



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**



**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL
CÁLCULO ELÉCTRICO DEL AISLAMIENTO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE
TRANSMISIÓN A PARTIR DE 400 kV**

**Miguel J. Soteldo P.
Edgar A. Piña S.**

Valencia, Julio de 2004



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**



**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL
CÁLCULO ELÉCTRICO DEL AISLAMIENTO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE
TRANSMISIÓN A PARTIR DE 400 kV**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE
CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**Miguel J. Soteldo P.
Edgar A. Piña S.**

Valencia, Julio de 2004



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado: **“Elaboración de una Herramienta Computacional para el Cálculo Eléctrico del Aislamiento de las Líneas Aéreas de Transmisión a Partir de 400 kV”**, realizado por los Bachilleres: Miguel J. Soteldo P., Cédula de identidad: 13.508.093, y Edgar A. Piña S., Cédula de identidad: 14.628.759, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Jorge Gómez
TUTOR

Prof. Milagros Peña
JURADO

Prof. Francisco Naveira
JURADO

Valencia, Julio de 2004

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3. OBJETIVOS	
1.3.1. GENERAL.....	4
1.3.2. ESPECÍFICOS.....	5
1.4. ALCANCE.....	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EL AISLAMIENTO ELÉCTRICO

2.1.1. Aislantes, conductores y semiconductores. Conceptos básicos.....	6
2.1.2. Análisis molecular de las sustancias.....	7
2.1.3. Conducción eléctrica en aislantes, conductores y semiconductores.....	14
2.1.4. El dieléctrico.....	15
2.1.5. Clasificación del aislamiento eléctrico.....	17

2.2. LOS AISLADORES

2.2.1. Breve reseña histórica.....	18
2.2.2. Funciones.....	19
2.2.3. Características generales de los aisladores.....	19
2.2.4. Clasificación de los aisladores.....	21
2.2.5. Comparación del desempeño de los aisladores para líneas.....	39

2.3. ESFUERZOS ELÉCTRICOS Y PARÁMETROS AMBIENTALES QUE AFECTAN AL AISLAMIENTO

2.3.1. Esfuerzos de voltaje sobre el aislamiento.....	42
2.3.2. Parámetros ambientales que afectan al aislamiento.....	71

2.4. REVISIÓN DE LA EXPERIENCIA OPERATIVA DEL DESEMPEÑO DE AISLADORES EN LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN	
2.4.1. Experiencias venezolanas.....	81
2.4.2. Otras experiencias.....	90
2.5. ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS, CRITERIOS Y NORMAS PARA EL CÁLCULO ELÉCTRICO DEL AISLAMIENTO	
2.5.1. Definición de términos.....	96
2.5.2. Concepto esfuerzo – rigidez (<i>stress – strength</i>).....	99
2.5.3. Diseño del aislamiento por sobretensiones a frecuencia industrial.....	106
2.5.4. Diseño del aislamiento por sobretensiones de maniobra.....	114
2.5.5. Diseño ante descargas atmosféricas.....	124
2.5.6. Recomendaciones para los requerimientos de aislamiento por fabricantes.....	146

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. SELECCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS, CRITERIOS Y NORMAS A EMPLEAR PARA EL DISEÑO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	
3.1.1. Procedimiento de diseño a seguir para el cálculo eléctrico del aislamiento.....	151
3.1.2. Dimensionamiento del aislamiento.....	151
3.1.3. Cálculo de distancias mínimas eléctricas a masa.....	158
3.1.4. Verificación del aislamiento ante descargas atmosféricas.....	162
3.2. SELECCIÓN DEL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN MÁS ADECUADO PARA EL DESARROLLO DE LOS PROCEDIMIENTOS REQUERIDOS	
3.2.1. Características adoptadas para la evaluación de los lenguajes.....	163
3.2.2. Resultados de la evaluación.....	164
3.3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA COMPUTARIZADA	
3.3.1. Elementos principales de la aplicación.....	165
3.3.2. Codificación.....	169
3.3.3. Empaquetado.....	172

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 REQUERIMIENTOS DE SISTEMA.....	174
4.2 INSTALACIÓN DEL PROGRAMA.....	174
4.3 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA FUNCIONALIDAD DEL PROGRAMA	
4.3.1. Proyecto.....	176
4.3.2. Edición y formato.....	180
4.3.3. Diseño.....	181
4.3.4. Configuración.....	197
4.3.5. Manual.....	201
4.4 VALIDACIÓN	
4.4.1. Primer ejemplo. Reportes.....	204
4.4.2. Segundo ejemplo. Reportes.....	214
4.4.3. Reporte de la configuración del programa.....	219

ONCLUSIONES.....	220
-------------------------	------------

RECOMENDACIONES.....	222
-----------------------------	------------

APÉNDICES

APÉNDICE A: PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN EL PERFIL DEL AISLADOR.....	223
APÉNDICE B: EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN AISLADORES.....	230
APÉNDICE C: CÁLCULO ELÉCTRICO MODELO DEL AISLAMIENTO PARA LÍNEAS EHV.....	246
APÉNDICE D: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS MÍNIMAS A MASA.....	282
APÉNDICE E: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO EMPLEADO POR EL PROGRAMA.....	292

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	299
--	------------

BIBLIOGRAFÍA.....	305
--------------------------	------------

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal desarrollado durante la realización de este trabajo de grado es el de elaborar una herramienta computacional capaz de realizar el cálculo eléctrico del aislamiento de las líneas aéreas de transmisión de extra y ultra alto voltaje, empleando una metodología elaborada a través de la adecuada selección de normas, criterios y modelos matemáticos. Para el logro de este propósito se definen una serie de objetivos más específicos, entre los cuales se tienen el describir y explicar los conceptos básicos asociados al aislamiento eléctrico de las líneas aéreas de transmisión, identificar aquellos esfuerzos eléctricos y parámetros ambientales que afectan el aislamiento de las líneas aéreas, señalar las experiencias de operación de las principales empresas de transmisión de energía eléctrica de Venezuela en cuanto al desempeño de los aisladores instalados, analizar los principales criterios, normas y métodos de cálculo para el diseño eléctrico del aislamiento propuestos por fabricantes e institutos de investigación así como seleccionar los más adecuados que permitan establecer el diseño eléctrico del aislamiento de la línea en proyecto según sean sus características y las del área geográfica que ésta atraviese; y por último elaborar la herramienta computacional que ejecute propiamente el cálculo eléctrico del aislamiento.

El área de aplicación que enmarca el desarrollo de este trabajo corresponde a la de la investigación y diseño del aislamiento eléctrico de las líneas de transmisión a partir de 400 kV.

Del procedimiento de trabajo empleado se puede concretar que primero se realiza un desarrollo teórico del tema del aislamiento eléctrico, donde se explican las características físicas de las sustancias aislantes y que las diferencian de otras sustancias como los conductores, luego de lo cual se hace una descripción de los aisladores en general usados en las líneas de transmisión actuales donde se exponen sus características tales como constructivas y de diseño, especificaciones, y comparaciones entre los diversos tipos.

Para identificar los esfuerzos eléctricos y los parámetros ambientales que afectan al aislamiento, se presentan y analizan las principales y más severas solicitaciones que se presentan en los sistemas eléctricos de transmisión y que afectan al aislamiento eléctrico, tales como las sobretensiones eléctricas tanto internas como externas al sistema. Luego se explican los distintos parámetros ambientales que afectan el desempeño del aislamiento y que por ende están relacionados con el cálculo. Seguidamente se presentan algunos casos resaltantes de la experiencia de operación de aisladores instalados de importantes empresas eléctricas de transmisión como C.V.G. EDELCA (Electrificación del Caroní).

Posteriormente, para seleccionar las normas, criterios y modelos matemáticos a emplear en el cálculo eléctrico del aislamiento para el desarrollo del programa, se hace un análisis de los principales criterios, normas y métodos de cálculo propuestos por fabricantes e institutos de investigación como el EPRI (*Electric Power Research Institute*). Luego, con el fin de desarrollar la herramienta computacional, se siguió una metodología en base a los criterios, normas y métodos de cálculo seleccionados, además de tomar en cuenta el procedimiento utilizado por EDELCA para el diseño de sus líneas a 400 y 765 kV.

El presente trabajo se encuentra estructurado en cuatro capítulos principales. En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema, el cual define los objetivos que se desean lograr. En el segundo, se presenta el marco teórico referencial, en donde se describe la información teórica de mayor aplicación para el desarrollo de este trabajo. En el tercer capítulo se describe la metodología utilizada para el logro del objetivo principal de este trabajo, esto es la elaboración del programa. Y en el cuarto capítulo se presenta un análisis completo y detallado de los resultados obtenidos. Finalmente se exponen las conclusiones y una serie de recomendaciones que van dirigidas principalmente al buen manejo, uso y explotación de la aplicación elaborada con el desarrollo del presente trabajo.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ampliación de los sistemas eléctricos, así como la transmisión de considerables bloques de energía eléctrica desde lugares remotos hasta los centros de carga, crearon la necesidad de incrementar los niveles de tensión en los sistemas de transmisión, dando lugar a su crecimiento y desarrollo en general.

En estos sistemas, uno de los problemas más importantes que afecta al desempeño de sus líneas aéreas de transmisión, es la ocurrencia de fallas a través del aislamiento, por cuanto es de suma importancia al momento de diseñar, garantizar un aislamiento apropiado para estas líneas, pues de ello depende en gran medida la confiabilidad del sistema.

Los elementos aislantes para exteriores están sometidos a una gama de condiciones anormales en su operación, tales como sobretensiones y condiciones climáticas adversas entre otros, que de no garantizarse la calidad apropiada en los mismos, se presentarían fallas e interrupciones en el sistema, que se traducen en la suspensión del servicio de suministro de energía eléctrica a los usuarios.

Para implementar el aislamiento externo se utilizan diferentes tipos de aisladores, cada cual diseñado para específicas condiciones de trabajo, entendiéndose como condiciones de trabajo a las condiciones climáticas reinantes en el área geográfica de estudio y a las exigencias de aislamiento de la línea de transmisión a proyectar. Entre esta variedad de aisladores, es necesario seleccionar el apropiado para las condiciones de trabajo de que se trate.

Debido a la diversidad de condiciones de trabajo existentes, y a la necesidad de incrementar la confiabilidad en los sistemas eléctricos, institutos de investigación y fabricantes se han dado la tarea de establecer criterios, normas y métodos de cálculo para el diseño eléctrico del aislamiento de las líneas

aéreas de transmisión en general, y particularmente en el área del extra y ultra alto voltaje por tratarse de sistemas de suma importancia.

La existencia de tales métodos de cálculo, criterios y normas, así como la experiencia obtenida de la operación de las empresas de transmisión de energía eléctrica referente al desempeño del aislamiento, permiten proporcionar una sólida base para la elaboración de un *software* que permita diseñar eléctricamente el aislamiento, siguiendo una metodología que sea confiable y aplicable a los distintos escenarios que pudieran presentarse en el marco del diseño del área de proyectos de ingeniería de sistemas eléctricos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este trabajo se justifica principalmente por la necesidad de disponer de un *software* para el cálculo eléctrico del aislamiento debido a la complejidad de los cálculos involucrados.

De esta forma, el *software* permitirá realizar los cálculos necesarios para la obtención de todos los parámetros que caracterizan el aislamiento eléctrico de una línea de transmisión de extra o ultra alto voltaje. Así, se dispondrá en un solo paquete todos los procedimientos de cálculo inherentes al aislamiento, evitando el uso de diferentes aplicaciones y cálculo a mano para conseguir los parámetros que definen el diseño completo del aislamiento.

Con la elaboración de este trabajo se establece un aporte a la Universidad de Carabobo, ya que servirá de herramienta para futuros trabajos de grado, de investigación y asesoría en el área.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional para el cálculo eléctrico del aislamiento de las líneas aéreas de transmisión a partir de 400 kV, a través de una adecuada selección de las normas, criterios y modelos matemáticos a emplear.

1.3.2. ESPECÍFICOS

1. Describir y explicar los conceptos básicos asociados al aislamiento de las líneas aéreas de transmisión.
2. Identificar los esfuerzos eléctricos y parámetros ambientales a los cuales se ve afectado el aislamiento de las líneas aéreas de transmisión.
3. Señalar las experiencias de operación de las principales empresas de transmisión de energía eléctrica de Venezuela en cuanto al desempeño de los aisladores instalados, así como las de algunas empresas foráneas.
4. Analizar los principales criterios, normas y métodos de cálculo para el diseño del aislamiento propuestos por fabricantes, institutos de investigación y normas.
5. Seleccionar las normas, criterios y modelos matemáticos más adecuados que permitan establecer el diseño eléctrico del aislamiento, según sean las características generales de la línea de transmisión a proyectar y del área geográfica en estudio.
6. Elaborar la herramienta computacional capaz de ejecutar el cálculo eléctrico del aislamiento siguiendo la metodología recomendada.

1.4. ALCANCE

Este estudio se basa en un análisis técnico y conceptual, pero que también considera información pertinente a la operación de los sistemas de transmisión en cuanto al desempeño de sus aisladores instalados. Así mismo, este trabajo de investigación se centra en el diseño del aislamiento

desde el punto de vista eléctrico en sistemas de transmisión con niveles de tensión a partir de 400 kV A.C..

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. EL AISLAMIENTO ELÉCTRICO

2.1.1. Aislantes, conductores y semiconductores. Conceptos básicos

Es conveniente clasificar las sustancias en términos de su capacidad para conducir carga eléctrica:

Los conductores eléctricos son materiales donde las cargas se mueven con bastante libertad, mientras que los aislantes eléctricos son materiales donde las cargas eléctricas no se mueven con tanta libertad. Entre estos materiales aislantes se destacan los conocidos como *dieléctricos* (ver sección 2.2.4). Por otra parte, existe una tercera clase de materiales llamados semiconductores, cuyas propiedades eléctricas se encuentran entre las de los aislantes y las de los conductores.

Materiales como el vidrio, el caucho y la madera entran en la categoría de aislantes eléctricos. Cuando dichos materiales se cargan por frotamiento, sólo el área que se frota queda cargada y la carga no puede moverse a otras regiones del material.

En contraste, materiales como el cobre, el aluminio y la plata son buenos conductores eléctricos. Cuando estos materiales se cargan en alguna pequeña región, la carga se distribuye rápidamente por sí sola sobre toda la superficie del material.

Véase el siguiente ejemplo: si se toma con la mano una barra de cobre y se frota con lana o piel, no atraerá un pequeño pedazo de papel. Esto podría sugerir que el metal no puede cargarse. Sin embargo, si se sostiene la barra de cobre por medio de un mango de madera mientras se frota, la barra permanecerá cargada y atraerá el pedazo de papel. Esto se explica del modo siguiente: sin la madera aislante las cargas eléctricas producidas por frotamiento se moverán con rapidez del cobre a través del cuerpo y finalmente hacia la tierra. El mango de madera aislante evita el flujo de carga hacia la mano.

En los metales, un experimento llamado *efecto Hall*, demuestra que las cargas negativas (electrones) son las que pueden moverse libremente. Cuando los átomos de cobre se unen para formar el cobre sólido, sus electrones exteriores no permanecen unidos a cada átomo, sino que quedan en libertad de moverse dentro la estructura reticular rígida formada por los centros de los iones cargados positivamente. A estos electrones móviles se les llama *electrones de conducción*. En contraparte, las

cargas positivas en una varilla de cobre permanecen tan inmóviles como lo están en una varilla de vidrio.

La distinción entre conductores y aislantes resulta más cuantitativa cuando se considera el número de electrones de conducción disponibles en una cantidad de material dada. En un conductor típico, cada átomo puede contribuir con un electrón de conducción y, por tanto, debería haber unos 10^{23} electrones de conducción por cm^3 en promedio. En cambio, en un aislante a la temperatura ambiente es en general poco probable encontrar siquiera un electrón de conducción por cm^3 .

En otro orden de ideas, materiales como el silicio y el germanio son ejemplos bien conocidos de semiconductores utilizados comúnmente en la fabricación de dispositivos electrónicos. Un semiconductor típico puede contener entre 10^{10} y 10^{12} electrones de conducción por cm^3 . Una de las propiedades de los semiconductores que los hace tan útiles, es que la densidad de los electrones de conducción puede cambiarse pronunciadamente mediante cambios pequeños en las condiciones del material, introduciendo, por ejemplo, pequeñas cantidades (menos de una parte en 10^9) de impurezas o variando el voltaje aplicado, la temperatura o la intensidad de la luz que incide sobre el material.

2.1.2. Análisis molecular de las sustancias

Para explicar las diferencias entre materiales aislantes, conductores y semiconductores mediante el examen de sus distribuciones electrónicas (sección 2.2.3), se debe primero describir los mecanismos de enlace en las moléculas y mostrar cómo se combinan para formar sólidos.

➡ Enlaces moleculares

Los mecanismos de enlace en una molécula se deben principalmente a fuerzas eléctricas entre átomos. La fuerza responsable del enlace entre los átomos en las moléculas es la misma fuerza electrostática que enlaza a los electrones en los átomos. Sin embargo, los átomos son de ordinario eléctricamente neutros, y por lo tanto no ejercerían una fuerza electrostática entre ellos. Así, para que existan enlaces moleculares entre los átomos debe ocurrir cierto reajuste de la estructura electrónica de los mismos. Por ejemplo, en una molécula de hidrógeno, H_2 , la separación entre sus dos protones es de 0.074 nm, comparable al radio de la orbita electrónica más baja del hidrógeno atómico, H, 0.0529 nm. Al electrón individual de hidrógeno atómico le gustaría adquirir un socio que llenase la capa 1s y, por consiguiente, el electrón de un átomo de H puede considerarse como si formase una pareja con el otro electrón de la misma capa.

Se puede ver este enlace como si se originara de una acción compartida de electrones. Los electrones no pertenecen a ningún protón. En efecto, cada protón atrae al par de electrones, y esta atracción es suficiente para vencer la repulsión de Coulomb de los protones.

La energía potencial total de un sistema de dos átomos (U) puede aproximarse por una expresión de la forma:

$$U = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m} \quad (2.1)$$

donde r es la distancia de separación internuclear, A y B son parámetros asociados con las fuerzas atractivas y repulsivas, y n y m son enteros pequeños. En la figura 2.1 se grafica la energía potencial total *versus* la distancia de separación internuclear para un sistema de dos átomos. A grandes distancias de separación, la pendiente de la curva es positiva, lo que corresponde a una fuerza atractiva neta. Cuando los átomos están muy próximos entre sí, la pendiente es negativa, lo cual indica una fuerza repulsiva neta. En la distancia de separación de equilibrio, las fuerzas atractiva y repulsiva apenas se equilibran: la energía potencial tiene su valor mínimo y la pendiente de la curva es cero. La diferencia existente entre el valor de energía correspondiente a una separación internuclear muy grande y el valor de energía potencial mínima, se conoce como *energía de disociación*. Desde el punto de vista conceptual, la energía de disociación es aquella energía necesaria para separar la molécula en dos átomos neutros.

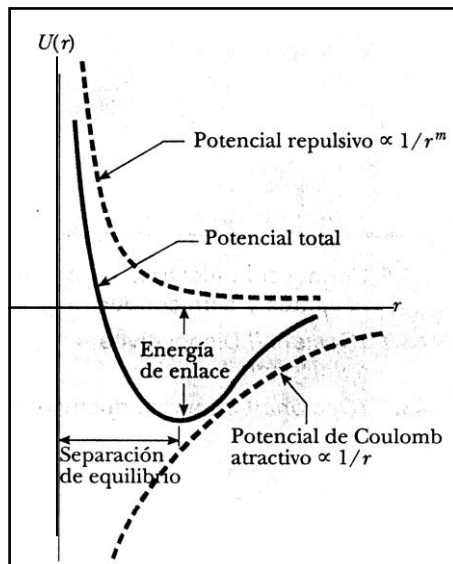


FIGURA 2.1. Energía potencial total como función de la distancia de separación internuclear para un sistema de dos átomos.

Una descripción completa de los mecanismos de enlaces en moléculas es muy complicada debido a que involucra las interacciones mutuas de muchas partículas. Por tanto, a continuación, sólo se analizan algunos modelos simplificados: enlace iónico, enlace covalente, fuerzas de van der Waals y puente de hidrógeno.

- **Enlace iónico**

Cuando dos átomos se combinan de tal manera que uno de ellos proporciona uno o más de sus electrones exteriores al otro, el enlace formado se denomina enlace iónico. Los enlaces iónicos se deben fundamentalmente a la atracción de Coulomb entre iones con cargas opuestas.

Por ejemplo, para el cloruro de sodio (NaCl) en el cual el sodio tiene una configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s$, resulta fácil su ionización, al proporcionar su electrón del orbital s de la capa 3 para formar un ión Na^+ . La energía requerida para ionizar el átomo con el fin de formar Na^+ es 5.1 eV. El cloro, cuya configuración es: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$, es menos estable que el ión Cl^- , ya que las configuraciones de capa llena son más estables que las de capa no llena (la configuración electrónica es la distribución de los electrones de un átomo en capas que pueden contener uno o más orbitales). La energía liberada cuando un átomo toma un electrón recibe el nombre de *afinidad electrónica* del átomo. El cloro tiene una afinidad electrónica de 3.7 eV. Por tanto, la energía requerida para formar Na^+ y Cl^- a partir de átomos aislados es $5.1 - 3.7 = 1.4$ eV.

La energía total *versus* la distancia de separación internuclear para el NaCl se grafica en la figura 2.2. La energía de disociación en este caso es de 4.2 eV.

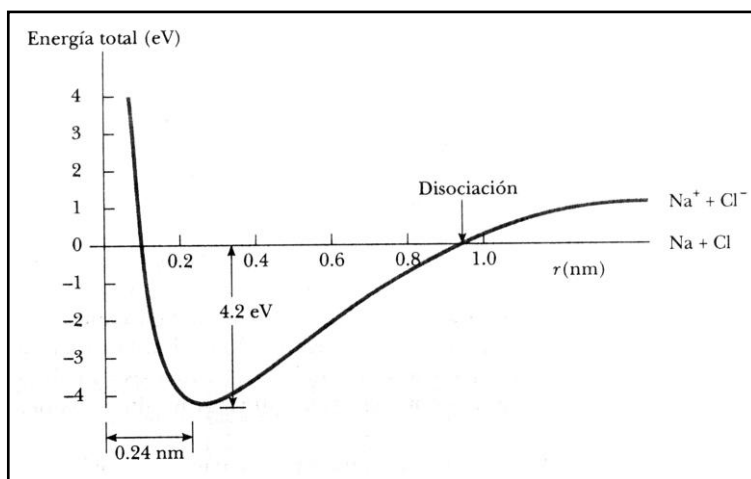


FIGURA 2.2. Energía total versus distancia de separación internuclear para iones Na^+ y Cl^- .

- **Enlace covalente**

Un enlace covalente entre dos átomos es uno en el cual los electrones suministrados por uno o ambos átomos son compartidos. Muchas moléculas diatómicas, como H_2 , F_2 y CO deben su estabilidad a enlaces covalentes. La densidad electrónica es grande en la región entre los dos núcleos, con los electrones actuando como el “pegamento” que mantiene unidos a los núcleos, como se muestra en la figura 2.3a para el caso del H_2 , cuya energía de disociación es de 4.5 eV, según se indica en la figura 2.3b.

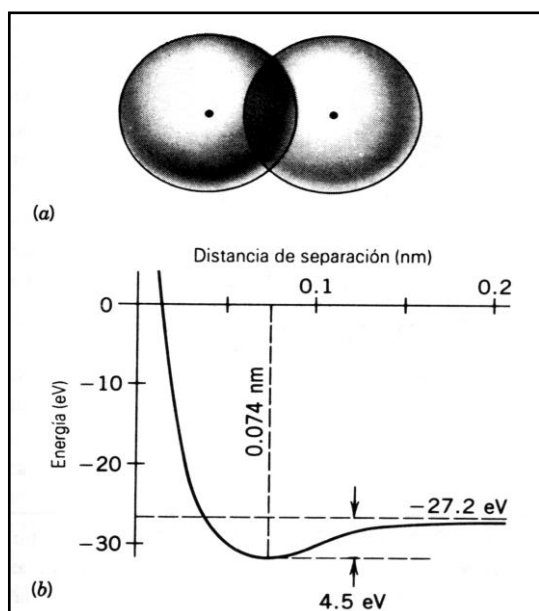


FIGURA 2.3. (a) Traslape de los electrones s del H , responsable de la formación de la molécula de H_2 . (b) Energía total de los dos electrones en el estado ligado de la molécula H_2 , en función de la distancia de separación atómica.

- **Enlace metálico**

Los *enlaces metálicos* son por lo general más débiles que los enlaces iónicos o covalentes. Los electrones exteriores en los átomos de un metal son relativamente libres de moverse a través del material, y el número de tales electrones móviles en un metal es grande. La estructura del metal puede verse como un “mar” de electrones casi libres que rodean una rejilla de iones positivos. El mecanismo de enlace en un metal es la fuerza atractiva entre los iones positivos y el mar de electrones.

- **Fuerzas de van der Waals**

Si dos moléculas están separadas a cierta distancia, se atraen entre ellas por fuerzas electrostáticas débiles denominadas fuerzas de van der Waals, que se basan en interacciones dipolares eléctricas. Existen tres tipos de fuerzas de van der Waals. El primer tipo, denominado fuerza dipolo -

dipolo, es una interacción entre dos moléculas, cada una con un momento de dipolo eléctrico permanente, por ejemplo, moléculas polares como el H_2O , tienen momentos de dipolo eléctrico permanente y atraen a otras moléculas polares.

El segundo tipo, la fuerza de dipolo - dipolo inducido, resulta cuando una molécula polar que tiene un momento de dipolo eléctrico permanente induce un momento de dipolo en una molécula no polar.

El tercer tipo se llama fuerza de dispersión, una fuerza atractiva que ocurre entre dos moléculas no polares, donde la interacción es resultado de que el promedio del cuadrado del momento del dipolo es diferente de cero.

- ***Puente de hidrógeno***

Un átomo de hidrógeno en una molécula dada, no solo puede formar como es de esperarse un enlace covalente, sino que también puede presentar un tipo de interacción con un átomo en otra molécula llamado puente de hidrógeno. Por ejemplo, en la molécula de agua es más probable que los electrones de los átomos de hidrógeno se encuentren cerca del átomo de oxígeno, lo cual deja esencialmente descubiertos protones en las posiciones de los átomos de hidrógeno. Dicha carga positiva destapada puede ser atraída al extremo negativo de otra molécula polar. Debido a que el protón no está cubierto por los electrones, el extremo negativo de la otra molécula puede acercarse mucho al protón para formar un “puente” que es lo suficientemente intenso para formar una estructura cristalina sólida, como la del hielo. Ya que los puentes de hidrógeno son relativamente débiles, de alrededor de 0.1 eV, el hielo se derrite a la baja temperatura de 0 °C.

A pesar de que las fuerzas de este tipo de interacción son relativamente débiles en comparación con las de los enlaces químicos, es el mecanismo responsable de la formación de moléculas biológicas y polímeros, entre los que destaca la molécula del ADN.

➡ **Enlaces en sólidos**

Un sólido cristalino se compone de un gran número de átomos dispuestos en una configuración regular, formando una estructura periódica, es decir, repetitiva. Dos de los mecanismos de enlace descritos anteriormente (iónicos y covalentes), también son apropiados al describir los enlaces en

sólidos. Por ejemplo, los iones del cristal NaCl están enlazados iónicamente, como ya se había señalado, y los átomos de carbono en el cristal al que se le denomina diamante forman enlaces covalentes entre ellos.

A continuación se describen los tipos de sólidos según sus enlaces moleculares.

- **Sólidos iónicos**

Muchos cristales se forman mediante enlace iónico, donde la interacción dominante entre los iones es la interacción de Coulomb. Si se considera el cristal de NaCl como en la figura 2.4, cada ión Na^+ tiene seis iones Cl^- vecinos más cercanos, y cada ión Cl^- tiene seis iones Na^+ vecinos más cercanos. Cada ión Na^+ es atraído hacia sus seis vecinos Cl^- . La energía potencial atractiva correspondiente es:

$$-6 \times k_e \times e^2 / r \quad (2.2)$$

donde k_e es la constante de Coulomb y r es la distancia de separación entre cada Na^+ y Cl^- . Además, hay 12 iones Na^+ a una distancia de $\sqrt{2} \times r$ desde el Na^+ , y estos ejercen fuerzas repulsivas más débiles sobre el Na^+ central. De esto resulta una energía potencial eléctrica negativa neta:

$$U_{\text{atractiva}} = -\alpha \times k_e \times \frac{e^2}{r} \quad (2.3)$$

donde α es un número puro cuyo valor depende sólo de la estructura del cristal, y es conocido como *constante de Madelung*. Así, tomando en cuenta el término de energía potencial B/r^m en la ecuación 2.1, la energía potencial total es:

$$U_{\text{total}} = -\alpha \times k_e \times \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m} \quad (2.4)$$

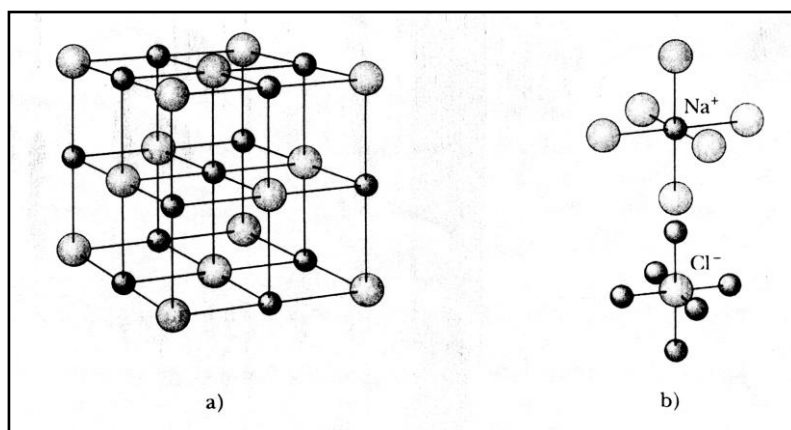


FIGURA 2.4. Estructura cristalina del NaCl.

En este caso el valor mínimo de la energía potencial, U_o , en la separación de equilibrio, se conoce como *energía cohesiva iónica* del sólido, y su valor absoluto representa la energía requerida

para separar el sólido en una colección de iones aislados positivos y negativos. El valor para el NaCl es de -7.84 eV por ión par. Por otro lado, la *energía cohesiva atómica* es la energía de enlace relativa a la energía de los átomos neutros. Para el NaCl es de -6.31 eV.

Los cristales iónicos tienen las siguientes propiedades generales:

- a) Forman cristales relativamente estables y duros.
- b) Son pobres conductores eléctricos, debido a que no contienen electrones libres.
- c) Tienen altas temperaturas de evaporación.
- d) Muchos son bastantes solubles en líquidos polares, como el agua. Las moléculas solventes polares ejercen una fuerza eléctrica atractiva sobre los iones cargados, la cual rompe los enlaces iónicos y disuelve el sólido.

- **Sólidos covalentes**

Los sólidos covalentes son aquellos cuyos átomos están enlazados covalentemente. Las energías cohesivas atómicas de algunos de estos sólidos se proporcionan en la tabla 2.1. Las grandes energías explican la dureza de los sólidos covalentes. Por ejemplo el diamante es particularmente duro y tiene un punto de fusión muy alto. En general, los sólidos enlazados en forma covalente son muy duros, tienen grandes energías de enlace y altos puntos de fusión, además de ser buenos aislantes eléctricos.

TABLA 2.1. *Energías cohesivas de algunos sólidos covalentes.*

Sólido	Energía cohesiva [eV]
C (diamante)	7.37
Si	4.63
Ge	3.85
InAs	5.70
SiC	6.15
ZnS	6.32
CuCl	9.24

- **Sólidos metálicos**

Los sólidos metálicos son aquellos cuyo mecanismo de enlace es el metálico. Los metales tienen una energía cohesiva en el intervalo de 1 a 3 eV, el cual es más pequeño que las energías cohesivas de sólidos iónicos o covalentes.

Además de la alta conductividad eléctrica de los metales producida por electrones libres, la naturaleza no direccional del enlace metálico permite que muchos diferentes tipos de átomos metálicos se disuelvan en un metal anfitrión en cantidades variables. Las *soluciones sólidas* resultantes, o *aleaciones*, pueden ser diseñadas para tener propiedades particulares, como resistencia a la tensión, ductilidad, conductividad eléctrica y térmica, así como resistencia a la corrosión. Tales propiedades suelen ser controlables y en muchos casos predecibles.

2.1.3. Conducción eléctrica en aislantes, conductores y semiconductores

De acuerdo con la teoría cuántica, sólo ciertos niveles discretos de energía o estados de energía son permitidos en un cierto átomo, y entonces un electrón debe absorber o emitir cantidades discretas de energía, o cuantos, al pasar de un nivel a otro. Un átomo normal a la temperatura del cero absoluto, tiene un electrón en cada una de las capas inferiores de energía, comenzando desde el núcleo hacia afuera y continuando hasta que la provisión de electrones se termine.

En un sólido cristalino, como puede ser un metal o un diamante, los átomos están empaquetados apretadamente; muchos electrones más están presentes y otros muchos niveles permitidos de energía están disponibles debido a las fuerzas de interacción entre átomos adyacentes. Se encuentra que la energía que los electrones pueden poseer está agrupada en intervalos muy amplios, o “bandas”, cada banda está constituida por numerosos niveles que se encuentran localizados unos muy cerca de otros. A la temperatura del cero absoluto, también el sólido tiene cada nivel ocupado, comenzando con los más bajos y continuando en orden hasta que todos los electrones estén colocados. Los electrones con los niveles de energía superiores, los electrones de valencia, están localizados en la banda de valencia. Si hay niveles permitidos de alta energía en la banda de valencia, o si la banda de valencia se traslapa suavemente a una banda de conducción, se puede suministrar energía cinética adicional a los electrones de valencia por un campo externo, produciéndose un flujo de electrones. Si esto ocurre, al sólido se le llama conductor metálico. En la figura 2.5a se muestran la banda de valencia llena y la banda de conducción vacía.

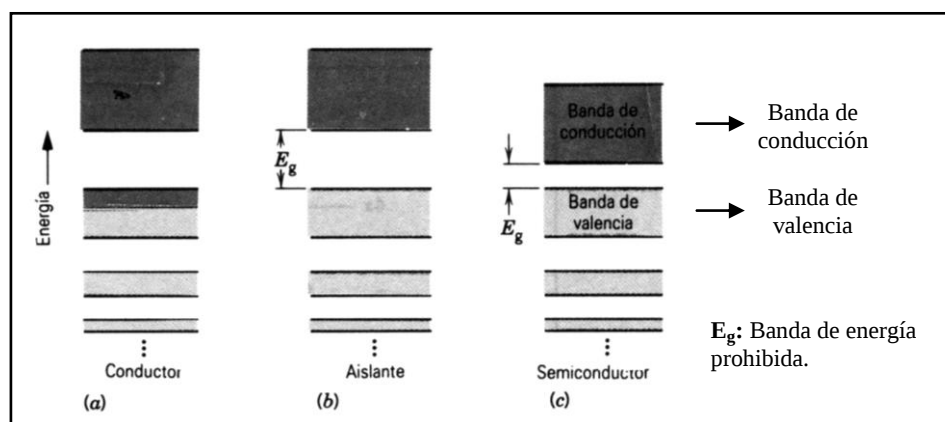


FIGURA 2.5. La estructura de bandas de energía en tres diferentes tipos de materiales. (a) Conductor. (b) Aislante. (c) Semiconductor. Se muestran las bandas llenas en sombreado suave, y las bandas vacías en sombreado intenso.

Sin embargo, si el electrón con la mayor energía ocupa el nivel más alto en la banda de valencia y existe una brecha entre la banda de valencia y la de conducción, entonces el electrón no puede recibir la energía adicional en pequeñas cantidades y el material es un aislante. Esta estructura de bandas se muestra en la figura 2.5b. Obsérvese que si una cantidad relativamente grande de energía pudiera transferirse al electrón, éste sería excitado lo suficiente como para brincar a la banda siguiente donde la conducción puede ocurrir más fácilmente. En este punto es cuando se rompe el aislante.

Una condición intermedia ocurre cuando solamente una pequeña “región prohibida” separa las dos bandas, como se indica en la figura 2.5c. Se necesita una pequeña cantidad de energía en la forma de calor, luz o de campo eléctrico para aumentar la energía de los electrones de la parte superior de la banda llena y dar las bases para la conducción. Estos materiales son aislantes que muestran muchas de las propiedades de los conductores por lo que son llamados semiconductores.

2.1.4. El dieléctrico

Los dieléctricos son aislantes que en presencia de un campo eléctrico se comportan como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas cuyos centros no coinciden perfectamente.

No se trata de cargas libres y no contribuyen al proceso de conducción. Más aún, se mantienen en su lugar por las fuerzas atómicas y moleculares, y sólo pueden cambiar su posición ligeramente en respuesta a campos eléctricos externos. Son llamadas cargas *ligadas*, en contraposición de las cargas libres que determinan la conductividad. Las cargas ligadas pueden ser tratadas como cualquier otra fuente de campo electrostático.

La característica común de todos los dieléctricos, ya sean sólidos, líquidos o gases, tengan o no estructura cristalina, es su capacidad para almacenar energía. Este almacenamiento tiene lugar al cambiar las posiciones relativas de las cargas positivas y negativas ligadas en el interior en contra de las fuerzas moleculares y atómicas.

Estos desplazamientos en contra de la fuerza de restitución, es similar a levantar un peso o estirar un resorte, ya que representan energía potencial. La fuente de esta energía es el campo externo, el desplazamiento de estas cargas puede producir una corriente transitoria a través de la batería que produce el campo.

El mecanismo real por el cual la carga se desplaza es diferente entre varios materiales dieléctricos. Algunas moléculas, llamadas moléculas polares, tienen un desplazamiento permanente entre el centro de “gravedad” de la carga positiva y negativa, y cada par de cargas actúa como un dipolo. Normalmente los dipolos están orientados aleatoriamente en el interior del material y la acción del campo eléctrico externo sobre estas moléculas, las alinea, hasta cierto punto, en la misma dirección. Una molécula no polar no tiene este tipo de arreglo sino hasta que se aplica un campo. Las cargas positivas y negativas se desplazan en direcciones opuestas en contra de su atracción mutua y producen un dipolo que está alineado con el campo eléctrico.

Por tanto, hay dos categorías de dieléctricos, los polares y los no polares. En los polares, los momentos dipolares eléctricos tienden a alinearse por sí mismos con un campo eléctrico externo, como se ilustra en la figura 2.6. Puesto que las moléculas están en constante agitación térmica, el grado de alineamiento no es completo sino que aumenta conforme aumenta el campo eléctrico aplicado o a medida que disminuya la temperatura.

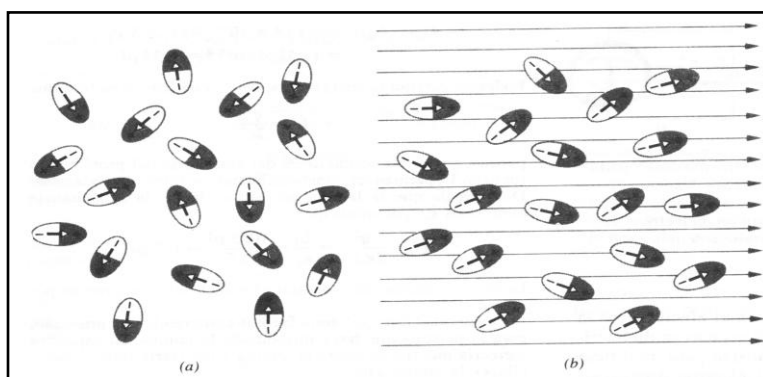


FIGURA 2.6. (a) Conjunto de moléculas con momentos dipolares eléctricos permanentes. (b) Un campo eléctrico externo produce un alineamiento parcial de los dipolos.

En los dieléctricos no polares, las moléculas carecen de momentos dipolares eléctricos permanentes, pero pueden adquirirlos por inducción cuando se colocan en un campo eléctrico. Este momento dipolar eléctrico inducido está presente sólo cuando el campo eléctrico está presente. Es proporcional al campo eléctrico y se crea ya alineado con el campo eléctrico. Los dieléctricos polares pueden también adquirir momentos dipolares eléctricos inducidos en campos externos.

La constante dieléctrica es una propiedad fundamental del material dieléctrico y es independiente de su forma y tamaño, y se define en función de la permitividad eléctrica del vacío ϵ_o , como:

$$k_e = \frac{\epsilon}{\epsilon_o} \quad (2.5)$$

donde k_e es la constante dieléctrica del material y ϵ es la permitividad eléctrica del material.

Cada material dieléctrico tiene una *resistencia o rigidez dieléctrica* característica que es el valor máximo del gradiente eléctrico que puede soportar sin perforación. En las tablas 2.2 y 2.3, se muestran los valores de la constante y rigidez dieléctrica de algunos materiales empleados para proporcionar aislamiento eléctrico.

TABLA 2.2. Características eléctricas de los dieléctricos de porcelana y vidrio.

DIELÉCTRICOS $\Rightarrow$	PORCELANAS			VIDRIOS		
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS $\Downarrow$	Porcelana electrotécnica tradicional	Porcelana electrotécnica aluminosa	Esteatita	Sodocálcico	Sodocálcico potásico	Borosilicato
Constante dieléctrica k_e a 25° C y 50 Hz	6	7.5	6.1	7.5	7.3	5.3
Rigidez dieléctrica (kV/cm) a 25°C y 50 Hz	170	160	180	230	250	290

TABLA 2.3. Características eléctricas de la fibra de vidrio.

DIELÉCTRICOS $\Rightarrow$	1. FIBRA DE VIDRIO	
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS $\Downarrow$	E-GLASS	ECR-GLASS
Constante dieléctrica k_e a 25° C y 60 Hz	6.4	7.1
Rigidez dieléctrica (kV/mm)	9.80	9.96

2.1.5. Clasificación del aislamiento eléctrico

De acuerdo al comportamiento del dieléctrico ante las descargas eléctricas, el aislamiento se divide en dos grandes grupos: aislamiento *auto restaurable* y aislamiento *no auto restaurable*.

Los llamados auto restaurables corresponden con aquellos aislantes que después de una descarga recuperan totalmente sus propiedades dieléctricas. Si bien este concepto se ha generalizado para aislamientos externos, por ejemplo en el aire, cabe señalar que también aplica para cavidades cerradas, por ejemplo llenas de SF₆, como es el caso de los equipos encapsulados.

A diferencia del aislamiento auto restaurable, los no auto restaurables se caracterizan porque después de una falla no recuperan de nuevo totalmente sus propiedades dieléctricas. Por ejemplo, el aislamiento de los arrollados de los transformadores. Una falla en estos arrollados, traería como consecuencia una perforación que le impediría al aislante sólido recuperar sus propiedades.

Por otra parte, el aislamiento puede clasificarse en función del ambiente en el cual funciona, esto es: *aislamiento interno*, en cuyo caso la superficie del material aislante se encuentra resguardada de todo contacto con el medio exterior, y por tanto, libre de condiciones atmosféricas adversas; y el *aislamiento externo*, en cuyo caso la superficie del material aislante está a la intemperie, quedando sujeta a la acción de agentes externos que afectan sus características dieléctricas; así como de otras condiciones externas adversas tales como contaminación, humedad, animales, entre otros. Este es el caso del aislamiento de las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica.

A continuación se desarrollará un estudio acerca de los aisladores, los materiales empleados en su fabricación, sus características y funciones, tipos, diferencias y aplicaciones en el campo del aislamiento externo.

2.2. LOS AISLADORES

2.2.1. Breve reseña histórica

Las primeras líneas eléctricas aéreas de distribución de electricidad de alta tensión, de corriente continua en 1882 y luego alterna en 1885, fueron construidas con aisladores de vidrio recocido rígidamente ligados al soporte, a los cuales estaban sujetos los conductores por medio de una ligadura.

Los primeros aisladores de porcelana se probaron sin gran éxito entre 1890 y 1893, fecha en la cual se desarrolló el procedimiento de fabricación por vía húmeda, que ha permitido obtener un material no poroso, de características mecánicas superiores a las del vidrio recocido.

Entonces, se desarrolló la cerámica y permitió realizar en 1903 los primeros aisladores de suspensión, gracias a los cuales el enlace entre cables y torres se hizo flexible.

El templado se aplicó a los dieléctricos en vidrio para aisladores, a partir de 1935. Este procedimiento permite obtener piezas de una gran resistencia mecánica, cuya integridad eléctrica se hace visible en las líneas sólo por la presencia de las campanas ó faldones de aisladores, incrementando así la seguridad de la explotación.

Así se desarrolló el aislador de caperuza y espiga de vidrio templado. Después han aparecido las cerámicas especiales de gran resistencia mecánica y mejor comportamiento eléctrico, como los aisladores de porcelana del tipo antiniebla (también conocidos como anticontaminación), y los aisladores semiconductores que son producto de una investigación desarrollada en los años 70.

A finales de la década del 50, el desarrollo de un aislador de línea con peso reducido y de características eléctricas y mecánicas mejoradas, comparativo a los aisladores cerámicos convencionales en cadena, se consideró esencial para líneas de transmisión de 1000kV. Aunque el interés en la transmisión a 1000kV disminuyó gradualmente, el interés en tener un aislador más ligero se incrementó, dando lugar a que en 1959 se introdujera en Estados Unidos el primer aislador compuesto o polimérico (también conocido como no cerámico), principalmente fabricado con resina epóxica. Sin embargo, ese primer aislador, a pesar de sus ventajas prometedoras, experimentó severas fallas por la degradación prematura del material epóxico.

Algunos años después, fabricantes europeos introdujeron al mercado lo que se conoce como la primera generación de aisladores compuestos. Durante un período de unos 15 años, un gran número de compañías eléctricas empezó a utilizar estos aisladores como prueba, principalmente para ganar experiencia. Las primeras experiencias fueron desalentadoras y como consecuencia de las fallas reportadas por las compañías usuarias, los fabricantes detuvieron la producción de aisladores compuestos para líneas de transmisión. En vista de estos hechos, algunos fabricantes introdujeron significativas mejoras en la tecnología de materiales y diseños para ofrecer la segunda e incluso la tercera generación de aisladores no cerámicos.

En la sección 2.2.4 se describe con detalle estos tipos de aisladores.

2.2.2. Funciones

La función de los aisladores de las líneas aéreas, es de sujetar mecánicamente los conductores a las estructuras que los soportan, asegurando el aislamiento eléctrico entre estos dos elementos, esto es, evitar la derivación de la corriente de la línea hacia tierra, ya que un aislamiento defectuoso acarrea pérdidas de energía y en consecuencia un aumento del gasto de explotación comercial del sistema.

Así pues, durante algunas décadas, sus cualidades eléctricas y mecánicas no deberán ser destruidas por ninguno de los esfuerzos de todo tipo a que estarán sometidos.

Además, deberán facilitar todo trabajo que pudiera efectuarse en la línea, aún mantenida en tensión eléctrica, sin perjudicar la recepción de las señales electromagnéticas, radio, televisión y otros, ni la ecología y estética si fuera posible.

2.2.3. Características generales de los aisladores

Las funciones de los aisladores antes mencionados, obligan a éstos a cumplir con un conjunto mínimo de condiciones que a continuación se hace mención:

➤ Rigidez dieléctrica

El aislador debe reducir las corrientes de fuga a un valor despreciable para las condiciones más desfavorables. Además, debe tener una tensión de perforación muy superior a la tensión de servicio para que pueda soportar sobretensiones accidentales. Estas condiciones determinan el valor de tensión de perforación del aislador.

➤ Forma

La forma del aislador debe ser tal que minimice el peligro de descargas superficiales, arcos y efectos corona. Esta condición determina las dimensiones del aislador, además de las características que se nombran a continuación y que se definen en la sección 2.5.1 del presente capítulo.

- 1.- Distancia de fuga.
- 2.- Distancia de arco en seco.
- 3.- Tensión de disrupción

Es necesaria una distribución uniforme de tensión en el aislador, evitando así la perforación y formación de arcos, los principios fundamentales de electrostática establecen que lo ideal es que la superficie de los aislantes debe ser perpendicular o paralela a las líneas de fuerza electrostáticas. Si éstas consideraciones no se cumplen en los aisladores, existirían porciones de aire en él sometidas a sobretensiones dando origen al efecto corona, sin embargo, ésta forma ideal debe ser considerada junto con la forma de fijación del aislador al apoyo, tratando de conseguir suficiente distancia de fuga.

La distancia de fuga depende del tamaño y del número de pliegues de cada unidad aisladora y éstas serán mayores ó menores de acuerdo con la tensión de servicio a la cual se sometiera el aislador.

Otra condición eléctrica fundamental será la de establecer un coeficiente de seguridad eléctrico que nos garantice hasta donde sea posible, cualquiera que sea la onda de sobretensión, sea o no de origen atmosférico, a cualquier frecuencia y en todas las circunstancias climatológicas, la no formación de caminos conductores en la superficie del aislador. Estas circunstancias son tan notables, que resultan decisivas para el dimensionamiento de los aisladores, tanto más, debido a que el mantenimiento no puede ser permanente.

➤ Resistencia mecánica

Debe ser tal que soporte las solicitaciones a que debe estar sometido el aislador (esfuerzos mecánicos del conductor, esfuerzos originados por fenómenos eléctricos, esfuerzos del viento, entre otros). Esta condición establece principalmente las siguientes características:

- 1.- Resistencia mecánica máxima: carga a la cual falla cualquier parte de un aislador en su función de servicio como soporte mecánico, sin tener en cuenta fallas eléctricas.
- 2.- Resistencia electromecánica: carga mecánica a la cual cualquier parte de un aislador falla en función mecánica o eléctrica cuando se somete simultáneamente a tensión eléctrica y esfuerzos mecánicos.
- 3.- Resistencia al impacto: Impacto mecánico que en condiciones especificadas puede soportar el aislador sin dañarse.
- 4.- Peso unitario.

➤ Vida útil

El material de que está constituido el aislador y el proceso de fabricación deben garantizar un envejecimiento lento, para evitar los problemas inherentes a mantenimiento y reposición.

Las principales causas de envejecimiento y deterioro en los aisladores son de tipo mecánicas y térmicas en cambio el campo eléctrico tiene muy poca influencia. Este deterioro se hace presente debido a la existencia en el aislador de ciertas porosidades motivadas por golpes durante su transporte, montaje y servicio; dilatación y compresión debido a cambios de temperatura, ya que el aire que llena los poros, cargado éste de humedad, impurezas, etc., se ioniza y puede provocar perforación en los aisladores.

Todas estas condiciones nos determinan: el tipo y calidad de material y el proceso de elaboración en la fabricación de los aisladores.

2.2.4. Clasificación de los aisladores

Los aisladores se pueden clasificar desde diferentes puntos de vista, así tenemos, según el material elegido para su manufacturación: aisladores de vidrio, porcelana y poliméricos. Según su uso tenemos aisladores de suspensión o aisladores de amarre, así como también aisladores de apoyo. También se diferencia entre aisladores de corriente alterna y aisladores de corriente continua.

En principio, esta sección clasifica a los aisladores de acuerdo al tipo de material empleado en su fabricación, resultando dos grandes grupos: *cerámicos* y *no cerámicos*. En el grupo de los aisladores cerámicos se incluyen los aisladores de porcelana y vidrio, mientras que el grupo de los aisladores no cerámicos comprende a los aisladores del tipo compuesto ó poliméricos. Así mismo, se indica sucintamente las características constructivas más relevantes de cada uno de ellos.

➡ **Aisladores cerámicos**

- *Composición y fabricación de aisladores de porcelana*

La porcelana consiste básicamente de un agregado de caolín (silicato de aluminio puro: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuarzo (anhídrido silícico: SiO_2) y feldespato (Silicato alúmino – potásico: $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$). De ellos el caolín mejora las propiedades térmicas, el cuarzo las mecánicas y el feldespato las eléctricas.

La porcelana dura contiene generalmente un 40 a 60% de caolín, entre un 20 – 30% de cuarzo y entre un 20 – 30% de feldespato. La porcelana eléctrica lleva a menudo una parte considerable de arcilla, no sólo en lugar del caolín, sino también en sustitución del feldespato porque proporciona mayor capacidad que el caolín y menor conductividad eléctrica que el feldespato.

La preparación de la porcelana se efectúa mezclando y amasando los materiales básicos finamente molidos y eliminando, después, el agua en filtros – prensas. Se le da la forma deseada por moldeo, torneado, prensado, extrusado, entre otros.

A los aisladores de cuerpo largo (*long rod*), habitualmente se les da la forma en dos fases: confección de un modelo preliminar cilíndrico por estirado, luego estos modelos son trabajados sea cuando todavía contienen 16 a 17% de humedad (elaboración en húmedo), sea después que han sido secados en estufa (elaboración en seco). A los aisladores de suspensión de caperuza y espiga (*cap and pin*) se les da la forma en un molde de yeso en rotación, aplicando una presión a la pasta por medio de un taco; obteniendo el interior de la cabeza, cuando es en socavación, por medio de una herramienta de forma conveniente, aplicada a la pieza sometida a un movimiento de rotación.

Los objetos ya formados son sometidos a secado por aire caliente o vapor y luego se les recubre de una capa vitrificante, cociéndola finalmente a una temperatura de unos 1400° C. Las mejores composiciones para esta capa son los silicatos aluminosos de potasio y cal con pigmentos tales como: óxido de hierro (Fe_2O_3), trióxido de cromo (Cr_2O_3), dióxido de manganeso (MnO_2), monóxido de

carbono (CO). El tiempo de cocción es de alrededor de 20 horas y después se deben dejar enfriar por un período de tiempo semejante.

A fin de mejorar las propiedades eléctricas de los aisladores de las líneas, algunos fabricantes usan una capa vítrea semiconductora, añadiendo óxido de estaño (SnO_2). Este es el caso de los *aisladores semiconductores*.

- *Composición y fabricación de aisladores de vidrio*

El aislador de vidrio se obtiene fundiendo diferentes materiales de granulometría, tales como: carbonato de sodio, dolomita, carbonato de bario, carbonato de potasio, sulfato de bario y piedra caliza en un horno de fundición continua.

La variación en la proporción de los elementos que constituyen el material acabado, permiten modificar o variar las características eléctricas, térmicas y mecánicas. El potasio contribuye a incrementar el comportamiento eléctrico. La cal y demás óxidos originan un incremento en la resistencia del vidrio después del proceso de templado.

Así pues, la fabricación de vidrio requiere la fusión total de las materias primas y la homogeneización de la mezcla. Estas dos operaciones se efectúan en un horno de cuba de marcha continua, a temperaturas próximas a los 500°C . El vidrio fluye del horno hacia la máquina por un canal, en el cual se enfría a una temperatura homogénea, que cuenta en su extremidad con un mecanismo que distribuye en moldes, a una cadencia apropiada, gotas de vidrio llamadas masas de vidrio, de peso y temperatura constante. Estas masas de vidrio tomarán las formas del molde por prensado. En este proceso el vidrio fundido se enfría, su viscosidad aumenta progresivamente hasta el estado sólido, sin la aparición de ningún indicio de cristalización.

Las tensiones mecánicas internas, inducidas por la rapidez relativa del enfriamiento, son eliminadas por un calentamiento seguido de un enfriamiento lento; así se obtiene el vidrio recocido exento de toda tensión. No obstante, ciertas tensiones mecánicas internas son convenientes para aumentar la resistencia mecánica de las piezas, a condición, por cierto, de repartirlas convenientemente en la masa; de compresión en la superficie hasta una profundidad suficiente, y de extensión en las partes internas solamente.

El sistema por el cual estas tensiones controladas son inducidas en el vidrio, se llama templado; consiste en enfriar la pieza por medio de la difusión de aire fresco, dosificado y dirigido por orificios convenientemente dispuestos.

- *Herrajes*

Los esfuerzos mecánicos de las líneas aéreas son transmitidos a través de los herrajes a los materiales cerámicos. La distribución del esfuerzo está en estrecha relación con la forma de los herrajes. Si ocurre la rotura de un herraje la línea se caerá. Debido a que se requiere de un funcionamiento mecánico por largo tiempo, se necesita de materiales de alta calidad, sin defectos (fisuras o heterogeneidades), para asegurar la resistencia de estos accesorios contra la corrosión, envejecimiento, vibraciones, fatigas, entre otros.

Entre los principales materiales empleados en su fabricación se encuentran las fundiciones maleables, los aceros, las aleaciones de aluminio, las aleaciones de zinc y las aleaciones de cobre.

- *Diferentes tipos de aisladores*

Sobre la base de su modo de operación desde el punto de vista mecánico, los aisladores pueden dividirse en dos clases básicas: aisladores rígidos y aisladores suspendidos.

a) Aisladores rígidos

Los aisladores rígidos, también conocidos como aisladores de soporte, se caracterizan porque trabajan con el conductor ejerciendo sobre ellos fuerza de compresión ó fuerzas cortantes. Una pieza metálica sellada alrededor de la base del dieléctrico, o en una cavidad prevista con este objeto, permite conectar rígidamente el aislador con la estructura ó torre. El cable se sujeta al dieléctrico sea directamente por medio de una ligadura, sea por intermedio de una pinza fijada a una pieza metálica sellada en el aislante.

Estos aisladores pueden utilizarse en posición vertical, horizontal u oblicua. Sin embargo, en cada caso particular, conviene asegurarse con el fabricante que el aislador seleccionado, instalado en la posición elegida, responde bien a las características deseadas.

Este tipo de aislador, podrá ser sometido en explotación a tensiones mecánicas de flexión, tracción y compresión, aún de torsión algunas veces.

Dentro de esta clase de aisladores pueden distinguirse dos tipos:

a.1) Aisladores de espiga:

Los aisladores de espiga están formados por uno o varios cuerpos de porcelana o vidrio permanentemente conectados entre sí, provisto de una cavidad u orificio para la fijación de una espiga de montaje no integrante, por medio de la cual el aislador se fija rápidamente a una estructura soporte.

La espiga (también conocida como espárrago o vástago) es un accesorio para fijar el aislador a una estructura soporte. El uso de estos aisladores se limita hasta sistemas de medianas tensiones.

Los aisladores formados por varias piezas unidas por cemento, presentan la ventaja de que la rotura ocasionada en una pieza no se transmite a la otra debido a la presencia del cemento intermedio, evitando así un posible contacto entre línea y tierra. Estas piezas generalmente tienen una forma de campana. La campana superior es la de mayor importancia debido a su efecto protector y por consiguiente es la de mayor diámetro. La finalidad de darles forma de campana es obtener mayores distancias de fuga tanto mas, cuando mayor sea la tensión de servicio.

En la figura 2.7 se muestran algunos ejemplos de estos tipos de aisladores, en donde el conductor se encuentra fijado mediante una ligadura.

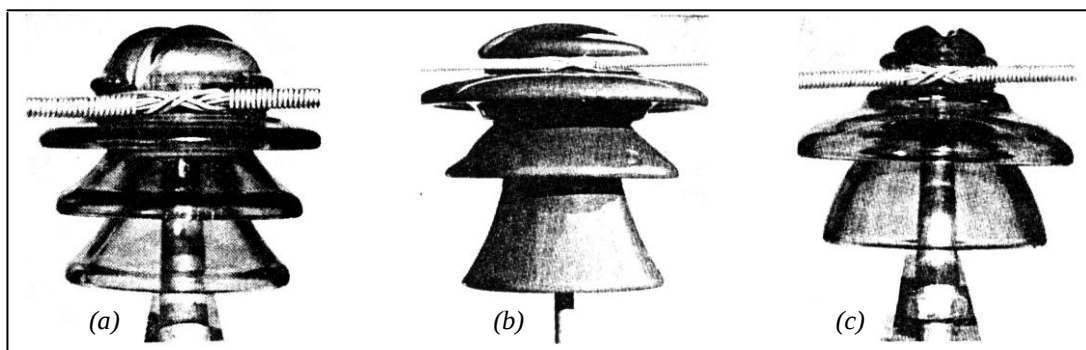


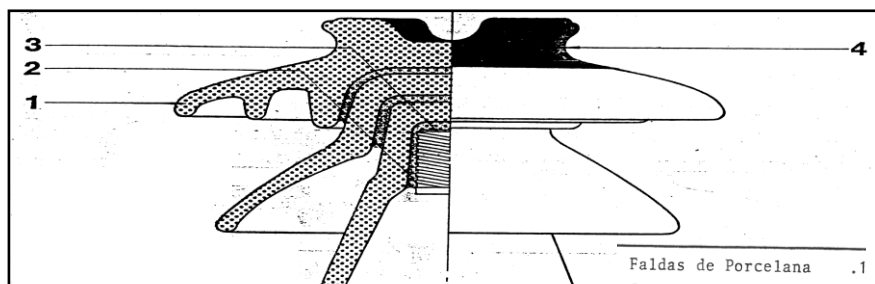
FIGURA 2.7. (a) Aislador rígido de vidrio recocido. (b) Aislador rígido de porcelana. (c) Aislador rígido de vidrio templado.

En los aisladores de espárrago simple se registra un elevado gradiente eléctrico en la proximidad del electrodo, lo que le da origen a descargas por efecto corona inclusive a tensión de régimen. Pequeños espacios de aire entre el conductor, los cables de amarre y la porcelana, pueden ser también causa de radio-interferencia. Con la finalidad de combatir la misma se ha diseñado el aislador antiparásito (ver figura 2.8), el cual dispone de una capa semiconductora. Dicha capa pone entonces en cortocircuito a los pequeños espacios de aire, debilitando así al campo eléctrico alrededor del electrodo.

a.2) Aisladores con base:

A diferencia del aislador de espiga, este tipo de aislador está dotado de una base que consiste de una pieza metálica sellada al dieléctrico, que le permite fijarse a la estructura soportante.

Así se tiene, por ejemplo, el aislador con base para líneas (*line post*), también conocido como tipo poste. Este aislador posee una base para colocarlo directamente sobre el poste de una línea de transmisión, sin necesidad de cruceta (ver figura 2.9).



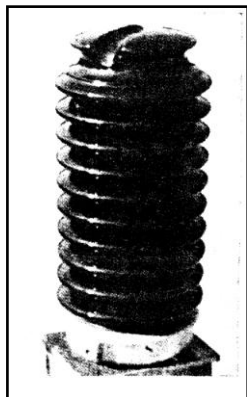
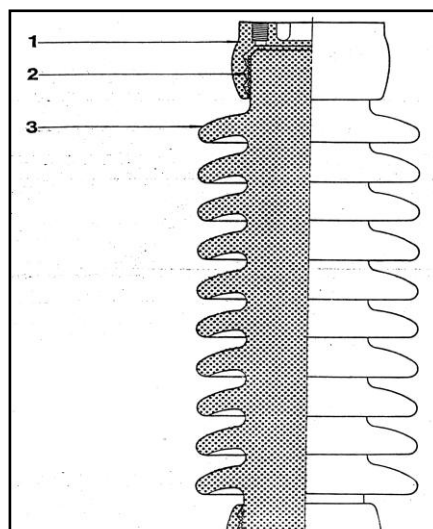
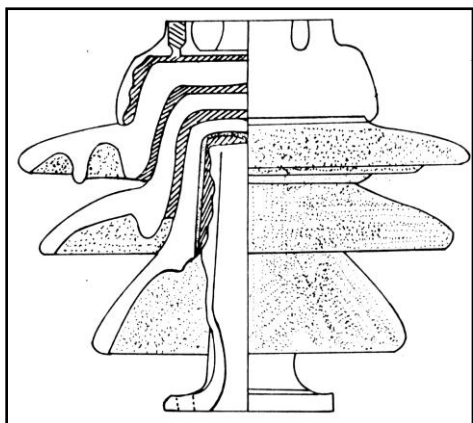


FIGURA 2.9. Aislador tipo poste.

También se tiene al aislador tipo soporte para subestaciones (*switch & bus insulator*). Como se puede ver en la figura 2.10, este aislador consta de varias piezas cementadas entre sí, y de una base de hierro forjado o galvanizado en caliente. Además, pueden observarse campanas anchas, la primera de ellas diseñada como elemento *antiniebla* (ver sección siguiente). En este tipo de aislador se trata de lograr una mejor distribución del campo tanto en estado seco como húmedo.

Un tipo de aislador usado especialmente en subestaciones, es el conocido como tipo columna (*solid-core station post insulator*). La figura 2.11 ilustra un modelo diseñado para zonas de elevada contaminación. Se pueden distinguir las siguientes partes: caperuza o capucha de hierro o acero tratado en caliente (1), cemento portland (2), y cuerpo de porcelana (3). Varias unidades se pueden disponer en columna.



De igual forma, los aisladores tipo soporte y las columnas para subestaciones pueden conseguirse con el vidrio como dieléctrico.

b) Aisladores suspendidos

En este caso el aislamiento consiste en una cadena de aisladores de revolución, ensamblados los unos a los otros, a las torres y a los cables, por sistemas metálicos de rótula o de horquilla que sólo permiten la transmisión, excepto el rozamiento, de esfuerzos mecánicos paralelos a su eje. De estas cadenas verticales se suspenden los conductores a las torres de alineación; de otras cadenas horizontales o más bien inclinadas respecto a la alineación de los cables, se tensan los conductores en las torres de anclaje. Estas cadenas pueden ser dobles o múltiples para aumentar la resistencia mecánica, su longitud dependerá del nivel de aislamiento requerido.

En esta categoría de aisladores, existen dos conceptos: aisladores de caperuza y espiga (*cap and pin*), y aisladores de cuerpo macizo ó cuerpo largo (*long rod*).

b.1) Aisladores de caperuza y espiga:

Este tipo de aislador dispuesto en cadena ha sido empleado especialmente en líneas aéreas de transmisión. El esquema del corte de este aislador se presenta en la figura 2.12.

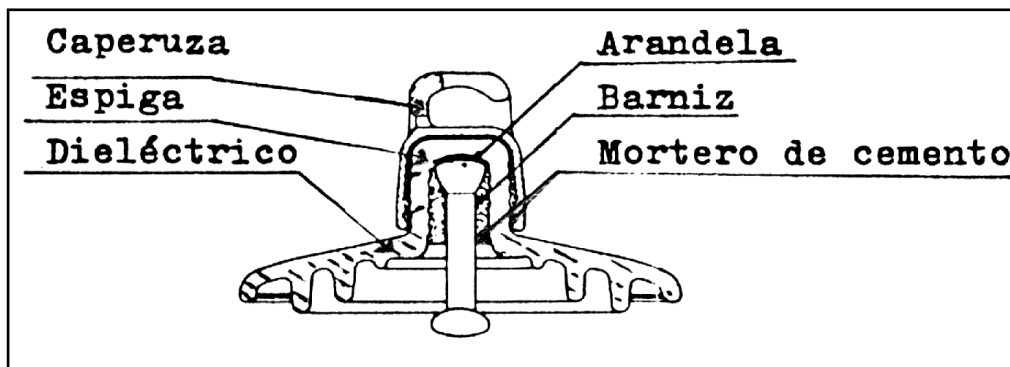
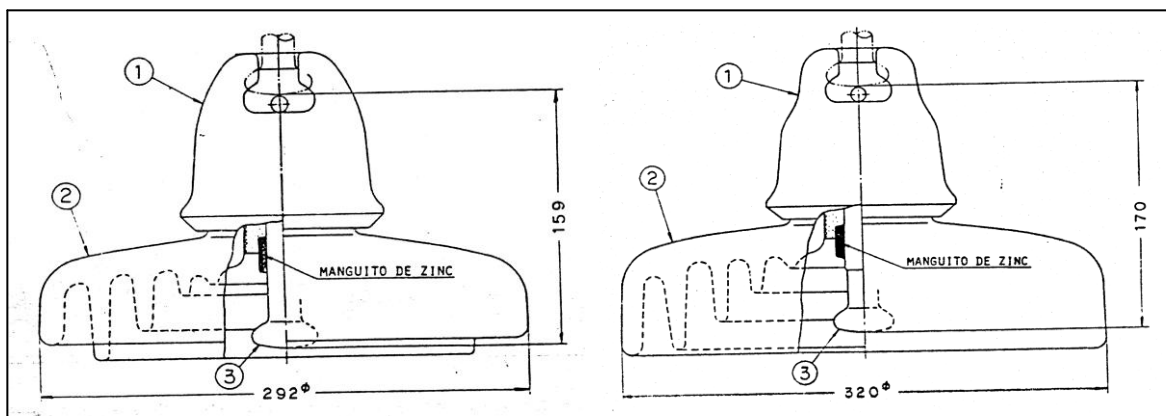


FIGURA 2.12. Aislador de caperuza y espiga.

El dieléctrico es de vidrio templado o de porcelana, la caperuza generalmente de fundición maleable y la espiga de acero, ambos galvanizados en caliente. El material de conexión es un mortero de cemento aluminoso o Portland. La forma de la cabeza es diseñada de tal modo, que los esfuerzos de tracción aplicados al aislador se transformen, tanto como sea posible, en compresión en los dieléctricos, en los cuales aparecen no obstante, inevitablemente, ciertas tensiones de cizalladura. La forma socavada interior de la cabeza, necesaria para la fijación del sellado de la espiga, se obtiene sea por el paso de un tornillo que se retira después del prensado del dieléctrico, sea por medio de una deformación o elaboración posterior a la formación de dicha cabeza. En el caso del aislador de porcelana, esta socavación puede evitarse aplicando, antes de la cocción, partículas de pastas precocidas, las cuales después de la cocción formarán cuerpo con la pieza, permitiendo la fijación del mortero. Este procedimiento es conocido con el nombre de "Sandage".

El Instituto Nacional Americano de Normalización por una parte, y por otra la Comisión Electrotécnica Internacional (ANSI estándar C 29-2-71, y la publicación IEC 305), han estandarizado cierto número de tipos de aisladores y elementos de cadena, comprendiendo las formas. Igualmente se han determinado las dimensiones de los sistemas de suspensión, particularmente en la publicación 120 de la IEC. Actualmente los sistemas de rótula, "ball and socket", son recomendados por la IEC que ha previsto cuatro dimensiones, correspondientes a espigas de diámetros nominales de 11, 16, 20 y 24 mm. También los estándares americanos definen las dimensiones de las ensambladuras de horquilla y espiga, así como las dimensiones de las ensambladuras de rótula, que cabe destacar, son diferentes a las adoptadas por la IEC.

De acuerdo a la configuración de las corrugaciones de la falda del dieléctrico, los aisladores pueden dividirse en aisladores normales, en cuyo caso las corrugaciones no sobresalen del borde inferior; y aisladores antiniebla o anticontaminación (*fog type*) (ver figura 2.13), en los que el número de ondulaciones es menor, pero mucho más pronunciado, de tal forma que sobresalga del borde inferior. Los fabricantes recomiendan el empleo de este tipo de aislador en zonas fuertemente contaminadas.



Otra tecnología aplicada en los aisladores de caperuza y espiga, es la aplicación de una capa semiconductora de vidrio con óxido de estaño, que en condiciones de ambientes contaminados y húmedos, presenta un comportamiento donde las corrientes circulan a través de esa superficie semiconductora generándose un calor que seca la superficie del aislador, y de ese modo no se producen o se reducen los arcos eléctricos parciales y se mejora el comportamiento de la cadena de aisladores. Estos son los llamados aisladores semiconductores (*semiconducting glazed*).

b.2) Aisladores de cuerpo macizo:

Están constituidos, como se ve en la figura 2.14, por un cilindro macizo de porcelana provisto de aletas, que tiene en cada extremo una pieza metálica de conexión. Esta pieza puede ser; envolvente en forma de casquete sellado alrededor de los extremos troncocónicos, previstos en el cilindro, como en la figura 2.14a, o en forma de varilla sellada en una cavidad prevista con este objeto, como en la figura 2.14b. Los sistemas de conexión en estos aisladores, o con las torres, o los cables, están formados por rótulas u horquillas como en el caso de los aisladores de caperuza y espiga. Además, las dimensiones de las conexiones de rótula recomendadas por la IEC, son las mismas para los dos tipos de aisladores, y aparecen en la publicación 120.

Estos tipos de aisladores pueden utilizarse unitariamente o en serie de varios elementos, en función de su longitud y del nivel de aislamiento requerido. Se usan generalmente en líneas aéreas de transmisión de alto voltaje.

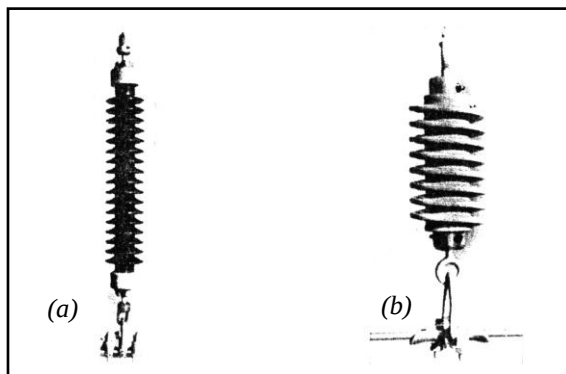


FIGURA 2.14. (a) Aislador de cuerpo largo de porcelana. (b) Aislador de cuerpo largo con aletas helicoidales.

Contrario al dieléctrico de los aisladores de caperuza y espiga, el cual se ve sometido a esfuerzos de compresión debido a las cargas de tracción dinámica y estática que se originan por el peso y sobrecarga de los conductores, el dieléctrico del aislador de porcelana de cuerpo largo siempre se ve sometido a esfuerzos de tracción. Con el tiempo, estos esfuerzos de tracción, aunado a los de origen térmico, provocan en el dieléctrico de porcelana el desarrollo de micro fisuras y consecuentemente la reducción de la rigidez mecánica del aislador de cuerpo largo.

Este fenómeno de “envejecimiento termomecánico” puede conducir a una rotura mecánica inesperada del aislador y la caída de la línea, sin alguna señal detectable por las cuadrillas de mantenimiento. Por esta razón, el uso de este aislador está limitado y restringido a muy pocos países.

➤ Aisladores no cerámicos

- *Diseño y características constructivas*

La figura 2.15 muestra los componentes básicos de un aislador no cerámico, el cual consiste de un núcleo (*core*), recubrimiento externo (*housing*), y herrajes terminales (*end fittings*) acoplados en ambos extremos. Sin protección, el núcleo por sí solo no es adecuado para la aplicación a la intemperie en alto voltaje, ya que la contaminación, la humedad y el voltaje conducen a la formación y desarrollo de caminos conductores sobre la superficie del material (*tracking*), lo cual resulta en una falla eléctrica. Por lo tanto, el núcleo requiere de un recubrimiento externo, el cual se compone de una cubierta (*sheath*) y aletas ó faldones (*sheds – weather sheds*) de algún material no cerámico elaborado para usos eléctricos, los cuales se aplican de diferentes maneras para protegerlo y proporcionar el máximo aislamiento eléctrico entre los terminales. Esto resulta en una diversidad de construcciones posibles, encontrando aplicaciones en el área de transmisión, distribución y subestaciones.

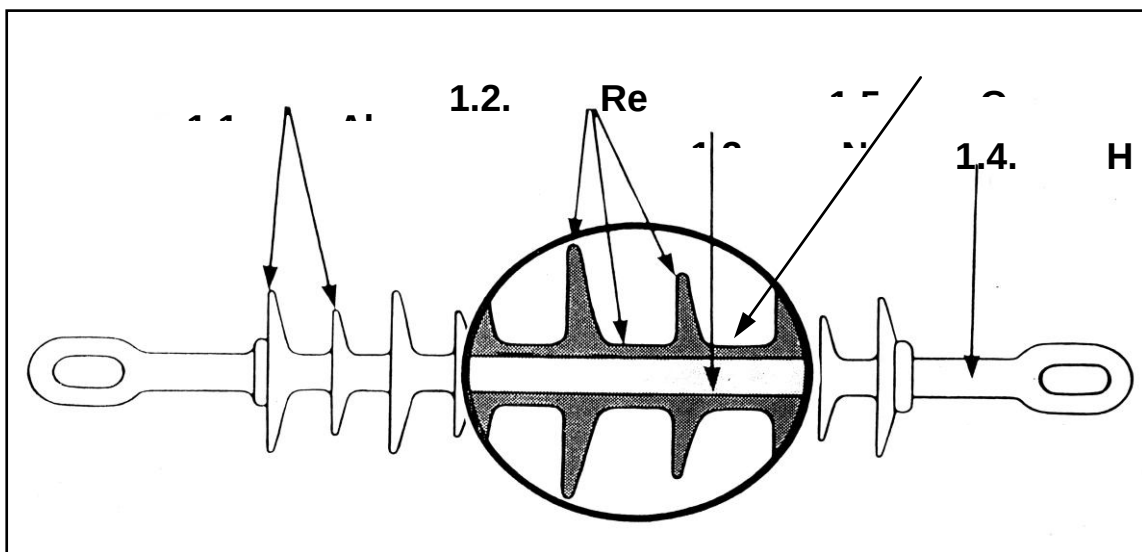


FIGURA 2.15 Composición del aislador no cerámico

a) El núcleo

El núcleo de un aislador no cerámico tiene la doble misión de ser aislante y de ser el principal miembro soportante de carga mecánica. El núcleo es una barra formada por fibras de vidrio alineadas axialmente e impregnadas con una resina orgánica. Esta combinación de materiales es conocida como “polímero reforzado con vidrio” (*glass reinforced polymer, GRP*), o también “polímero reforzado con fibra de vidrio” (*fiberglass reinforced polymer, FRP*).

a.1) Resinas:

Las resinas térmicamente tratadas han sido los materiales matrices más usados en la fabricación del núcleo. Debido a su molécula de cadena larga, enlazada covalentemente, y a su estructura de red de enlaces transversales, estas resinas exhiben una adecuada rigidez y resistencia, así como también una estabilidad térmica relativamente alta. Sin embargo, debido a sus diferentes componentes químicos, estas resinas presentan diferentes propiedades mecánicas, resistencia química y grado de contracción.

Las resinas empleadas pueden ser: poliéster, epoxi y vinil ester. Aún cuando el epoxi es considerado como la mejor resina debido a su bajo costo, es el poliéster el más usado. Sin embargo, el vinil ester ha conseguido incrementar su uso recientemente.

a.2) Fibras:

La mayoría de los refuerzos comúnmente usados para el núcleo de los aisladores compuestos, corresponde a la fibra de vidrio tipo E (clase eléctrica) vidrio borosilicatado, fibra conocida como E – GLASS, cuyo nombre se deriva de sus primeras aplicaciones en devanados de motores y de otros equipos eléctricos. El vidrio de mayor resistencia a los ácidos, ECR – GLASS, ha generado interés recientemente como un material de consideración en la fabricación de un aislador polimérico de mayor resistencia a la fractura.

La fibra E – GLASS también se usa como material de reforzamiento para productos de plástico y de fibra de vidrio textil. La fibra ECR – GLASS se usa en aplicaciones que requieren mayor resistencia química. En la tabla 2.3 se muestran algunas características eléctricas de estas fibras.

a.3) Fabricación:

Las barras GRP se fabrican por medio de un proceso de sinterización, un proceso automatizado para la formación de materiales compuestos a perfiles de sección transversal constante. Las fibras de vidrio se recubren con una membrana de un polímero matriz modificado apropiado o “mordiente” (*sizing*), el cual debe hacer químicamente compatible la mezcla con la resina. En este proceso, las fibras se pre-impregnan con la resina líquida termotratada para ser “estiradas” por medio de un molde calentado o troquel, para vulcanizar la resina. La barra compuesta sinterizada contiene de 70 a 80% de su volumen de fibra de vidrio.

b) Recubrimiento externo

El recubrimiento externo consiste de una cubierta y aletas de goma hechas de compuestos poliméricos. Como cualquier otro material orgánico, el polímero del recubrimiento externo experimenta envejecimiento ambiental. Por lo tanto, las propiedades de estos polímeros tales como la resistencia al “rastreo” (*tracking*) (ver página 35), erosión e intemperie, son factores limitantes en el desempeño eléctrico y mecánico de los aisladores no cerámicos. Para aplicaciones en exteriores a alto voltaje, se requiere que estos materiales presenten las siguientes características:

- 1.- Buena resistencia al rastreo y descarga eléctrica.
- 2.- Alta rigidez dieléctrica para minimizar daños por erosión.
- 3.- Rigidez mecánica aceptable.
- 4.- Buena resistencia a la intemperie, particularmente a la radiación ultravioleta y a la oxidación.
- 5.- Alta hidrofobicidad (*hydrophobicity*) superficial, que es la habilidad de aspersar o repeler el agua.

b.1) Materiales empleados:

Los materiales empleados para el recubrimiento son las resinas epóxicas, elastómeros de hidrocarburo y elastómeros de silicona. Cada material ofrece características particulares. Sin embargo, han sido los elastómeros los que han tenido éxito en el aislamiento eléctrico de exteriores, especialmente la silicona, con la cual se han reunido todos los requerimientos para un desempeño a largo plazo en casi todos los ambientes posibles. La tabla 2.4 muestra en forma resumida los distintos materiales empleados para el recubrimiento externo del aislador.

TABLA 2.4. *Materiales empleados para el recubrimiento externo del aislador compuesto.*

MATERIAL	TIPO
Resina epóxica	Bisfenol tipo A (<i>bisphenol A type</i>)

	Cicloalifática (<i>cycloaliphatic type</i>)
Elastómero de hidrocarburo	Monómero de etileno propileno (<i>ethylene propylene monomer – EPM</i>)
	Monómero de etileno propileno dieno (<i>ethylene propylene diene monomer – EPDM</i>)
Elastómero de silicona	Goma líquida de silicona (<i>liquid silicone rubber – LSR</i>)
	Vulcanizado a temperatura media (<i>room temperature vulcanized – RTV</i>)
	Vulcanizado a alta temperatura (<i>high temperature vulcanized – HTV</i>)
Aleación	EPDM – Silicona

b.2) Proceso de fabricación y forma de las aletas:

El proceso de fabricación de aisladores cerámicos facilita numerosas formas o campanas posibles. Estos aisladores emplean métodos de moldeo a presión para hacer cada unidad o campana.

Para aisladores poliméricos, los cuales son moldeados ya sea en una sola pieza o en largas secciones, la extracción del aislador de la cavidad del molde (el cual está hecho de dos partes iguales a lo largo del eje de simetría) es la acción primordial que conlleva a la forma del aislador.

La figura 2.16 muestra las tres posibilidades para la forma de la superficie inferior de la aleta del aislador. Esta superficie puede tener un ángulo positivo (figura 2.16a), ser horizontal o plana (figura 2.16b), o tener un ángulo negativo (figura 2.16c). Sin embargo, el molde no puede abrirse después de la operación de moldeo si el perfil de la aleta tiene demasiado ángulo negativo. Por esta razón sólo puede obtenerse una pequeña pendiente para la superficie inferior de la aleta con este tipo de proceso.

A fin de obtener aletas con mayores pendientes, tendría que abrirse desde el tope o desde el fondo. Esto significa que tales aletas tendrían que ser moldeadas individualmente, y posteriormente integradas al aislador. Esto, a su vez, resultaría en pasos adicionales de fabricación y también aumentaría el número de interfases, lo cual puede implicar complicaciones en el comportamiento del aislador.

Investigaciones realizadas por la Universidad de Arizona, permiten afirmar que los aisladores con ángulo positivo de la superficie inferior de la aleta (figura 2.16a) no se comportan tan bien como los otros. El comportamiento obtenido ante corriente de fuga, carga acumulativa y al *flashover* (disrupción), fue inferior respecto a los otros tipos que se ilustran en la figura 2.16.

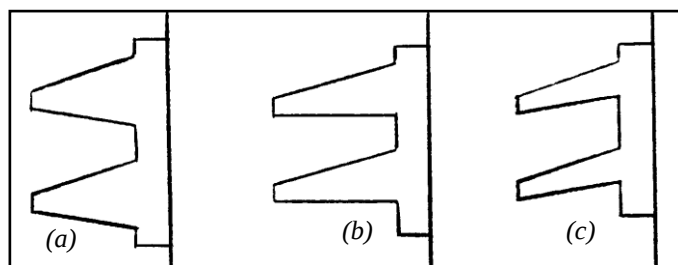


FIGURA 2.16. Formas de la superficie inferior de las aletas. (a) Ángulo positivo. (b) Disposición

El ángulo positivo debajo de la aleta mejora el aspecto aerodinámico (más fácil de remover los contaminantes por el viento y la lluvia), pero disminuye la probabilidad de que una parte del aislador permanecerá seco bajo condiciones ambientales de humedad.

Por otra parte, se determinó que un aislador con mayor inclinación de la superficie superior de la aleta mejora su desempeño en disuadir la formación de hilos continuos de agua, por lo que provee un comportamiento superior bajo condiciones de contaminación. Adicionalmente, mientras mayor es el espaciamiento entre aletas se evita el puenteo de agua, así como también se puede disuadir la actividad de descargas parciales que se concentran en ciertos sitios y que pueden conducir a la degradación del aislador mediante rastreo y erosión.

La norma IEC 60815 suministra una guía de instrucciones para aisladores cerámicos sobre aspectos de forma de los mismos, tales como el diámetro máximo de campana y la distancia mínima entre campanas. Ya que no hay un documento equivalente aún establecido para aisladores compuestos, puede asumirse que la norma IEC 60815 es un documento que puede usarse. En el apéndice A se presenta esta guía de instrucciones, que lleva por título “Parámetros que Caracterizan el Perfil del Aislador” (*Parameters Characterizing the Insulator Profile*), y cuyo contenido se presenta en el apéndice D de la norma en cuestión.

c) Herrajes terminales

Los herrajes terminales de los aisladores no cerámicos, en general, están hechos de aluminio labrado a máquina (*machined*), forjado y colado, acero forjado o hierro colado dúctil. Para mejorar su resistencia a la corrosión en ambientes de servicio, los herrajes terminales (excepto el aluminio) son galvanizados mediante baño en caliente para protegerlos contra la corrosión.

Los herrajes se conectan con el núcleo de diferentes formas para desarrollar la rigidez mecánica necesaria así como proveer un medio de conexión al aislador.

d) Interfases

En el aislador compuesto existen tres interfases: núcleo – recubrimiento, herraje – núcleo y herraje – recubrimiento. Otra interfase que se puede presentar en estos aisladores es el del tipo aleta – cubierta, la cual consiste de una intercapa de material adhesivo generalmente compuesto de grasa de silicona. Sin embargo, para disminuir el número de interfases y aumentar la confiabilidad de los productos, los fabricantes en la actualidad construyen aletas y cubierta en una sola pieza, para luego ser moldeadas directamente al núcleo.

d.1) Núcleo - recubrimiento:

La interfase entre el recubrimiento y el núcleo debe estar libre de aire y espacios vacíos, además de que debe evitar el ingreso de contaminantes y humedad. Existen diferentes tipos de interfases, de entre los cuales destacan la adhesión por “vulcanización” (*vulcanizing*) o “autoclavamiento” (*autoclaving*), capa interna de grasa de silicona y pegamentos químicos.

d.2) Herraje – núcleo:

A lo largo de los años se han desarrollado varios métodos para la conexión entre herrajes terminales y núcleo, los cuales incluyen al “estampado” (*swaging*), “pegado” (*gluing*) o el uso de una cuña metálica.

La fuerza de sujeción de los herrajes sobre la barra del núcleo debe ser lo suficientemente fuerte para asegurarla pero sin ocasionarle esfuerzos excesivos que puedan dañarla, ambos factores deben tomarse en cuenta en el diseño de aisladores compuestos para el desarrollo de procesos de estampado o compresión de la barra, en los cuales la fuerza de sujeción es gradualmente aplicada y uniformemente distribuida.

d.3) Herraje – recubrimiento:

El área del herraje en unión con la cubierta de goma se amplía suministrando así una máxima adhesión en esta interfaz. Esto se hace con la finalidad de aumentar la protección del núcleo contra humedad y contaminación, y además de esto, permite altas presiones de lavado cuando son requeridas. Entre los sellados empleados para esta interfaz se encuentra el sellado hermético al agua (*water-tight sealing*) con sellador de silicona RTV.

- *Mecanismos de degradación*

Los aisladores no cerámicos pueden envejecerse y presentar cambios debido a los múltiples esfuerzos encontrados en servicio, ya que tienen uniones más débiles que los materiales cerámicos. El envejecimiento y la vida esperada de los aisladores no cerámicos dependen de varios factores, muchos

de los cuales están asociados con la exposición a la intemperie, mientras que otros están relacionados con las condiciones de operación. Aunque el exponerse a los elementos naturales ha demostrado que envejece los materiales, existe una gran experiencia que sugiere que la vida del aislador está más relacionada con diseños de pobre desempeño y un mal control de calidad durante el proceso de fabricación.

El envejecimiento se refiere al proceso que causa la falla del aislador para poder cumplir con su función. Dependiendo de los materiales utilizados en los aisladores, de su diseño y de las condiciones ambientales, se pueden generar diferentes mecanismos de degradación que pueden provocar la falla del aislador. Algunos de estos mecanismos son:

- 1.- Diversas formas de falla mecánica de la barra de fibra de vidrio (*brittle fracture*).
- 2.- Formación de caminos conductores sobre la superficie del material aislante (*tracking*).
- 3.- Aparición de partículas del relleno en la superficie aislante (*chalking*).
- 4.- Cambios en el color base del material aislante (*colour changes*).
- 5.- Rompimiento del material no cerámico como resultado de la exposición a altos niveles de energía UV asociada con la presencia de corona (*corona cutting*).
- 6.- Corrosión de las partes metálicas debido a la reacción química con el ambiente.
- 7.- Microfracturas superficiales con profundidades entre 0.01 y 0.1 mm (*crazing*).
- 8.- Rompimiento del material adhesivo usado para unir químicamente dos materiales del aislador (*debonding*).
- 9.- Pérdida significativa del material aislante, irreversible y no conductora (*erosión*).
- 10.- Exposición de la barra de fibra de vidrio al ambiente (*exposure of the core*).
- 11.- Fracturas superficiales con profundidad mayor a 0.1 mm (*alligatoring*).
- 12.- Fuga de grasa de las interfaces aleta-cubierta o cubierta-núcleo hacia la superficie (*grease leakage*).
- 13.- Penetración de agua en forma líquida o vapor, causando el ablandamiento de cubierta o aletas (*hydrolisis*).
- 14.- Pérdida de hidrofobicidad.
- 15.- Pérdida de adhesión del sello de los herrajes (*peeling*).
- 16.- Daños por arco de potencia (*power arc damage*).
- 17.- Daños por perforación (*puncture*).
- 18.- Separación o apertura del material aislante (*splitting*).

19.- Daños por vandalismo.

Aunque muchos factores están involucrados en el envejecimiento de los aisladores no cerámicos, la humedad y la contaminación juegan los papeles más importantes. En condiciones secas y ambientes sin contaminación, los aisladores no cerámicos tienen una vida muy larga. La humedad y la contaminación provocan un incremento en la corriente de fuga sobre la superficie aislante. La experiencia ha mostrado que existe una apreciable diferencia en el nivel de corriente de fuga entre los aisladores cerámicos y los no cerámicos. La corriente de fuga en los aisladores no cerámicos indica la pérdida de la hidrofobicidad de las aletas y cubierta. Si la corriente de fuga es suficientemente alta puede conducir a la formación de arqueo de bandas secas. El calor producido por las descargas en forma localizada causa erosión o carbonización. Por lo anterior, la retención de la hidrofobicidad es altamente deseada, aunque si esta propiedad se pierde o se reduce, la formulación del material no cerámico debe tener una alta resistencia a la erosión o a la carbonización.

La corriente de fuga también redistribuye el esfuerzo de voltaje, sobreesforzando los materiales no cerámicos y la construcción del aislador, lo cual causa la ruptura dieléctrica de las uniones, exponiendo la barra de fibra de vidrio a la humedad. Cuando esto ocurre se presenta una falla interna por carbonización.

La clave para dar mayor tiempo de vida a los aisladores no cerámicos es asegurar que la corriente de fuga se mantenga en un nivel bajo. Debido a su hidrofobicidad, los aisladores no cerámicos de goma de silicona satisfacen este requerimiento esencial. Sin embargo, una distancia de fuga protegida bien dimensionada también reduce la corriente de fuga. Asimismo, el mantenimiento por lavado natural o artificial también incrementa su vida.

- *Diferentes tipos de aisladores*

A través de los años, el uso de aisladores compuestos en la transmisión y distribución de energía eléctrica ha venido incrementándose. Los productos compuestos que inicialmente cubrían sólo los aisladores de suspensión, cubren ahora un amplio espectro de aplicaciones. Así pues, se pueden encontrar diferentes diseños de aisladores según sea la aplicación.

a) Aisladores con base y aisladores de suspensión

Contrariamente a los aisladores de suspensión, donde todas las cargas generan esfuerzos de tracción, el aislador con base debe soportar esfuerzos de compresión, flexión y tracción cuando se ve sometido a cargas verticales, longitudinales y de compresión. El aislador con base, también conocido

Por otra parte, los aisladores de suspensión (ver figura 2.15) encuentran su aplicación en líneas aéreas de transmisión desde 69 kV hasta 765 kV.

El aislador con base atirantado se utiliza en líneas aéreas de transmisión de alto voltaje. Su uso se justifica cuando el esfuerzo vertical es importante. Este aislador consiste de un arreglo entre el aislador con base y el aislador de suspensión el cual hace la función de “viento” o “tirante” (ver figura 2.18). El viento absorbe, al trabajar en tracción, el esfuerzo vertical producido por el conductor; el aislador con base no es más solicitado en flexión. Para el aislador con base, hay dos tipos de fijación a la estructura soportante:

-
- AISLADOR DE SUSPENSION

c) Aisladores para líneas de distribución

Además de los aisladores con base, se encuentran otros tipos de aisladores usados para niveles de distribución. Tal es el caso de los aisladores de aplicación tipo remate en sistemas de hasta 35kV (ver figura 2.19), cuyo diseño disminuye las dimensiones de los herrajes terminales, presentando pequeños anillos metálicos.

d) Aisladores huecos para subestaciones (*hollow composite insulators*)

A diferencia del diseño del aislador compuesto tradicional, el núcleo de este tipo de aislador es tubular (hueco), como se aprecia en la figura 2.20. Dependiendo de la aplicación específica, la cavidad interior del tubo puede estar en contacto con gas (SF₆) o líquido (aceite). Estos aisladores encuentran aplicación en disyuntores, transformadores de potencia, transformadores de medición, capacitores, puntas terminales de cables entre otros.

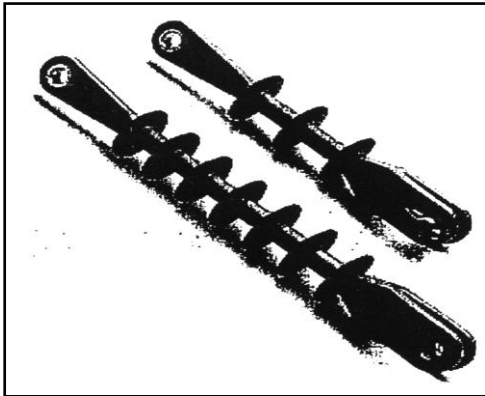


FIGURA 2.19. Aisladores para distribución.

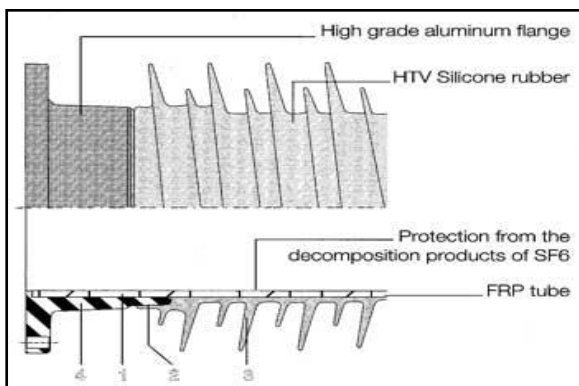


FIGURA 2.20. Aislador hueco para subestaciones.

2.2.5. Comparación del desempeño de los aisladores para líneas

A continuación se realiza un breve análisis comparativo entre los distintos tipos de aisladores empleados en las líneas de transmisión en cuanto a su comportamiento, basado en experiencias de explotación, investigaciones y pruebas de laboratorio.

➤ Comparación entre aisladores cerámicos: porcelana y vidrio templado

La comparación del comportamiento de los aisladores de porcelana y vidrio templado de caperuza y espiga bajo distintos esfuerzos puede resumirse en los siguientes puntos:

- 1.- La resistencia mecánica del aislador de vidrio es mayor que la de la porcelana.
- 2.- En aisladores de vidrio templado, si por cualquier circunstancia estos llegaran a sufrir algún daño fatal, el disco se destrozaría casi instantáneamente, quedando el aislador en un estado de muñón. La alta resistencia mecánica residual del muñón le hace posible a la línea continuar en operación hasta la próxima jornada de mantenimiento. Un aislador de porcelana con su campana destruida pierde buena parte de su resistencia mecánica.
- 3.- La inspección visual en el vidrio para la detección de defectos internos, se hace fácilmente debido a su transparencia. En los aisladores de porcelana, defectos invisibles pueden escapar de la inspección durante la verificación de lotes. De hecho, durante su operación estos aisladores pueden presentar perforación sin cambio aparente externo, por lo que usuarios y fabricantes de equipos eléctricos han diseñado dispositivos altamente sofisticados para el chequeo de las unidades en servicio.
- 4.- Tanto en el aislador de vidrio como en el de porcelana, el dieléctrico trabaja bajo esfuerzos de compresión.
- 5.- En lo concerniente a la capa vitrificadora en la porcelana, ésta, mejora las propiedades mecánicas y ayuda a conservar las piezas limpias en servicio.
- 6.- El aislador de porcelana con respecto a su equivalente de vidrio, resulta tener mayor peso.
- 7.- La rigidez dieléctrica del aislador de vidrio templado es mayor que la del aislador de porcelana.
- 8.- Las cadenas de aisladores de vidrio presentan generalmente un mejor comportamiento ante los arcos de potencia que las cadenas de aisladores de porcelana.

9.- El aislador de vidrio presenta la característica de ser imperforable ante ondas de impulso de frente escarpado. Los aisladores de porcelana son perforables, debido a la presencia de porosidades en el material dieléctrico. Por esta razón se requiere la aplicación de una prueba de porosidad al momento de la inspección.

10.- Las variaciones de temperatura crean menor condensación sobre el vidrio que en la porcelana. El aislador de porcelana con capa semiconductor mejora su desempeño bajo esta condición (ver sección 2.2.4).

11.- La corrosión del material de la espiga en el aislador de vidrio no causa ningún daño al dieléctrico de vidrio templado, mientras que en el aislador de porcelana puede producir en el interior de la cabeza del aislador una ruptura del cuerpo de porcelana. Los fabricantes, en vista de este problema, han incorporado en la espiga un recubrimiento capaz de disminuir la corrosión. Este recubrimiento se fabrica de zinc, y es conocido como “manguito” de zinc (*zinc sleeve*).

12.- Otro asunto relativo a los aisladores cerámicos de caperuza y espiga, ha sido el problema del vandalismo. Cabe destacar que los aisladores de vidrio han sido los más afectados debido a su apariencia y forma de destrucción, las cuales resultan atractivas a los tiradores. Por esta razón, en Venezuela, la empresa C.V.G. EDELCA ha adoptado una política de reemplazo de aisladores de vidrio con aisladores de porcelana en aquellas áreas donde sucede el vandalismo.

➡ **Comparación entre aisladores no cerámicos: EPDM y goma de silicona**

El recubrimiento externo de los aisladores poliméricos está hecho de materiales orgánicos, por lo tanto están sujetos a deterioro y envejecimiento durante su servicio en campo a largo plazo debido a varios factores tales como radiación ultravioleta (*UV*), humedad, descarga corona, corriente de fuga y/o arqueado de banda seca, bajo ambientes de contaminación y humedad. Seguidamente se establece una breve comparación de las propiedades entre la goma de silicona y el EPDM, los cuales han sido los materiales más usados como recubrimiento de aisladores compuestos, y que han encontrado mayor aplicación en el aislamiento de exteriores.

1.- La goma de silicona presenta un superior comportamiento al envejecimiento en condición seca a alta temperatura.

2.- El EPDM tiene una resistencia superior al agua caliente y al vapor.

3.- La goma de silicona tiene una resistencia superior a la radiación ultravioleta.

4.- La goma de silicona presenta mayor hidrofobicidad y recuperación de ésta propiedad a lo largo del tiempo después de cualquier esfuerzo que haga que la pierda momentáneamente. Esto resulta en

menores corrientes de fuga, menor arqueo de banda seca, y menor ocurrencia de descargas eléctricas por contaminación. En el EPDM la pérdida de la hidrofobicidad inicial es un fenómeno irreversible.

5.- Experiencias de compañías de servicio han determinado que la goma de silicona presenta un mejor comportamiento en campo a largo plazo.

➡ **Comparación entre aisladores cerámicos y no cerámicos**

Los aisladores no cerámicos poseen características especiales que los hacen atractivos para resolver problemas detectados en los aisladores de vidrio o porcelana, principalmente en zonas de alta contaminación y vandalismo. La tendencia en su uso se ha incrementado notablemente en nuevos proyectos de transmisión, pero la experiencia operativa muestra que la selección de dichos aisladores requiere de un análisis cuidadoso y de un seguimiento de su comportamiento en campo que permita establecer las ventajas o desventajas técnico-económicas de su aplicación a largo plazo. En comparación con los aisladores cerámicos convencionales, pueden establecerse los siguientes puntos:

- 1.- Los aisladores poliméricos presentan menor peso, lo que resulta en ahorros de transporte, manejo e instalación.
- 2.- A diferencia de los aisladores cerámicos, los aisladores compuestos no son frágiles, lo que los hace resistentes al vandalismo.
- 3.- El aislador compuesto exhibe una alta relación resistencia-peso, lo que permite diseños de nuevas torres con mayores claros.
- 4.- Con su propiedad hidrofóbica, los aisladores no cerámicos mejoran el comportamiento bajo contaminación debido a que presentan valores más altos de voltaje de descarga por contaminación para la misma distancia de fuga que los de los aisladores cerámicos. Además, presentan valores menores de corriente de fuga.
- 5.- Por su flexibilidad de diseño el aislador compuesto tiene la ventaja de presentar variedad de herrajes terminales eliminando la necesidad del empleo de piezas de conexión adicionales. También, tienen la posibilidad de incrementar la distancia de fuga añadiendo discos de goma sin incrementar la longitud del aislador.
- 6.- Los aisladores poliméricos eliminan los programas de mantenimiento y lavado de aisladores.
- 7.- El aislador cerámico cuenta con una amplia experiencia de su desempeño en servicio para sistemas de transmisión superiores a 400 kV, lo que representa una ventaja frente al aislador compuesto, que

posee una limitada experiencia de operación en campo para estos grandes niveles de tensión por ser un producto relativamente nuevo.

2.3. ESFUERZOS ELÉCTRICOS Y PARÁMETROS AMBIENTALES QUE AFECTAN AL AISLAMIENTO

2.3.1. Esfuerzos de voltaje sobre el aislamiento

La ruptura o deterioro del aislamiento eléctrico depende de la magnitud del esfuerzo y del período de tiempo durante el cual éste se aplica. Frecuentemente, la física del proceso de ruptura es considerablemente diferente para diferentes tipos de esfuerzos. Puesto que existen varios tipos de esfuerzos, sería necesario considerarlos a cada uno por separado. Sin embargo, para el aislamiento de líneas aéreas de transmisión, hablar de esfuerzo es prácticamente hablar de esfuerzo por tensión ó voltaje. De hecho, para el cálculo eléctrico del aislamiento de líneas de transmisión sólo se consideran este tipo de esfuerzos, aunado a los parámetros ambientales reinantes en el área de estudio.

Institutos de normalización han adoptado una terminología específica para varias categorías de esfuerzos de voltaje sobre el aislamiento [10]. Así se tiene:

1.- Voltaje del sistema.

2.- Sobretensiones.

2.1.- Sobretensión temporal.

2.2.- Sobretensión de maniobra.

2.3.- Sobretensión atmosférica.

Estas categorías se refieren más al tipo de prueba empleada para la identificación de las características del aislamiento de la línea que a los orígenes de los esfuerzos de voltaje aplicados a dicho aislamiento.

Cabe destacar que la forma y magnitud del esfuerzo de voltaje, en lo concerniente al aislamiento, son más importantes que el origen físico del voltaje que conlleva a este esfuerzo. En la tabla 2.5, página 49, se presentan las características de las formas de onda estándar que representan los esfuerzos. A continuación se desarrollan las definiciones referentes a estas categorías, y más adelante se presentan los orígenes físicos de los esfuerzos de voltaje.

➡ Voltaje del sistema

En un sistema eléctrico, se llama voltaje del sistema al voltaje *rms* fase a fase a frecuencia industrial. El sistema comúnmente se designa por un voltaje nominal del sistema al cual se le asocian ciertas características de operación del mismo. Por ejemplo, el voltaje nominal del sistema se usa como una base para el flujo de carga así como para otros estudios asociados también al sistema. En general, la mayoría de los sistemas operan cerca de la tensión nominal del sistema. Algunos sistemas operan al máximo voltaje del sistema o a valores cercanos de éste, el cual normalmente es de 5% a 10% más elevado que el nominal.

El máximo voltaje del sistema es el máximo valor *rms* fase a fase que puede presentar el voltaje del sistema, que ocurre bajo condiciones normales de operación en cualquier momento y punto del sistema. Esto excluye tensiones transitorias y sobretensiones temporales causadas por condiciones anormales.

Para el aislamiento, es importante conocer la diferencia básica entre los esfuerzos causados por la tensión del sistema y los esfuerzos causados por sobretensiones. Las sobretensiones son poco frecuentes y de limitada duración, pero la tensión del sistema, aún cuando es relativamente bajo en amplitud, constantemente fatiga al aislamiento mientras el sistema se encuentra en operación. En general, no puede limitarse el tiempo o la amplitud de este esfuerzo sin mermar la potencia transmitida.

El continuo esfuerzo debido al voltaje es de importancia aún cuando su amplitud es más baja que la de otros esfuerzos de corta duración. Este puede contribuir al envejecimiento del aislamiento. Sin embargo, esto no es de interés para el aislamiento de líneas en general, pero si lo puede ser para el equipo conectado.

El continuo esfuerzo debido a la tensión es de interés si el aislamiento se altera por sí mismo con el tiempo. Puede ocurrir disrupción si la rigidez del aislamiento se reduce lo suficiente. Las condiciones climáticas pueden originar tales reducciones en la rigidez. Por ejemplo, el viento al incidir sobre un conductor reduce la distancia entre éste y la estructura que lo soporta. Este tipo de alteraciones serían de corta duración.

Adicionalmente, el aislamiento cambia sobre períodos prolongados, por ejemplo, la disminución de la rigidez debido a la contaminación. El aislamiento puede cambiar durante un período de meses debido a la acumulación de contaminantes, o puede cambiar en un período de minutos cuando en forma alternada los aisladores se humedecen por niebla o lluvia y se secan por fuga en la superficie. En ambos casos solo el continuo voltaje del sistema dura lo suficiente para producir cambios en la

rigidez y hacerlos evidentes. Los efectos de la contaminación se pueden evaluar a través de pruebas de laboratorio.

Aseveraciones de que el aislamiento de líneas se determina completamente por un tipo de sobrevoltaje, por ejemplo sobretensiones de maniobra para líneas de extra-alto voltaje (EHV), son por lo tanto algo engañosas. Diferentes aspectos del aislamiento se determinan por medio de los diferentes esfuerzos. Por ejemplo, los aisladores contaminados se fatigan más por el voltaje de operación, mientras que las distancias de abertura (*air gaps*) se fatigan más por sobretensiones de maniobra.

Así pues, el diseño del aislamiento de líneas para el voltaje de operación a frecuencia de régimen es de básica importancia.

➡ Sobretensiones

Una sobretensión es cualquier voltaje transitorio entre fase y tierra o entre fases con un valor de cresta más alto que el valor de cresta del voltaje máximo del sistema ($V_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$ para una sobretensión fase tierra o $V_m\sqrt{2}$ para una sobretensión fase a fase).

Estas sobretensiones son frecuentemente expresadas en valores en por unidad, teniendo como valor base al voltaje máximo del sistema. De esta manera, por ejemplo, el valor en por unidad para una sobretensión fase tierra es:

$$V_{pu} = \frac{V_{L-G}\sqrt{3}}{V_m\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

donde:

V_{pu} : Sobretensión en por unidad fase a tierra.

V_{L-G} : Valor cresta de la sobretensión fase a tierra.

V_m : Voltaje máximo *rms* del sistema.

El valor en por unidad para una sobretensión fase a fase se define de manera similar.

Estas definiciones, conforme a la Norma ANSI C92.1 y a la Publicación 72 de la IEC, son importantes y deben seguirse para evitar malas interpretaciones [10].

Las sobretensiones son fenómenos transitorios. Una distinción general se puede hacer entre las sobretensiones elevadamente amortiguadas de una relativa corta duración (sobretensión atmosférica y sobretensión de maniobra) y las sobretensiones no amortiguadas o débilmente amortiguadas de una

relativa larga duración (sobretensión temporal). La transición, si existe, entre estos dos grupos no se puede definir claramente.

- ***Sobretensión temporal***

Una sobretensión temporal es una sobretensión oscilatoria fase a tierra o fase a fase la cual es de una duración relativamente larga, y es no amortiguada o débilmente amortiguada. Estas sobretensiones, por lo general se originan, entre otros, de:

- 1.- Fallas.
- 2.- Cambios repentinos de carga.
- 3.- Efecto Ferranti.
- 4.- Resonancia lineal.
- 5.- Ferroresonancia.
- 6.- Conductores abiertos.
- 7.- Resonancia inducida de circuitos acoplados.

Una falla línea a tierra representa un ejemplo típico de una sobretensión temporal no amortiguada que se puede mantener en las fases sanas hasta que la situación se corrija. Esto puede representar un esfuerzo de voltaje a frecuencia industrial relativamente prolongado, del orden de cientos de milisegundos.

Otro ejemplo típico de sobretensión temporal es aquella debida al recierre de líneas terminadas en transformadores. Las características de saturación del transformador pueden producir un alto contenido armónico en la forma de onda de la tensión. Por otra parte, la capacitancia de la línea, junto con la inductancia del transformador, pueden producir oscilaciones que modularían las amplitudes del voltaje a frecuencia industrial. La envolvente de las oscilaciones sería atenuada con relativa lentitud, o quizás no sería del todo atenuada. Típicamente, el voltaje excesivo puede persistir durante cientos de milisegundos. Ambos tipos de fenómenos, algunas veces llamados sobretensiones mantenidas y dinámicas, respectivamente, tienen un período de duración común.

- ***Sobretensión de maniobra***

Una sobretensión de maniobra es una sobretensión en un punto determinado debida a una operación de maniobra o a una falla. Para propósitos de coordinación de aislamiento, la forma de esta

sobretensión puede estimarse como similar a aquella empleada para representar al impulso de maniobra estándar. Las sobretensiones de maniobra son comúnmente sobre amortiguadas y de corta duración.

El propósito de esta definición es el de enfatizar que una sobretensión dada se clasifica como una sobretensión de maniobra en función de su forma de onda en lugar de su fuente u origen. Sin embargo, en la práctica, las sobretensiones de maniobra tienen diversidad de formas de onda: unas oscilatorias, unas aperiódicas y otras repetitivas. Algunas veces, es muy difícil compararlas con las formas de onda estándar consideradas en las pruebas. La amplitud y duración de las sobretensiones de maniobra dependen de la configuración del sistema y de los parámetros eléctricos de los equipos, junto con el tiempo y forma del cambio del sistema que da inicio al transitorio. El número de factores influyentes en los resultados finales hacen difícil proporcionar una descripción general de la forma de onda de las sobretensiones. Es suficiente decir que las sobretensiones de maniobra se refieren a los voltajes transitorios sobre amortiguados generados por el sistema en respuesta a la operación de maniobra. Estas sobretensiones son considerablemente de mayor duración que las sobretensiones atmosféricas, las cuales tienen una duración de unos pocos microsegundos.

Aún cuando la forma de onda y duración de las sobretensiones son de mayor importancia para el aislamiento de las líneas que sus orígenes, la clasificación de las sobretensiones con respecto a su origen es útil. Esta clasificación ofrece una guía acerca de cómo deberían investigarse las situaciones cuando se buscan datos de sobretensión. Las sobretensiones de maniobra pueden clasificarse de acuerdo a sus orígenes como sigue:

- 1.- Energización de líneas.
- 2.- Recierre de líneas.
- 3.- Ocurrencia y despeje de falla.
- 4.- Interrupción de corrientes capacitivas (principalmente efectos de “reiniciación de arco” (*restrikes*)):
 - 4.1.- Apertura de línea en vacío
 - 4.2.- Conmutación de bancos de capacitores.
- 5.- Interrupción de corrientes inductivas (principalmente efectos de “desgarramiento de corriente” (*current chopping*)):
 - 5.1.- Corrientes de magnetización de transformadores.
 - 5.2.- Conmutación de reactores.
- 6.- Operaciones especiales de maniobra:
 - 6.1.- Capacitores serie.

6.2.- Circuitos resonantes y ferresonantes.

Algunas de estas operaciones son normales y otras anormales. No se puede dar por sentado que las sobretensiones elevadas estén asociadas sólo a operaciones anormales, o que las operaciones normales produzcan sólo sobretensiones intrascendentes.

La magnitud de las sobretensiones exhibe una variación considerable. Estas variaciones reflejan la naturaleza determinística y probabilística de este tipo de sobretensiones.

Está claro que las sobretensiones de maniobra dependen de los parámetros del sistema, de su configuración y de sus condiciones, por ejemplo, la excitación de carga. Sin embargo, estas sobretensiones pueden alcanzar diferentes valores aún para el mismo sistema y, aparentemente, la misma operación de maniobra.

El valor de la sobretensión depende del tiempo relativo al evento de maniobra con respecto a la onda sinusoidal del voltaje del sistema a frecuencia de régimen. Por ejemplo, se encuentra que las sobretensiones durante la energización o recierre de una línea dependen del tiempo de cierre de los polos del interruptor. Por medio de la combinación del peor caso de los tiempos de cierre del interruptor, generalmente a través del tanteo o de un analizador de transitorio de redes (*TNA*), es posible hallar la sobretensión máxima asociada con una determinada operación de maniobra en un sistema dado. Esta metodología ha sido usada en el procedimiento tradicional de coordinación de aislamiento; la sobretensión correspondiente es llamada sobretensión de maniobra máxima convencional.

Generalmente el tiempo de cierre del interruptor no está sincronizado con la forma de onda de la tensión a frecuencia industrial. Esto es aleatorio, y cada operación de maniobra resulta en una sobretensión diferente. Este carácter aleatorio del tiempo de cierre es sólo una razón de la variación en la sobretensión de maniobra. Pueden haber otros eventos aleatorios que hacen imposible predecir el valor de las sobretensiones para una operación específica sobre la base de observaciones previas.

Debido a que los valores de sobretensión presentan un comportamiento aleatorio, estos pueden ser descritos de forma más significativa por medio de métodos estadísticos. Estos métodos no predicen las sobretensiones específicas producidas por alguna operación de maniobra en particular, pero si determinan la probabilidad con la que una cierta sobretensión pueda darse, o de una manera más práctica, la probabilidad de que se exceda un cierto valor de sobretensión. La sobretensión sería completamente descrita si fuese dada su función de distribución de densidad de probabilidad o su distribución de probabilidad acumulativa. Aunque los términos estadísticos como el *término medio* y la

varianza pueden ser empleados para describir la distribución de sobretensión, eso no es lo práctico en este campo. El término mayormente usado en el campo de la coordinación de aislamiento es la *sobretensión estadística*. La sobretensión estadística de maniobra (o atmosférica) da a entender un valor de sobretensión que, en un sistema dado y con una operación de maniobra específica, tiene un 2% de probabilidad de ser excedido.

- ***Sobretensión atmosférica***

La sobretensión atmosférica es una sobretensión fase a tierra o fase a fase debida a una descarga atmosférica específica (rayo). Tales sobretensiones son por lo común unidireccionales y tienen una duración de entre 1 a 100 μ s. Los voltajes causados por otros eventos diferentes a estas descargas, pueden ser considerados como sobretensiones atmosféricas, para propósitos de coordinación de aislamiento, siempre que éstos tengan una forma similar a la del impulso atmosférico estándar.

Los tipos de sobretensiones atmosféricas incluyen aquellas debidas a fallas de apantallamiento o blindaje, causadas por un impacto directo a un conductor de fase; a las debidas por descargas retroactivas o de retorno (*back-flashovers*), causadas por impactos en torres o cables de guarda; y a los voltajes inducidos, causados por impactos de rayo en las cercanías de objetos aterrados.

En la tabla 2.5 se presentan los rangos de valores de onda establecidos por la Norma IEC 71-1 [25] para las sobretensiones desarrolladas hasta el presente punto, así como también las formas de onda normalizadas para la ejecución de pruebas estándar.

➞ **Formas de onda de voltaje normalizadas según IEC**

Según la Norma IEC 71-1, se han normalizado las siguientes formas de onda de voltaje para las sobretensiones estudiadas anteriormente:

- ***Voltaje a frecuencia industrial estándar de corta duración***

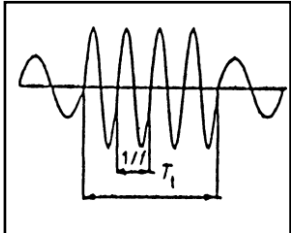
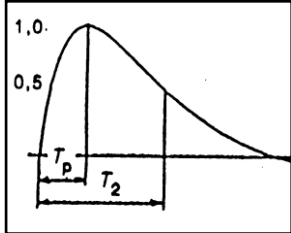
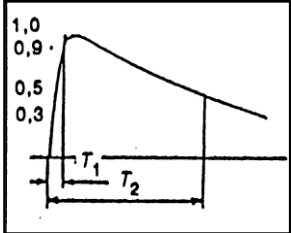
Voltaje sinusoidal con frecuencia entre 48 Hz y 62 Hz, y duración de 60 segundos (ver tabla 2.5), el cual representa a la sobretensión temporal.

- ***Impulso de maniobra estándar***

Impulso de voltaje con un tiempo de pico de 250 μ s y un tiempo de valor medio de 2500 μ s; siendo el tiempo de pico aquel correspondiente al valor pico del impulso, y el tiempo de valor medio

aquel correspondiente al valor medio del impulso de voltaje en la cola (ver tabla 2.5). Esta forma de onda representa a la sobretensión de maniobra.

TABLA 2.5. Formas de voltaje y valores estándar para las sobretensiones según Norma IEC 71-1.

SOBRETENSIÓN ➡	TEMPORAL	MANIOBRA	ATMOSFÉRICA
FORMA DE VOLTAJE	 Voltaje a frecuencia industrial estándar de corta duración	 Impulso de maniobra estándar	 Impulso atmosférico estándar
RANGO DE FORMAS DE VOLTAJE	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0.03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0.1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$
FORMA DE VOLTAJE ESTÁNDAR	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$
PRUEBA DE RESISTENCIA ESTÁNDAR	Prueba a frecuencia industrial de corta duración	Prueba de impulso de maniobra	Prueba de impulso atmosférico

- **Impulso atmosférico estándar**

Impulso de voltaje con un tiempo de frente de $1.2 \mu\text{s}$ y un tiempo de valor medio de $50 \mu\text{s}$; siendo el tiempo de frente aquel correspondiente al 90% del valor pico del impulso de voltaje (ver tabla 2.5). Esta forma de onda representa a la sobretensión atmosférica.

➡ Orígenes físicos de las sobretensiones

A pesar de que el sistema de clasificación para sobretensiones (temporal, de maniobra y atmosférica) convenientemente identifica al tipo de prueba apropiado para el aislamiento, éste no es igualmente útil cuando se discuten los orígenes físicos de las sobretensiones aplicadas al aislamiento. Cuando se consideran los orígenes físicos, deben entenderse los conceptos de “evento” y “condición”. Las sobretensiones de corta duración son ocasionadas por un evento. Un evento es algún tipo de operación de maniobra que involucra la eliminación de un camino de corriente existente o el establecimiento de uno nuevo. Esto incluye operaciones de maniobra inadvertidas, tales como la ocurrencia de una falla o una descarga atmosférica, así como también operaciones de maniobra intencionales. Por otro lado, las sobretensiones mantenidas son consecuencia de una condición anormal que constituye un estado de operación. Un ejemplo de una condición anormal sería la operación con una falla en una fase. La condición anormal generalmente sería ocasionada por un evento. Una sobretensión particular aplicada al aislamiento de líneas puede tener una forma de onda muy compleja y puede ser el resultado de varios eventos y condiciones. Por ejemplo, el evento de una descarga atmosférica a línea puede producir un voltaje transitorio muy rápido, una sobretensión atmosférica, que ocasiona la disrupción de un aislador. Esa disrupción puede desarrollarse en el evento de una falla que ocasiona un tipo diferente de sobrevoltaje en las fases sanas. Si la falla se despeja por un disyuntor, habría aún un tipo diferente de voltaje transitorio producido por el evento de recierre de la línea, el cual sería una sobretensión de maniobra. Los transitorios asociados con este último evento, pueden llevar a una condición en la cual las características de línea y transformador interactúan para producir una sobretensión temporal de mayor duración.

Las sobretensiones debidas a los eventos comúnmente duran microsegundos o milisegundos en su mayoría, mientras que aquellas debidas a condiciones duran ciclos, segundos e incluso minutos.

Debido a que cualquier sobretensión particular puede ser de una naturaleza compleja, no se debería darle demasiada importancia a la distinción entre los diferentes tipos de sobrevoltajes. El siguiente material ilustra algunos ejemplos de la naturaleza compleja de las sobretensiones.

- ***Sobretensiones temporales***

Las sobretensiones temporales generalmente, aunque no siempre, tienen dos características importantes: son determinables y persisten por varios ciclos. Determinable significa que las magnitudes pueden calcularse mediante un análisis clásico de estado estable (*steady-state*), asumiendo que las condiciones físicas en el sistema son conocidas. No se necesita recurrir a conceptos estadísticos para definir las magnitudes de éstas sobretensiones. El hecho de que las tensiones persisten por varios ciclos

implica que sus efectos sobre el aislamiento pueden considerarse mejor en términos de estado estable. A continuación se describen algunos de los eventos más comunes que conducen a las sobretensiones temporales.

a) Fallas a tierra

Las sobretensiones temporales pueden ser amortiguadas o no amortiguadas. Una falla a tierra es una condición que conlleva a un sobrevoltaje no amortiguado, una que persiste y fatiga al aislamiento hasta que se elimina el voltaje por algún tipo de evento de maniobra. El tipo predominante de falla es la falla monofásica a tierra. Las fallas bifásicas y trifásicas a tierra, y las fallas que no implican tierra, ocurren con mucho menos frecuencia.

Las magnitudes de las sobretensiones presentes en las fases sanas, dependen de la cantidad de cambio del neutro eléctrico causada por la falla. La sobretensión en las fases sanas será menos del 1.4 en por unidad en sistemas efectivamente aterrados, y 1.73 en por unidad o más en sistemas no aterrados. De acuerdo a la Norma ANSI C62.2, un sistema se define como efectivamente aterrado cuando el voltaje *rms* más alto línea a tierra en una fase sana es el 80% o menos del voltaje normal línea a línea en el emplazamiento de falla [10]. Por otra parte, una carga no aterrada alimentada desde el devanado en delta de un transformador es un ejemplo de un sistema no aterrado.

La forma de onda de una sobretensión asociada con una falla a tierra es por lo general sinusoidal y se puede describir en términos de valor pico o *rms*. Si el voltaje es lo suficientemente elevado, sin embargo, pueden presentarse efectos de saturación en los transformadores. Estos efectos conducen a la generación de armónicos y distorsión en las formas de onda. Bajo cualquier condición en la cual la forma de onda se distorsiona, una descripción del voltaje en términos de un valor *rms* sería incorrecta al considerar al aislamiento. El voltaje pico es una mejor medición de los efectos del voltaje en el aislamiento, pero sin embargo, éste pudiera no ser tan bueno.

Bajo ciertas condiciones, el aterramiento de un sistema puede cambiar. Por ejemplo, un transformador con un neutro aterrado podría ser removido del sistema. Es importante para el diseño del aislamiento que las sobretensiones se calculen bajo las peores condiciones posibles para obtener así los voltajes más elevados que probablemente pudieran ocurrir.

b) Cambios repentinos de carga

El peor caso de cambio de carga es la pérdida de carga o bote de carga. Esto ocurre cuando se abre el interruptor remoto de una línea de transmisión que transporta una porción considerable de la salida de una estación de generación, ya sea en respuesta a alguna condición del sistema o debido a un

disparo en falso. Una pérdida repentina de carga causa un aumento de voltaje debido a que, con un flujo de corriente reducido, la caída de voltaje a través de la impedancia interna del sistema se reduce. Adicionalmente, el generador tiende a incrementar su velocidad (*overspeed*) para producir voltajes aún más elevados. La magnitud de dicho incremento es primordialmente una función de la respuesta del gobernador de velocidad, mientras que la sobretensión depende no sólo de la velocidad sino del sistema de excitación y del carácter de la carga remanente. En turbinas de vapor, el incremento de velocidad en un completo bote de carga es menos del 10%, y es alcanzado en menos de un segundo. En unidades hidroeléctricas, por otro lado, puede haber un aumento de velocidad tan alto como un 60%, y le puede tomar tanto como 10 segundos para alcanzar ese nivel. En este último caso, un sistema de regulación de voltaje de rápida acción empezará a limitar la sobretensión mucho antes de que se alcance la velocidad máxima.

Así pues, la sobretensión en el generador se determina por los MVA de cortocircuito del sistema, la velocidad del generador, la longitud de cualquier línea de transmisión conectada, y la generación reactiva de la línea, la cual depende de la cantidad de compensación paralela y serie.

Para cálculos de precisión de sobretensiones debidas al bote de carga, generalmente se requiere de rutinas computarizadas, tomando en cuenta las características dinámicas de las máquinas y sus sistemas de control, además de las características de las líneas con las cuales dichas máquinas se conectan.

c) Efecto Ferranti

El voltaje estable o permanente en el extremo receptor de una línea en vacío (abierta) no compensada es siempre de mayor valor que el voltaje en el extremo transmisor. Este fenómeno se conoce con el nombre de “efecto Ferranti”, y se produce debido a la corriente de carga capacitiva que fluye a través de la inductancia serie de la línea. Para una línea no compensada, el voltaje en por unidad del extremo abierto de la línea es:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos(\beta l)} \quad (2.7)$$

donde:

V_2 : Voltaje en el extremo receptor, circuito abierto.

V_1 : Voltaje en el extremo transmisor.

l : Longitud de la línea.

β : Constante de fase ($\beta = 6$ grados / 100 km a 50 Hz; $\beta = 7.20$ grados / 100 km a 60 Hz).

Se puede obtener la compensación para el efecto Ferranti tanto paralela (inductiva) como serie (capacitiva). En una línea en vacío, las sobretensiones debidas a este efecto son de naturaleza sinusoidal.

d) Resonancia

Algunas de las sobretensiones temporales de mayor valor que pueden ocurrir en un sistema de transmisión son debidas a la resonancia. En su forma más simple, el circuito equivalente consiste de una fuente, un interruptor, y un circuito resonante serie LC, como se muestra en la figura 2.21a. En forma clara, si el circuito estuviera desprovisto de pérdidas (sin resistencia) y los elementos estuviesen sintonizados a la frecuencia de régimen (quedando con reactancias iguales), el voltaje a través del capacitor o del inductor aumentaría indefinidamente después del cierre del interruptor. En la práctica, los efectos de saturación y pérdidas limitan a las sobretensiones. Ignorando a las pérdidas, se tiene la siguiente relación:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{X_C}{X_L + X_C} = -\frac{1/\omega C}{\omega L - 1/\omega C} \quad (2.8)$$

donde:

L : Inductancia equivalente de la fuente.

C : Capacitancia equivalente de la carga.

$$\omega = 2\pi f$$

Aunque los sistemas de transmisión no se diseñan para ser resonantes, ocurren condiciones cercanas a la resonancia. Un ejemplo de tales condiciones es aquel en el cual la potencia normalmente se transfiere desde una fuente de alto voltaje a través de un cable, y luego a través de un transformador hacia una red de bajo voltaje. Si la fuente de alto voltaje fuese desconectada y el cable retroalimentado a través del transformador desde el lado de bajo voltaje, la reactancia inductiva serie del transformador podría ser casi igual a la reactancia capacitiva paralela del cable.

Las sobretensiones debidas a los efectos de resonancia, por lo general, se controlan mejor al alterar las impedancias del circuito para así evitar la condición de resonancia.

Los armónicos asociados con la saturación de transformadores pueden tener una frecuencia algo cercana a la frecuencia de resonancia. De esta forma, existe la posibilidad de una amplificación resonante de armónicos. Esto pudiera conducir a sobretensiones significativamente más grandes que las previstas por análisis elementales que emplean impedancias de frecuencia de sistema.

Las sobretensiones debidas a la amplificación resonante de armónicos se pueden estudiar empleando un *TNA* o uno de los diversos programas de análisis circuital de propósito general.

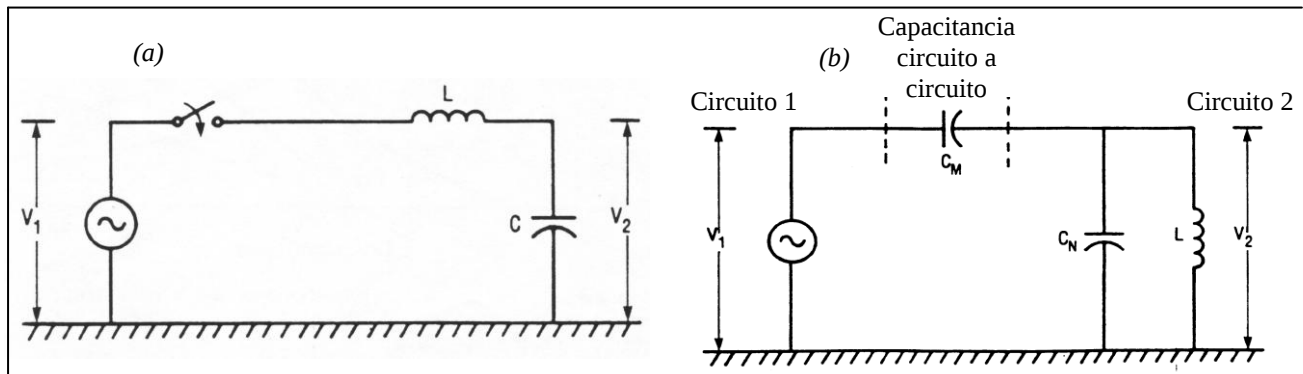


FIGURA 2.21. (a) Circuito de resonancia serie. (b) Circuito de resonancia de línea acoplada.

e) Resonancia de línea acoplada

Otra condición resonante que algunas veces se encuentra es el fenómeno de resonancia de línea acoplada. Los elementos fundamentales de esta condición constituyen múltiples circuitos de transmisión trifásicos en el mismo derecho de paso con compensación reactiva paralela o con transformadores aterrados conectados integralmente. Por ejemplo, se pueden tener dos circuitos en paralelo: uno desconectado con un reactor *shunt* en un extremo de la línea, y el otro energizado. Un circuito equivalente elemental para este caso se muestra en la figura 2.21b.

Bajo estas condiciones, existen tres puntos de resonancia que pueden acarrear sobretensiones. Para el modo de secuencia cero, la magnitud de la sobretensión está dada por:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\left(\frac{C_n}{C_m} \times \frac{1}{\omega L} \right) \times \left(\omega L - \frac{1}{\omega C_n} \right) + 1} \quad (2.9)$$

Los parámetros C_m y C_n son función del acoplamiento capacitivo entre los circuitos.

Las sobretensiones debidas a este efecto son sinusoidales en forma, a menos que el voltaje llegara a ser lo suficientemente elevado como para conducir a una saturación o a una condición de ferresonancia. Estas sobretensiones ocurren con mayor probabilidad cuando una línea está fuera de servicio por razones de mantenimiento, y pueden controlarse simplemente al aterrizar la línea desenergizada.

Ya que las sobretensiones producidas por este fenómeno de resonancia son por lo general sinusoidales, sus efectos sobre el aislamiento se determinan de mejor forma mediante el análisis de

estado estable, a través de pruebas a frecuencia de régimen. Existen, sin embargo, algunos fenómenos que originan sobretensiones que persisten por muchos ciclos, pero que prácticamente no son sinusoidales.

f) Ferroresonancia

La condición de ferroresonancia puede ocurrir cuando un dispositivo magnético saturable es excitado a través de una capacitancia. Situaciones típicas se muestran en la figura 2.22. En la figura 2.22a la capacitancia aparece entre los contactos del interruptor en circuito abierto, en tanto que en la figura 2.22b ésta es debida a las componentes en serie C_1 y C_2 de la capacitancia a tierra de un cable.

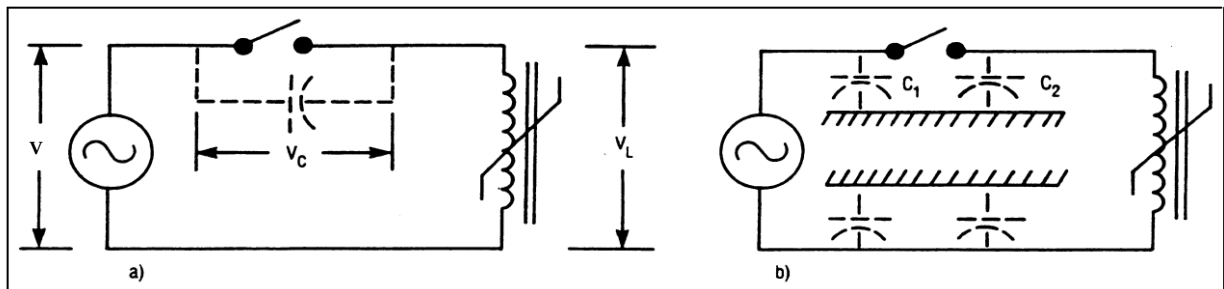


FIGURA 2.22. Circuitos sujetos a ferroresonancia. (a) Excitación por capacitancia a través de un interruptor. (b) Excitación a través de capacitancia a tierra.

Las condiciones que conducen al desarrollo de la ferroresonancia incluyen, pero no se limitan, aquellas en que sólo una o dos fases se energizan (ya sea por la acción de fusibles ó por apertura de fase) cuando los transformadores de potencial con reactancias muy elevadas se conectan a una barra abierta, ó cuando transformadores auxiliares se alimentan desde un devanado terciario en delta.

Cuando el campo magnético fluye a través de un material ferromagnético, la inductancia del circuito no es constante, manteniéndose al inicio prácticamente invariable al aumentar la corriente, y disminuyendo después cuando el circuito magnético entra en saturación.

El voltaje V_L en el reactor de la figura 2.22a depende de la forma y magnitud de la corriente que circula a través de él, pero la corriente, a su vez, depende del estado magnético del núcleo y por lo tanto de la forma y magnitud del voltaje V_L . Así pues, la curva característica voltaje – corriente del reactor no es lineal, mientras que para el capacitor sí lo es.

Pueden existir muchas combinaciones posibles de tensión y corriente para el análisis del circuito ferroresonante. No obstante, se puede realizar un análisis básico partiendo de la premisa de que las curvas características de V_C y V_L se cruzan, como en la figura 2.23a. En este caso, se presenta la siguiente situación: como inicialmente V_L es mayor que V_C , el voltaje V aplicado al circuito será la

diferencia entre V_L y V_C . Si el voltaje aplicado empieza a aumentar se llegará a un valor máximo de dicha tensión, V_{max} , a partir del cual cualquier incremento en el mismo implicaría un cambio brusco en el modo de operación del circuito, el cual pasaría de inductivo a capacitivo ya que para valores superiores a V_{max} no hay solución posible a la izquierda del punto de cruce de las curvas en estudio (punto O_1 de la figura 2.23) para el cual se pueda cumplir de nuevo la relación $V = V_L + V_C$. Como se puede apreciar, el cambio analizado provoca un cambio en el estado magnético del núcleo del inductor, el cual entra en saturación. Esto produce un aumento considerable en la magnitud de la corriente, lo que hace que también aumente el voltaje aplicado a cada uno de los componentes del circuito. Adicionalmente, debido a la saturación, la tensión V_L y la corriente del circuito serían poco sinusoidales, introduciéndose así un gran contenido de armónicos.

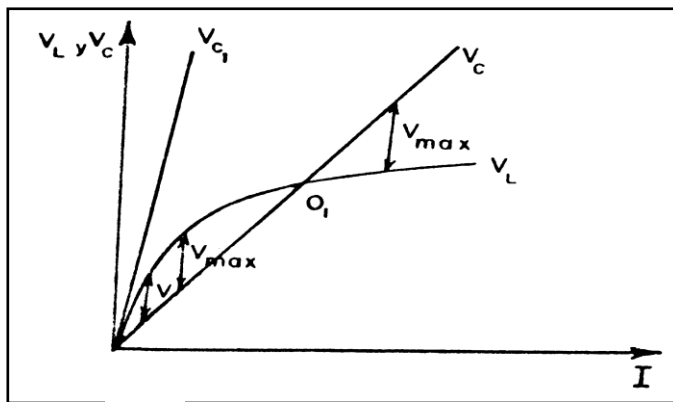


FIGURA 2.23. Característica de variación del voltaje en la inductancia y en la capacitancia.

El modo de oscilación puede cambiar con el tiempo de una manera impredecible, resultando en una tensión en el inductor más parecida a una señal de ruido aleatoria que a una onda periódica sinusoidal o cuadrada.

La figura 2.24 muestra un ejemplo de los voltajes observados durante una condición ferroresonante. Estos voltajes se obtuvieron con la apertura de la fase B del circuito de la figura 2.25a. Un examen de este circuito permite reducirlo al de la figura 2.25b, en el cual la fase B del transformador se excita a través de una capacitancia desde una fuente equivalente, E. La magnitud de E depende de las magnitudes de las distintas capacitancias y tensiones en las fases energizadas. Estudios realizados han determinado que las sobretensiones ferroresonantes tienen una mayor probabilidad de ocurrencia cuando:

$$X_C < 20X_L \quad (2.10)$$

donde X_C es la reactancia del capacitor y X_L es la reactancia inductiva en la región lineal o no saturada.

Algunas veces, los voltajes ferroresonantes pueden controlarse usando transformadores operando a densidades de flujo reducido. Si esto no es posible, pueden controlarse por procedimientos de maniobra que eviten la energización de transformadores sin carga a través de capacitancias.

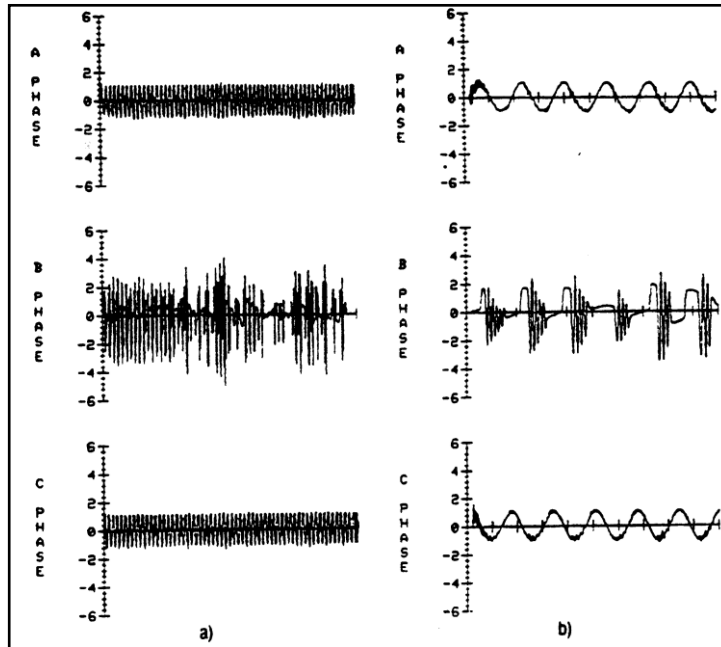


FIGURA 2.24. Voltaje ferroresonante resultante de una apertura en la fase B. (a) 100ms/div. (b) 10ms/div.

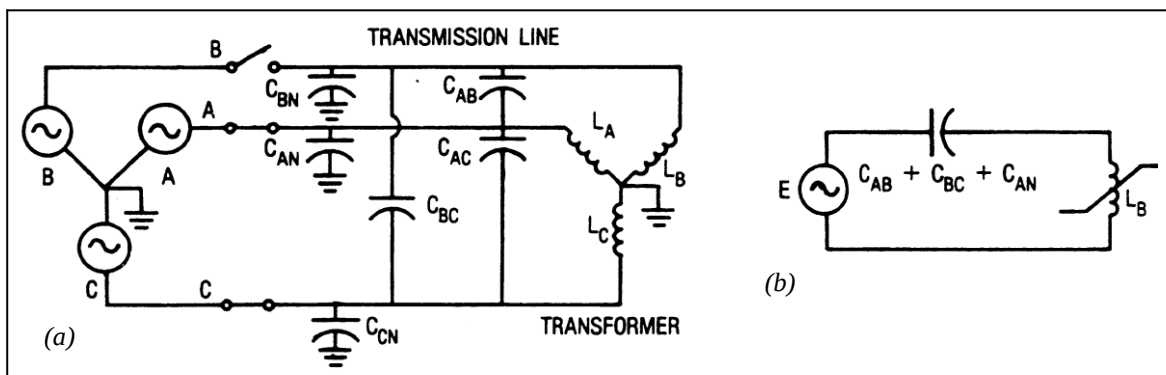


FIGURA 2.25. Circuito sujeto a ferroresonancia. (a) Representación trifásica. (b) Circuito equivalente simplificado.

g) Energización de líneas terminadas en un transformador

Un tipo de acción de maniobra que puede originar una sobretensión temporal ligeramente amortiguada, es la energización o recierre de una línea terminada en un transformador. Después del transitorio inicial, la forma de onda del voltaje permanece distorsionada por muchos ciclos debido a los efectos de la *corriente de inrush* del transformador. La magnitud de la corriente de inrush depende del instante en el que se cierra el interruptor, de la impedancia de la fuente, y de los parámetros de la línea

y el transformador, que incluyen el flujo residual del transformador. Debido a que este tipo de forma de onda puede permanecer en la línea durante un período de segundos, se clasifica como una sobretensión temporal, aún cuando contiene picos de voltaje iniciales que pertenecen a la categoría de sobretensiones de maniobra.

- **Sobretensiones de maniobra**

Los efectos de las sobretensiones de maniobra en el aislamiento son considerablemente diferentes a los de las sobretensiones temporales. Las sobretensiones de maniobra ocurren cuando quiera que el voltaje inicial en el momento de la maniobra no sea igual al voltaje final. Un ejemplo elemental se muestra en la figura 2.26. Cuando el interruptor cierra, el voltaje que estuvo a través de los contactos se elimina, pero reaparece, distribuido a través de los diversos elementos del circuito, en ambos lados del interruptor, en relación a sus impedancias características, o impedancias efectivas al impulso. El condensador inicialmente aparece como un corto circuito, mientras que el inductor en el otro lado del interruptor aparece como un circuito abierto. Por lo tanto, todo el voltaje se encuentra inicialmente en el lado de la fuente del interruptor. En la condición final de estado estable, el condensador debe tener el mismo voltaje que en la fuente. Debido a que éste es un circuito oscilatorio, el voltaje del condensador tiende a oscilar alrededor de este valor final, como se puede apreciar en la figura 2.26b. Así pues, la magnitud de la sobretensión depende de la diferencia entre el voltaje inicial y el final (para este caso, cero y E respectivamente).

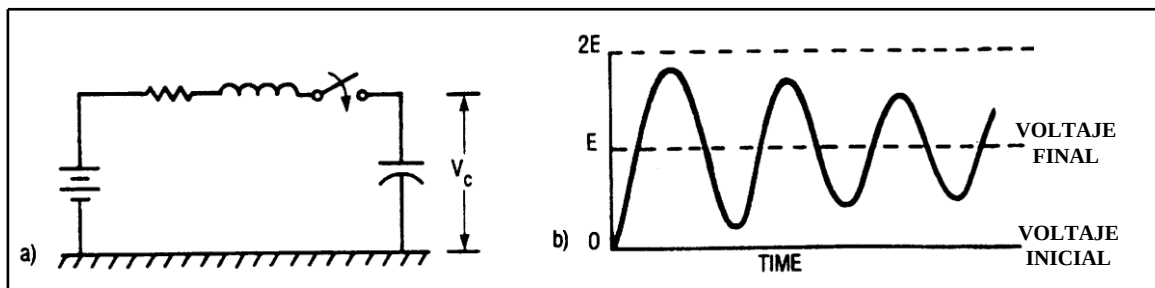


FIGURA 2.26. Maniobra de un circuito elemental. (a) Circuito RLC. (b) Voltaje del condensador V_C .

Sobretensiones similares a la del ejemplo anterior ocurren en las líneas de transmisión cuando ondas viajeras se reflejan en discontinuidades. Si no hubiera pérdidas, el voltaje oscilaría continuamente alrededor del valor final. En los sistemas de potencia, por lo general, las pérdidas son tales que sólo los primeros dos o tres ciclos de la oscilación transitoria poseen una significativa amplitud.

La forma de onda de las sobretensiones de maniobra puede variar en un extenso rango dependiendo del circuito involucrado. Típicamente, el rango del tiempo de frente de la forma de onda comprende desde unos cientos de microsegundos a uno o dos milisegundos. Sin embargo, tiempos de frente más pequeños que éstos son posibles cuando por ejemplo un interruptor despeja una falla muy cercana. Por otro lado, el rango de duración de la forma de onda va desde una fracción de milisegundo hasta unos pocos milisegundos. Esto es importante ya que la rigidez del aislamiento usado en líneas de transmisión depende en gran medida de la forma de onda de la sobretensión.

Otra característica importante de las sobretensiones de maniobra, en un sentido práctico, es que no son determinables. Si un interruptor de potencia es usado para operar una línea idéntica en dos ocasiones distintas, las sobretensiones debidas a una operación no serán, por lo general, las mismas que aquellas producidas por la otra operación.

Usualmente, las sobretensiones debidas a las operaciones de maniobra se describen en términos estadísticos, a menudo por curvas de probabilidad de exceso de un voltaje dado. El siguiente material describe algunas de las operaciones comunes de maniobra que dan origen a sobrevoltajes significantes.

a) Energización de una línea de transmisión

Si la línea no termina en un transformador, las sobretensiones producidas son debidas a ondas viajeras en los conductores. Estas ondas viajeras pueden excitarse directamente por el cierre de los interruptores o indirectamente por acoplamiento con otras fases. Los tiempos relativos de cierre de los distintos polos del interruptor revisten gran importancia. Las magnitudes de estos voltajes se ven influenciadas por la longitud de la línea, por las pérdidas en los conductores y la trayectoria del aterramiento, y por las resistencias de preinserción, si existen, en los interruptores. Estas sobretensiones son generalmente más grandes en el extremo abierto de la línea.

Por otra parte, cuando una línea terminada en un transformador se energiza, los fenómenos son más complejos debido a las características no lineales del núcleo. Los armónicos generados por las características de magnetización de los transformadores pueden interactuar con la capacitancia de la línea y causar oscilaciones no lineales. En algunos casos, estas oscilaciones se pueden mantener. Estos tipos de sobretensiones transitorias persisten por un tiempo relativamente prolongado, y en consecuencia, pueden imponer solicitudes demasiado severas en los pararrayos (*surge arrester*).

b) Recierre de una línea de transmisión

Cuando un interruptor opera para despejar una línea en vacío, la corriente de carga capacitiva se interrumpe cuando la misma pasa por cero. Esto ocurre cuando el voltaje está en su valor máximo, quedando así la línea con una carga atrapada. El voltaje en los conductores será aproximadamente igual al pico del voltaje del sistema. El acoplamiento entre fases, y posiblemente el *corrimiento de neutro*, deja a menudo una fase con un voltaje de hasta 1.3 en por unidad. A menos que la carga se drene por un transformador o un reactor, ésta permanecerá en la línea por varios segundos.

Si la línea se somete a recierre antes de que la carga haya sido drenada, los polos del interruptor pueden cerrar cuando el voltaje del sistema sea de una polaridad opuesta a la de la línea en cuestión. Esto hace que la diferencia entre el voltaje inicial y el voltaje final de la maniobra sea mayor que aquella que fuese si no hubiera carga atrapada en la línea. En consecuencia, el voltaje transitorio puede ser de mayor dimensión. En una línea trifásica, son posibles transitorios de maniobra de hasta cinco en por unidad, aunque éstos generalmente son de menor ocurrencia.

Las resistencias de cierre o de preinserción en un interruptor sirven para absorber parte de la energía asociada con las ondas viajeras y por lo tanto tienden a reducir la magnitud de las sobretensiones. Los interruptores equipados con resistencias de cierre generalmente tienen una valuación (*rating*) que indica el factor máximo de onda por maniobra que se espera cuando el interruptor se usa para energizar o efectuar el recierre de una línea convencional de longitud e impedancias especificadas. A pesar de que este factor de sobretensión es una buena medida de los transitorios a esperarse en una línea existente, no garantiza que las sobretensiones en dicha línea serán menores que las sobretensiones valuadas. La línea existente y el sistema pueden ser significativamente diferentes de la línea de referencia bajo la cual se basa la valuación.

Adicionalmente, las sobretensiones transitorias pueden producirse al desenergizar una línea. Un ejemplo de la desenergización de una línea terminada en un transformador se muestra en la figura 2.27. El voltaje alcanza 1.5 en por unidad antes de disminuir a niveles más bajos. También se puede apreciar de la figura que el voltaje sigue un patrón rectangular debido a que el núcleo del transformador es llevado alternadamente dentro y fuera de la saturación.

c) Interrupción de circuitos reactivos

Pueden desarrollarse voltajes muy elevados durante la interrupción de circuitos reactivos, particularmente si ocurre la reiniciación de arco (*restrikes*) en el dispositivo de maniobra. Generalmente, los fenómenos observados de maniobra involucra el almacenamiento de energía en las inductancias y capacitancias, con un intercambio entre las dos. Esta sección se centra en la interrupción

de corrientes de magnetización y carga, en lugar de la interrupción de corrientes de falla, debido a que la experiencia revela que aquella interrupción es la que produce por lo general las sobretensiones más vastas.

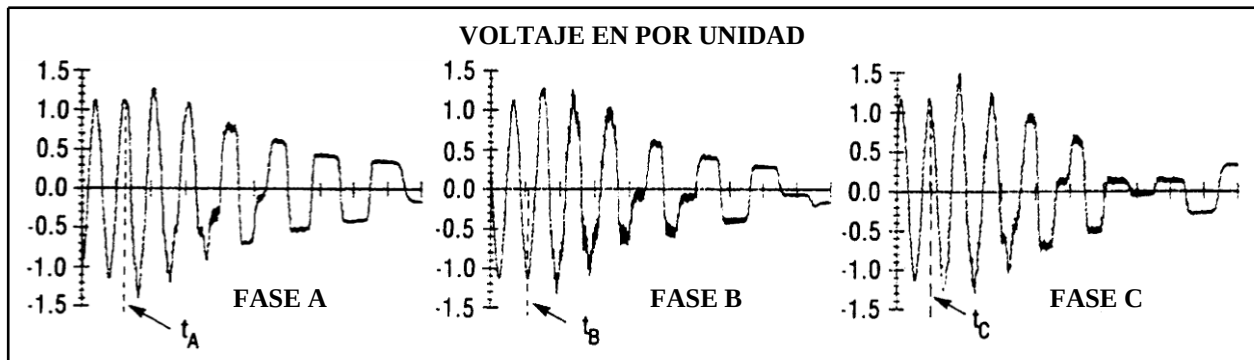


FIGURA 2.27. Sobretensiones producidas al desenergizar una línea terminada en un transformador.

c.1) Circuitos capacitivos:

Los fenómenos más simples involucran una carga capacitiva alimentada a través de una fuente inductiva, como se muestra en la figura 2.28. La corriente que circula por el condensador adelanta al voltaje en 90° . En el momento en que los contactos del interruptor se separan (algún lugar previo al punto 1 de la figura 2.28b), un arco de corriente aparece entre los contactos, y la corriente continúa fluyendo. Cuando la corriente pasa a través de cero, el arco pierde conductividad, y la corriente se interrumpe, produciéndose una pequeña oscilación en el voltaje de la fuente, V_S , en el punto 1. Esta oscilación iguala la inductancia L_S y la capacitancia de pérdida C_S . El arco no enciende de nuevo ya que el voltaje a través del interruptor, $V_C - V_S$, es muy pequeño. De esta forma, el condensador permanece cargado a un voltaje igual al valor pico de la alimentación, o -1.0 en por unidad.

Cuando la alimentación cambia de signo, el voltaje de recuperación en el interruptor, $V_C - V_S$, se incrementa. Medio ciclo después, cuando el voltaje de la fuente ha cambiado a +1.0 en por unidad, habrá un voltaje de casi 2.0 en por unidad a través del interruptor. Si el interruptor no ha recuperado la suficiente rigidez dieléctrica para resistir este voltaje, se reiniciará el arco (punto 2). El voltaje en el condensador intentará cambiar desde su voltaje inicial de -1.0 en por unidad hasta un valor final de +1.0 en por unidad, una diferencia de 2.0 en por unidad. Como se explicó previamente, el voltaje se disparará por esa cantidad en un circuito sin pérdidas. De este modo, el voltaje en el condensador puede elevarse tan alto como +3.0 en por unidad. En pruebas reales, los voltajes no llegarían a este nivel

debido a las pérdidas en los circuitos. La frecuencia de la transición oscilatoria (entre los puntos 2 y 3) es controlada por C y L_S .

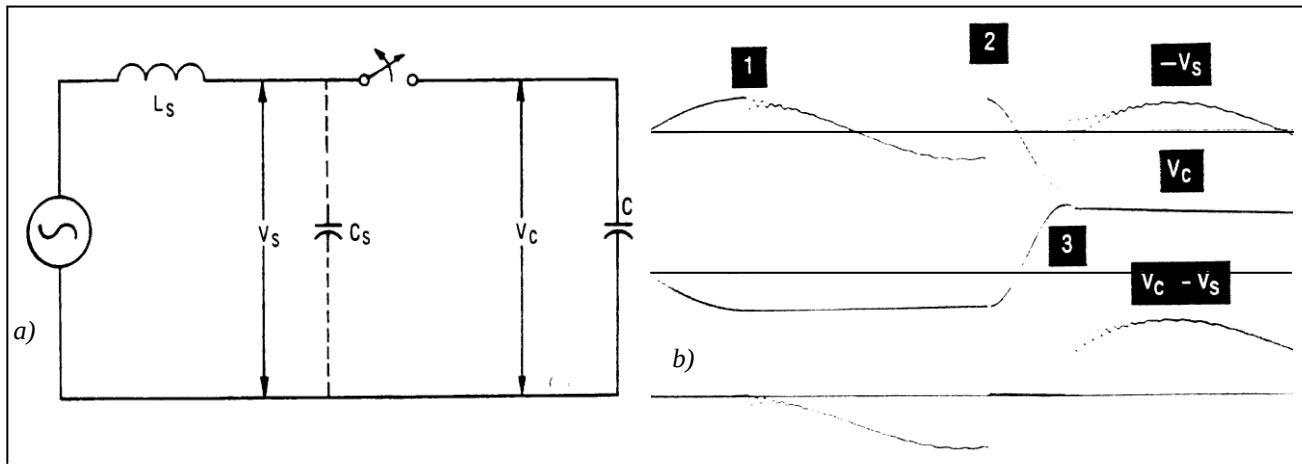


FIGURA 2.28. Interrupción de corrientes capacitivas. (a) Circuito. (b) Formas de onda.

Cuando el voltaje en el condensador ha alcanzado su máximo (punto 3), la corriente de descarga transitoria pasará a través de cero y el arco puede extinguirse de nuevo, dejando al condensador cargado a una tensión más alta. Teóricamente, el condensador podría dejarse cargado a +3.0 en por unidad. En la figura 2.28b, el proceso se detiene en el punto 3, pero medio ciclo después podría ocurrir una segunda reiniciación de arco, cuando el voltaje a través del interruptor se haya incrementado a -4.0 en por unidad. Teóricamente, tal reiniciación de arco podría dejar al condensador cargado a -5.0 en por unidad. En principio, el proceso podría continuar indefinidamente. En la práctica, sin embargo, las pérdidas, las capacitancias de pérdida, y posiblemente fallas del aislamiento limitarán a las sobretensiones. El precedente proceso puede ocurrir en cualquier momento en que se interrumpa la corriente capacitiva, si la maniobra es debida a una línea de transmisión abierta, un cable, o un banco de condensadores.

En los sistemas trifásicos, los fenómenos son más complejos, particularmente si los polos de los interruptores no operan todos al mismo tiempo. Los voltajes más elevados ocurren si se abre sólo una fase.

c.2) Circuitos inductivos:

En la figura 2.29a se muestra un inductor, L_L , en paralelo con un condensador, C_L . Si $\omega L \ll 1/\omega C$, la corriente a través del interruptor será predominantemente la corriente a través de L_L y atrasará al voltaje de alimentación en 90° . La inductancia L_S se asume pequeña comparada con L_L , y se

asume también que los contactos del interruptor se separan en un tiempo previo a t_0 (ver figura 2.29b), así que la corriente, I , se transmite por un arco que aparece entre los contactos del interruptor. Cuando la corriente de carga pasa por cero, el arco intenta extinguirse. Debido a que el circuito es predominantemente inductivo, la erradicación del arco ocurrirá cuando V_S y V_L estén en su máximo valor. Si el arco se extingue y permanece extinguido (un limpio despeje del arco), la carga que se almacenó en C se descarga a través de L , haciendo a V_L oscilatoria. La frecuencia de la oscilación es controlada por L_L y C_L , y en general, es más alta que la frecuencia del voltaje de la fuente. De este modo, el voltaje de recuperación a través del interruptor, V_B , llega a su valor máximo en un tiempo que es corto comparado con el período de la alimentación. Este caso es diferente a aquel presentado en la figura 2.28b, en la cual transcurre un medio ciclo completo antes de que el voltaje de recuperación alcance su máximo.

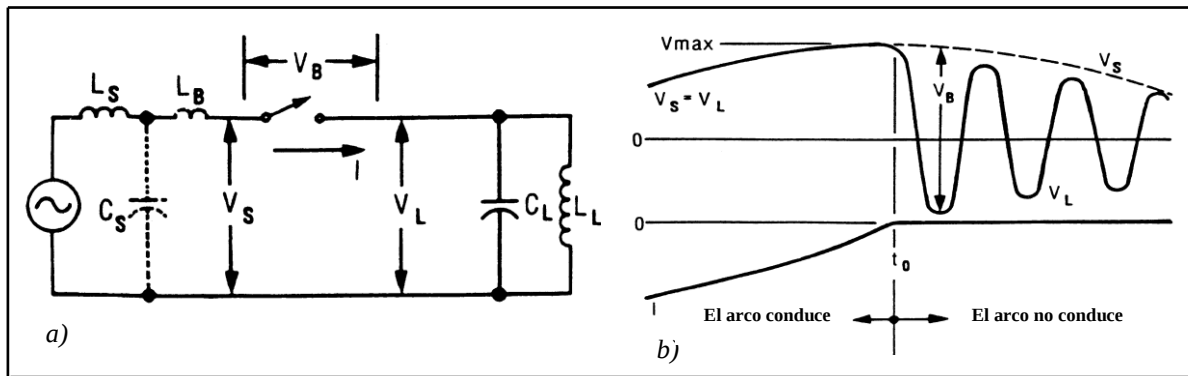


FIGURA 2.29. Despeje sencillo de corriente inductiva en un interruptor. (a) Circuito. (b) Formas de onda.

En la práctica, el voltaje de recuperación se ve influenciado por oscilaciones en V_S cuando se despeja el arco. Estas son oscilaciones que serían gobernadas por L_B y C_S (ver figura 2.29a). En el interés de una clara explicación, dichas oscilaciones y las que a continuación se desarrollan no se ilustran en la figura 2.29b.

Debido a que el voltaje de recuperación, V_B , es aplicado a través de los contactos poco tiempo después de haberse despejado el arco, éste último puede reencender o encender de nuevo (*reignition*). Si lo llega a hacer, como se muestra en la figura 2.30a, el voltaje V_L a través de la carga intentará recuperarse al voltaje de la fuente, V_S . Fluirán corrientes oscilatorias de una frecuencia gobernada por L_B y C_S , y V_L puede crecer más alto que V_S . Como la corriente en el arco pasa por cero, éste puede extinguirse de nuevo, como en t_1 (ver figura 2.30a), y el voltaje de recuperación será determinado de nuevo por L_L y C_L . Este proceso puede repetirse varias veces, con cada uno de los ciclos despeje-

reencendido—despeje ocasionando incrementos más altos en V_L . La figura 2.30b muestra un ejemplo. El arco inicialmente intenta despejarse en el punto 1. Luego, repetitivos reencendidos ocurren entre los puntos 1 y 2. Finalmente, el arco se despeja permanentemente en el punto 3, y V_L decae en una forma oscilatoria gobernada por L_L y C_L .

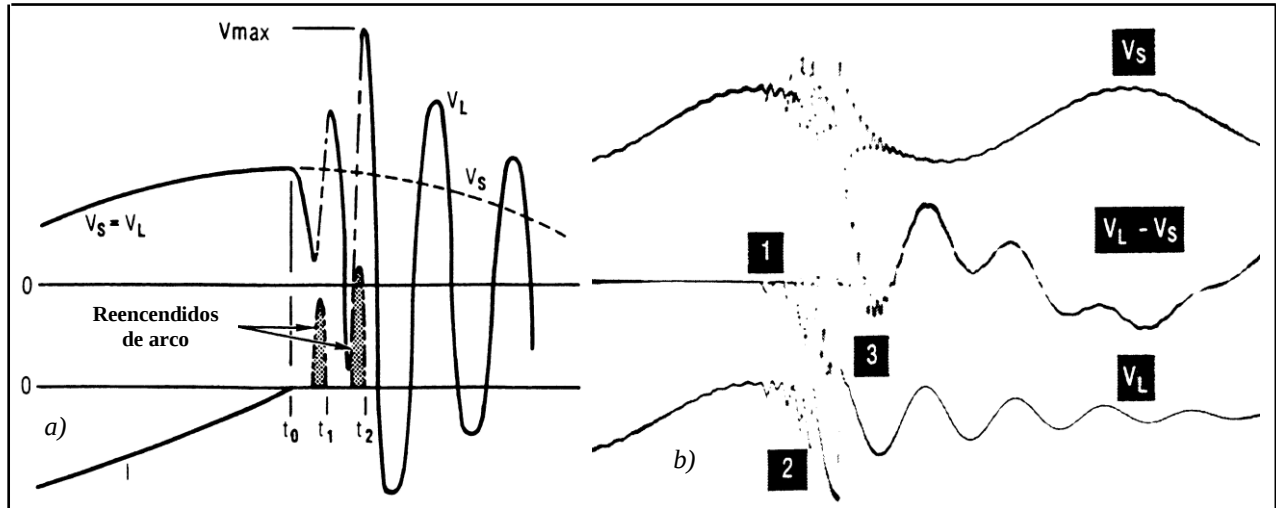


FIGURA 2.30. (a) Reencendido y escalada de voltaje. (b) Un ejemplo de escalada de voltaje a través del reencendido.

La figura 2.30 ilustra los fenómenos frecuentemente observados cuando se interrumpe la corriente de magnetización de un reactor o un transformador. Cabe destacar que si el arco se despeja cuando la corriente en el inductor pasa por cero, toda la energía será almacenada inicialmente en el condensador. El mecanismo fundamental por medio del cual el voltaje se incrementa corresponde de esta forma a un fenómeno capacitivo.

El arco, cuando decae, es propenso a muchas inestabilidades. Frecuentemente, estas inestabilidades se manifiestan como se muestra en la figura 2.31a, en la cual la corriente empieza a oscilar y luego cae bruscamente a cero. Esto ocurre antes del momento en el que normalmente la corriente pasa por cero. El fenómeno es llamado “desgarramiento de corriente” (*current chopping*). La magnitud de la corriente que puede ser desgarrada, I_C , depende del tipo de interruptor, de los materiales de los cuales son hechos los contactos, y del tipo de circuito al cual se conecta el interruptor. Típicamente, se encuentra alrededor de 10 A. La corriente inmediatamente previa al desgarrar estará fluyendo en su mayor parte en L_L ya que el desgarrar ocurrirá cerca del valor cresta de V_L , en donde la tasa de cambio del voltaje está a un mínimo.

La variación en el voltaje debido al desgarramiento de corriente viene dada por:

$$\Delta V = I_0 \sqrt{L/C} \quad (2.11)$$

típicamente está en el rango $(10 - 100) \cdot 10^3 \, \Omega$ para transformadores y reactores.

El condensador. Éste rara vez es el caso. Como es bien conocido, la energía se pierde por la histéresis y la resistencia, y ambas pérdidas son altas a frecuencias asociadas con fenómenos rápidos de maniobra. El efecto de estas pérdidas se puede tomar en cuenta al introducir un factor empírico de eficiencia, η , en la ecuación 2.11, obteniendo así:

$$\Delta V = I_0 \sqrt{\eta} \sqrt{L/C} \quad (2.12)$$

valor para dispositivos de núcleo de hierro.

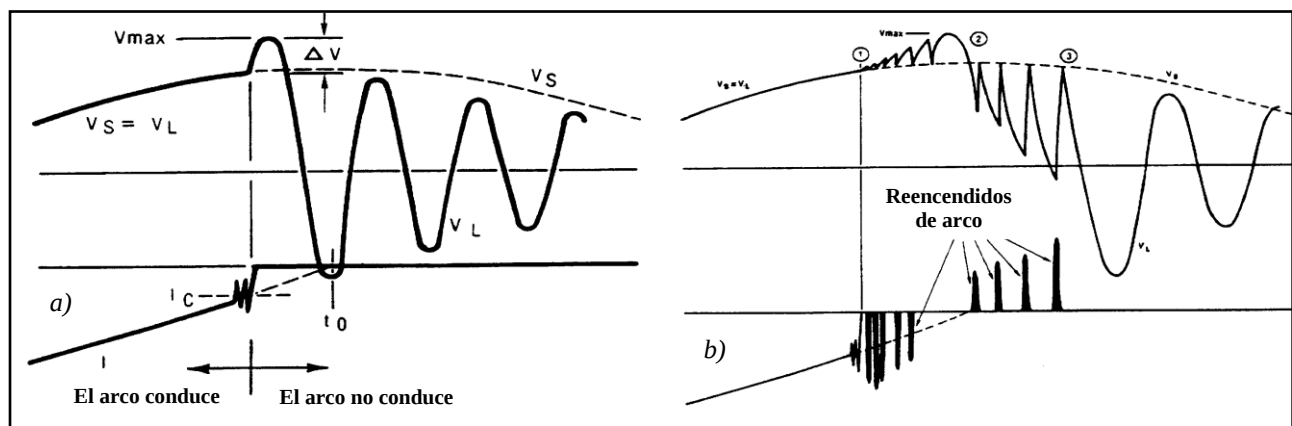


FIGURA 2.31. (a) Despeje con desgarramiento de corriente. (b) Escalada de voltaje inducida por el desgarramiento de corriente.

característica del desgarramiento de corriente. Este tipo de incremento no se ve en la figura 2.30b, por lo que en ese caso la corriente se interrumpió sin desgarramiento.

islamiento, excepto posiblemente si se tratara de la maniobra de reactores lineales. Las corrientes desgarradas son pequeñas y colapsan en el dispositivo de maniobra, en tanto que las pérdidas previamente mencionadas mantienen a la sobretensión en un bajo nivel.

ΔV incrementa el voltaje de recuperación en el interruptor y puede conducir a una escalada de voltaje, como se muestra en la figura 2.31b. Los reencendidos que ocurren entre los puntos 1 y 2 (el periodo

entre el desgarramiento de corriente y la corriente natural cero) producen un voltaje con forma de diente de sierra que incrementa V_L a un máximo, V_{max} , el cual es más elevado que el voltaje de la fuente. Pueden ocurrir otros reencendidos después del punto 2 hasta que el arco se despeja permanentemente en el punto 3. Cuando el arco finalmente es despejado, el voltaje puede ser de alto valor ya que los repetitivos encendidos habrán incrementado la corriente a un valor más alto que I_0 .

En los circuitos trifásicos, un reencendido puede conducir al fenómeno del “desgarramiento virtual de corriente”, el cual acusa interrupciones de corriente mucho más elevadas que aquellas involucradas en un simple desgarramiento de corriente, y que conduce a la producción de sobretensiones mucho más elevadas.

d) Ocurrencia y despeje de falla

La ocurrencia de una falla en un sistema de transmisión causa no solo una sobretensión temporal sino además una sobretensión de maniobra. Esta sobretensión transitoria depende de la impedancia del sistema, el aterramiento, la longitud de las líneas de transmisión pertinentes, la ubicación y los parámetros de los transformadores, el grado de compensación, y la naturaleza de la falla.

La ocurrencia de una falla puede ser considerada como el cierre de un interruptor entre línea y tierra. El voltaje a través del interruptor inmediatamente previo al cierre se redistribuye entre los elementos restantes del circuito, incluyendo cualquier impedancia de falla.

Debido a que el aislamiento del sistema debe, en cualquier caso, ser capaz de resistir la sobretensión debida a la ocurrencia de falla, sería inapropiado e innecesariamente costoso diseñar o usar un interruptor que limite sobretensiones de maniobra a menos de aquellas producidas por fallas.

Cuando los interruptores operan para despejar la corriente de falla, ocurre otra sobretensión de maniobra. La magnitud de esta sobretensión puede exceder el valor de 1.7 en por unidad. Para ilustrar esta sobretensión, considérese el circuito de la figura 2.28a con el interruptor cerrando a un máximo voltaje de alimentación y con ningún voltaje inicial a través del condensador. Esto equivale al despeje (a una corriente cero) de una falla a través del condensador. Como se explicó previamente, esta acción de maniobra redistribuye al voltaje y, con un circuito oscilatorio, ocasiona un brusco incremento del voltaje en el condensador a un valor de aproximadamente 2.0 en por unidad (si se ignoran las pérdidas). Si la línea se acondiciona con compensación serie o paralela, los fenómenos pueden ser más complejos y las sobretensiones más elevadas.

e) Otras operaciones de maniobra

Algunas operaciones de maniobra, que no se ajustan a los patrones normales de la energización y la reenergización, pueden también ocasionar sobretensiones. Una de estas operaciones especiales es la del “puenteo” (*bypassing*) de un banco de condensadores serie. Un diagrama simplificado de este circuito se muestra en la figura 2.32. Una secuencia típica de los eventos comienza con una falla línea a tierra que origina un incremento repentino de corriente a través del capacitor serie en la fase fallada. Esta corriente incrementada, a su vez, causa un voltaje creciente a través de este capacitor dando lugar a una eventual operación de puenteo protector. Este “puente” o *bypass*, representado como un simple *switch* en la figura 2.32, se proporciona junto a una reactancia para limitar la corriente a través de él. Cuando el *switch* de puenteo cierra, el capacitor se descarga a través del inductor limitante de corriente. La frecuencia de la oscilación decadente comúnmente se encuentra en el rango de 500 – 1000 Hz. Si la oscilación no se amortigua lo suficiente antes de que el interruptor de potencia opere para despejar la falla, el voltaje agregado por la oscilación puede resultar de mayor magnitud que las sobretensiones normales.

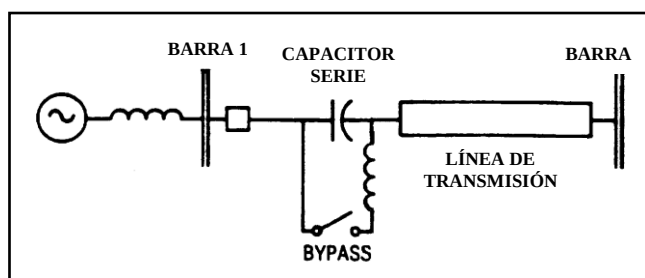


FIGURA 2.32. Circuito simplificado de puenteo para capacitor serie.

Los sobrevoltajes ocasionados por la operación de dispositivos de protección de capacitores serie dependen de los valores exactos de todas las impedancias asociadas, de las longitudes de las líneas de transmisión, y del nivel de protección del dispositivo.

Otro sobrevoltaje puede ser aquel inducido desde un transitorio en un circuito adyacente, el cual comúnmente es de mayor ocurrencia en circuitos de transmisión múltiples sobre el mismo derecho de paso. Debido a que los niveles de voltaje e impedancias de los circuitos no pueden ser idénticos, es concebible que un transitorio en un circuito pueda inducir un alto transitorio en un circuito adyacente. Aún para los mismos niveles de voltaje, la tensión inducida puede ser bastante alta si se llega a excitar una resonancia natural del circuito receptor.

f) Voltaje de recuperación a través de los interruptores

Existen también voltajes producidos a través de los contactos abiertos del interruptor de potencia. Estos voltajes serán más grandes que los voltajes línea a tierra debido a que el voltaje a través

del interruptor es la diferencia entre el voltaje línea a tierra y el voltaje de alimentación. En referencia a la figura 2.30b, el voltaje a través del interruptor es $V_L - V_S$. Las oscilaciones de alta frecuencia visibles en V_S y en $V_L - V_S$, se deben a la resonancia de inductancia y capacitancia en el lado de la fuente del interruptor. Tanto la magnitud del voltaje de recuperación como la tasa a la cual éste se incrementa son importantes para el diseño y valuación de interruptores, pero no tienen una influencia directa sobre el aislamiento de líneas.

- ***Sobretensiones atmosféricas***

Esta sección describe algunas características de las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas a fin de poder compararlas con las características de las sobretensiones temporales y de maniobra.

En muchas estimaciones, la descarga atmosférica puede ser considerada como una fuente de corriente capaz de hacer pasar una corriente firme a través de cualquier impedancia. Así pues, el voltaje desarrollado por la descarga atmosférica es el producto de la corriente de descarga y de la impedancia a través de la cual ésta fluye.

El evento total de la descarga atmosférica es conocido como un rayo. En el rayo existe un número de picos de alta corriente conocidos en la literatura anglosajona como *strokes*, y que en este trabajo simplemente se denominarán como “descargas”. La primera descarga es llamada “descarga inicial” y las restantes “descargas subsiguientes”. Las mediciones han mostrado que la descarga inicial es más comúnmente de polaridad negativa y tiene una amplitud de pico de alrededor de 40,000 A. La corriente pico es considerablemente variable; puede ser tan baja como unos miles de amperios y tan alta como varios cientos de miles de amperios. Típicamente, la corriente que fluye en un objeto aterrado crece inicialmente a una tasa pausada, y llega a su tasa de cambio máxima en poco tiempo antes de alcanzarse la corriente pico. En general, el tiempo de frente de la corriente está en el orden de 3 a 10 μ s. Después de que el pico haya sido alcanzado, la corriente decae con una constante de tiempo del orden de las decenas de microsegundos. Las descargas subsiguientes, que ocurren a intervalos de alrededor de 20 ms, son similares a la descarga inicial, aunque tienen un tiempo de frente considerablemente más rápido y quizás una amplitud un tanto más baja. Cabe destacar que algunos rayos son de polaridad positiva. Estos son menos comunes que las descargas negativas. Pueden tener corrientes pico muy altas y frecuentemente poseen sólo una descarga de un tiempo de frente alargado.

Todas las características de los rayos son considerablemente variables de una descarga a otra. Para obtener información adicional acerca de las características de las descargas atmosféricas, el lector puede consultar las referencias bibliográficas N° 1, 10, 41 y 42 del presente trabajo.

Existen dos mecanismos principales a través de los cuales la descarga atmosférica produce sobretensiones en las líneas de transmisión. La primera, y menos común, implica rayos que pasan a un lado de los cables de guarda y terminan directamente encima de los conductores de fase. Estas sobretensiones son llamadas fallas de blindaje ó de apantallamiento. En una falla de apantallamiento, la corriente de la descarga atmosférica se divide, fluyendo la mitad en cada dirección. Como la corriente fluye a través de la impedancia característica del conductor de fase, se produce el siguiente voltaje:

$$V(t) = \frac{I(t) \times Z}{2} \quad (2.13)$$

donde:

$V(t)$: Voltaje a tierra.

$I(t)$: Corriente de la descarga atmosférica.

Z : Impedancia característica del conductor.

En principio, este voltaje tiene la misma forma general que la corriente de la descarga. En la práctica, sin embargo, la impedancia característica varía con el tiempo debido a la intensa ionización que se desarrolla alrededor de los conductores. La corriente y el voltaje asociado se propagan a lo largo del conductor, hasta que la energía asociada con las ondas se disipe o hasta que se desarrolle una disrupción (*flashover*) en algún punto débil del aislamiento de la línea. Esto último generalmente ocurre a través de un aislador en la primera torre encontrada por la corriente. La falla a través del aislador ocurre cuando el gradiente excede sobre los 500 kV/m. Este gradiente de falla determina la corriente máxima que puede entrar al conductor de fase sin ocasionar una falla. Si el voltaje de falla fuese de 2000 kV y la impedancia característica 250 Ω , entonces sólo las corrientes que excedan los 16 kA causarían disrupción. En sistemas bien diseñados, las fallas de blindaje son poco frecuentes debido a que los cables aéreos de guarda son ubicados de tal forma que intercepten todos los rayos conteniendo de corrientes lo suficientemente elevadas como para causar disrupciones.

Las disrupciones o *flashovers* son mayormente causadas por el mecanismo de las “descargas retroactivas” (*back-flashovers*). Si la corriente de descarga fluye a través de una torre de transmisión, existe un voltaje producido a través de la resistencia de aterramiento de la torre. Esto eleva la torre a un potencial por encima de aquel de la más remota tierra. El potencial de los conductores de fase

permanece igual como era antes del contacto del rayo con la torre. El resultado neto radica en el desarrollo de un voltaje entre la torre y el conductor de fase. La corriente a través de la torre produce además un campo magnético en la región comprendida entre la torre y el conductor de fase. Este campo cambia con el tiempo, como lo hace la corriente de la descarga atmosférica, produciendo así un voltaje entre la torre y el conductor de fase que es proporcional a la tasa de cambio de la corriente de la descarga atmosférica. En términos más simples, el voltaje total desarrollado a través del aislador es:

$$V(t) = (1 - K) \times \left[I' R + L \frac{d}{dt} I' \right] + V_0 \quad (2.14)$$

donde R es la resistencia de aterramiento o de puesta a tierra, L es un factor geométrico que relaciona al flujo con la corriente, llamado comúnmente inductancia de la torre, K es el coeficiente de acoplamiento entre los conductores de guarda y fase, y V_0 es el voltaje del sistema fase a tierra al momento en que ocurre la descarga. La corriente I' es menor que la corriente de descarga ya que alguna parte de esta última corriente fluye alejándose de la torre en los cables de guarda.

Adicionalmente, los sobrevoltajes pueden producirse por inducción electromagnética a partir de rayos cercanos. Sin embargo, estos voltajes inducidos resultan ser extraña vez un problema en líneas de transmisión.

La forma de onda estándar para probar la habilidad del aislamiento de resistir sobretensiones por descarga atmosférica, es un impulso unidireccional con un tiempo de frente de $1.2 \mu s$ y un tiempo de cola de $50 \mu s$ como se muestra en la tabla 2.5. Esta forma de onda se derivó de tempranas mediciones de la forma de voltaje producida por la acción de una descarga atmosférica en un punto lejano del lugar de medición de la tensión. La forma de onda estándar fue una que pudiera ser producida por simples generadores de onda de laboratorio, pero que también tuviera las características esenciales de los voltajes medidos: un frente rápido y una cola de cambio más lento.

Algunas veces se denota que la corriente de la descarga atmosférica, o los voltajes producidos en el punto de contacto de una descarga atmosférica, tienen también una forma de onda similar. Lo anterior es una verdad en contadas veces. Cuando las corrientes de las descargas atmosféricas entran en una línea de transmisión, producen voltajes a través de los aisladores que pueden ser muy diferentes del impulso atmosférico estándar de laboratorio.

En el mecanismo de la descarga retroactiva, el componente del voltaje debido a la resistencia tiene la misma forma que la corriente de la descarga atmosférica, mientras que el componente del voltaje debido al cambiante campo magnético tiene una forma proporcional a la derivada temporal de

la corriente. La forma total depende de las cantidades relativas de los dos componentes del voltaje. Si la resistencia de aterramiento es alta, la tensión del aislador será casi de la misma forma que la corriente de la descarga atmosférica, y puede ser representada bastante bien por el impulso atmosférico estándar. Sin embargo, en líneas con una tasa de salida aceptable por descargas atmosféricas, la resistencia de aterramiento debe ser bastante baja, con lo que predominará el componente del voltaje debido al flujo magnético cambiante. Este componente alcanza su cresta rápidamente, como lo hace la onda estándar 1.2 – 50 μ s, pero decae con una cola mucho más corta que la onda estándar.

Si la sobretensión atmosférica es lo suficientemente elevada como para ocasionar la disrupción de un aislador, es muy probable que se establezca un arco de potencia que deba ser extinguido por la desenergización de la línea. Las fallas a tierra inducidas por descargas atmosféricas constituyen una causa principal para la operación no programada de interruptores de potencia.

2.3.2. Parámetros ambientales que afectan al aislamiento

La vulnerabilidad del aislamiento expuesto a las ondas de sobretensión y, en el caso de la descarga atmosférica, la cantidad de las ondas mismas dependen en gran medida de las condiciones climáticas o parámetros ambientales.

Por lo tanto, para realizar el diseño eléctrico del aislamiento de una línea de transmisión es necesario considerar los parámetros ambientales existentes de la zona a través de la cual se extenderá la ruta de la misma. La obtención de tales parámetros se logra a partir de los registros provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas en puntos que permitan tener datos confiables a los efectos de caracterizar la zona que atraviesa la ruta de la línea bajo estudio. En Venezuela, estas estaciones meteorológicas pertenecen a la Fuerza Aérea Venezolana (FAV) o al Ministerio del Ambiente, y en algunos casos se pueden obtener datos meteorológicos de otros organismos, como es el caso de las estaciones de la compañía EDELCA (Electrificación del Caroní) ubicadas en la Gran Sabana, ó de estudios particulares que se realicen para tal fin.

La figura 2.33 presenta en forma general y condensada la manera de cómo se obtienen los datos básicos atmosféricos y la forma de cómo se procesan y consideran sus efectos en los ítems básicos del aislamiento, a saber:

- 1.- Distancia mínima a la estructura.
- 2.- Esfuerzo sobre la misma producidos por sobrevoltajes.

3.- Capacidad de la distancia mínima a masa para soportar dicho esfuerzo.

Ahora bien, la primera fila de la figura 2.33 representa los datos a obtener de las estaciones meteorológicas, la segunda fila los datos derivados orientados para su uso en el diseño del aislamiento, y de la fila 3 a la 6 se indica cómo los datos atmosféricos afectan el comportamiento del aislamiento.

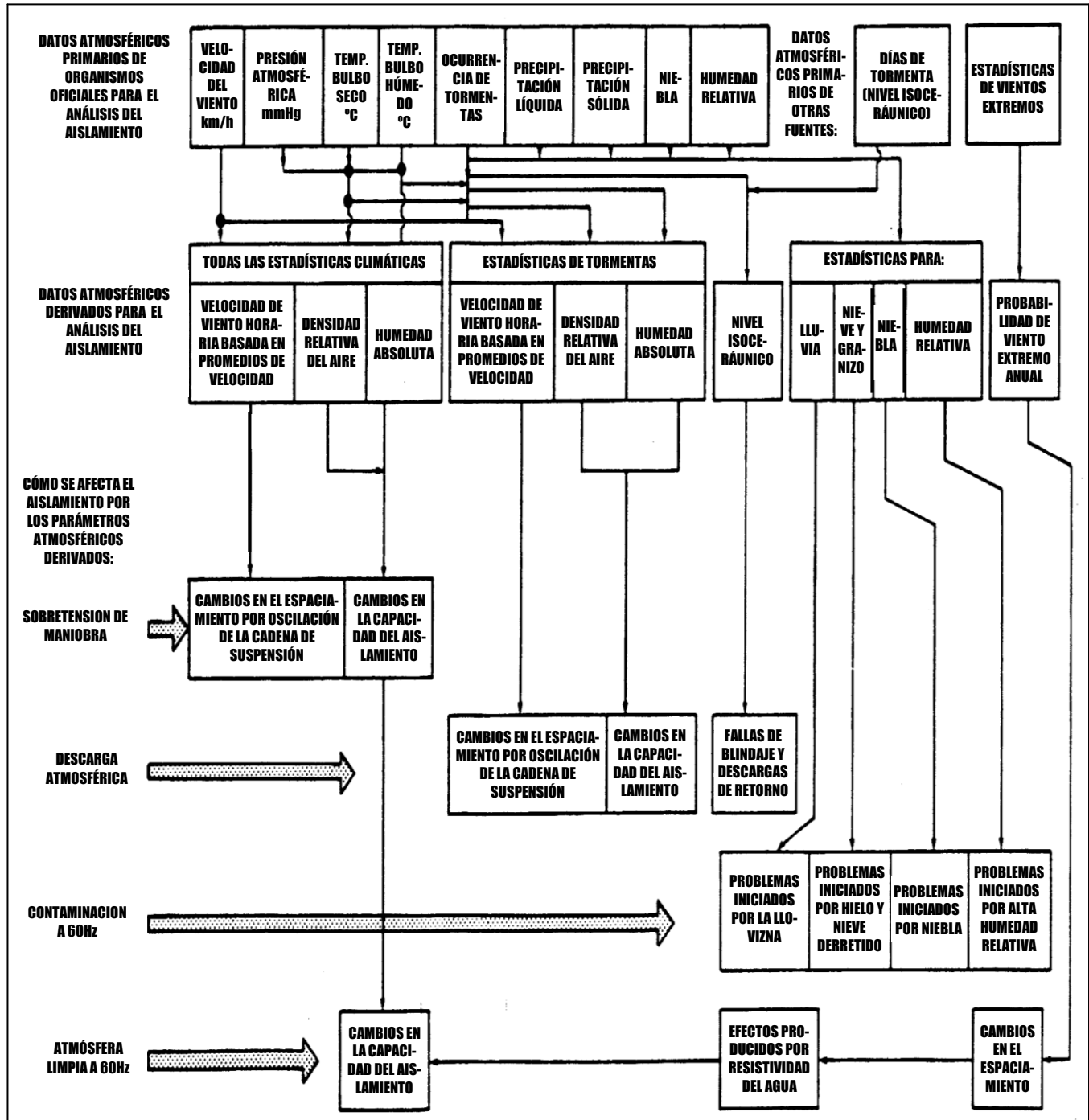


FIGURA 2.33. Parámetros ambientales que afectan el comportamiento del aislamiento.

En resumen, los parámetros ambientales que se requieren normalmente por estar involucrados en el diseño eléctrico del aislamiento de una línea de transmisión son los siguientes:

- 1.- Velocidad del viento.
- 2.- Precipitación.
- 3.- Humedad relativa y absoluta.
- 4.- Densidad relativa del aire.
- 5.- Nivel cerámico.
- 6.- Contaminación.

➤ Velocidad del viento

Este parámetro se obtiene a partir del tratamiento estadístico de mediciones meteorológicas. Se definen los valores de velocidad del viento máximo y promedio de 5 segundos y 5 minutos de duración, a una altura del suelo de 10 metros, para períodos de retorno o recurrencia desde 50 hasta 200 años, de entre los cuales ESINCA recomienda un período de 100 años (referencia 11). Es oportuno indicar, que los anemómetros están por lo general instalados a una altura de 12 metros, sin embargo, es práctica común referenciar esta altura como de 10 metros.

Los medidores de las estaciones meteorológicas reflejan la velocidad de viento de 5 segundos de duración, y a partir de estas velocidades se calcula la velocidad de viento de 5 minutos de duración, utilizando las siguientes expresiones:

$$V_{(5\min)} = \frac{1.10}{1.48} \times V_{(5seg)} \quad (\text{DURST}) \quad (2.15)$$

$$V_{(5\min)} = \frac{1.05}{1.35} \times V_{(5seg)} \quad (\text{NUTT}) \quad (2.16)$$

$$V_{(5\min)} = 1.05 \times \frac{(V_{(5seg)} - 9.3)}{1.29} + 6.4 \quad (\text{FARR}) \quad (2.17)$$

En el caso de EDELCA, el criterio ha sido el de promediar los resultados obtenidos de las ecuaciones de los diferentes autores (Durst, Nutt y Farr) como valor de velocidad de viento seleccionado para el diseño.

Si se desea obtener la velocidad del viento a otra altura, el valor puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$V_{(5\text{ min})_2} = V_{(5\text{ min})_1} \times \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.18)$$

donde:

$V_{(5\text{ min})_2}, V_{(5\text{ min})_1}$: Velocidad del viento a las alturas de referencia.

H_1, H_2 : Alturas de referencia.

Este parámetro se emplea en la evaluación del espaciamiento mínimo o distancia mínima a masa (también conocida como distancia mínima eléctrica) que debe existir ante las solicitaciones eléctricas. En la tabla 2.6 se muestran valores de velocidad del viento máximo y promedio de 5 minutos de duración, mientras que en la tabla 2.7 se muestran valores de velocidad promedio del viento en condiciones sostenidas en diversas estaciones meteorológicas.

TABLA 2.6. Parámetros ambientales considerados por EDELCA para distintas zonas geográficas.

REGIÓN GEOGRÁFICA	PARÁMETROS AMBIENTALES													
	Temperatura (°C)			Velocidad del Viento de 5 min. (km/h)		Precipitación		Humedad		Presión Atmosférica (mmHg)	DRA Prom.	Nivel Isoce-ráunico (días/año)	Nivel de contaminación (mg/cm²)	
	Max.	Min.	Prom.	Max.	Prom.	Total Anual Prom. (mm)	Tasa Prom. (mm/min)	Relativa Prom.	Absoluta Prom.				Alta	Baja
Guayana-Bajo Caroní	40	13	27	(1) 119	(1) 60	(2) 1138	(2) 5	76	21.6	754.54	0.986	60	—	0.05
Oriente	40	10	27	(3) 91.45	(3) 45.73	1036	5	73.3	20.8	749.23	0.9776	60 – 50	0.24	0.05
Oriente-Centro	40	10	26	(3) 91.45	(3) 45.73	1036	5	73.3	19.76	749.23	0.9776	60 – 80	0.24	0.05
Nor-occidente	39	10	28	(4) 104	(4) 65	—	5	78	23.34	—	—	60	0.2	0.05
Costa Oriental del Lago de Maracaibo	41	18	29	(4) 104	(4) 65	1000	5	78	24.55	—	—	88	0.5	0.19
Nor-Oeste de Maracaibo	41	18	29	(1) 100	(1) 50	1000	5	76.9	24.21	750.53	0.96	88	0.15	0.15
Bolívar (Tumeremo)	40	10	27	(5) 115	(5) 57	1264	—	84	21.6	759.1	0.986	120	—	0.05

Bolívar (Sta. Elena)	40	10	22	(4) 93.3	(4) 55.5	1400	—	82.3	16.7	762.4	0.986	120	—	0.05
-------------------------	----	----	----	-------------	-------------	------	---	------	------	-------	-------	-----	---	------

NOTAS:

- (1) Para un período de recurrencia de 100 años y 20 metros de altura.
(2) Valores máximos.
(3) Para un período de recurrencia de 200 años y 10 metros de altura.
(4) Para un período de recurrencia de 100 años y 10 metros de altura.
(5) Para un período de recurrencia de 100 años y 15 metros de altura.

➤ Precipitación

Las características de disrupción a 60Hz de las cadenas de aisladores de suspensión son altamente dependientes sobre la tasa de precipitación. Para una cadena en I (cadena vertical de aisladores), la principal influencia es el escurrimiento o flujo descendente de agua desde una unidad a otra. Para propósitos de ensayo, el estándar ANSI C-29.1-1961 ha especificado una tasa de precipitación de 5 mm/min. Este equivalente de una lluvia extremadamente fuerte, la cual es de extraña ocurrencia, ocasiona una reducción de la rigidez sobre las cadenas de aisladores largas de alrededor del 30% del voltaje crítico de flameo o disrupción en seco en condiciones limpias de ambiente.

Así mismo, estudios realizados por el EPRI (*Electric Power Research Institute*), han determinado que la lluvia produce un efecto de reducción del aislamiento de aproximadamente un 5% bajo la acción de esfuerzos por maniobra [10].

TABLA 2.7. Parámetros ambientales de las estaciones climatológicas pertenecientes a la Fuerza Aérea Venezolana para el período 1961 – 1990.

ESTACION	PARAMETROS AMBIENTALES				
	TEMPERATURA (° C)		VELOCIDAD MEDIA (m / seg)	PRECIPITACION TOTAL ANUAL PROMEDIO (mm)	NIVEL ISOCERAUNICO (Dias / Año)
	Max.	Min.			
Guri A	37,2	15,7	1,5	941	43,5
Mene Grande	38,9	17,9	1,7	1327	173,5
Acarigua (*)	39,5	17,3	2,7	1484	89,8
Guanare (*)	38,5	15,3	1,9	1629	109,7
Maturín	37,1	16,1	3,1	1336	103,6
Merida	31,7	10	2,4	1785	77,4
Ciudad Bolívar	40,4	17,7	2,7	977	96,1
San Antonio	38,2	15,3	3,5	753	174,6
Guasdalito (*)	39,2	15,5	1,8	1759	111
San Fernando	40	15,9	2,9	1350	109,1
Tumeremo	38,3	15,3	2,1	1264	120,8
Pto. Ayacucho	40,2	17,2	1,9	2269	140,9
Santa Elena	36	6,3	1,6	1692	139,2

(*) Período 1971 / 90

FUENTE: Estadísticas climatológicas de Venezuela. Período 1961 - 1990. Fuerza Aerea Venezolana. Publicación especial N° 5, Año 1993.

En otro orden de ideas, la duración anual de la precipitación se calcula a partir de la duración de cada evento de lluvia sucedido en el año. Los días de lluvia al año se obtienen contabilizando los días que llovieron. La tasa de precipitación promedio se obtiene al dividir el total anual de precipitación entre los días de lluvia al año y la tasa de precipitación máxima, dividiendo la máxima intensidad de precipitación que ocurre en un período de 5 minutos entre 5 minutos. El porcentaje de mal tiempo es la relación entre el número de días con lluvia y el total de días del año. En las tablas 2.6 y 2.7 se presentan algunos valores de referencia.

➤ Humedad relativa y absoluta

Los voltajes de disrupción para los espaciamientos y aisladores dependen de la humedad absoluta contenida en el aire. En general, la rigidez crece con la humedad a menos que se forme condensación en el electrodo o en la superficie de los aisladores.

La humedad usualmente se mide con los termómetros de bulbo húmedo y seco de un psicrómetro, el cual puede usarse junto con la figura 2.34 para determinar la humedad absoluta en gr/m^3 .

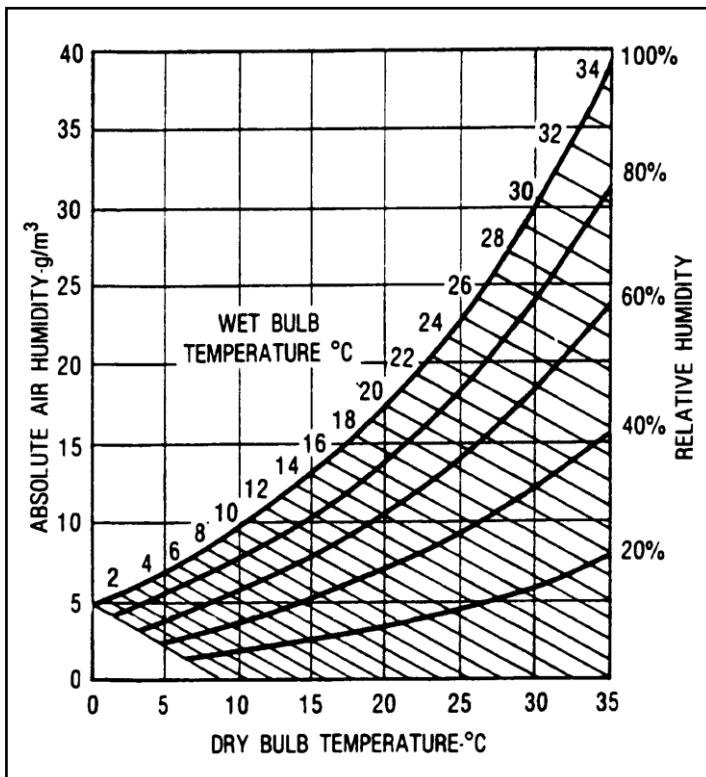


FIGURA 2.34. Humedad absoluta del aire en función de las lecturas de los termómetros de bulbo húmedo y seco.

Así mismo, y en base a registros de humedad relativa promedio obtenidos de las estaciones meteorológicas, se puede calcular la humedad absoluta promedio en gr/m^3 , empleando la siguiente expresión:

$$H_{abs} = \left(\frac{H_r}{100} \right) \times 0.31 \times (T)^{1.36} \times \left(1 - \frac{16.4 - T}{273 + T} \right) \quad (2.19)$$

donde:

T : Temperatura promedio en $^{\circ}\text{C}$.

H_r : Humedad relativa promedio en %.

En la tabla 2.6 se muestran algunos valores de referencia de estos parámetros.

➤ Densidad relativa del aire

La presión barométrica estándar de 760 mmHg y la temperatura estándar de bulbo seco de 20°C establecen una densidad relativa del aire de 1.0. La densidad relativa del aire (DRA) para cualquier otra presión barométrica y temperatura puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$DRA = \frac{0.386 \times P}{273 + T} \quad (2.20)$$

donde:

P : Presión barométrica en mmHg.

T : Temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

Al incrementarse la densidad relativa del aire, la rigidez de ruptura del aire también crece. Por otra parte, un incremento en la humedad usualmente viene acompañado por un decremento en la densidad relativa del aire. Por lo tanto, los dos efectos se contrarrestan uno al otro, haciendo pequeña la variación total de la rigidez. Sin embargo, el efecto de la densidad del aire se hace muy importante en áreas montañosas.

En la tabla 2.6 se muestran algunos valores de referencia de estos parámetros.

➤ Nivel cerámico

Cualquier área geográfica a través del cual las líneas de transmisión deben pasar, puede indicarse de tener un cierto nivel ceráunico, o nivel isoceráunico, como usualmente se le conoce. El nivel representa el número promedio de días de truenos por año en esa área, esto es, el número promedio de días por año en que se pueden oír truenos durante un período de 24 horas.

Actualmente, las mediciones se realizan a través de sistemas conformados por dispositivos para el registro automático de los rayos, los cuales aportan una gran precisión en los resultados de registro.

El nivel ceráunico es la estadística básica que debe conocerse para una región geográfica dada antes de que pueda ser calculada la incidencia de una descarga atmosférica a tierra y a cualquier línea de transmisión en esa región. En una primera aproximación, el error en determinar este importante parámetro ocasionará un error proporcional en el cálculo del desempeño por descargas atmosféricas.

La tabla 2.7 contiene el nivel isoceráunico para las distintas estaciones meteorológicas pertenecientes a la Fuerza Aérea Venezolana con registros durante el período 1961-1990.

➡ Contaminación

En ambientes marinos o industriales, las partículas de sal u otros contaminantes suspendidos en el aire son transportadas por el viento y se depositan sobre la superficie de los aisladores, dando lugar al problema de contaminación del aislamiento. Dichas partículas forman, bajo condiciones propicias de humedad, una película conductora sobre la superficie de los aisladores, que presenta un paso a la corriente de fuga produciendo, en ciertos casos, la ruptura del aislamiento.

Con el aumento de la polución industrial, el problema de la contaminación ha sido objeto de interés universal, por cuanto puede llegar a ser, en muchos sitios, el factor determinante de la selección de aislamiento de líneas de tensiones extra altas (EHV).

Así pues, en servicio, el aislador se ve expuesto a un sinnúmero de agentes contaminantes, los cuales varían de un lugar a otro. Los tipos de contaminación más frecuentes son:

1.- Contaminación salina: Se presenta en la proximidad de la costa y consiste en la deposición por el viento de cristales de cloruro de sodio y sustancias afines. La magnitud del depósito es proporcional al tiempo de exposición.

2.- Contaminación industrial: Se observa en la cercanía de centros industriales, fábricas, plantas procesadoras de metales, entre otros, y consiste en la deposición de sulfatos, óxidos, sales solubles, polvo, ceniza, entre otros.

3.- Contaminación agrícola: Se presenta en zonas de gran actividad agrícola y consiste en la deposición de depósitos solubles e insolubles, tales como tierra y fertilizantes entre otros. La administración desde el aire de los fertilizantes agudiza este tipo de problema, al cual se le une la acción de los vientos locales.

Así mismo, y como se explica en el Apéndice B sección B.2, los contaminantes en la superficie del aislador se pueden clasificar en dos grandes bloques o grupos: sustancia soluble conductora y sustancia insoluble no-conductora.

A continuación, se describen los problemas inherentes a los ambientes contaminados, se presenta una descripción general sobre los factores que determinan el nivel de contaminación de un aislador, sobre el fenómeno de descarga en aisladores contaminados y sobre las medidas que pueden adoptarse para combatir los efectos de la contaminación.

- ***Problemas inherentes a los ambientes contaminados***

En los sistemas eléctricos que operan en ambientes contaminados existen dos fenómenos específicos atribuibles a las condiciones ambientales: deterioro de las propiedades aislantes de los aisladores y corrosión acelerada de los elementos metálicos.

El problema de descarga de aisladores es el que causa mayores inconvenientes en la operación de sistemas eléctricos en áreas expuestas a la contaminación.

La corrosión de estructuras metálicas, conductores, vientos, herrajes, accesorios y demás elementos metálicos de subestaciones y líneas de transmisión, se acelera notablemente en la presencia de ambientes fuertemente contaminados como por ejemplo los salinos. En las espigas de acero de los aisladores de suspensión la corrosión es particularmente severa, debido al efecto corona y a la presencia de arcos en áreas cercanas al punto de contacto entre la espiga y la porcelana.

- ***Factores determinantes para el nivel de contaminación***

Las partículas contaminantes están en general compuestas de ingredientes solubles, como la sal, y de un 50% a 70% de ingredientes no solubles que sirven de portadores y que mejoran la adherencia del contaminante a la superficie del aislador.

La distribución del contaminante sobre la superficie del aislador depende de factores tales como la dirección e intensidad de los vientos, el peso y tamaño de las partículas, los campos eléctricos que actúan sobre éstas, las condiciones de adhesión y la intensidad y frecuencia de las lluvias. La densidad del contaminante es generalmente mayor en la superficie inferior del aislador debido a la acción del viento, al lavado por lluvias, y al gradiente de potencial que hace que el contaminante migre en dirección a la espiga.

Los niveles de contaminación se especifican de acuerdo a la ubicación geográfica de las líneas, en términos de densidad equivalente de sal depositada (DESD) el cual se mide en mg/cm^2 , y se define como la cantidad de NaCl (sal común) que posee la misma conductividad que la solución de la muestra contaminante tomada del aislador bajo prueba. En la tabla 2.6 se presentan algunos niveles de contaminación para diferentes zonas geográficas. De la misma forma, en el Apéndice B se muestran otros niveles de contaminación (sección B.4), y se explica con más detalle lo que se ha presentado en esta sección, además de exponer los métodos de evaluación de la contaminación y procedimientos para su medición.

- ***Descarga de aisladores contaminados***

A continuación se da una explicación cualitativa del fenómeno de descarga en aisladores contaminados, a tensiones de operación normal.

La capa de contaminante seca tiene propiedades aislantes; sin embargo, al humedecerse, forma una película conductora que permite el paso de corrientes de fuga, las que a su vez dan lugar a disipación de energía y a evaporación de la humedad.

Debido a la geometría del aislador y la distribución no uniforme del contaminante, en unas partes del aislador se disipa más energía que en otras, creándose áreas secas en forma de bandas. El voltaje a través de ellas tiende a aumentar, provocando la formación de pequeños arcos que saltan hasta cuando el ancho de las bandas secas sea suficiente para interrumpir la corriente de fuga. Al ocurrir esto, se reinicia de nuevo el proceso, debido al subsiguiente humedecimiento del contaminante.

Ocasionalmente, sin embargo, puede ocurrir ruptura del aislamiento, debido generalmente a la migración de humedad de las bandas húmedas hacia las bandas secas, o a la presencia de un voltaje excesivo a través de éstas últimas.

Lo anterior explica porque la descarga de aisladores atribuible a contaminación, ocurre normalmente en las primeras horas de la mañana o al producirse las primeras lluvias después de un período seco. Esto hace que los efectos de la contaminación sean particularmente severos en regiones húmedas, poco lluviosas, o donde los períodos anuales de lluvia son concentrados.

- ***Medidas contra la contaminación de aisladores***

Desde el punto de vista de la contaminación, un diseño ideal sería aquel en el cual el aislamiento pudiera soportar las peores condiciones de contaminación. Sin embargo, esto no es conveniente en todos los casos, ya que puede dar lugar a diseños antieconómicos en relación con otros que adopten compromisos entre el sobreaislamiento, lavado de aisladores, recubrimiento de éstos con grasa de silicón, o empleo de relativas nuevas tecnologías como es el caso de los aisladores poliméricos de goma de silicón.

El sobreaislamiento se logra mediante el uso de curvas obtenidas de pruebas de laboratorio bajo condiciones contaminantes para los productos aislantes de los diferentes fabricantes. Al aumentar el grado de contaminación decrece el voltaje de flameo de los aisladores. Se han determinado curvas de tensión no disruptiva o de resistencia en función del DESD, que muestran que existe un grado de contaminación por encima del cual no se disminuye apreciablemente el voltaje de resistencia, lo que permite realizar diseños de líneas de transmisión que operen adecuadamente en áreas severamente contaminadas. Así mismo, otros ensayos de laboratorio indican que en aisladores contaminados existe, para tensiones de operación a 60 Hz, una relación lineal entre tensión de resistencia y número de aisladores en una cadena de suspensión a un nivel de DESD específico. Esta relación puede permitir extrapolar, de resultados disponibles, el aislamiento requerido a diferentes tensiones de operación.

Ahora bien, bajo ciertas circunstancias puede ser necesario lavar líneas y subestaciones con regularidad durante los períodos secos del año para remover el contaminante de los aisladores y así restaurar sus propiedades aislantes. Aunque no exista un peligro inmediato de flameo, el lavado es conveniente para disminuir la corrosión de las espigas y reducir la interferencia de radio. Existen equipos que permiten el lavado de líneas y subestaciones energizadas, por lo que a esta acción se le conoce como “lavado en caliente”. El lavado exige agua de alta resistividad a alta presión, para

seguridad y mejor control del chorro en presencia de vientos fuertes. El costo del equipo de lavado y el de su operación, así como el alcance y capacidad del equipo, además del tiempo requerido para el lavado, son factores determinantes en la conveniencia de adoptar este método preventivo.

Aparte de todo esto, la aplicación de la grasa de silicón puede prolongar los períodos entre limpiezas de los aisladores de subestaciones. Su costo es relativamente alto y la mano de obra requerida considerable. En áreas muy contaminadas, es generalmente necesario reemplazar la grasa al menos una vez al año, para lo cual se requiere desenergizar el equipo. Lo anterior, junto al costo, dificultad y frecuencia de aplicación hace que este método no se utilice en líneas de transmisión.

Por otra parte, el uso de aisladores compuestos de silicona en las líneas de transmisión mejora el desempeño del aislamiento frente a los agentes contaminantes, como así se puede constatar al chequear las experiencias de operación en zonas contaminadas con este tipo de aisladores, y al revisar las conclusiones de los ensayos de laboratorio relevantes al caso.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. SELECCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS, CRITERIOS Y NORMAS A EMPLEAR PARA EL DISEÑO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

3.1.1. Procedimiento de diseño a seguir para el cálculo eléctrico del aislamiento

Así pues, la herramienta computacional se encargará de realizar el cálculo eléctrico del aislamiento a partir de 400 kV; rango de tensión en el cual se ubican las líneas de extra alta tensión en Venezuela. Sin embargo, el cálculo para líneas EHV de voltaje entre 345 kV y el referido valor de tensión, puede hacerse a través del programa ya que los métodos de cálculo seleccionados también aplican para estos niveles de tensión.

El procedimiento de diseño a seguir para el cálculo eléctrico del aislamiento acusa, en primer lugar, el cálculo del número de aisladores requeridos o dimensionamiento del aislamiento ante sobretensiones del tipo de frecuencia industrial y de maniobra, con el objetivo de seleccionar aquellos valores más exigentes para el diseño. Luego, una vez definida la cadena de aisladores, se calculan las distancias mínimas eléctricas a masa ante estas mismas sollicitaciones eléctricas, distancias que deben respetarse para el buen desempeño del aislamiento, por lo que el ingeniero proyectista o usuario de la herramienta computacional debe verificarlas como se explica en las secciones 2.5.3 y 2.5.4 del capítulo II. Una vez definida la longitud de la cadena de aisladores y las distancias mínimas, se verifica el diseño ante la ocurrencia de descargas atmosféricas.

Cabe destacar que los métodos de cálculo y criterios adoptados para el desarrollo del programa (que se señalan a partir de la siguiente sección 3.1.2), además del procedimiento de diseño aquí descrito que los enmarca, se derivan principalmente de la experiencia en el diseño y operación de los sistemas a 400 y 765 kV de EDELCA, así como de la revisión de la experiencia de otras empresas eléctricas, normas y la literatura técnica internacional.

3.1.2. Dimensionamiento del aislamiento

La experiencia venezolana en el diseño y operación de líneas a 400 kV y 765 kV, en cuanto al desempeño del aislamiento, sugiere siempre considerar en el diseño el valor del grado de

contaminación presente en el área, el cual junto a las solicitaciones eléctricas (sobretensiones a frecuencia industrial y maniobra), presenta en general el escenario de mayor exigencia para el aislamiento a estos altos niveles de tensión. Por esta razón, es recomendable realizar un estudio preliminar acerca del grado de contaminación del área geográfica por donde atraviese la línea en proyecto, en aquellos casos donde no se conozca a ciencia cierta qué niveles de contaminación pudieran estar presentes en la mencionada área. En el caso de ambientes bastante limpios, sería conservativo estimar un mínimo valor de contaminación para efectos del diseño.

Así pues, para el dimensionamiento del aislamiento, la metodología a emplear considera al menos un mínimo valor de contaminación presente en el área de estudio. Este valor corresponde al grado de contaminación DESD y es requerido por el programa como dato de entrada. Para áreas geográficas venezolanas, el lector puede observar algunos valores del DESD en la tabla 2.6 (página 74). Los métodos a usar son los mismos que los empleados por EDELCA, y se basan en el empleo de curvas de fabricantes, de las cuales se obtiene la tensión de resistencia por unidad aisladora (tipo caperuza y espiga) a partir del grado de contaminación DESD. Estos métodos análogos se desarrollan en el capítulo II, secciones 2.5.3 y 2.5.4 (para dimensionamiento por contaminación ante sobretensiones a frecuencia industrial y maniobra respectivamente).

Para aplicar estos métodos, deben establecerse aisladores “tipo” para el diseño, ya que por lo general, al momento de diseñar no se tiene la selección final de los aisladores a instalar en la línea. Estos aisladores tipo, por supuesto, deben tener las respectivas curvas de tensión de resistencia (V_w) a frecuencia industrial y maniobra en función del grado de contaminación DESD, las cuales son suministradas por los fabricantes.

Los aisladores tipo que se acogerán para el cálculo en el programa como predeterminados de origen serán los mismos que los considerados por EDELCA para el diseño de sus líneas (el programa contendrá en su configuración las características geométricas y los valores asociados a las curvas V_w – DESD de estos aisladores tipo).

EDELCA considera, en forma general, los siguientes aisladores tipo de caperuza y espiga [8]:

1.- Aislador tipo A: (Para cadenas de suspensión en áreas de baja contaminación)

Longitud entre centros: 170 mm (6 ¾").

Diámetro: 280 mm (11").

Distancia de fuga mínima: 370 mm.

Carga electromecánica: 160 kN (A1) y eventualmente 210 kN (A2).

Diámetro mínimo de la espiga: 20 mm.

2.- Aislador tipo B: (Para cadenas de suspensión en áreas de alta contaminación)

Longitud entre centros: 170 mm (6 ¾").

Diámetro: 320 mm (12 ⅝").

Distancia de fuga mínima: 550 mm.

Carga electromecánica: 160 kN (B1) y eventualmente 210 kN (B2).

Diámetro mínimo de la espiga: 20 mm.

3.- Aislador tipo C: (Para cadenas de amarre en áreas de baja o alta contaminación)

Longitud entre centros: 195 mm (7 ¾").

Diámetro: 320 mm (12 ⅝").

Distancia de fuga mínima: 460 mm.

Carga electromecánica: 300 kN.

Diámetro mínimo de la espiga: 24 mm.

Ahora bien, en los más recientes diseños de líneas de tensiones a 400 kV y 765 kV, EDELCA ha considerado sólo aisladores tipo con carga ó resistencia electromecánica de 210 kN para las cadenas de suspensión. Tomando en cuenta esta consideración, los aisladores equivalentes a los aisladores tipos, suministrados por el fabricante NGK del Japón, son los siguientes:

1.- Aislador tipo A: Para este tipo, el aislador equivalente es el CA-589 (ver figura 3.1).

2.- Aislador tipo B: Para este tipo, el aislador equivalente es el CA-845 (ver figura 3.2).

3.- Aislador tipo C: Para este tipo, el aislador equivalente es el CA-590 (ver figura 3.3).

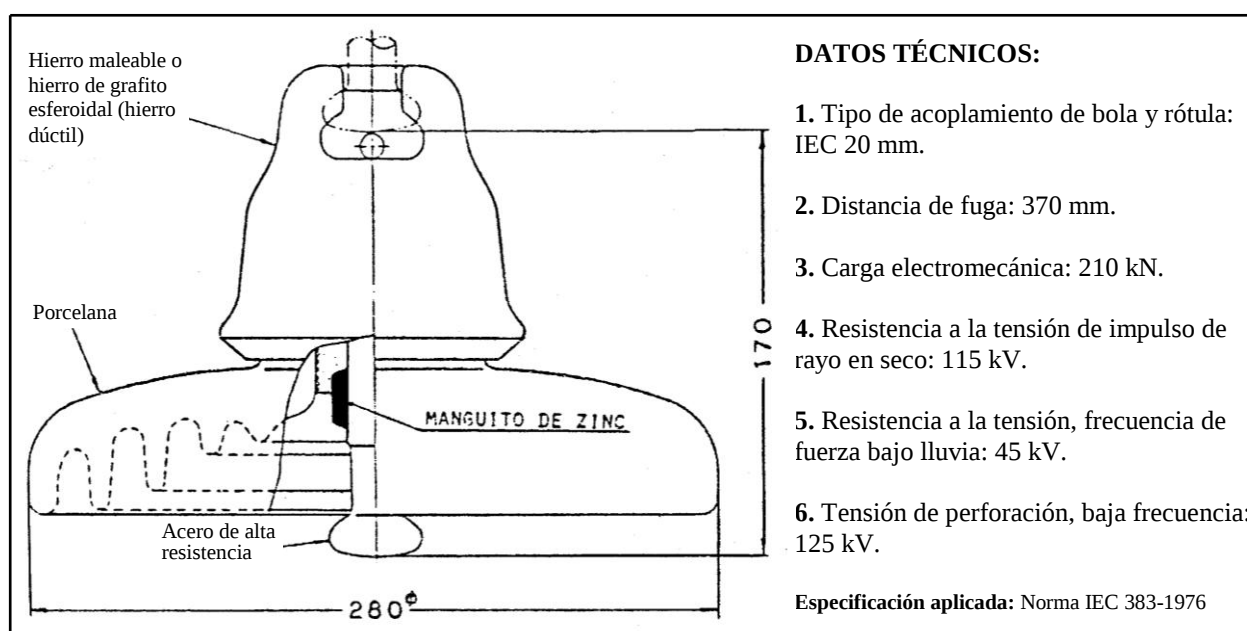


FIGURA 3.1. Aislador NGK de suspensión para el diseño en zonas de baja contaminación (CA-589).

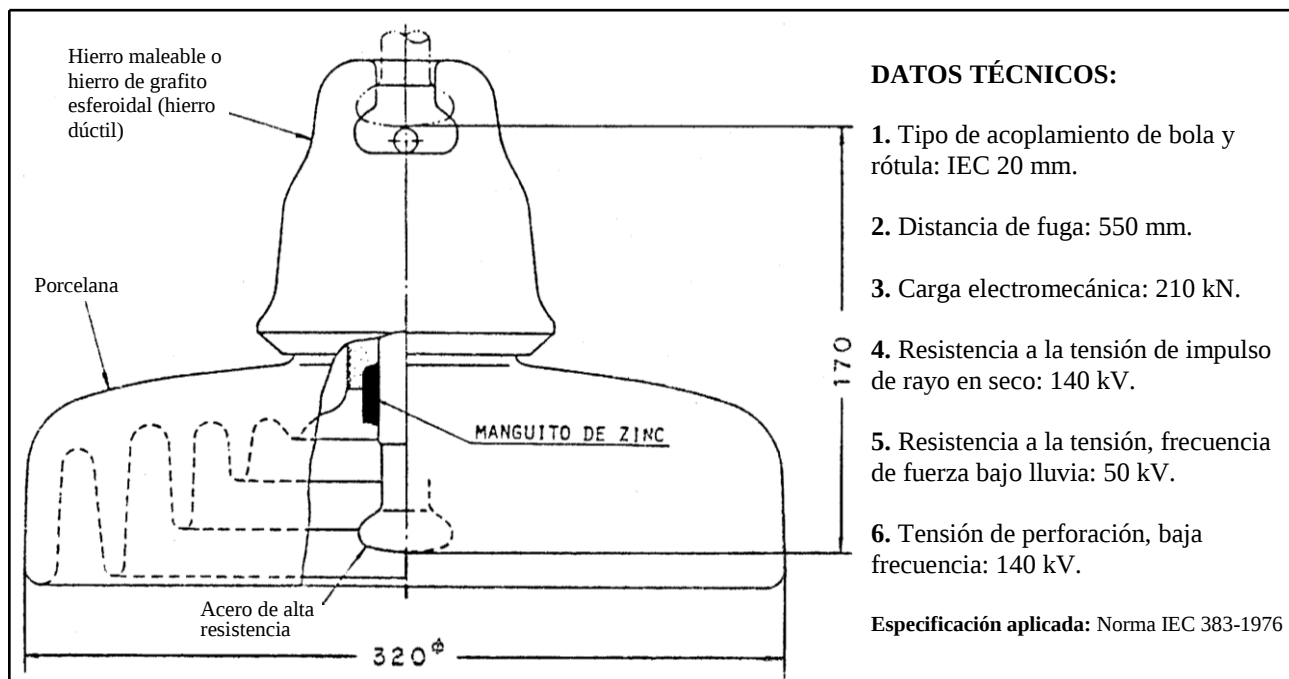


FIGURA 3.2. Aislador NGK de suspensión para el diseño en zonas de alta contaminación (CA-845).

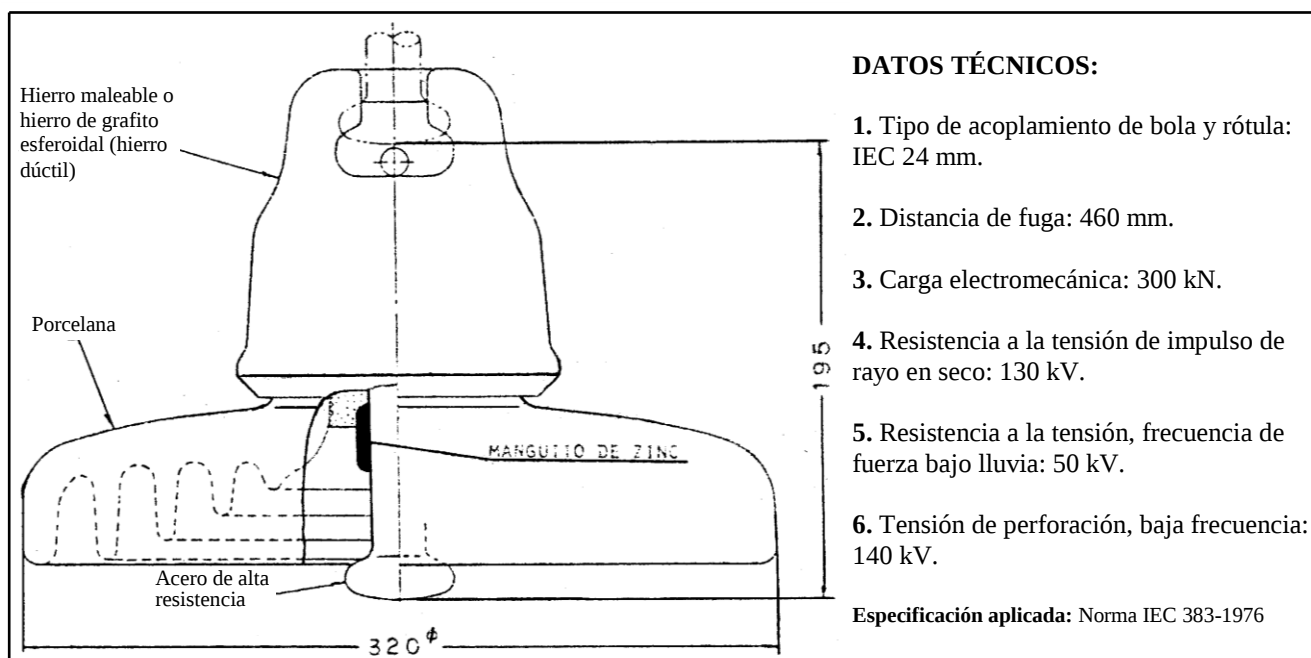


FIGURA 3.3. Aislador NGK de amarre para el diseño en zonas de baja o alta contaminación (CA-590).

Ahora bien, en la configuración del programa, y con la finalidad de ofrecer al usuario la posibilidad de emplear aisladores tipo diferentes para el dimensionamiento de las cadenas de amarre, se estableció el aislador tipo D sólo para áreas de alta contaminación, quedando el aislador tipo C para el caso de áreas de baja contaminación. De esta forma, la configuración original del programa deja al aislador tipo D igual al tipo C y se corresponden al aislador ya mencionado CA-590 de NGK el cual presenta buen desempeño tanto en áreas de baja como de alta contaminación.

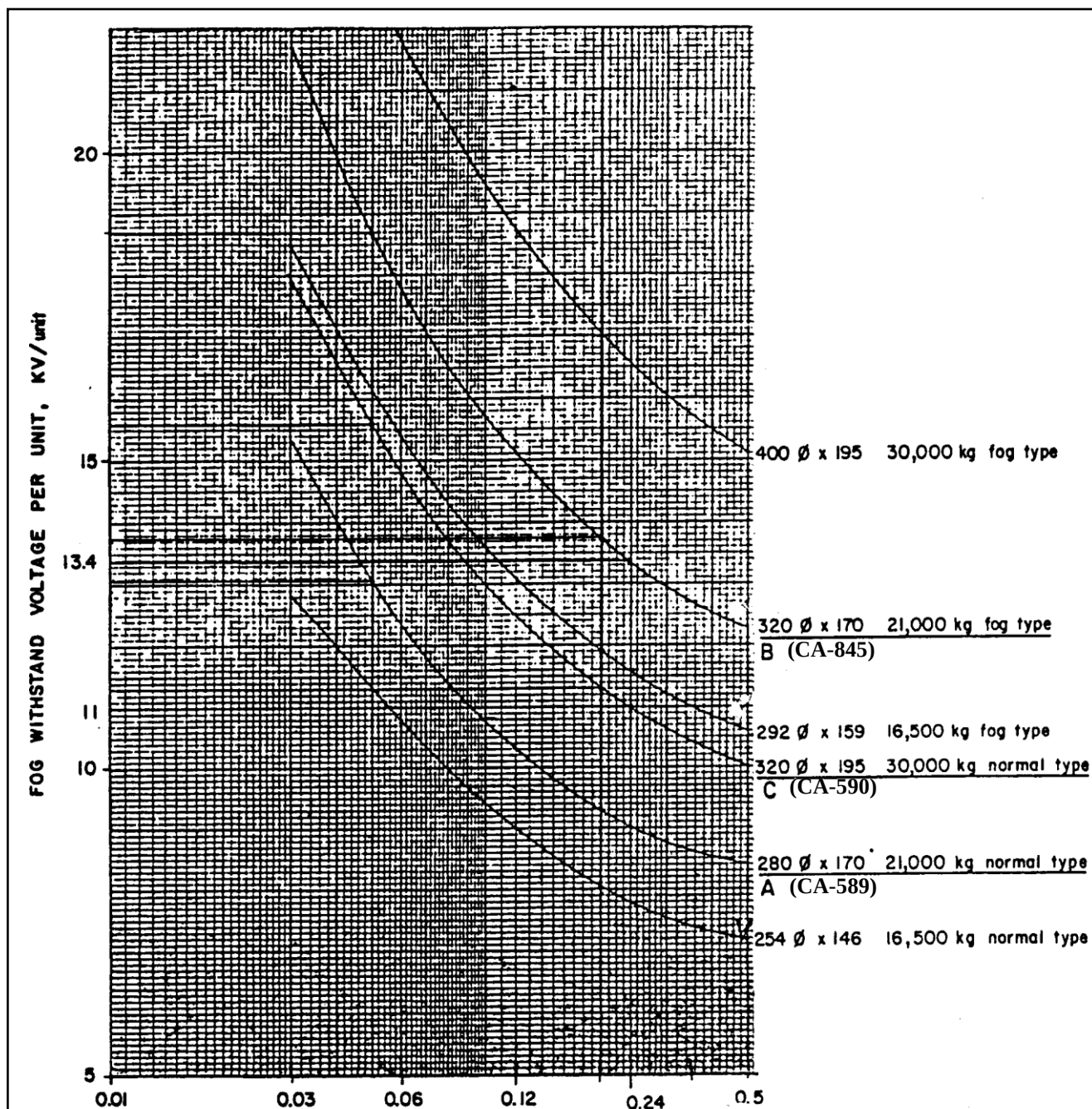
Las curvas respectivas de estos aisladores tipo para la obtención de la tensión de resistencia a partir del DESD a frecuencia industrial y maniobra, se dan en las figuras 3.4 y 3.5a-b [8]. Ahora bien, si el usuario del programa prefiriere el empleo de otros aisladores tipos, diferentes a los establecidos de origen, debe entonces introducir los datos que caracterizan las curvas tensión de resistencia – DESD de los nuevos aisladores tipos en el programa, así como también las características generales de dichos aisladores. Esto se describe en la sección 4.3.4 del capítulo IV, página 197.

Por otro lado, el uso específico de los aisladores tipo ya establecidos va a depender del valor DESD del área geográfica de interés. En el caso del aislador tipo A (para suspensión, baja contaminación), sería recomendable su uso en el diseño para valores del DESD representativos de áreas de baja o ligera contaminación; y para niveles de contaminación superiores, sería recomendable emplear el aislador tipo B (para suspensión, alta contaminación). Del apéndice B sección B.4 (página 240), puede concluirse que para niveles de contaminación ligeros, el máximo valor estimado para el DESD corresponde a 0.06 mg/cm^2 . Basándose en esta premisa, se limita el uso del aislador tipo A en el diseño para valores del DESD hasta 0.06 mg/cm^2 , confinando al aislador tipo B para mayores valores del DESD. Lo mismo aplica para los aisladores tipo de amarre: tipo C (para $\text{DESD} \leq 0.06 \text{ mg/cm}^2$) y tipo D (para $\text{DESD} > 0.06 \text{ mg/cm}^2$). Esta metodología es llevada a cabo a través del procedimiento de diseño del programa titulado: “dimensionamiento del aislamiento estándar” (ver sección 4.3.3, capítulo IV, página 181). Así mismo, el programa ofrece otra opción que lleva por nombre: “dimensionamiento del aislamiento personalizado”, en el cual el usuario podrá seleccionar los aisladores tipo que desee para el cálculo independientemente del valor del DESD (ver sección 4.3.3, capítulo IV, página 183). Adicionalmente, es oportuno indicar que el programa proporciona una herramienta de graficación para el número de aisladores definitivo por cadena en función del DESD para todos los aisladores tipo, estando definido el rango de graficación por el máximo y el mínimo valor común del DESD de entre todas las curvas de los fabricantes (ver sección 4.3.3 del capítulo IV, página 191).

Si el área geográfica de interés presentara regiones con distintos grados de contaminación DESD, entonces se realizaría un diseño de dimensionamiento independiente para cada una de estas regiones, es decir, un estudio de dimensionamiento por separado para cada valor de DESD presente en el área de estudio.

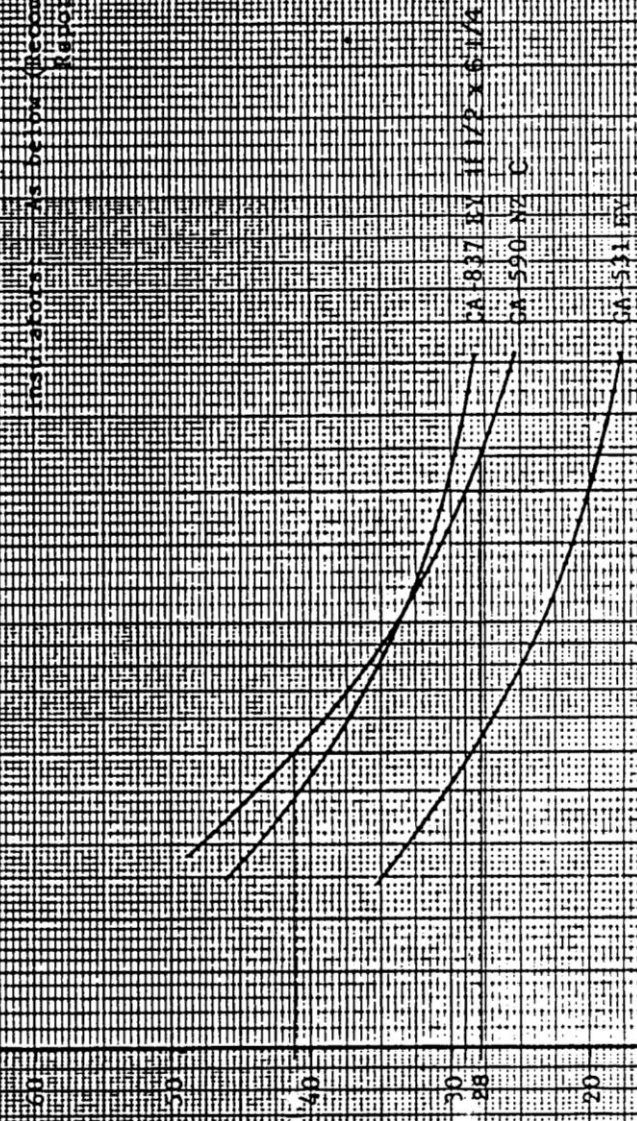
Así pues, a partir del valor DESD se obtiene, de las curvas presentadas en la figura 3.4 y 3.5a-b, el valor de la tensión de resistencia a frecuencia industrial y por maniobra correspondientemente.

Una vez obtenida la tensión de resistencia, tanto para el aislador tipo de suspensión como para el de amarre, se hace uso de la ecuación 2.28 (página 108) para obtener el número de aisladores tipo requeridos ante frecuencia industrial, haciendo lo propio para el caso del cálculo por maniobra a partir de la ecuación 2.38 (página 116), con un factor S_v predeterminado de origen de 1.05.



WAVE 300000 25072500116
 Insulators As below Recommended by SGR
 Report No. 5293

Design Withstand Voltage per Unit, KV/Unit



0.01 0.03 0.05 0.1 0.2 0.3
 Salt Deposit Density, mg/cm²

Del resultado del dimensionamiento a frecuencia industrial y por maniobra para un determinado valor del DESD, se escogen los valores más exigentes, esto es, las cadenas con mayor número de aisladores. Finalmente, de este último resultado, se determina la distancia de fuga mínima total y la longitud mínima de la cadena tanto para suspensión como amarre, partiendo lógicamente de las dimensiones geométricas de los aisladores tipo empleados en el cálculo.

Con respecto al factor de seguridad, F_s , presente en las ecuaciones 2.28 y 2.38, se adopta de 1.1 como valor de origen predeterminado, valor que representa al mínimo en el rango recomendado por NGK (1.1 – 1.2). Con esto, se pretende no sólo agregar un margen de seguridad al diseño, sino también no sobredimensionar la cadena en exceso para así tener un compromiso económico con la inversión del proyecto. Por otro lado, si el usuario difiriera de este criterio, podrá cambiarlo al de su preferencia como se indica más adelante. En forma general, los valores de origen predeterminados para el cálculo en el programa podrán ser cambiados por el usuario o ingeniero proyectista a los de su preferencia, a través de la configuración del programa (ver sección 4.3.4, capítulo IV, página 196).

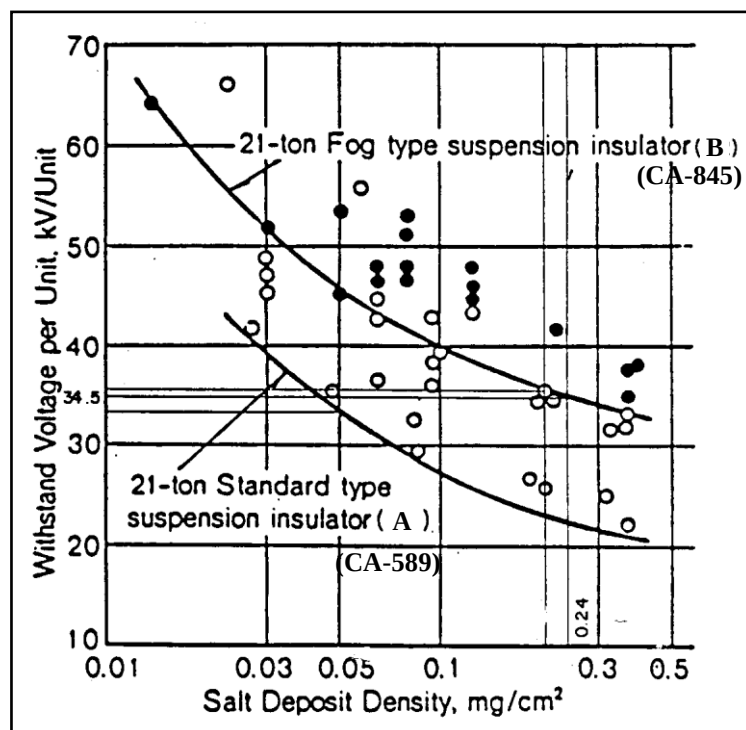


FIGURA 3.5-b. Tensión de resistencia a sobretensiones de maniobra en función del nivel de contaminación para aisladores tipo de suspensión NGK.

3.1.3. Cálculo de distancias mínimas eléctricas a masa

Las torres de transmisión empleadas por EDELCA para líneas con niveles de tensión a partir de 400 kV son, según la figura 2.60 (página 137), de clase 3 para líneas de terna simple, y de clase 1 para líneas de doble circuito. En vista de este hecho, sólo se considerarán estos casos de configuraciones geométricas de torre para el cálculo de las distancias mínimas.

En cuanto a las configuraciones de las cadenas de aislamiento en la torre, se consideran las del tipo “I-I-I”, “I-V-I” y “V-V-V” para el caso de líneas de terna simple; mientras que para el caso de líneas doble circuito, se consideran dos configuraciones: “I” y “V” (actualmente, en Venezuela existe la presencia de todos estos casos excepto el de líneas de doble circuito con todas las cadenas en “V”). Así pues, según EDELCA, estas son las posibles configuraciones más representativas que pueden presentarse para las cadenas de aislamiento en líneas a partir de 400 kV.

Ahora bien, los métodos a usar en el cálculo de las distancias mínimas a masa por sobretensiones a frecuencia industrial y maniobra, principalmente, son los recomendados por el instituto de investigación americano EPRI, además de algunas consideraciones hechas por la empresa C.V.G. EDELCA.

➡ Distancia mínima a masa ante sobretensiones a frecuencia industrial

El cálculo de la distancia mínima a masa por sobretensiones a frecuencia industrial se realizará a través del método expuesto en la sección 2.5.3 del capítulo II (página 111).

Ahora bien, para la ecuación 2.33 (página 112), a partir de la cual se obtiene el valor del voltaje crítico disruptivo con el que se adquiere posteriormente de la figura 2.47 (página 112) la distancia mínima eléctrica a masa, se requiere conocer el valor del exponente n , el cual depende a su vez del espaciamiento disruptivo. Para hallar el valor de este exponente, se empleará la metodología recomendada por EDELCA, la cual consiste en obtener dicho valor a través de la figura 2.44 (página 107) entrando con la distancia mínima geométrica, la cual se señala en la sección 2.5.3 del anterior capítulo.

Con respecto a los valores de la constante K y de la desviación normalizada σ_f presentes en la ecuación 2.33, se predeterminan los siguientes valores:

- 1.- $K = 3$ (criterio EPRI, el cual es más conservativo que el criterio IEC).
- 2.- $\sigma_f = 2\%$ (también recomendado por EPRI).

Una vez obtenida la distancia mínima eléctrica a masa, se verificará que ésta sea menor a la distancia geométrica empleada en la obtención del exponente n . De ser así, el usuario debe verificar que se respete la distancia mínima eléctrica bajo la condición de acción del viento máximo sobre la línea en un plano a escala de la torre para cada una de las configuraciones geométricas presentes fase - estructura, tal como se explica en la sección de interés 2.5.3. Pero, si ocurriera lo contrario, el usuario debe entonces de corregir el problema aumentando la distancia considerada como mínima geométrica, para luego repetir el cálculo y la posterior verificación de la distancia mínima eléctrica a masa.

➤ Distancia mínima a masa ante sobretensiones de maniobra

El cálculo de la distancia mínima a masa por sobretensiones de maniobra se realizará a través del método expuesto en la sección 2.5.4 del capítulo II (página 116).

Para el cálculo inicial del voltaje crítico disruptivo, CFO , se empleará un procedimiento alterno y equivalente o análogo al presentado en esta última sección, el cual también es presentado por el EPRI. Esta otra forma de determinar el CFO , tiene su base en la combinación de las ecuaciones 2.41 y 2.42, lo cual resulta en la siguiente expresión [10]:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \int_{-\infty}^Y \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \times dz \quad (3.1)$$

con:

$$Y = \frac{S - CFO}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_s^2}} \quad (3.2)$$

donde:

S : Valor medio de las sobretensiones.

CFO : Tensión crítica disruptiva del aislamiento para sobretensiones de maniobra.

σ : Desviación estándar del comportamiento probabilístico del aislamiento a sobretensiones de maniobra.

σ_s : Desviación estándar de la generación de sobretensiones de maniobra.

La desviación estándar σ , viene dada por la ecuación 2.43 (página 118), donde la desviación estándar normalizada, σ_m , se predetermina del 5%, según recomienda IEEE.

Así bien, la expresión 3.1 representa la probabilidad de falla de un elemento aislante, P , caracterizado por un voltaje crítico disruptivo CFO y una desviación estándar σ , al cual se le aplica una sobretensión de maniobra caracterizada por $F(V)$ (ecuación 2.41, página 117).

Luego, para considerar la descarga en n elementos aisladores, se debe utilizar la ecuación 2.39 (página 117) de la siguiente forma:

$$P(n) = 1 - (1 - P)^n \quad (3.3)$$

donde el valor de $P(n)$ es la probabilidad de falla de un sistema de n elementos aisladores sujetos a una misma sobretensión, predeterminado al criterio de diseño expuesto de una falla cada 1000 energizaciones de la línea (1/1000). En cuanto al exponente n , se predetermina el criterio de EDELCA, el cual considera el 25% de la totalidad de las torres.

De esta misma ecuación 3.3, se despeja el valor de P , para luego multiplicarlo por dos (para obtener al CFO referido a polaridad positiva) e introducirlo en la ecuación 3.1, de donde se obtiene el valor de Y . Finalmente, con este último valor, y junto a la ecuación 3.2, se obtiene el valor del voltaje crítico disruptivo CFO en por unidad.

Este procedimiento alternativo para la determinación del CFO es el seleccionado principalmente por presentar mayor docilidad en el cálculo, con lo que se hace menos arduo el trabajo de programación.

Ahora bien, una vez determinado el voltaje crítico disruptivo en kV y corregido por lluvia, se determina en primera instancia la distancia mínima eléctrica no corregida para fase central a través de la ecuación 2.46 (página 119) o de la figura 2.50, según considera EDELCA. Por lo tanto, la relación 2.47 no se toma en cuenta para el cálculo de la distancia mínima, esencialmente por estar restringida a espaciamientos superiores de cinco metros. Luego, en la corrección del espaciamiento por humedad, se emplea la curva correspondiente a tiempos de cresta menores de 500 μs , entre otras cosas, por ser el rango inherente a la forma de onda estándar para la sobretensión de maniobra, cuyo tiempo de cresta según IEC es de 250 μs . Ya en la última corrección, por longitud de cadena, se utilizan las tres curvas de la figura 2.53 (página 122) empleando específicamente, y para ser conservativo, aquella que represente al valor “L” inmediato superior de la distancia que se desea corregir por este motivo; pero, si el valor de la distancia o espaciamiento a corregir resulta superior al máximo valor “L” representativo

de las curvas ($L=11.9\text{m}$), se empleará entonces la curva representada por este máximo valor de “L” (si el valor de la distancia o espaciamiento a corregir resulta igual a un valor de “L”, se utilizará la curva representativa de dicho valor “L”).

Una vez determinada la distancia mínima eléctrica para la fase central, se hace lo propio para la fase exterior tal como se indica en la sección de interés 2.5.4 del segundo capítulo.

Ya para finalizar, se verifica que la distancia mínima eléctrica sea menor a la correspondiente geométrica. De ser menor, el usuario debe verificar adicionalmente que se respete la distancia mínima eléctrica a masa bajo la condición de acción del viento promedio sobre la línea en un plano a escala de la torre para cada una de las configuraciones geométricas presentes fase - estructura, tal como se explica en la sección de interés 2.5.4. Pero, si ocurriera lo contrario, el usuario debe entonces corregir el problema aumentando la distancia considerada como mínima geométrica, para luego repetir la verificación de la distancia mínima eléctrica a masa.

3.1.4. Verificación del aislamiento ante descargas atmosféricas

El método de verificación del aislamiento ante descargas atmosféricas con el que se va a calcular la tasa de salida ante este fenómeno, tanto por fallas de apantallamiento como por descargas de retorno, es también el recomendado por el instituto de investigación de potencia eléctrica EPRI, y con el cual EDELCA se basa para sus diseños ante la ocurrencia de rayos.

Las configuraciones geométricas de torres y cadenas de aislamiento consideradas para el cálculo del desempeño de la línea ante descargas atmosféricas, son las mismas que las consideradas para el cálculo de las distancias mínimas a masa (sección 3.1.3, página 158).

En relación a las coordenadas promedio en la torre de los conductores de fase y cables de guarda, se ha considerado total simetría con respecto al eje vertical que pasa por el centro de la torre.

Por otro lado, los valores considerados para el parámetro β en el cálculo del desempeño del blindaje de la línea, son los recomendados en 0.8 para líneas EHV y en 0.67 para líneas UHV.

Una vez determinadas las tasas de salida, el usuario o ingeniero proyectista debe evaluarlas con respecto a los criterios de aceptación que considere adecuados para el desempeño de sus líneas ante las descargas atmosféricas. A tal efecto, el usuario puede guiarse de los criterios mencionados en la sección 2.5.5 del capítulo II (páginas 133 y 144). En el caso de resultar un apantallamiento inefectivo, se le presentará al usuario del programa el valor de la máxima distancia horizontal a la que puede estar el cable de guarda del conductor de fase para obtener el blindaje efectivo.

Es oportuno referir que al igual que en el caso del dimensionamiento, el programa brinda una herramienta de graficación para las tasas de salida en la cual el rango lo define el usuario. Se pueden obtener los siguientes tipos de curvas:

- 1.- Tasa de salida por fallas de blindaje (SFO) - Longitud de cadena (LC).
- 2.- Tasa de salida por descargas retroactivas (BOR) - Longitud de cadena (LC).
- 3.- Tasa de salida por descargas retroactivas (BOR) - Resistencia de puesta a tierra (RPT).

Ya para finalizar, y con el interés de presentar una mejor explicación paso a paso de la metodología empleada para la herramienta computacional, se recomienda al lector revisar el apéndice C de este trabajo, en el cual se desarrolla el cálculo eléctrico del aislamiento para una línea de transmisión EHV, con los datos de entrada correspondientes a la línea existente de transmisión Guri – La Canoa – El Tigre a 400 kV de EDELCA (tomados del anexo A de la referencia #8).

Adicionalmente, el apéndice E presenta resumidamente el diagrama de flujo del procedimiento de cálculo empleado por el programa elaborado, indicándose los parámetros de entrada y salida así como los métodos de cálculo considerados.

3.2. SELECCIÓN DEL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN MÁS ADECUADO PARA EL DESARROLLO DE LOS PROCEDIMIENTOS REQUERIDOS

Debido a la diversidad existente de lenguajes de programación, para seleccionar el que realmente se adapta a los propósitos del presente trabajo, se realizó un análisis comparativo en base a unas características adoptadas para la evaluación de los distintos lenguajes de programación. Estas características evaluativas representan los requerimientos y las necesidades de lenguaje necesarios para cumplir con los objetivos planteados. A continuación se desarrollan dichas características, para luego presentar los resultados de la evaluación.

3.2.1. Características adoptadas para la evaluación de los lenguajes

Las características evaluativas empleadas para la selección del lenguaje de programación que han sido consideradas como más importantes en relación a las necesidades del diseño del programa, se describen seguidamente:

➡ Operatividad en el entorno de Windows

Este aspecto representa la posibilidad de utilizar objetos del entorno de Windows para diseñar una adecuada interfaz de usuario (tales como botones prediseñados y cuadros de diálogo entre otros), brindando así sencillez en la codificación, dando como resultado un programa con una buena presentación sin tener que invertir mucho tiempo en el diseño de objetos comunes. Además, se obtiene un programa que perdura por mucho más tiempo proporcionando compatibilidad con el sistema operativo más común presente en la mayoría de las empresas a nivel nacional e internacional.

➤ **Facilidad en el uso del entorno de programación**

Esto va dirigido hacia el grado de complicación en el uso del entorno del lenguaje de programación y en la resolución de problemas con los archivos de ayuda del propio entorno. Así pues, el entorno debe ofrecer mayor facilidad de uso para obtener una buena evaluación.

➤ **Disponibilidad de manuales**

Esta característica tiene que ver con la facilidad de conseguir manuales en tiendas, librerías técnicas y/o bibliotecas. La disponibilidad de manuales mejora la calidad del programa ya que con esto se tiene la posibilidad de compenetrarse con la información suministrada por los expertos, que incluyen principalmente las capacidades y limitaciones del lenguaje, y así evitar tener que invertir mucho tiempo adicional en pruebas innecesarias para comprobar propiedades.

➤ **Novedad del lenguaje**

La novedad del lenguaje de programación siempre trae consigo una serie de ventajas, como por ejemplo, nuevos comandos capaces de resumir procesos. Por lo tanto, mientras más reciente sea el lenguaje mayores beneficios ofrecerá en este aspecto.

➤ **Posibilidad y facilidad en el uso de funciones matemáticas**

Esto implica la opción de utilizar en la elaboración del programa funciones matemáticas tales como logaritmos, funciones trigonométricas, entre otros, para la resolución de modelos matemáticos insertados en forma de ecuaciones dentro del programa.

➤ **Facilidad de impresión**

Este aspecto ofrece la ventaja de poder manejar la información fuera del computador, mostrando fácilmente a través de un reporte impreso, los resultados del cálculo eléctrico del aislamiento ofrecidos por el programa. La posibilidad y facilidad que presenta el empleo de la impresión con el lenguaje especificado dará el resultado de la evaluación respectiva.

3.2.2. Resultados de la evaluación

Los lenguajes existentes que se escogieron para la evaluación son los siguientes: C++, Turbo Pascal y Visual Pascal en sus últimas versiones; Visual Basic, Visual C++ y Visual FoxPro todos en la versión 6.0 edición empresarial de Visual Studio.

Tras la evaluación de todos estos lenguajes en base a las características planteadas y con el auspicio de un asesor en la materia, se concluyó que Microsoft Visual Basic 6.0 edición empresarial es el entorno de programación más adecuado para los propósitos del presente trabajo.

3.3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA COMPUTARIZADA

3.3.1. Elementos principales de la aplicación

Para desarrollar el programa utilizando como herramienta de programación Visual Basic, se partió de un proyecto estándar en el que se enumeraron los distintos componentes de la aplicación.

Así, los elementos principales empleados para la aplicación corresponden a los formularios, módulos de código estándar, entorno de datos, informes, controles y archivos de recursos. Cada uno de estos tipos de archivo tiene una finalidad concreta, que se conocerán en los puntos siguientes.

➤ El proyecto

El proyecto puede definirse como la referencia que tiene el entorno de programación para conocer qué componentes forman la aplicación, así como el aspecto del escritorio durante el diseño, las ventanas que hay abiertas, su posición y dimensiones, entre otros.

Visual Basic almacena los proyectos en archivos con extensión VBP (*Visual Basic Project*), cuyo contenido se puede visualizar e incluso modificar con cualquier editor. En el archivo de proyecto se enumeran los formularios que existen en el proyecto, asociando el nombre de cada formulario con el archivo en que está contenido, así como los módulos de código, entornos de datos e informes. Además, en este archivo se almacenan aquellas opciones que afectan de forma global al proyecto, tales como el

punto de entrada a la aplicación, nombre del proyecto e información relativa al programa (versión, título e icono), entre otros.

➤ Archivos de formulario

Cada formulario que existe en el proyecto tiene una correspondencia con un archivo, con extensión FRM, al cual se hace referencia en el propio archivo de proyecto.

En un archivo de formulario se almacena tanto la descripción del propio formulario, valores que se han asignado a sus propiedades, controles que contiene, entre otros, como el código asociado a dicho formulario. En los formularios del proyecto se han almacenado controles *ActiveX* de los cuales se hablará en el punto “Otros componentes”, y controles del tipo estándar de entre los cuales se han usado los siguientes:

- 1.- **TextBox:** para la entrada y salida de información.
- 2.- **Label:** exclusivamente para la salida de información.
- 3.- **CommandButton:** para ejecutar una acción.
- 4.- **PictureBox:** para presentar imágenes.
- 5.- **Line:** para dibujar gráficos.
- 6.- **OptionButton:** para seleccionar una de varias opciones.
- 7.- **CheckBox:** para seleccionar una o varias opciones.
- 8.- **Frame:** para clasificar diversos controles en grupos.
- 9.- **ListBox:** para visualizar una lista de valores.
- 10.- **ComboBox:** para la selección de un valor de entre una lista de posibles alternativas.
- 11.- **VScrollBar:** para realizar el desplazamiento vertical de información.

Estos controles poseen eventos, propiedades y métodos al igual que los formularios que lo contienen. Las propiedades constituyen las características de comportamiento y apariencia de un control o un objeto entre las cuales se tienen: ancho, tamaño, color, entre otros. Los eventos constituyen aquellos sucesos generados por el usuario del programa, tales como eventos de ratón, eventos de teclado y eventos de selección; como por ejemplo hacer *clic* sobre un botón, pulsar la tecla *ENTER*, mover el foco de un control a otro a través de la tecla *TAB*, entre otros. Por último, los métodos son procedimientos y funciones que se utilizan para llevar a cabo una determinada acción sobre un control específico con la finalidad de controlar su comportamiento.

La enumeración de propiedades en un archivo de formulario es muy fácil de interpretar, ya que tras el nombre del formulario o control al que pertenecen las propiedades, existe una lista en la cual se facilita el nombre de la propiedad y su valor, separados ambos datos mediante un signo de igual. El código de un formulario siempre sigue a la descripción de éste y está normalmente estructurado a través de procedimientos y funciones.

Ahora bien, el proyecto realizado contiene un formulario MDI principal, el cual corresponde a la ventana principal que actúa como fondo de la aplicación, y que contiene las barras de menús y herramientas. De la misma forma, el proyecto tiene formularios MDI secundarios, los cuales están contenidos en el formulario MDI principal y comprenden las ventanas de entrada de datos y resultados de los procedimientos de diseño, además de la ventana de propiedades. Estos formularios son *no modales*, es decir, no requieren ninguna acción del usuario antes de que el enfoque pueda cambiarse a otro formulario o cuadro de diálogo.

Así mismo, el proyecto contiene formularios que son *modales*; es decir, que requieren llevar a cabo alguna acción antes de que el enfoque pueda cambiarse a otro formulario o cuadro de diálogo. Estos formularios conforman las ventanas correspondientes a la configuración del programa, formato e información.

Por otra parte, para la ventana inicial o de presentación que antecede a la ventana principal se empleó un formulario del tipo *Pantalla de Inicio*, mientras que para la ventana titulada “Acerca de CEALT 1.0” se empleó un formulario del tipo *Cuadro de diálogo Acerca de*.

➤ Módulos de código

Fue necesario emplear módulos de código independiente para almacenar los procedimientos y funciones que no están directamente relacionados con un determinado formulario. Este es el caso de los módulos que contienen los procedimientos y funciones empleados para el cálculo en las opciones de diseño del programa, además de aquellos que son llamados desde el formulario principal MDI para realizar las actividades de guardado, apertura, impresión, entre otras.

Los módulos de código empleados son del tipo estándar los cuales tienen extensión BAS y su finalidad es almacenar código que se usa desde otros puntos de la aplicación, ya sea desde los procedimientos de un formulario o desde otro módulo de código.

➤ Archivos de recursos

Un archivo de recursos sirve para almacenar elementos de la aplicación que no son ni controles, ni código. Dentro de estos elementos están las imágenes empleadas de mapa de bits y los iconos, además de un archivo de *Microsoft Internet Explorer* vinculado a través de un control estándar *Contenedor OLE*.

Un mapa de bits, por ejemplo, no es una variable, ni un formulario, ni es código ejecutable, por lo que entra dentro de la categoría de lo que se denominan recursos, que no son más que otros elementos usados por la aplicación.

Visual Basic permite añadir a un proyecto un archivo de recursos, cuyo contenido formará parte del ejecutable que finalmente se genera. Este archivo de recursos se deberá hallar en formato compilado, extensión RES.

➤ Entorno de datos e informes

Visual Basic 6 cuenta con dos nuevos tipos de módulo, conocidos como *DataEnvironment* (entorno de datos) y *DataReport* (informe), que se utilizan para definir conexiones y comandos de acceso a bases de datos y diseñar informes, respectivamente.

En el proyecto realizado, se empleó un entorno de datos constituido de dos tablas con acceso a través de conexiones independientes. En estas tablas se almacenan los valores correspondientes a los datos de entrada y resultados de las opciones de diseño, además de los valores que definen la configuración del programa, para luego ser incorporados en los informes respectivos a fin de establecer las opciones de vista preliminar e impresión.

La información de estos tipos de módulo se almacena en archivos con extensión DSR. Al igual que ocurre con los módulos FRM, que almacenan formularios, los módulos DSR son archivos de texto que contienen una descripción del entorno de datos o del informe. Por lo tanto, se podría editar el contenido de estos archivos usando por ejemplo el Bloc de notas. No obstante, lo lógico es utilizar los diseñadores que Visual Basic 6 incorpora para este tipo de módulos, como tal cual se hizo en la realización del programa.

➤ Otros componentes

En el proyecto elaborado existe otro tipo de componentes el cual corresponde con los llamados *Controles ActiveX*. Un control ActiveX (antiguamente llamado control OLE) es una extensión del cuadro de herramientas de Visual Basic. Los controles ActiveX se usan como cualquiera de los

controles estándar incorporados, como por ejemplo, el control *CheckBox*. Cuando se agrega un control ActiveX a un programa, éste pasa a formar parte del entorno de desarrollo y de tiempo de ejecución y proporciona nueva funcionalidad a la aplicación.

Los controles ActiveX incrementan la capacidad del programador de Visual Basic conservando algunos métodos, propiedades y eventos ya familiares. Pero además, los controles ActiveX incorporan métodos y propiedades que aumentan enormemente la flexibilidad y capacidad del programador de Visual Basic.

Entre los controles ActiveX que se emplearon en la elaboración del programa se encuentran los siguientes:

- 1.- **ImageList:** para almacenar una colección de imágenes.
- 2.- **ProgressBar:** para indicar el estado de avance actual de un proceso.
- 3.- **ToolBar:** para proveer una colección de objetos *Button*, cada uno de los cuales se comporta como un control estándar *CommandButton*.
- 4.- **SysInfo:** para proporcionar información sobre la plataforma y la versión del sistema operativo.
- 5.- **RichTextBox:** para editar texto con formato RTF (*Rich Text Format*).

Estos elementos se almacenan en archivos con extensión OCX.

3.3.2. Codificación

Aunque buena parte del desarrollo de la aplicación en Visual Basic se realiza de forma visual, disponiendo de controles en el formulario y estableciendo propiedades, también existe una parte muy importante del programa que es el código que se encargará, básicamente, de responder a los eventos y procesar los datos para generar los resultados necesarios.

Los siguientes puntos resumen a grosso modo los fundamentos del lenguaje Visual Basic 6 que fueron necesarios conocer y aplicar para la elaboración del código del programa.

➡ Variables

Todos los programas que se ejecutan en un ordenador necesitan, en un momento u otro, tener en memoria aquellos datos que van a procesar. La memoria del ordenador está dividida en celdillas de un byte de capacidad, en cada una de las cuales se puede almacenar un número entre 0 y 255 representando cualquier dato que sea necesario. Cada celdilla se distingue de todas las demás mediante una dirección, que es única.

En Visual Basic, no es necesario manipular directamente las celdillas de memoria para poder almacenar datos, ya que se tiene la posibilidad de utilizar variables. Se puede definir una variable como una plantilla de un dato, en la cual se mantiene el número de celdillas necesarias para almacenar ese dato, su tipo y la dirección de la celdilla o celdillas en que se haya almacenado. Así, una variable de tipo *Integer* sería una plantilla que sabe qué capacidad es necesaria para almacenar un número entero. En realidad, lo que se hace al crear una variable es asignar un nombre a un cierto espacio de memoria que después se usa para almacenar y recuperar datos.

Entre los tipos de variables usados en el proyecto, se encuentran los siguientes:

- 1.- **Boolean:** puede valer *True* o *False*.
- 2.- **Byte:** representa enteros en el rango de 0 a 255.
- 3.- **Integer:** representa enteros en el rango de -32768 a 32767.
- 4.- **Double:** representa números reales con un punto flotante de doble precisión (el valor positivo más alto de un tipo de dato Double es 1,79769313486232 E +308)
- 5.- **String:** Cadenas de longitud fija o variable.
- 6.- **Variant:** Cualquier tipo de dato.

Ahora bien, cuando es necesario almacenar múltiples valores del mismo tipo y que guardan alguna relación entre ellos, en lugar de declarar una variable para cada uno se puede crear lo que se denomina una matriz. Así pues, una matriz es una serie de variables que comparten un mismo nombre y que se diferencian unas de las otras por un número de orden, al que se denomina habitualmente índice. El uso de matrices permite el uso de construcciones muy potentes, que facilitan el tratamiento de muchos datos con muy pocas sentencias. Entre las aplicaciones dadas a las matrices en el proyecto están la de los datos numéricos correspondientes a las gráficas o curvas empleadas en el programa para el cálculo, los cuales fueron insertados en matrices de dos dimensiones.

➤ Expresiones

Los distintos datos que se manejan a lo largo de un programa, ya estén almacenados en una variable o sean usados de forma directa, en forma de constantes literales, tienen como finalidad producir algún resultado, por lo cual con frecuencia son usados como operandos en diversas expresiones. Una expresión es una combinación de operandos (los datos) y operadores (las operaciones a realizar) construida teniendo en cuenta unas reglas y que genera un resultado único. Por regla general, la mayoría de los operadores son binarios, lo que significa que actúan sobre dos operandos, uno

facilitado a la izquierda del operador y otro a la derecha. La expresión más simple es la de asignación, en la cual se da un valor a una cierta variable.

En términos generales, se pueden agrupar las expresiones empleadas en el programa en tres tipos básicos: expresiones aritméticas, expresiones relacionales y expresiones lógicas o booleanas.

Las expresiones aritméticas son aquellas en las que interviene algunos de los operadores aritméticos, generando un resultado numérico. Entre algunos de estos operadores que fueron empleados en la codificación del programa se tienen al operador “+” (suma los dos operandos), “-” (resta el segundo operando del primero), “/” (división del primer operando entre el segundo), “^” (potencia del primer operando, base, al segundo, exponente).

Una expresión relacional es aquella en la cual los operandos están unidos por un operador de relación, de tal forma que si dicha relación es cierta el valor obtenido es *True* y si no es cierta el valor es *False*. Los operadores relacionales, al igual que los aritméticos, son todos binarios.

Estos operadores son: “=” (igualdad), “<” (desigualdad), “<” (primer operando menor que el segundo), “<=” (primer operando menor o igual que el segundo), “>” (primer operando mayor que el segundo), “>=” (primer operando mayor o igual que el segundo).

Ahora bien, las expresiones lógicas son aquellas en las que interviene algunos de los operadores lógicos, de entre los cuales se han usado para el programa los siguientes:

- 1.- **And:** devuelve *True* cuando los dos operadores son *True*.
- 2.- **Or:** devuelve *True* cuando uno de los dos operandos o los dos son *True*.
- 3.- **Not:** devuelve *True* si el operando es *False*.

Todos los operadores lógicos son binarios a excepción del operador *Not*, que sólo actúa sobre un operando que es facilitado a su derecha.

➡ Estructuras de control

Dentro de cada uno de los procedimientos o funciones que se construyan se necesitará tener un cierto control sobre las sentencias que se han de ejecutar o no, teniendo en cuenta estructuras condicionales, así como la posibilidad de repetir la ejecución de una o más sentencias un número determinado de veces, haciendo uso de las estructuras de repetición.

En ciertos momentos es necesario asignar a una variable un valor u otro dependiendo de que se cumpla una cierta condición, o bien ejecutar unas sentencias sólo si se cumple una condición. Para poder hacer esto se necesitará usar las que se conocen como estructuras condicionales, de las cuales el

exponente más conocido es la instrucción *If*. Las condiciones en Visual Basic se componen como expresiones relacionales, que pueden contener también operadores aritméticos y lógicos, siempre que al final se devuelva un único valor, que será *True* o *False*. Entre las instrucciones condicionales empleadas en la codificación del programa se encuentran *If..Then..Else* y *Elseif*, siendo necesaria la instrucción *End if* para cerrar la estructura.

Por otra parte, si lo que se requiere realizar en la codificación es repetir una misma acción múltiples veces, deben emplearse las estructuras de repetición las cuales se conocen habitualmente como bucles. En el código del programa han sido empleados bucles por contador y bucles por condición.

El bucle por contador es aquel en el que de antemano se conoce el número de veces que se quiere repetir la ejecución y su construcción se realiza mediante las instrucciones *For..Next*.

Ahora bien, no siempre es posible conocer de antemano el número de veces que se ha de repetir un bucle, por lo cual la construcción *For..Next* en ocasiones puede no servir. En estos casos, puede aplicar la utilización del bucle por condición. Para codificar este tipo de bucle, se utiliza la construcción *Do..Loop*. Entre la instrucción *Do* y la instrucción *Loop*, que se encontrarán en líneas distintas, se dispondrán todas las líneas de código a incluir en el bucle, como similarmente se hace en un bucle *For..Next*. Si el bucle condicional se va a controlar mediante una condición que se deba cumplir para permitir la ejecución se precederá una expresión condicional con la palabra *While*. Pero, si por el contrario el bucle se debe ejecutar hasta que la condición se cumpla, la palabra a usar será *Until*. El condicional que controla un bucle de este tipo puede disponerse tanto en su inicio, tras la palabra *Do*, como al final, tras la palabra *Loop*, lo que determinará el momento en que se realiza la comprobación de entrada al bucle.

Existe otro tipo de estructura de repetición el cual también fue empleado en el proyecto. Consiste de un método alternativo a la construcción *For..Next* en el cual no es necesario disponer de un contador ni conocer los límites de una matriz en el caso de que se requiera recorrerla. Esta construcción se realiza a través de las instrucciones *For Each..Next*, y puede aplicarse tanto a matrices como a colecciones de datos.

Tras la instrucción *For Each* se debe facilitar el identificador de una variable, necesariamente de tipo *Variant*, que irá seguido de la palabra *In* y el identificador de la matriz a recorrer. En el interior del bucle, que se ejecutará una vez por cada elemento, puede referirse a la variable de control para obtener cada uno de los valores.

➡ Procedimientos y funciones

El código de un programa Visual Basic ha de estar contenido en procedimientos y funciones. Es decir, no puede introducirse directamente una sentencia ejecutable en un módulo, se ha de definir primero el procedimiento en el que se incluirá esa sentencia. Fuera de los procedimientos y funciones sólo se puede definir nuevos tipos de datos o declarar variables.

Visual Basic incluye funciones incorporadas o intrínsecas, de entre las cuales fueron usadas *Sqr* (raíz cuadrada), *Cos* (coseno) y *Atn* (arcotangente), entre otras. Así mismo, muchos de los procedimientos de la aplicación fueron definidos automáticamente por el propio Visual Basic, asociándolos a ciertos eventos, de tal forma que sólo se necesitó escribir el código interno de esos procedimientos. Sin embargo, muchas veces se debieron crear procedimientos y funciones propios con el fin de codificar en ellos acciones que desde otros puntos de la aplicación se necesitaban ejecutar.

En el apéndice D de este trabajo, se presenta el código de programación realizado para la modelación del cálculo de las distancias mínimas a masa, el cual está compuesto de dos procedimientos, y se basa en la metodología expuesta en la sección 3.1.3 del presente capítulo.

3.3.3. Empaquetado

Una vez terminado el proyecto en Visual Basic, se generó el archivo ejecutable correspondiente al proyecto, el cual lleva por nombre CEALT.EXE.

La próxima acción correspondió al empaquetado de la aplicación para su posterior distribución o instalación en otros equipos.

Para ejecutar el empaquetado se utilizó el *asistente para empaquetado y distribución* que proporciona Visual Basic. Este asistente es el que finalmente crea el programa de instalación de distribución de la aplicación realizada, comprimiendo todos los archivos necesarios y generando un programa que será el que el usuario final utilice para llevar a cabo la instalación.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. REQUERIMIENTOS DE SISTEMA

La herramienta computacional desarrollada, que lleva por nombre CEALT 1.0 (Cálculo eléctrico del aislamiento para líneas de transmisión EHV – UHV, versión 1.0), ha sido diseñada y ensamblada para trabajar bajo plataformas operativas de ambiente Windows en sus versiones 98, *Millenium*, *2000 Professional* y *XP*. Sin embargo, se recomienda Windows XP por ser el sistema donde se diseñó la herramienta y donde se presenta la configuración original de colores para las ventanas de interfaz del programa. También, es recomendable tener instalado *Microsoft Internet Explorer*, por ser el programa soporte para la activación del “Manual del Usuario” o archivo de ayuda.

Los requerimientos de sistema recomendados son los siguientes:

- 1.- Procesador compatible Pentium 133 MHz o superior.
- 2.- Se recomienda un espacio libre en disco duro superior al tamaño del paquete de instalación del programa (52.2 MB).
- 3.- 32 MB de RAM como mínimo. Es recomendable una memoria RAM superior.
- 4.- CD-ROM para la instalación (velocidad 4X o superior).
- 5.- Impresora para generación de reportes (recomendada a color para la obtención de gráficas). En las preferencias de impresión, el tamaño del papel debe ser carta o de dimensiones superiores.
- 6.- Monitor VGA, con una resolución de pantalla no mayor a 800x600 píxeles.
- 7.- Teclado, ratón u otro dispositivo señalador.

Por otro lado, CEALT 1.0 requiere que la configuración regional actual del sistema, disponible en el panel de control, utilice la coma como separador decimal (por ejemplo, el formato español).

4.2. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

Para entender plenamente las explicaciones de esta sección y la siguiente, es necesario que el usuario tenga conocimientos básicos previos sobre el uso de Microsoft Windows. Es necesario que sepa cómo usar el ratón, apuntar, hacer clic y arrastrar. También deberá saber cómo seleccionar los comandos de los menús, opciones en los cuadros de diálogos, introducir texto, entre otras tareas. Se recomienda la consulta del manual del usuario de Microsoft Windows para obtener más detalles.

Ahora bien, la instalación de CEALT 1.0 debe hacerse atendiendo el siguiente procedimiento:

- 1.- Introduzca el CD de instalación CEALT 1.0 en el CD-ROM de su sistema.
- 2.- Busque el archivo ejecutable SETUP en la unidad señalada y haga doble clic con el botón izquierdo del ratón en este ejecutable para iniciar el proceso de instalación. También puede iniciar la instalación de CEALT 1.0 mediante la aplicación AGREGAR O QUITAR PROGRAMAS provista en el panel de control de la plataforma de su sistema, o bien, ejecutar el archivo SETUP desde la unidad CD-ROM con la aplicación EJECUTAR... disponible, por lo general, en el menú INICIO del sistema.
- 3.- Aguarde a que el asistente de instalación de CEALT 1.0 se inicialice y siga las instrucciones y recomendaciones de este asistente.
- 4.- El programa le indicará la finalización de la copia de archivos al disco. Finalizada la copia de archivos y el proceso de instalación, se recomienda reinicializar el sistema antes de iniciar CEALT 1.0.
- 5.- Por último, se recomienda activar la casilla “Sólo lectura” de la ficha “General” de las propiedades del archivo “Requerimientos” contenido en la carpeta de CEALT 1.0 para que no pueda ser dañado accidentalmente (este archivo presenta los requerimientos descritos en la sección anterior 4.1).

CEALT 1.0, al igual que otras aplicaciones que funcionan bajo la plataforma operativa Windows, crea durante su instalación la carpeta del programa en el submenú PROGRAMAS del menú INICIO del sistema. Inicie CEALT 1.0 con un clic en el botón izquierdo del ratón sobre el nombre de la herramienta o posicione el cursor sobre este y oprima la tecla ENTER en el teclado del equipo. Otras formas de iniciar el programa dependerán de la preferencia del usuario y del conocimiento que tenga sobre la plataforma o sistema operativo de su equipo.

4.3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA FUNCIONALIDAD DEL PROGRAMA

Tal y como ha sido diseñada esta herramienta, CEALT 1.0 es un software de cálculo aplicado a estudios de aislamiento eléctrico para líneas aéreas de transmisión EHV-UHV, que cuenta con una interfaz visual donde el usuario podrá introducir los valores necesarios para la obtención de los parámetros que representan el diseño eléctrico de una línea. Adicionalmente, CEALT 1.0 proporciona herramientas de graficación para la obtención de curvas de sensibilidad que pueden emplearse en el análisis de la selección definitiva de los parámetros eléctricos asociados al aislamiento de una línea en particular. Asimismo, CEALT 1.0 permite al usuario realizar ajustes en su configuración para la personalización de los diseños.

4.3.1. Proyecto

➤ Inicio

El programa se carga a través del archivo ejecutable CEALT.EXE. Al cargar CEALT 1.0, se presenta una ventana preliminar (ver figura 4.1) con información muy general acerca del programa, la cual perdura por un lapso de tiempo de aproximadamente 4 segundos. Para evitar esperar este intervalo de tiempo, basta con hacer clic sobre dicha ventana y seguidamente se cargará la pantalla inicial del programa.



FIGURA 4.1. Ventana preliminar inicial –

La pantalla inicial presentada por CEALT 1.0 (figura 4.2) se caracteriza por mostrar un fondo de color gris oscuro y un menú con opciones habilitadas sólo para abrir y crear un nuevo proyecto, consultar información acerca del programa, y por supuesto, salir del programa. Para realizar un diseño, o hacer cambios en la configuración de CEALT 1.0, debe abrirse un proyecto o crearse uno nuevo.

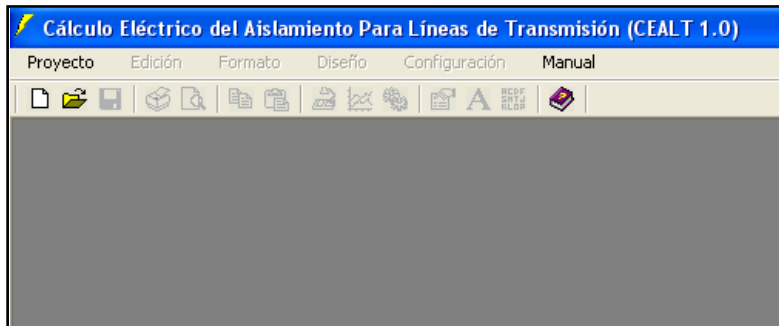


FIGURA 4.2. Pantalla inicial presentada por

➤ Acceso y guardado de archivos

Para crear un archivo nuevo, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Nuevo”; o alternativamente se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas.

Para abrir un archivo existente, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Abrir”; o alternativamente se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas. Es importante decir que los archivos deben ser editables para que el programa pueda abrirlos (no deben ser de “sólo lectura”).

Ahora bien, los archivos de proyecto de CEALT 1.0 no se cargan al tratar de abrirlos directamente desde el sistema operativo (por ejemplo, haciéndole doble clic al archivo en cuestión); deben cargarse o abrirse desde CEALT 1.0 a través de su menú o barra de herramientas.

Una vez creado o abierto un proyecto, el color del fondo cambia de gris a blanco, indicando que un archivo se ha cargado (ver figura 4.3).

Cabe destacar que CEALT 1.0 trabaja sólo con un archivo a la vez, es decir, no permite tener cargados varios archivos de proyecto al mismo tiempo. Esto se evidencia en el hecho de que al estar cargado un archivo de proyecto, las opciones de abrir y crear proyectos se deshabilitan.

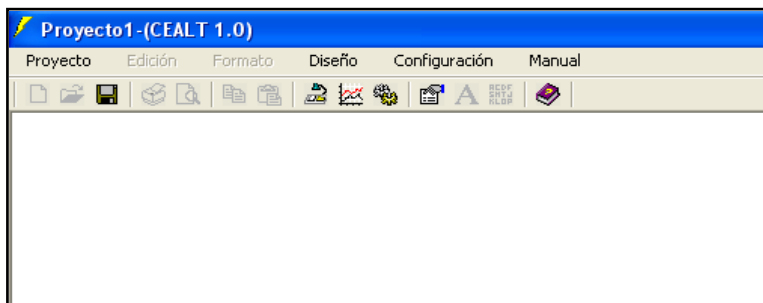


FIGURA 4.3. *Aspecto de la pantalla al cargarse un archivo*

Cuando se crea un proyecto nuevo, CEALT 1.0 le asigna inicialmente el nombre de “Proyecto1”. Para guardar por primera vez los cambios realizados al proyecto en cuestión, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Guardar” o en “Guardar Como”; o alternatively se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas. Acto seguido, se presenta el cuadro de diálogo “Guardar Como...” en donde el usuario puede guardar el archivo escogiendo el nombre y la ubicación de su preferencia (la extensión de los archivos de proyecto de CEALT 1.0 es: “.clt”).

Si el archivo cargado o activo en CEALT 1.0 no es nuevo sino existente, para guardar los cambios realizados en el proyecto actual se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Guardar”; o alternatively se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas. Si se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Guardar Como”, se presenta el cuadro de diálogo “Guardar Como...” en donde el usuario puede guardar el archivo actual con otro nombre (realizar una copia) o remplazar otro archivo que tenga el mismo nombre.

Para cerrar el proyecto actual o cargado, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Cerrar”. Obviamente, también se cierra el archivo al salir del programa haciendo clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Salir”; o alternatively haciendo clic en el botón principal de cerrar. Si se realizaron cambios al proyecto, antes de cerrar CEALT 1.0 presentará en pantalla un cuadro de mensaje “MsgBox”, en donde el usuario decidirá si guarda o no dichos cambios.

➤ Impresión

Para poder imprimir el reporte de un procedimiento, debe estar activada o en pantalla la ventana de los resultados de dicho procedimiento. De no estar activada dicha ventana, las opciones de imprimir reportes de procedimientos se deshabilitan (como en la figura 4.3). Los procedimientos son las opciones de diseño que se despliegan del menú “Diseño” del cual se hablará más adelante.

CEALT 1.0 ofrece dos modalidades de impresión: impresión directa y vista preliminar. La impresión directa imprime todo el reporte del procedimiento actual sin efectuar interfaz con el usuario. La vista preliminar ofrece antes, una visión en pantalla del diseño de impresión, esto es, cómo se verá el reporte impreso en papel. Desde esta ventana de reporte o vista preliminar (ver figura 4.4), el usuario podrá ajustar las preferencias de impresión a través del botón imprimir de la ventana de reporte, e incluso podrá guardar el reporte a través del botón exportar.

En el caso de los dos procedimientos correspondientes a las curvas de sensibilidad, CEALT 1.0 ofrece la vista preliminar sólo para el reporte de datos de entrada (no presenta la vista preliminar de los resultados o gráficas); de modo que por esta vía, no se puede imprimir la hoja correspondiente al resultado o a la gráfica. Para obtener la gráfica impresa, se debe imprimir a través de la modalidad de la impresión directa.

La impresión del reporte correspondiente a la configuración del programa, a diferencia de los procedimientos, habitualmente puede efectuarse en cualquier momento, siempre y cuando esté activo o cargado un archivo de proyecto. Para imprimir este reporte, ya sea directamente o en vista preliminar, sólo puede efectuarse desde las opciones del menú; no puede hacerse desde los botones de la barra de herramientas.

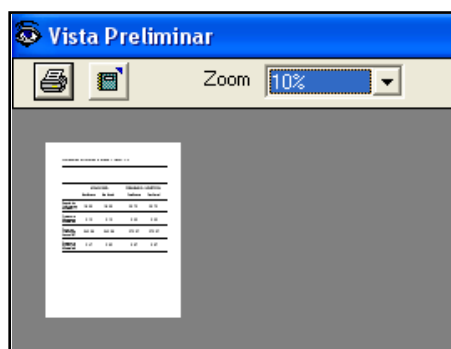


FIGURA 4.4. *Ventana de reporte o vista preliminar –*

Para realizar la impresión directa, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Imprimir”, para luego hacer clic en “Procedimiento” si se va a imprimir un reporte de un procedimiento, o en “Configuración” si se va a imprimir el reporte correspondiente a la configuración.

Alternativamente, para realizar la impresión directa (de sólo reportes de procedimientos) se puede hacer clic en el botón:  de la barra de herramientas.

Para imprimir a través de la vista preliminar, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Vista Preliminar”, para luego hacer clic en “Procedimiento” si se va a imprimir un reporte de un procedimiento, o en “Configuración” si se va a imprimir el reporte correspondiente a la configuración.

Alternamente, para imprimir a través de la vista preliminar (de sólo reportes de procedimientos) se puede hacer clic en el botón:  de la barra de herramientas.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- "El ancho del informe es mayor que el ancho del papel". Se debe establecer en las preferencias de impresión del panel de control del sistema el tamaño de papel a tamaño carta, de lo contrario puede ocurrir este tipo de error de impresión.

➔ Propiedades

CEALT 1.0 provee una ventana para el almacenamiento de las propiedades generales de los proyectos (ver figura 4.5). Esta ventana proporciona las principales características informáticas del archivo actual que son las siguientes: nombre del archivo, ubicación del archivo en disco, tamaño, fecha de creación, fecha de último acceso y fecha de última modificación.

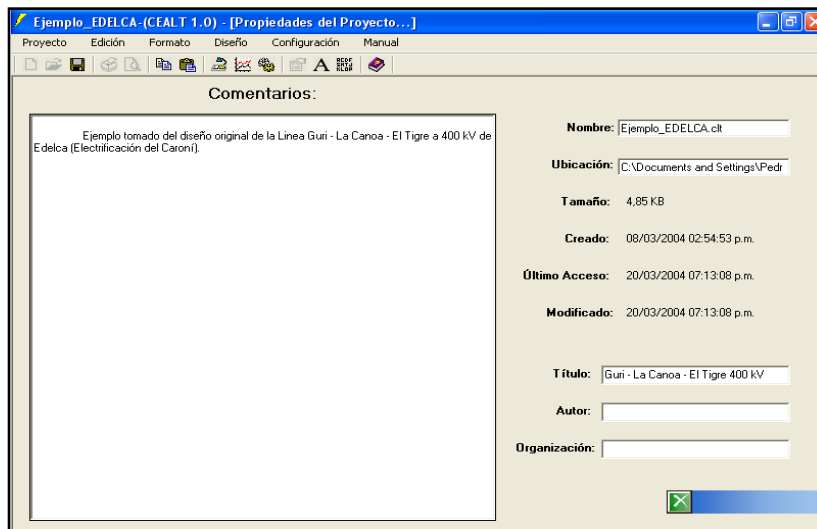


FIGURA 4.5. Ventana de propiedades – CEALT 1.0.

En esta ventana, el usuario puede guardar información de interés en los espacios “Título”, “Autor” y “Organización”. También hay lugar para que el usuario almacene notas alusivas al proyecto

en el espacio “Comentarios”. No está demás señalar que en estos espacios, CEALT 1.0 no guarda comillas ya que se emplean internamente en el proceso de guardado y podrían generarse errores.

Para abrir la ventana de propiedades, se hace clic en el menú “Proyecto”, y seguidamente en “Propiedades”; o alternativamente se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas. En general, puede abrirse en cualquier instante siempre y cuando esté activo un archivo de proyecto. Así, puede cargarse mientras se esté trabajando con un procedimiento cualquiera de diseño.

Para cerrar la ventana de propiedades, es suficiente hacer clic en el botón “Cerrar”:  de la ventana.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- “No se puede emplear el texto: \$EOM\$”. En los espacios “Título”, “Autor” y “Organización” no se puede introducir el texto “\$EOM\$” por estar reservado para la operatividad del programa.

4.3.2. Edición y formato

⇒ Edición

En el momento en que esté presente en pantalla cualquier ventana perteneciente a un procedimiento de diseño, o también la ventana de propiedades, las opciones de edición estarán habilitadas. Estas opciones abarcan las acciones de copiar y pegar texto. Estas acciones pueden aplicarse a cualquier texto que pueda ser seleccionado, y son compatibles con otros programas.

Para copiar texto, se debe en primer lugar seleccionar el texto de interés, luego se hace clic en el menú “Edición”, y seguidamente en “Copiar”; o alternativamente se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas (también se puede hacer desde el teclado pulsando: Ctrl + C).

Para pegar texto, se debe en primer lugar colocar el cursor en el espacio deseado, luego se hace clic en el menú “Edición”, y seguidamente en “Pegar”; o se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas (también se puede hacer desde el teclado pulsando: Ctrl + V).

Las opciones de edición tienen más aplicación en el espacio “Comentarios” de la ventana de propiedades, ya que dicho espacio está especialmente dedicado a procesar texto.

⇒ Fuente

Esta opción sólo tiene aplicación en el cuadro “Comentarios” de la ventana de propiedades.

Al hacer clic en el menú “Formato”, y luego en “Fuente”; o también al hacer clic en el botón de la barra de herramientas: , se muestra en pantalla el cuadro de diálogo “Fuente”, mediante el cual el usuario puede cambiar el tipo de letra o fuente, el estilo, cambiar el tamaño de la letra y seleccionar efectos para el texto.

➡ Alineación

Esta opción, al igual que “Fuente”, sólo tiene aplicación en el cuadro “Comentarios” de la ventana de propiedades.

Lo primero que se debe hacer es ubicar el cursor en el párrafo o línea al cual se le desea cambiar la alineación.

Luego se hace clic en el menú “Formato”, y luego en “Alineación”; o también en el botón de la barra de herramientas: . Entonces se muestra en pantalla el cuadro de diálogo “Alineación del Texto...”, mediante el cual el usuario puede escoger la alineación para el texto, ya sea a la izquierda, a la derecha o centrado.

4.3.3. Diseño

CEALT 1.0 contempla los siguientes procedimientos de diseño: dimensionamiento del aislamiento estándar y personalizado, cálculo de las distancias eléctricas mínimas a masa, verificación ante descargas atmosféricas y obtención de gráficos de sensibilidad para el número de aisladores y las tasas de salida por descargas atmosféricas.

Para cargar un procedimiento de diseño, se hace clic en el menú “Diseño”, luego se busca el nombre del procedimiento en cuestión y se le hace clic. Ahora bien, si se desea hacer un diseño completo de aislamiento, el usuario puede hacer clic en el botón:  de la barra de herramientas, el cual llama uno a la vez a los procedimientos de dimensionamiento estándar, cálculo de las distancias eléctricas y verificación ante descargas atmosféricas; en ese mismo orden. Por otro lado, si se le hace clic en el botón:  de la barra de herramientas, se cargarían uno a la vez los procedimientos de obtención de gráficos “número de aisladores” y “tasas de salida”, en ese mismo orden.

Cabe destacar que el programa trabaja sólo con un procedimiento de diseño a la vez, es decir, no permite tener cargados varios procedimientos de diseño simultáneamente. Esto se evidencia en el hecho de que al estar cargado un procedimiento, las opciones de llamar otros procedimientos de diseño se deshabilitan.

Por otra parte, el usuario debe guardar los cambios realizados en un procedimiento antes de cerrarlo. De todas formas, al cerrar un procedimiento sin guardar los cambios que se hayan hecho en él, CEALT 1.0 presentará en pantalla un cuadro de mensaje en donde el usuario decidirá si finalmente guarda o no dichos cambios.

➡ Dimensionamiento del aislamiento

- **Estándar**

Este procedimiento de diseño está compuesto de dos ventanas principales: una de datos de entrada y otra de resultados.

En la ventana de datos de entrada, el usuario debe introducir los valores correctamente, sólo números, pudiendo emplear del teclado el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. En el caso particular del DESD, se debe introducir el valor en el espacio asignado y luego hacer clic en el botón “Agregar”; y si se desea borrar de la lista un valor determinado de DESD, basta con seleccionarlo haciendo clic sobre él para luego hacer clic en el botón “Eliminar” (ver figura 4.6).

Para ejecutar el cálculo y presentar los resultados, se hace clic en el botón “Calcular”:  de la ventana. Asimismo, para cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

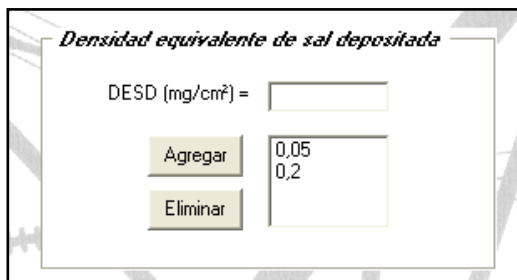


FIGURA 4.6. Detalle de la ventana de datos del procedimiento de dimensionamiento estándar. CEALT

La ventana de resultados presenta un recuadro de conjunto o un “ComboBox” (ver figura 4.7). En dicho control se almacenan los valores introducidos de DESD, a los que se le asocia a cada uno de estos valores los resultados respectivos. Así, para visualizar en pantalla los resultados correspondientes a un determinado valor de DESD, se hace clic en el recuadro de conjunto para desplegar los valores de DESD almacenados, y luego se hace clic en aquél valor al cual se le desea obtener los resultados.

En esta ventana, además, CEALT 1.0 ofrece al usuario la información inherente a los aisladores tipo empleados para el cálculo. Sólo se debe hacer clic en el enlace “Ver Aisladores Tipo”, y se verá en pantalla la ventana de información “Aisladores Tipo Considerados”. En esta última ventana, hay otro enlace titulado “Ver Fabricante y N° de Catálogo”, el cual conduce (al hacerle clic) a otra ventana de información de etiqueta “Aisladores Tipo – Fabricante y N° de Catálogo”.

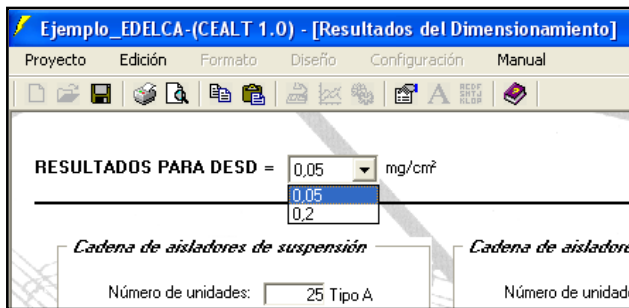


FIGURA 4.7. Detalle de la ventana de resultados del procedimiento de dimensionamiento estándar – CEALT

Para cerrar las ventanas de información y resultados, se hace clic en el botón “Cerrar”: . Es bueno indicar que al cerrar la ventana de resultados no se cierra el procedimiento de diseño. Esto ocurre en todos los procedimientos.

Posibles errores que pueden presentarse:

- A.- "Error de introducción de datos". Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.
- B.- "El valor del voltaje del sistema es inválido". El valor introducido de tensión de línea debe ser mayor o igual a 345 kV.
- C.- "El valor no puede ser cero". Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.
- D.- "Se requiere al menos un valor para el DESD". Debe introducirse en la lista, a través del espacio asignado, al menos un valor de contaminación DESD.
- E.- "El valor del DESD esta fuera de rango válido. Revisar datos de entrada.". Refiere que en la lista de los valores de DESD agregados existe un valor fuera de rango válido y que por tanto debe ser eliminado. El rango válido está definido por el rango común del DESD en los datos de las curvas de los fabricantes (tensión de resistencia – DESD), según los aisladores tipo empleados en el cálculo. A continuación se presenta el rango válido para cada aislador tipo predeterminado de origen:

Aislador Tipo A: [0.03 ; 0.37] mg/cm².

Aislador Tipo B: [0.03 ; 0.4] mg/cm².

Aislador Tipo C y D: [0.03 ; 0.42] mg/cm².

Por ejemplo, si el valor del DESD es: 0.05 mg/cm^2 , los aisladores tipo a emplear en el cálculo son el A y el C, por lo que el rango válido es: $[0.03 ; 0.37] \text{ mg/cm}^2$, que resulta ser el rango común para estos dos aisladores tipo.

- **Personalizado**

Este procedimiento de diseño, al igual que el estándar, está compuesto de dos ventanas principales: una de datos de entrada y otra de resultados.

En la ventana de datos de entrada, el usuario debe introducir los valores correctamente, sólo números, pudiendo emplear del teclado el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. En el caso particular del DESD, se debe introducir el valor en el espacio asignado y luego hacer clic en el botón “Agregar”; y si se desea borrar de la lista un valor determinado de DESD, basta con seleccionarlo haciendo clic sobre él para luego hacer clic en el botón “Eliminar” (ver figura 4.6). Asimismo, antes de iniciar el cálculo se debe seleccionar al menos un aislador tipo haciendo clic en la correspondiente casilla de verificación.

Para ejecutar el cálculo y presentar los resultados, se hace clic en el botón “Calcular”:  de la ventana. Asimismo, para cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

La ventana de resultados presenta un recuadro de conjunto o un “ComboBox” como el de la figura 4.7. En dicho control se almacenan los valores introducidos de DESD, a los que se le asocia a cada uno de estos valores los resultados respectivos. Así, para visualizar en pantalla los resultados correspondientes a un determinado valor de DESD, se hace clic en el recuadro de conjunto para desplegar los valores de DESD almacenados, y luego se hace clic en aquél valor al cual se le desea obtener los resultados.

En esta ventana, y al igual que en el procedimiento anterior, CEALT 1.0 ofrece al usuario la información inherente a los aisladores tipo empleados para el cálculo tal y como se explica en el procedimiento de dimensionamiento estándar.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- "Error de introducción de datos". Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.

B.- "El valor del voltaje del sistema es inválido". El valor introducido de tensión de línea debe ser mayor o igual a 345 kV.

C.- "El valor no puede ser cero". Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.

D.- "Se requiere al menos un valor para el DESD". Debe introducirse en la lista, a través del espacio asignado, al menos un valor de contaminación DESD.

E.- "Debe seleccionar el (los) aislador(es) tipo a considerar para el cálculo". Se debe seleccionar al menos un aislador tipo para poder activar el procedimiento de cálculo.

F.- "El valor del DESD esta fuera de rango válido. Revisar datos de entrada". Refiere que en la lista de los valores de DESD agregados existe un valor fuera de rango válido y que por tanto debe ser eliminado. El rango válido está definido por el rango común del DESD en los datos de las curvas de los fabricantes (tensión de resistencia – DESD), según los aisladores tipo empleados en el cálculo. A continuación se presenta el rango válido para cada aislador tipo predeterminado de origen:

Aislador Tipo A: [0.03 ; 0.37] mg/cm².

Aislador Tipo B: [0.03 ; 0.4] mg/cm².

Aislador Tipo C y D: [0.03 ; 0.42] mg/cm².

Por ejemplo, si los aisladores tipo seleccionados para el cálculo fueron el B y el C, el rango válido para el DESD será el común entre los dos: [0.03 ; 0.4] mg/cm².

➡ Distancias eléctricas mínimas a masa

Este procedimiento de diseño está compuesto de dos ventanas principales de datos, una tercera ventana de interfaz con el usuario y una última que presenta los resultados.

En la primera ventana de datos, se debe seleccionar el tipo de torre considerado para el diseño haciendo clic sobre el recuadro respectivo o sobre el botón de opción que lo identifica. Una vez seleccionado el tipo de torre, debe seleccionarse la configuración de la cadena haciendo clic en el "ComboBox" destinado para ello, y luego haciendo clic en la configuración de la cadena deseada.

Para pasar a la segunda ventana, se hace clic en el botón "Siguiente": . Asimismo, para cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón "Cerrar procedimiento actual":  de la ventana.

En la segunda ventana de datos, el usuario debe introducir los valores correctamente, sólo números, pudiendo emplear del teclado el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. Algunas etiquetas de datos de esta ventana poseen enlaces los cuales al ser ejecutados (haciéndole clic) presentan cuadros de mensaje con información breve respecto a la misma etiqueta. No está demás indicar que si la configuración de todas las cadenas es en "V", los espacios correspondientes a los parámetros del

conductor de fase, los relacionados con la acción del viento y la relación vano medio / vano gravante se deshabilitan por no aplicar para el cálculo.

Para ejecutar el cálculo, se hace clic en el botón “Calcular”:  de esta segunda ventana. Asimismo, se puede retroceder a la ventana anterior haciendo clic en el botón “Atrás”: , y si se quiere cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

Después de solicitar el cálculo, aparece en pantalla una tercera ventana, en la cual el usuario debe introducir los datos requeridos de la misma forma en que se hace para la segunda ventana. Para cancelar el cálculo y volver a las ventanas de datos, se hace clic en el botón “Cancelar”:  de esta ventana.

Ahora bien, para continuar con el proceso de cálculo y presentar la ventana de resultados, el usuario debe hacer clic en el botón “Continuar”:  de la ventana.

Para cerrar la ventana de resultados, se hace clic en el botón “Cerrar”: .

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- "Debe seleccionarse el tipo de torre antes de continuar". Se refiere a que debe seleccionarse el tipo de torre antes de cargar la siguiente ventana.

B.- "Error de introducción de datos". Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.

C.- "El valor del voltaje del sistema es inválido". El valor introducido de tensión de línea debe ser mayor o igual a 345 kV.

D.- "El valor no puede ser cero". Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.

E.- "El valor introducido de humedad absoluta está fuera de rango válido". El valor de la humedad absoluta debe estar dentro del siguiente rango: $(0 ; 25] \text{ gr/cm}^3$.

F.- "La altura promedio de la flecha debe ser menor que la altura promedio del conductor". Refiere que el valor introducido de la altura promedio del conductor de fase debe ser mayor al de la flecha.

G.- "El valor de la altura promedio del conductor de fase A en la torre debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase B". Aplica en el caso de líneas doble circuito, y refiere que el valor introducido de la altura promedio del conductor de fase A debe ser mayor al de la fase B.

H.- "El valor de la altura promedio del conductor de fase B en la torre debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase C". Aplica en el caso de líneas doble circuito, y refiere que el valor introducido de la altura promedio del conductor de fase B debe ser mayor al de la fase C.

I.- "El valor del número total de torres debe ser entero". El valor introducido del número total de torres debe ser entero, no debe tener parte decimal.

J.- "Error en el cálculo del CFO ante sobretensiones de maniobra. Revisar datos de entrada.". Este error puede ocurrir durante el proceso particular de cálculo del CFO a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes al número total de torres, sobretensión media de maniobra, y desviación estándar de la generación de sobretensiones. Así mismo, se deben revisar los valores de configuración correspondientes al porcentaje de torres consideradas (**Ptc**), máxima probabilidad de falla (**Pn**) y desviación estándar por maniobra (σ_m) (en el caso que se hayan modificado y sean distintos a los valores de origen).

K.- "El CFO obtenido ante sobretensiones de maniobra es inválido. Revisar datos de entrada.". Ocurre cuando el valor obtenido del CFO es menor o igual a 1 en por unidad, o si resulta mayor a 2360.64 kV. Se deben revisar los valores correspondientes al número total de torres, tensión de línea, sobretensión media de maniobra, y desviación estándar de la generación de sobretensiones. Así mismo, se deben revisar los valores de configuración correspondientes a la máxima tensión de operación normal del sistema (**Sv**), porcentaje de torres consideradas (**Ptc**), máxima probabilidad de falla (**Pn**) y desviación estándar por maniobra (σ_m) (en el caso que se hayan modificado y sean distintos a los valores de origen).

L.- "La distancia eléctrica obtenida ante sobretensiones de maniobra está fuera de rango válido. Revisar datos de entrada.". Ocurre al hacer la corrección para la condición estándar de un espesor de torre de 1.2 metros, cuando la relación **1.2 / Distancia eléctrica** se sale del rango: [0 ; 0.7]. Se deben revisar los valores correspondientes al número total de torres, tensión de línea, sobretensión media de maniobra, desviación estándar de la generación de sobretensiones y densidad relativa del aire. Así mismo, se deben revisar los valores de configuración correspondientes a la máxima tensión de operación normal del sistema (**Sv**), porcentaje de torres consideradas (**Ptc**), máxima probabilidad de falla (**Pn**) y desviación estándar por maniobra (σ_m) (en el caso que se hayan modificado y sean distintos a los valores de origen).

M.- "La relación espesor de torre - distancia eléctrica obtenida ante sobretensiones de maniobra está fuera de rango válido. Revisar datos de entrada.". Ocurre al hacer la corrección para el espesor real de la torre (**ET**) cuando la relación **ET / Distancia eléctrica** se sale del rango válido: [0 ; 0.7]. Se deben revisar los valores correspondientes al espesor de la torre, número total de torres, tensión de línea, sobretensión media de maniobra, desviación estándar de la generación de sobretensiones y densidad

relativa del aire. Así mismo, se deben revisar los valores de configuración correspondientes a la máxima tensión de operación normal del sistema (**Sv**), porcentaje de torres consideradas (**Ptc**), máxima probabilidad de falla (**Pn**) y desviación estándar por maniobra (σ_m) (en el caso que se hayan modificado y sean distintos a los valores de origen).

N.- "La relación longitud de cadena - distancia eléctrica obtenida ante sobretensiones de maniobra está fuera de rango válido. Revisar datos de entrada." Puede suceder al hacer la corrección por longitud de la cadena (**Lc**) cuando la relación **Lc / Distancia eléctrica** se sale de los siguientes rangos condicionados según el valor de la distancia eléctrica:

Para una distancia eléctrica ≤ 4.6 , el rango válido es: [0.7 ; 2].

Para una distancia eléctrica > 4.6 y ≤ 7.6 , el rango válido es: [0.6 ; 2].

Para una distancia eléctrica > 7.6 , el rango válido es: [0.5 ; 2].

Se deben revisar los valores correspondientes a la longitud de la cadena, número total de torres, tensión de línea, sobretensión media de maniobra, desviación estándar de la generación de sobretensiones y densidad relativa del aire. Así mismo, se deben revisar los valores de configuración correspondientes a la máxima tensión de operación normal del sistema (**Sv**), porcentaje de torres consideradas (**Ptc**), máxima probabilidad de falla (**Pn**) y desviación estándar por maniobra (σ_m) (en el caso que se hayan modificado y sean distintos a los valores de origen).

Ñ.- "Error en el cálculo del CFO ante sobretensiones a frecuencia industrial. Revisar criterios de cálculo." Este error puede ocurrir durante el proceso particular de cálculo del CFO a frecuencia industrial por causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores de configuración correspondientes al número de desviaciones estándar en que el CFO se encuentra por encima de la máxima sobretensión (**K**) y a la desviación estándar a frecuencia industrial (σ_f).

O.- "El CFO obtenido a frecuencia industrial está fuera de rango válido. Revisar datos de entrada." Ocurre cuando el valor obtenido del CFO a frecuencia industrial se sale del rango: [0 ; 2080] kV. Se deben revisar los valores correspondientes a la tensión de línea, máxima sobretensión a frecuencia industrial y densidad relativa del aire. Así mismo, se deben revisar los valores de configuración correspondientes a la máxima tensión de operación normal del sistema (**Sv**), número de desviaciones estándar en que el CFO se encuentra por encima de la máxima sobretensión (**K**) y a la desviación estándar a frecuencia industrial (σ_f) (en el caso que se hayan modificado y sean distintos a los valores de origen).

➤ Verificación ante descargas atmosféricas

Este procedimiento de diseño está compuesto de tres ventanas principales de datos y una cuarta que presenta los resultados.

En la primera ventana de datos, se debe seleccionar el tipo de torre considerado para el diseño haciendo clic sobre el recuadro respectivo o sobre el botón de opción que lo identifica. Una vez seleccionado el tipo de torre, debe seleccionarse la configuración de la cadena haciendo clic en el “ComboBox” destinado para ello, y luego haciendo clic en la configuración de la cadena deseada.

Para pasar a la segunda ventana, se hace clic en el botón “Siguiente”: . Asimismo, para cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

En la segunda ventana de datos, el usuario debe introducir los valores correctamente, sólo números, pudiendo emplear del teclado el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. En el caso particular del N° de subconductores por fase, el usuario debe seleccionar el valor a través de un control “ComboBox”. Si se selecciona la unidad, el espacio correspondiente a la distancia entre subconductores de fase se deshabilita.

Para pasar a la tercera ventana, se hace clic en el botón “Siguiente”: . Asimismo, se puede retroceder a la ventana anterior haciendo clic en el botón “Atrás”: , y si se quiere cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

En la tercera ventana de datos, el usuario debe introducir los valores correctamente en los espacios habilitados, sólo números, pudiendo emplear el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. La imagen de la torre en esta ventana proporciona el sistema de coordenadas al que el usuario debe hacer referencia para la introducción de los datos. En el caso particular del ángulo de fase, el usuario debe establecer los valores a través de los controles “ComboBox” asignados para ello.

Para ejecutar el cálculo, se hace clic en el botón “Calcular”:  de esta segunda ventana. Asimismo, se puede retroceder a la ventana anterior haciendo clic en el botón “Atrás”: , y si se quiere cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- "Debe seleccionarse el tipo de torre antes de continuar". Se refiere a que debe seleccionarse el tipo de torre antes de cargar la siguiente ventana.

B.- "Error de introducción de datos". Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.

C.- "El valor del voltaje del sistema es inválido". El valor introducido de tensión de línea debe ser mayor o igual a 345 kV.

D.- "El valor no puede ser cero". Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.

E.- "La secuencia definida por los ángulos de fase es inválida". Los valores de los ángulos de fase han sido seleccionados incorrectamente, estableciendo una secuencia inválida.

F.- "El valor de la coordenada en X del cable de guarda no puede ser mayor al valor respectivo del conductor de fase". Aplica en el caso de líneas de terna simple. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en X del cable de guarda y/o el valor respectivo del conductor de fase.

G.- "El valor de la coordenada en Y del cable de guarda debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase". Aplica en el caso de líneas de terna simple. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del cable de guarda y/o el valor respectivo del conductor de fase.

H.- "La altura promedio de la flecha debe ser menor que la altura promedio del conductor". Se debe corregir el valor introducido de la altura promedio de la flecha y/o el valor de la altura promedio del conductor.

I.- "El valor de la coordenada en X del cable de guarda no puede ser mayor al mayor valor respectivo de los conductores de fase". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en X del cable de guarda y/o el mayor valor respectivo de los conductores de fase.

J.- "El valor de la coordenada en Y del cable de guarda debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase C'". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del cable de guarda y/o el valor respectivo del conductor de fase C'.

K.- "El valor de la coordenada en Y del conductor de fase C' debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase B'". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del conductor de fase C' y/o el valor respectivo del conductor de fase B'.

L.- "El valor de la coordenada en Y del conductor de fase B' debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase A'". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del conductor de fase B' y/o el valor respectivo del conductor de fase A'.

M.- "El valor de la distancia Y_{tm1} debe ser menor al de la distancia Y_{tm2} ". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la distancia Y_{tm1} y/o el valor de la distancia Y_{tm2} .

N.- "El valor de la distancia Y_{tm2} debe ser menor al de la distancia Y_{tm3} ". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la distancia Y_{tm2} y/o el valor de la distancia Y_{tm3} .

Ñ.- "Revisar coordenadas de altura y flecha promedio". Este error ocurre a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas promedio de los conductores y flechas promedio.

O.- "Revisar coordenadas de altura, flecha promedio y longitud de cadena". Este error puede ocurrir durante el proceso particular de cálculo del radio equivalente por corona para conductor simple, a causa de una indeterminación matemática. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas promedio de las alturas de los conductores, flechas promedio y longitud de cadena.

P.- "Revisar coordenadas de altura, flecha promedio y radios de conductores". Este error puede suceder durante el proceso de cálculo de las impedancias características a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas promedio de altura de los conductores, flechas promedio y radios de conductores.

Q.- "Revisar datos de entrada". Este error ocurre a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar, en general, todos los valores de entrada introducidos.

R.- "Revisar coordenadas". Este error acontece a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas introducidas en la última ventana de datos además de las flechas promedio.

➤ Gráficos de sensibilidad

- ***Número de aisladores***

Este procedimiento de diseño está compuesto de dos ventanas principales: una de datos de entrada y otra de resultados.

En la ventana de datos de entrada, el usuario debe introducir los valores de los parámetros eléctricos correctamente, sólo números, pudiendo emplear del teclado el punto o la coma para

distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. También se debe establecer el formato de la gráfica (que se refiere al cuadrículado) y el modo de graficación para la curva (línea continua o escalera) seleccionando el botón de opción que represente a la característica de graficación deseada.

Las etiquetas de las características correspondientes al modo de graficación tienen enlaces que al ser ejecutados (haciéndole clic) presentan cuadros de mensaje con información breve respecto a dichas características.

Para ejecutar el cálculo y presentar los resultados, se hace clic en el botón “Graficar”:  de la ventana de datos. Asimismo, para cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

Una vez ejecutada la acción de graficar, aparecerá en pantalla una barra de progreso indicando el estado actual del proceso. Una vez terminado el proceso de graficación, se presenta la ventana de resultados, la cual muestra el gráfico obtenido. En esta ventana, pueden moverse las etiquetas correspondientes a la leyenda y al título del gráfico de sensibilidad, dando así la posibilidad de evitar que tapen la curva en pantalla y en papel impreso. Sólo se debe hacer clic encima de la etiqueta y luego moverla con el ratón a la posición deseada. Si se imprime la curva, el botón de “Cerrar”:  se oculta para no entorpecer la gráfica.

El rango de graficación está definido por el máximo y el mínimo valor del DESD encontrado de entre todos los valores de las curvas de tensión de resistencia – DESD (curvas de los fabricantes), los cuales definen parte de la configuración del programa.

Para cerrar la ventana de resultados y caer en la de datos, se hace clic en el botón “Cerrar”.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- "Error de introducción de datos". Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.

B.- "El valor del voltaje del sistema es inválido". El valor introducido de tensión de línea debe ser mayor o igual a 345 kV.

C.- "El valor no puede ser cero". Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.

- ***Tasas de salida***

Este procedimiento de diseño está compuesto de cinco ventanas principales: cuatro para los datos de entrada y otra para la visualización de los resultados.

En primer lugar, una vez cargada la primera ventana de datos, se debe escoger el tipo de curva deseado haciendo clic en el botón de opción correspondiente. Se pueden obtener los siguientes tipos de curvas:

A.- Tasa de salida por fallas de blindaje (SFO) - Longitud de cadena (LC).

B.- Tasa de salida por descargas retroactivas (BOR) - Longitud de cadena (LC).

C.- Tasa de salida por descargas retroactivas (BOR) - Resistencia de puesta a tierra (RPT).

Si se selecciona el tipo de curva **A** o el tipo de curva **B**, debe introducirse el intervalo o rango de graficación para la longitud de la cadena en metros. Pero si por el contrario se escoge el tipo de curva **C**, debe introducirse el rango de graficación para la resistencia de puesta a tierra en ohms.

En esta primera ventana también debe seleccionarse el formato deseado que refiere al cuadriculado de la gráfica, haciendo clic en el botón de opción de interés.

Para pasar a la segunda ventana, se hace clic en el botón “Siguiente”: . Asimismo, para cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

En la segunda ventana de datos, se debe seleccionar el tipo de torre considerado para el diseño haciendo clic sobre el recuadro respectivo o sobre el botón de opción que lo identifica. Una vez seleccionado el tipo de torre, debe seleccionarse la configuración de la cadena haciendo clic en el “ComboBox” destinado para ello, y luego haciendo clic en la configuración de la cadena deseada.

Para pasar a la tercera ventana, se hace clic en el botón “Siguiente”: . Asimismo, se puede retroceder a la ventana anterior haciendo clic en el botón “Atrás”: , y si se quiere cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

Ya cargada la tercera ventana de datos, el usuario debe introducir los valores correctamente, sólo números, pudiendo emplear del teclado el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. En el caso particular del N° de subconductores por fase, el usuario debe seleccionar el valor a través de un control “ComboBox”. Si se selecciona la unidad, el espacio correspondiente a la distancia entre subconductores de fase se deshabilita. Cabe señalar que si el tipo de curva seleccionado es el **C**, el espacio correspondiente a la resistencia de puesta a tierra en esta ventana también se deshabilita.

Para pasar a la última ventana de datos, se hace clic en el botón “Siguiente”: . Asimismo, se puede retroceder a la ventana anterior haciendo clic en el botón “Atrás”: , y si se quiere cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

En la cuarta ventana de datos, el usuario debe introducir los valores correctamente en los espacios habilitados, sólo números, pudiendo emplear el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan. La imagen de la torre en esta ventana proporciona el sistema de coordenadas al que el usuario debe hacer referencia para la introducción de los datos. En el caso particular del ángulo de fase, el usuario debe establecer los valores a través de los controles “ComboBox” asignados para ello. Cabe señalar que si el tipo de curva seleccionado es el **A** o el **B**, los espacios correspondientes a la longitud de la cadena en esta ventana se deshabilitan.

Para ejecutar el cálculo, se hace clic en el botón “Graficar”:  de esta cuarta ventana. Así mismo, se puede retroceder a la ventana anterior haciendo clic en el botón “Atrás”: , y si se quiere cerrar el procedimiento de diseño, se hace clic en el botón “Cerrar procedimiento actual”:  de la ventana.

Una vez ejecutada la acción de graficar, aparecerá en pantalla una barra de progreso indicando el estado actual del proceso. Una vez terminado el proceso de graficación, se presenta la ventana de resultados, la cual muestra el gráfico obtenido. En esta ventana, puede moverse la etiqueta correspondiente al título del gráfico de sensibilidad, dando así la posibilidad de evitar que tape la curva en pantalla y en papel impreso. Sólo se debe hacer clic encima de la etiqueta y luego moverla con el ratón a la posición deseada. Si se imprime la curva, el botón de “Cerrar”:  se oculta para no entorpecer la gráfica.

Para cerrar la ventana de resultados y caer en la última de los datos de entrada, se hace clic en el botón “Cerrar”.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- “Error de introducción de datos”. Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.

B.- “El valor no puede ser cero”. Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.

C.- “El valor mínimo debe ser menor al valor máximo”. Este error ocurre cuando el valor mínimo introducido en el intervalo de graficación resulta ser mayor al valor máximo.

D.- “Debe seleccionarse el tipo de torre antes de continuar”. Se refiere a que debe seleccionarse el tipo de torre antes de cargar la siguiente ventana.

E.- “El valor del voltaje del sistema es inválido”. El valor introducido de tensión de línea debe ser mayor o igual a 345 kV.

F.- "La secuencia definida por los ángulos de fase es inválida". Los valores de los ángulos de fase han sido seleccionados incorrectamente, estableciendo una secuencia inválida.

G.- "El valor de la coordenada en X del cable de guarda no puede ser mayor al valor respectivo del conductor de fase". Aplica en el caso de líneas de terna simple. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en X del cable de guarda y/o el valor respectivo del conductor de fase.

H.- "El valor de la coordenada en Y del cable de guarda debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase". Aplica en el caso de líneas de terna simple. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del cable de guarda y/o el valor respectivo del conductor de fase.

I.- "La altura promedio de la flecha debe ser menor que la altura promedio del conductor". Se debe corregir el valor introducido de la altura promedio de la flecha y/o el valor de la altura promedio del conductor.

J.- "El valor de la coordenada en X del cable de guarda no puede ser mayor al mayor valor respectivo de los conductores de fase". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en X del cable de guarda y/o el mayor valor respectivo de los conductores de fase.

K.- "El valor de la coordenada en Y del cable de guarda debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase C". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del cable de guarda y/o el valor respectivo del conductor de fase C'.

L.- "El valor de la coordenada en Y del conductor de fase C' debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase B". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del conductor de fase C' y/o el valor respectivo del conductor de fase B'.

M.- "El valor de la coordenada en Y del conductor de fase B' debe ser mayor al valor respectivo del conductor de fase A". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la coordenada en Y del conductor de fase B' y/o el valor respectivo del conductor de fase A'.

N.- "El valor de la distancia Ytm1 debe ser menor al de la distancia Ytm2". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor introducido de la distancia Ytm1 y/o el valor de la distancia Ytm2.

Ñ.- "El valor de la distancia Ytm2 debe ser menor al de la distancia Ytm3". Aplica en el caso de líneas doble circuito. Se debe corregir el valor de la distancia Ytm2 y/o el valor de la distancia Ytm3.

O.- "Revisar coordenadas de altura y flecha promedio". Este error ocurre a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas promedio de los conductores y flechas promedio.

P.- "Revisar coordenadas de altura, flecha promedio y longitud de cadena". Este error puede ocurrir durante el proceso particular de cálculo del radio equivalente por corona para conductor simple, a causa de una indeterminación matemática. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas promedio de las alturas de los conductores, flechas promedio y longitud de cadena.

Q.- "Revisar coordenadas de altura, flecha promedio y radios de conductores". Este error puede suceder durante el proceso de cálculo de las impedancias características a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas promedio de altura de los conductores, flechas promedio y radios de conductores.

R.- "Revisar datos de entrada". Este error ocurre a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar, en general, todos los valores de entrada introducidos.

S.- "Revisar coordenadas". Este error acontece a causa de indeterminaciones matemáticas. Se deben revisar los valores correspondientes a las coordenadas introducidas en la última ventana de datos además de las flechas promedio.

4.3.4. Configuración

CEALT 1.0 ofrece al usuario la posibilidad de establecer sus propios criterios para el cálculo de las distancias eléctricas y dimensionamiento, así como también los aisladores tipo considerados en este último procedimiento, a través de las ventanas respectivas que conforman la configuración del programa y que se describen con detalle en los puntos de la presente sección.

Para acceder a la ventana de la configuración correspondiente a los criterios de cálculo, se hace clic en el menú "Configuración" y luego en "Criterios de Cálculo".

Por otro lado, para acceder a la configuración correspondiente a las características de los aisladores tipo, se hace clic en el menú "Configuración" y luego en "Aisladores Tipo".

Ahora bien, si el usuario ha cambiado la configuración original del programa y desea restablecer esos valores de origen, sólo debe hacer clic en el menú "Configuración" y luego en "Restablecer Valores de Origen".

Por otra parte, al hacer clic en el botón:  de la barra de herramientas, se cargan una a la vez las dos opciones de configuración, cargándose primero la opción correspondiente a los criterios de cálculo.

No está demás señalar que las opciones de configuración, al igual que las de diseño, sólo se cargan una a la vez, es decir, no se pueden cargar simultáneamente.

➡ Criterios de cálculo

En la ventana de configuración para los criterios de cálculo el usuario debe introducir los valores correctamente en los espacios habilitados, sólo números, pudiendo emplear el punto o la coma para distinguir la parte decimal. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos en las unidades que se señalan.

Para cerrar esta ventana se hace clic en el botón “Cancelar”, y luego se confirma la acción en el cuadro de mensaje que a continuación se presenta en pantalla.

Ahora bien, al hacer clic en el botón “Valores Predeterminados” se cargan en la ventana los valores actualmente predeterminados, es decir, los valores de los criterios de cálculo que CEALT 1.0 emplea para los nuevos proyectos.

Por otro lado, al hacer clic en el botón “Valores de Usuario” se cargan en la ventana los valores de los criterios de cálculo que CEALT 1.0 emplea para el proyecto actual.

Inicialmente, los valores predeterminados coinciden con los valores de usuario y corresponden a los valores de origen.

Una vez llenados todos los espacios de la ventana, los nuevos valores pueden aplicarse sólo al proyecto actual si se le hace clic al botón “Aplicar”; o predeterminarse (para el proyecto actual y los nuevos proyectos) haciendo clic en el botón “Predeterminar” y luego confirmando la acción a través del cuadro de mensaje que se presenta.

Ya realizados los cambios deseados en los valores de los criterios de cálculo, se hace clic en el botón “Terminar” de la ventana.

Posibles errores que pueden presentarse:

A.- “Error de introducción de datos”. Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.

B.- “El valor no puede ser cero”. Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.

➡ Aisladores tipo

En la ventana inicial de la opción de configuración para los aisladores tipo, el usuario debe introducir los valores correctamente en los espacios habilitados, pudiendo emplear el punto o la coma para distinguir la parte decimal de los valores numéricos. Así mismo, se debe tener cuidado de introducir los datos numéricos en las unidades que se señalan. Es bueno indicar que en los espacios “Fabricante” y “Nº de catálogo”, CEALT 1.0 no guarda comillas ya que se emplean internamente en el proceso de guardado y podrían generarse errores.

Para cerrar esta ventana se hace clic en el botón “Cancelar”, y luego se confirma la acción a través del cuadro de mensaje que a continuación se presenta en pantalla.

Ahora bien, al hacer clic en el botón “Valores Predeterminados” se cargan en la ventana los valores actualmente predeterminados, es decir, las características de los aisladores tipo que CEALT 1.0 emplea para los nuevos proyectos.

Por otro lado, al hacer clic en el botón “Valores de Usuario” se cargan en la ventana las características de los aisladores tipo que CEALT 1.0 emplea para el proyecto actual.

Inicialmente, los valores predeterminados coinciden con los valores de usuario y corresponden a los valores de origen.

Una vez llenados todos los espacios de esta primera ventana, debe hacerse clic en el botón “Siguiente” para pasar a llenar los datos correspondientes a las curvas de la tensión de resistencia en función del DESD ante sobretensiones a frecuencia industrial y maniobra para cada aislador tipo.

Esta nueva ventana (ver figura 4.8) ofrece al usuario facilidades de edición para la introducción de los datos, las cuales están conformadas por los siguientes botones:

- A.- “Nº”:** Selecciona las 10 filas de valores introducidos en la tabla que se ven directamente en pantalla.
- B.- “S”:** Selecciona todas las filas de valores introducidos en la tabla.
- C.- “Copiar”:** Copia la selección actual.
- D.- “Pegar”:** Pega la selección copiada a partir de la posición actual del cursor en la tabla.

Adicionalmente, los botones ubicados a la izquierda de cada fila de la tabla seleccionan sus filas correspondientes al hacerles clic.

Los datos se introducen en la tabla por filas ordenadamente desde la primera celda a la izquierda. Luego, para pasar a la siguiente celda, se hace clic en ella o se oprime la tecla de movimiento hacia abajo o flecha hacia abajo: ↓. Una vez llenada una fila, debe pasarse a la siguiente para que se introduzcan correctamente los valores de dicha fila en la tabla.

Nº	DESD	Vwf	S

FIGURA 4.8. Ventana correspondiente a la configuración de las curvas

Ya para continuar, al hacer clic en el botón “Gráfico Predeterminado” se cargan en la tabla los valores del gráfico correspondiente actualmente predeterminado, es decir, la curva correspondiente de tensión de resistencia en función del DESD que CEALT 1.0 emplea para los nuevos proyectos.

Por otro lado, al hacer clic en el botón “Gráfico de Usuario” se cargan en la tabla los valores del gráfico correspondiente de la tensión de resistencia en función del DESD que CEALT 1.0 emplea para el proyecto actual.

Inicialmente, los valores del gráfico predeterminado coinciden con los valores del gráfico de usuario y corresponden a los valores de origen.

Ahora bien, si se desea anular el procedimiento de ajuste en la configuración de los valores asociados a los aisladores tipo, se debe hacer clic en el botón “Cancelar” y luego confirmar la acción a través del cuadro de mensaje que seguidamente se presenta en pantalla.

Ya introducidos en la tabla los valores correspondientes, se hace clic en el botón “Siguiente” de la ventana para luego introducir los valores de la siguiente curva. También, puede hacerse clic en el botón “Atrás” para regresar a la ventana anterior. Deben llenarse las 8 curvas que conforman las características tensión de resistencia – DESD.

Una vez introducidos los valores correspondientes a la última curva (que es la octava), se hace clic en el botón “Terminar” (que para las anteriores ventanas era el botón “Siguiente”) con lo que aparece de nuevo en pantalla la ventana inicial de este procedimiento configurativo.

Los nuevos valores pueden aplicarse sólo al proyecto actual si se le hace clic al botón “Aplicar”; o predeterminarse (para el proyecto actual y los nuevos proyectos) haciendo clic en el botón “Predeterminar” y luego confirmando la acción a través del cuadro de mensaje que se presenta.

Ya realizados los cambios deseados en las características de los aisladores tipo, se hace clic en el botón “Terminar” de la ventana.

Posibles errores que pueden presentarse:

- A.- "Error de introducción de datos". Ocurre cuando no se ha introducido el valor o cuando se ha introducido incorrectamente.
- B.- "El valor no puede ser cero". Se refiere a que el valor introducido no puede ser cero.
- C.- "Debe introducir fabricante y nº de catálogo". Sucede cuando no se ha introducido la información correspondiente al fabricante o número de catálogo.
- D.- "No se puede emplear el texto: \$EOM\$". En el espacio asignado a la información del fabricante y número de catálogo no se puede introducir el texto “\$EOM\$” por estar reservado para la operatividad del programa.
- E.- "Debe introducir al menos 2 filas de datos". El usuario debe introducir al menos un par de filas de datos para las curvas de la tensión de resistencia en función del DESD.
- F.- "Se han detectado valores repetidos para el DESD. Revisar datos seleccionados.". Este error ocurre cuando se ha introducido al menos dos filas idénticas de valores para las curvas de la tensión de resistencia en función del DESD. CEALT 1.0 señalará al usuario cuáles son esas filas para que éste corrija la situación.

➔ **Valores de origen**

Los valores de origen representan aquellos valores que CEALT 1.0 trae inicialmente como predeterminados en su configuración. Estos valores están descritos en el capítulo III, sección 3.1 (página 158).

Si el usuario decide restablecer la configuración original del programa, haciendo clic en el menú “Configuración” y luego en “Restablecer Valores de Origen” como ya se dijo, aparecerá en pantalla un cuadro con el siguiente mensaje: "¿Está seguro que desea restablecer los valores de origen? Este cambio afectará a los nuevos proyectos.". El usuario, entonces, podrá hacer clic en el botón “Sí” para confirmar la acción o en el botón “No” para cancelarla.

4.3.5. Manual

CEALT 1.0 ofrece al usuario la consulta de un manual a través de un vínculo preestablecido en un control auxiliar “Contenedor OLE”. El contenido de este manual es básicamente el contenido de la presente sección 4.3.

Para acceder al manual, se hace clic en el menú “Manual” y luego en “Manual del Usuario”; o alternativamente se hace clic en el botón:  de la barra de herramientas.

Adicionalmente, al hacer clic en el menú “Manual” y luego en “Acerca de CEALT 1.0”, se presentará en pantalla una ventana con información de interés acerca del programa. Ahora bien, al hacer clic en el botón “Info. del sistema...” de esta ventana, se presentará otra ventana en la que se mostrará con detalle la información actual del sistema en cuanto a los recursos de *hardware*, componentes y entorno de *software* entre otros. Para cerrar la ventana “Acerca de CEALT 1.0”, sólo se debe hacer clic en el botón “Cerrar”.

No está demás indicar que el usuario puede acceder a estas opciones del menú “Manual” en cualquier instante de la operación del programa.

4.4. VALIDACIÓN

Para validar el correcto funcionamiento del programa, se han empleado dos ejemplos para el cálculo eléctrico de líneas EHV.

El primer ejemplo desarrolla el cálculo eléctrico del aislamiento completo (incluyendo curvas de sensibilidad) para una línea de transmisión EHV, con los datos de entrada correspondientes a la línea existente de transmisión Guri – La Canoa – El Tigre a 400 kV de EDELCA (tomados del anexo A de la referencia #8), y cuyos principales resultados se obtuvieron a través del cálculo paso a paso en el apéndice C de este trabajo.

El segundo ejemplo desarrolla el cálculo eléctrico del aislamiento correspondiente a la verificación ante descargas atmosféricas (incluyendo curvas de sensibilidad para las tasas de salida) para una línea de transmisión EHV con los datos de entrada correspondientes a una línea doble circuito de 345 kV. Este ejemplo fue tomado del capítulo 12, sección 12.10 de la referencia # 10 del presente trabajo.

Finalmente, se encontraron acordes los resultados obtenidos a través de la herramienta computacional con los resultados esperados de cada ejemplo. Las tablas 4.1 y 4.2 presentan una

comparación entre los valores obtenidos por el programa y los valores esperados para cada ejemplo, incluyéndose el porcentaje de desviación entre estos valores.

Adicionalmente, se chequeó a través de inspecciones en el programa que los valores obtenidos de las variables involucradas en el cálculo que no se reflejan directamente en los resultados estuvieran acorde a los valores esperados.

A continuación, se presentan los reportes correspondientes a estos ejemplos, los cuales contienen la información de los datos y resultados de cada procedimiento de diseño; y por último, se presenta el reporte de la configuración del programa que se empleó para el cálculo, la cual corresponde a la original o la constituida por los valores predeterminados de origen.

TABLA 4.1. Comparación de resultados para el primer ejemplo de validación.

Procedimientos de Cálculo	Variables de Salida		Valor Obtenido CEALT	Valor Esperado	Porcentaje de Desviación
Dimensionamiento (DESD = 0.2 mg/cm ²)	Cadena de suspensión	Número de aisladores	23 Tipo B	23 Tipo B	0 %
		Longitud de cadena [m]	3.91	3.91	0 %
		Distancia de fuga [m]	12.65	12.65	0 %
	Cadena de amarre	Número de aisladores	28 Tipo D	28 Tipo D	0 %
		Longitud de cadena [m]	5.46	5.46	0 %
		Distancia de fuga [m]	12.88	12.88	0 %
Distancias mínimas a masa	Frecuencia Industrial	Fase externa [m]	0.67	0.67	0 %
		Fase central [m]	0.67	0.67	0 %
	Maniobra	Fase externa [m]	2.62	2.62	0 %
		Fase central [m]	2.79	2.79	0 %
Verificación ante descargas atmosféricas	Ángulo de blindaje efectivo [°]		25.15	25.16	0.04 %
	Ángulo de blindaje de la línea [°]		14.8	14.79	0.07 %
	Tasa de salida por fallas de		0	0	0 %

	blindaje - SFO [salidas/100km.año]			
	Tasa de salida por descargas retroactivas – BOR [salidas/100km.año]	0.220062	0.219830	0.11 %

TABLA 4.2. Comparación de resultados para el segundo ejemplo de validación.

Procedimientos de Cálculo	Variables de Salida	Valor Obtenido CEALT	Valor Esperado	Porcentaje de Desviación
Verificación ante descargas atmosféricas	Ángulo de blindaje efectivo [°]	6.56	6.45	1.71 %
	Ángulo de blindaje de la línea [°]	14.6	14.6	0 %
	Tasa de salida por fallas de blindaje - SFO [salidas/100km.año]	0.037666	0.038	0.88 %
	Tasa de salida por descargas retroactivas - BOR [salidas/100km.año]	1.092782	1.1	0.66 %

4.4.1. Primer ejemplo. Reportes

Dimensionamiento - CEALT 1.0

Voltaje Nominal [kV]	Máxima Sobretensión a Frecuencia Industrial [p.u.]	Máxima Sobretensión de Maniobra [p.u.]
400	1,1	2,1

Nivel de Contaminación DESD [mg/cm²] = 0,05

	Aislador Tipo	Número de Unidades F.I.	Número de Unidades Maniobra	Número de Unidades Definitivo	Longitud de Cadena [m]	Distancia de Fuga [m]
Cadena de Suspensión	A	23	25	25	4,25	9,25

Dimensionamiento Personalizado - CEALT 1.0

Voltaje Nominal [kV]	Máxima Sobretensión a Frecuencia Industrial [p.u.]	Máxima Sobretensión de Maniobra [p.u.]
400	1,1	2,1

Nivel de Contaminación DESD [mg/cm²] = 0,05

	Número de Unidades F.I.	Número de Unidades Maniobra	Número de Unidades Definitivo	Longitud de Cadena [m]	Distancia de Fuga [m]
Aislador Tipo A	23	25	25	4,25	9,25
Aislador Tipo B	16	18	18	3,06	9,9
Aislador Tipo C	19	20	20	3,9	9,2
Aislador Tipo D	19	20	20	3,9	9,2

Nivel de Contaminación DESD [mg/cm²] = 0,2

	Número de Unidades F.I.	Número de Unidades Maniobra	Número de Unidades Definitivo	Longitud de Cadena [m]	Distancia de Fuga [m]
Aislador Tipo A	32	35	35	5,95	12,95
Aislador Tipo B	22	23	23	3,91	12,65
Aislador Tipo C	26	28	28	5,46	12,88
Aislador Tipo D	26	28	28	5,46	12,88

Distancias Mínimas a Masa - CEALT 1.0

Número de circuitos:	1
Configuración de la cadena:	I-I
Voltaje nominal [kV]:	400
Máxima sobretensión a frecuencia industrial [p.u.]:	1,1
Sobretensión media de maniobra [p.u.]:	1,6902
Desviación estándar de la generación de sobretensiones de maniobra:	0,2162
Densidad relativa del aire:	0,9776
Humedad absoluta [gr/cm³]:	18,89
Velocidad promedio del viento de 5 minutos [km/h]:	45,73
A una altura de referencia [m]:	10
Velocidad máxima del viento de 5 minutos [km/h]:	91,45
A una altura de referencia [m]:	10
Diámetro del conductor [m]:	0,02959
Peso del conductor [kg/m]:	1,432
Flecha promedio del conductor [m]:	17,14
Altura promedio del conductor en la torre [m]:	27,31
Número total de torres:	450
Espesor de la torre [m]:	1
Relación vano medio / vano gravante:	1,2
Longitud de la cadena (sin herrajes) [m]:	3,57

Distancias Mínimas a Masa - CEALT 1.0

MANIOBRA		FRECUENCIA INDUSTRIAL	
	Fase Externa	Fase Central	
	Fase Externa	Fase Central	
Ángulo de Inclinación de Cadena [°]	16,55	16,55	30,72
Distancia Geométrica Mínima [m]	3,13	3,13	2,02
Tensión Disruptiva Crítica [kV]	990,13	990,13	372,97
Distancia Eléctrica Mínima [m]	2,62	2,79	0,67

Verificación ante Descargas Atmosféricas - CEALT 1.0

Número de circuitos:	1
Configuración de la cadena:	I-I-I
Voltaje nominal [kV]:	400
Nivel isocerámico (días de tormenta al año):	60
Resistencia de puesta a tierra [ohm]:	10
Distancia promedio del vano [m]:	420
Longitud de la Línea [km]:	187
Nº de subconductores por fase:	2
Distancia entre subconductores de fase [m]:	0,4
Flecha promedio del cable de guarda [m]:	13,71
Flecha promedio del conductor [m]:	17,14
Radio del conductor de fase [m]:	0,014795
Radio del cable de guarda [m]:	0,004355

Conductor Nº	Función	Coordenada Promedio en Torre [m]		Ángulo de Fase [°]	Longitud de Cadena o Distancia Mínima [m]
		X	Y		
1	Guarda	-6,3	34,11	---	---
2	Guarda	6,3	34,11	---	---
3	Fase A	-8,7	27,31	0	3,57
4	Fase B	0	27,31	-120	3,57
5	Fase C	8,7	27,31	120	3,57

Verificación ante Descargas Atmosféricas - CEALT 1.0

Ancho de la cintura de la torre:

$$Act [m] = 3$$

Distancia vertical del tope de la torre a ménsula:

$$Ytm [m] = 2,6$$

TASAS DE SALIDA:

Tasa de salida por fallas de apantallamiento:

$$SFO [\text{salidas}/100\text{km.año}] = 0$$

Tasa de salida por descargas retroactivas:

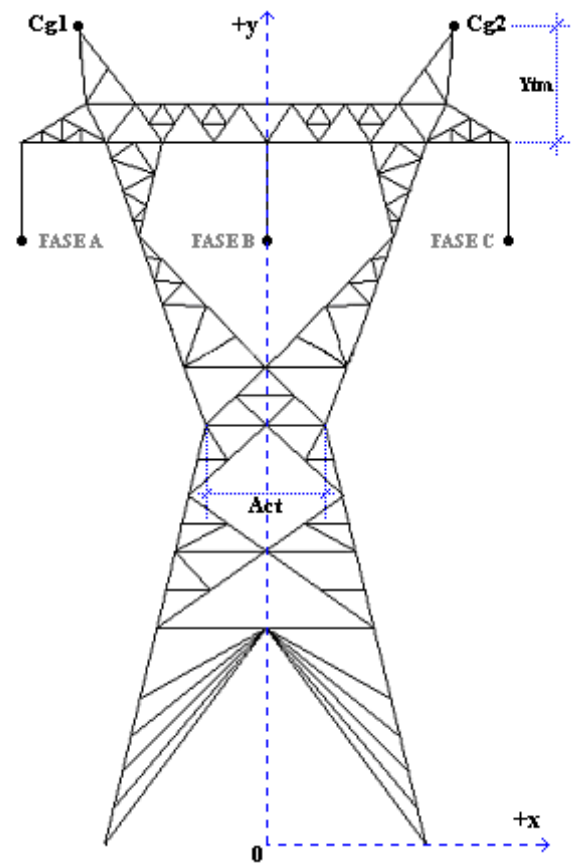
$$BOR [\text{salidas}/100\text{km.año}] = 0,220062$$

Tasa de salida total en salidas/100km.año:

$$TST [\text{salidas}/100\text{km.año}] = 0,220062$$

Tasa de salida total en salidas/año:

$$TSL [\text{salidas/año}] = 0,411516$$



Curvas de Sensibilidad - Número de Aisladores - CEALT

Voltaje Nominal [kV]	Máxima Sobretensión a Frecuencia Industrial [p.u.]	Máxima Sobretensión de Maniobra [p.u.]
400	1,1	2,1

- Modo de graficación:

Constante
- Formato:

Cuadrícula principal y secundaria
- Intervalo de graficación:

Definido por el mínimo y el máximo valor del DESD que presentan las curvas de los fabricantes: Voltaje de resistencia - DESD



Curvas de Sensibilidad - Tasas de Salida - CEALT 1.0

Número de circuitos:	1
Configuración de la cadena:	I-I-I
Voltaje nominal [kV]:	400
Nivel isocerámico (días de tormenta al año):	60
Resistencia de puesta a tierra [ohm]:	---
Distancia promedio del vano [m]:	420
Nº de subconductores por fase:	2
Distancia entre subconductores de fase [m]:	0,4
Flecha promedio del cable de guarda [m]:	13,71
Flecha promedio del conductor [m]:	17,14
Radio del conductor de fase [m]:	0,014795
Radio del cable de guarda [m]:	0,004355

COORDENADAS DE LOS CONDUCTORES

Conductor Nº	Función	Coordenada Promedio en Torre [m]		Ángulo de Fase [°]	Longitud de Cadena o Distancia Mínima [m]
		X	Y		
1	Guarda	-6,3	34,11	---	---
2	Guarda	6,3	34,11	---	---
3	Fase A	-8,7	27,31	0	3,57
4	Fase B	0	27,31	-120	3,57
5	Fase C	8,7	27,31	120	3,57

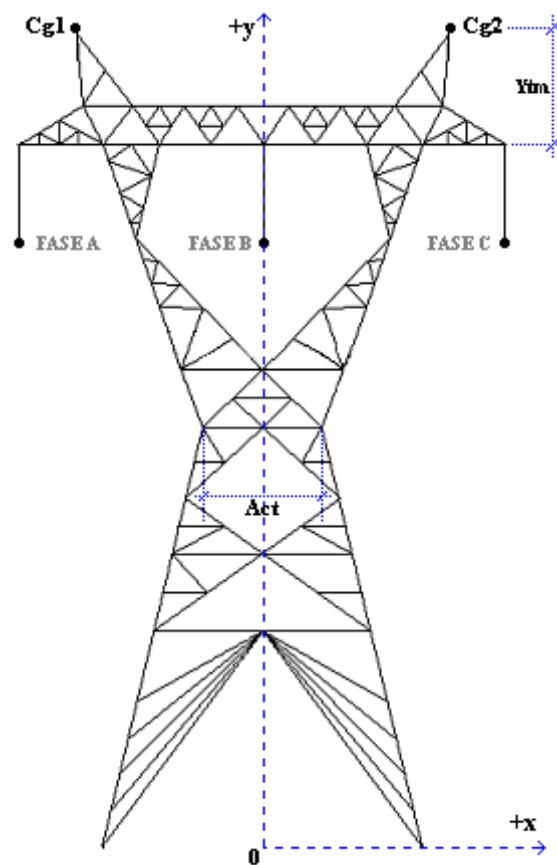
Curvas de Sensibilidad - Tasas de Salida - CEALT 1.0

Ancho de la cintura de la torre:

Act [m] = 3

Distancia vertical del tope de la torre a ménsula:

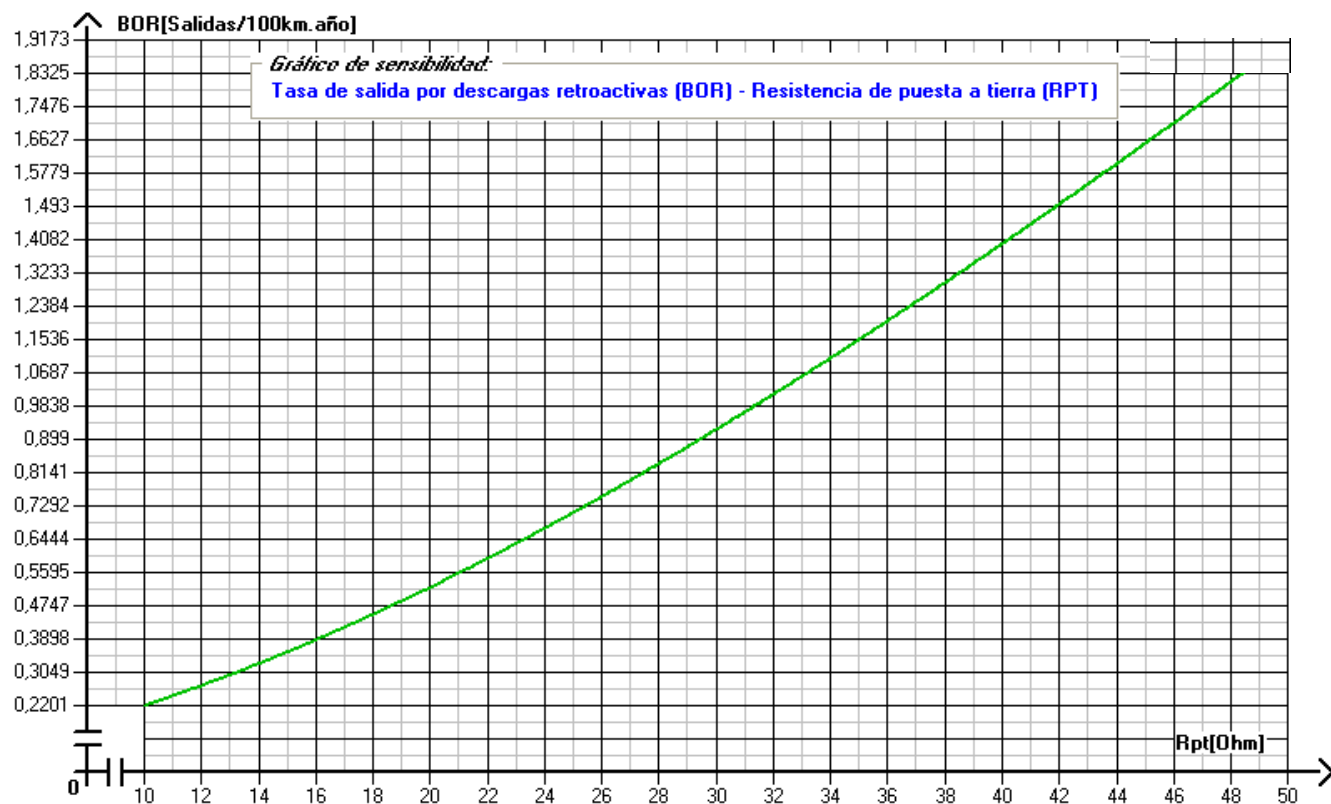
Ytm [m] = 2,6



Tipo de curva: BOR - Resistencia de puesta a tierra

Formato: Cuadrícula principal y secundaria

Intervalo de graficación: 10 ↔ 50 ohms



4.4.2. Segundo ejemplo. Reportes

Verificación ante Descargas Atmosféricas - CEALT 1.0

Número de circuitos:	2
Configuración de la cadena:	En l
Voltaje nominal [kV]:	345
Nivel isoceraúnico (días de tormenta al año):	30
Resistencia de puesta a tierra [ohm]:	20
Distancia promedio del vano [m]:	335
Longitud de la Línea [km]:	200
Nº de subconductores por fase:	2
Distancia entre subconductores de fase [m]:	0,457
Flecha promedio del cable de guarda [m]:	7
Flecha promedio del conductor [m]:	7
Radio del conductor de fase [m]:	0,0148
Radio del cable de guarda [m]:	0,0045

Verificación ante Descargas Atmosféricas - CEALT 1.0

Ancho de la base de la torre:

$$Abt [m] = 10$$

Distancias verticales del tope de la torre a ménsula:

$$Ytm1 [m] = 2,7$$

$$Ytm2 [m] = 9,3$$

$$Ytm3 [m] = 15,3$$

TASAS DE SALIDA:

Tasa de salida por fallas de apantallamiento:

$$SFO [\text{salidas}/100\text{km.año}] = 0,037666$$

Tasa de salida por descargas retroactivas:

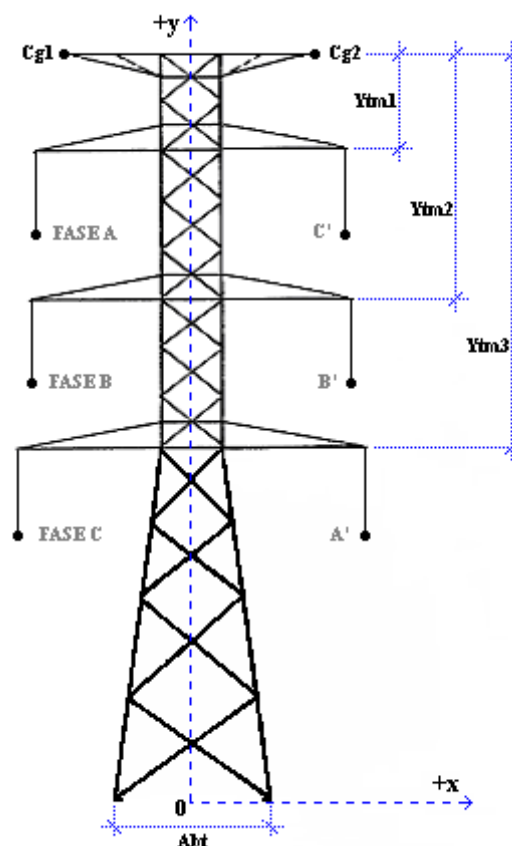
$$BOR [\text{salidas}/100\text{km.año}] = 1,092782$$

Tasa de salida total en salidas/100km.año:

$$TST [\text{salidas}/100\text{km.año}] = 1,130448$$

Tasa de salida total en salidas/año:

$$TSL [\text{salidas/año}] = 2,260897$$

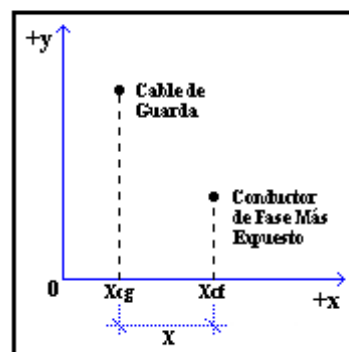


Máxima distancia horizontal que puede existir entre el cable de guarda y conductor de fase para obtener apantallamiento efectivo:

$$X [m] = 1,37$$

Conductor de fase más expuesto =

B' ó B



Curvas de Sensibilidad - Tasas de Salida - CEALT 1.0

Número de circuitos:	2
Configuración de la cadena:	En l
Voltaje nominal [kV]:	345
Nivel isocerámico (días de tormenta al año):	30
Resistencia de puesta a tierra [ohm]:	20
Distancia promedio del vano [m]:	335
Nº de subconductores por fase:	2
Distancia entre subconductores de fase [m]:	0,457
Flecha promedio del cable de guarda [m]:	7
Flecha promedio del conductor [m]:	7
Radio del conductor de fase [m]:	0,0148
Radio del cable de guarda [m]:	0,0045

COORDENADAS DE LOS CONDUCTORES

Conductor Nº	Función	Coordenada Promedio en Torre [m]		Ángulo de Fase [°]	Longitud de Cadena o Distancia Mínima [m]
		X	Y		
1	Guarda	-5,5	39,3	---	---
2	Guarda	5,5	39,3	---	---
3	Fase A	-5,5	33,8	0	---
4	Fase B	-8,6	27,4	-120	---
5	Fase C	-5,8	21,3	120	---
6	Fase C'	5,5	33,8	120	---
7	Fase B'	8,6	27,4	-120	---
8	Fase A'	5,8	21,3	0	---

Curvas de Sensibilidad - Tasas de Salida - CEALT 1.0

Ancho de la base de la torre:

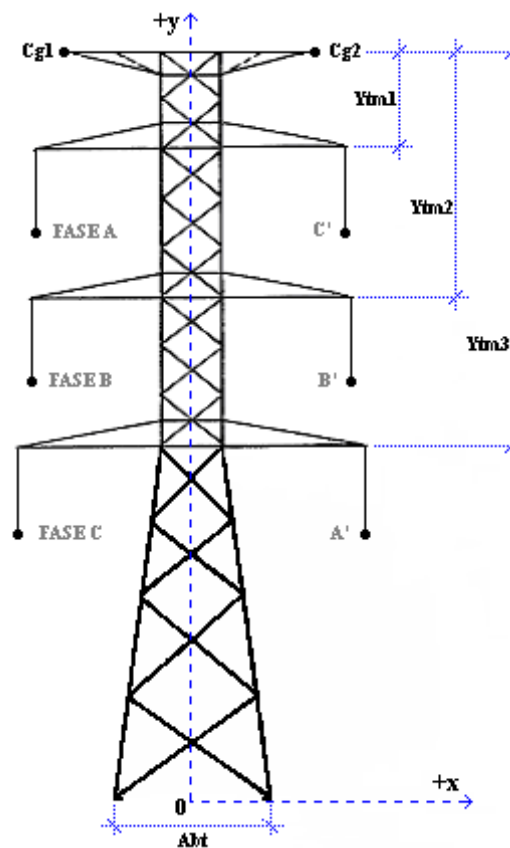
$Abt [m] = 10$

Distancias verticales del tope de la torre a ménsula:

$Ytm1 [m] = 2,7$

$Ytm2 [m] = 9,3$

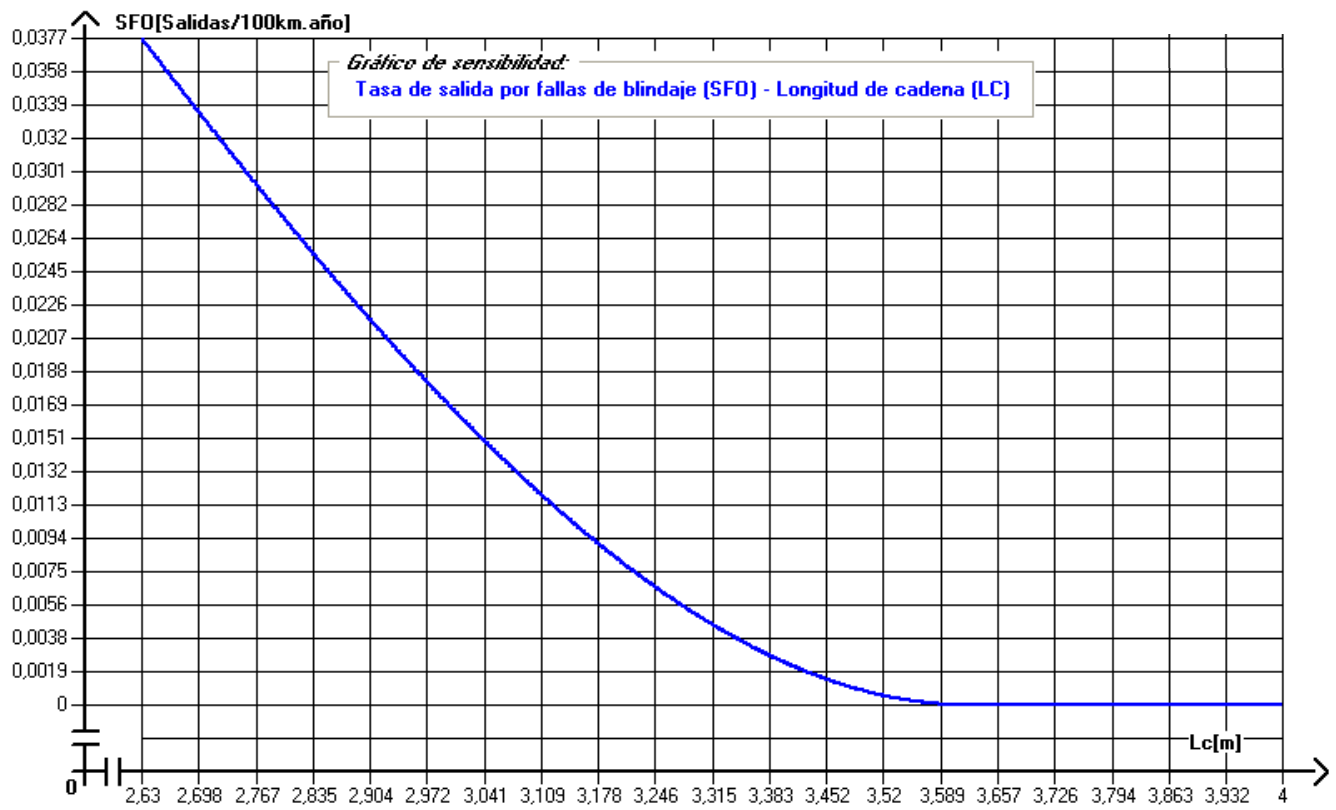
$Ytm3 [m] = 15,3$



Tipo de curva: SFO - Longitud de cadena

Formato: Cuadrícula principal

Intervalo de graficación: 2,63 $\leftrightarrow$ 4 metros



4.4.3. Reporte de la configuración del programa

Configuración - CEALT 1.0

CRITERIOS DE CÁLCULO

Máxima tensión de operación normal del sistema en por unidad [p.u.]:	1,05
Factor de seguridad:	1,1
Nº de desviaciones estándar en que el CFO se encuentra por encima de la máxima sobretensión:	3
Desviación estándar del aislamiento a frecuencia industrial normalizada con respecto al CFO:	0,02
Desviación estándar del aislamiento normalizada respecto al CFO a sobretensión de maniobra:	0,05
Porcentaje de torres consideradas sobre el total de torres [%]:	25
Máxima probabilidad de falla para el sistema:	0,001

AISLADORES TIPO

	Aislador Tipo A	Aislador Tipo B	Aislador Tipo C	Aislador Tipo D
Longitud [m]	0,17	0,17	0,195	0,195
Diámetro [m]	0,28	0,32	0,32	0,32
Distancia de fuga [m]	0,37	0,55	0,46	0,46
Carga Electro-mecánica [kN]	210	210	300	300
Fabricante	NGK	NGK	NGK	NGK
Nº Catálogo	CA-589	CA-845	CA-590	CA-590

CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este trabajo se ha dispuesto el cumplimiento de los objetivos inicialmente trazados; que junto al análisis respectivo, ha permitido la formulación puntual de las conclusiones derivadas de la culminación de la presente investigación.

De esta forma, se concluye lo siguiente:

➡ Los conceptos básicos asociados al aislamiento eléctrico se componen principalmente de la clasificación de las sustancias con respecto a su capacidad de conducir cargas, de donde se desprende un análisis molecular necesario para la explicación del fenómeno de la conducción eléctrica.

➡ La clasificación del aislamiento eléctrico puede realizarse de dos formas:

- De acuerdo al comportamiento del dieléctrico, lo cual resulta en dos tipos: aislamiento autorestable y no autorestable.
- En función del ambiente en el cual funciona: aislamiento interno y externo.

Así, y de acuerdo con este ordenamiento, se concluye que el aislamiento eléctrico de las líneas aéreas de transmisión es del tipo autorestable y externo.

➡ Los aisladores tienen como función sujetar mecánicamente los conductores a las estructuras que los soportan, asegurando el aislamiento eléctrico entre estas dos partes. Pueden agruparse en dos grandes grupos: cerámicos y no cerámicos; y a su vez, pueden clasificarse de acuerdo a la aplicación específica que se les designa.

➡ Los esfuerzos eléctricos que se consideran en el diseño del aislamiento son las sobretensiones a frecuencia industrial, las sobretensiones de maniobra, las sobretensiones atmosféricas y el voltaje del sistema.

➡ Los parámetros ambientales que afectan al aislamiento y que se ven involucrados en el cálculo por el programa son la velocidad del viento, la humedad, la densidad relativa del aire, la lluvia, el nivel isoceraúnico y el nivel de contaminación.

➤ Las experiencias de operación de varias empresas foráneas, en cuanto al uso de aisladores poliméricos, han permitido concluir que los aisladores de goma de silicona mejoran, en términos generales, el desempeño del aislamiento en las líneas de transmisión de alta y extra alta tensión.

➤ Las experiencias de operación de líneas EHV en Venezuela, en cuanto al desempeño del aislamiento, sugieren realizar estudios preliminares acerca del nivel de contaminación existente en aquellas zonas donde no se conozca, para de esta forma gozar de un valor confiable y veraz del grado de contaminación para su posterior consideración en el diseño de líneas.

➤ La metodología de cálculo empleada para la programación, principalmente es la presentada y recomendada por el Instituto de Investigación de Potencia Eléctrica (EPRI), además de algunas consideraciones hechas por la empresa C.V.G. EDELCA. En cuanto al dimensionamiento del aislamiento, se puso en práctica las recomendaciones hechas por el fabricante NGK del Japón.

➤ El entorno de programación *Microsoft Visual Basic*, versión 6.0 - edición empresarial, fue el escogido para la elaboración de la herramienta computacional.

➤ El programa diseñado; CEALT 1.0, permite realizar todos los cálculos necesarios para la obtención de los parámetros que caracterizan el aislamiento eléctrico de líneas aéreas de transmisión de extra y ultra alto voltaje. Adicionalmente, presenta los siguientes atributos:

- Impresión de la configuración del programa, además de todos los datos y resultados.
- Acceso al cambio de valores de los parámetros predeterminados (cambio en la configuración del programa) con la posibilidad de restablecer los valores de origen.
- Acceso o guardado de proyectos en archivos.
- Detección de errores a través de procedimientos automáticos.
- Posibilidad de ejecutar diseños personalizados.
- Generación de gráficos de sensibilidad.

RECOMENDACIONES

A continuación se presenta una serie de recomendaciones en relación al diseño eléctrico del aislamiento de una línea de transmisión y la selección definitiva de los parámetros que lo caracterizan.

- ➡ Utilizar la herramienta computacional desarrollada para el cálculo eléctrico del aislamiento puesto que los resultados obtenidos a través de ésta (con los ejemplos oportunamente señalados) se encuentran acorde a los valores esperados.
- ➡ Ajustar la configuración del programa para aquellos valores que el ingeniero proyectista considere idóneos, de acuerdo a sus lineamientos y experiencia propia o de la organización a la cual perteneciera.
- ➡ Emplear los procedimientos correspondientes a la generación de gráficos de sensibilidad como herramienta para el análisis de la selección definitiva de los parámetros eléctricos del aislamiento.
- ➡ Incluir la posibilidad de emplear aisladores poliméricos de goma de silicón para las líneas EHV en aquellas áreas donde se presenten niveles fuertes de contaminación por su comprobado buen desempeño ante estas circunstancias, toda vez que presenten valores mayores o iguales que los obtenidos para la longitud de cadena y distancia de fuga, además de que se respeten las distancias mínimas eléctricas a masa.
- ➡ Realizar un análisis técnico – económico con los resultados del diseño del aislamiento para establecer una óptima evaluación; esto es, hacer un balance entre el costo de inversión y nivel de aislamiento para la determinación de un adecuado compromiso técnico – económico.
- ➡ Comparar los resultados obtenidos para las cadenas de aisladores con las cadenas existentes de aquellas líneas que presenten condiciones y características similares a la línea de transmisión bajo estudio; esto con el objetivo de analizar la posibilidad de adoptar las características de esas cadenas existentes para la nueva línea en aras de aminorar costos siempre y cuando sea comprobable el buen desempeño y confiabilidad de dichas cadenas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALMIRALL M., Juan. **Técnicas de Alto Voltaje**. La Habana, 1984.
2. AVRIL, Charles. **Construcción de Líneas Aéreas de Alta Tensión**. Francia, 1985.
3. BURHAM J.. **Silicon Rubber Insulators Improve Transmission Line Performance**. Artículo publicado en la revista “*Transmission & Distribution*”. USA, 1992.
4. CENTENO, Alejandro. **Diseño de una Herramienta Computacional para el Cálculo de Flujo de Carga (AC) en Sistemas Eléctricos de Potencia**. Universidad de Carabobo. Valencia, 2002.
5. CHARTE O., Francisco. **Visual Basic 6**. Ediciones Anaya Multimedia, S.A.. Madrid, 1999.
6. CHÁVEZ F., José L.. **Aisladores no Cerámicos para Líneas de Transmisión**. Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). México, 1999.
7. CHECA, Luis M.. **Líneas de Transporte de Energía**. Tercera Edición. Editorial Alfaomega Marcombo. Colombia, 2000.
8. C.V.G. EDELCA. **Informe de Referencia para el Aislamiento en Líneas Aéreas de Transmisión de EDELCA de Alto y Extra Alto Voltaje**. Caracas, 2003.
9. Electrical World. **Eliminado el Lavado de Aisladores en Áreas Contaminadas**. Traducción al español del original en inglés. Septiembre, 1990.
10. Electric Power Research Institute (EPRI). **Transmission Line Reference Book 345 kV and Above**. Segunda Edición. California, 1982.
11. ESINCA S.A.. **Diseño de Aislación por Tensión a Frecuencia Industrial para Líneas de Extra Alto Voltaje (EHV)**. III Jornadas Nacionales de Potencia. Maracaibo, 1982.
12. ESINCA S.A.. **Criterios y Parámetros de Diseño de aislamiento para Líneas de Extra Alto Voltaje**. III Jornadas Nacionales de Potencia. Maracaibo, 1982.
13. ESINCA S.A.. **Diseño de Aislación por Sobretensiones de Maniobra para Líneas de Extra Alto Voltaje**. III Jornadas Nacionales de Potencia. Maracaibo, 1982.
14. GASSÁN, Alexis y Pedro Soteldo. **Evaluación Energética Integral de la Planta de Amoníaco en el Complejo Morón de PDVSA PEQUIVEN**. Universidad de Carabobo. Valencia, 2000.
15. GONZÁLEZ, Marleni y Carlos Jiménez. **Normas Para la Elaboración y Presentación del Trabajo Especial de Grado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica**. Universidad de Carabobo. Valencia, 1999.

16. GORUR, Ravi. **The Shape Aspect of Composite Polymer Insulators**. INMR. USA, 2001.
17. HALLIDAY, David; Robert Resnick y Krane Kenneth. **Física**. Volumen 2. Tercera Edición en Español. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.. México, 1999.
18. HAYT, William H.. **Teoría Electromagnética**. Quinta Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 1995.
19. HERNÁNDEZ, Oscar. **Criterios de Selección y Pruebas de Aisladores para Líneas Aéreas de Transmisión de Alta y Extra Alta Tensión**. Universidad de Carabobo. Valencia, 1992.
20. HERRERA G., Xavier. **Integral de Riemann y Series Infinitas**. Universidad de Carabobo. Valencia, 1974.
21. Insulator News & Market Report. **New Los Angeles Transmission Project Gose Entirely to Silicone Insulators**. USA, 1994.
22. Insulator News & Market Report. **New Transmission Line Sees Interesting Decision Making for Insulators**. USA, 1994.
23. International Electrotechnical Commission (IEC). **Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to Be Used on A.C. Systems**. Norma No. 60507. Segunda Edición. Génova, 1991.
24. International Electrotechnical Commission (IEC). **Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions, Publication 815**. Primera Edición. Génova, 1986.
25. International Electrotechnical Commission (IEC). **Insulation Co-ordination, Part 1: Definitions, Principles and Rules**. Norma N° 71-1. Séptima Edición. Génova, 1993.
26. MacLean Power System a MacLean-Fogg Company. **Aisladores y Herrajes para Líneas Aéreas de Transmisión y Distribución**. USA, 1996.
27. NGK Insulators, LTD. **List of Documents (No.TN-POL-VER.3)**. Japón, 1994.
28. NGK Insulators, LTD. **Report on Design of 800 kV Trasmision Line in Venezuela**. Tercer Reporte. Japón, 1978.
29. NGK Insulators, LTD. **Technical Guide Cat.No.91R**. Japón.
30. OLIVEIRA, Joaquín y José Pardiñas. **Experience at Venezuelan Utility with Ceramic and Non-Ceramic Insulators**. INMR. Barcelona, 1999.
31. OREGON Graduate Institute of Science & Technology. **Non-Ceramic Insulators. Applications. Design. Testing and Analysis**. Oregon, 1995.
32. Raga, José. **Transmisión de Energía II**. Universidad de Carabobo. Valencia.

33. Reliable Power Products, A MacLean-Fogg Company. **Guía de Aplicación de Aisladores Poliméricos de Suspensión para Líneas Aéreas de Transmisión y Distribución**. USA, 1995.
34. SEDIVER. **Armoursil Hollow Composite Insulators**. Francia.
35. SEDIVER. **Comparison of the Behaviour of Porcelain Long Rod Insulator and Cap and Pin Insulator**. Francia, 1998.
36. SEDIVER. **Performance of Sediver Cap and Pin Toughened Glass Insulators Versus Cap and Pin and Long Rod Porcelain Insulators**. Francia.
37. SEDIVER. Nota 504.RP-DD.98/mam. **Porcelain Long Rod Insulators**. Francia, 1998.
38. SERWAY, Raymond y Robert Beichner. **Física – Para Ciencias e Ingeniería**. Quinta Edición. Editorial McGraw-Hill. México D.F., 2001.
39. SEVEREYN, Ilwin G. **Diseño de Líneas de Transmisión para Zonas de Extremas Condiciones Ambientales**. III Jornadas Nacionales de Potencia. Maracaibo, 1982.
40. SIEGERT C., Luis A.. **Aisladores**. C. A. La Electricidad de Caracas. Caracas, 1974.
41. SIEGERT C., Luis A.. **Alta Tensión y Sistemas de Transmisión**. Editorial Limusa. México D.F., 1998.
42. SIELECTRIC C.A.. **Nivel Isoceráunico, Estudio Preliminar**. Caracas, 1988.
43. SMITH, Eric; Valor Whisler, y Marquis Hank. **El Libro de Visual Basic 6**. Ediciones Anaya Multimedia, S.A.. Madrid, 1999.
44. SOTELDO H., Pedro J.. **Desarrollo de Algunos Métodos Prácticos para Resolver Ecuaciones No Lineales para Mini – Calculadoras**. Universidad de Carabobo. Valencia, 1982.
45. STEVENSON, William D. **Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia**. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 1979.
46. TRADIS C.A., Grupo Tradis. **Guía para el Diseño de Aisladores Poliméricos RODURFLEX® (LAPP Insulator GmbH)**. Caracas.
47. TRADIS C.A., Grupo Tradis. **Recomendaciones Técnicas para el Diseño Eléctrico y la Aplicación de Aisladores Compuestos RODURFLEX® en Líneas de Transmisión Aéreas**. Caracas.
48. Universidad Autónoma de Nuevo León FIME-DIE. **Evaluación Integral del Ángulo de Blindaje en Líneas de Transmisión**. Reporte de Avance. 2000.

49. **Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE.** A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, Vol. PAS-104, No. 4. **USA, 198.**