

37
2ej-



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ASLAMIENOS ELECTRICOS
EXTERNOS**

T E S I S

**Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA ELECTRICA)**

p r e s e n t a n

**GUSTAVO CEREZO GARCIA
MIGUEL ANGEL HERRERA AMAYA**



**Asesor de Tesis:
Ing. ANIBAL GARZA MACIAS**

MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE 1992

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.

INDICE

I N D I C E

	TEMA	PAGINA
	INDICE DE FOTOGRAFIAS.....	1
	INDICE DE FIGURAS.....	3
1.	GENERALIDADES.....	5
2.	ANTECEDENTES.....	10
3.	INTRODUCCION A LOS AISLADORES.....	13
3.1.	FUNCIONES DE LOS AISLADORES.....	21
3.2.	EVOLUCION DEL AISLADOR.....	22
3.3.	OPERACION EN CONDICIONES ADVERSAS.....	30
3.4.	TIPOS DE AISLADORES MAS EMPLEADOS EN LAS LINEAS ELECTRICAS AEREAS.....	32
4.	MATERIALES EN LOS AISLADORES.....	39
4.1.	NATURALEZA DE LOS MATERIALES EN LOS AISLADORES.....	40
4.2.	AISLADORES CONVENCIONALES.....	42
4.2.1.	AISLADORES DE PORCELANA.....	44
4.2.2.	AISLADORES DE VIDRIO.....	50
4.3.	AISLADORES SINTETICOS.....	51
4.3.1.	POLIMEROS.....	52
4.3.2.	ELASTOMEROS.....	53
4.3.3.	POLITETRAFLUORURO DE ETILENO (PTFE).....	54
4.3.3.1.	PROPIEDADES ANTE EL MEDIO AMBIENTE.....	55
4.3.4.	ELASTOMEROS DE ETILENO-PROPILENODIENO (EPDM).....	55
4.3.5.	RESINAS EPOXICAS.....	56
4.3.6.	MATERIALES COMPUESTOS.....	57
4.3.6.1.	CONCRETOS POLIMERICOS.....	59
4.3.6.2.	FIBRAS DE VIDRIO ENLAZADA CON RESINAS (RBGF).....	59
4.3.6.3.	POLISYL.....	62
4.3.6.4.	CP-8.....	63
5.	ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE AISLADORES.....	66
5.1.	ELEMENTOS DE DISEÑO DE AISLADORES Y PARTES QUE LO INTEGRAN.....	67
5.1.1.	PARTES QUE INTEGRAN EL AISLADOR DE TIPO SUSPENSION PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION.....	69

TEMA	PAGINA
5.1.2. PARTES PRINCIPALES DE UN AISLADOR COMPUESTO DEL TIPO TRANSMISION.....	72
5.2. FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS AISLAMIENTOS SINTETICOS.....	76
5.2.1. FENOMENOS Y EFECTOS ASOCIADOS A LA OPERACION DE LOS AISLADORES.....	78
5.2.2. SOBREVOLTAJE TRANSITORIO.....	81
5.2.3. FORMACION DE BANDAS SECAS Y DESCARGAS SUPERFICIALES.....	82
5.2.4. HUMEDAD Y RADIACION SOLAR.....	85
5.2.5. DEGRADACION POR OXIDACION.....	88
5.2.6. DEGRADACION POR CONTAMINACION AMBIENTAL.....	89
5.2.7. EFECTO SINERGICO.....	91
5.2.8. RADIO INTERFERENCIA Y RUIDOS GENERADOS POR AISLADORES.....	91
5.2.9. VANDALISMO.....	94
6. PRUEBAS Y METODOS DE EVALUACION.....	95
6.1. TECNICAS DE EVALUACION DE MATERIALES Y AISLANTES SINTETICOS.....	97
6.1.1. AJUSTE POR CONDICIONES AMBIENTALES.....	98
6.1.2. TECNICAS DE EVALUACION EN EL LABORATORIO.....	103
6.1.2.1. PLANO INCLINADO.....	103
6.1.2.2. INTEMPERIMETRO.....	109
6.1.2.3. ARCO EN SECO.....	109
6.1.2.4. RUEDA DE TRACKING.....	110
6.1.2.5. EQUIPO EXPERIMENTAL PET-1.....	115
6.1.2.6. CAMARA DE NIEBLA O DE CONTAMINACION.....	117
6.1.2.7. PRUEBAS DE IMPULSO DE FRENTE ESCARPADO.....	121
6.1.2.8. PRUEBAS DE ARCO DE POTENCIA EN AISLADORES SINTETICOS.....	128
6.1.2.9. SISTEMA PARA PRUEBA DE LLUVIA ARTIFICIAL EN AISLADORES ELECTRICOS.....	132
6.1.2.10. EQUIPO EVALUADOR DE LA PRUEBA DE SINERGISMO EESA-1.....	140

TEMA	PAGINA
6.1.2.11. PRUEBAS TRADICIONALES.....	142
6.1.3. TECNICAS DE EVALUACION EN CAMPO.....	142
6.1.3.1. ESTACIONES PARA PRUEBAS NATURALES EN AISLADORES.....	144
6.1.3.1.1.DETERMINACION DEL GRADO DE CONTAMINACION EN AISLADORES.....	145
6.1.3.1.2.COMPORTAMIENTO ELECTRICO DE AISLADORES.....	146
6.1.3.1.3.MONITOREO DE PARAMETROS METEOROLOGICOS.....	147
7. VENTAJAS DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE UN LABORATORIO DE PRUEBAS.....	150
8. CONCLUSIONES.....	156
BIBLIOGRAFIA.....	160

INDICE DE FOTOGRAFIAS

INDICE DE FOTOGRAFIAS

	PAGINA
3.1. Aislador tipo columna de 34.5 KV.....	15
3.2. Aislador tipo soporte de 25 KV.....	15
3.3. Aislador tipo suspensión.....	17
3.4.A. Aislador alfiler de 15 KV.....	18
3.4.B. Aislador alfiler de 25 KV.....	18
3.5. Aislador de línea tipo "V".....	19
3.6. Aislador sintético de soporte.....	35
5.1. Aislador tipo alfiler de concreto polimérico.....	75
6.1.A. Equipo de prueba de plano inclinado.....	107
6.1.B. Instalación del espécimen a probar.....	107
6.1.C. Placas de material sintético después de realizada la prueba.....	108
6.2. Equipo de prueba rueda de tracking.....	114
6.3. PET-1.....	116
6.4. Aisladores bajo prueba al momento del rocío.....	117
6.5. Cámara de niebla o contaminación.....	120
6.6. Equipo de impulso de voltaje adaptable a la prueba de frente escarpado.....	126
6.7. Equipo de aspersion de la prueba de lluvia artificial.....	134
6.8. Armazón del EESA-1.....	140

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE FIGURAS

	PAGINA
3.1. Aislador tipo suspensión.....	17
3.2. Aislador tipo alfiler o pin forma y tipo de herraje.....	19
3.3. Aislador de línea indicando la sección de polímero que utiliza.....	20
3.4. Aisladores basados en los utilizados en telégrafos (siglo XIX).....	24
3.5. Evolución de los aisladores.....	28
3.6. Aislador de fuerza seccional.....	28
3.7. Aisladores que muestran diferentes técnicas de acoplamientos entre los herrajes y el elemento aislante del tipo alfiler.....	29
3.8. Distintos tipos de aisladores alfiler.....	33
4.1. Carbón y sílice como bloques de construcción para el equilibrio entre las moléculas.....	43
4.2. Porcelana dieléctrica. Representación diagramática.....	45
4.3. Ciclo de horneado de los aisladores de porcelana.....	47
4.4. Preparación de la mezcla de arcilla y el proceso de fabricación del aislador cerámico.....	49
4.5. Fórmula del elastómero politetrafluoruro de etileno (PTFE).....	58
4.6. Fórmula del elastómero del etileno- propileno-dieno (EPDM).....	58
4.7. Elementos que componen los centros fibrosos del tipo RBGF.....	61
4.8. Transición entre la parte de metal y el centro fibroso, "s" es el borde o chaqueta de metal.....	64

	PAGINA
5.1. Aislador para líneas de distribución.....	70
5.2. Aislador compuesto.....	73
5.3. Aislador tipo soporte de concreto polimérico.....	75
5.4. Esquema general de condiciones a la que se expone un aislador en una zona industrial.....	77
5.5. Longitud de onda asociada a la energía de activación de los polímeros.....	79
5.6. Elementos que intervienen en la formación de bandas secas en los aisladores.....	83
5.7. Oxidación de un polímero en función de la radiación ultravioleta y la energía calorífica.....	90
5.8. Agentes que actúan sinérgicamente en la degradación de los aisladores sintéticos.....	92
6.1. Gráfica para encontrar la humedad absoluta del aire....	101
6.2. Gráfica para encontrar el valor de Kh.....	101
6.3. Diagrama eléctrico y montaje de muestras para el equipo de plano inclinado.....	106
6.4. Diagrama eléctrico de la prueba de arco en seco.....	111
6.5. Diagrama eléctrico de la rueda de tracking.....	113
6.6. Diagrama equivalente de un generador de impulso simple.....	123
6.7.A. Gráfica representativa de la reducción del tiempo de frente de onda.....	124
6.7.B. Gráfica representativa del aumento de la amplitud de la onda.....	124
6.8. Modificación de un generador convencional para generar impulsos de frente escarpado.....	127
6.9. Diagrama unifilar de la prueba de arco de potencia....	131
6.10. Diagrama de secuencias de la prueba de arco de potencia.....	131
6.11. Diagrama eléctrico para prueba de tensión aplicada....	133

	PAGINA
6.12. Diagrama del sistema hidráulico típico para prueba de lluvia artificial.....	135
6.13. Circuito de medición de corriente de fuga.....	147
6.14. Esquema general de conexiones de alimentación y tierra.....	149

CAPITULO I

GENERALIDADES

GENERALIDADES

El estudio de los aislamientos como parte importante de los sistemas eléctricos, permite su apropiada utilización en el diseño de equipos y en redes eléctricas.

La experiencia obtenida, así como la investigación en el uso de aislamientos, ha permitido identificar los factores que afectan su funcionamiento cuando son sometidos a los esfuerzos de campos eléctricos y efectos contaminantes. A lo largo de este siglo que se han utilizado los aisladores para la transmisión de la energía eléctrica, se ha avanzado en el diseño y materiales gracias a las experiencias obtenidas. En muchos países, incluido México, se sigue ampliando la investigación y experimentación con el objeto de mejorar la tecnología de aislamientos, debido entre otros factores a los grandes sistemas de transmisión de energía y a los altos voltajes que se manejan.

En México se cuenta con el área de aislamientos externos del Instituto de Investigaciones Eléctricas (I.I.E.), la cual en estudios de contaminación se encuentra en la frontera de éste campo. Un apoyo fundamental para dicha área es el laboratorio de alta tensión, donde además de las labores de evaluación normalizada de muestras, se realizan pruebas experimentales, así como diseños de equipos de prueba. Todo ésto para obtener los mejores resultados apegados a las normas internacionales y constituir un confiable apoyo al sector eléctrico.

El conocimiento que se adquiera sobre las características fundamentales de los materiales y diseños de aisladores, así como las pruebas a las que se someten, permitirán mejorar los sistemas actuales de aislamiento. Las fallas se reducirán, ya que los

nuevos materiales quedan experimentalmente sujetos a grandes esfuerzos de tipo mecánico y, obviamente, los eléctricos. Estas características han sido consideradas con el objeto de sustituir a los materiales tradicionales como son el vidrio y la porcelana, por materiales sintéticos.

CAPITULO II

ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

En los sistemas eléctricos, tradicionalmente se han utilizado materiales de vidrio y porcelana para los aisladores de líneas de transmisión, los cuales en ciertas aplicaciones han reportado diversos problemas durante su operación; es por ello que desde hace varios años, muchos materiales sintéticos se han integrado a los sistemas de potencia como aislamiento eléctrico, gracias a que sus características eléctricas y mecánicas han podido sustituir y, sobre todo, superar a los aislamientos tradicionales.

La experiencia obtenida en muchos países, se ha encaminado al desarrollo de nuevos materiales y diseño de aisladores sintéticos y, desde luego, en la elaboración de métodos o técnicas de prueba eficientes para poder evaluar su comportamiento, ya que en muchos casos éste es diferente a los aislamientos de porcelana y vidrio. Estas técnicas de prueba están orientadas a determinar las condiciones bajo las cuales se presenta un mecanismo de falla y la forma de reproducirlas en el laboratorio en forma acelerada mediante la combinación de diferentes variables que se encuentran en el campo.

En el I.I.E. y en otros centros de investigación del país, se está trabajando en el desarrollo de diferentes materiales sintéticos como aislamiento eléctrico para las líneas de distribución, contando con equipos de prueba de laboratorio, instalaciones experimentales y en el campo, todo esto para tener un buen diseño de los aisladores.

En el presente trabajo se tiene como objetivo realizar una búsqueda y recopilación de los nuevos materiales y formas de aisladores que se utilizan en los sistemas de distribución, así como las pruebas a las que deben ser expuestos los mismos.

Sabemos que las características del comportamiento de los aislamientos están íntimamente relacionados con los esfuerzos derivados del campo eléctrico y éste, a su vez, del potencial eléctrico. También es de gran importancia conocer cómo se comportan los aisladores cuando están bajo diferentes tipos de sobrepotenciales transitorios, conocidos en la práctica como impulsos por maniobras y por rayo.

Otra de nuestras metas es la de lograr que este trabajo sirva como una información sobre el estado actual del desarrollo en el campo de los aislamientos sintéticos en nuestro país, para que las nuevas generaciones de Ingenieros Eléctricos de nuestra Universidad conozcan éste campo tan importante en nuestros días, ya que, cada vez se necesita transmitir energía eléctrica a mayores voltajes y distancias, dentro de confiables índices de seguridad.

CAPITULO III

INTRODUCCION A LOS AISLADORES

INTRODUCCION A LOS AISLADORES

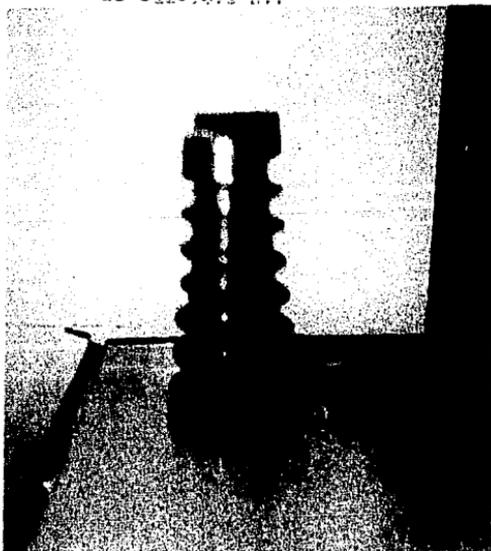
El aislador es un dispositivo que da un soporte rígido ó flexible a conductores eléctricos y accesorios, aislándolos además de partes físicas que estén a un potencial diferente al nivel de los conductores. El aislador sintético es generalmente integral, mientras que, los aislamientos de vidrio y porcelana se constituyen de uno o más elementos. En los aisladores sintéticos la unión se lleva a cabo mediante resinas o cementos.

Los aisladores se constituyen (dependiendo del tipo) en diferentes componentes; como en el presente trabajo se utilizarán términos especializados, se mencionan a continuación algunos de ellos para una mejor comprensión.

- a) CAMPANA O FALDON. Es la mínima parte a la que se puede dividir el aislador, es decir, éste es un elemento del aislamiento que tiene una forma de platillo, con la cualidad de poderse anexas más faldones a través de acoplamientos, cementados o en moldeo integral.
- b) AISLADOR TIPO SOPORTE. Aislador que sujeta rigidamente mediante tornillos a equipo eléctrico; puede ser tipo pedestal o tipo columna. (Fotografías 3.1 y 3.2).



FOTOGRAFIA 3.1. Aislador tipo columna.
de 34,5 KV,



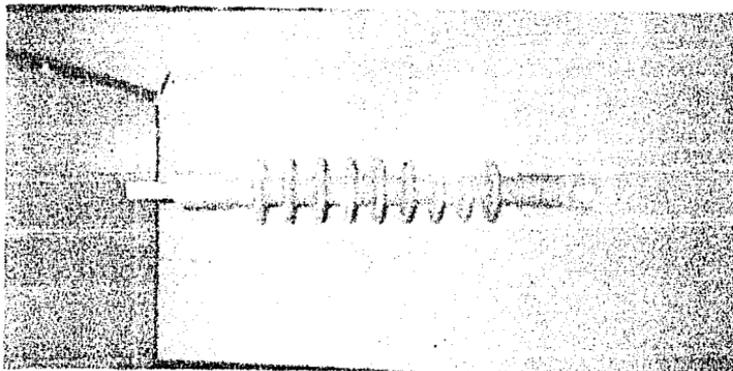
FOTOGRAFIA 3.2 Aislador tipo soporte
de 25 KV.

c) AISLADORES TIPO SUSPENSION. Antes de desarrollarse los materiales sintéticos, éste tipo de aisladores se componían por un conjunto de faldones y eran unidos por partes metálicas. Para los aisladores sintéticos éste tipo de unión se eliminó; actualmente se encuentran en una sola pieza, ya que éstos presentan la ventaja de no necesitar herrajes de sujeción entre ellos, sino que llevan un alma de fibra de vidrio reforzada y en la superficie se recubre con el material polimérico en forma de varios faldones. En los extremos tenemos los elementos de sujeción de aluminio, al cuál se encuentra aislado del centro de fibra de vidrio, para evitar una posible penetración de humedad que pueda dañarlo. Otra característica favorable es que puede soportar grandes esfuerzos en cantiliver. (Fotografía 3.3 y Figura 3.1).

d) AISLADOR TIPO ALFILER O PIN. Es una unidad aisladora en forma de hongo, la cuál tiene la característica de no poderse adaptar a otro elemento aislante, es decir, no tiene los acoplamientos necesarios para poderse extender. En la mayoría de los casos estos aisladores se les utiliza en sistemas de distribución de medianos a bajos voltajes (Figura 3.2., Fotografías 3.4.A. y 3.4.B.).

e) AISLADOR DE LINEA. Actualmente se utilizan los materiales sintéticos en las líneas de transmisión, los cuales cuentan con dos elementos aislantes, unidos en un punto por medio de herrajes para la sujeción del conductor (en forma de "V"), o bién, de una sola pieza aislante, como un aislador tipo suspensión (Fotografía 3.5. y Figura 3.3.).

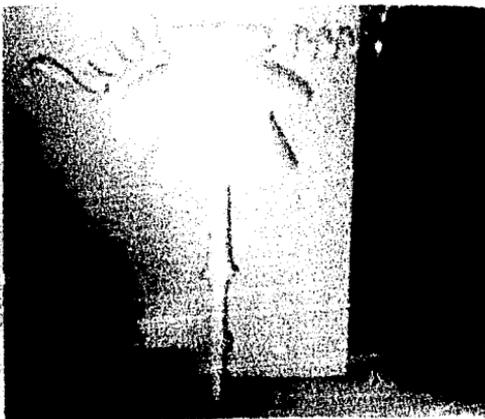
f) SEÑAL DE BAJA FRECUENCIA. Se le llama así a cualquier señal de tensión cuya frecuencia se encuentra entre 15 y 100 Hz.



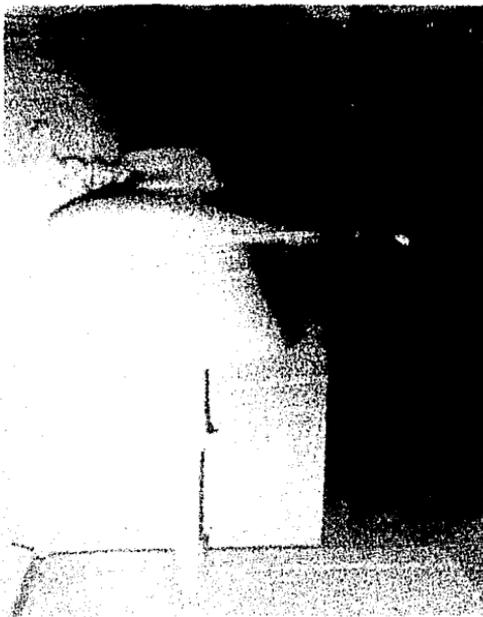
FOTOGRAFIA 3.3. Aislador tipo suspensión.



FIGURA 3.1. Aislador tipo suspensión.



FOTOGRAFIA 3.4.A. Aislador alfiler de 15 KV



FOTOGRAFIA 3.4.B. Aislador alfiler de 25 KV.

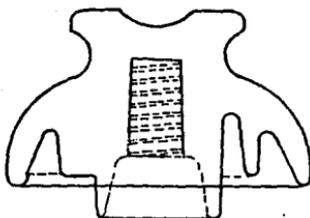
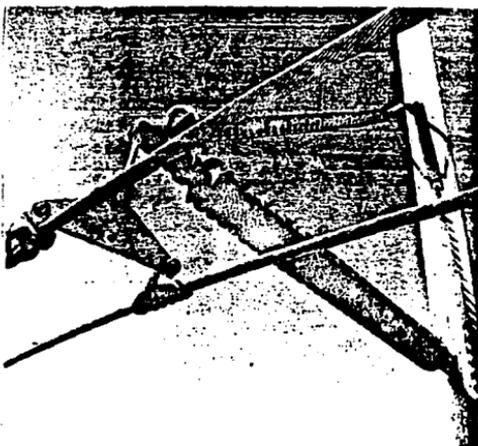


FIGURA 3.2. Aislador tipo alfiler o pin.
forma y tipo de herraje.



FOTOGRAFIA 3.5. Aislador de línea tipo "V".

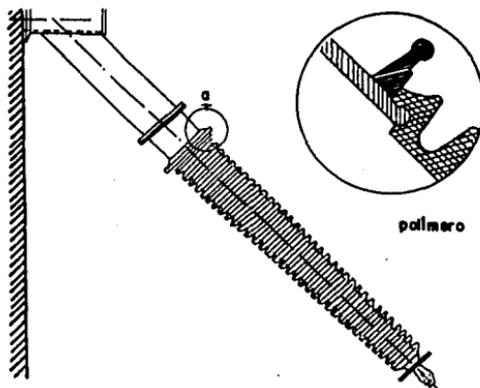


FIGURA 3.3. Aislador de línea indicando la sección de polímero que utiliza.

g) TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA. Es el valor eficaz (rms) de la tensión de baja frecuencia que causa un flameo sostenido (descarga disruptiva) através del medio circundante.

h) TENSION SOSTENIDA A BAJA FRECUENCIA DE UN AISLADOR. Es el valor eficaz (rms) que se puede aplicar a un aislador sin causar flameo o perforación del elemento de prueba.

i) TENSION DE PERFORACION A BAJA FRECUENCIA. Es el valor eficaz (rms) de la tensión de baja frecuencia que es aplicada al aislador bajo condiciones normales y causa una descarga disruptiva a través de cualquier parte del aislador.

j) ONDA DE IMPULSO. es aquella onda unidireccional generada por la disipación de energía eléctrica de un circuito; ésta onda de impulso alcanza valores extremos de tensión en un corto tiempo.

k) TENSION DE FLAMEO AL IMPULSO. Es el valor de cresta de la onda impulso, que debe resistir un aislador sin que exista perforación.

l) RESISTENCIA MECANICA. Es la carga a la cual cualquier parte del aislador falle en su función mecánica, independientemente de una falla eléctrica.

m) TRACKING. Es un camino conductor carbonizado, que se forma cuando se aplica suficiente tensión eléctrica a un aislador en un medio húmedo.

n) EFECTO SINERGICO. Disminución de las propiedades físicas del aislador al actuar simultáneamente algunos agentes del medio (radiación ultravioleta, infrarroja y contaminación) acarreado con esto un riesgo de falla.

3.1. FUNCIONES DE LOS AISLADORES.

Todos los aisladores tienen una doble función como ya se explicó anteriormente (la eléctrica y mecánica), que comúnmente presentan dificultades en las demandas del diseño. Uno de los más complicados factores de diseño en la práctica, es el aislamiento en líneas vivas.

Todos los aisladores tienen superficies externas, las cuales se contaminan cuando son expuestos a un servicio prolongado. La contaminación podría traer una descarga o ruptura de corriente. La superficie de un aislador contaminado, contendrá materia mineral inerte, polvos conductores como el carbón y óxidos metálicos, sales solubles y agua. Esta capa podría comportarse como una resistencia no lineal y altamente variable, en la mayoría de los casos inestable en presencia de los campos eléctricos. La corriente de descarga incrementaría la descarga, y produciría productos electroquímicos por la electrólisis y descargas eléctricas. Las consecuencias secundarias que seguirían son:

erosión electroquímica através de descargas de ablandamiento, completada con el paso de corriente por la ruptura.

Las corrientes de descarga superficial y las consecuencias que trae, se consideran un parámetro de diseño del aislador, especialmente aquellos que serán usados al aire libre en una atmósfera húmeda y contaminada.

Otros resultados de la acción entre variables eléctricas, mecánicas y ambientales, han reflejado ser importantes en el deterioro de los aislamientos, por lo cual las pruebas que se realizan a los aislamientos resultan ser fundamentales.

3.2 EVOLUCION DEL AISLADOR.

A fines del siglo XIX, cuando nació la industria eléctrica, los materiales de porcelana y vidrio fueron empleados para aislar las líneas de energía de las torres o postes que las transportaban. Estos primeros aisladores eran utilizados comúnmente en las líneas de los telégrafos.

Los esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que estaban sometidos dichos aisladores, eran insignificantes si los comparamos con los que se tienen en las líneas de potencia.

Las nuevas demandas en transmisión de energía reflejaron las deficiencias en los materiales y diseños con los que se contaba en aquellos años. En particular la perforación debido al esfuerzo eléctrico de los aisladores ceramicos que contenian poros o grietas; las rupturas causadas por una expansión térmica diferencial ó, efectos corrosivos en el metal y en los pegamentos, así como el surgimiento del arqueado debido a la combinación del

polvo con la humedad. Todo esto mostraba la necesidad de una evolución en el diseño y métodos de fabricación. Se estuvo experimentado durante decenas de años en laboratorios y en redes experimentales en campo, hasta que a partir de los años cincuenta, se comenzaron a obtener logros importantes en la geometría y los materiales, presentándose los resultados prácticos a partir de los años sesenta.

Algunos de los aisladores rediseñados de finales del siglo XIX son conocidos como descendientes de los usados en telégrafos (Figura 3.4), teniendo como características tamaño y peso elevados, creando con ello grandes dificultades en su manufactura, manejo y montaje.

Estos primeros aisladores del tipo denominado alfiler, estaban fabricados por los materiales tradicionales (porcelana, vidrio y mezcla de ellos), unidos con un pegamento. Estos tenían una vida útil corta debido a defectos en la fabricación.

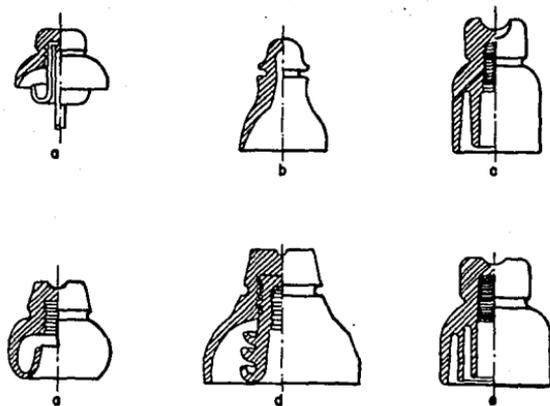


FIGURA 3.4. Aisladores basados en los utilizados en telégrafos (siglo XIX).

- a) JOHNSON AND PHILLIPS, 1876.
- b) SIEMENS, 1850.
- c) DOUBLE-BELL, 1858 (DOBLE CAMPANA).
- d) MULTIPLE RECAMARA BAÑADA EN ACEITE, 1891.
- e) ALFILER-TRES FALDONES, 10 KV, 1895.

Para los aisladores que soportaban cargas en tensión, su diseño fué del tipo alfiler (del telégrafo). Estos eran montados por medio de herrajes.

El aislador básico en forma de huevo (Figura 3.5), actualmente prevalece como el mejor aislador resistente de retenida; y fué descubierto en 1860. Este aislador dió pie al descubrimiento del Hewlett, el cual tenía la característica de ser como un disco que también fijaba conexiones entrelazadas y soportaba cargas de compresión (Figura 3.5), por contar con movimiento. El defecto era que no brindaba seguridad ante impactos al estar en servicio (vandalismo, sobrevoltajes, etc.). A diferencia de los demás, no requiere pegamento para unir sus elementos, por lo cual era de difícil fabricación. Este aislador se ha distinguido por seguir en servicio en algunas redes debido a su resistencia a la corrosión.

En 1903 se introdujeron en los E.U.A. los aisladores "cubiertos" (éste nombre se debe a que la parte de sujeción es de metal y cubierta por un material aislante), que eran básicamente los tipo alfiler; los cuales resistían esfuerzos de cantiliver (Figura 3.5). Este fué llamado Locke, considerado como precursor de los aisladores del tipo suspensión y campana-alfiler, que actualmente se utilizan para soportar líneas de transmisión.

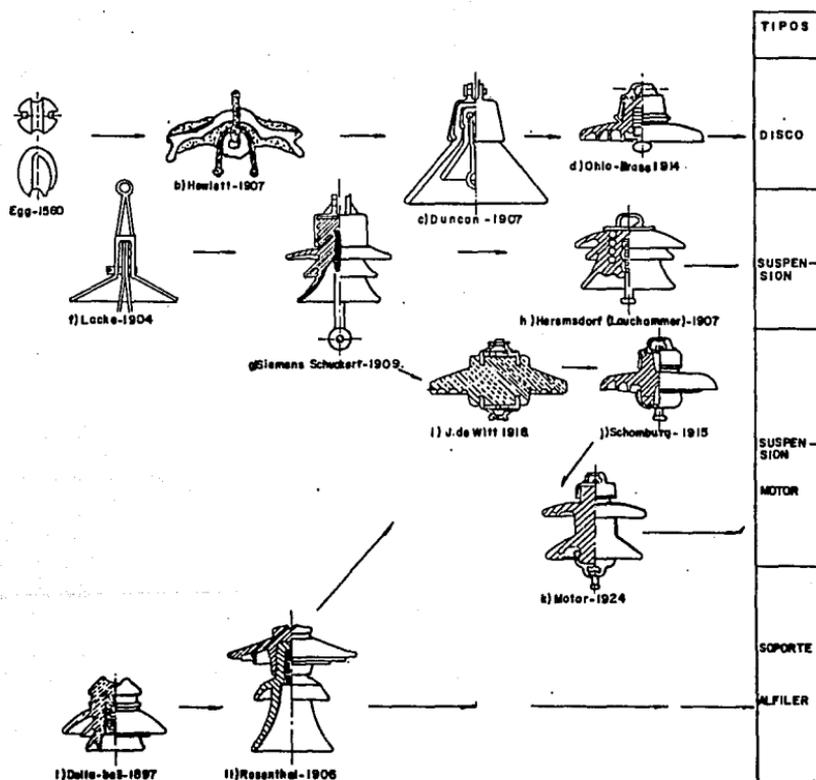


FIGURA 3.5. Evolución de los aisladores.

El aislador de esfuerzo seccional Brent. Mills de 1904 (Figura 3.6), es un diseño del tipo campana-alfiler sin tener el sistema de compresión. La compañía Ohio Brass de los E.U.A., lo empleó como base para su aislador denominado Duncan (1907). El uso de superficies opuestas cónicas fué el diseño e innovación más importante, para convertir la tensión en una compresión radial, por la acción de unión de sus partes, aumentando el aislamiento. En la unión de terminales o herrajes metálicos y el dieléctrico cerámico, éstos causaron problemas en su proceso de fabricación debido a que el proceso de cementado entre los dos materiales era difícil; ésto se podía apreciar una vez energizados, ya que se calentaban excesivamente.

El cementado fué visto como el mal que lo afectaba -es justo decir que esas sospechas aún están presentes en cierto tipo de aisladores- y las alternativas de su uso fueron exploradas (Figura 3.7). Varios de éstos diseños, desde 1910 a 1935, fueron producidos en cantidades comerciales, lamentablemente ninguno tenía las características requeridas; es decir, ninguno fué exitoso.

En 1918 la Compañía Jeffrey Dewitt tuvo éxito al combinar elementos de metal y cerámica de carga maleable (Figura 3.5), eliminando a la larga las fallas debidas a la corrosión. Desafortunadamente, se sacrificó lo más importante del aislador campana-alfiler, la habilidad de mantener su integridad aún al ser golpeado.

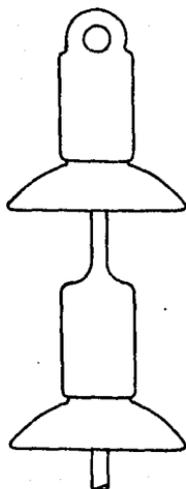


FIGURA 3.6. Aislador de fuerza seccional.

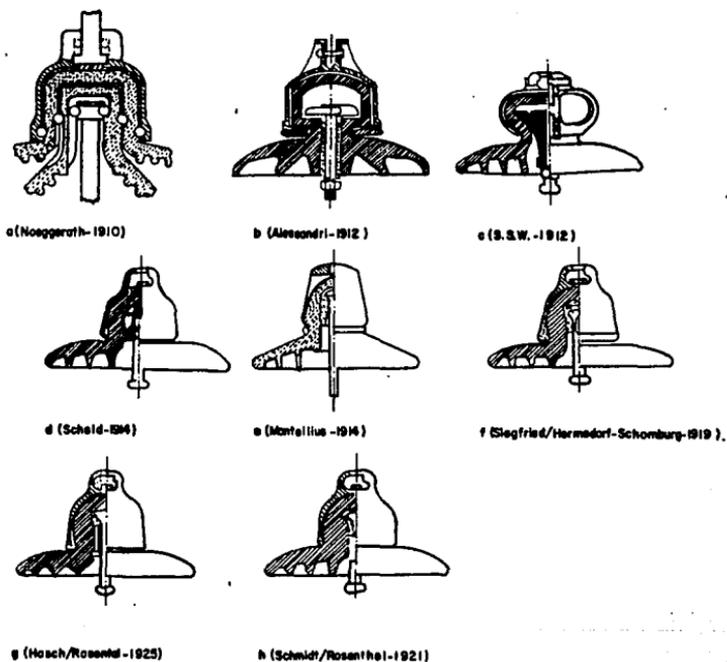


FIGURA 3.7. Aisladores que muestran diferentes técnicas de acoplamiento entre los herrajes y el elemento aislante del tipo alfiler.

- a) ACOPLAMIENTO BLANDO-ESFERA.
- b) LIMITADOR DE CARGA (ITALIA).
- c) LIMITADOR DE CARGA (ALEMANIA).
- d) CABEZA-ESFERA.
- e) GORRA O CAPUCHON SOBRE PLANCHADO.
- f) ANILLO-TENSION DE RESORTE.
- g) ANILLO-ESFERA.
- h) CABEZA-CONO.

No existieron muchos adelantos antes de 1962, siguiendo con la tendencia de que el comportamiento del aislador podría ser predecido a través de pruebas de laboratorio. Los aisladores que se probaron fueron examinados científicamente y comparados en orden de repetitividad de méritos.

Con el incremento de los voltajes y del número de conductores por fases, las cargas mecánicas que soportaban las líneas aéreas, estaban arriba de lo especificado, lo cual no se encontraba en los parámetros de diseño de los aisladores que se tenían convenientemente.

Todo esto hizo lógico la entrada de los materiales poliméricos, usando compuestos de materiales fibrosos para proveer al aislador de una fuerza de tensión así como de su peso y tamaño.

3.3 OPERACION EN CONDICIONES ADVERSAS.

La capacidad de un aislador para -por ejemplo- resistir a la ruptura en condiciones adversas, es determinado por el elemento dieléctrico, pero también por la posición del aislador (vertical, inclinado, horizontal) y por las propiedades de su superficie.

Un problema que ha prevaecido en el diseño de los aisladores en los últimos años es debido a los efectos de humedad en la superficie de éstos, por ello las pruebas de humedad y lluvia artificial fueron introducidas para los nuevos aisladores.

Los principios que se siguen en el diseño de los aisladores son: optimar la fuerza de sujeción sin dañar la superficie aerodinámica; considerar la depositación del flujo de aire que

lleva consigo gotas de agua y/o contaminantes, promoviendo el daño por tracking en las superficies; evitar las áreas horizontales, las cuales, bajan la resistencia de la superficie al reducir las fuerzas de adhesión y determinar la geometría y tipo de material para una óptima operación dieléctrica.

3.4. TIPOS DE AISLADORES MAS EMPLEADOS EN LAS LINEAS ELECTRICAS AEREAS.

Anteriormente se expuso la nomenclatura de los tipos de aisladores que se utilizan en las líneas eléctricas. Entre estos, los más empleados son los siguientes:

- a) Aisladores de alfiler.
- b) Aisladores de soporte.
- c) Aisladores de suspensión.

a) AISLADORES DE ALFILER.

Estos aisladores se aplican en las líneas eléctricas aéreas en una gama de tensiones comprendida entre las bajas tensiones (125V, 220V, 440V, etc.) hasta altas tensiones del orden de 69KV; por encima de éste límite, se prefieren los aisladores de suspensión.

En la figura 3.8. se han representado varios tipos de aisladores alfiler; como puede apreciarse, están formados por un elemento o pieza (de material sintético, de porcelana o de vidrio) de forma apropiada para soportar el conductor y para fijarlo a la palomilla, cruceta o apoyo a través del herraje correspondiente. El conductor puede fijarse en la ranura situada en la cabeza del aislador o en el cuello de éste, atándolo convenientemente por medio de ligaduras o hilos de retención.

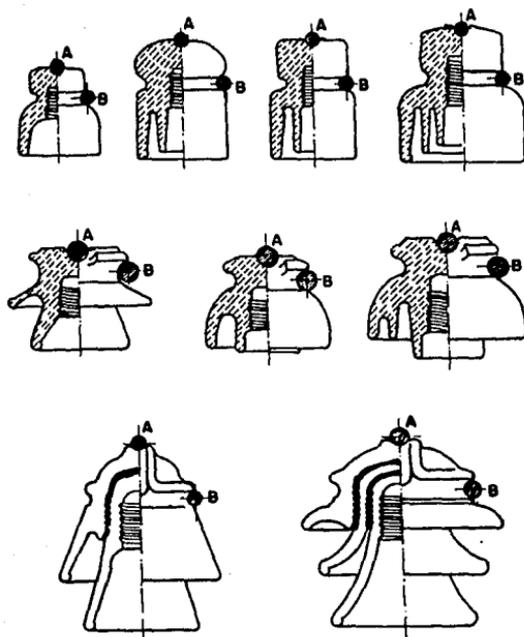


FIGURA 3.8. Distintos tipos de aisladores alfiler

Los aisladores tienen, por lo general, forma de campana. El objetivo perseguido al adoptar ésta forma, es el conseguir un perfil que alargue las líneas de fuga superficial entre el conductor situado en la parte superior y el soporte metálico del aislador; naturalmente, cuando más alta es la tensión de servicio, es necesaria mayor longitud para las líneas de fuga, es decir, que el aislador habrá de ser de mayor longitud superficial.

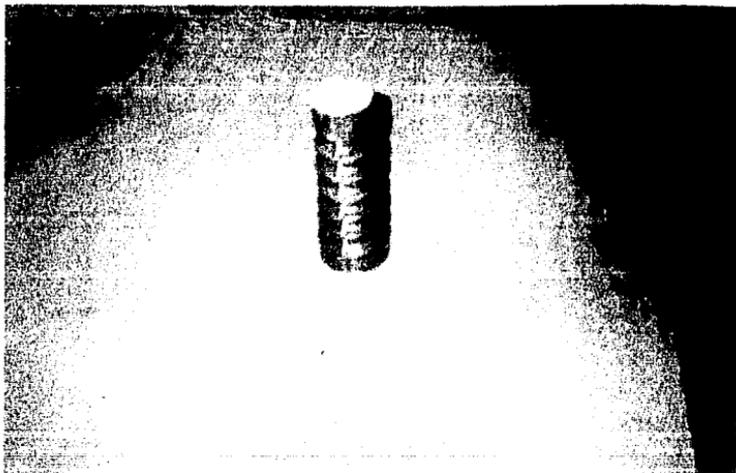
Los aisladores para bajas tensiones de servicio y los de alta tensión destinados a instalaciones interiores son lisos, a lo más provistos de ondulaciones, ya que en estos casos las condiciones de funcionamiento son más favorables.

Actualmente está en estudio una normalización de los aisladores tipo alfiler, donde los materiales sintéticos están cada día teniendo un papel muy importante en la fabricación y diseño de los mismos, debido a sus ventajas inherentes.

No es posible establecer una regla fija que permita asegurar que un determinado tamaño de aislador corresponde a una tensión de servicio dada, ya que las condiciones de trabajo pueden ser diferentes, y dependen de factores tales como el peligro de depósitos salinos en la superficie del aislador, condiciones climatológicas locales, altura de la línea sobre el nivel del mar, etc..

b) AISLADORES DE SOPORTE.

Estos se caracterizan por ser elementos constituidos en una sola pieza y debido a que el conductor se fija apoyándolo sobre el aislador, toma su nombre; es utilizado en equipos como interruptores y cuchillas de subestaciones. (Fotografía 3.6).



FOTOGRAFIA 3.6. Aislador sintético de soporte.

c) AISLADORES DE SUSPENSION.

En los aisladores de suspensión la fijación del conductor se realiza por suspensión de éste mediante herrajes adecuados; a su vez, el propio aislador está fijado también por suspensión al apoyo correspondiente.

Estos aisladores son más caros que los aisladores de apoyo y son competitivos con ellos a partir de tensiones de servicio de 69 KV. Sin embargo, a causa de sus numerosas ventajas muchos países los han adoptado incluso para tensiones de servicio de 10 KV.

Entre sus ventajas tenemos la seguridad que presentan contra la perforación, la cuál es muy superior en estos aisladores; debido al número de faldones que posee y a la alta tensión de descarga de cada uno de ellos.

La gran distancia existente entre los aisladores de suspensión y el punto de fijación, hace que resulte poco probable los cortocircuitos provocados por objetos ajenos (ramas, aves u otras causas).

Desde el punto de vista mecánico, los aisladores de suspensión permiten conseguir la igualdad de tensión mecánica en todos los puntos de apoyo de anclaje; por inclinación, si es necesario, del conjunto respecto a su posición vertical, sin desplazamiento de conductor sobre la cabeza del aislador, como sucede en los aisladores de soporte, que están fijos rigidamente a los apoyos.

Cabe mencionar que los materiales sintéticos han tenido en éste campo una gran importancia, gracias a ellos se ha podido aumentar el nivel de aislamiento sin incrementar su peso (ventaja que no se podía tener en los aisladores tradicionales de vidrio y porcelana), teniendo como resultado una disminución del peso en todo el conjunto del sistema de transmisión.

Aunque se han estudiado bastantes tipos de aisladores de suspensión, solamente algunos de estos tipos han tenido aplicación práctica.

Los aisladores de suspensión pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Aisladores de núcleo hueco.
- Aisladores de núcleo macizo.

Los aisladores de suspensión de núcleo hueco más utilizados en la actualidad, y de materiales de porcelana y vidrio son los siguientes:

- Aislador Hewlett
- Aislador de caperuza y vástago
- Aislador Jeffrey-Dewitt.

Los aisladores de suspensión de núcleo macizo más empleados actualmente, son los indicados a continuación:

- Aislador motor.
- Aislador de barra.

Estos aisladores están fabricados con materiales llamados tradicionales. Sin embargo, estudios realizados a nuevos materiales sintéticos están creando un nuevo grupo de aisladores de núcleo macizo con características superiores a los antes mencionados, se les da el nombre genérico de aislador de barra. Estos aisladores no contienen ninguna parte metálica entre el conductor y el potencial de tierra por lo que resulta prácticamente imposible la formación de arcos eléctricos en cascada. Para igual longitud del conjunto, el aislador sintético admite doble número de faldones, aunque de menor diámetro.

CAPITULO IV

MATERIALES EN LOS AISLADORES

MATERIALES EN LOS AISLADORES

Desde hace algunos años, los materiales sintéticos se han integrado a los sistemas de transmisión como aislamiento eléctrico. Las características dieléctricas de éstos materiales han sido consideradas con el único fin de sustituir a los materiales más empleados en la actualidad: la porcelana y el vidrio, los cuales en algunas aplicaciones han reportado diversos problemas durante su operación.

El nombre de materiales sintéticos se ha generado en países europeos y en los Estados Unidos de Norteamérica, convirtiéndose en un nuevo grupo de materiales.

4.1. NATURALEZA DE LOS MATERIALES EN LOS AISLADORES.

Para la fabricación de aisladores eléctricos se han utilizado diferentes materiales que poseen características eléctricas y mecánicas adecuadas para tal aplicación. Dentro de éstos, tenemos a los tradicionales (porcelana y vidrio) y a polímeros orgánicos de reciente desarrollo.

Los materiales sintéticos ofrecen muchas ventajas para la fabricación de aisladores. El uso adecuado depende de la selección del material apropiado y de un diseño compatible. Esta labor requiere que se utilicen al máximo las ventajas de los materiales.

La porcelana está constituida por medio de varias formas de cristales y algunos granos de componentes minerales, unos de los cuales están parcialmente disueltos. Estos se encuentran formados por átomos de valencia cuatro con la cualidad de formar estructuras más grandes.

El vidrio eléctrico ideal es una mezcla de silicatos en forma vítrea sin inclusiones. En la práctica casi siempre contienen burbujas gaseosas y fragmentos de material refractario como imperfecciones.

Se puede decir que los materiales sintéticos son sustancias macromoleculares, originadas a su vez por una multitud de pequeñas partículas o unidades. Los polímeros se forman haciendo reaccionar muchas moléculas pequeñas (monómeros). En algunos casos, las moléculas pueden reaccionar consigo mismas para formar homopolímeros. En ocasiones se requiere de dos monómeros diferentes para que reaccionen el uno con el otro y, en éstos casos, los monómeros reaccionan en cadena para formar una macromolécula.

nA----->AAAAAAAAA.....

A = Monómeros.

n = Número de Átomos.

Las capas eléctricas de cada átomo determinan su valencia o capacidad de enlace. La capa externa de electrones tiende a completarse (a ocho), con la excepción del hidrógeno que solamente se completa con dos. A éstas condiciones se les conoce como el conteo balanceado de electrones. Otra característica importante es que los átomos comparten electrones para lograr el balance de ocho o dos, tal como se observa en la figura 4.1.

4.2. AISLADORES CONVENCIONALES.

Se les dió éste nombre por ser materiales aislantes utilizados durante muchos años, y porque han demostrado poseer las propiedades adecuadas para ésta aplicación. Estos materiales inorgánicos mencionados anteriormente (vidrio y porcelana) son los más utilizados desde que el hombre necesitó de aislamientos seguros para la transmisión de la energía eléctrica. Desafortunadamente, éstos adquirieron un valor económico elevado, debido a su proceso de fabricación; por otro lado, sus fallas al exponerse a zonas con alta contaminación y su aumento de peso y tamaño al utilizarse en tensiones de transmisión muy elevadas ha propiciado que se reconsidere su utilización. Por todo esto, se ha tenido la necesidad de incrementar el nivel de aislamiento sin incrementar peso, volumen y costos.

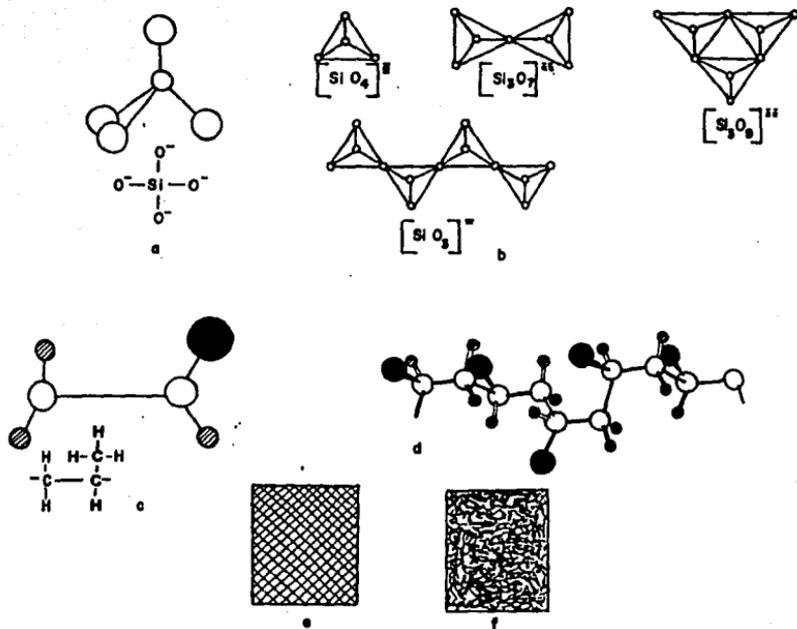


FIGURA 4.1. Carbón y silice como bloques de Construcción para el equilibrio entre las moléculas.

- a) VISTA EN EXPLOSION DEL TETRAEDRO SiO_4 .
- b) ALGUNOS MODOS DE VARILLAJE EN SILICON Y SILICATOS.
- c) ELEMENTOS DE UNA MOLECULA DE POLIPROPILENO.
- d) FORMA ESPIRAL DE LA MOLECULA DE POLIPROPILENO (EN SECCION TRIANGULAR).
- e) SUPERFICIE VIDRIOSAS O CRISTALINA RICA EN UNIONES Y ALTAMENTE ADHESIVA.
- f) SUPERFICIE DE POLIOLEFINA, SATURADA Y CON POCOS LAZOS SIMILAR A UNA "PELOTA DE LANA".

4.2.1. AISLADORES DE PORCELANA.

Para la fabricación de porcelana eléctrica son empleados principalmente los siguientes componentes: cuarzo (pedernal), óxido de aluminio (alúmina), caolín (arcilla china), arcilla bola y feldespato. Para obtener diferentes tipos de porcelana, se varían los porcentajes de los materiales anteriormente descritos. Los tipos de porcelana más utilizadas son las denominadas porcelanas feldespáticas y la porcelana alúmina.

La porcelana feldespática está compuesta principalmente por los siguientes materiales: del 15 al 30 % de cuarzo, de 20 a 40% de feldespato y de 40 a 60 % de caolín. La resistencia mecánica es baja debido a el cuarzo; éste tipo de porcelana es utilizada en boquillas y otros elementos, por lo antes mencionado. En el proceso de elaboración de este tipo de porcelana requiere de temperaturas del orden de 1200° C.

El segundo tipo de porcelana contiene un alto porcentaje de aluminio en lugar del cuarzo. Las características de éste tipo de porcelana son: una gran dureza, muy buena resistencia eléctrica y mecánica. Las temperaturas necesarias para su proceso son más elevadas que en la porcelana tradicional. La porcelana alúmina se utiliza en aisladores que soporten grandes esfuerzos eléctricos y mecánicos, así como de fuertes ambientes contaminados (figura 4.2.).

Para la fabricación de un aislador de porcelana se tienen dos etapas: la producción de la arcilla y la obtención del aislador como producto final.

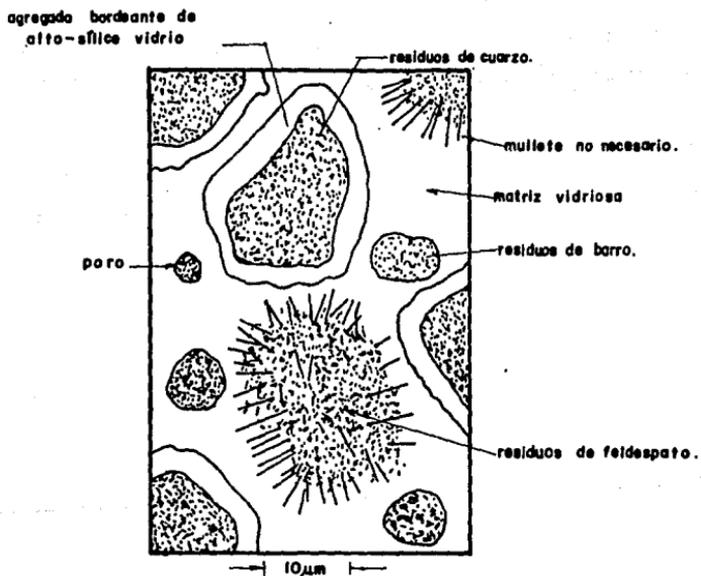


FIGURA 4.2. Porcelana dieléctrica. Representación diagramática.

La materia prima después de ser triturada hasta convertirse en polvo, se combina con agua, ésta mezcla adquiere una consistencia semilíquida que garantiza tanto la homogeneidad de la mezcla como cierta facilidad al momento de aplicar la etapa de filtrado. En ésta parte del proceso se aplican varias pruebas de aceptación para confirmar o rechazar la calidad de la arcilla, las características a probar son: densidad, nivel de acidéz y el grado de viscosidad. Para detectar impurezas en la mezcla se aplica calor a una muestra de arcilla de un cuarto de pulgada de espesor, las cuales, en caso de mostrar grumos ante el calor, nos indicará presencias ajenas a la mezcla. Si la mezcla de arcilla es aceptada por estas pruebas se le retira el excedente de agua, hasta lograr una consistencia tal que permita la operación del moldeado de piezas. Posteriormente, pasa a una cámara de alto vacío, donde se succionará toda posible burbuja atrapada. Al salir de ésta cámara el material se somete a un proceso de secado bajo condiciones de temperatura y humedad estrictamente controladas, ya que un error por insignificante que éste parezca, puede provocar esfuerzos internos a las piezas de arcilla causando fracturas.

Al concluir el secado, las piezas reciben el diseño que se requiere por medio del molde, del torneado, etc., para después recibir la operación de "glaseado", la cual consiste en un baño con una mezcla de calcio, bario y estroncio. Esta operación se aplica, según el tamaño del aislador, por inmersión, manualmente o rociando la superficie del elemento con glase sobre el cuerpo de arcilla que a su vez se transforma en porcelana. Este proceso se lleva casi dos días y medio. La figura 4.3. y la 4.4. muestra el ciclo de horneado de los aisladores de porcelana y el diagrama de flujo que sigue la fabricación y preparación de los materiales utilizados en el aislador cerámico.

TEMPERATURA [C]

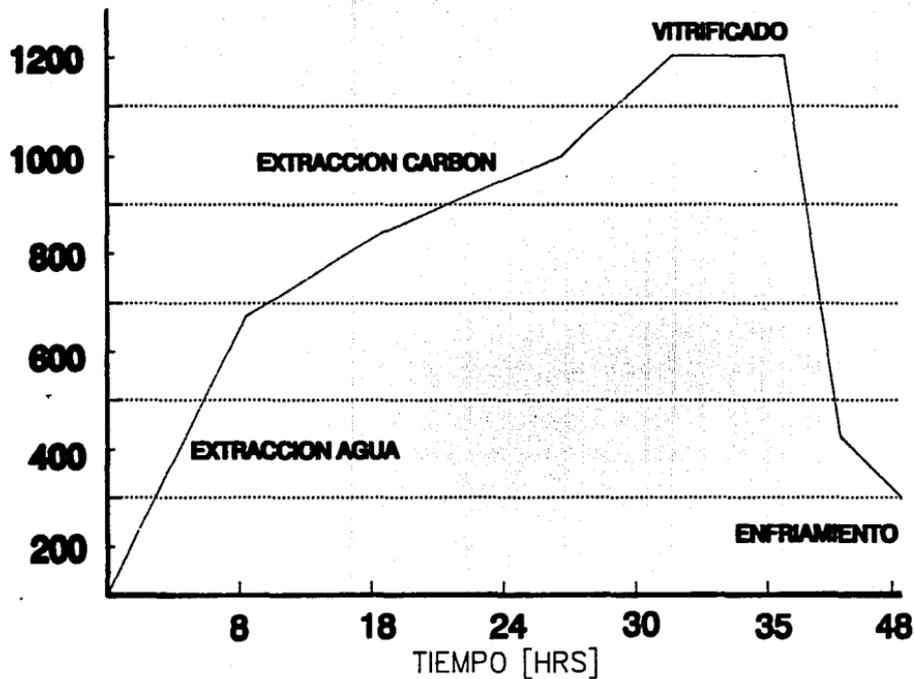


FIGURA 4.3
Ciclo de hornado de los
aisladores de porcelana.

Las desventajas que presentan el proceso de producción de los aislamientos de porcelana son:

- El proceso de producción es muy largo.
- Una pequeña variación en el porcentaje de los componentes afecta severamente la calidad de la arcilla.
- La mezcla de arcilla fácilmente pierde sus características ante impurezas o residuos en los vagones de transporte.
- Durante el proceso de secado de los modelos de arcilla una variación inadecuada en la temperatura o humedad puede deteriorar los modelos.
- El proceso de vitrificado consume demasiada energía.
- El cementado para fijación de los herrajes, es susceptible de absorber humedad, provocando esfuerzos mecánicos adicionales a los aisladores.

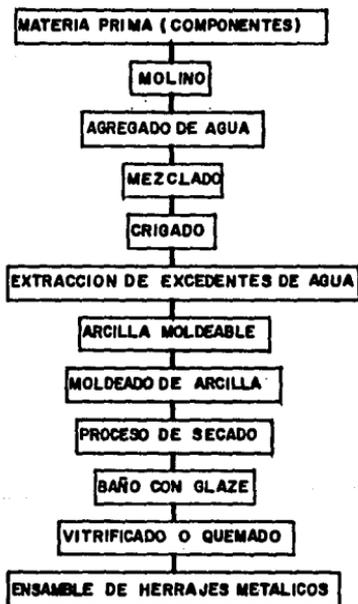


FIGURA 4.4 Preparación de la mezcla de arcilla y el proceso de fabricación del aislador cerámico.

4.2.2. AISLADORES DE VIDRIO.

El vidrio comúnmente utilizado en la fabricación de aisladores está formado por los siguientes componentes: óxido de silicio (sílice), óxido de calcio y potasio. La cal y otros óxidos presentes como impurezas, colaboran con el incremento de la resistencia mecánica, mientras que el potasio mejora el comportamiento del producto.

Este tipo de vidrio presenta problemas ya que es un material quebradizo e hidrosκόpico. El primero se origina siempre por un defecto superficial en el aislador, el cual se propaga en forma de fractura. En el segundo punto, el material acepta paulatinamente humedad hasta provocar caminos de falla.

El vidrio templado se forma cuando la pieza se encuentra al rojo vivo, de manera que permita el ajuste de los esfuerzos entre sus moléculas, se induce una operación de tensión enfriándolo en forma controlada con chorros de aire frío o aceite. De éste modo, la capa superficial expuesta directamente al frío solidificará, mientras que, el interior del vidrio permanece aún viscoso, por lo cual se pueden ajustar sus dimensiones a las contracciones de la superficie. Cuando el centro se enfria, se contrae ligeramente provocando algunos esfuerzos de compresión y tensión en la superficie y el centro respectivamente.

En su proceso de producción el vidrio sale del horno de preparación y mezcla, éste es dirigido a prensas de acero donde la masa de vidrio se moldea. Cuando la pieza ha solidificado en grado tal que no se deforme al ser secado, se inicia el proceso de enfriamiento controlado. Acto seguido la pieza se somete a una serie de choques térmicos que destruyen aquellos que contengan defectos de templado o inclusión de elementos ajenos. De no realizarse esta eliminación, las piezas defectuosas podrían llegar a romperse espontáneamente estando en servicio.

Las piezas de vidrio antes de ser llevadas al taller de ensamble y montaje, son sometidas a ensayos unitarios y estadísticos para certificar su calidad.

El vidrio, pese a sus ventajas, presenta los siguientes inconvenientes:

- Peso elevado de los aisladores.
- Laboriosidad en su manipulación e instalación.
- Su complejo proceso de producción.
- Es complicado el equipo de horneado.

Estas características dan como resultado un elevado precio del producto.

4.3. AISLADORES SINTETICOS.

En los sistemas de distribución el elemento que causa grandes fallas cuando se utilizan altos voltajes de transmisión es, sin lugar a dudas, el aislamiento; ésto debido a la creciente demanda de energía eléctrica, no solo en nuestro país sino en todo el mundo; esto crea un problema para los Ingenieros encargados del diseño y puesta en servicio del sistema de aislamiento, ya que como se sabe a mayores tensiones utilizadas se necesitan mayores niveles de aislamiento. Con los aislamientos tradicionales, éstos se tornan más grandes y pesados, por tanto; también se traduce en un incremento en el costo ya que se tendrían que reforzar las torres para soportar a estos aisladores. Con base a éste problema y al mejoramiento de los mismos, en nuestro país y en otros se iniciaron desde hace varios años, diferentes investigaciones en el área de los materiales plásticos o poliméricos como posibles sustitutos de la porcelana y el

vidrio. Como resultado de tales investigaciones, surgieron los llamados aisladores sintéticos, en donde, los países más avanzados llevaron a cabo las primeras investigaciones y pruebas de estos materiales. La experiencia adquirida en éstos países se aplica desde hace tres décadas en nuestro país, en instituciones como el I.I.E.; su experiencia dice que estos aislamientos presentan ventajas en ciertas aplicaciones en las líneas de transmisión que se tienen trabajando actualmente, por ejemplo: facilidad en el proceso de fabricación, facilidad en su instalación (debido a que no son tan frágiles en su manejo como los tradicionales), su bajo costo (cuando se llegue a fabricar nacionalmente), y sobre todo, su bajo peso y volúmen; además de esto se ha comprobado en el mencionado Instituto que estos aisladores son extremadamente resistentes a los efectos vandálicos (como característica adicional a las anteriores).

Dentro de las pruebas a las que se someten los aisladores sintéticos un problema a vencer es el de descargas superficiales y la exposición a la luz ultravioleta, ya que estas, hasta ahora, son los principales elementos destructivos que los afectan.

4.3.1. POLIMEROS.

En general, ésta materia se encuentra constituida por cientos o miles de moléculas pequeñas denominados monómeros, que forman enormes cadenas con diferentes formas.

Los polímeros sintéticos, como ya se mencionó anteriormente, son macromoléculas integradas artificialmente por unidades químicas, repetidas sistemáticamente. A la unidad utilizada se le llama monómero. En la siguiente tabla se puede observar que la

unión de los monómeros nos da como resultado un polímero:

MONOMERO	POLIMERO
ETILENO $\text{CH}=\text{CH}=\text{CH}\dots$	POLIETILENO: $\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}\dots$
CLORURO DE VINILO $\text{CH}=\text{CHCl}=\dots$	CLORURO DE POLIVINILO $\dots\text{CH}-\text{CH}-\text{CHCl}-\dots$

Los compuestos poliméricos a causa de la gran cantidad de ligaduras covalentes son elementos aisladores de la electricidad, al no permitir el flujo de electrones.

Existen varios grupos de polímeros que se distinguen por sus propiedades dieléctricas y mecánicas. Algunos de éstos son los elastómeros, los plásticos, las resinas epóxicas y los materiales compuestos.

4.3.2. ELASTOMEROS.

Los elastómeros son materiales poliméricos y maleables, ya que tiene un bajo módulo de elasticidad tienen la característica de absorber gran cantidad de energía de deformación. Al terminar de aplicársele una fuerza flexionante, éste recupera su forma original, debido a que cuenta con una estructura molecular lineal, en forma de espiral que cede elásticamente al esfuerzo mecánico.

Otro elastómero es el silicón, muy importante por su capacidad de aislar la corriente eléctrica y de poseer buena resistencia mecánica. a pesar de su consistencia ahulada, su configuración

química se asemeja a algunos materiales inorgánicos como por ejemplo, el cuarzo, el vidrio, la arena, etc., por ello éste polímero posee buena resistencia entre factores de operación externos, como son radiación solar, ozono, efecto corona, contaminantes sólidos, esfuerzo de tensión eléctrica y humedad, entre otros.

Para disminuir su deterioro por descargas eléctricas superficiales, se le agrega alúmina trihidratada la cual le proporcionará la rigidez dieléctrica necesaria. Lamentablemente a éste polímero no se le ha podido dar una aplicación para hacer un aislador eléctrico del tipo suspensión, debido principalmente, a su baja resistencia mecánica. Es muy utilizado en cambio en pequeños aisladores de una pieza y en aisladores de soporte.

Otros elastómeros ampliamente utilizados en aislamientos eléctricos son: el PTFE (politetrafluoruro de etileno), y los hules EPDM (monómero diénico de etileno propileno).

4.3.3. POLITETRAFLUORURO DE ETILENO (PTFE).

Fué el primer polímero formado por fluorocarbón y aún muy empleado en el comercio. Este polímero es extremadamente viscoso y tiene un peso molecular alto, es marcadamente cristalino y hasta los 325° C, no pasa al estado amorfo, no siendo un elemento termoplástico al estar expuesto a temperaturas elevadas. Por ello los cuerpos de los aisladores se moldean prensados en frío, donde el polimerizado granulento se fija, y sintetizándolos fuera del molde a una temperatura entre 350 y 380 grados centígrados, durante la cual tiene lugar una fuerte contracción (hasta del 20%), que debe tomarse en consideración al realizarse esta última conformación. Al enfriar rápidamente, se congela el estado amorfo

y el objeto resulta translúcido y elástico. Con un enfriamiento más lento, se puede apreciar un estado cristalino considerable, resultando las piezas duras y muy compactas. Si el enfriamiento es irregular, se originan tensiones que pueden dar lugar a deformaciones cuando el producto final se encuentra expuesto a las temperaturas de servicio. Los límites para estas temperaturas oscilan alrededor de los 280°C. Cerca de los 400°C se produce una descomposición con desprendimiento de gases de flúor (que son venenosos), por lo que su control es importante (figura 4.5.).

4.3.3.1. PROPIEDADES ANTE EL MEDIO AMBIENTE.

Debido a que el PTFE no absorbe la luz, éste no sufre nunca alguna reacción fotoquímica, esto hace que tenga una alta resistencia cuando se encuentra a la intemperie.

Posee una muy baja constante dieléctrica, y tiene una alta resistencia al arco. Lo principal es que, éstas propiedades se mantienen en un alto rango de temperaturas y frecuencias de trabajo.

4.3.3.4. ELASTOMEROS DE ETILENO-PROPILENODIENO (EPDM).

Cuando se copolimeriza el etileno con el propileno (plásticos conocidos) y la configuración de las unidades de polipropileno en las cadenas produce un polímero completamente amorfo, con alta flexibilidad molecular y propiedades típicas de extensión del material.

Debido a que se trata de un polihidrocarburo saturado, tiene muy baja polaridad y conductividad eléctrica, pero en cambio una alta resistencia a la oxidación.

Este polímero se vulcaniza empleando peróxidos, pero el proceso es difícil de controlar, y por lo mismo, bastante caro. Por eso se han desarrollado terpolímeros de etilenopropileno dieno (EPDM) para introducir los dobles enlaces y vulcanizar por las técnicas tradicionales.

Estos polímeros son menos sensibles a la degradación oxidativa que los plásticos naturales y sintéticos, que tienen los dobles enlaces incorporados en las cadenas (figura 4.6.).

4.3.5. RESINAS EPOXICAS.

Estas resinas son materiales impermeables, con óptimo comportamiento eléctrico y altamente adhesivos. Para mejorar su resistencia ante la intemperie y la formación de caminos carbonizados, a las resinas epóxicas se les mezcla con alúmina trihidratada. También para incrementar su resistencia mecánica se le agrega polvo de cuarzo o dióxido de titanio.

Las resinas epóxicas se identifican por la presencia de dos o más anillos epóxicos por molécula (epóxido o eter glicídico).

Las resinas casi siempre se curan con anhídridos para formar sistemas térmicamente estables. Existen reportes de resistencias a 316° y 371° C para éste tipo de resinas. Por esta razón, resultan útiles en laminados para temperaturas elevadas, aislamientos eléctricos y recubrimientos.

4.3.6. MATERIALES COMPUESTOS.

Los materiales compuestos son aquellos polímeros que se encuentran reforzados, los más comunes son: los concretos poliméricos, las fibras de vidrio enlazadas con resinas, el polysil, etc.

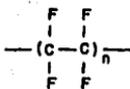


FIGURA 4.5. Fórmula del elastómero politetrafloruro de etileno (PTFE).

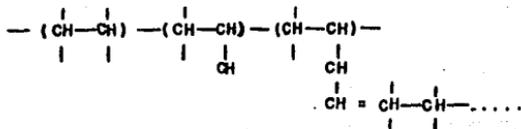


FIGURA 4.6. Fórmula del elastómero del etilenopropileno-dieno (EPDM).

4.3.6.1. CONCRETOS POLIMERICOS.

Los concretos poliméricos (concretos reforzados con polímero), los podemos clasificar en tres grupos o tipos que serán explicados a continuación:

- a) Concreto precolado o impregnado. Es un concreto a base de polímeros y concreto del tipo Portland, polimerizándose con un monómero de metacrilato.
- b) Concreto a base de polímero. Compuesto formado por los agregados del concreto y resinas monoméricas. Esta mezcla no contiene agua y cemento, polimerizándose con técnicas en el manejo de la temperatura.
- c) Concreto a base de polímero y cemento. Compuesto fabricado a partir de una mezcla de cemento y latex artificial.

4.3.6.2. FIBRAS DE VIDRIO ENLAZADAS CON RESINAS (RBGF).

Las principales aplicaciones de las fibras de vidrio en los aisladores poliméricos, son en realidad las de más importancia, ya que todas las cargas mecánicas son soportadas por las fibras. La función de la resina matriz es la de proteger las fibras y transferir carga a aquellas fibras que no estén rotas (cuando un aislador se encuentra bajo el efecto de una carga transversal se llegan a romper las cuerdas de fibra de vidrio). Para éstas aplicaciones (no siempre) la resina matriz puede ser menos fuerte y rígida que las propias fibras. Las resinas más comúnmente utilizadas en la formación de las matrices, son las poliésteres y las epóxicas; ambas pertenecen a las llamadas viscoelásticas.

Estas resinas cambian sus propiedades con el tiempo y muchas de ellas son afectadas por una temperatura elevada.

Las imperfecciones en éste tipo de compuestos son difíciles de evitar debido, entre otros factores, a la longitud del área específica que tiene la fibra de vidrio y la necesidad de ésta de llenarse con la resina matriz. Las porosidades axiales casi siempre están presentes; éstas por lo regular dejan entrar contaminantes que causan daños internos en el aislador (al estar sujeto a altos potenciales se producen descargas internas).

Al tener una descarga interna en las porosidades ocurren descomposiciones químicas en los elementos internos del polímero, formándose ácido oxálico, el cual comienza a deteriorar y debilitar a las fibras, disminuyendo las fuerzas de las mismas.

Se ha encontrado que los materiales fibrosos son altamente vulnerables al deterioro, una vez que les ha penetrado el agua por los esfuerzos eléctricos y mecánicos.

Los centros fibrosos desarrollados para aisladores están basados en laminados de polímero y fibra de vidrio, generalmente utilizados para niveles de MV. Se utiliza una sección rectangular en forma de viga, cuyas terminales pueden ser reforzadas con fibras transversales, para soportar las cargas cortantes (figura 4.7.).

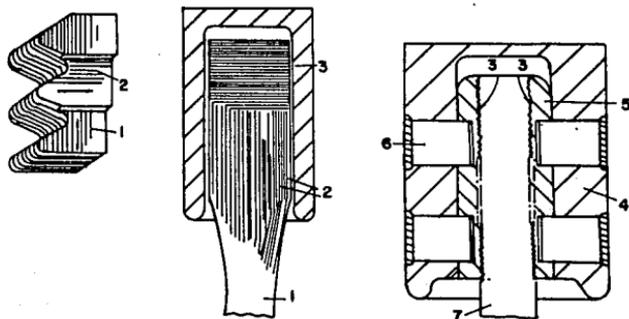


FIGURA 4.7. Elementos que componen los centros fibrosos del tipo RBGF.

- 1.- FIBRAS UNIDIRECCIONALES PARA LLEVAR CARGAS DE TENSION.
- 2.- LAMINADO DE REFUERZO TRANSVERSAL.
- 3.- CORRUGADO NORMAL A LOS PLANOS 1 Y 2.
- 4.- CASA DE METAL.
- 5.- PLATOS CON CARGAS CORRUGADAS.
- 6.- PERNOS DENTRO DE CAJA O CAJA BLINDADA EN AGUJEROS (5).
- 7.- CENTRO.

Las fibras de vidrio utilizadas contienen además de sus elementos propios, cal-alúmina-silica, reduciendo contenidos de álcali y eliminando el boro, llamándole E-VIDRIO.

En recientes estudios elaborados a éste material, han encontrado que la reducción en el contenido de boro y la sustitución de otros radicales como Mg, Zn, TnO, mejoran la resistencia al ácido oxálico y al ácido nítrico.

Las propiedades eléctricas del RBGF se mencionan en la siguiente tabla:

MATERIAL	FIBRA (%, v./v.)	ESFUERZO A LA PERFORACION kV/mm, 50HZ a (°C)	PERMITIVIDAD (AIRE=1, a (°C)
E-VIDRIO	FIBRA-65	3.0=(20)	5.3=(20)
GRADO DE PENETRACION		14.0 ang (20)	3.7 ang (20)

4.3.6.3. POLISYL.

En los E.U.A., se desarrolló un material aislante al que llamaron polysyl, el cual consiste en un concreto polimerizado que presenta excelentes propiedades dieléctricas para la fabricación de aisladores de uso en exteriores. Este nuevo elemento se comenzó a utilizar al probarse bajo condiciones, en las cuales, los aisladores de porcelana no pasaban.

El polysyl necesita un proceso de vacío y vibrado del material para desalojar las burbujas de aire que se encuentran atrapadas en la mezcla. Son utilizados moldes de materiales muy costosos como el poliuretano, para la fabricación de piezas (algunos problemas de acabado superficial).

El problema que presentan con más frecuencia por contaminación son la entrada de humedad al centro debido a la unión del herraje con el centro polimérico o fibroso (figura 4.8.).

4.3.6.4. EL CP-8.

Este es otro material importante. Se trata de una formulación polimérica similar a la del polysyl, pero con un proceso simplificado. Es un material constituido básicamente por arenas de sílice de diferente granulometría, con lo cual se obtiene una resina poliéster no saturada y muy compacta. Este tipo de material está siendo estudiado, desde hace varios años por el I.I.E.

La forma de operación y fabricación es la siguiente: se emplea un proceso de moldeo por inyección, la mezcla ya preparada pasa por una cámara de precalentado para su plastificación y, así, obtener una consistencia maleable. Posteriormente se inyecta a presión (alrededor de 1000 lb/pulg²) en un molde metálico, a fin de obtener un excelente acabado superficial. En el molde se encuentran integradas resistencias calefactoras para lograr un proceso de "curado", el cual dura aproximadamente 3 minutos; al pasar este tiempo, es retirada la pieza del molde ya como producto terminado.

Se puede apreciar que éste proceso de producción tiene un tiempo global muy reducido comparado con otros tiempos empleados en otros procesos de fabricación de aisladores.

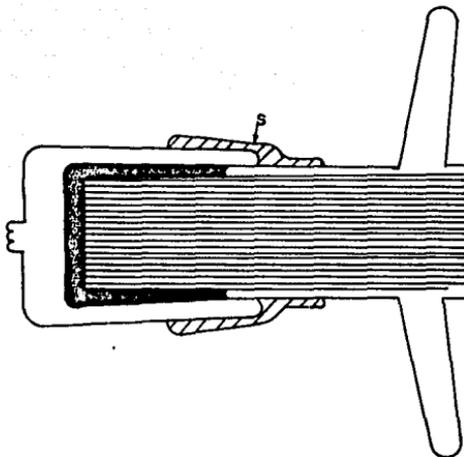


FIGURA 4.8. Transición entre la parte de metal y el centro fibroso, "S" es el borde o chaqueta de metal.

Las propiedades del CP-8 son superiores a las del polisyl y similares a las de la porcelana.

En el I.I.E. se ha trabajado en el diseño, así como en las pruebas que se tienen que realizar para poder ser presentados en el mercado mexicano. Los aisladores que ahí se prueban son del tipo alfiler para 15 KV y del tipo soporte para 23 KV, ambos fabricados por el proceso de inyección.

CAPITULO V

**ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN
EL DISEÑO DE AISLADORES**

ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE AISLADORES

5.1. ELEMENTOS DE DISEÑO DE AISLADORES Y PARTES QUE LO INTEGRAN.

En el diseño de un aislador siempre se toma en cuenta las siguientes dos cualidades:

- a) Que evite el flujo superficial o volumétrico de energía eléctrica.
- b) Proporcionar al conductor un soporte mecánico confiable.

El flujo de energía que se menciona en el primer inciso se debe principalmente a los siguientes fenómenos (estos entran dentro de los elementos que se necesitan cuando se quiere diseñar un aislador):

1.- LA CONDUCTIVIDAD DE LA MASA. Por ésta causa el flujo de energía es insignificante, ya que los materiales utilizados en la manufactura de los aisladores son elementos aislantes, con lo que tienen resistencias muy altas y se oponen al paso de corriente.

2.- LA CONDUCTIVIDAD SUPERFICIAL. El flujo de energía debido a ésta causa es principalmente debida a la contaminación a la que se encuentra expuesto el aislador. En muchas ocasiones los aisladores trabajan en ambientes severamente contaminados (más adelante se explican todos los elementos que contaminan o producen fallas en los aisladores), ésto hace que en la superficie del aislador se forme una capa semiconductor, esta capa muchas veces se forma de polvo, sales, desechos industriales, humedad, etc.

Este problema se soluciona utilizando el perfil de la campana del aislador adecuado. En casi todos los diseños de aisladores sintéticos, se observa que la superficie superior de la campana, tiene un aspecto y textura lisa, inclinada hacia abajo, con la cual, se elimina un poco el polvo o contaminantes que ahí se depositen. Esto minimiza la conductividad superficial y los flasheos o rupturas.

3.- PERFORACION DE LA MASA DEL AISLADOR. El flujo de energía por perforación de la masa del aislador, se da cuando ésta, no es suficiente para soportar la tensión de trabajo del mismo; como el material utilizado en nuestro caso es un polímero, con peso menor a los del vidrio y porcelana, los elementos que se refuerzan para soportar las cargas son los centros fibrosos y/o los herrajes terminales del aislador.

4.- ELEMENTO POLIMERICO A UTILIZAR. Este es uno de los más difíciles problemas a los que se enfrenta el diseño de un aislador, debido principalmente a que en las pruebas realizadas en la República Mexicana, los aisladores que en otros países funcionaban correctamente, en las zonas de altas temperaturas (costas y desiertos) tuvieron problemas de ablandamiento del material y, por tanto, fallas de fase a tierra. Esto nos puede dar idea de lo importante que resulta el seleccionar el polímero correcto.

5.- PERFIL GEOMETRICO PARA LLUVIA. Es el elemento de diseño que depende de los siguientes parámetros: nivel de aislamiento, tipo de aislador y sobre todo la posición del aislador con respecto a la horizontal.

6.- CONSTANTE DIELECTRICA. Característica de cada material aislante a utilizar.

5.1.1. PARTES QUE INTEGRAN EL AISLADOR DE TIPO SUSPENSION PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

En el diagrama 5.1 se ilustra el aislador y las partes con su número correspondiente que lo conforman:

1.- Una varilla de fibra de vidrio; todos los aisladores de suspensión cuentan con una barra reforzada, la función de ésta es la de proporcionar resistencia mecánica adecuada para soportar cargas en forma horizontal y en condiciones dinámicas o estáticas.

2.- Una cubierta continua, la cual está fabricada en una sola pieza de material; no tiene uniones, eliminando así las descargas eléctricas y la erosión; también para proteger la barra de fibra de vidrio de la humedad que se encuentra en el ambiente. El material es una "vaina" construida de etileno propileno (elastómero), ésta se encuentra colocada alrededor de la barra.

3.- Este es un vulcanizado de interfases, que elimina la necesidad de utilizar adhesivos o grasas, evitando así la posibilidad de descargas. Estas interfases son: la interfase entre la barra de fibra de vidrio y la "vaina".

4.- Una envoltura vulcanizada que protege de los elementos de la intemperie; y aún más importante, es un medio de unión para las aletas salientes.

5.- Es un cono de material epóxico, el cuál, su función es la de unir al armazón o parte metálica y a la barra de fibra de vidrio. Este cono es colocado con una cierta presión entre las dos superficies (antes mencionadas), para no dar ningún camino a que se puedan introducir elementos contaminantes a la barra de fibra de vidrio.

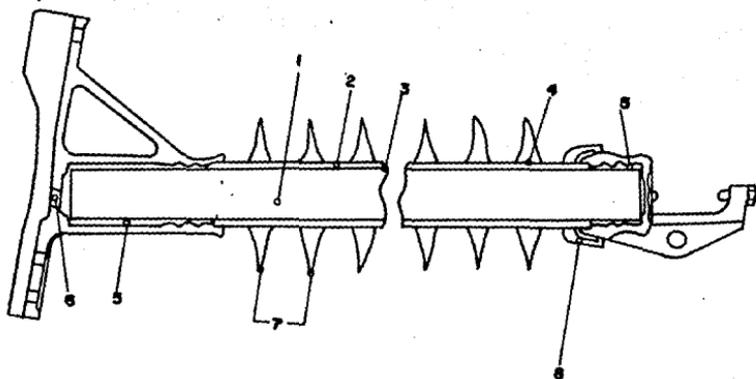


FIGURA 5.1 Aislador para líneas de distribución.

6.- Es un tapón metálico que evita la entrada de agentes contaminantes a el núcleo del aislador y a el cono por la parte central.

7.- El espacio entre los faldones o aletas de aislamiento sintético es muy importante, para evitar las perforaciones del mismo o, en algunos casos, que los elementos contaminantes se resbalen y no den lugar a caminos eléctricos de fuga.

8.- Esta es una corona protectora, la cual se encarga de aumentar la distancia entre el conductor y los aisladores; también incrementa el BIL (BASIC INSULATION LEVEL) de el aislamiento, con lo cual se puede utilizar para manejar un nivel más alto de voltaje.

5.1.2. PARTES PRINCIPALES DE UN AISLADOR COMPUESTO DEL TIPO TRANSMISION.

En el aislador de la figura 5.2. se pueden ver las partes que integran a este aislador tan singular, ya que combina la porcelana (elemento tradicional en el aislamiento) y al RBGF que es un material sintético polimérico; a continuación se dará una breve explicación de sus elementos:

- 1.- El centro es del material denominado RBGF (FIBRAS DE VIDRIO ENLAZADAS CON RESINAS), el cual tiene la característica de dar un soporte mecánico muy alto a el aislador.
- 2.- Elemento de madera impregnada con aceite para dar un nivel de aislamiento más alto y sobre todo, una protección contra humedad y agentes contaminantes que puedan introducirse y dañar el núcleo fibroso.
- 3.- Elemento intermedio entre el herraje terminal (de sujeción a tierra o de amarre del conductor) y la capa de porcelana .
- 4.- Capa de porcelana, la cual incrementa el nivel de aislamiento del aislador, además de proveerlo de resistencia mecánica en su parte central.

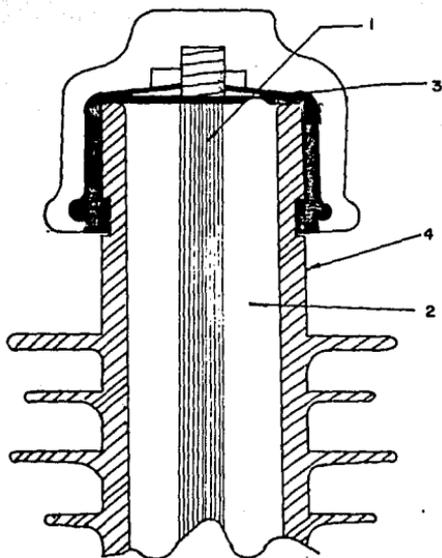
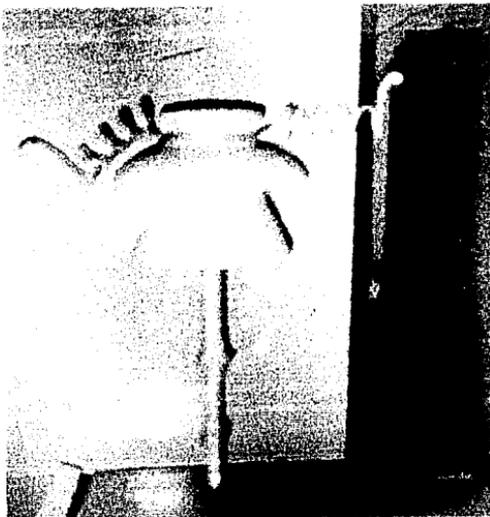


FIGURA 5.2. Aislador compuesto.

En la actualidad existen muchos materiales sintéticos utilizados como aislamiento eléctrico. Se pueden encontrar aisladores hasta de 400 KV de una sola pieza pesando una fracción de un aislador construido de porcelana o vidrio. Un ejemplo de estos aisladores y materiales se pueden apreciar en la fotografía 5.1. y figura 5.3.



FOTOGRAFIA 5.1 Aislador tipo alfiler de
concreto polimérico.

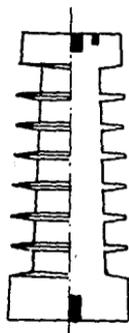


FIGURA 5.3. Aislador tipo soporte de
concreto polimérico.

5.2. FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS AISLAMIENTOS SINTETICOS.

En un sistema eléctrico, los elementos aislantes se encuentran expuestos a los efectos de una amplia gama de factores que actúan en forma adversa a su funcionamiento. Estos factores están constituidos por los diferentes tipos de esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos, así como la interacción de las condiciones ambientales y de contaminación del lugar donde se instale el aislamiento. En el transcurso de éste estudio, dichos factores serán tratados como los requerimientos de operación a los cuales estará sometido el aislamiento.

En la figura 5.4 se muestra un esquema general de estos requerimientos, los cuales pueden actuar en forma individual o combinada sobre aislamientos tanto convencionales como sintéticos y que, dependiendo de su magnitud, pueden sobrepasar las limitaciones del sistema aislante provocando una serie de fenómenos de los cuáles puede surgir el desarrollo de un mecanismo de falla.

Es importante señalar que las fallas en los aislamientos convencionales están bien estudiados e identificadas, debido a la experiencia tan amplia que se tiene en el uso de los mismos. Sin embargo, para el caso de los sintéticos, existen diferentes mecanismos de falla (los cuales no se presentan en los aisladores de vidrio y porcelana), propiciados principalmente por un envejecimiento prematuro del material sintético al estar expuesto al efecto de la luz ultravioleta (radiación solar) que puede degradar la superficie aislante, y principalmente al efecto pirolizante de las descargas superficiales generadas en presencia de contaminación, humedad y voltaje.

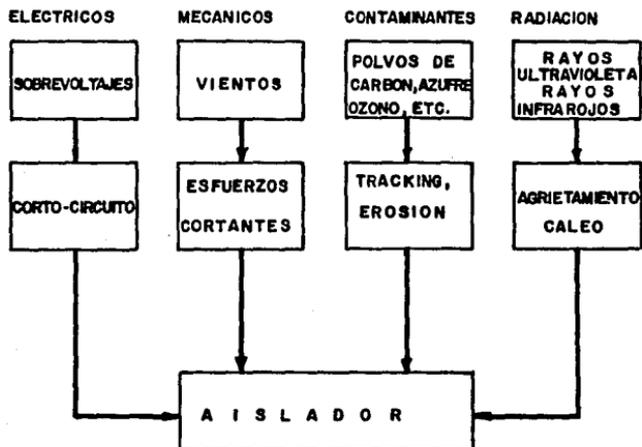


FIGURA 5.4. Esquema general de condiciones a la que se expone un aislador en una zona industrial.

La experiencia en campo ha demostrado que la vida de estos aisladores depende en gran parte de su resistencia a los efectos degradantes de las descargas superficiales generadas durante el proceso de formación de bandas secas, así como de la degradación superficial por rayos ultravioleta. Por ello, la gran evolución de los aisladores sintéticos se ha logrado a través del desarrollo de nuevos diseños y materiales, lo cual ha permitido resolver los problemas de envejecimiento prematuro detectados y su forma de evaluarlos.

5.2.1. FENOMENOS Y EFECTOS ASOCIADOS A LA OPERACION DE LOS AISLADORES.

Los aisladores sintéticos (hechos básicamente a partir de polímeros) en algunos casos se mezclan con otros materiales, como la alúmina o la arena sílica, para mejorar su resistencia al intemperismo y al arco eléctrico. Durante el procesamiento de los polímeros es usual añadir sustancias tales como las cetonas, aldehídos y peróxidos, compuestos que, por la absorción de energía, pueden ser responsables del inicio de la degradación que sufre el aislador cuando se encuentra instalado en el campo.

Cualquier fenómeno de degradación que se presente en los aisladores sintéticos, requiere una entrada de energía (energía de activación). La manifestación de la degradación depende del tipo de energía que haya actuado. Por ejemplo, cuando la energía proviene de la luz solar, la fotólisis es el deterioro más significativo que se presenta.

En la figura 5.5., vemos que la energía requerida para romper algunos enlaces covalentes simples se encuentra entre 165 y 420 KJ/mol., correspondiéndole longitudes de onda entre 710 y 290 nm. Aún cuando gran cantidad de la radiación emitida por el Sol es rechazada por la atmósfera, en especial por la capa de

ozono, una parte se filtra (aquella que tiene longitudes de onda entre 300 y 400 nm.), generando energía suficiente para romper algunos enlaces químicos, lo que provoca el inicio de la degradación del aislador.

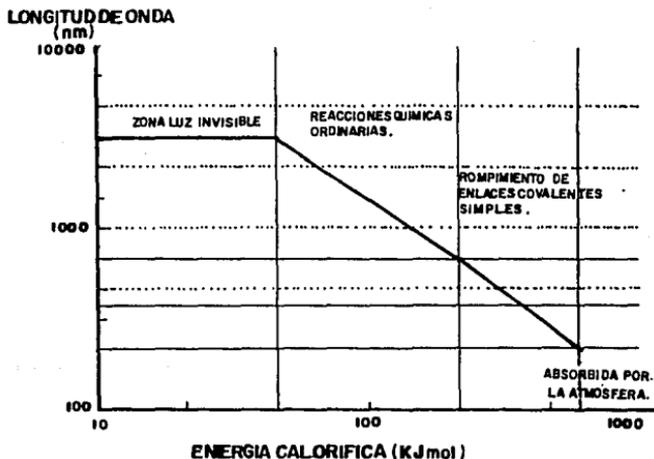


FIGURA 5.5. Longitud de onda asociada a la energía de activación de los polímeros.

Esta degradación comúnmente se manifiesta de las siguientes formas: agrietamiento, originando el cruce de cadenas poliméricas; desquebrajamiento de la superficie, debido al corte de ellas y a la pérdida de hidrofobicidad, proporcionada por la volatización superficial del material.

El desarrollo de un mecanismo de falla es un proceso complejo que puede presentarse debido a las condiciones de operación. Estas condiciones provocan la aparición de diferentes fenómenos los cuales, a su vez, producen ciertos efectos en el sistema aislante, que pueden modificar sus características eléctricas o mecánicas. El resultado final de este proceso se puede traducir como una falla total del sistema, lo cual representa la caída de la línea o la interrupción del servicio con sus ya conocidas consecuencias.

Debido a que en una instalación pueden existir diferentes tipos de aisladores, el efecto producido por los fenómenos varía en cada uno de ellos de acuerdo a su diseño y material de fabricación. Por ejemplo, el efecto producido por la lluvia ácida en aisladores de porcelana, tendrá sus consecuencias en la corrosión de los herrajes del mismo, mientras que en los aisladores sintéticos construidos con barra de fibra de vidrio, la penetración y contacto de la lluvia ácida con la fibra de vidrio producirá no solo un efecto de corrosión, que bajo carga mecánica puede llevarla a la ruptura, sino también una falla eléctrica por la formación de descargas eléctricas que pueden llegar a carbonizar la barra, provocando la perforación de la misma. Así mismo, el efecto que produce el encadenamiento de las descargas superficiales en un aislador de porcelana o vidrio únicamente puede llevar al flameo del mismo (seguido del arco de potencia), mientras que en un aislador sintético, además de lo anterior, puede existir un efecto degradante (erosión o tracking) debido al calentamiento (pirólisis) provocado por las descargas superficiales.

En vista de que la interacción de las diferentes variables de operación a las cuales está sometido el aislamiento, genera diferentes mecanismos de falla que pueden degradar el material sintético, nos enfocaremos a discutir solo algunos de ellos, considerados como de mayor importancia por el efecto que producen en el comportamiento del sistema aislante.

5.2.2. SOBREVOLTAJE TRANSITORIO

Los transitorios provocados por sobrevoltajes tienen su origen en las oscilaciones en el voltaje del sistema causadas por descargas atmosféricas sobre la línea o adyacentes a ella y por operaciones de maniobra en equipos de interrupción. Estas sobretensiones en ocasiones sobrepasan el nivel de aislamiento en un punto (generalmente en los elementos que soportan la línea), provocando un flameo cuya consecuencia es un arco de potencia, la magnitud del daño que esto ocasiona en el aislamiento, depende básicamente de:

- a) Las impedancias de la línea y el transformador.
- b) La potencia de corto circuito del sistema.
- c) El tiempo de interrupción o liberación de la falla.

En aisladores de porcelana y vidrio, en ocasiones las fallas por arco de potencia los destruyen, debido a que se fracturan por la alta energía transferida. Los aisladores sintéticos han demostrado poseer mejor comportamiento ante fallas de este tipo sin reportar un daño apreciable en el material sintético.

5.2.3. FORMACION DE BANDAS SECAS Y DESCARGAS SUPERFICIALES.

Las variables de operación que contribuyen a la formación de bandas secas y descargas superficiales, son la contaminación, la humedad (provocada por lluvia, niebla o rocío), y el voltaje. El desarrollo de éste fenómeno se puede explicar de la siguiente forma:

El aislador instalado a la intemperie recibe contaminación del medio ambiente, la cual se deposita en su superficie como se muestra en la figura 5.6.A. Al humedecerse ésta contaminación (figura 5.6.B) permite la circulación de corriente eléctrica a través de la capa contaminante cuya magnitud depende de los compuestos electrolíticos formados, esta corriente genera calor por efecto Joule provocando que la humedad retenida en la capa contaminante se evapore. Bajo condiciones reales, la capa de contaminación no se deposita en forma homogénea y además, el diámetro del aislador no es constante. Por esta razón la densidad de corriente no es uniforme, siendo mayor en las zonas de menor diámetro del aislador y en las zonas de menor espesor de la capa de contaminación como se observa en la figura 5.6.C.

En base a este proceso, la humedad no se evapora en forma uniforme a lo largo de la superficie, por lo que se forman zonas o bandas secas de alta resistencia concentradas principalmente en las regiones de mayor evaporación, provocando una distorsión en la distribución de voltaje (Figura 5.6.D.). Al tener zonas de alta resistencia eléctrica rodeadas de zonas conductoras, el voltaje aplicado al aislador prácticamente se transfiere a los extremos de las bandas secas (figura 5.6.E.). Bajo estas condiciones es posible obtener gradientes eléctricos suficientemente elevados, para que rompan la rigidez dieléctrica del aire que rodea dichas bandas, generando la formación de descargas superficiales entre los extremos de las zonas secas.

FIGURA 5.6.A El aislador recibe contaminación del medio sin causar problemas. La corriente de fuga es prácticamente nula

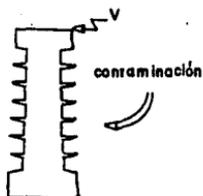


FIGURA 5.6.B La contaminación se humedece formando una solución electrolítica que permite la circulación de corriente por la superficie aislante.

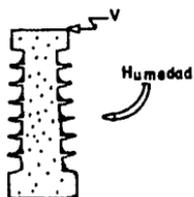


FIGURA 5.6.C La humedad se evapora por la circulación de corriente (calor por efecto Joule). Se forman bandas secas de alta resistencia eléctrica.

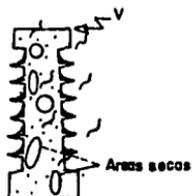


FIGURA 5.6.D. Distorsión del voltaje debido a la formación de bandas secas concentradas en las regiones de mayor evaporación.

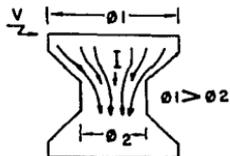
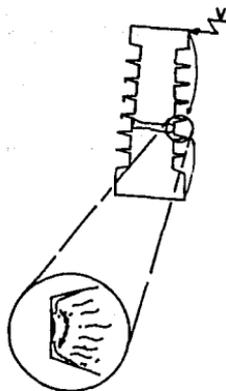


FIGURA 5.6.E. Se generan descargas superficiales en los extremos de las bandas secas al romperse la rigidez dieléctrica del aire.



La temperatura generada, principalmente en las raíces del arco puede llegar a pirolizar la superficie aislante (descomposición del material por efecto de la energía calorífica transferida), lo cual puede llevar a la formación de un camino conductor carbonizado (tracking) o la volatilización de los productos degradados (erosión).

Aunque en poco tiempo el efecto de la erosión puede ser pequeño, bajo condiciones severas la pérdida de material no solo involucra la reducción de la resistencia mecánica del aislador, sino también cambios en el acabado superficial y en las propiedades hidrofóbicas, lo cual puede dar como resultado una degradación drástica.

5.2.4. HUMEDAD Y RADIACION SOLAR.

Estos factores dependen de las condiciones ambientales y son muy importantes ya que todos los materiales sintéticos absorben humedad. La absorción de humedad trae como consecuencia un decremento en las propiedades dieléctricas (calentamiento) lo cual puede producir una falla en el material.

Un aislador seco puede demostrar ser adecuado cuando nuevo pero al absorber humedad posteriormente, puede calentarse y aumentar su conductividad a una razón mayor a la que logra disipar el calor, hasta fallar mecánicamente. Este fenómeno se conoce como avalancha térmica y ocurre en todos los tipos de aisladores incluyendo los tradicionales.

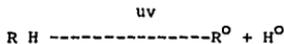
La radiación solar produce envejecimiento térmico y degradación química originando calentamiento dieléctrico, fractura mecánica, agrietamiento o la deterioración superficial que origina la formación de finos polvos (reticulación superficial y despolimerización de la superficie aislante), ocasionando cambios en el acabado superficial (pérdida de propiedades hidrofóbicas), que pueden aumentar la actividad de las descargas superficiales con las consecuencias ya mencionadas en el párrafo anterior.

La degradación por radiación se adopta de dos formas:

- a) Fotólisis, causada por la radiación ultravioleta.
- b) Radiólisis, originada principalmente por los rayos X, y los rayos gamma.

La fotólisis es un proceso de baja energía que aparece cuando la radiación ultravioleta excita electrónicamente algunos grupos funcionales específicos como, por ejemplo, los carbonilos.

Durante la etapa de excitación se forman radicales de polímero que posteriormente originan un corte de cadenas poliméricas, manifestándose como un resquebrajamiento superficial del material. La pérdida de hidrofobicidad y el agrietamiento también son manifestaciones de la degradación por fotólisis.



DONDE:

R H = MOLECULA DEL POLIMERO.

R^o = MOLECULA DEL POLIMERO.

H^o = RADICAL HIDRURO.

uv = RADIACION ULTRAVIOLETA.

Aunque algunos polímeros puros no deberían de absorber radiación con longitudes de onda más allá de 300 nm, en ocasiones, como se mencionó, la presencia de impurezas tales como las cetonas, aldehídos y peróxidos, son los responsables de la degradación.

La radiólisis es causada por radiación con longitud de onda extremadamente corta y, por tanto con gran energía. Se puede presentar de dos formas: de manera directa, cuando la radiación incide sobre el material o indirectamente, cuando se forman iones o moléculas excitadas por el gas que rodea al aislador. Esta última forma, aparece comúnmente durante el efecto corona cuando los iones del gas que se forman, se aceleran sobre el aislamiento debido a la presencia de un campo eléctrico intenso.

Los resultados de la radiólisis se manifiestan a menudo como la volatilización de grandes cantidades de hidrocarburos.

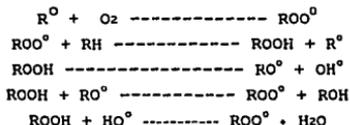
De esta forma, las condiciones ambientales afectan a los factores mencionados con anterioridad por el proceso de desgaste, el cual puede considerarse como la resistencia a la degradación influida por la exposición a la intemperie. El desgaste de un aislador es un proceso muy complicado, producido por la acción combinada de temperatura, luz ultravioleta, humedad, oxígeno (ozono) y esfuerzos mecánicos. Generalmente es muy grave cuando el aislador está contaminado y soporta esfuerzos eléctricos.

5.2.5. DEGRADACION POR OXIDACION.

Al igual que en la degradación por radiación, el primer paso en la degradación por oxidación es la formación de radicales de polímero.

Los principales factores que inducen la oxidación son la radiación ultravioleta y el calor. En la figura 5.7 se muestra como se presenta una variación considerable en el grado de oxidación de un polímero en función de la cantidad de radiación ultravioleta y de la energía calorífica que recibe durante un año.

Si el proceso de oxidación se induce por medio de la radiación ultravioleta, el fenómeno se llama foto-oxidación, en tanto que si es inducido por calor el fenómeno se llama termo-oxidación.



DONDE:

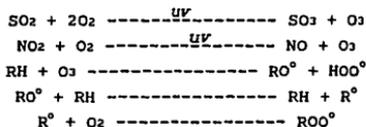
- O₂ = OXIGENO MOLECULAR.
- ROO[°] = RADICAL PEROXIDO.
- ROOH = MOLECULA DE HIDROPEROXIDO.
- RO[°] = RADICAL ALCOXILO.
- OH[°] = RADICAL HIDROXILO.
- ROH = MOLECULA DE HIDROXICOMPUESTO.
- H₂O = MOLECULA DE AGUA.
- ir = RADIACION INFRAROJA.

En ambos casos, la decoloración por la solidificación y el resquebrajamiento por el corte de cadenas poliméricas son las manifestaciones de oxidación.

5.2.6. DEGRADACION POR CONTAMINACION AMBIENTAL.

Los aisladores sintéticos son susceptibles de sufrir una degradación por la contaminación ambiental, especialmente en zonas donde hay elevadas concentraciones de ozono.

Es también sabido que el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre son compuestos que generalmente contienen los gases emanados de fábricas y automóviles. Estos gases en combinación con el aire y estando presente la radiación ultravioleta, son los causantes del incremento del ozono, el cual reacciona rápidamente a temperatura ambiente con los polímeros, aunque con menor intensidad. Este fenómeno es conocido como ozonólisis.



DONDE:

SO₂ = MOLECULA DE DIOXIDO DE AZUFRE.

SO₃ = MOLECULA DE SULFITO.

O₃ = MOLECULA DE OZONO.

NO₂ = MOLECULA DE DIOXIDO DE NITROGENO.

NO = MOLECULA DE MONOXIDO DE NITROGENO.

HOO[°] = RADICAL HIDROPEROXIDO.

La manifestación más común de la ozonólisis es el resquebrajamiento del material. El agrietamiento sólo se presenta cuando previamente se han formado radicales de polímero a partir de un fenómeno de oxidación.

Existen otros tipos de contaminación sólida (desértica, rural y marina) que son nocivos cuando el material se humedece y se presentan los fenómenos de tracking y erosión.

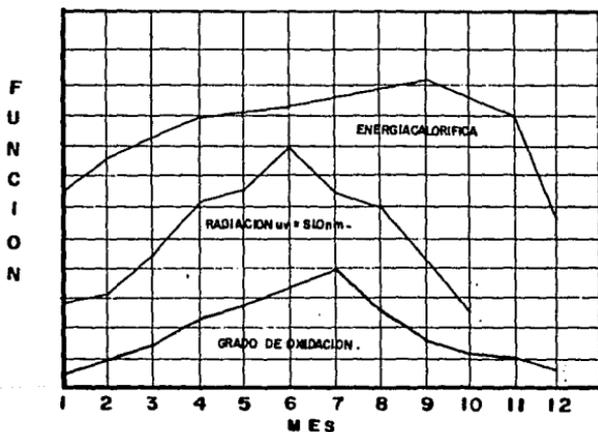


FIGURA 5.7. Oxidación de un polímero en función de la radiación UV y la energía calorífica.

5.2.7. EFECTO SINERGICO.

Todos los sistemas de aislamiento eléctrico están expuestos en el campo a más de un agente degradador. La combinación de radiación infraroja, radiación ultravioleta y tensión eléctrica están siempre presentes.

Basándonos en el análisis de los fenómenos de degradación que se presentan en los aisladores sintéticos, se ha desarrollado el esquema de la figura 5.8., en el que se muestra la interrelación que existe entre los agentes involucrados en el efecto sinérgico.

Todos ellos provocan un cambio en el material y, como se puede apreciar, comúnmente la manifestación es la misma, aún cuando el fenómeno que la originó sea diferente. Esta es una de las principales razones por las cuales se hace difícil la evaluación de éste tipo de efecto en los aisladores.

5.2.8. RADIO INTERFERENCIA Y RUIDOS GENERADOS POR AISLADORES.

La interferencia con la ondas de radio y la televisión (RI y TVI) pueden incrementarse cuando corren por el aislador ciertas descargas, las cuales inducen corrientes de alta frecuencia en conductores que se encuentran cerca (todo aquel conductor que pueda radiar ondas electromagnéticas). El ruido audible es generado ya sea por descargas eléctricas o por otro proceso; éste puede ser: la resonancia (en las cavidades del aislador) ó, también, por excitaciones aerodinámicas.

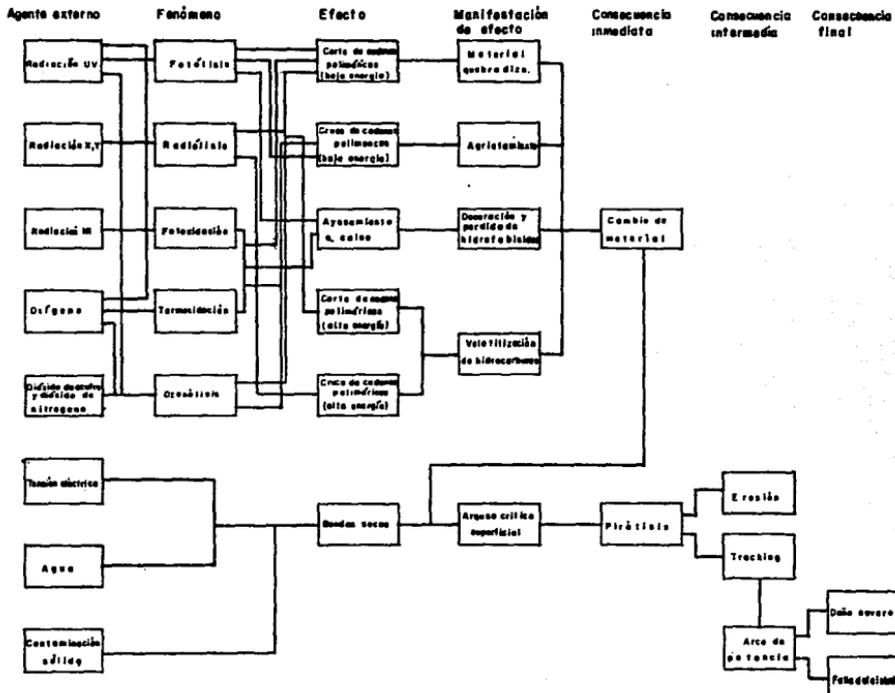


FIGURA 5.8. Agentes que actúan sinérgicamente en la degradación de los aisladores sintéticos. (Laboratorio eléctrico I.I.E)

Algunos tipos de descargas que generan interferencia pueden ser: partículas de hierro entre gotas de agua ó entre las terminales del aislados (éste se presenta cuando se tienen problemas de corrosión ó envejecimiento); también es muy común encontrar descargas a través de las bandas secas de las superficies agrietadas de los materiales poliméricos con un cierto tiempo de trabajo o descargas superficiales por el efecto corona cerca de los electrodos o contactos terminales.

La banda de frecuencia en la que se genera la RI ó la TVI depende de la naturaleza de la descarga y de los parámetros eléctricos del circuito asociado. Las micro-rupturas son eventos que ocurren en un corto tiempo, pero contienen cambios de corriente muy severos. En consecuencia, éstos son capaces de generar frecuencias que se encuentran en la banda HF hasta de micro-ondas. Cuando las descargas ocurren entre gotas de agua ó entre gotas y metal, éstas se vuelven transitorias y totalmente ineficientes como generadoras de ruido (entre partes de metal); cuando éstas corren dentro ó sobre cristales causados por la corrosión del aislador, éstos pueden elevar continuamente la frecuencia de interferencia a altos niveles.

Las descargas superficiales pueden ser prevenidas por un tratamiento hidrofóbico, pero un remedio altamente efectivo es sobreponerle una película de vidrio resistivo en la superficie. Esto no sólo elimina la formación de bandas secas sino que también provee un buen gradiente de voltaje, disminuyendo los sobrevoltajes que son causa de las descargas. También el uso de pintura semiconductora logra una atenuación en las concentraciones de campo eléctrico de los aisladores, disminuyendo significativamente el nivel de radiointerferencia.

5.2.9. VANDALISMO.

En zonas rurales y suburbanas, los aisladores se encuentran expuestos a los efectos vandálicos de personas que disparan sus armas de fuego en contra de ellos. Esto ocasiona mucho daño al sistema debido a que por un impacto, el aislador puede romperse dejando fuera de servicio la línea. Bajo estas circunstancias, los aisladores sintéticos construidos con barra de fibra de vidrio y materiales ahulados, han reportado considerables ventajas en comparación con los de vidrio y porcelana debido a que tienen una mayor relación de esbeltez, lo cual impide acertar al aislador, además de poseer mejores características mecánicas lo cual impide que la línea se caiga al tener un daño menor.

Bajo estas consideraciones, el comportamiento de los aisladores enfrenta un proceso complejo de desarrollo, el cual depende básicamente de las condiciones de operación y que a base de experimentación en laboratorio y en campo se han podido retroalimentar tanto buenas como malas experiencias a fin de solucionar los problemas encontrados, mediante el desarrollo de nuevos materiales y modificaciones en los diseños donde, para ciertas aplicaciones, los aisladores sintéticos juegan un papel muy importante.

CAPITULO VI

PRUEBAS Y METODOS DE EVALUACION

PRUEBAS Y METODOS DE EVALUACION

Durante los últimos años, se han desarrollado diversos métodos de prueba para evaluar los sistemas aislantes del tipo sintético, los cuales han sido utilizados en la construcción de dispositivos para alta tensión como aisladores de suspensión reforzados con núcleo de fibra de vidrio y cubiertos con material elastomérico, aisladores tipo soporte, boquillas, terminales para cables, etc.

Debido a ésta amplia gama de aplicación, se ha hecho necesario contar con métodos de evaluación capaces de seleccionar el material adecuado en base a su comportamiento bajo condiciones de operación. Se intenta simular dichas condiciones mediante las pruebas normalizadas, pero éstas no han sido totalmente satisfactorias para validar su comportamiento ya sea porque la variable deseada de intemperismo y voltaje se aplican en forma separada o porque los ciclos térmicos y mecánicos se simplifican demasiado durante la evaluación, obteniéndose que el efecto sinérgico (coordinación de varias formas distintas de ataque al material), sea muy difícil de reproducir en el laboratorio.

Evaluar un aislador es determinar su capacidad para operar en las condiciones de servicio para las cuales fué diseñado. Una forma de obtener este objetivo para un material o un prototipo determinado, sabiendo de antemano que la respuesta de los materiales sintéticos al intemperismo y a ciertos compuestos contaminantes en presencia de humedad, no es completamente satisfactoria, sería el diseñar un sistema degradante el cual,

operando en forma acelerada, obtenga los resultados que el aislador aceptaría instalado en campo durante un periodo relativamente largo.

Lo ideal sería evaluar el aislador o material aislante en forma prácticamente rápida; confrontar ventajas y desventajas para el uso previsto y rechazarlo o aceptarlo, para enviarlo posteriormente a la siguiente prueba de aceptación. Para lograr esto, se requieren métodos eficaces para envejecimiento en forma acelerada y reproducible en laboratorio con el objeto de poder validar el comportamiento de dichos materiales.

6.1 TECNICAS DE EVALUACION DE MATERIALES Y AISLANTES SINTETICOS.

A nivel internacional, se trabaja en el estudio de materiales y aisladores en base a pruebas en estaciones experimentales de contaminación natural y experimentos en laboratorio con contaminación artificial. Empleando bancos experimentales en lugares críticamente representativos de un tipo de contaminación, se han registrado mecanismos de degradación extrema en aisladores prototipo. De ésta manera se han establecido relaciones claras entre cada tipo de degradación y el ambiente respectivo en el cual se generó. Basados en los resultados obtenidos, se han propuesto una serie de técnicas de laboratorio para la evaluación de materiales y aisladores sintéticos, las cuales intentan reproducir al máximo las condiciones de operación y sobre todo el estado superficial de las muestras para provocar el desarrollo de descargas superficiales y consecuentemente la aparición de algún mecanismo de falla, determinando de esta manera la bondad de los materiales para ser usados como aislamientos en exteriores.

6.1.1. AJUSTE POR CONDICIONES AMBIENTALES *.

En las pruebas a las que se someten los aisladores un elemento importante que debe ser tomado en cuenta son las condiciones ambientales de la zona donde se efectuará, esto con el fin de validarlo en cualquier región. Se deben tomar las condiciones ambientales de acuerdo a los siguientes pasos:

MEDICION DE LAS TEMPERATURAS.

- 1.- Verificar que la tela que rodea al bulbo del termómetro húmedo se encuentre limpia de polvo y/o depósitos de sales. En su defecto se debe cambiar.
- 2.- Debe mojarse la tela del termómetro húmedo con agua destilada.
- 3.- El depósito del agua debe estar retirado del termómetro o tapado.
- 4.- Darle cuerda al aparato de relojería (aproximadamente a un 90% de ella).
- 5.- Esperar alrededor de dos minutos a que la lectura del termómetro húmedo permanezca invariable.
- 6.- Tomar la lectura de los termómetros seco y húmedo, tratando de no acercarse demasiado ni por mucho tiempo para evitar lecturas erróneas por radiación térmica corporal.

* Procedimiento del laboratorio eléctrico, I.I.E.

MEDICION DE LA PRESION ATMOSFERICA.

- 1.- Golpear ligeramente al instrumento con el dedo para estabilizar la superficie de mercurio.
- 2.- Colocar el cursor de tal manera que su parte inferior y el menisco de la columna de mercurio estén alineados.
- 3.- Tomar la lectura del barómetro, aplicándole a la misma el factor de corrección por temperatura y gravedad; dicho factor se calcula restando a la lectura del barómetro:
 - a) 10% de la lectura del termómetro del bulbo seco.
 - b) 2.15 por efecto de la gravedad y no linealidad del menisco formado por el nivel de mercurio.

NOTA: Todo esto para el barómetro Göttingen 609-611.

Una vez obtenidos los valores de presión, temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo se calcula el factor de corrección K, dividiendo los factores Kh y Kd donde:

Kh = Factor de corrección por humedad.

Kd = Factor de corrección por densidad relativa del aire.

El factor de corrección Kd se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$Kd = \frac{P}{Po} \times \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

Donde:

P = Presión atmosférica en el lugar de prueba en mm de Hg.

P₀ = Presión atmosférica al nivel del mar (760 mm Hg).

t₀ = Temperatura normalizada (20° C).

t = Temperatura ambiente del lugar de prueba (temperatura del termómetro de bulbo seco).

El factor de corrección Kh se obtiene a partir de la humedad absoluta del aire; dicha humedad se determina por medio de la gráfica de la figura 6.1.

Al graficar la temperatura de bulbo seco en el eje de las abscisas, y la temperatura del bulbo húmedo en la curva correspondiente, los puntos encontrados se desplazan paralelamente con los ejes señalizados hasta su punto de unión; en este punto se traza una línea horizontal con el eje de las abscisas hasta cruzar el eje de las ordenadas; se localiza un nuevo punto que corresponde al valor de la humedad absoluta del aire.

El valor encontrado en la figura 6.1. se grafica en la figura 6.2. en el eje de las abscisas; de este punto se traza una línea perpendicular con dicho eje hasta cruzar la curva "b"; de este nuevo punto se traza una línea horizontal con el eje de las abscisas hasta cruzar el eje de las ordenadas; en este último punto está localizado el valor del factor Kh.

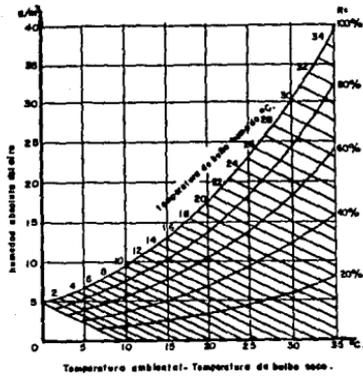


FIGURA 6.1. Gráfica para encontrar la humedad absoluta del aire.

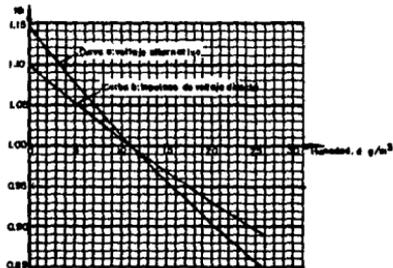


FIGURA 6.2. Gráfica para encontrar el valor de Kh .

TENSION.

La tensión que se aplicará a la muestra se determina multiplicando la tensión de calibración especificada en la norma, por el factor de corrección K; en forma matemática, nos queda:

$$V(t,b,h) = V(t_0,b_0,h_0)K; \quad K = \frac{K_d}{K_h}$$

siendo:

$V(t_0,b_0,h_0)$ = Tensión especificada por la norma con una temperatura (t_0), presión (b_0) y humedad (h_0) normalizada.

$V(t,b,h)$ = Tensión aplicada con temperatura (t), presión (b) y humedad (h) del lugar de prueba.

6.1.2. TECNICAS DE EVALUACION EN EL LABORATORIO.

Algunas de las técnicas o métodos de prueba más usados para la evaluación de materiales y aisladores en el laboratorio se mencionan a continuación:

6.1.2.1. PLANO INCLINADO.

Esta prueba esta clasificada como la norma ASTM D2303 y se utiliza en primer término, para evaluar aislamientos sólidos en función de su resistencia superficial, al someterlos a una diferencia de potencial mientras que se suministra un líquido ionizable y eléctricamente conductivo y, en segundo para evaluar cuantitativamente la habilidad relativa del aislamiento para soportar la acción de las descargas superficiales similares a las que, en forma esporádica, ocurren en servicio bajo la influencia de contaminantes combinados con la humedad del medio. Con esta técnica es posible obtener la falla del material en pocas horas. Sin embargo, no es factible reproducir todas las condiciones de campo, por lo cual las conclusiones obtenidas no producen información amplia respecto al comportamiento del material. Una de las ventajas de este método es que la conductividad de cualquier tipo de contaminante puede ser simulada, disfrazando la característica hidrofóbica del material al utilizar un material humectante que disminuya la tensión superficial del líquido conductor y provoque la presencia forzada de partículas acuosas.

Desde su inicio, en esta prueba se presenta actividad eléctrica sobre la muestra. Con esto se desarrolla directamente una de las etapas finales de lo que es un mecanismo de degradación en campo. Por lo tanto, es necesario completarla con otras técnicas de prueba para materiales orgánicos, siendo entre otras

la cámara de niebla salina, la prueba de tracking, el intemperímetro, etc.; con el objeto de generar las etapas faltantes y simular en forma completa la degradación.

La prueba comprende cinco niveles de clasificación, variando entre ellos los valores de voltaje, flujo contaminante y resistencias limitadoras como se muestra en la tabla 6.1. Para la realización de esta prueba, primero debe definirse la clasificación de voltaje al que corresponde la probeta para lo cual se realizan incrementos de voltaje de 250 volts por un tiempo de una hora debiendo presentarse un camino carbonizado de una pulgada de longitud entre la 3ª y 4ª hora; de no ser así, se ajustan los voltajes de prueba. En este momento se detiene la prueba registrándose el voltaje al cual corresponde (voltage to track). Una vez definido éste, se le restan 750 volts y se registra el voltaje resultante; se inicia en otras probetas la evaluación para determinar el tiempo que la muestra alcanza antes de fallar (time to track), manteniendo la probeta al voltaje en el cual se clasificó.

APLICACION DEL CONTAMINANTE ml/min	NIVEL DEL VOLTAJE	VALOR DE LA RESISTENCIA SERIE
#	KV	OHMS
0.075	1.0 A 1.75	1000
0.150	2.0 A 2.75	10000
0.300	3.0 A 3.75	50000
0.600	4.0 A 4.75	50000
0.900	5.0 A 6.00	50000

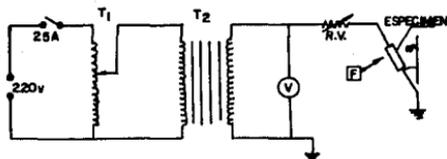
TABLA 6.1 Aplicación de contaminante en función del nivel de voltaje de clasificación (# 0.1 % NH₄CL -0.02% de agente humectante).

Se considera condición de falla cuando el camino carbonizado sobre la muestra logre una extensión de una pulgada.

El circuito eléctrico y montaje utilizado para esta prueba se presenta en la figura 6.3 y en la fotografía 6.1.(A y B). Aunque el tiempo estipulado para la prueba es de un máximo de 15 horas en el nivel de voltaje establecido, se han sometido materiales a tiempos largos para determinar su resistencia antes de que se registre la falla del mismo. Las dimensiones de las probetas son de 5 X 2 X 0.25 pulgadas (largo, ancho y espesor, respectivamente), inclinadas a 45°.

Algunos estudios se han encaminado a determinar la respuesta de materiales bajo este criterio de prueba después de haber sido sometidos a un ciclo de envejecimiento con luz ultravioleta, temperatura y humedad, logrado a través de un intemperímetro, o mediante un envejecimiento natural en probetas instaladas en bancos experimentales, con diferentes condiciones ambientales. Con esto se intenta obtener diferentes factores de aceleración intemperímetro-campo, evaluados mediante la prueba de plano inclinado.

En la fotografía 6.1.C se muestran materiales ya probados en el plano inclinado.



T1 Regulador de voltaje, 220/0-220v, 7.8 KVA.

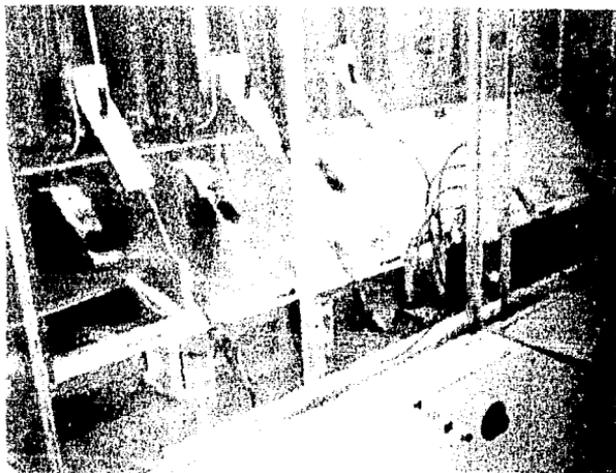
T2 Transformador 13 200/220v.

V Voltímetro 0-10 KV

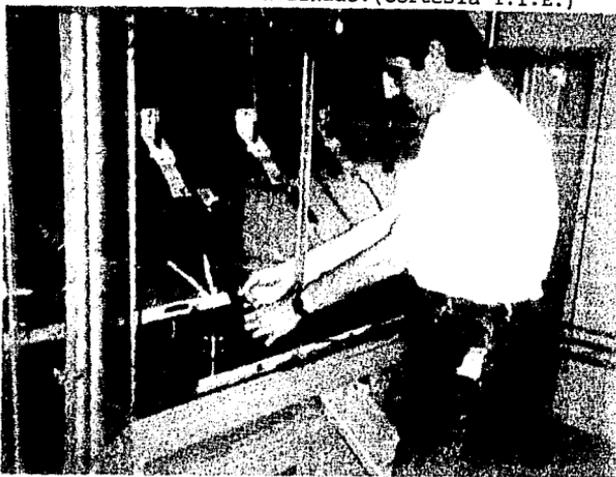
R.V. Resistencia variable 10-50 KOHMS

F Sistema de suministro de flujo contaminante.

FIGURA 6.3. Diagrama eléctrico y montaje de muestras para el equipo de plano inclinado.



FOTOGRAFIA 6.1.A Equipo de prueba de plano
inclinado. (Cortesía I.I.E.)



FOTOGRAFIA 6.1.B Instalación del espécimen a
probar. (Cortesía I.I.E.)



FOTOGRAFIA 6.1.C Placas de material sintético
después de realizada la prueba.
(Cortesía I.I.E.)

6.1.2.2. INTEMPERIMETRO.

El intemperímetro, es un aparato capaz de desarrollar un proceso acelerado de fotodegradación, exposición a la intemperie, decoloración y reacciones fotoquímicas, en materiales susceptibles al envejecimiento. El intemperímetro simula el efecto de la radiación solar por medio de una lámpara de arco de xenón para probar materiales no metálicos. El uso de este aparato es muy amplio para determinar en el laboratorio la resistencia de los materiales bajo el efecto de luz y agua en condiciones controladas de humedad y temperatura. Mediante una programación, en el intemperímetro se pueden obtener periodos alternados de luz, temperatura y humedad.

Sin embargo, no se considera la operación como simulación idéntica de las condiciones de exposición natural, ya que el desgaste generado en el campo implica un número muy diverso de variables de operación, además de una compleja coparticipación de las mismas.

Este aparato se encuentra normalizado internacionalmente.

6.1.2.3. ARCO EN SECO.

Esta prueba esta clasificada con la norma ASTM D495 y al igual que el plano inclinado se utiliza para evaluar materiales mediante un arco de energía variable que aumenta su severidad hasta fallar el material.

Por medio de esta prueba, se diferencian los materiales orgánicos en función de su resistencia a la acción del arco

producido por el alto voltaje y la baja corriente en su superficie, el cuál puede generar un camino conductor. Esto es, convertir al aislante en conductor por descomposición termoquímica y por erosión. En general, esta prueba no permite obtener conclusiones relacionadas con la resistencia de materiales al arco y se usa preferentemente para control de calidad. Además, las condiciones del arco generado, por su extrema severidad, raramente se observan en servicio, por lo que esta prueba se emplea para evaluación preeliminar de cambios en la estructura y composición del material, sin la compleja influencia de las condiciones ambientales, especialmente humedad y contaminantes. El diagrama eléctrico de esta prueba se presenta en la figura 6.2.

6.1.2.4. RUEDA DE TRACKING. (ENVEJECIMIENTO ACELERADO).

También llamada rueda de Ontario, es un dispositivo que provoca un proceso de bandas secas y descargas superficiales sobre una muestra de prueba, manteniendo como alimentación voltaje constante y humectación periódica. Este método, ideado en los laboratorios de investigación de Ontario Hydro (Canada), somete a prueba muestras normalmente tubulares o cilíndricas las cuales mantiene bajo un gradiente de 3.3 KV/pulg. y las moja completamente al pasar por una posición determinada.

Al tiempo en que el proceso de humectación inicia, el resto seco de la muestra soporta prácticamnete todo el voltaje aplicado, proporcionando un medio adecuado para que se presenten descargas eléctricas parciales las cuales secan continuamente la superficie aislante. El flujo de corriente y las descargas evaporan la humedad pero no los minerales contenidos en el agua,

por lo que se provoca la acumulación de residuos sólidos. Tan pronto como la actividad en las bandas secas se inicia, la porción seca va soportando un alto porcentaje del voltaje entre electrodos, causando un incremento en pérdidas por efecto Joule, y a la vez que se incrementa el área de bandas secas, se desarrolla un proceso de deterioro que puede llevar a la carbonización de la muestra.

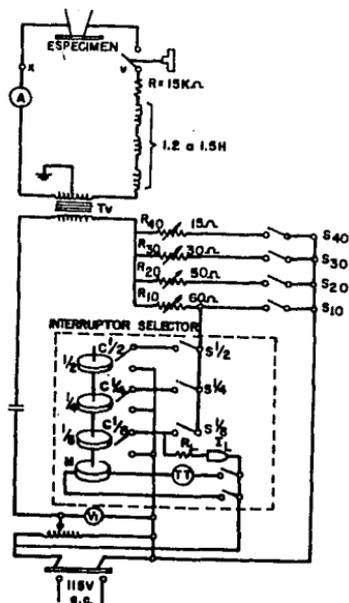


FIGURA 6.4. Diagrama eléctrico de la prueba de arco en seco.

Debido a la naturaleza del experimento, esta prueba no solo se considera como un método de evaluación sino también como un método de envejecimiento. El tiempo establecido para la duración de la prueba es de 1000 horas y la corriente máxima admisible en cada probeta es de 100 mA. Este método de prueba se considera de mayor importancia que el plano inclinado, ya que las condiciones a las que se somete la probeta son más reales, además de mantener un mismo diámetro a lo largo de la misma, logrando así que la densidad de corriente sea igual en la probeta .

En la figura 6.5 se presenta el diagrama eléctrico usado para esta prueba. El agua utilizada para humectar las muestras es agua de la red, manteniendo una conductividad de 350 a 400 μ Ω /cm.

Los resultados obtenidos con esta prueba han permitido realizar modificaciones en la forma de evaluación, encontrando que se puede aplicar no sólo a probetas sino también a algunos tipos de aisladores.

La alimentación de voltaje a las muestras bajo prueba se realiza por medio de un transformador conectado a las mismas a través de unas resistencias limitadoras, las cuales protegen al equipo en caso de una sobrecorriente . Esta corriente se intensifica cuando la muestra pasa por el rocío de agua, estando limitada prácticamente por la resistividad de la película acuosa y por las resistencias mencionadas.

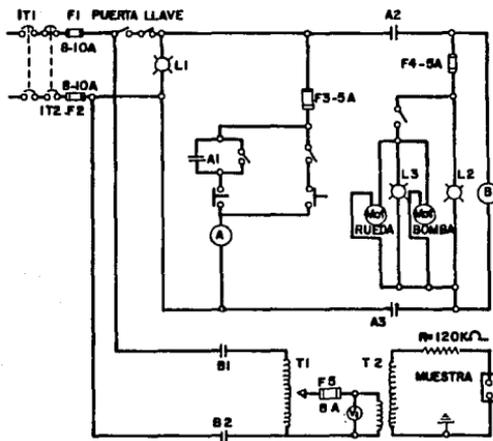
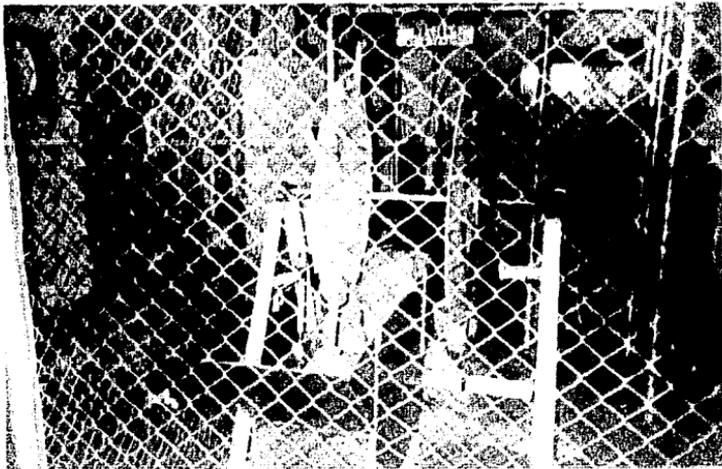


FIGURA 6.5 Diagrama eléctrico de la rueda de tracking. (Cortesía I.I.E.).

La fotografía 6.2. muestra un esquema general de este equipo . Durante su operación, las muestras pasan por el rocío del agua permitiendo un proceso de descargas superficiales en cada ciclo, el cual se repite cada dos minutos, hasta que se observan los primeros indicios de carbonización o la falla de las probetas.

Es importante mencionar que conforme avanza el tiempo, las propiedades superficiales de las muestras se ven reducidas por la actividad constante de las descargas superficiales y el calentamiento mismo, encontrándose que una vez que se define un punto de degradación, la actividad se intensifica en esa zona acelerando el proceso de degradación .

Este método de prueba se ha utilizado extensamente ya que han podido reproducir en poco tiempo diferentes mecanismos de falla observados en aisladores instalados en campo.



FOTOGRAFIA 6.2. Equipo de prueba rueda de tracking. (Cortesía I.I.E.)

6.1.2.5. EQUIPO EXPERIMENTAL PET-1 (ENVEJECIMIENTO ACELERADO).

Dada la relativa dificultad para probar aisladores de distribución en la rueda de Ontario, en el I.I.E.* se diseñó un equipo original para evaluar el efecto de descargas superficiales por la técnica de bandas secas.

Este equipo totalmente estático, esta formado por tres partes principales:

a) Equipo de energización al aislador.

Este equipo utiliza cuatro elementos de prueba como se muestra en la fotografía 6.3. , donde los aisladores son energizados por la parte superior a través de resistencias de límite, que se encuentran perfectamente aisladas de la humedad de la prueba. Se utiliza un arreglo de autotransformador -Transformador que aplica gradientes de 140 V/mm-.

b) Sistema de emisión de agua.

Se encuentra formado por un tanque de alimentación de agua , un flotador y una bomba, la cual funciona cuando lo requiere el temporalizador de acción, proporcionando agua a las boquillas (en este sistema se utilizan regaderas con ángulo de inclinación de 45°). El agua recircula hacia el tanque de almacenamiento. En la fotografía 6.4. se puede apreciar el momento en el que se está efectuando una prueba sobre los aisladores y como se humectan completamente.

* "Diseño y construcción de un equipo original para la prueba de arrastre superficial en aisladores de distribución".Ing Anibal Garza M. RVP-90-INS-06.

c) Sistema de control y medición.

Este se encarga de energizar los aisladores de prueba y sobre todo, efectuar la medición de corrientes superficiales a través de arreglos de resistencia-varistor.



FOTOGRAFIA 6.3. PET-1. (Cortesía I.I.E.)



FOTOGRAFIA 6.4. Aisladores bajo prueba al momento del rocío. (Cortesía I.I.E.)

6.1.2.6. CAMARA DE NIEBLA O CONTAMINACION.

El comportamiento de los aisladores bajo contaminación es en muchos casos el factor limitante en determinar el tamaño y el tipo de aisladores que deben ser usados. Los métodos utilizados en la aplicación de la contaminación artificial que han sido desarrollados a nivel mundial, pueden ser clasificados en dos grandes categorías: Una en la cual el aislador se sujeta a una condición ambiental definida y la otra en la que el objetivo es reproducir una determinada capa uniforme de contaminación sólida de conductividad controlada sobre la superficie del aislador.

Se han propuesto diferentes pruebas en cada uno de los métodos, pero solamente en las pruebas en que el voltaje se mantiene constante por un lapso de tiempo (algunos minutos), son consideradas confiables para normalización. Otros métodos en los cuales el voltaje se aumenta gradualmente hasta el flameo, no están propuestos para normalización pero pueden ser usados para propósitos especiales.

En la primera categoría de métodos de aplicación de contaminación, la prueba propuesta es la de niebla salina. En esta prueba, el aislador energizado al voltaje nominal se sujeta a una niebla de agua salina, cuya salinidad define la severidad de la prueba. En la segunda categoría existe un número de variantes en las cuales la capa de contaminación se aplica antes de la prueba, por ejemplo por rociado o inmersión. La capa de contaminación puede retener humedad del mismo proceso de contaminado o ser humectada posteriormente con niebla o rocío. La conductividad proporcionada por la capa define la severidad de la prueba.

La importancia de las diferencias entre las dos categorías de pruebas de contaminación artificial y el alcance para el cual dichas pruebas son suficientes para reproducir el fenómeno actualmente encontrado en servicio, están determinados por datos de pruebas en condiciones naturales de operación. La validez de ambas categorías de prueba están siendo investigadas. Un cierto grado de correlación se ha encontrado, particularmente entre el comportamiento de aisladores en ambientes de contaminación costera natural y la prueba de contaminación artificial de niebla salina.

En la fotografía 6.5. se presenta el esquema de una cámara de niebla salina utilizada en el I.I.E. para evaluación de aisladores

convencionales y sintéticos . El control de las variables implicadas durante las pruebas a los aislamientos (corriente de fuga, tensión aplicada y de flameo, etc.), se encuentra cerca de la cámara permitiendo su conexión de manera convencional y energizarlos con un riesgo mínimo para el personal y equipo.

La cámara dispone de boquillas atomizadoras que proporcionan soluciones contaminantes o agua limpia para generar niebla con las características deseadas. El método usual en el I.I.E. es efectuar la impregnación controlada de los aisladores con una base de agua, caolín y sal, dejarla secar y luego introducir las muestras a una pequeña cámara de acrílico en donde se les aplica voltaje mientras se humedece su capa contaminante con vapor de agua, generado con resistencias inmersas en tanques. Todos los parámetros son perfectamente controlados y registrados. Con estos métodos se pueden simular condiciones de aislamientos expuestos a brisa marina o simular la energización de una línea, en la cual, sus aislamientos contaminados se encuentran bajo condiciones de alta humedad, rocío o niebla. También pueden simularse localidades donde la capa contaminante acumulada sobre el aislador durante un periodo grande de sequía, en la primera situación de humedad puede propiciar un fenómeno de descargas superficiales que favorecen caminos carbonizados o el flameo de los aisladores.



FOTOGRAFIA 6.5. Cámara de niebla o
contaminación. (Cortesía I.I.E.)

6.1.2.7. PRUEBAS DE IMPULSO DE FRENTE ESCARPADO.

Sabemos que las nubes de tormenta se encuentran cargadas eléctricamente con polaridad negativa en su parte inferior, en casi todos los casos. Sobre el piso, como si fuera su sombra, una enorme cantidad de cargas positivas se acumula bajo la nube, debido a la atracción electrostática; estas cargas emigran hacia partes superiores de torres de transmisión, árboles, estructuras metálicas, mástiles, etc.

Es tan alto el gradiente de potencial entre nube y tierra, que una gran cantidad de carga positiva "brinca" los aisladores y se acumula sobre las líneas de transmisión. Cuando el gradiente de potencial es lo suficientemente elevado, se presenta el RAYO, fenómeno que rompe el equilibrio electrostático y libera las cargas acumuladas sobre las líneas, las cuales viajan a la velocidad de la luz en forma de ondas unidireccionales de sobrevoltaje, impactando los aislamientos de redes aéreas, transformadores de subestaciones y otros elementos. Para simular este efecto en laboratorio, se diseñó el "generador de impulso" y se normalizó una forma de onda de prueba con tiempos específicos.

La prueba de impulso de voltaje actualmente se realiza con una forma de onda normalizada de $1.2 \times 50 \mu\text{seg}$. Los últimos estudios realizados han demostrado que las sobretensiones por rayo observadas en las líneas aéreas tienen pendientes mayores a las de las ondas normalizadas usadas en laboratorios. La pendiente de la onda modifica los esfuerzos eléctricos que se producen en los aislamientos, por lo que resulta ser necesario realizar una revisión a las normas internacionales para probar los equipos con impulsos de frente más pronunciado a fin de reproducir con una mayor veracidad los fenómenos que ocurren en el campo.

Hasta el momento, la experiencia internacional en campo ha demostrado que con la realización de pruebas de impulso de frente pronunciado o escarpado utilizando pendientes del orden de 2500 KV/ μ seg, se previenen fallas por perforación a los aisladores de tipo alfiler y suspensión.

En las últimas investigaciones realizadas a nivel mundial, se encontró la importancia de definir las condiciones ambientales para la realización de estas pruebas. Esto es debido a que con las mismas pendientes, un aislador flama a un valor menor cuando el laboratorio está ubicado a mayor altitud, lo cual reduce los esfuerzos eléctricos en el aislamiento y hace que la prueba sea menos drástica. Por lo anterior, se propuso normalizar el voltaje de flameo, en lugar de normalizar la pendiente de la onda. Hasta el momento, el criterio que prevalece es que se debe ajustar la pendiente de la onda a un valor tal, que el voltaje de flameo del aislador sea el doble del obtenido con una onda convencional de $1.2 \times 50 \mu$ seg. Las pendientes para lograrlo deben de ser del orden de 2500-3000 KV/ μ seg.

Los generadores de impulso convencionales funcionan bajo el principio de cargar capacitores en paralelo y descargarlos en serie para lograr altas tensiones. En la figura 6.4 se presenta uno de los diagramas equivalentes de un generador de impulsos en el cuál, se tienen conectados el divisor de tensión y la capacitancia de carga (Cc). En el caso del I.I.E., el divisor de tensión es del tipo resistivo, el cual está representado en el circuito de la figura 6.6, como una resistencia. La capacitancia auxiliar de carga, en este caso, es un capacitor de 1000 ρ F conectado en paralelo con el aislador bajo prueba, el cual en promedio representa una carga capacitiva de alrededor de 50 ρ F.

Los valores de los componentes del circuito para el generador del I.I.E. son los siguientes :

$$R_f = 323 \Omega$$

$$R_c = 1051 \Omega$$

$$C_g = 0.066 \mu F$$

$$C_c = 1050 \rho F$$

$$R \text{ divisor} = 10.4 K\Omega$$

Con estos valores es posible obtener las formas de onda normalizadas de $1.2 \times 50 \mu\text{seg.}$

Así para lograr generar impulsos de frente pronunciado con el circuito convencional descrito, se requieren las siguientes condiciones :

- Reducir el tiempo de frente de onda (fig. 6.7.A).
- Aumentar la amplitud de la onda (fig. 6.7.B).

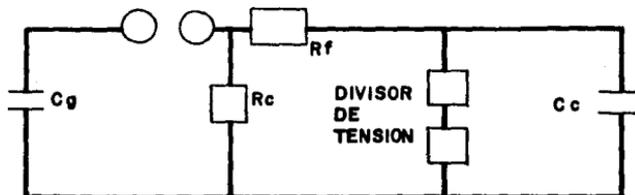


FIGURA 6.6. Diagrama equivalente de un generador de pulso simple.

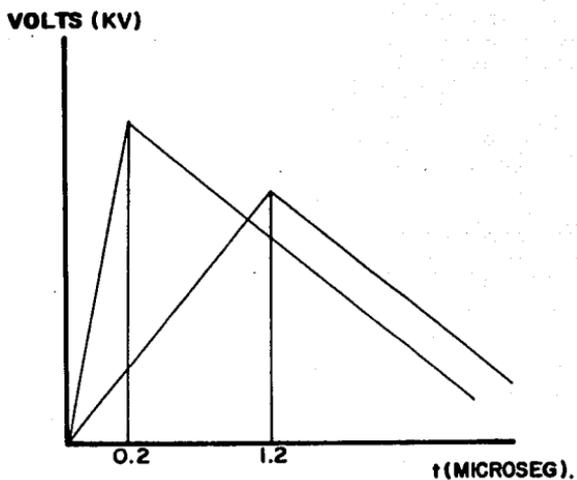


FIGURA 6.7.A Gráfica representativa de la reducción del tiempo de frente de onda.

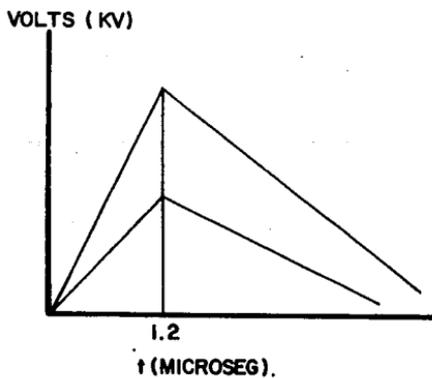


FIGURA 6.7.B Gráfica representativa del aumento de la amplitud de la onda.

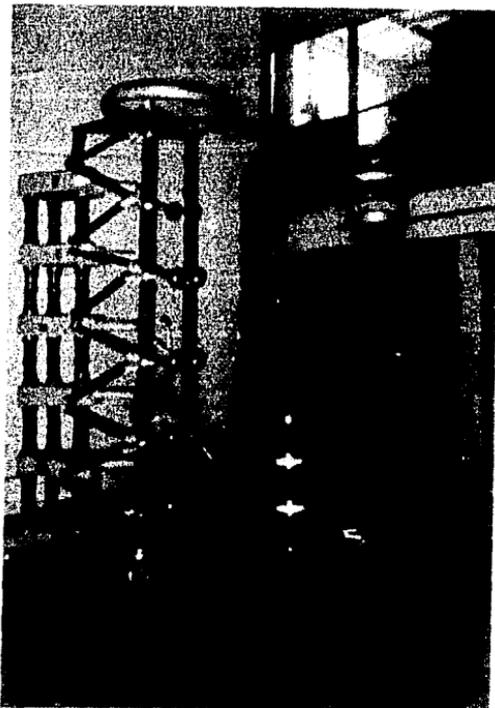
Dadas las restricciones del equipo no es posible cumplir las especificaciones de la prueba dado que el frente de onda sólo se puede reducir hasta $0.61 \mu\text{seg}$, y a la limitada capacidad del generador (500 KV), en el cual se alcanzan ondas con pendientes de $625 \text{ KV}/\mu\text{seg}$.

Con ésta técnica, se requiere la utilización de generadores de impulso extremadamente grandes para lograr pendientes del orden de $2500 \text{ KV}/\mu\text{seg}$.

Así para evitar la utilización de un generador de alta capacidad para generar impulsos de frente pronunciado, se realizaron ensayos en éste instituto con un circuito diferente (figura 6.8.). El cambio consiste en la adición de un explosor, el cual transfiere la energía almacenada hacia un nuevo circuito formado únicamente por el aislador y el divisor de tensión. El circuito original sirve únicamente como una fuente de voltaje que se descarga a través del segundo explosor, el cual controla la tensión que llega al aislador por medio de la separación de sus esferas. El voltaje de carga que se utiliza en el circuito original, debe ser suficiente para producir el arqueo de dicho explosor, pero no afecta de manera apreciable el voltaje aplicado al aislador.

Este tipo de pruebas requieren una instrumentación diferente a la utilizada en las pruebas de impulso convencionales, ya que las ondas generadas son muy rápidas para registrarse con precisión con los divisores y osciloscopios tradicionales. A su vez, la inductancia del circuito tiene mucho mayor efecto al trabajar con ondas de tan alta frecuencia, lo cual, obliga a desarrollar dispositivos especiales para evitar problemas de oscilaciones de alta frecuencia.

En la fotografía 6.6. se puede observar el equipo de prueba antes mencionado.



FOTOGRAFIA 6.6. Equipo de impulso de voltaje adaptable a la prueba de frente escarpado. (Cortesía I.I.E.)

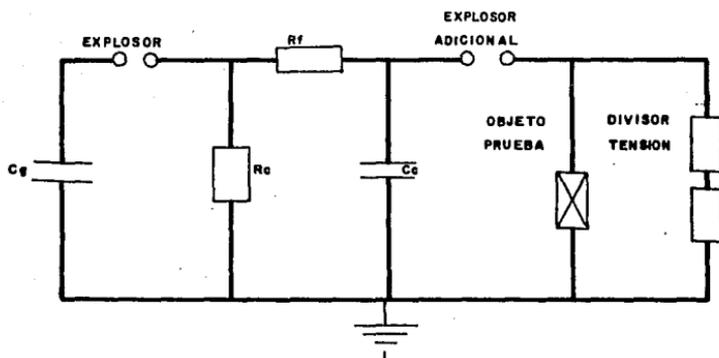


FIGURA 6.8. Modificación de un generador convencional para generar impulsos de frente escarpado. (Cortesía I.I.E.).

6.1.2.8. PRUEBAS DE ARCO DE POTENCIA EN AISLADORES SINTETICOS.

Las características de aislamiento de los aisladores son afectadas por el arco de potencia, dañando sus componentes. Como una prueba de diseño, se requiere el arco de potencia.

La resistencia electromecánica de los aisladores de suspensión convencionales se basa en un material mineral, mientras que los aisladores sintéticos están contruidos de material orgánico, por lo que soportan mejor los efectos destructivos de las altas corrientes de falla.

Cuando una alta corriente de falla se presenta en las terminales de una aislador, las características electromecánicas pueden ser afectadas por el alto nivel de energía disipada por el arco. Fisicamente, el daño es por el efecto térmico sobre la superficie del aislador y electromecánico en las terminales del mismo.

La magnitud del daño en el aislador es función de la cantidad de energía transmitida al aislador antes de que el arco sea liberado por la protección del sistema. A mayor energía transferida mayor es el daño.

De tal manera que para las pruebas de arco de potencia prevista a los aisladores, debe seleccionarse cuidadosamente el nivel de corriente de prueba y el tiempo de liberación del sistema.

La energía de un arco en un sistema dado, es directamente proporcional al producto de la corriente de falla y el tiempo de liberación, por lo que una baja corriente de falla con un gran tiempo de liberación producirá mayor daño en el aislador.

Para la característica I-V (corriente vs. voltaje) de arco de potencia a 60 Hz se entiende que el voltaje a través del arco es representado por un voltaje de reignición relativamente constante y un voltaje de extinción.

Los aisladores bajo prueba son tensionados a una fuerza dada, con una configuración geométrica que se establece de acuerdo al tipo de aislador. La corriente de prueba debe ser simétrica, energizando el aislador igual que en condiciones normales de operación. El arco se logra cortocircuitando el aislador con un alambre-fusible, energizando y manteniendo la corriente de corto circuito un número de ciclos predeterminado. Después de la prueba, debe ser verificada la tensión mecánica del aislador, comparando con el valor inicial la carga de ruptura del mismo lote de muestras.

El comportamiento del arco y el daño causado al aislador difiere poco del arco logrado por un alambre fusible al que se presenta con condiciones reales de operación. La diferencia en la trayectoria del arco se tiene solamente en los primeros milisegundos.

Las condiciones simétricas de la falla influyen sobre las fuerzas que actúan sobre el arco y por lo tanto determinan su movimiento, asegurando que éste es confinado lo más cerca del circuito y, por lo tanto, en las terminales del aislador.

Las pruebas de arco de potencia se han realizado a 13.8 KV en aisladores sintéticos para sistemas de distribución y sobre aisladores de vidrio y porcelana para comparar resultados, aplicando tres pruebas de arco a cada aislador bajo prueba.

En aisladores para sistemas de distribución se ha comprobado que los arcos a lo largo del aislador tienden a extinguirse a partir de su centro, por lo que el daño será más severo en las terminales.

La resistencia del arco de potencia de los herrajes en los aisladores sintéticos depende del diseño del aislador y del diseño del material del herraje. Como el hierro tiene una temperatura de fusión de 1535 °C y el aluminio de 600 °C, se tiene una erosión más considerable en el aluminio que en hierro forjado.

En los sistemas de distribución, las máximas corrientes simétricas de falla, están limitadas por los transformadores cuya capacidad comúnmente empleada en 115/13.8 KV, es de 12/16/20 MVA.

Considerando un valor promedio de 8% de impedancia a 12 MVA y de 14 MVA así como una capacidad interruptiva en el lado de alta tensión de 1500 MVA, la capacidad máxima de corto circuito en terminales de baja tensión será de 137 MVA (5.7KA) y de 130 MVA (5.4 KA) respectivamente; por lo que la capacidad que se considera para establecer valores de prueba de arco de potencia será de 12 MVA.

El circuito típico de ésta prueba es el mostrado en las figuras 6.9. y 6.10., en donde se pueden apreciar el diagrama unifilar y el diagrama de secuencias de la prueba.

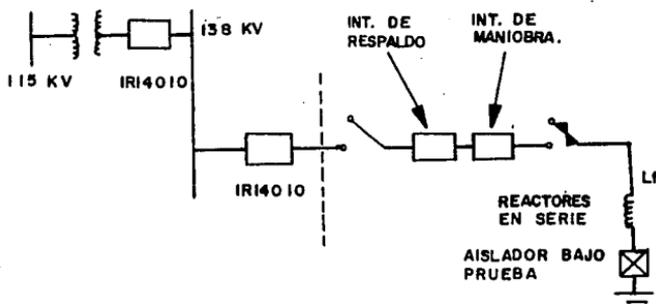


FIGURA 6.9. Diagrama unifilar de la prueba de arco de potencia.

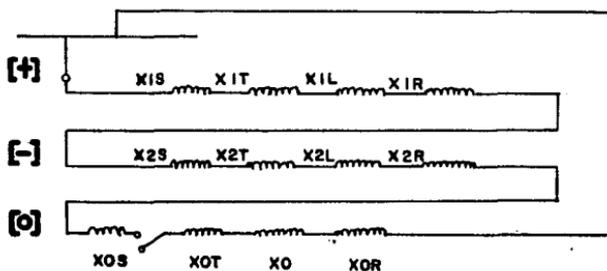


FIGURA 6.10. Diagrama de secuencias de la prueba de arco de potencia.

6.1.2.9. SISTEMA PARA PRUEBA DE LLUVIA ARTIFICIAL EN AISLADORES ELECTRICOS.

Reproducir el fenómeno natural de lluvia sobre aisladores en los laboratorios de alta tensión es prácticamente imposible, ya que en la naturaleza dicho fenómeno, depende de varios factores simultáneos como son: dirección e intensidad del viento, grado de contaminación atmosférica, intensidad de lluvia, temperatura ambiente, contaminación superficial, temperatura del aislador, altura de la caída de agua, presencia de descargas eléctricas, etc. Sin embargo, para efecto de comprobar la fabricación normalizada de aisladores sintéticos o tradicionales y mejorar el diseño de los mismos, es válido establecer en laboratorio un mecanismo físico de descarga eléctrica en un aislador bajo lluvia artificial para asentar los criterios comparativos necesarios.

La norma IEC-60 hace referencia a un método para simular el efecto de lluvia natural sobre aislamientos externos, basado en la emisión de agua con resistividad prefijada cayendo en forma de gotas sobre el aislador sujeto a prueba. El documento recomienda qué ángulo de llegada debe tener el agua sobre el aislador, la intensidad de la misma, su valor de resistividad y las características de las boquillas emisoras.

Para la realización de la prueba de tensión aplicada en humedo se diseño en el I.I.E. un sistema electrohidráulico (S.E.H), el cual se compone de dos subsistemas base: el sistema S.E. (subsistema eléctrico) y el S.H. (subsistema hidráulico), ver figura 6.11.

Gracias al apropiado desarrollo de estos, se ha podido llevar a cabo la prueba de lluvia artificial bajo las recomendaciones internacionales.

El S.E., es un sistema típico para prueba de tensión aplicada el cual consta de una fuente de potencia, un regulador de voltaje, transformador, resistencia limitadora de corriente, un juego de explosores, un sistema de tierra, un sistema de protección y un sistema de medición.

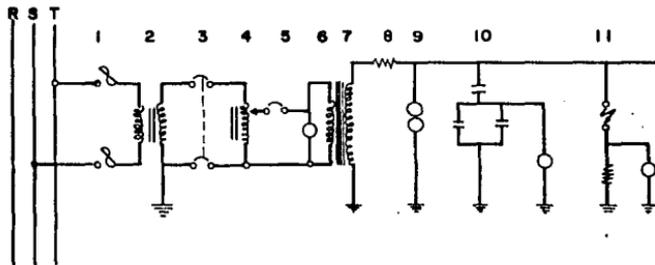
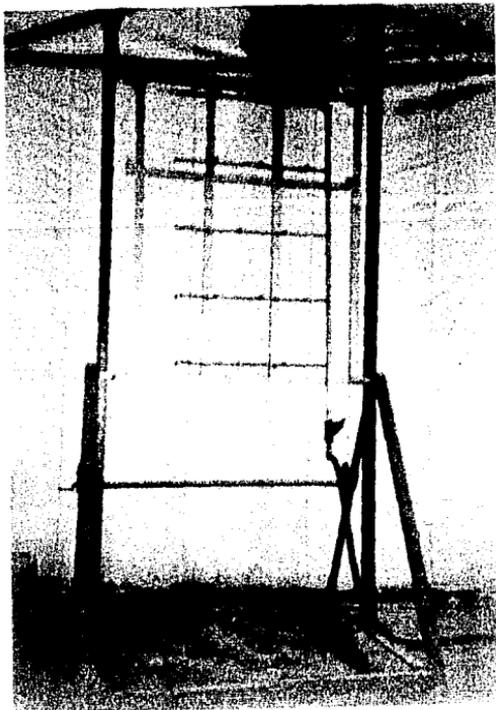


FIGURA 6.11. Diagrama eléctrico para prueba de tensión aplicada. (Cortesía I.I.E.)

Partes que lo integran:

- 1.- Protección en alta tensión.
- 2.- Transformador monofásico reductor.
- 3.- Protección primaria del regulador.
- 4.- Regulador de voltaje.
- 5.- Protección secundaria del regulador.
- 6.- Medición de voltaje a la salida del regulador.
- 7.- Transformador elevador.
- 8.- Resistencia limitadora.
- 9.- Juego de explosores.
- 10.- Divisor capacitivo.
- 11.- Resistencia en la trayectoria a tierra (shunt).

Para probar los aisladores clase 15, 25 y 34.5 KV se recomiendan tres niveles con una separación de aproximadamente 45 cm. y una distancia entre chorros de 15 cm., para lograr la uniformidad en el humedecimiento de la muestra, así como los niveles de intensidad de lluvia recomendados. Se considera también que la boquilla se debe de operar con una presión entre 1.1 y 2.0 Kg/cm² y ubicando los aisladores entre cuatro y cinco metros. El ajuste final se logra con pequeños cambios de presión y distancia del aislador bajo prueba, hasta obtener los 45° de caída y de uno a dos mm/min. de intensidad. En la figura 6.12. se muestra el sistema hidráulico (S.H.) típico, y en la fotografía 6.7. se muestra el sistema de aspersión de éste equipo.



FOTOGRAFIA 6.7.
Equipo de aspersión de la
prueba de lluvia artificial.
(Cortesía I.I.E.)

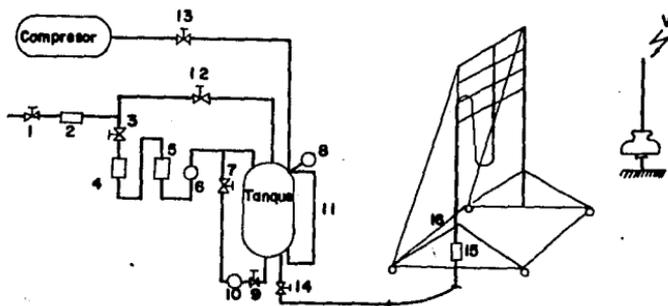


FIGURA 6.12. Diagrama del sistema hidráulico típico para prueba de lluvia artificial. (Cortesía I.I.E.)

En donde:

- 1,3,7,9,12) Válvulas para el flujo de agua.
- 2) Filtraje primario de agua cruda. (Procedimiento físico).
- 4) Resina sintética catiónica.
- 5) Resina sintética aniónica.
- 6) Indicador de calidad del agua desmineralizada.

- 8) Manómetro para conocer la presión en el interior del tanque.
- 10) Electrobomba para recirculación de la mezcla de aguas.
- 11) Indicador del nivel del agua dentro del tanque.
- 13) Compresor y válvula para el flujo de aire.
- 14) Salida de agua y válvula que alimenta el agua de lluvia.
- 15) Manómetro para conocer la presión de alimentación al sistema de lluvia.
- 16) Filtraje secundario de agua.

Las resinas que se mencionan con anterioridad son susceptibles de regeneración, haciendo fluir el reactivo regenerante convenientemente diluido en agua desmineralizada, através del lecho de resina.

Existen una gran variedad de SEH operando satisfactoriamente en los laboratorios de alta tensión de todo el mundo, pero el sistema propuesto en éste Instituto es uno de los que presenta mayores ventajas en cuanto a economía y funcionalidad.

En cuanto al desarrollo de la prueba, debemos cumplir con las siguientes recomendaciones* para que tengamos un índice alto de confiabilidad:

- 1.- Precipitación promedio de agua en componente vertical: 1 a 2 mm/min.
- 2.- Precipitación promedio de agua en componente horizontal: 1 a 2 mm/min.
- 3.- Rango permitido por cada componente: 0.5 a 2.5 mm/min.
- 4.- Agua colectada (en válvula adjunta) en las boquillas emisoras. Con resistividad de $100 \pm 15 \Omega$ -metro, corregida a 20°C.
- 5.- Antes de la prueba, prehumectar con un rocío directo a la muestra durante 15 minutos. Cayendo el agua en forma de gotas con un ángulo aproximado de 45°.
- 6.- La precipitación y su ángulo deben medirse con un vaso colector de dos bocas independientes, una vertical y otra horizontal, las cuales tendrán un área de 100 cm² a 750 cm².
- 7.- Se puede usar cualquier tipo y arreglo de boquillas emisoras de agua con tal de que satisfagan la precipitación recomendada.

* "Pruebas en alta tensión para aisladores de distribución "
Ing. Anibal Garza M.- Convenio México-Cuba. 1992.

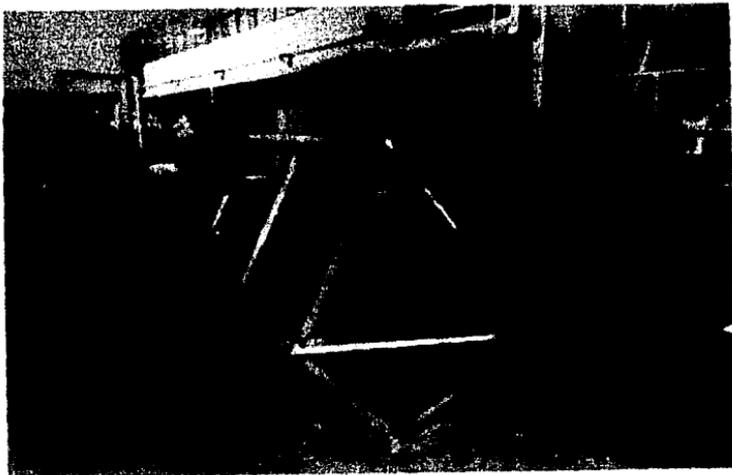
- 8.- Entre la muestra y cualquier otra estructura cercana, debe haber una distancia libre igual a 1.5 veces la longitud de la distancia de arqueo en seco más corta del aislador bajo prueba.
- 9.- Debe considerarse un factor de corrección por densidad de aire, el cual involucra las condiciones atmosféricas de referencia que son: $t_0=20^{\circ}\text{C}$ y $p_0=1013 \text{ mbar}= 760 \text{ mmHg}$ ("nivel del mar").
- 10.- La frecuencia eléctrica de la onda de voltaje de prueba preferentemente debe ser entre 40 y 62 Hz.
- 11.- La relación de la onda de voltaje de prueba entre valor pico y valor rms, será igual a la raíz de $2 \pm 5 \%$.
- 12.- La fuente de voltaje debe tener una corriente estabilizada de corto-circuito mayor a un ampere rms.
- 13.- La medición del valor pico del voltaje de prueba puede hacerse con un voltmetro de esferas, preferentemente al 100 % del voltaje de prueba.
- 14.- Los aisladores tipo alfiler o poste deben montarse sobre una base metálica aterrizada que sea recta, horizontal y lisa, con una anchura de 3" (76 mm) a 6" (152 mm) y una longitud tal que el flameo (arqueo) no se presente en sus extremos. En la parte superior -sobre la ranura del aislador- debe depositarse el electrodo energizado que será un tubo recto liso con un diámetro no menor a 1/2" (13 mm) sujeto, con al menos, dos vueltas de alambre calibre 8 AWG estrechamente enrollado a cada lado del aislador.

- 15.- Para la prueba específica de tensión de flameo, el voltaje puede incrementarse rápida y aproximadamente al 75 % del voltaje estimado de flameo en húmedo; el resto del voltaje se incrementa a manera que el tiempo de flameo no sea menor a 5 segundos ni mayor a 30 segundos después de que el 75 % del voltaje ha sido alcanzado
- 16.- El valor del flameo en húmedo de la muestra se obtiene con el promedio aritmético de no menos de 5 flameos individuales tomados consecutivamente. El lapso entre flameos consecutivos no debe ser menor a 15 segundos ni mayor a 5 minutos.
- 17.- Si se pretende verificar la tensión de aguante en húmedo para la muestra, se procede de la misma manera que para la prueba de flameo en húmedo; pero en lugar de propiciar éste fenómeno se sostiene el voltaje normalizado de prueba durante 60 segundos.
- 18.- El promedio de flameo en húmedo de tres aisladores probados debe ser igual o mayor al 90 % del valor nominal de flameo en húmedo.

6.1.2.10. EQUIPO EVALUADOR DE LA PRUEBA DE SINERGISMO EESA-1.

Este equipo surge por la necesidad que tienen los laboratorios en reproducir (en un solo equipo) los diferentes parámetros físicos que degradan los aislamientos eléctricos, incluido su efecto sinérgico.

Actualmente el I.I.E. se encuentra realizando los trabajos necesarios para realizar el equipo, teniendo concluidos los diseños de el EESA-1 (equipo evaluador de sinergismo en aisladores No.1) y se encuentra en proceso de construcción como lo muestra la fotografía 6.8.



FOTOGRAFIA 6.8. Armazón del EESA-1.
(Cortesía I.I.E.)

Una evaluación múltiple es muy difícil de realizar hasta la fecha. Todavía se tiene un conocimiento muy relativo de la forma en que interactúan los agentes que degradan a los aisladores sintéticos y aún no se conocen los niveles de esfuerzo que provocan daños significativos en cada tipo de material que se emplea en su fabricación.

Por otra parte, tampoco se cuenta con una técnica de evaluación apropiada que permita conocer el grado de deterioro del aislador y que a su vez permita tratar de hacer un intento para pronosticar su vida en servicio.

Las técnicas como la cromatografía, el análisis térmico diferencial, la espectrometría infrarroja, etc., muestran que efectivamente hay una degradación, y el saber en cuanto tiempo este estado de degradación provocará una falla del aislador es el objetivo principal del EESA-1.

Se pueda afirmar que al comenzar a trabajar esta prueba con este equipo, se obtendrán resultados satisfactorios que ayudarán a mejorar los materiales y el diseño de los aisladores sintéticos .

6.1.2.11. PRUEBAS TRADICIONALES.

Aún cuando los aislamientos sintéticos requieren de pruebas especiales que modelen los mecanismos de falla propios de estos aisladores, se tienen las normas tradicionales de prueba para los aisladores de porcelana, las cuales se están utilizando en los sintéticos, ya que definen en muchos casos los requerimientos del aislador bajo esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos. En forma general, estas pruebas se utilizan para determinar las características de los prototipos, siendo entre otras: voltaje de flameo en seco y húmedo, voltaje de flameo al impulso, (ya descritos) voltaje de radio interferencia, voltaje de perforación resistencia mecánica en tensión, compresión, torsión, cantilever choque térmico, arco de potencia, etc., y que variarán dependiendo del tipo de aislador que se vaya a probar.

6.1.3. TECNICAS DE EVALUACION EN CAMPO.

Con el objeto de conocer el comportamiento real de los aisladores se hace necesaria la aplicación de pruebas en condiciones naturales de servicio. Este tipo de pruebas es muy importante ya que permite la obtención directa de información acerca del comportamiento de distintos tipos de aisladores bajo evaluación. Son utilizables para comprobar la eficiencia de los métodos de prueba de laboratorio ya establecidos, así como para proponer nuevos. Sirven también para definir en cada evaluación cual método utilizar, además de ayudar a clasificar y ubicar el aislamiento en función del tipo y nivel de contaminación.

El objetivo principal de las pruebas en campo es evaluar el comportamiento de los aisladores en condiciones reales de operación. Se llevan a cabo en un sistema eléctrico donde los elementos sean afectados directamente por los factores ambientales del punto donde el nuevo aislador será asignado y en ocasiones para solucionar problemas particulares bajo condiciones críticas de contaminación o vandalismo.

Un programa de este tipo incluye la instalación de diferentes aisladores en uno o varios bancos de prueba con el objeto de validar estadísticamente su comportamiento mediante apreciación visual y mediciones utilizando la instrumentación adecuada.

a) Apreciación visual.

Esta etapa de la evaluación se realiza por medio de inspecciones visuales periódicas a fin de detectar el inicio y desarrollo de problemas tales como el de arrastre, erosión, agrietamiento, etc., así como la dinámica de acumulación de contaminantes.

b) Instrumentación.

Consiste en la recolección de información por medio de aparatos de medición y registro, está orientada principalmente a factores como corriente de fuga, parámetros ambientales, tipo y cantidad de contaminación, flameos, etc..

A pesar de que el tiempo requerido para obtener información relevante sobre el comportamiento de los aisladores, el inicio y desarrollo de algún mecanismo de degradación, etc., puede ser muy largo ya que en gran parte, su respuesta depende del diseño y tipo de material utilizado, mediante el análisis de la información

parcial obtenida es posible la elaboración de tablas de control que indiquen la evaluación de fallas, utilizando métodos estadísticos se pueden emitir pronósticos sobre el comportamiento de los aisladores a largo plazo.

6.1.3.1. ESTACIONES PARA PRUEBAS NATURALES EN AISLADORES.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas de tipo natural o de campo se efectúan en estaciones experimentales localizadas en puntos estratégicos, representativos de los modos reales de operación de los aisladores. Dada la extensión territorial de la República Mexicana, su gran variedad de climas, topografía, las condiciones meteorológicas y tipos de contaminación, fué necesario buscar una serie de sitios que simulen la gran variedad de condiciones a que están sujetos los aisladores. Se construyeron estaciones de prueba y monitoreo dentro de subestaciones eléctricas de la CFE y de la CL y FC. El nivel de tensión a la que se someten los aisladores bajo prueba dependerá de su disponibilidad en el sitio de ubicación.

Se pretende realizar un estudio completo sobre el comportamiento eléctrico de los aisladores ante contaminación y bajo condiciones naturales utilizados en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica de México. Es decir, se experimenta tanto en aisladores tipo alfiler como sobre cadenas de hasta 230 KV (no es posible experimentar sobre cadenas de 400 KV, debido a razones de seguridad del sistema eléctrico en algunos casos). Se contempla el análisis y diseño de materiales convencionales, aisladores poliméricos, semiconductores, etc. Además, se ponen en práctica los métodos preventivos existentes en contra de la contaminación, tales como el empleo de grasas, lavado de aisladores y sobreaislamiento.

De los resultados que se obtienen en los sitios de prueba, se darán diferentes opciones de solución al problema de contaminación en aisladores, así como un análisis costo-beneficio de cada una de ellas.

Las actividades experimentales que se realizan en las estaciones de prueba, son:

- a) Determinación del nivel de contaminación en aisladores.
- b) Comportamiento eléctrico de aisladores.
- c) Monitoreo de parámetros meteorológicos.
- d) Medición de la contaminación atmosférica.
- e) Determinación del número óptimo de aisladores.

6.1.3.1.1. DETERMINACION DEL GRADO DE CONTAMINACION EN AISLADORES.

Esta es una de las actividades principales de las estaciones de prueba. Existen varios métodos para realizar esta evaluación, en este caso utilizó la técnica en donde se cuenta con una medida de proporcionalidad directa del grado de contaminación en aisladores. Esta se obtiene al transformar la resistividad eléctrica medida del depósito contaminante en una concentración equivalente de solución salina con la misma resistividad. Esta determinación del nivel de contaminación se efectúa tanto en aisladores de distribución (tipo alfiler; 13.2, 23 o 34 KV.), como para cadenas de transmisión (69 hasta 230 KV.).

El objeto de esta actividad es establecer la dinámica de crecimiento de la contaminación depositada en los aisladores, considerando los parámetros meteorológicos en cada lugar.

6.1.3.1.2. COMPORTAMIENTO ELECTRICO DE AISLADORES.

Existen dos características fundamentales para evaluar el comportamiento eléctrico de los aisladores bajo condiciones de contaminación que son la intensidad de corriente de fuga, que fluye a través del aislador (éste debe presentar una resistencia infinita), y el número de flameos (es un arco eléctrico o flasheo) que se presente en un determinado periodo.

La corriente de fuga, que nos proporciona una indicación clara de la disminución de la resistencia eléctrica del aislador. Mediante un procesador de señales se registrará tanto el valor máximo positivo como el máximo negativo en un periodo determinado y se grabará esta información para su posterior análisis.

En la figura 6.13. se muestra, de manera esquemática, el circuito de medición que se utiliza en el I.I.E. para sensar la corriente de fuga en aisladores.

Desde el punto de vista técnico-económico, la cantidad de flameos que se presentan es un factor importante en la selección del aislador adecuado para las condiciones ambientales y de contaminación del lugar en cuestión. Este conteo es visual y lo realiza el personal encargado del cuidado de la estación experimental.

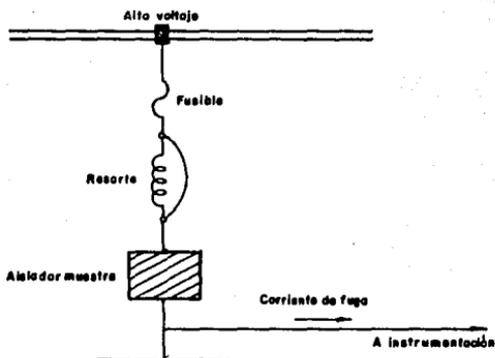


FIGURA 6.13. Circuito de medición de corriente de fuga.

6.1.3.1.3. MONITOREO DE PARAMETROS METEOROLOGICOS.

Esta actividad tiene por objeto registrar, en forma continua, los parámetros meteorológicos que, en mayor o menor grado, influyen sobre el comportamiento de los aisladores en ambientes contaminados.

Para llevar a cabo esta actividad, se adquirieron estaciones meteorológicas automáticas cuyos parámetros por monitorear son:

- Dirección y velocidad del viento.
- Precipitación pluvial.
- Temperatura.
- Humedad relativa.

Como en el caso de monitoreo de corrientes de fuga, también se utiliza un colector de datos, para registrar la información. Sin embargo, este colector es diferente puesto que su velocidad de

muestreo es menor; además, los valores que se almacenarán son el máximo y el promedio de cada periodo de muestreo, excepto para el caso de precipitación pluvial. Para este parámetro meteorológico, se registrará tanto la tasa de precipitación por periodo como su acumulación en un tiempo determinado. Asimismo, esta información se almacenará, también, para su análisis posterior.

Actualmente, dichas estaciones están sujetas a modificación en el I.I.E., para darles una aplicación específica de acuerdo a necesidades manifestadas por C.F.E. (Figura 6.14.).

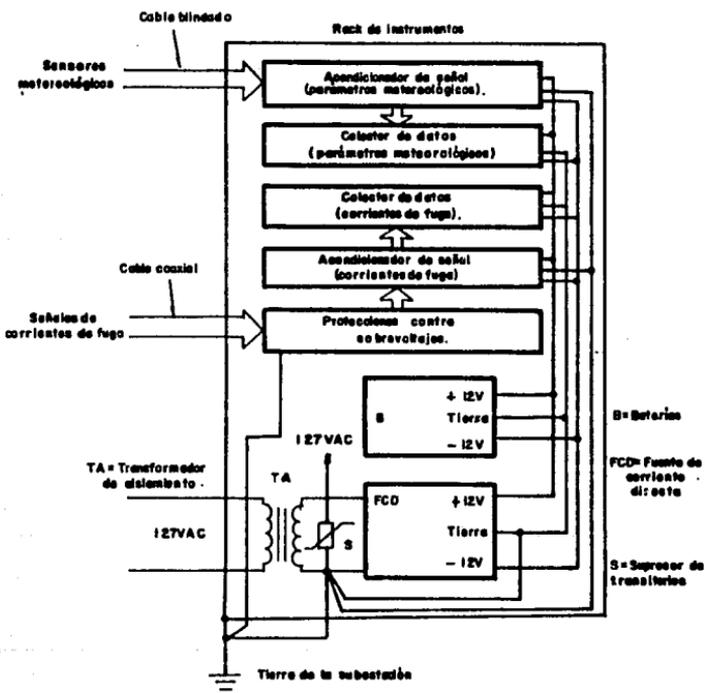


FIGURA 6.14. Esquema general de conexiones de alimentación y tierra.
(Cortesía I.I.E.)

CAPITULO VII

**VENTAJAS DEL ASEGURAMIENTO DE LA
CALIDAD DE UN LABORATORIO DE PRUEBAS**

**VENTAJAS DEL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD
EN UN LABORATORIO DE PRUEBAS**

El propósito de las actividades técnicas y administrativas que se realizan normalmente en cualquier laboratorio de pruebas eléctricas, es obtener resultados confiables, ya que la acertada evaluación de un objeto ensayado permite determinar la calidad de su diseño o de su material. Un dictamen erróneo de laboratorio puede propiciar -por ejemplo- la pérdida de miles de millones de pesos en producción defectuosa o un grave riesgo de seguridad para los consumidores, por la pobre calidad de los productos adquiridos. A esto debe aunarse el deterioro del prestigio del laboratorio, con las evidentes consecuencias que esto trae consigo.

En el caso de laboratorios de instituciones que se dedican a la investigación, la confiabilidad de sus resultados de prueba debe ser óptima, ya que en ello se sustenta el desarrollo de nuevas tecnologías.

Por ésta razón, la operación de un laboratorio debe caracterizarse por su organización, con base en la implementación de un buen programa de calidad; éste puede definirse como un conjunto de procedimientos que permiten la operación organizada, segura, confiable y eficiente de un laboratorio de pruebas. Su diseño y planificación deben correr por cuenta del jefe de laboratorio, poniendo un particular interés en la especificación clara de su operación y en la apropiada comunicación de la misma al personal responsable de llevarlas a cabo.

En los años cincuenta, en México, muchas empresas consideraban la calidad como algo gravoso y complejo, que eleva los costos de producción; sin embargo, poco a poco, se ha demostrado que la mala calidad de los productos fabriles ocasionan comparativamente costos mucho más altos que los que pudiera invertirse en un programa de aseguramiento de calidad, siempre y cuando éste se ubique en un punto de balance entre las altas pérdidas económicas por productos de calidad defectuosas y los costos excesivos por perfeccionismo en la calidad. Asimismo el incremento de los servicios en las diferentes dependencias del Gobierno Federal propició que este implantara mecanismos más rigurosos para controlar la calidad en sus bienes de consumo. Dicha labor sinérgica motivo un cambio paulatino de la mentalidad de los grandes empresarios, y dió inicio a una producción industrial con niveles de calidad más altos y constantes, además, la industria manufacturera está sujeta a la presión de la competencia con productos importados, en una política de fronteras abiertas y tienen la necesidad de sobrevivir exportando sus productos.

Actualmente, se ha reconsiderado buscar la calidad, aunque ya no con aquellos mecanismos que proporsionaban una "Calidad Aleatoria", a bienes y servicios, sino implantando los sistemas necesarios para lograr bienes que sean económicos, confiables y constantes. Estos sistemas son los programas de aseguramiento de calidad.

Los laboratorios de prueba - que son un poderoso soporte para el desarrollo de los diferentes sectores productivos porque, dependiendo de los resultados obtenidos en las evaluaciones y caracterizaciones que realizan, se tomen decisiones trascendentales - deben contar necesariamente con un buen programa

de aseguramiento de calidad para garantizar resultados de prueba confiables y expeditos.

Por ejemplo el Laboratorio Eléctrico del I.I.E., ha trabajado más de cinco años con un programa de éste tipo asentando un documento de poco más de 200 páginas, donde se detallan los aspectos indispensables para su correcta operación. Es decir, se trata de un documento rector que permite la continua operación confiable del sistema, sin que éste se vea afectado por renunciaciones, rotación de personal, suplencias, criterios objetivos y decisiones que pudieran presentarse.

Si a un ingeniero de pruebas eléctricas, recién contratado, se le solicita que de manera urgente realice una prueba de tensión de aguante en húmedo, a un aislador soporte clase 25 KV, según la especificación de la norma ANSI C 29.1-1988, una secuencia obligada para éste trabajo sería:

- 1.- Consultar si el laboratorio tiene el personal y las instalaciones necesarias para realizar la prueba, antes de aceptar formalmente el servicio.
- 2.- Acudir al programa de órdenes de trabajo para conocer los servicios pendientes en el proceso, y determinar la viabilidad de realizar con la celeridad debida el ensayo solicitado.
- 3.- Verificar o informar al cliente el mecanismo adecuado de solicitud de prueba y la aceptación de costo de la misma.

- 4.- Confirmar u obtener la última edición de la norma señalada para la prueba y conocer el mecanismo administrativo para obtenerla rápidamente.
- 5.- Con base en los programas de mantenimiento preventivo - correctivo, determinar si el sistema de potencial aplicado en alta tensión y el sistema de lluvia artificial están en condiciones de uso inmediato.
- 6.- Contar con instrumentos de medición debidamente calibrados en laboratorios acreditados para la Dirección General de Normas.
- 7.- Conocer el procedimiento para dar al agua del tanque hidroneumático la resistividad especificada en la norma.
- 8.- Conocer al mecanismo para operar el sistema hidráulico, incluyendo el procedimiento de desmineralización de agua.
- 9.- Saber la manera de coleccionar y medir confiablemente los componentes vertical y horizontal de lluvia artificial, y verificar la acometida de lluvia a 45° C.
- 10.- Conocer el manejo de la consola de control del sistema de potencial aplicado.
- 11.- Verificar que los sistemas de seguridad operen, en caso de un flameo del aislador.
- 12.- Conocer el reglamento de seguridad y su aplicación para ésta prueba.
- 13.- Realización de la prueba de acuerdo con la norma.

- 14.- Conocer el mecanismo de compensación por densidad de aire, manejo y lectura de instrumentos de registro de parámetros ambientales, inclusive.
- 15.- Asentamiento de los datos en el registro oficial de prueba (bitácora).
- 16.- Elaboración del informe adecuado con el procedimiento indicado.
- 17.- En caso de problemas durante la prueba, saber a quién consultar y dónde encontrarlo.

A manera de resumen, puede decirse que contar con un programa de aseguramiento de la calidad en un laboratorio de pruebas propicia ventajas, tales como:

- a) Información técnica y archivo.
- b) Rotación de personal.
- c) Calibración y contratación de equipo.
- d) Mantenimiento.
- e) Procedimientos de prueba.
- f) Operación de equipo.
- g) Organización administrativa.
- h) Seguridad.
- i) Confiabilidad.

En general, el conjunto de estas ventajas representa una optimización operativa de todas las funciones inherentes a un laboratorio de pruebas.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En resúmen, los aisladores sintéticos se usan actualmente en un buen número de equipos, líneas de transmisión y distribución como accesorios normales de fabricación; también se usan con propósitos experimentales o como medida emergente ante problemas de contaminación y vandalismo. Un ejemplo de lo anterior es que en zonas de alta contaminación de la zona Metropolitana se comienzan a colocar los aisladores sintéticos en circuitos de distribución a medianas tensiones; también se pueden apreciar en las redes de distribución que vienen de la subestación Topilejo en el D.F. En Estados Unidos, existe un total de 5173 kilómetros de líneas de transmisión que utilizan aisladores sintéticos, con buenos resultados a la fecha.

Dichos aisladores han mostrado eficiencia para casos especiales, por las ventajas electromecánicas. Sin embargo, se ha reconocido que algunos aisladores sintéticos tienen un substancial problema de envejecimiento que redundo en el deterioro de sus propiedades, tanto mecánicas como dieléctricas en función del tiempo, ya que se han reportado diversos mecanismos de falla en los aisladores sintéticos después de un cierto período de uso. Como ya se mencionó con oportunidad en éste trabajo, el elemento más activo en el envejecimiento es la exposición a la luz ultravioleta proveniente del Sol, lo cual actualmente se intenta contrarrestar mezclando inhibidores de uv con el polímero, por ejemplo el quelato de níquel. Para efectos de corrosión se está experimentando el alfiler de concreto polimérico, que por su naturaleza es ajeno a la corrosión. Actualmente se encuentra en una línea experimental de C.F.E.

A pesar de lo anterior, han sido estos registros los que determinan que en muchos casos, los problemas se encuentren en el proceso de su manufactura, malos manejos de instalación, etc., y han podido ser resueltos mediante mejoras a los moldes o al diseño de los aisladores para poder operar bajo las condiciones más críticas de servicio. Todo esto se logra con una investigación y pruebas sobre los materiales que día con día se reforan y, sobre todo, se mejoran y preparan para funcionar dentro de las condiciones que se tienen en el territorio Nacional gracias a la labor que se tiene en los laboratorios especializados de nuestro país.

Es importante considerar que a pesar de los problemas encontrados, muchos fabricantes de aisladores convencionales han abierto sus líneas de investigación hacia los materiales sintéticos tratando de mantenerse dentro del estado de arte de la funcionalidad. En base a esto, y mediante el uso de nuevas técnicas de evaluación, es posible predecir que los aisladores sintéticos estarán en un futuro cercano compitiendo y sustituyendo a los aislamientos de vidrio y porcelana, con una gran variedad de diseños y aplicaciones.

Para lograr tener en México una serie de aisladores adecuados y, sobre todo, que cumplan con las normas Internacionales es indispensable que tanto los laboratorios que dependen de la C.F.E. como los de la Iniciativa Privada, sean confiables. Para ello, se requiere que los equipos de prueba e instalaciones pasen una inspección y sean aprobados por personal del Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Prueba (SINALP), organismo dependiente de la D.G.N.

Esto es muy importante ya que la confiabilidad de evaluación y diseño, propician mejores aisladores que signifiquen una mayor continuidad de servicio eléctrico, ya que actualmente sus frecuentes interrupciones en líneas de distribución representan pérdidas económicas significativas para la industria nacional.

Debido al tiempo necesario para efectuar una evaluación integral de aisladores prototipos, es indispensable una buena organización y dirección de los experimentos a realizar, tomando en cuenta que no solamente tienen que intervenir la Ingeniería Eléctrica sino también las áreas físico-química y mecánica.

En éste trabajo se trata de dar un panorama sobre los aisladores sintéticos y algunas de las pruebas que se realizan, para la evaluación de los mismos. Es importante conocerlas ya que un Ingeniero Eléctrico debe siempre estar al tanto en cuanto a los nuevos materiales que día a día se implementan en las redes de transmisión de energía eléctrica y, en aislamientos que permitan una mejor actuación de los equipos. Esto permite al Ingeniero desempeñarse con éxito en funciones tales como el diseño, compras, ventas, laboratorio y testimonio de pruebas.

Esperamos que este modesto trabajo, cumpla con su cometido.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- LOOMS, J.S.T., and PROCTOR, F.H.: "THE DEVELOPMENT OF AN EPOXY-BASED INSULATOR FOR UHV", IEEE A 76 342-6, 1976.
- 2.- TAYLOR, D.: "DISC INSULATORS: A TECHNICAL REVIEW AND A DESIGN PHILOSOPHY", DUOLTON INSULATORS Ltd., TAMWORTH, UK, 1981.
- 3.- NGK INSULATORS LTD.: "STUDY OF POLLUTION PROBLEM". TECHNICAL NOTE 68069, MIZUHO, NAGOYA, JAPAN, 1968.
- 4.- WOODSON, H.H., and McELROY, A.J.: "INSULATORS WITH CONTAMINATED SURFACES", IEEE TRANS., 1970, PAS-89, P.1858.
- 5.- KUFFEL, E. and ZAENGL, W.S.: "HIGH VOLTAGE ENGINEERING". Mc GRAW HILL, PP. 56-65. 1979.
- 6.- GARZA MACIAS ANIBAL.: "VENTAJAS DEL ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE UN LABORATORIO DE PRUEBAS". BOLETIN DE LA IIE, ENERO-FEBRERO DE 1990. PP 12-14.
- 7.- BOLETIN TECNICO LAPEM. LABORATORIO DE PRUEBAS Y ENSAYOS DE MEXICO. C.F.E.NUM.1 JULIO-AGOSTO, 1983 IRAPUATO, GTO. PP 21-29.
- 8.- IIEC GUIDE FOR AGING MECHANISMS AND DIAGNOSTIC PROCEDURES IN EVALUATING ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS. ANSI-IEEE Std 943. MARZO 1986.
- 9.- "ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLID INSULATING MATERIALS". AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 926. ENGINEERING DIELECTRICS VOL.II-B. 1987.

- 10.- "STANDARD PRACTICE FOR OPERATING LIGHT AND WATER EXPOSURE APARATUS (FLUORECENT, uv, CONDENSATION TYPE) FOR EXPOSURE OF NONMETALLIC MATERIALS". AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 626. 1988. PP.12-17.
- 11.- "EXPERIMENTAL TECHNICS FOR INVESTIGATING THE DEGRADATION OF ELECTRICAL INSULATORS".ELECTRICAL POWER RESERCH INSTITUTE (1981).PP.23-25.
- 12.- "GUIDE FOR THE EVALUATION AND IDENTIFICATION OF INSULATING SYSTEMS OF ELECTRICAL EQUIPMENT". PUBLICATION 505. I.E.C. REPORT 1985.
- 13.- "PRUEBAS EN AISLADORES SINTETICOS". NORMA ANSI 91-1-1989
- 14.- IEC-SCJ6B-WG6-IWD-91-214. PUNCTURE TESTING OF INSULATORS OF CERAMIC MATERIAL OR GLASS FOR OVERHEAD LINES WITH A NOMINAL VOLTAGE GREATER THAN 1000 V. (1991).
- 15.- F.A. CHAGAS, D.R.DE MELLO. ENSAIO DE PERFURACAO COM IMPULSO EM ISOLADORES. CENTRO DE PESQUISIAS DE ENERGIA ELECTRICA (1990)
- 16.- ONTARIO-HYDRO RESERCH DIVISION REPORT No.EG79-15-K
- 17.- "PRUEBAS DE IMPULSO DE FRENTE PRONUNCIADO EN AISLADORES DE DISTRIBUCION". JORGE GONZALEZ DE LA VEGA. RVP-I.E.E.C.-91.
- 18.- GARZA MACIAS ANIBAL. "DEGRADACION POR EFECTO SINERGICO EN AISLADORES SINTETICOS". BOLETIN I.I.E. MAYO-JUNIO 1991 VOL.15.
- 19.- GARZA MACIAS ANIBAL. "SISTEMA PARA PRUEBA DE LLUVIA ARTIFICIAL EN AISLADORES ELECTRICOS HASTA 34.5 KV". RVP-I.E.E.E. 1988.