probetas de aislamiento y someterlas a ruptura por tensión. Al mismo tiempo se calcula el porcentaje de alargamiento. También en la misma prueba, cuando

el espécimen se alargó un 100% se calcula su esfuerzo de tensión.

D. y E. Retención de Esfuerzo de Tensión y Alargamiento después de Envejecido en Horno.

Se someten 3 probetas de la misma muestra que el inciso anterior a un envejecimiento acelerado en horno de circulación forzada de aire -- durante 168 horas a 121°C. Posteriormente se prueban como se indica en puntos A y B comparando los valores y calculando el porcentaje que retuvieron de su valor original.

F. Constante Dieléctrica y Factor de Potencia.

Se toma una muestra de cable retirando de él la cubierta y la pantalla metálica. Se sumerge en agua por 24 horas y se le mide la constante dieléctrica y el factor de potencia --- aplicándole tensión igual a la nominal del cable a tierra.

G. Absorción de Humedad

-Método gravimétrico.

Una muestra de aislamiento se seca mediante calor y vacío por 48 horas a 70°C y 5 mm Hg. posteriormente se somete a un baño de agua a 70°C durante 168 horas y posteriormente se vuelve a secar en las condiciones iniciales.

Por medio de diferencia de pesos se obtiene la humedad absorbida en mg/cm^2 .

-Método Eléctrico.

Se efectúa sobre una muestra de cable a la -- que se le deben retirar los elementos sobre -- el aislamiento, y posteriormente se le sumerge en agua a 75°C durante 14 días excepto sus extremos.

Después del 1er. día, el 7° día y el 14° día -- se determinan el factor de potencia a 40 y 80 V/mil (1.57 y 3.15 kV/mm), y la capacitancia a 80 V/mil (3.15 kV/mm).

No debe incrementarse la capacitancia más de 3.5% entre el 1° y el último día, en tanto -- que el factor de potencia no deberá aumentar más del 10%.

H. Deformación Térmica.

Las probetas de aislamiento son sometidas a un período de calentamiento controlado de 121°C -- 1 hora y bajo una cierta carga para determinar los cambios que presenten sus espesores. No -- deberá exceder del 25%.

I. Extracción por Solventes.

Los especímenes de aislamiento vulcanizado se pesan, y posteriormente se hierven en el sol--vente de extracción (usualmente decahidronafta--leno), a la temperatura y tiempo especificados. Después de la extracción, los especímenes se -- secan y se vuelven a pesar.

Por cálculo se determina la porción extraída -- de material no vulcanizado, el cual no debe -- ser mayor de 30%.

6.4.3. Pruebas al Semiconductor sobre Aislamiento.

Ver punto número 6.4.1.

6.4.4. Pruebas a la Cubierta.

La cubierta debe ser sometida a las pruebas indicadas en el punto 6.4.4., incisos A,B,C y D en la misma forma que al aislamiento, punto 6.4.2., incisos A,B,D y E respectivamente.

E., F. Retención de Esfuerzo de Tensión y Alargamiento después de Envejecido en Aceite.

Se someten 3 especímenes tomados de una muestra de la cubierta a un envejecido en aceite - del tipo *ASTM No.2, a una temperatura de 70°C durante 48 horas. Posteriormente se realizan las pruebas de esfuerzo de tensión y alargamiento y se obtiene el porcentaje de retención de los valores envejecidos contra los iniciales (incisos A y B).

*ASTM (American Society of Testing Materials).

G. Deformación Térmica.

Para la cubierta esta prueba se realiza de --- igual forma que en el caso del aislamiento, -- punto 6.4.2. inciso H.

H. Choque Térmico.

Una muestra de cable se somete a 121°C durante una hora, posteriormente se deja enfriar a temperatura ambiente y se analiza buscando cualquier grieta en la cubierta.

I. Doblez en Frío.

Una muestra de cable se somete a -10°C durante una hora. Inmediatamente, se dobla en "U" y no se debe agrietar la cubierta.

6.5. Pruebas de Aceptación.

Estas pruebas se efectúan al 100% de los cables fabricados antes de su embarque al cliente, para comprobar las condiciones mínimas de funcionalidad de cada cable.

Las pruebas comúnmente realizadas son:

- Descargas Parciales
- Rigidez Dieléctrica C.A.
- Resistencia de Aislamiento
- Resistencia Ohmica
- Rigidez Dieléctrica C.D.

6.5.1. Descargas Parciales.

Consiste en aplicar tensión C.A. en etapas de 1.5, 2.0, 3.0 y 4.0 E₀ y en cada una determinar las --descargas parciales en el aislamiento en pC, comparándolas con el máximo permisible según la especificación en cuestión.

Las descargas parciales son producidas por presencia de cavidades en el aislamiento que tienen una constante dieléctrica diferente al dieléctrico, - presentándose una ionización que depende de la intensidad del campo, las dimensiones de la cavidad y la presión del gas en dicha cavidad.

6.5.2. Rigidez Dieléctrica C.A.

Se aplica un potencial C.A. entre conductor y pantalla metálica para someter al aislamiento a un - esfuerzo suficientemente alto como para detectar posibles defecto que lleven a una falla prematura. La práctica actual consiste en aplicar 200 V/mil (7.87 kV/mm), de espesor por 5 minutos.

6.5.3. Resistencia de Aislamiento.

Se debe medir la resistencia que tiene el aislamiento al paso de la corriente y se corrige por temperatura y longitud para compararlo con el mínimo especificado obtenido de la siguiente fórmula:

$$R = K \log \frac{D}{d}$$

- Donde:
- R = Resistencia de Aislamiento mínima en $M\Omega$ - km
 - K = Constante de Resistencia de Aislamiento = 6,100 $M\Omega$ - km a 15.6 °C para el EP.
 - D = Diámetro sobre el aislamiento
 - d = Diámetro bajo el aislamiento.

6.5.4. Resistencia Ohmica.

Se debe medir la resistencia que presenta el conductor al paso de la corriente corrigiéndolo por temperatura y longitud para compararlo con el especificado para ese calibre en particular.

6.5.5. Rigidez Dieléctrica C.D.

Se le aplica un potencial C.D. entre conductor y pantalla metálica que es de 2 a 3 veces la prueba de C.A. durante 15 minutos.

6.6. Pruebas de Campo.

Una vez instalado el cable y efectuados los empalmes necesarios se debe realizar una prueba de alta tensión C.D.

al 80% del valor de prueba en fábrica durante 15 minutos para asegurar la correcta fabricación de los empalmes y terminales o posibles daños del cable durante su transporte e instalación.

7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados típicos de las pruebas de un cable de 115 kV con aislamiento de EP se resumen en las siguientes tablas: (El número corresponde a la descripción de la prueba del capítulo 6).

NUMERO	DESCRIPCION	UNIDAD	ESPECIFICADO	OBTENIDO
6.2.	PRUEBAS DE CALIFICACION			
6.2.1.	Alta Tensión - Tiempo			
	1a. Etapa 200 V/mil (156 kV) 4 hrs.	--	Sin fallar	Cumplió
	2a. Etapa 300 V/mil (234 kV) 1 hr.	--	Sin fallar	Cumplió
	3a. Etapa 360 V/mil (280 kV) 1 hr.	--	Informativo	Cumplió
	4a. Etapa 400 V/mil (312 kV) 0.5 hr.	--	Informativo	Cumplió
	5a. Etapa 440 V/mil (343 kV) 0.5 hr.	--	Informativo	Cumplió
	6a. Etapa 480 V/mil (374 kV) 0.5 hr.	--	Informativo	Cumplió
	7a. Etapa 520 V/mil (406 kV) 0.5 hr.	--	Informativo	Cumplió
	8a. Etapa 560 V/mil (437 kV) 0.5 hr.	--	Informativo	Cumplió
	9a. Etapa 600 V/mil (468 kV) 0.5 hr.	--	Informativo	Falló
	Gradiente de ruptura	kV/mm	Informativo	44.35
6.2.2.	Impulso			
	A temperatura ambiente			
	1a. Etapa 1.00 NBI (550kV) 3(+) y 3(-)	--	Sin fallar	Cumplió
	2a. Etapa (600 kV) 3(-)	--	Sin fallar	Cumplió
	3a. Etapa (650 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	4a. Etapa (700 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	5a. Etapa (750 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	6a. Etapa (800 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	7a. Etapa (850 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	8a. Etapa (900 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	9a. Etapa (950 kV) 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	10a. Etapa (1000 kV) 3(-)	--	Informativo	Falló en terminal
	Gradiente de ruptura	kV/mm	Informativo	94.79
	A 130°C			
	1a. Etapa 1.0 NBI(550kV)3(+)y 3(-)	--	Informativo	Cumplió
	2a. Etapa (600 kV) 3 (-)	--	Informativo	Cumplió
	3a. Etapa (650 kV) 3 (-)	--	Informativo	Cumplió
	4a. Etapa (700 kV) 3 (-)	--	Informativo	Cumplió
	5a. Etapa (750 kV) 3 (-)	--	Informativo	Cumplió
	10a. Etapa (1000 kV) 3 (-)	--	Informativo	Falló
	Gradiente de ruptura	kV/mm		94.79

NUMERO	DESCRIPCION	UNIDAD	ESPECIFICADO	OBTENIDO
6.2.3.	Envejecimiento Cíclico			
	Mediciones Iniciales ambiente			
	.Desc.Parciales a 1.5 Eo (100 kV)	pC	5 Máx.	4
	.Desc.Parciales a 2.0 Eo (134 kV)	pC	20 Máx.	4
	.Desc.Parciales a 150 kV	pC	27 Máx.	4
	.Factor de Potencia a Eo (67 kV)	%	1.5 Máx.	0.07
	Primer ciclo de envejecimiento elec trotérmico con 2 Eo (134 kV) 121 -- días y 90°C, diarias.			
	Mediciones a 90°C después del 7º día			
	.Desc.Parciales a 1.5 Eo	pC	Informativo	4
	.Desc.Parciales a 2.0 Eo	pC	Informativo	4
	.Desc.Parciales a 150 kV	pC	Informativo	6
	.Factor de Potencia a Eo	%	No especi- ficado.	0.141
	Mediciones a temperatura ambiente después del 7º día.			
	.Desc.Parciales a 1.5 Eo	pC	5 Máx.	4
	.Desc.Parciales a 2.0 Eo	pC	20 Máx.	4
	.Desc.Parciales a 150 kV	pC	27 Máx.	6
	.Factor de Potencia a Eo	%	1.5 Máx.	0.111
	Mediciones a 90°C después del 14º día			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	Informativo	4
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	Informativo	4
	.Desc. Parciales a 150 kV	pC	Informativo	4
	.Factor de Potencia a Eo	%	No especi- ficado.	0.163
	Mediciones a temperatura ambiente después del 14º día.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	5 Máx.	4
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	20 Máx.	4
	.Desc. Parciales a 150 kV	pC	27 Máx.	4
	.Factor de Potencia a Eo	%	1.5 Máx.	0.0905
	Mediciones a 90°C después del 21º día.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	Informativo	5
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	Informativo	5
	.Desc. Parciales a 150 kV	pC	Informativo	5
	.Factor de Potencia a Eo	%	No especi- ficado.	0.135
	Mediciones a temperatura ambiente después del 21º día.			
	.Desc.Parciales a 1.5 Eo	pC	5 Máx.	5

NUMERO	DESCRIPCION	UNIDAD	ESPECIFICADO	OBTENIDO
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo .Desc. Parciales a 150 kV .Factor de Potencia a Eo	pC pC %	20 Máx. 27 Máx. 1.5 Máx.	5 5 0.109
	Segundo ciclo de envejecimiento electrotérmico con 167 kV y 21 días 130°C 6 hrs. diarias Mediciones a 130°C después del 7° día			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo .Desc. Parciales a 2.0 Eo .Desc. Parciales a 150 kV .Factor de Potencia a Eo	pC pC pC %	Informativo Informativo Informativo No especificado	4 4 4 0.149
	Mediciones a temperatura ambiente después del 7° día.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo .Desc. Parciales a 2.0 Eo .Desc. Parciales a 150 kV .Factor de Potencia a Eo	pC pC pC %	5 Máx. 20 Máx. 27 Máx. 1.5 Máx.	4 4 4 0.099
	Mediciones a 130°C después del 14° día.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo .Desc. Parciales a 2.0 Eo .Desc. Parciales a 150 kV .Factor de Potencia a Eo	pC pC pC %	Informativo Informativo Informativo No especificado	4 4 4 0.276
	Mediciones a temperatura ambiente después del 14° día			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo .Desc. Parciales a 2.0 Eo .Desc. Parciales a 150 kV .Factor de Potencia a Eo	pC pC pC %	5 Máx. 20 Máx. 27 Máx. 1.5 Máx.	4 4 4 0.154
	Mediciones a 130°C después del 21° día.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo .Desc. Parciales a 2.0 Eo .Desc. Parciales a 150 kV .Factor de Potencia a Eo	pC pC pC %	Informativo Informativo Informativo No especificado	4 4 4 0.250
	Mediciones a temperatura ambiente después del 21° día.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	5 Máx.	4

NUMERO	DESCRIPCION	UNIDAD	ESPECIFICADO	OBTENIDO
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	20 Máx.	4
	.Desc. Parciales a 150 kV	pC	27 Máx.	4
	.Factor de Potencia a Eo	%	1.5 Máx.	0.35
6.2.4.	Estabilidad de la Resistencia	--	--	Cumplió
6.2.5.	Absorción de Humedad			
	a. Incremento de constante dieléctrica de 1 a 180 días	%	20 Máx.	9.54 9.43
	b. Incremento de factor de Potencia de 1 a 180 días.	%	10 Máx.	7.66 7.30
6.2.6.	Módulo en Caliente	kg/mm ²	0.123	0.125
6.2.7.	Arborescencias Forzadas	--	Informativo	--
6.3.	PRUEBAS ESPECIALES			
6.3.1.	Estabilidad Estructural			
	Mediciones Iniciales (Ambiente)			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo (100 kV)	pC	5 Máx.	5
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo (134 kV)	pC	20 Máx.	12
	.Factor de Potencia a Eo (67 kV)	%	1.5 Máx.	0.08234
	Mediciones a 90°C después de 6 hrs. de calentamiento.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	Informativo	1
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	Informativo	15
	.Factor de Potencia a Eo	%	Informativo	0.1441
	Mediciones a 130°C después de 6 hrs. de calentamiento.			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	Informativo	1
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	Informativo	5
	.Factor de Potencia a Eo	%	Informativo	0.2191
	Mediciones Finales (Ambiente)			
	.Desc. Parciales a 1.5 Eo	pC	5 Máx.	1
	.Desc. Parciales a 2.0 Eo	pC	20 Máx.	9
	.Factor de Potencia a Eo	%	1.5 Máx.	0.0896

NUMERO	DESCRIPCION	UNIDAD	ESPECIFICADO	OBTENIDO
6.3.2.	Estabilidad Dimensional	mm	INFORMATIVO	2.22
6.3.3.	Burbujas y Contaminantes	--	--	Cumple
6.4.	PRUEBAS A LOS COMPONENTES			
6.4.1.	Semiconductor sobre Conductor			
	A.Resistividad Volumétrica	Ohm-cm		
	A 90°C		100,000 Máx	646
	A 130°C		100,000 Máx	463
	B.Alargamiento después de Envejecido	%	100 Mín	150
	C.Fragilidad en Frío	°C	-10 Máx	-20
6.4.2.	Aislamiento			
	A.Esfuerzo de Tensión	kg/mm ²	1.27 Mín	1.767
	B.Alargamiento	%	250	355
	C.Esfuerzo al 100%	kg/mm ²	0.3	0.4
	D.Retención de Esfuerzo	%	75 Mín	100
	E.Retención de Alargamiento	%	75	98
	F.Constante Dieléctrica	-	4 Máx	2.86
	Factor de Potencia	%	2 Máx	1.56
	G.Absorción Humedad			
	Método Gravimétrico	mg/cm ²	1.55Máx	0.117
	Método Eléctrico Incremento			
	SIC Cte.diélectrica	%	3.5 Máx	0.0
	Incremento			
	Factor de Potencia.	%	10 Máx	1.2
	H.Deformación Térmica	%	25 Máx	4.6
	I.Extracción por Solventes	%	30 Máx	10.1

NUMERO	DESCRIPCION	UNIDAD	ESPECIFICADO	OBTENIDO
6.4.3.	Semiconductor sobre Aislamiento			
	A. Resistividad Volumétrica	Ohm-cm		
	A 90°C		50,000 Máx	5,722
	A 130°C		50,000 Máx	1,297
	B. Alargamiento después de Envejecido	%	100 Mín	125
	C. Fragilidad en Frío	°C	-10 Máx	-20
6.4.4.	Cubierta			
	A. Esfuerzo de Tensión	kg/mm ²	1.0 min	1.7
	B. Alargamiento a Ruptura	%	100 Mín	250
	C. Retención Esfuerzo Tensión(horno)	%	85 Mín	90
	D. Retención Alargamiento (horno)	%	60 Mín	82
	E. Retención Esfuerzo Tensión(aceite)	%	80 Mín	93
	F. Retención Alargamiento (aceite)	%	60 Mín	75
	G. Deformación Térmica	%	50 Máx	18
	H. Choque Térmico	1hr/121°C	S/Fractura	Cumple
	I. Doble en Frío	1hr/121°C	S/Fractura	Cumple
6.5.	ACEPTACION			
6.5.1.	Descargas Parciales 100 kV	pC	5 Máx	2
	133 kV		5	2
	150 kV		12.7	8
6.5.2.	Rigidez Dieléctrica C.A.	150kV/5min	Sin Falla	Cumple
6.5.3.	Resistencia de Aislamiento *	M Ω/km	2,400	45,600
6.5.4.	Resistencia Ohmica *	Ohm/km	.116	.115
6.5.5	Rigidez Dieléctrica C.D.	340kV/15min	Sin Falla	Cumple
	* Para un calibre 500 kCM			

C O N C L U S I O N E S

Como hemos podido observar, durante el desarrollo de la experimentación de un compuesto aislante determinado, se prueba el aislamiento primero en modelos miniatura de cable. Cuando los resultados de estas pruebas son alentadores, se procede a fabricar una muestra de cable real y se procede a realizar las pruebas de calificación. Cuando el cable ha cumplido estas pruebas estamos en posibilidad de comercializar dicho aislamiento con una amplia seguridad de que se comportará satisfactoriamente en la operación del mismo.

Cuando se fabrique producción definitiva se deben realizar las pruebas especiales a los componentes y de aceptación para ratificar que no se hayan tenido fallas en los procesos.

Finalmente es muy importante el cuidado que se debe tener durante la instalación del cable y realización de empalmes, debido a que estos son factores importantes causantes de fallas en las líneas de transmisión y distribución subterránea.

Es difícil predecir la vida útil del cable ya instalado, debido a que dependerá de muchos factores ajenos al diseño o fabricación del mismo tales como, tipo de terreno, temperatura, trayectoria de instalación, circuitos cercanos, animales, daños, etc.

Por tal motivo se recomienda realizar pruebas de campo de mantenimiento periódico (Resistencia de Aislamiento), para detectar cualquier posible deterioro prematuro de algún elemento, pudiéndose tomar acciones que eviten un daño mayor o falla sorpresiva.

La experimentación con modelos miniatura de cables es una h

rramienta indispensable en la evaluación de formulaciones ya que nos da información muy valiosa del comportamiento de los aislamientos sin incurrir en grandes gastos y pérdida de tiempo que representa el probar en cables de dimensiones normales. Además nos permite predecir el tiempo de vida de los cables - en condiciones normales.

La metodología para la experimentación con modelos miniatura de cables y para la calificación de prototipos de cables definitivos presenta grandes dificultades para su realización completa. Se requiere de mucho tiempo para la experimentación - con diversas formulaciones de aislamientos hasta encontrar la más conveniente. Posteriormente se requiere de más de medio año en la realización de las pruebas de calificación, ya teniendo los prototipos de cable, por lo que el tiempo es factor importante para este tipo de proyectos. Otra limitante - importante es la carencia de equipo de pruebas para la experimentación en la industria, ya que el existente es requerido - para las funciones normales de prueba de rutina a la producción.

Se debe continuar la experimentación e investigación en el -- campo de los modelos miniatura pero sometiéndolos a condiciones más cercanas a las de operación de los cables para obtener resultados más apegados a la realidad. Además es recomendable profundizar en el estudio de las arborescencias para -- disminuir los riesgos o posibilidades de fallas en los cables.

No obstante lo anterior, la metodología de experimentación actual nos permite garantizar un alto grado de confiabilidad en la operación de los cables.

Debido a la alta especialización de los equipos de prueba requeridos, a su alto costo y al tiempo que se necesita emplear

para estas pruebas, sólo un fabricante de cables en México está en posibilidades de realizar estas pruebas sin recurrir al extranjero, lo que ha limitado la investigación en este campo . Sin embargo el futuro es alentador, ya que - la Comisión Federal de Electricidad con la creación del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México (LAPEM), podrá -- dar el impulso requerido para el futuro desarrollo de esta área.

8. BIBLIOGRAFIA

TITULOS

AUTORES

- STUDY OF AGEING AND BREAKDOWN PHENOMENA IN EXTRUDED INSULATION BY TESTS ON MODELS. Gherardi, Metra, Vecellio.* CIGRE 15-13.
- HIGH VOLTAGE CABLES WITH EXTRUDED INSULATION. STATISTICAL CONTROLS AND RELIABILITY EVALUATION. Metra, Occhini, Portinai * IEEE T74 315-8
- ELECTRIC CABLES C.C. Barnes - Pitman.
- UNDERGROUND SYSTEMS REFERENCE BOOK. Edison Electric Institute
- INSULATION TESTING BY D-C METHODS James G. Biddle Co.
- POWER CABLES C.C. Barnes, Chapman & Hall Ltd.
- POWER CABLES AND THEIR APPLICATION. Lothar Heinbold
- A STATISTICAL APPROACH TO THE DISCUSSION OF THE DIELECTRIC STRENGTH IN ELECTRICAL CABLES. E. Occhini * IEEE 71TP 157 PWR
- COMPARING XLP AND EPR FOR CABLE INSULATION. L.M. Sloman, Electrical Times Febrero 13, 1976
- TREEING IN SOLID EXTRUDED ELECTRICAL INSULATION. R.M. Eichorn, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. E1-12, No.1 P2-18 1977.
- THE SCIENCE OF ENGINEERING MATERIALS. C.O. Smith

• NORMAS OFICIALES MEXICANAS

CCONNIE	NOM - J	T I T U L O
10.1.10	59-1979	Cable de Cobre con Cableado Redondo Compacto para Usos Eléctricos.
10.1.13	62-1979	Cable de Aluminio con Cableado Redondo Compacto para Usos Eléctricos.
10.2.4	142 en revisión	Conductores con Aislamiento de Polietileno de Cadena Cruzada para Usos Eléctricos.
10.2.5	176-1971	Cable de Energía con Aislamiento Elastomérico a Base de Etileno Propileno.
10.2.6	292-1977	Cubierta Protectora para Cables a Base de Materiales Termoplásticos.
10.3.8	--	Cubiertas Protectoras a Base de Materiales Elastoméricos para Cables de Energía.
10.7.1	177-1980	Determinación de Espesores de Pantallas Semiconductoras, Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos.
10.7.2	178-1980	Determinación del Esfuerzo de Tensión a la Ruptura y Alargamiento de Pantallas Semiconductoras, Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos. Método de Prueba.
10.7.7	186-1981	Prueba de Envejecimiento Acelerado en Horno a Pantallas Semiconductoras, Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos.
10.7.12	190-1981	Resistencia al choque térmico de Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos. Método de Prueba

CCONNIE	NOM - J	T I T U L O
10.7.13	191-1980	Deformación por Calor de Pantallas Semi conductoras, Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos. Método de Prueba.
10.7.15	193-1980	Doblez en Frío en Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos. Método de Prueba.
10.7.16	194-1974	Prueba de Envejecimiento Acelerado en Aceite para Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos.
10.7.19	293-1977	Método de Prueba de Alta Tensión C.A. y C.D. para Conductores Eléctricos Aislados.
10.7.20	294-1982	Determinación de la Resistencia de Aislamiento de Conductores Eléctricos.
10.7.21	--	Prueba de Capacidad Inductiva Específica para Conductores Eléctricos Aislados
10.7.28	41-1983	Determinación de la Resistencia Eléctrica y Resistividad de Conductores Metálicos.
10.7.34	309-1977	Método de Prueba de Tensión de Impulso a la Ruptura en Conductores Eléctricos Aislados.
10.7.35	T39-1979	Método de Prueba de Extracción por Solventes para Materiales Vulcanizados de Base Etilénica.
13.1	271-1980	Técnicas de Prueba en Alta Tensión.
13.3	335-1978	Medición de Descargas Parciales
---	I-50	Designación de Cables y Alambres usados en Telefonía.

- PERFORMANCE OF ETHYLENE PROPYLENE RUBBER INSULATION IN MEDIUM AND HIGH VOLTAGE POWER CABLE. Morton Brown *
IEEE 82SM 375-4
- THE SURGE CHARACTERISTICS OF XLP INSULATION CONTAINING WATER TREES. Densley, Bulinski, Robert *
IEEE CH 1496-9/80
- ASTM - D - 150 A-C Loss Characteristics Dielectric Constant (Permittivity) of solid electrical insulating materials.
- AEIC CS6-82 Specifications for Ethylene Propylene Rubber Insulated Shielded Power Cables. Rated 5 through 69 kV.
- AEIC - CS5-81 Specifications for thermoplastic and Crosslinked Polyethylene Insulated Shielded Power Cables Rated 5 through 46 kV.
- ICEA S 68-516 ICEA/NEMA Standards Publication Ethylene-propylene-rubber-insulated. Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy
- ICEA S 19-81 ICEA/NEMA Standards Publication Rubber - insulated wire and cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy.
- HANDBOOK OF WIRING CABLING AND INTERCONNECTING FOR ELECTRONICS. Harper Charles McGraw Hill

* Artículos Técnicos publicados en conferencias internacionales:
 CIGRE: Conferencia Internacional sobre Grandes Redes Eléctricas.
 IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers.