



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis en la selección de aisladores para una línea de transmisión

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Carlos Augusto Morales Crespo

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jorge Velázquez Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por inculcarme el valor del estudio e impulsarme a superarme cada día más como profesional y como ser humano, además de, su apoyo en todas mis decisiones y por estar ahí en todo momento.

A mis hermanas Vania y Miriam, por su apoyo incondicional en todo momento, en cada decisión en cada paso siempre han estado ahí, especial agradecimiento a Miriam por financiar mis estudios, por toda la paciencia y comprensión.

A mis amigos, por hacer más amenos los momentos difíciles.

A la UNAM, por todo lo que me ofreció como la gran institución que es, grandes profesores, grandes compañeros, instalaciones, valores y conocimiento.

Agradecimiento especial al Ing. Jorge Velázquez Ramírez, mi director de tesis por su asesoría y dirección a lo largo del desarrollo de todo este trabajo.

Índice

Introducción.....	1
Objetivo.....	2
Planteamiento del problema.....	2
Metodología	2
Capítulo I. Aisladores, definición y clasificaciones	3
1.1 ¿Qué son los aisladores y para qué sirven?	3
1.2 Tipos de aisladores y sus características	4
1.3 Materiales	5
1.3.1 Aisladores de porcelana.....	5
1.3.2 Aisladores de vidrio templado.....	6
1.3.3 Aisladores sintéticos.....	6
1.4 Cadenas de aisladores.....	7
1.4.1 Conjunto en suspensión	8
1.4.2 Cadenas en “I”	8
1.4.3 Cadenas en “V”.....	10
1.4.4 Conjunto en tensión	11
1.4.5 Herrajes y conectores	12
1.4.6 Diseño	15
Capítulo II. Pruebas importantes a los aisladores.....	17
2.1 Pruebas prototipo.....	17
2.2 Pruebas de Aceptación	20
2.3 Pruebas de rutina o pruebas FAT	21
Capítulo III. Coordinación de aislamiento.....	23
3.1 Definiciones	23
3.2 Descripción del método.....	28
3.3 Parámetros de diseño □.....	29
3.3.1 Tensión y niveles de aislamiento.....	29
3.3.2 Altitud.....	31

3.3.3 Niveles de contaminación.....	32
3.3.4 Distancias de aislamiento en aire	34
3.4 Aplicación del método.....	38
3.4.1 Línea de transmisión 1, Torreón	38
3.4.2 Línea de transmisión 2, Coatzacoalcos	40
3.4.3 Línea de transmisión 3, Zumpango	41
3.5 Selección de aisladores y herrajes	45
3.5.1 Línea de transmisión 1, Torreón	47
3.5.2 Línea de transmisión 2, Coatzacoalcos	52
3.5.3 Línea de transmisión 3, Zumpango	55
3.6 Protección para aisladores	62
Capítulo IV. Conclusiones.....	64
Anexo.....	66
Bibliografía y referencias	68

Introducción

Las líneas de transmisión son elementos de suma importancia en los sistemas eléctricos de potencia ya que a través de ellas se transporta la energía que llegará al usuario final, sean estos, industrias, residencias, etc.

Uno de los dispositivos que se utilizan en el montaje electromecánico de las líneas de transmisión y que fungen como elementos de seguridad y sujeción mecánica son los aisladores y de su correcta selección depende también el correcto funcionamiento de una línea de transmisión. Precisamente en esto último se enfoca el desarrollo de este trabajo escrito, de la correcta selección de aisladores tomando en cuenta los diversos factores eléctricos, ambientales y materiales de fabricación.

A lo largo de los cuatro capítulos que componen este trabajo se trata de dejar claro el procedimiento de selección de los aisladores haciendo uso de normas y especificaciones de la CFE, comenzando con:

Capítulo I, se expone qué son los aisladores y cuál es su uso dentro de los sistemas eléctricos de potencia, además de mencionar los materiales comunes de fabricación y arreglos de aisladores.

Capítulo II, se hace mención de las pruebas de laboratorio que se realizan comúnmente a estos dispositivos con el fin de poner a prueba su efectividad y correcto funcionamiento.

Capítulo III, se explica de manera breve el procedimiento de coordinación de aislamiento usado para seleccionar aisladores y se exponen tres casos prácticos donde se hacen uso de los diferentes factores de corrección que a su vez dependen de factores eléctricos y ambientales, por último, se describe el procedimiento para la selección de los herrajes correspondientes a estos aisladores y se proponen arreglos según cada caso.

Capítulo IV, se exponen las conclusiones derivadas del trabajo ejecutado en los capítulos anteriores.

Objetivo

Realizar un análisis y selección de aisladores para líneas de transmisión según su categoría y tomando en cuenta los materiales de fabricación de éstos, parámetros eléctricos y atmosféricos del sitio. Finalmente, proponer el tipo de aislador según sea el caso, arreglos y herrajes.

Planteamiento del problema

Cuando se instala una línea de transmisión de energía eléctrica se deben de llevar a cabo diferentes procedimientos para que esta opere de manera normal y segura, uno de ellos es la correcta selección de los aisladores que soportaran los conductores y aislaran a las estructuras de la tensión que circula a través de los mismos. Debido a que esta selección se ve afectada por varios factores tanto electromecánicos como ambientales, es necesario realizar un análisis que permita concluir que tipo de aisladores y material de fabricación es el correcto o recomendable para usar.

Metodología

Para llevar a cabo este análisis se tomarán en cuenta los diferentes tipos de material del que están hechos los aisladores y las características que poseen dichos materiales desde un punto de vista eléctrico y mecánico. Además, se hará uso de los procedimientos descritos por normas y especificaciones de CFE (los cuales son compatibles con normas internacionales) para llevar a cabo la coordinación de aislamiento, procedimiento que, permitirá seleccionar los aisladores con base en las distancias mínimas dieléctricas para posteriormente referirse a especificaciones y así determinar tipo, características y número de aisladores según sea el caso. Finalmente se concluirá que tipo de aisladores y sus respectivos herrajes se recomiendan de acuerdo al análisis y cálculos realizados.

Capítulo I. Aisladores, definición y clasificaciones

1.1 ¿Qué son los aisladores y para qué sirven?

Las líneas de transmisión de energía eléctrica se componen de varios elementos además de las estructuras y conductores, siendo estos los que se distinguen a simple vista. Debido al uso común de conductores desnudos en líneas de transmisión aéreas es necesario el uso de aisladores y el apropiado cálculo y dimensionamiento de estos.

Los aisladores son componentes que bajo ciertos requerimientos eléctricos y un nivel de tensión de operación, deben soportar sobretensiones provocadas por descargas atmosféricas o por maniobras evitando que se forme lo que se conoce como "*arco eléctrico*". Por otro lado, estos elementos deben ser igualmente resistentes a los esfuerzos mecánicos a los que son sometidos a causa de viento, la nieve y el hielo sobre el cable conductor.

La correcta operación de estos dispositivos (y de la misma línea de transmisión) depende de la correcta selección del tipo de aislador y de la cantidad necesaria, según los parámetros de diseño, a este estudio se le conoce como *Coordinación de Aislamiento* y se hablará de este en temas posteriores.

Para la selección del tipo de aislador es importante considerar algunos factores como:

- Tensiones máxima y nominal
- Nivel de contaminación de la zona
- Altitud
- Problemas de vandalismo
- Fauna aérea

En cuanto al número para generar una cadena de aisladores se consideran factores como:

- Tensión máxima
- Distancia de fuga
- Distancia entre fases
- Tipo o arreglo de la estructura a utilizar.

Adicionalmente, cabe destacar que, los elementos utilizados para lograr la correcta sujeción de las cadenas de aisladores a los conductores y a las estructuras se conocen como *herrajes y conectores*.

1.2 Tipos de aisladores y sus características

Los aisladores utilizados en líneas de transmisión pueden clasificarse en dos tipos principales de acuerdo con su forma:

1) Tipo poste



Figura 1. Aisladores tipo poste comerciales

El aislador tipo poste (*Figura 1*) es instalado de forma vertical o casi vertical, aunque también en ocasiones puede ser en posición horizontal, el soporte mecánico lo proporciona el núcleo de acero.

Las cargas verticales crean una tensión de compresión en la porcelana entre los conductores y el núcleo (o espiga) interior de acero.

2) Tipo suspensión

Los aisladores tipo suspensión (*Figura 1.1*) tienen forma de disco y sus partes de acero permiten el anclaje de estos a la estructura y entre sí mismos para formar cadenas. Este tipo de dispositivo es el más frecuentes de encontrar en líneas de transmisión debido a que su resistencia mecánica es más grande al momento de formar cadenas y soportan cargas mucho más pesadas y también voltajes de operación más altos, pueden estar hechos de vidrio templado, materiales sintéticos (poliméricos) o también porcelana.



Figura 1.1 Aislador tipo suspensión de vidrio templado

Cabe destacar que estos dos tipos de aisladores descritos suelen utilizarse en los postes y estructuras para líneas de transmisión y subtransmisión aunque también es posible encontrar los del primer tipo en líneas de distribución.

Además de los anteriores se tiene el aislador tipo columna, el cual, es usado como soporte para equipo eléctrico para aislar las partes vivas correspondientes a los cables y el equipo en sí de las partes conectadas a tierra.

1.3 Materiales

La fabricación de aisladores es más variada hoy en día en cuanto al material empleado, desde hace muchos años se utiliza la porcelana y el vidrio templado como los materiales predominantes en el mercado, sin embargo, actualmente se están desarrollando nuevos materiales sintéticos entre los cuales se encuentran; las resinas epóxicas, fibra de vidrio, materiales poliméricos, etc.

De este modo se puede decir que estos accesorios también se pueden clasificar por el tipo de material del que están compuestos (ver *Figura 1.2*).

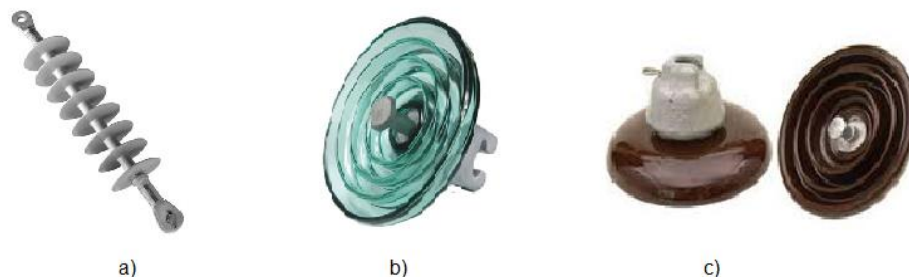


Figura 1.2 a) Aislador sintético, b) Aislador de vidrio templado, c) Aislador de porcelana

1.3.1 Aisladores de porcelana

La porcelana está constituida por arcilla blanca, feldespato en polvo y sílice. Este material tiene una mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos y a los cambios bruscos de temperatura (en comparación con el vidrio), además, un alto valor de aislamiento y el acabado o el esbozo tiene un esmaltado externo que protege de los golpes y dificulta la acumulación de polvo y humedad. Sus características negativas son que suelen ser pesados y tienen tendencia a la fragmentación bajo estrés.

Dependiendo de cómo se fabriquen los aisladores, la resistencia a la tracción de la porcelana puede variar de 2000 a 9000 lb_f/in^2 (140.61 a 632.76 kg_f/cm^2 , en el SI), y las resistencias mínimas de compresión correspondientes, de 15,000 a 60,000 lb_f/in^2 (1054.60 a 4218.60 kg_f/cm^2 , en el SI); su coeficiente de expansión puede ser

tan bajo como 16.6×10^{-6} en cada grado Fahrenheit, o 30×10^{-6} en cada grado Celsius. (Pansini, 2007)^[1]

La normativa internacional se puede encontrar en el documento de la IEC (International Electrotechnical Commission) titulado *IEC 60672: ceramic and glass insulating materials*, además, en México, la CFE (Comisión Federal de Electricidad) establece los requerimientos fundamentales en la especificación *CFE 52210-02: aisladores tipo suspensión de porcelana y vidrio templado*.

1.3.2 Aisladores de vidrio templado

El vidrio templado se utiliza, principalmente, para fabricar aisladores tipo suspensión. Son más económicos en comparación con los de porcelana, sin embargo, poseen una menor resistencia mecánica, comparada con la porcelana, al impacto y tienen un alto coeficiente de expansión, por estas razones el uso de este tipo de material se podría ver limitado principalmente para líneas de transmisión con un bajo nivel de contaminación de la zona y que no presenten problemas de vandalismo.

Por otra parte, las propiedades dieléctricas pueden variar dependiendo del tratamiento empleado. En cuanto a su resistencia a la tracción es generalmente inferior a $10,000 \text{ lb / in}^2$ (703.06 kgf/cm^2); su resistencia mínima a la compresión es $50,000 \text{ lb / in}^2$ (3515.34 kgf/cm^2); su módulo de elasticidad es $10,000,000 \text{ lb/in}^2$ (703069 kgf/cm^2); y su coeficiente de expansión es de 400 a 600×10^{-6} en cada grado Fahrenheit, o 720 a 1080×10^{-6} en cada grado Celsius. Pyrex, una forma de vidrio, supera parcialmente las dos deficiencias relacionadas con los cambios de choque y temperatura, pero su costo relativamente alto restringe su aplicación generalmente en las líneas de transmisión de alta tensión. (Pansini, 2007)

La normativa internacional y nacional es la misma de la que se habló en el apartado anterior con relación a la porcelana.

1.3.3 Aisladores sintéticos

Los aisladores fabricados de materiales sintéticos o mejor conocidos como aisladores poliméricos han resultado ser mejores de cierta forma en comparación con los dispositivos fabricados de los dos materiales antes expuestos. Este material resulta ser una buena opción para su uso en líneas de transmisión debido a que presenta un valor de aislamiento igualmente alto que el de la porcelana (o más alto) pero es más ligero y flexible que los otros materiales, además, posee una alta resistencia a la radiación ultravioleta, es menos propenso a sufrir daños o

^[1] Electrical Distribution Engineering, Anthony J. Pansini, Ed. The Fairmont Press, 3a Edición, 2007, EUA, pg. 558.

destrucción a causa del vandalismo y puede operar en un ambiente con alto nivel de contaminación.

El aislamiento de polímero es fuerte mecánicamente hablando ya que se le adiciona un núcleo reforzado con fibra de vidrio alrededor del cual se fija el aislamiento del polímero en forma de faldón, estos faldones proporcionan (de igual forma que los aisladores de vidrio y porcelana) una mayor trayectoria de fuga entre los conductores energizados y las estructuras de soporte. Los faldones son fabricados de materiales como resina epóxica, politetrafluoretileno (PTFE, polímero similar al polietileno), hule de etileno-propileno (EPR) o hule de silicón.

En cuanto a su comparativo económico, suelen ser ligeramente más caros que los de porcelana, aunque se pueden encontrar a precios muy competitivos con relación al otro material.

La normativa internacional se encuentra en el mismo documento de IEC, descrito en los aisladores de porcelana, por otro lado, la CFE en México establece los requerimientos necesarios en la especificación "*CFE-52210-47: aisladores sintéticos para líneas aéreas en tensiones de 161 kV hasta 400 kV*".

1.4 Cadenas de aisladores

Los aisladores tipo suspensión se utilizan para formar cadenas en líneas de transmisión de alto y extra alto voltaje, estos cuentan con piezas en los extremos que les permiten acoplarse entre sí (herrajes), las cuales generalmente son de algún tipo de metal o aleación de hierro. Las características y arreglos de las cadenas de aisladores dependen de factores como: su capacidad mecánica, condiciones climatológicas (contaminación, lluvia, hielo), problemas de vandalismo, tensiones de aguante y tensiones de operación, el número de discos (aisladores) que conformarán una cadena se determina en el estudio de *Coordinación de aislamiento*, donde, con base en las distancias mínimas dieléctricas obtenidas se determina esta cantidad.

Adicionalmente estas cadenas pueden estar en un arreglo dependiendo de la configuración de las estructuras y más que nada de la topología del terreno en donde se instalan las líneas de transmisión, la longitud e inclinación del claro que existe entre torres, pues de esto se determinan los esfuerzos mecánicos totales a los que estará sometida la línea. Los arreglos más comunes son:

- Cadenas en "I"
- Cadenas en "V"
- En tensión

1.4.1 Conjunto en suspensión

Para seleccionar el tipo de arreglo de cadenas se consideran principalmente los esfuerzos mecánicos totales, estos se transmiten en dos direcciones: vertical y horizontal.

De forma horizontal, debido a la acción del viento sobre las áreas donde golpea a los conductores y al arreglo, más la componente transversal, que representa la tensión longitudinal de los conductores a causa de la deflexión que existe en la suspensión de la línea.

De manera vertical, a causa del peso mismo del conjunto mecánico en general; peso de conductores, herrajes y aisladores, a esto último se le suma un peso adicional por efecto de la acumulación de agua y hielo.

1.4.2 Cadenas en "I"

Este arreglo tiene la característica de poder balancearse por efecto del viento considerando como pivote el punto de anclaje a la estructura, por tal motivo, la resultante de la acción del viento y las cargas verticales actúan en la misma dirección en que se balancea la cadena. En la *Figura 1.3* se muestra un ejemplo del arreglo en "I" y las fuerzas que actúan sobre ella.

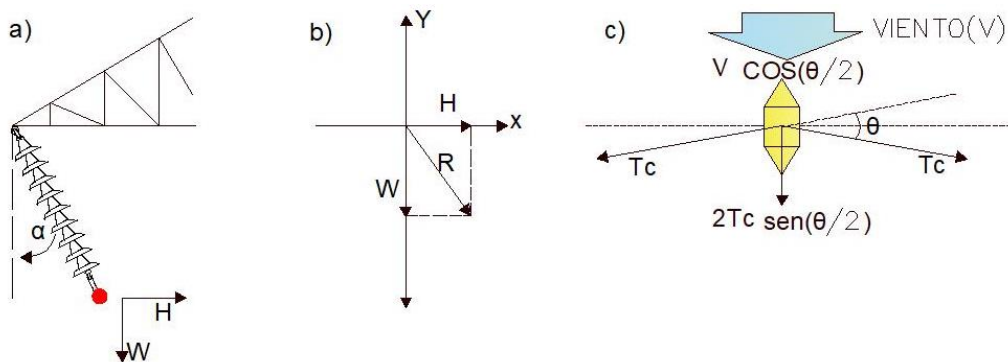


Figura 1.3 Arreglo de aisladores en "I" a) Cruceta con cadena de aisladores en "I", b) Diagrama de fuerzas del arreglo, c) Vista de planta de deflexión en LT

Sin embargo, cuando se produce una deflexión en la torre con este tipo de arreglo se presentan las siguientes condiciones (ver *Figura 1.3c*):

- La acción del viento afecta en este caso en función del coseno de la semi-deflexión de la línea debido a la dirección no perpendicular del viento sobre la línea de transmisión.

- Se incrementa por efecto de las componentes transversales de la tensión longitudinal de los conductores debido a la deflexión.

Tomando como referencia la *Figura 1.3 b)* se tiene que la carga H, considerando la acción del viento y la deflexión de la línea, se comporta de acuerdo con la siguiente expresión:

$$H = \left[D_c C_{MH} C_f \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) + D_a l_c \right] P_m F_v + 2T_c \operatorname{sen}\left(\frac{\Theta}{2}\right) \dots (1.0)$$

NOTA: Las expresiones contenidas en este capítulo provienen del Manual para diseño electromecánico de líneas de transmisión aéreas^[2] de CFE.

Donde:

- D_c : diámetro del conductor en metros
- C_{MH} : claro medio horizontal o claro de viento en metros
- C_f : son los conductores por fase
- Θ : deflexión en suspensión de la línea en grados
- D_a : diámetro de los aisladores en suspensión en metros
- l_c : longitud de la cadena en metros
- P_m : presión del viento máxima sobre los cables en $[\text{kgf}/\text{m}^2]$
- F_v : factor del efecto del viento sobre el claro que depende de la magnitud de este, se considera de 0.8 si el $C_{MH} < 100$ m, o de 0.6 si $C_{MH} > 500$ m, y T_c es la tensión de trabajo máxima del conductor en $[\text{kgf}]$

La carga vertical por efecto del peso total del sistema (conductores, aisladores y herrajes) se determina mediante la expresión:

$$W = W_c C_v C_f + W_i \dots (1.1)$$

Donde:

- W_c : peso unitario del conductor en kgf/m
- C_v : claro vertical o claro de peso en metros
- W_i : peso total de la cadena de aisladores herrajes

La fuerza resultante está dada por:

$$R = \sqrt{W^2 + H^2} \dots (1.2)$$

Y el ángulo está dado por:

$$\alpha = \operatorname{angtan}\left(\frac{H}{W}\right) \dots (1.3)$$

^[2] Manual para diseño electromecánico de líneas de transmisión aéreas, Comisión Federal de Electricidad, 1ª Edición, año 2012, México D.F., Pg. 355.

1.4.3 Cadenas en “V”

Este tipo de arreglos se utiliza de igual forma dependiendo de la configuración de la estructura y los conductores, pero también se utiliza para dar mayor estabilidad y soporte a los conductores y aisladores en claros que no son rectos, es decir, que llegan o salen de los puntos de anclaje con cierto ángulo de inclinación con respecto a la estructura, esto sucede principalmente por la topología del terreno o por ramificaciones de la misma línea de transmisión.

En este tipo de arreglos las cargas horizontal y vertical se modifican con respecto al arreglo anterior (aunque algunos parámetros se siguen tomando de la misma forma), las cargas horizontales se incrementan debido a que se adiciona una cadena de aisladores en este arreglo y el viento actúa en ambas cadenas. Las cargas verticales también se incrementan pues se debe considerar el peso de la otra cadena de aisladores.

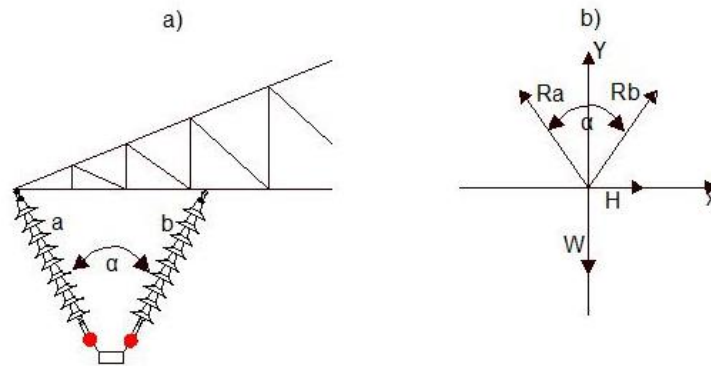


Figura 1.4 Arreglo en “V” a) Cruceta con arreglo en “V”, b) Diagrama de fuerzas del arreglo

Tomando como referencia la *Figura 1.4*, las cargas horizontales están dadas por la siguiente expresión:

$$H = \left[D_c C_{MH} C_f \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2D_a L_c \right] P_m F_v + 2T_c \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \dots (1.4)$$

Mientras que la carga vertical está dada por:

$$W = W_c C_v C_f + P_v \dots (1.5)$$

Donde:

- W_c : peso unitario del conductor en [kgf/m]
- C_v : claro vertical o claro de peso en [m]
- C_f : conductores por fase
- P_v : es el peso del conjunto de suspensión en “V” en [kgf]

Cabe destacar que, este arreglo no posee la característica de que las cargas se muevan hacia la misma dirección como en el arreglo tipo “I”, se tiene que las cargas en las cadenas de aisladores se comportan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$R_a = \frac{W}{2 \cos(\frac{\alpha}{2})} + \frac{H}{2 \operatorname{sen}(\frac{\alpha}{2})} \dots (1.6)$$

$$R_b = \frac{W}{2 \cos(\frac{\alpha}{2})} - \frac{H}{2 \operatorname{sen}(\frac{\alpha}{2})} \dots (1.7)$$

Donde se tiene que W es la carga vertical, H la carga horizontal y α el ángulo entre ejes longitudinales de las cadenas que conforman el arreglo (en grados).

La interpretación de las expresiones anteriores indica que el diseño de la cadena de aisladores está en función de la ecuación (1.6) ya que proporciona el caso más desfavorable en cuanto al valor numérico de los esfuerzos mecánicos en los puntos de apoyo. En comparación con la expresión (1.7) que siempre proporciona valores menores ya que el primer término de la ecuación depende de cargas verticales y el segundo de cargas horizontales, entonces, si estas se incrementan por efecto del viento el resultado de la ecuación puede ser negativo incluso y si no se tiene en cuenta el ángulo adecuado en la cadena, la cadena “V” podría estar trabajando en compresión.

1.4.4 Conjunto en tensión

En los conjuntos en tensión, la carga que actúa sobre los arreglos depende de la tensión máxima de trabajo del conductor (T_c , en [kgf]), este dato se obtiene del estudio de flechas y tensiones, la fuerza total que actúa en estos conjuntos se determina por el producto de la tensión de trabajo del conductor y la cantidad de conductores por fase (C_f) de la línea de transmisión.

La resultante está dada por la siguiente expresión:

$$R = T_c C_f \dots (1.8)$$

Donde:

- T_c : tensión máxima de trabajo del conductor en [kgf]
- C_f : cantidad de conductores por fase.

1.4.5 Herrajes y conectores

Los herrajes y conectores son elementos metálicos utilizados para la fijación, empalme, separación, amortiguamiento y protección (eléctrica y mecánica) para cables conductores, hilos de guarda y cadenas de aisladores. Es muy común encontrar en catálogos de proveedores conjuntos ya armados de herrajes y cadenas de aisladores de modo que estos pueden ser solicitados directamente con el fabricante con las características requeridas por la instalación.

Los herrajes, por su uso, pueden ser clasificados en:

- Para cables conductores y de guarda: grapas, empalmes, pistolas, separadores, amortiguadores.
- Para protección eléctrica: anillos equipotenciales y apartarrayos.
- Para protección mecánica: varillas preformadas y herrajes para estructuras conformadas por postes.
- Para cadenas de aisladores.

Estos elementos se fabrican y diseñan bajo ciertos parámetros mecánicos y eléctricos, esto conlleva al uso de diversos metales y métodos de fabricación, algunos metales usados con regularidad son el cobre, aluminio y acero; mientras que los métodos de fabricación comunes son por inmersión en frío y en caliente. La selección correcta de estos elementos también es importante para asegurar el correcto funcionamiento de una línea de transmisión y también optimizar el mantenimiento de estas. En México, por parte de CFE, estos elementos han sido dimensionados principalmente para la familia de estructuras normalizadas usadas con regularidad por esta empresa.

Las características de los herrajes están dadas principalmente por el nivel de voltaje de trabajo de la línea, el tipo y calibre de conductores, configuración de la estructura, etc. Por ejemplo, algunos de los requisitos que establece la CFE en México para este tipo de accesorios se muestran en la Tabla 1.

Como se dijo anteriormente, la clasificación de los herrajes puede ser dependiendo del uso que se les dé a éstos, en este caso se trata de herrajes y conectores que se usan para generar conjuntos o cadenas de aisladores en los arreglos antes descritos.

Tabla 1 [2]
Requisitos mínimos para herrajes

Requisito	Descripción
Materiales usados	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Soportar el trabajo en frío debido a la compresión (para herrajes de compresión). ✓ Tener una eficaz resistencia al impacto después de la compresión (para herrajes de compresión). ✓ Asegurar que los maguitos de reparación sean del mismo material a reparar. ✓ No deben presentar corrosión, ni provocarla en donde se instalen. ✓ No deben presentar rebabas, aristas vivas, escarificaciones, traslapes de material, fisuras y ningún defecto de fabricación.
Herrajes	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Soportar tensiones mecánicas de instalación, servicio y mantenimiento. ✓ Soportar corriente nominal de servicio y de corto circuito, las temperaturas de servicio y del medio ambiente. ✓ Mantener fijo cada elemento, de forma que no pueda aflojarse durante la transmisión de energía, el acople se debe realizar con chavetas de seguridad para facilitar el mantenimiento. ✓ Estar libres de efecto corona. ✓ Garantizar el acoplamiento entre los elementos, suministrado con conjuntos completos. ✓ No deben dañar los conductores en condiciones normales de servicio. ✓ Asegurar que el acabado de los herrajes no presente porosidades, escoriados, grietas, escamas, asimetría, rebabas, aplastamiento y demás defectos de fábrica que puedan comprometer su correcto funcionamiento. ✓ Fabricar mediante el proceso de forja los elementos estructurales como bolas, calaveras, eslabones, ganchos de bola, grapas de tensión a compresión, grilletes, horquillas, tuercas de ojo, alfileres y tensores. ✓ Fabricar por fundición las grapas de remate y suspensión, amortiguadores y conectores. ✓ Deben tener un acabado galvanizado.

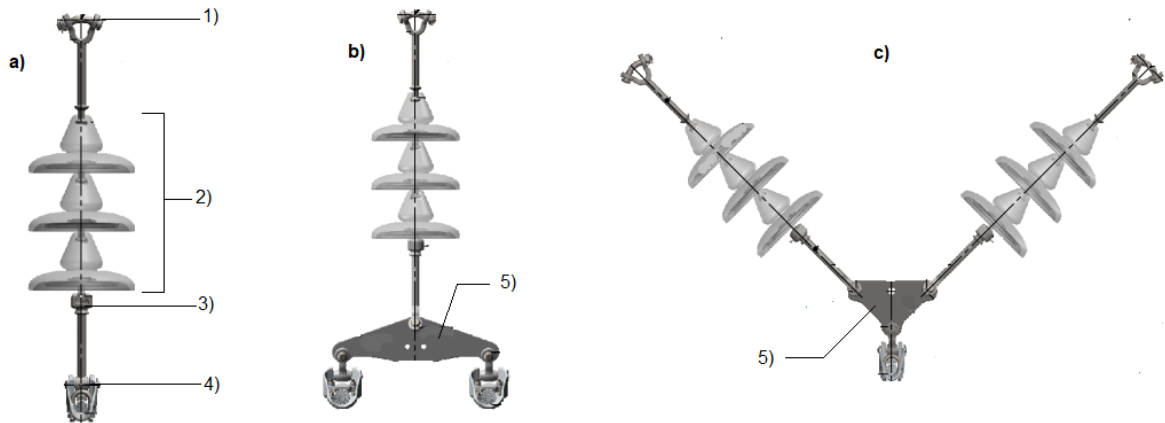


Figura 1.5 Conjuntos de cadenas de aisladores a) Conjunto en "I", b) Conjunto en "I" 2 conductores por fase, c) Arreglo en "V"

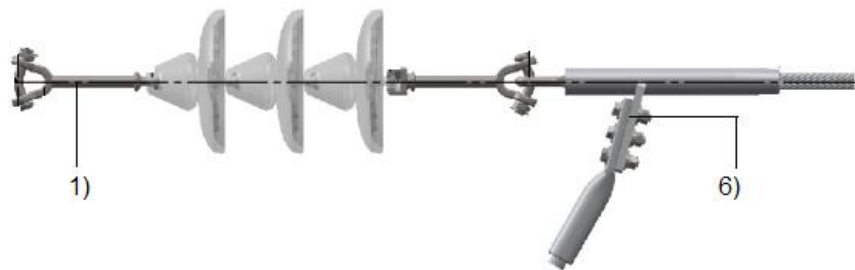


Figura 1.6 Conjunto de cadena de aisladores en tensión

En la *Figura 1.5* y *Figura 1.6* se muestran los arreglos antes descritos con sus respectivos herrajes, los cuales se pueden identificar a continuación según en número que aparece en las imágenes.

- 1) Horquilla "Y" bola larga (puede ser larga o corta).
- 2) Aisladores.
- 3) Calavera ojo larga (puede ser larga o corta dependiendo el caso).
- 4) Grapa de suspensión
- 5) Yugo triangular (generalmente usado para 2 o más conductores por fase).
- 6) Grapa de tensión a compresión (CTPOL), dependiendo del conductor es el número correspondiente.

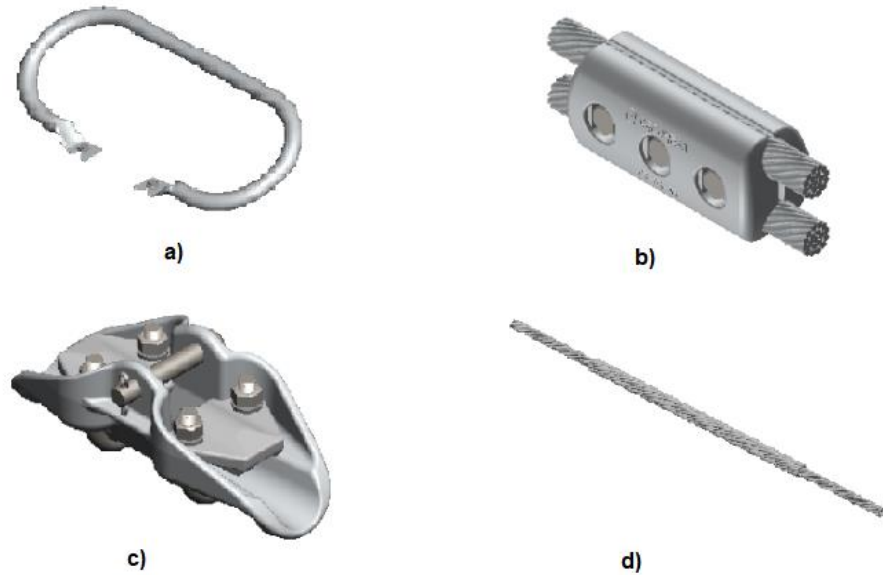


Figura 1.7 Herrajes para conductor a) Anillo equipotencial, b) Grapa paralelo, c) Grapa de suspensión, d) Varilla preformada

En la *Figura 1.7* se muestran los conectores para conductor y elementos de protección donde a) muestra un anillo equipotencial usado principalmente en yugos para evitar diferencias de potencial en las diferentes partes de este, en b) se observa una grapa paralela para conductor usada para empalme, entre otras cosas, en c) es la grapa de suspensión para conductor que se señaló en los arreglos anteriores y, por último, en d) se muestran las varillas preformadas para protección del conductor.

1.4.6 Diseño

El diseño de conjuntos de herrajes y aisladores desde el punto de vista mecánico, en todos los tipos, consiste en elevar el valor de las fuerzas resultantes multiplicando por un factor de seguridad.

Las ecuaciones de capacidad mínima para el arreglo en “I”, con y sin hielo son:

$$C_M = \left(\sqrt{H^2 + W^2} \right) F_s \dots (1.9)$$

$$C_{M,con\ hielo} = (H^2 + W^2) F_s \dots (1.10)$$

Las ecuaciones para el arreglo en “V” son las siguientes:

$$C_M = \left(\frac{W}{2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{H}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) F_s \dots (1.11)$$

$$C_{M,con\ hielo} = \left(\frac{W_{con\ hielo}}{2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{H_{con\ hielo}}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) F_s \dots (1.12)$$

Donde:

- C_M : es la capacidad mínima mecánica del arreglo (en kgf).
- F_s : factor de seguridad.
- W y H : componentes vertical y horizontal, respectivamente (en kgf).

Capítulo II. Pruebas importantes a los aisladores

Los aisladores deben pasar por un proceso de comprobación de sus características eléctricas y mecánicas dadas por su material de fabricación y diseño. Las pruebas las realiza, por una parte, el fabricante y por otra el usuario o empresa calificada para llevarlas a cabo en un laboratorio.

Los procedimientos, mediciones y resultados deben ser llevados a cabo de acuerdo con la normativa nacional e internacional en donde se establecen los criterios de aceptación y parámetros aceptables, dentro de esta normativa se encuentran las siguientes:

- IEC 60060-1: high-voltage test techniques – Part1: General definitions and test requirements.
- ANSI C29.1: test methods for electrical power insulators.
- NMX-J-271/1-ANCE-2007: técnicas de prueba de alta tensión – Parte 1: definiciones generales y requerimientos de prueba.
- CFE-52210-02: aisladores tipo suspensión de porcelana y vidrio templado.
- CFE-52210-47: aisladores sintéticos tipo suspensión para tensiones de 161 kV a 400 kV.

2.1 Pruebas prototipo

Se trata del conjunto de pruebas para examinar las características de los aisladores, este tipo de pruebas se llevan a cabo solamente cuando se tiene un nuevo diseño de aislador o método de fabricación y solo un pequeño número de estos son sometidos a esta verificación.

- **Tensión de flameo a 60 Hz**

La tensión de flameo es una tensión de valor eficaz (RMS) a frecuencia fundamental, el flameo ocurre cuando una descarga disruptiva se presenta sobre la superficie del dieléctrico, el objetivo de este ensayo es comprobar los parámetros de diseño del aislador.

Se prueban los aisladores de forma individual (se toman 3 aisladores de muestra, por lo menos), se



Figura 2.0 Montaje para prueba de tensión de flameo

monta el aislador con sus herrajes correspondientes y se aplica tensión la cual se debe incrementarse rápidamente hasta alcanzar el 75% del valor de la tensión de flameo promedio esperada.

Posteriormente, el aumento en la tensión debe ser tal que el tiempo de flameo debe ser mayor a 5 segundos, pero no más de 30 segundos.

Esta prueba se efectúa con el montaje que puede observarse en la *Figura 2.0* y emulando condiciones atmosféricas de con y sin lluvia, de ahí que se considere esta prueba en dos partes, *Tensión de flameo en seco a 60 Hz* y *Tensión de flameo en húmedo a 60 Hz*. El valor de la tensión de flameo en seco del aislador se determina mediante el promedio de los valores obtenidos al haber realizado la prueba de manera individual al menos 5 veces consecutivas, donde el periodo entre flameos no debe ser menor a 15 segundos ni más de 15 minutos.

- **Tensión crítica de flameo al impulso por rayos de polaridad positiva y negativa**

La tensión crítica de flameo al impulso por rayo es considerada el valor cresta de la onda de impulso normalizada y que produce flameo en el dispositivo con un 50 % de probabilidad, esta onda puede tener polaridad positiva o negativa.

Se deben probar al menos tres aisladores de forma (mismo montaje de la prueba anterior) y, de acuerdo con lo indicado en la norma, se le debe aplicar un impulso de rayo normalizado, este es un impulso de rayo completo con un tiempo de frente de 1.2 μ s y un tiempo al valor medio de 50 μ s (se conoce como impulso 1.2/50 μ s).

La norma NMX-J-271/1-ANCE establece varios procedimientos de prueba y este se escoge según el dispositivo, sin embargo, se establece que se deben aplicar entre tres y quince impulsos al objeto de prueba sobre el cual se evaluarán los daños producidos al aislamiento y de acuerdo con los criterios establecidos en la norma se determinará si el aislador pasó la prueba. La medición de la tensión crítica de flameo para cada impulso se realiza según lo establecido por dicha norma.

Adicionalmente, para que la prueba al aislador se considere satisfactoria la tensión crítica de flameo al impulso promedio de los tres aisladores debe cumplir según lo establecido en la especificación CFE-52210-02: Aisladores tipo suspensión de porcelana y vidrio templado.

Cabe destacar que los procedimientos según la norma son equivalentes a la metodología empleada en las normas IEC-60600-1 y ANSI C29.1.^[3]

[3] NMX-J-271/1-ANCE-2007: Técnicas de prueba de alta tensión – Parte 1: definiciones generales y requerimientos de prueba

- **Tensión de radio interferencia**

Para medir la tensión de radio interferencia de los aisladores existe la prueba de radio interferencia en aisladores o RIV (por sus siglas en inglés, Radio-Influence Voltage).

Aunque las condiciones ambientales como el nivel de humedad, temperatura y contaminación pueden influir en las perturbaciones radioeléctricas en la normativa se especifica que la prueba debe llevarse a cabo en especímenes secos y limpios y se deben tomar lecturas de las condiciones atmosféricas del lugar del ensayo a reserva de especificar posteriormente factores de corrección, las frecuencias a observar son entre los 0.5 MHz y 1 MHz ya que estas son representativas de niveles de ruido más elevados y los herrajes deben estar libres de radio interferencia a una tensión 10% mayor a la tensión de prueba

Se considera que el espécimen paso la prueba siempre y cuando el promedio de los valores de tensión de radio interferencia no son menores al valor garantizado por el fabricante. Además, se debe seguir lo dicho en la especificación CFE 52210-02.

En México la norma NMX-J-563-ANCE establece los procedimientos, definiciones y parámetros a considerar para efectuar la prueba de forma satisfactoria, a su vez, esta norma y sus procedimientos son compatibles con los de las normas internacionales IEC-60437 y ANSI C29.1, adicionalmente, en la NEMA 107-1987 también se establecen los métodos de prueba, condiciones del circuito de prueba y la forma en que se tomarán las lecturas con el equipo de medición. ^[4]

- **Choque térmico**

Esta prueba consiste en someter un conjunto de aisladores (diez aisladores) a cambios bruscos de temperatura con el fin de verificar su resistencia mecánica y la integridad física de los mismos después del ensayo. La prueba consiste en hacer inmersiones del objeto de prueba en agua fría y posteriormente en agua caliente a 4 °C y 96 °C, respectivamente, con una tolerancia de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en cada caso. Deben hacerse un total de 10 inmersiones, alternando entre dichas temperaturas, después de las cuales se le aplica tensión al aislador en cuestión hasta alcanzar el flameo, de modo que, se verifique que este no presente daño interno alguno (perforación).

La prueba se considera satisfactoria si ninguno de los objetos de prueba presenta daño aparente ya sean fracturas en el esbozo o internas.

- **Prueba de perforación**

La perforación puede ocurrir cuando un aislador sufre daño interno (fractura interna, grietas) a causa de las condiciones físicas a las que fue sometido en servicio o por

[4] ANSI C29.1: Test methods for electrical power insulators

algún defecto de fábrica, se dice que un aislador sufrió perforación cuando la descarga disruptiva ocurre a través del dieléctrico sólido.

Los aisladores tipo suspensión, en particular, deben someterse a esta prueba (prueba de perforación en aire) donde se selecciona un conjunto de muestra y se sigue un procedimiento parecido al de la prueba de impulso por rayo, se aplican diez impulsos de tensión primero de polaridad negativa y luego de polaridad positiva (sin alternar) los cuales tendrán las características que se especifiquen en la normativa, generalmente se utiliza un valor de tensión de impulso de 2.3 a 3.5 veces la tensión crítica de flameo al impulso propia del aislador.

Como resultado aceptable se considera que los aisladores no deben presentar tipo alguno de perforación aparente (fractura interna) en ninguno de los especímenes de prueba.

Estas pruebas se realizan para todos los tipos de aisladores y de todos los materiales ya sean de porcelana, vidrio templado o sintéticos. Sin embargo, a los aisladores sintéticos se les realizan otras pruebas adicionales con el fin de examinar el material y cómo funciona en su conjunto el aislador, se realizan pruebas para verificar las características del núcleo, de los faldones y su absorción de la radiación ultravioleta e infrarroja. Los procedimientos y requerimientos mínimos se establecen en la normativa internacional IEC 60060-1 y en la especificación de Comisión Federal de Electricidad CFE- 52210-47.

2.2 Pruebas de Aceptación

Una vez que se han realizado las pruebas prototipo se efectúan las pruebas de aceptación, estas últimas tienen como objetivo principal poner a prueba y verificar las características, así como la calidad en sí de la fabricación y los materiales utilizados para esto.

De igual forma que las pruebas prototipo se seleccionan cierto número de aisladores como muestra y se verifican sus dimensiones comparadas con los planos de diseño, se observa la calidad y porosidad de la porcelana o el material en sí del que están constituidos los aisladores, se corrobora el galvanizado de las partes metálicas (herrajes). Al igual que en las pruebas prototipo para este rubro se ponen a prueba las mismas características mecánicas y eléctricas del producto, pero difiere el procedimiento, por ejemplo:

- **Choque térmico**

En este caso los objetos de prueba son calentados, regularmente por aire caliente, de manera uniforme para después sumergirse en agua fría donde deben permanecer por un tiempo no menor a 2 minutos y no deben presentar daños en el elemento aislante para considerarse la prueba exitosa.

- **Prueba de perforación**

A diferencia del proceso que se lleva a cabo en las pruebas prototipo, el aislador limpio y seco debe introducirse en un medio aislante líquido, generalmente aceite, a temperatura ambiente para después aplicar la tensión de manera gradual hasta alcanzar el valor de tensión de perforación establecido (o incluso superior de ser necesario), el aislador pasará la prueba si no se presenta perforación alguna por debajo del valor de la tensión de perforación.

- **Carga de falla**

En esta prueba se examina la resistencia mecánica del aislador aplicando un esfuerzo mecánico de tensión entre sus partes metálicas de forma que se alcance el 75 % del valor de carga de falla mecánica y después se aumenta gradualmente hasta alcanzar la falla, todo en un tiempo de entre 15 y 45 segundos.

2.3 Pruebas de rutina o pruebas FAT

Las pruebas que realiza el proveedor o fabricante llevan por nombre *FAT (Pruebas de Aceptación en Fábrica)* estas tienen como fin el realizar una verificación de las características y parámetros de funcionalidad, rendimiento y calidad de acuerdo con los protocolos y, según lo exigido por la normativa nacional e internacional, en el caso de los aisladores de vidrio templado y porcelana estas pruebas se realizan al 100 % de la producción, mientras que, para los aisladores sintéticos o poliméricos se debe efectuar al 50 % de la producción.

Las pruebas que conforman este rubro son principalmente las siguientes:

- **Prueba mecánica.** Se deben someter a un esfuerzo mecánico de tensión el cual tendrá un valor equivalente al 50% del valor de carga mecánica o electromecánica de falla prevista por el diseño y fabricación del aislador, este esfuerzo debe aplicarse por aproximadamente 3 segundos, los aisladores y sus herrajes deben resistir y no presentar fractura alguna, de lo contrario estos serán rechazados.
- **Prueba eléctrica.** La muestra se somete a una tensión y un flameo continuo en seco por un tiempo de 3 a 5 minutos, la tensión aplicada debe ser la

necesaria para mantener un flameo continuo y uniforme, los aisladores no deben presentar perforación de lo contrario serán rechazados.

- Choque térmico. Los aisladores son expuestos a cambios bruscos de temperatura siendo sumergidos en agua fría y luego en agua caliente, alternando de esta forma entre temperatura baja y alta, esta prueba se realiza para porcelana y para vidrio templado de modo que se pone a prueba y se verifica que el aislador no se fracture, rompa o perfore.

Estas pruebas son consideradas dentro del proceso de fabricación y se aplican de manera consecutiva, de modo que, una es el complemento de la otra y se verifican las características dadas por el modelo y diseño del aislador.

Capítulo III. Coordinación de aislamiento

La coordinación de aislamiento es un procedimiento fundamental para el diseño de múltiples instalaciones eléctricas cuyo fin es la protección y seguridad en la operación del sistema eléctrico, tanto para el personal que labora en él, como para el equipo.

En el caso particular de las líneas de transmisión se utiliza este procedimiento para la correcta selección de los aisladores que darán un margen de seguridad a la instalación contra las sobretensiones y también establecerá las distancias de seguridad (en aislamiento en aire) permisibles. Para llevar a cabo este procedimiento se cuenta con normas especializadas en este aspecto y se enlista a continuación.

Por parte de la normativa internacional se cuenta con las siguientes normas de la IEC (International Electrotechnical Commission).

- ✓ **IEC 60071-1:** *insulation co-ordination: definition, principles and rules.*
- ✓ **IEC 60071-2:** *insulation co-ordination: application guide.*

En México, se cuenta con la normativa de la Asociación de Normalización y Certificación (ANSE) y las especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la primera ofrece métodos y definiciones compatibles con las normas IEC antes mencionadas, mientras que, la segunda propone un procedimiento diferente pero igualmente efectivo y válido en la práctica. A continuación, se enlista dicha normativa.

- ✓ **NMX-J-150/1-ANCE:** *coordinación de aislamiento: definiciones, principios y reglas.*
- ✓ **NMX-J-150/2-ANCE:** *coordinación de aislamiento: guía de aplicación.*
- ✓ Especificación **CFE L0000-06:** *coordinación de aislamiento (1980).*
- ✓ Especificación **CFE L0000-06:** *coordinación de aislamiento (1991).*
- ✓ Especificación **CFE L0000-41:** *guía de aplicación de la especificación L0006, coordinación de aislamiento.*

3.1 Definiciones

➤ Coordinación de Aislamiento

Selección de la tensión de aguante del equipo e instalación con relación a las sobretensiones que puedan producirse en un punto dado del sistema, de modo que, pueda proporcionar un margen de seguridad a la instalación y reducir, en un nivel técnico y económicamente aceptable, la probabilidad de que los esfuerzos

dieléctricos puedan producir una falla de aislamiento y, por consecuencia, afectar la continuidad del servicio.

➤ Aislamiento externo

Comprende las superficies externas de los equipos, así como el aire que los rodea y las distancias en aire, para seleccionar la tensión de aguante del aislamiento es necesario considerar las condiciones atmosféricas y de intemperie.

➤ Aislamiento interno

Comprende los aislamientos de tipo sólido, líquido o gaseoso que forman parte interna de los equipos y no se encuentran expuestos a las condiciones atmosféricas y de intemperie.

➤ Aislamiento Autorrecuperable

Es aquel que recupera todas sus características aislantes en un tiempo relativamente corto después de ser sometido a un esfuerzo de tensión, haya ocurrido o no una descarga disruptiva. Suelen ser aislamientos de tipo exterior, aunque no necesariamente.

➤ Aislamiento No Autorrecuperable

Es aquel que no recupera, o no del todo, sus propiedades aislantes después de ocurrir una descarga disruptiva dado un esfuerzo de tensión. Suelen ser aislamientos de tipo interior, aunque no necesariamente.

➤ Distancia de fuga

Es la trayectoria (o suma de estas) más corta a lo largo de la superficie de un aislador entre dos partes conductoras a diferente potencial, normalmente una conectada a tierra y la otra a la tensión de operación del sistema (se expresa en [mm]).

➤ Nivel de Aislamiento.

Es el conjunto de tensiones de aguante (ya sea impulso, por rayo o maniobra) para verificar que el aislamiento cumple con una o todas las tensiones de aguante requeridas por el mismo. Cuando el nivel de aislamiento tiene una probabilidad de falla del 10% se le conoce como un *Nivel Básico de Aislamiento al Impulso* abreviado como *NBAI* cuando es por rayo y *NBAM* cuando es por maniobra.

Esta característica es seleccionada dependiendo de la tensión máxima de diseño del sistema o instalación, de acuerdo con esto, los sistemas se clasifican en dos categorías, según el siguiente criterio establecido por la especificación CFE-L0000-06.

1. Categoría I: para tensiones máximas ≤ 245 [kV], el nivel de aislamiento comprende las tensiones de aguante nominales de impulso por rayos y la de corta duración a la frecuencia del sistema.
2. Categoría II: para tensiones máxima > 245 [kV], el nivel de aislamiento comprende las tensiones de aguante nominales por maniobra y por rayo.

➤ Tensión crítica de flameo

Es la tensión medida o estimada con un 50% de probabilidad de generar un flameo en condiciones atmosféricas reales. La *Figura 3.0* muestra el flameo que se produce sobre el contorno de un aislador, después de alcanzar su tensión crítica de flameo en una prueba de laboratorio.



Figura 3.0 Prueba de laboratorio de tensión de flameo a aislador

➤ Tensión nominal (V_n)

Valor eficaz de tensión con la cual se designa el sistema y al cual están referidas algunas características de operación.

➤ Tensión máxima de operación (V_m)

Valor eficaz de tensión de operación entre fases más alto el cual ocurre en condiciones normales de operación sin ser considerada una sobretensión.

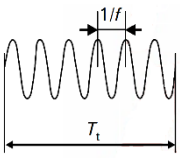
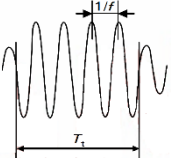
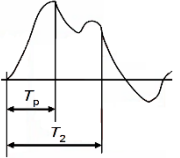
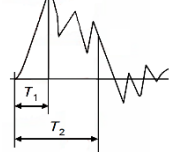
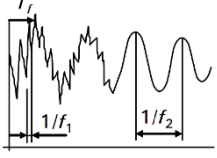
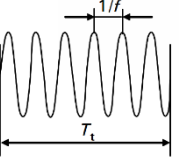
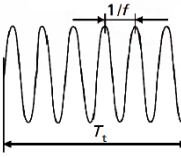
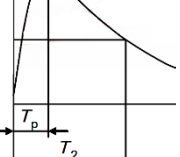
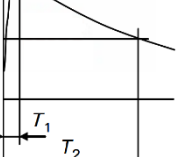
➤ Tensión máxima de diseño de equipo (V_d)

Valor eficaz de tensión entre fases más alto para el cual está diseñado el equipo con respecto a su aislamiento, es una característica propia de cada equipo según el fabricante.

➤ **Sobretensiones**

Cualquier valor de tensión entre fase y tierra o entre fases cuyo valor pico sea igual o mayor a $V_m(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}})$ y $V_m(\sqrt{2})$, respectivamente, donde V_m es la tensión máxima del sistema. Las sobretensiones se clasifican dependiendo del evento que las provoca y su duración en ciclos como se describe a continuación y se ve en la Tabla 2.

Tabla 2
Características y formas de onda de Sobretensiones

Tipos	Baja frecuencia		Transitorias		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Características	$f = 60[\text{Hz}]$ $T_t \geq 3600 [\text{s}]$	$10 < f < 500 [\text{Hz}]$ $0.2 \leq T_t \leq 3600 [\text{s}]$	$20 < T_p \leq 5000$ [μs] $T_2 \leq 20 [\text{ms}]$	$0.1 < T_1 \leq 20$ [μs] $T_2 \leq 300 [\mu\text{s}]$	$T_r \leq 100 [\text{ns}]$ $0.3 < f_1 < 100 [\text{MHz}]$ $30 < f_2 < 300 [\text{kHz}]$
Formas de onda normalizadas					
Características	$f = 60[\text{Hz}]$	$58 \leq f \leq 62 [\text{Hz}]$ $T_t = 60 [\text{s}]$	$T_p = 250 [\mu\text{s}]$ $T_2 = 2500 [\mu\text{s}]$	$T_1 = 1.2 [\mu\text{s}]$ $T_2 = 50 [\mu\text{s}]$	

- **Sobretensión temporal:** es una tensión oscilatoria con una duración más larga que un periodo a la frecuencia del sistema, no es amortiguada o levemente amortiguada.
- **Sobretensión transitoria:** sobretensión de corta duración (pocos milisegundos), puede ser oscilatoria o no, muy amortiguada y puede estar montada en una sobretensión temporal.

- Sobretensión por rayo: también llamada *de frente rápido*, es una sobretensión de fase a fase o de fase a tierra ocasionada por una descarga atmosférica en cualquier punto del sistema, se considera también como una sobretensión transitoria. Las características de la forma de onda son; es unidireccional, un tiempo de frente de 0.1 [μs] y 30 [μs], y una duración de la cola hasta algunos cientos de microsegundos, todo esto según especificaciones y normas.
- Sobretensión por maniobra: llamada también *de frente lento* y también considerada como transitoria, es una sobretensión de fase a fase o de fase a tierra producida por la operación específica de maniobra de interruptores, falla, etc. Las características de su forma de onda son: es unidireccional, con duración de frente de 30[μs] a 3000[μs] y duración menor a un periodo de la frecuencia del sistema.

➤ Herraje

Elementos metálicos para la sujeción, empalme, reparación, separación, amortiguamiento y protección electromecánica de elementos de un sistema eléctrico de potencia sean estos; conductores, aisladores, cables de guarda, etc.

➤ Desviación Estándar (σ)

El comportamiento de muchas de las sobretensiones es de carácter estadístico, las sobretensiones por maniobra y por rayo pueden ser descritas mediante una función y distribución estadística debido a la naturaleza aleatoria de las variables y parámetros implicados en ellas. El estudio de sobretensiones requiere un método probabilístico para obtener la distribución de probabilidad correcta de las amplitudes de las sobretensiones, se puede obtener mediante simulaciones cuidadosas de operación del sistema por medio de software especializado, el cual, de forma resumida realiza lo siguiente:

- Se realiza la selección de una distribución de probabilidad (distribución Gaussiana, de Weibull, entre otras) para todas las variables y parámetros implicados de carácter aleatorio.
- Desarrollo de un modelo matemático característico del sistema a examinar y de la sobretensión a determinar.
- Se aplica un método de cálculo estadístico numérico (generalmente basado en el método Monte Carlo) para aproximar los resultados de la expresión antes formulada lo más precisos posible.

La desviación estándar es una medida que se utiliza para determinar qué tan dispersos están un conjunto de datos de su media aritmética, una desviación estándar grande significa datos muy dispersos, en su caso contrario indica datos agrupados tendientes a la media, aplicado a la distribución de sobretensiones este

valor nos indica que tan alejadas están las sobretensiones a converger en un valor característico que sería la media aritmética de la distribución y se aplica en el cálculo de la tensión crítica de flameo (TCF).

El estudio de sobretensiones es usado la mayoría de las veces en casos muy particulares, dependiendo del sistema que se esté tratando, para propósitos generales se pueden utilizar los valores de sobretensiones indicados en norma y con el valor de desviación estándar indicado por norma que es de un 3% para impulsos por rayo y de un 6% para impulsos por maniobra.

3.2 Descripción del método

Para el desarrollo de este tema se tomará la metodología desarrollada en las especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad, **CFE L0000-06** (años 1980 y 1991) y **CFE L0000-41**. La coordinación de aislamiento aplica en sistemas eléctricos de 1 [kV] en adelante, principalmente trifásicos, aunque también se puede aplicar a sistemas monofásicos y bifásicos, para fines de desarrollo de este escrito se tomarán en cuenta principalmente los niveles de tensión correspondientes a las líneas de transmisión.

La coordinación de aislamiento en líneas de transmisión tiene por objeto principal el desarrollo de los siguientes puntos:

- Seleccionar niveles de tensión de aguante de la instalación y equipo de acuerdo con la categoría y al estudio de sobretensiones, en caso de no tener este último, realizar la coordinación de acuerdo con lo indicado en la normativa usando los valores máximos o representativos de sobretensiones que ahí se indican.
- Definir las distancias de aislamiento en aire adecuadas para el tipo de instalación con base en los parámetros del sistema y al punto anterior.
- Seleccionar el número de aisladores que conformarán las cadenas y el arreglo de estas dependiendo de la tensión y nivel de aislamiento.
- Con el desarrollo de los puntos anteriores, reducir la probabilidad de esfuerzos dieléctricos que puedan dañar el aislamiento y por consiguiente la continuidad y estabilidad del sistema.

3.3 Parámetros de diseño ^[5]

Los parámetros principales a considerar para llevar a cabo el procedimiento son:

- Tensión nominal
- Nivel de aislamiento
- Nivel de contaminación
- Altitud

Los cuales se explicarán más a fondo a continuación.

3.3.1 Tensión y niveles de aislamiento

Como se dijo anteriormente, el estudio de coordinación de aislamiento aplica principalmente en sistemas cuyas tensiones sean de 1 [kV] en adelante, en México, cuya tensión nominal más alta en líneas de transmisión es de 400 [kV] los sistemas pueden abarcar este rango de tensiones de operación (1-400 [kV]). Cabe destacar que para fines de diseño la tensión representativa se considera constante e igual a la tensión máxima de operación continua del sistema.

Con base en la tensión nominal y su respectivo valor de tensión máxima de diseño (Ver Tabla 3), los sistemas pueden ser clasificados en dos categorías:

- ✓ Categoría I: para tensiones máximas de hasta 245 [kV].
- ✓ Categoría II: para tensiones máximas mayores a 245 [kV].

En la especificación de 1980 se consideraba como categoría I a sistemas de 1[kV] hasta 52 [kV] y como categoría II los sistemas de hasta 230 [kV] y categoría III los mayores al nivel de tensión anterior, sin embargo, la especificación vigente de 1991 agrupó las categorías I y II anteriores en una sola, de esta forma se establecieron las categorías actuales.

Dada la tensión nominal del sistema y su correspondiente tensión máxima de operación es posible seleccionar el nivel de aislamiento, o bien, la tensión de aguante al impulso por rayo (**NBAI**) o por maniobra (**NBAM**).

[⁵] Formulas y expresiones a partir de este punto obtenidas de especificaciones CFE L0000-06 de los años 1980 y 1991.

Tabla 3
Niveles de aislamiento Categoría I y II

Categoría I			
Tensión Nominal en [kV] (eficaz)	Tensión máxima de diseño [kV] (eficaz)	Tensión de aguante nominal a 60 [Hz] de F-T en [kV] (eficaz)	NBAI en [kV] de fase a tierra (valor cresta)
4.4	5.5	19	45 60 75
6.9	7.2	20	40 60
13.8	15.5	35	75 95 110
23	27	50 60	95 125 150
34.5	38	70	125 150 200
44	52	95	250
69	72.5	140	325 350
85, 115	123	185 230	450 550
138	145	230 275	550 650
150, 161	170	275 325	650 750
230	245	360 395 460	850 900 950 1050

Categoría II				
Tensión Nominal en [kV](eficaz)	Tensión Máxima de diseño [kV](eficaz)	NBAM		NBAI En [kV] de fase a tierra (valor cresta)
		Fase a tierra [kV]	Fase a fase [kV] (relación al valor cresta de F-T)	
400	420	850	1.5	1050
		950	1.5	1175
		1050	1.5	1300
				1425
765	800	1425	1.5	1800
		1550	1.5	1175
			1.5	1300
			1.5	2100
			1.5	2400

NOTA: Valores de tabla obtenidos de especificación CFE L0000-06 ^[6]

3.3.2 Altitud

La presión atmosférica afecta directamente a las tensiones críticas de flameo y tensiones de aguante, pues estas decrecen cuando la presión también lo hace debido a que a menor presión es menor la densidad de aire circundante, por tal motivo se estableció que, a ciertas alturas sobre el nivel del mar, es necesario aplicar un factor de corrección a dichas tensiones para asegurar el cálculo correcto del aislamiento.

Al tener la presión atmosférica y la altura una relación inversamente proporcional, se puede decir que también la tiene con las tensiones críticas de flameo y de aguante y, al ser de más fácil conocimiento el dato de la altitud sobre el nivel del mar, el factor de corrección se calcula con base en este.

Está establecido en las normas internacionales y nacionales que en sistemas instalados a altitudes mayores a 1000 msnm estos requieren la aplicación del factor de corrección que está dado por la siguiente expresión:

[6] CFE L0000-06: Coordinación de Aislamiento (1991)

$$\frac{b_0}{b} = e^{\left(\frac{H}{8150}\right)} \dots (3.1)$$

Donde:

b_0 = presión atmosférica de referencia normalizada (101.3 [kPa]).

b = presión atmosférica en [kPa].

H = altitud en [m]

Este factor debe ser aplicado a la tensión crítica de flameo elevado a un exponente “m”, el cual se puede aproximar según la gráfica correspondiente en la especificación.

$$TCF_R = TCF \left(\frac{b_0}{b}\right)^m \dots (3.2)$$

Donde:

- TCF_R = tensión crítica de flameo requerida o corregida
- TCF = tensión crítica de flameo sin corregir

3.3.3 Niveles de contaminación

Los aislamientos externos se ven afectados por otro factor ambiental que es el nivel de contaminación, en el caso de los aisladores, impacta en la distancia de fuga de estos pues la acumulación de residuos en los aisladores puede formar caminos que pueden ocasionar que se presenten descargas disruptivas en el aislamiento (flameo), esta consecuencia puede ser acrecentada por presencia de lluvia, niebla o nieve.

Se considera que se tienen tres tipos de contaminación dadas las condiciones de la zona que son: salina, desértica e industrial y dependiendo de esto se considera un nivel de contaminación ligero, medio, pesado y muy pesado. Adicionalmente, el nivel de contaminación se mide por la cantidad de miligramos de sal que se acumulan en cada centímetro cuadrado en la superficie de un aislador y se le conoce bajo el nombre de *Densidad Equivalente de Sal Depositada (DESD)* en [mg/cm²], este factor permite establecer intervalos de valores para los cuales se consideran los distintos niveles.

Por otra parte, el nivel de contaminación también puede ser asociado con un factor de distancia de fuga mínima específica (Kfe, de fase a fase) que se mide en [mm/kV], este dato es usado con mayor frecuencia como factor de corrección para

la distancia de fuga. En la siguiente tabla se muestran los niveles de contaminación con sus características y valores correspondientes.

Tabla 4
Niveles de contaminación

Nivel de contaminación	Características de las zonas	DESD [mg/cm ²]	Distancia de fuga mínima (Kfe) [mm/kV]
Ligera	<ul style="list-style-type: none"> *Alejadas del mar (por lo menos 10 a 20 km). *Con baja o nula densidad de industria y población (equipadas con calefacción) *Agrícolas o montañosas. 	<0.08	16
Media	<ul style="list-style-type: none"> *Con industrias que producen humo particularmente contaminante. *Con densidad promedio de casa con calefacción equipada. *Sujetas a frecuentes vientos y/o lluvia. *No demasiado cerca de la costa. 	0.08≤ y ≤ 0.25	20
Alta	<ul style="list-style-type: none"> *Alta densidad de industrias y grandes ciudades que en conjunto producen contaminación. *Cercanas al mar o expuestas a los vientos provenientes de este. 	0.25< y ≤ 0.60	25
Muy alta	<ul style="list-style-type: none"> *De extensión moderada y expuestas a polvos conductivos y humos industriales. *De extensión moderada y muy cerca de la costa, expuestas a brisa y vientos marítimos (fuertes) con altos contenidos de sal. *Desérticas con climas áridos (poca probabilidad de lluvia) con altos índices de arena y sal. 	0.60>	31

Para determinar la distancia de fuga se utiliza la siguiente expresión que relaciona el factor de distancia de fuga mínima específica (Kfe) con la tensión máxima de diseño de fase a fase (que a menudo es la tensión máxima del sistema).

$$D_f = Kfe * V_d \dots (3.3)$$

3.3.4 Distancias de aislamiento en aire

Las distancias mínimas dieléctricas en aire varían dependiendo de varios factores como la disposición de los conductores, la resistencia del aire con respecto a esfuerzos provocados por impulso de rayo y por maniobra, los factores ambientales antes descritos (la presión atmosférica y nivel de contaminación) así como la humedad y temperatura, aunque estos dos últimos, para fines de diseño y coordinación, se considera que se anulan entre sí.

El dimensionamiento dieléctrico tiene una fundamentación más empírica basada en la física de las descargas y sus aplicaciones son diversas y en cada caso se aplica un criterio diferente de dimensionado dependiendo del caso en particular, los mismos factores que se consideran para una línea de transmisión se consideran para una subestación eléctrica, solo cambian los factores según sea el caso. Diversos estudios se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo que han conducido a los resultados experimentales que se aplican al diseño y entre los más significativos se encuentran los desarrollados por L. Paris en Italia y por Gallet y Leroy en Francia, los cuales, cada quien por su parte realizaron los estudios que condujeron a las expresiones que se usan hoy en día para el diseño.^[7]

Las distancias mínimas dieléctricas en aire básicamente son dos; las distancias de fase a tierra (D_{f-t}) y las distancias de fase a fase (D_{f-f}), las cuales se obtienen de las expresiones que se describen más adelante.

Es importante mencionar que en instalaciones eléctricas cuya tensión supera los 245 [kV] (Categoría II) se considera que el efecto de impulso por maniobra es mayor que el de impulso por rayo, por tal motivo, para sistemas que entran en esta categoría el diseño se hace utilizando el nivel básico de aislamiento al impulso por maniobra (**NBAM**). Por otra parte, en los sistemas cuya tensión es hasta 245 [kV] (Categoría I) se considera que el efecto del impulso por rayo no difiere mucho del impulso por maniobra por lo cual se utiliza el nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (**NBAI**).

[7] Técnicas de las altas tensiones, Ing. Gilberto Enríquez Harper, Vol. 1, 2ª Edición, Editorial LIMUSA, México 1980.

Tensión Crítica de Flameo

Para impulso por rayo:

$$NBAI = TCF(1.0 - 1.3\sigma) \dots (3.4)$$

Donde σ es la desviación estándar y para este caso es del 3% con lo cual la expresión final queda:

$$NBAI = 0.961 * TCF \dots (3.5)$$

Para impulso por maniobra:

$$NBAM = TCM(1.0 - 1.3\sigma) \dots (3.6)$$

Donde σ es la desviación estándar y para este caso es del 6% con lo cual la expresión final queda:

$$NBAM = 0.922 * TCF \dots (3.7)$$

De las expresiones anteriores los valores de **NBAI** y **NBAM** se obtienen de Tablas 2 y 3 de este capítulo, y se despeja la tensión crítica de flameo **TCF**.

Distancia de Fase a Tierra

Para categoría I, tensiones de hasta 245 [kV] y hasta 1000 msnm, considerando condiciones estándar (o normalizadas), la distancia de fase a tierra se calcula despejándola de la siguiente expresión.

$$TCF = k_3 * D_{f-t} [kV] \dots (3.8)$$

Donde:

- D_{f-t} = distancia de fase a tierra.
- k_3 = factor "Gap" de acuerdo con el arreglo de los electrodos según la Tabla 5 en este capítulo.

El factor "Gap" que se usa para esta expresión es usualmente $k_3 = 550$ para la mayoría de los arreglos que se pueden ver en la Tabla 5, con excepción de los arreglos punta-plano y varilla-varilla donde el factor $k_3 = 480$.

Para categoría II, tensiones superiores a 245 [kV] y hasta 1000 msnm, condiciones normalizadas, la distancia de fase a tierra se puede calcular de dos formas dependiendo de si se considera o no un tiempo de retardo de la descarga de la onda de impulso por maniobra.

- 1) Sin considerar tiempo de retardo.

$$TCM = 500 * k_2 * D_{f-t}^{0.6} [kV] \dots (3.9)$$

2) Considerando tiempo de retardo.

$$TCM = \frac{3400 k_2}{1 + \frac{8}{D_{f-t}}} \dots (3.10)$$

Donde:

- k_2 = factor de "Gap" según la Tabla 5.

Distancia de Fase a Fase

Para impulso por rayo, tensiones de hasta 245 [kV] y hasta 1000 msnm.

$$TCF = 520.29 * D_{f-f} \dots (3.11)$$

Para impulso por maniobra, tensiones mayores a 245[kV] y hasta 1000 msnm.

1) $D_{f-f} = 1.8 * TCM^{1.6} \dots (3.12.1).$

2) $D_{f-f} = 2.0 * TCM^{1.7} \dots (3.12.2).$

Donde **TCM** está expresada en [MV].

La expresión (3.12.1) se utiliza para configuraciones simétricas entre electrodos y barras rígidas, mientras que la expresión (3.12.2) se aplica en configuraciones asimétricas entre electrodos y en barras soportadas por aisladores.

Cálculo de aisladores para formar cadenas

Por distancia de fase a tierra:

$$\# \text{ Aisladores} = \frac{D_{f-t}}{D_{f-t} \text{ del aislador}} \dots (3.13.1)$$

Por distancia de fuga:

$$\# \text{ Aisladores} = \frac{D_f}{D_f \text{ del aislador}} \dots (3.13.2)$$

Tabla 5
Factores “Gap” de acuerdo al arreglo de electrodos

Arreglo	Ilustraciones	k_1	k_2	k_3
Conductor-estructura (Línea de transmisión)		1.40	1.25	550
Conductor-ventana		1.30	1.20	550
Conductor-suelo		1.30	1.10	550
Conductor-objeto a tierra		1.45	1.35	550
Varilla-varilla		1.20	1.40	480
Punta-plano		1.20	1.00	480
Conductor-estructura		1.45	1.35	550
Conductor-conductor (Sobretensión f-f)		-	1.50	550
Anillo equipotencial- anillo equipotencial		-	1.50	550

3.4 Aplicación del método

A continuación, se mostrarán tres casos prácticos con el fin de ilustrar el procedimiento de coordinación de aislamiento antes descrito, cada uno mostrará un nivel de tensión diferente que caracterizará cada una de las dos categorías que establece la norma, se determinarán las distancias mínimas dieléctricas con las cuales será posible seleccionar los aisladores. El procedimiento aplicado, como ya se ha dicho, es el establecido en las especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad; **L0000-06** (de 1980 y 1991) y **L0000-41**.

3.4.1 Línea de transmisión 1, Torreón

Para el siguiente ejemplo se supone una línea ubicada en Juan Eugenio, Torreón, Coahuila con coordenadas $25^{\circ}17'22.092''N$ y $103^{\circ}30'00.906''W$ (Ver *Figura 3.1*) donde se definen los siguientes parámetros para su estudio; nivel de tensión de 34.5 [kV], la región está ubicada a 1200 msnm, el nivel de contaminación se define como 16 [mm/kV] (ligero) debido a que se trata de un área rural con un asentamiento de casas relativamente pequeño y se sitúa a varios kilómetros del mar y las zonas industriales.



Figura 3.1 Vista satelital de la región Juan Eugenio

Entonces, según la *Tabla 3* y de acuerdo con el nivel tensión antes mencionado se obtiene que la tensión máxima de operación es de 38 [kV], con base en este se selecciona el nivel básico de aislamiento al impulso correspondiente a esa tensión, el cual es $NBAI = 200$ [kV], según dicha tabla.

- 1) Se determina factor de corrección por altitud: de acuerdo con los datos del caso se tiene que la instalación se llevaría a cabo en una zona cuya altitud es de 1200 msnm, por lo cual, según la especificación, se requiere efectuar una corrección por altitud (presión atmosférica).

$$\frac{b_0}{b} = e^{\left(\frac{H}{8150}\right)} = e^{\left(\frac{1200}{8150}\right)} = \mathbf{1.1586}$$

- 2) Determinar distancia de fuga: usando el factor de distancia de fuga específica dado el nivel de contaminación (Ver *Tabla 4*) se obtiene lo siguiente.

$$D_f = Kfe * V_d = \left(16 \left[\frac{mm}{kV}\right]\right) (38 [kV]) = \mathbf{0.608 [mm]}$$

- 3) Determinar distancia de fase a tierra: dado el factor de corrección $\frac{b_0}{b}$ se multiplicará por la tensión crítica de flameo que se calcula a continuación para poder obtener la distancia de fase a tierra.

$$TCF = \frac{NBAI}{0.961} = \frac{200 [kV]}{0.961} = 208.1165 [kV]$$

$$TCF_R = TCF * \frac{b_0}{b} = (208.1165 [kV])(1.1586) = 241.1237 [kV]$$

$$D_{f-t} = \frac{241.1237}{550} = \mathbf{0.4384 [m]}$$

- 4) Determinar distancia de fase a fase: para esto se ocupará el **NBAI** de fase a fase (el cual es el mismo que el de fase a tierra).

$$D_{f-f} = \frac{TCF}{520.29} = \frac{(241.1237)}{520.29} = \mathbf{0.8027 [m]}$$

Una vez obtenidas las distancias mínimas dieléctricas se pueden seleccionar los aisladores, para este caso, dado el nivel de tensión y que el nivel de contaminación es ligero se seleccionarán aisladores de porcelana tipo poste por lo cual será necesario recurrir a la especificación de CFE 52000-91 la cual establece los requisitos mínimos y nomenclatura para la selección de estos dispositivos, los aisladores de porcelana tienen una gran resistencia mecánica y son ideales para niveles de contaminación ligeros.

3.4.2 Línea de transmisión 2, Coatzacoalcos

Para este ejemplo se supone una línea ubicada en Coatzacoalcos, Veracruz cuyas coordenadas son $18^{\circ}08'16.378''N$ y $94^{\circ}27'10.805''W$ (Ver *Figura 3.2*) donde se definen los siguientes parámetros; Tensión nominal de 115 [kV], la región se ubica a 20 msnm y su nivel de contaminación se clasifica como alto de 31 [mm/kV] dada su cercanía al mar y a que está cercana a centros de explotación petrolera por lo cual se considera que posee contaminación de tipo salina e industrial.

Utilizando la *Tabla 3* se observa que su tensión máxima de operación es 123 [kV] a la cual le corresponde un nivel básico de aislamiento al impulso por rayo de $NBAI = 550$ [kV], refiriéndose de nuevo al valor máximo característico de este.

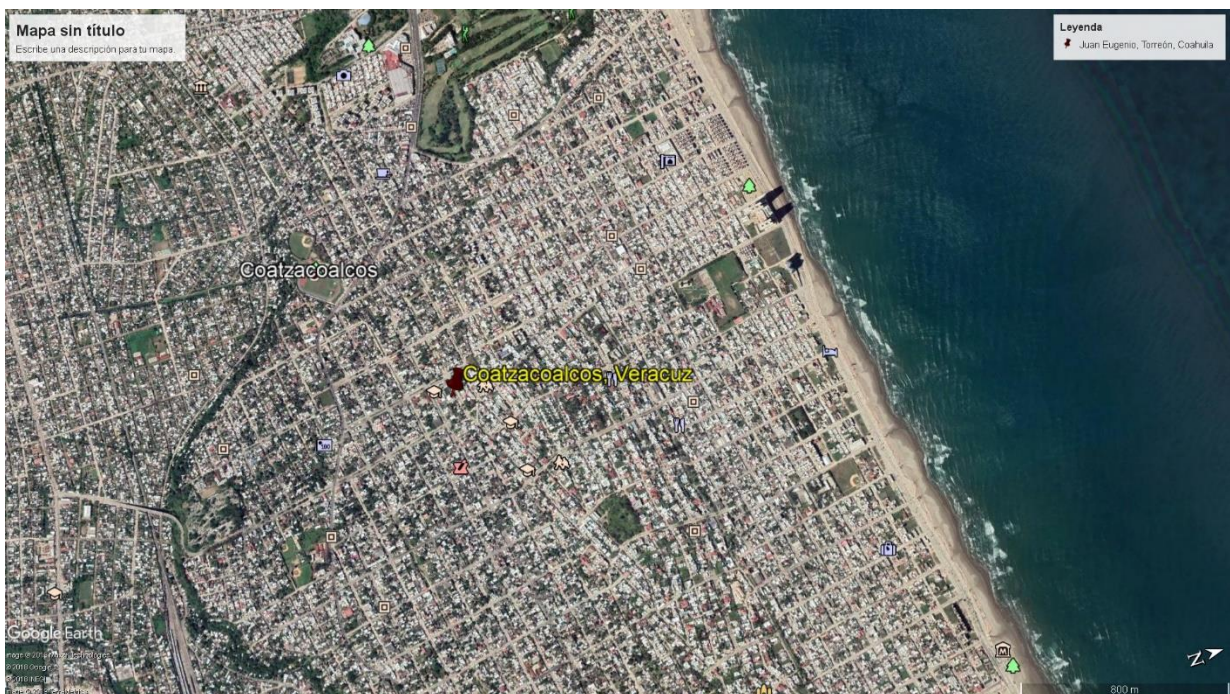


Figura 3.2 Vista satelital de la región Coatzacoalcos, Veracruz

Entonces, ya que la altura en del sitio es de 20 msnm no es necesario aplicar un factor de corrección por altura, entonces el cálculo empieza con lo siguiente.

- 1) Cálculo de distancia de fuga:

$$D_f = Kfe * V_d = \left(31 \left[\frac{mm}{kV} \right] \right) (123 [kV]) = 3813 [mm]$$

2) Cálculo de distancia de fase a tierra:

$$TCF = \frac{NBAI}{0.961} = \frac{550 [kV]}{0.961} = 572.32 [kV]$$
$$D_{f-t} = \frac{572.32}{550} = 1.0405 [m]$$

3) Cálculo de distancia de fase a fase:

$$D_{f-f} = \frac{TCF}{520.29} = \frac{(572.32)}{520.29} = 1.10 [m]$$

La CFE establece para sistemas instalados hasta 1000 msnm distancias mínimas recomendables que pueden aplicarse a la instalación, para un sistema con el nivel de tensión de este ejemplo, se establece que las distancias recomendadas son las siguientes:

$$D_{f-t} = 900 [mm]$$

$$D_{f-f} = 900 [mm]$$

Se puede considerar que las distancias calculadas son correctas pues exceden, dentro de lo razonable, las distancias recomendadas para el diseño por la especificación, por lo cual se tomarán para este fin. Los aisladores para este caso, dado el nivel alto de contaminación de la zona, serán poliméricos ya que los materiales sintéticos ofrecen mayor resistencia al desgaste por contaminación y a que esta se impregne en el esbozo del aislador, se usará la especificación de CFE 52100-65 para su selección.

3.4.3 Línea de transmisión 3, Zumpango

Se supone una línea de transmisión ubicada en Zumpango, Estado de México cuyas coordenadas son 19°47'49.643"N y 099°06'02.282"W (Ver *Figura 3.3*) donde se definen los siguientes parámetros; tensión nominal de 400 [kV], la región se encuentra a una altura de 2262 msnm y su nivel de contaminación se supone de 25 [mm/kV] (media) ya que la región se describe como una zona urbana, alejada del mar.

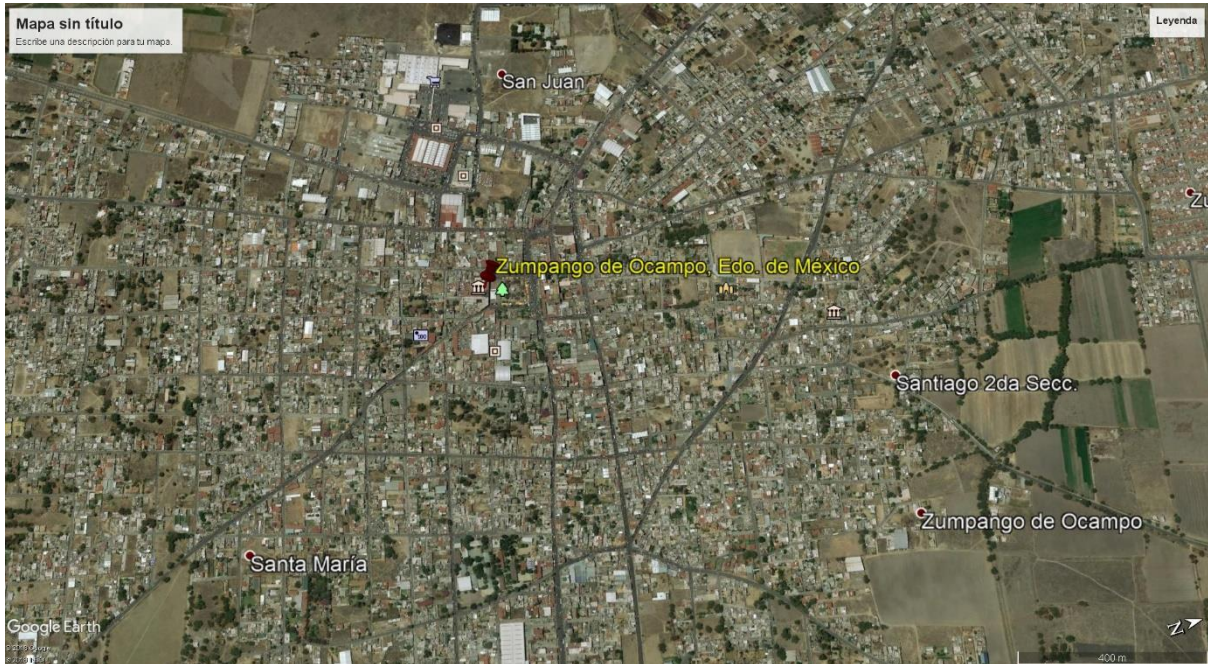


Figura 3.3 Vista satelital de la región Zumpango, Edo. de México

Según la *Tabla 3* se tiene que la tensión máxima de operación del sistema es de 420 [kV], por lo tanto, es un sistema de categoría II, como se dijo anteriormente, para este nivel de tensión se requiere usar el nivel básico de aislamiento al impulso por maniobra y este cuenta con dos valores, un valor de fase a tierra y un valor de fase a fase, los cuales son distintos y se ocuparán ambos valores para los cálculos, además se tiene una altitud considerable y se debe usar factor de corrección.

- 1) Factor de corrección por altitud: en este punto es importante destacar que el factor está elevado a un exponente “m” el cual se considera igual a 1 en la mayoría de los sistemas de categoría I, sin embargo, para esta categoría el exponente es menor y debe aproximarse usando la gráfica de la *Figura 3.4* con la cual se obtuvieron los valores que se utilizaron a continuación en el cálculo.

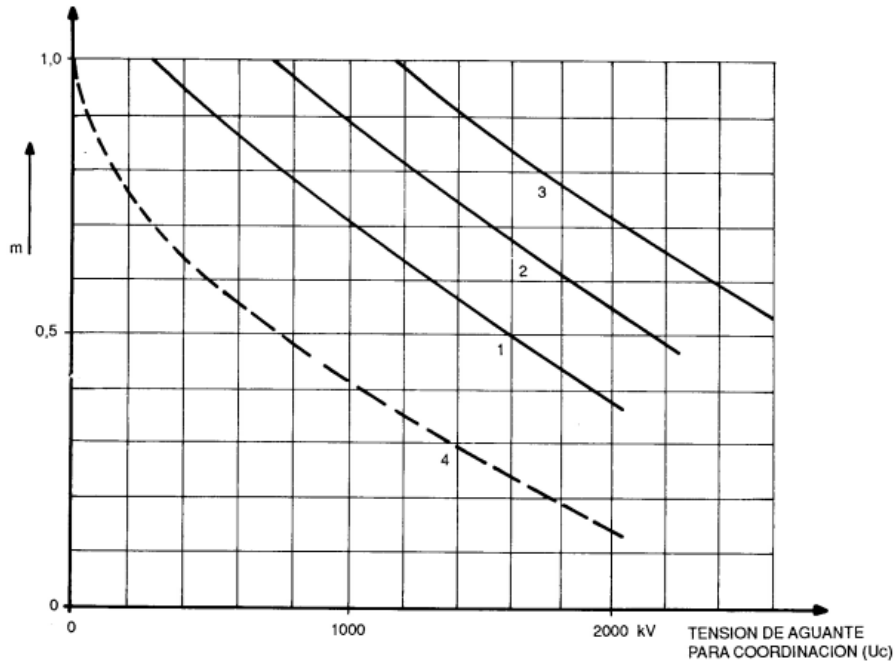


Figura 6.- Valores del exponente "m" para la corrección de la tensión nominal de impulso de maniobra para coordinación.

Figura 3.4 Gráfica factor "m"

NOTA: Figura 6, página 25 de especificación CFE L0000-06

Para el caso de $NBAM = 1050$ [kV] (aislamiento Fase- Tierra, curva 1 de Figura 3.4) y $m = 0.67$:

$$\left(\frac{b_0}{b}\right)^m = e^{(m)\left(\frac{H}{8150}\right)} = e^{(0.67)\left(\frac{2262}{8150}\right)} = \mathbf{1.2043}$$

Según la especificación **L0000-06** el valor de $NBAM$ de fase a fase es 1.5 veces el de fase a tierra por lo cual $NBAM = 1575$ [kV] y $m = 0.8$ (aislamiento Fase-Fase, curva 3).

$$\left(\frac{b_0}{b}\right)^m = e^{(m)\left(\frac{H}{8150}\right)} = e^{(0.80)\left(\frac{2262}{8150}\right)} = \mathbf{1.2486}$$

2) Cálculo de distancia de fuga:

$$D_f = Kfe * V_d = \left(25 \left[\frac{mm}{kV}\right]\right) (420 [kV]) = \mathbf{10,500 [mm]}$$

- 3) Cálculo de distancia de fase a tierra: usando el factor de corrección correspondiente se tiene que la tensión crítica de flameo por maniobra es la siguiente.

$$TCF = \frac{NBAM}{0.922} = \frac{1050 [kV]}{0.922} = 1138.8286 [kV]$$

$$TCF_R = TCF * \frac{b_0}{b} = (1138.8286[kV])(1.2043) = 1,371.4912 [kV]$$

Sin considerar tiempo de retardo en la onda de descarga de impulso por maniobra:

$$D_{f-t} = \left(\frac{TCM}{500 * k_2} \right)^{\frac{1}{0.6}} = \left(\frac{1371.49}{500 * 1.25} \right)^{\frac{1}{0.6}} = \mathbf{3.70 [m]}$$

Donde $k_2 = 1.25$ según el factor de Gap (Tabla 5) y el arreglo de conductores en "V" conductor-estructura para una línea de transmisión.

Considerando tiempo de retardo en la onda de descarga de impulso por maniobra:

$$D_{f-t} = \frac{8 TCM}{(3400 * k_2) - TCM} = \frac{(8)(1371.49[kV])}{(3400 * 1.25) - 1371.49 [kV]} = \mathbf{3.81 [m]}$$

El valor obtenido con la última fórmula es el que se ocupa para fines de diseño por representar la distancia más grande y segura.

- 4) Distancia de fase a fase: Para este cálculo se requiere modificar la **TCM** utilizando el valor de fase a fase de $NBAM = 1575 [kV]$.

$$TCF = \frac{NBAM}{0.922} = \frac{1575 [kV]}{0.922} = 1708.24 [kV]$$

Aplicando factor de corrección.

$$TCF_R = TCF * \frac{b_0}{b} = (1708.24[kV])(1.2486) = 2,132.9084 [kV]$$

Con lo cual la distancia de fase a fase es.

$$D_{f-f} = 2.0 * TCM^{1.7} = (2.0)(2.1329 [MV])^{1.7} = \mathbf{7.24 [m]}$$

Una vez obtenidas las distancias es posible calcular el número de discos que llevará la cadena con base en dos criterios, por distancia de fuga y por distancia de fase a tierra, siendo este último el de mayor prioridad. Para este caso se usarán aisladores tipo suspensión de vidrio templado debido a que su resistencia mecánica al formar cadenas es más grande para claros largos como los que caracterizan a este tipo de sistemas, se debe usar la especificación **CFE 52210-02**.

Tabla 6. Resultados

Casos de estudio	Factor de corrección por altitud	Tensión Crítica de Flameo [kV]	Distancia de fuga D_f [mm]	Distancia Fase-Tierra D_{f-t} [m]	Distancia Fase-Fase D_{f-f} [m]
1	1.1586	241.12	608	0.4384	0.8027
2	N/A	572.32	3,813	1.0405	1.10
3	1.2043 1.2486	1371.49 2132.90	10,500	3.81	7.24

3.5 Selección de aisladores y herrajes

Para entender de mejor manera la función que cumplen los aisladores armados en conjuntos que se conocen como cadenas y sus respectivos herrajes, se tiene que hablar de cómo es el reparto de potencial eléctrico en estos elementos, hay que recordar que estos cumplen una función eléctrica y otra mecánica, la primera como elemento aislante entre el potencial de los conductores y las estructuras que los soportan y la segunda fungiendo como medio de fijación mecánica de los conductores.

El potencial existente entre el conductor y el herraje de fijación a la estructura no se reparte de manera uniforme a través de la cadena, de modo que, cada elemento de esta (aisladores tipo suspensión) soporta un porcentaje diferente de potencial, siendo este más pequeño conforme el elemento está más lejano del conductor y más grande en el elemento más cercano a este.

Para explicar lo anterior es necesario decir que una cadena de aisladores se comporta como un conjunto de capacitores conectados en serie (y en derivación con respecto a tierra) como se puede ver en la Figura 3.5a). El reparto no uniforme

del gradiente de potencial se debe principalmente a las longitudes de los herrajes propios de los aisladores con respecto al punto de anclaje, entonces cada elemento está siendo recorrido por una corriente de capacidad distinta y se adiciona la capacidad de cada elemento a tierra.

El cálculo de las tensiones parciales correspondientes a cada elemento podría realizarse, sin embargo, el resultado difiere mucho del obtenido de forma experimental, ya que también se debe tomar en cuenta el efecto de fuga superficial de corriente, el cual es proporcional a la tensión entre armaduras de cada elemento y que actúa en parte como efecto compensador al desigual reparto de las corrientes de capacidad en cada elemento.^[8]

En la Figura 3.5b) se puede observar de una manera aproximada como es la distribución de potencial en una cadena de aisladores siendo en el más cercano al conductor el que carga con la mayor parte de la diferencia de potencial.

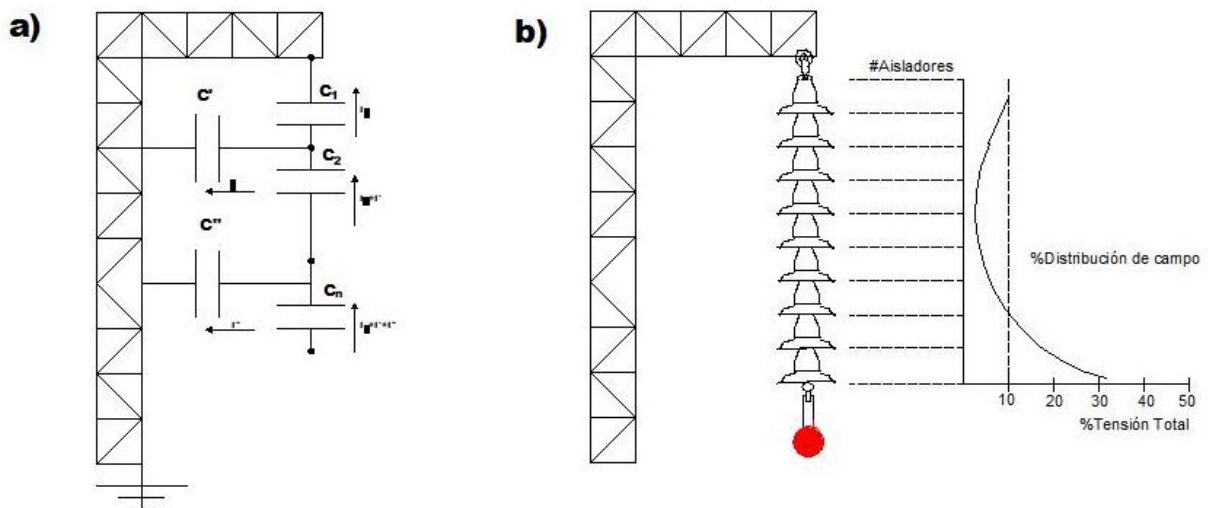


Figura 3.5 a) Comportamiento de aisladores en cadena. b) Distribución de campo en cadena de aisladores

Ante el fenómeno antes mencionado se han llegado a tomar medidas que en la práctica se han hecho muy frecuentes como por ejemplo la adición de un aislador de mayores dimensiones a los escogidos para conformar la cadena de modo que este suple el lugar del más cercano al conductor, también, adicionar un herraje de protección al conjunto el cual suele ser instalado en extremos de la cadena, es decir, en el punto de remate a la estructura y en la grapa de suspensión del conductor, estos herrajes generalmente contruidos de material tubular, consiguen un reparto

[8] Instalaciones Eléctricas generales, Enciclopedia CEAC de electricidad, José Ramírez Vázquez, 7ª Edición, Editorial Ediciones CEAC, Barcelona (España) 1990.

más uniforme entre los elementos de la cadena, con respecto al antes mencionado e ilustrado en la Figura 3.5b).

Una vez explicado de manera detallada el funcionamiento de los conjuntos de aisladores en este apartado se continuará con la selección de aisladores y sus respectivos herrajes para cada caso analizado, para esto, se usarán las siguientes especificaciones:

- ✓ **CFE 52000-91**: aisladores tipo poste
- ✓ **CFE 52100-65**: aisladores sintéticos de tipo suspensión para tensiones de 13.8 [kV] hasta 138 [kV].
- ✓ **CFE 52210-02**: aisladores tipo suspensión de porcelana o de vidrio templado.
- ✓ **CFE 21000-01**: herrajes y sus accesorios.
- ✓ **NRF-043-CFE-2011**: herrajes y conjuntos de herrajes para líneas de transmisión aéreas de 69 [kV] a 400 [kV].

3.5.1 Línea de transmisión 1, Torreón

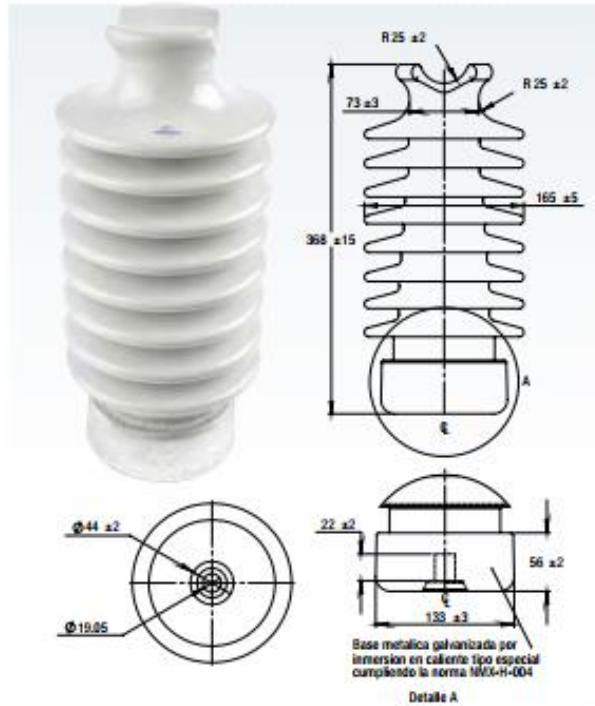
Los datos relevantes para culminar el ejemplo del punto 3.4.1 son las distancias obtenidas y el nivel de tensión.

$$V_n = 34.5 \text{ [kV]}, D_f = 0.608 \text{ [mm]}, D_{f-t} = 0.4384 \text{ [mm]}, D_{f-f} = 0.8027 \text{ [mm]}$$

Basados en la especificación 52000-91 se escogen aisladores con la nomenclatura **33PDPG1**.

Abreviatura	Descripción
33	Para tensión de 34.5 [kV]
P	Para instalación en postes de acero, fibra de vidrio y concreto (tensión nominal hasta 34.5 [kV]).
D	Para zonas con descargas atmosféricas ya que el nivel de contaminación de la zona es ligero.
P	Material del aislador, porcelana en este caso.
G	Material del herraje, acero o hierro nodular galvanizado por inmersión en caliente para este caso.
1	Abreviación que corresponde a $K_{fe} \geq 20 \text{ [mm/kV]}$

Usando las tablas de la especificación que se muestran en la Figura A1 y Figura A2 (Ver Anexo) y comparando con las características de los productos del fabricante **ANKER ELECTRIC** de acuerdo con su catálogo se escogió el aislador tipo poste que se puede observar en la Figura 3.6.



● AISLADOR
33 PD

ESPECIFICACIONES

CARACTERÍSTICAS	VALORES CFE	VALORES DE PRUEBAS
TENSIÓN MÁXIMA DE DISEÑO EN KV		38
DESCRIPCIÓN CORTA		33PDPG1
TENSIÓN NOMINAL DEL SISTEMA EN KV		34.5
PRUEBAS ELÉCTRICAS		
FLAMEO EN SECO EN KV	125	125
FLAMEO EN HÚMEDO EN KV	95	100
TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO AL IMPULSO POR RAYO EN KV	200	210
SALINIDAD EN KG/M3	14	16
TENSIÓN DE PRUEBA 60 HZ, FASE TIERRA EN KV	22	25
TENSIÓN DE RADIINTERFERENCIA EN µV	200	200
TENSIÓN DE PRUEBA 60 HZ EN KV	30	30
DISTANCIA MÍNIMA DE FUGA EN MM	760	783
DISTANCIA DE FUGA 1= DISTANCIA ESPECÍFICA DE FUGA MAYOR A 20 MM / KV		
DISTANCIA MÍNIMA DE ARCO EN SECO EN MM	sin valor	311
PRUEBAS MECÁNICAS		
RESISTENCIA MÍNIMA A LA FLEXIÓN EN KN	12,5	12,5

Figura 3.6 Aislador tipo poste para 34.5 [kV]

Herrajes

Para los herrajes en este caso, es necesario saber el tipo de estructura sobre la cual se van a montar los aisladores y conductores, para esto, se tomará como base la especificación **CFE DCCIAMBT: Construcción de instalaciones aéreas en media y baja tensión** donde se ilustran los diversos tipos de estructuras de acuerdo con el arreglo de conductor, tipos de crucetas y aisladores a usar. Basado en lo anterior se determina una estructura de tipo **VS3N** (poste de concreto) con la cual se usarían los siguientes herrajes:

Tabla 7. Listado de herrajes para aislador tipo poste

Catalogo	Descripción	Especificación CFE
CONHESA Código CRUPV-03	Cruceta PV250 , longitud total de 2.5[m], perfil tubular de 101.6 mm x 50.8 mm espesor de 1.9 [mm], dados de acero de 4.56 [mm] de espesor. (ver Figura 3.7.1)	2C900-93
CONHESA Código ABUC-01	Abrazadera en U para fijar cruceta a poste, 2 tuercas hexagonales de 15.88 [mm] + 2 arandelas de presión, 194 [mm] A, 250 [mm] B, 110 [mm] C, 1.06 [kg]. (ver Figura 3.7.2)	2A100-05
CONHESA Código PL-04	Placa PR , para distribuir esfuerzos mecánicos en crucetas PV, placa o solera de acero de 101.6x50.8x6.35 [mm], diámetro 18 [mm], peso 0.27 [kg]. (ver Figura 3.7.3)	2C900-89
CONHESA Código ALFLP-01	Alfiler Line Post , para soportar aisladores tipo PD, redondo de 16 [mm], tuerca hexagonal + arandela de presión de 16 [mm], galvanizado por inmersión en caliente. (ver Figura 3.7.4)	-
CONHESA Código TIRA-01	Tirante T2 , soporte para cruceta de estructura volada, galvanizado por inmersión en caliente. (ver Figura 3.7.5)	2T400-48
CONHESA Código ABBS-01	Abrazadera 1BS , para fijar soportes angulares, solera de acero de 6.35x38.10 [mm], 2 tornillos máquina cabeza hexagonal de 12.7x76.2 [mm], 2 tuercas hexagonales + 2 arandelas de presión, diámetro de 170 [mm]. (ver Figura 3.7.6)	2A100-04
CONHESA Código TORM-15	Tornillo 16x76 , para sujetar herrajes en estructuras, cabeza hexagonal grado A con rosca UNC 2A, tuerca hexagonal + arandela de presión, galvanizado por inmersión en caliente.	67B00-04

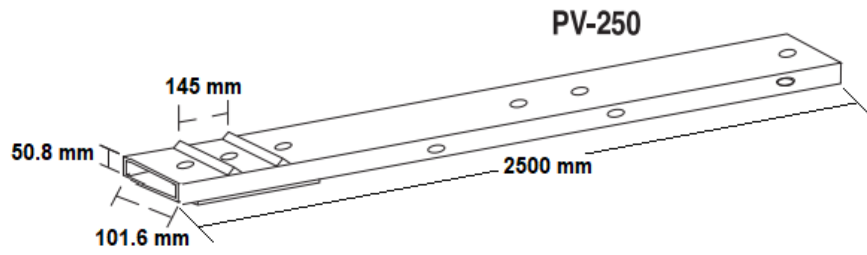


Figura 3.7.1 Detalle y dimensiones Cruceta PV250

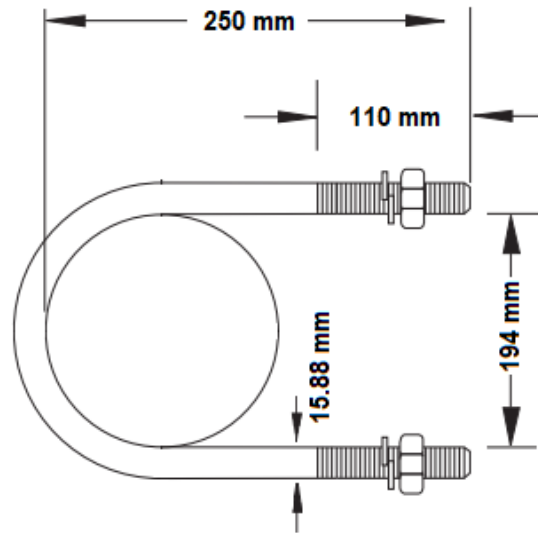


Figura 3.7.2 Detalle y dimensiones Abrazadera U

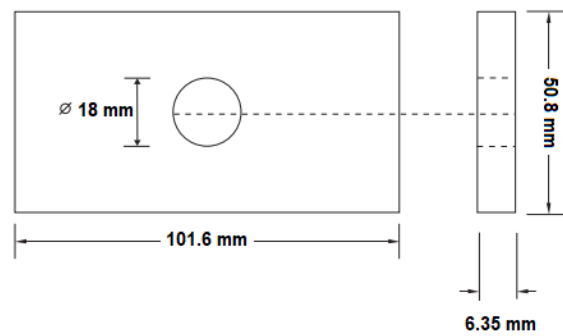


Figura 3.7.3 Detalle y dimensiones Placa PR

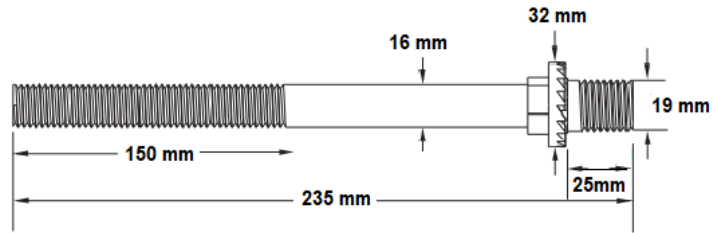


Figura 3.7.4 Detalle y dimensiones Alfiler de sujeción para aisladores PD

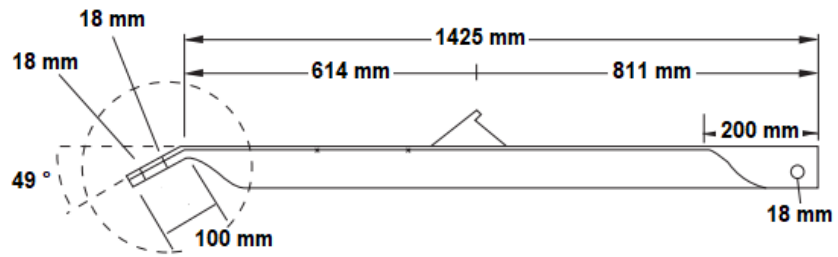


Figura 3.7.5 Detalle y dimensiones Tirante T2

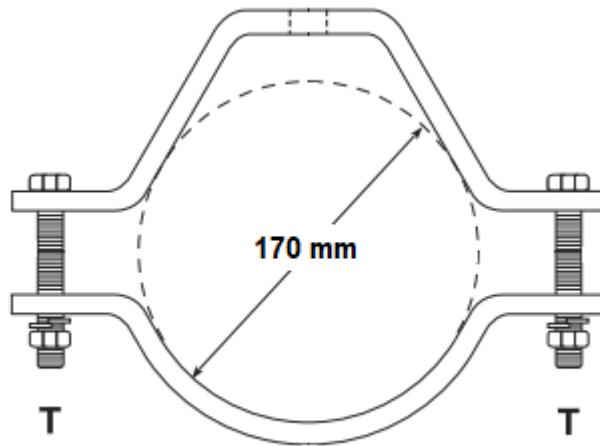


Figura 3.7.6 Detalle y dimensiones Abrazadera 1BS

NOTA: Detalles y dimensiones de herrajes obtenidas del catálogo de CONHESA.

3.5.2 Línea de transmisión 2, Coatzacoalcos

Los datos relevantes para culminar el ejemplo del punto 3.4.2 son las distancias obtenidas y el nivel de tensión.

$$V_n = 115 [kV], D_f = 3813 [mm], D_{f-t} = 1.0405 [m], D_{f-f} = 1.10 [m]$$

Según la especificación 52100-65, la designación del aislador debería ser:

8S YB 120 e2

Abreviatura	Descripción
115	Para sistemas de hasta 115 [kV].
S	Material de la envolvente que será de hule de silicón.
YB	Es el conjunto de herrajes a usar, Y-Clevis para la parte superior y bola para la inferior.
120	Resistencia mecánica de 120 [kN].
e	Para nivel de contaminación "Muy alto".
A	Material de los herrajes, "A" para acero forjado galvanizado y "G" para hierro nodular galvanizado.

Usando las tablas de la especificación que se muestran en la Figura A3 y Figura A4 (Ver Anexo) y comparando con los productos del fabricante IUSA en su catálogo de productos para media y alta tensión se eligió el siguiente aislador.

SINTÉTICO TIPO SUSPENSIÓN

Descripción general

» Está formado, al menos, de dos partes aislantes llamadas núcleo y una cubierta de hule silicón.

Características

» Está equipado con herrajes metálicos, conectores Y-Clevis-Bola (YB), Calavera-Bola (SB) y Horquilla-Lengua (HL).
» A partir de tensiones eléctricas de 115 kV se suministran con aro equipotencial.

Aplicaciones

» Para uso en tensión o suspensión del conductor eléctrico.

Ventajas

» Tiene un reducido peso que facilita su manejo e instalación.

Normas aplicables

» CFE 52100-65
» IEC 60587
» IEC 61109
» IEC 61952
» IEC 62217

Acotación

» 13=13,8 kV: Tensión eléctrica nominal
» 22=23 kV: Tensión eléctrica nominal
» 33=34,5 kV: Tensión eléctrica nominal
» 69=69 kV: Tensión eléctrica nominal
» 115=115 kV: Tensión eléctrica nominal
» 138=138 kV: Tensión eléctrica nominal
» S: Envolvente de hule silicón
» 5: Herraje de acoplamiento calavera
» B: Herraje de acoplamiento bola
» L: Herraje de acoplamiento lengua
» H: Herraje de acoplamiento horquilla
» C: Herraje de acoplamiento clevis
» Y: Herraje de acoplamiento y-clevis
» 45: Carga mecánica especificada
» 70: Carga mecánica especificada
» 120: Carga mecánica especificada
» d: Alta contaminación
» e: Muy alta contaminación
» G: Hierro nodular galvanizado
» A: Acero forjado

Anotación

» En caso de que la distancia de fuga no sea cubierta para un nivel de tensión se debe utilizar el aislador sintético inmediato superior que cumpla con la de distancia de fuga establecida.



CODIGO	CAT.	DESCRIPCIÓN	MASTER	CODIGO	CAT.	DESCRIPCIÓN	MASTER
339072	ASSI-15	Aislador sintético tipo suspensión 15 kV	16	213010	ASSI-69C-5YB	Aislador sintético tipo suspensión 69 kV muy alta contaminación 5YB	1
339073	ASSI-25	Aislador sintético tipo suspensión 25 kV	16	-	ASSI-69N-5SB	Aislador sintético tipo suspensión 69 kV alta contaminación 5SB	1
339074	ASSI-35	Aislador sintético tipo suspensión 35 kV	16	-	ASSI-69C-5SB	Aislador sintético tipo suspensión 69 kV muy alta contaminación 5SB	1
375122	ASSI-15-70	Aislador sintético tipo suspensión 15 kV a 70 kN	16	-	ASSI-69N-SHL	Aislador sintético tipo suspensión 69 kV alta contaminación SHL	1
302459	ASSI-25-70	Aislador sintético tipo suspensión 25 kV a 70 kN	16	-	ASSI-69C-SHL	Aislador sintético tipo suspensión 69 kV muy alta contaminación SHL	1
302458	ASSI-35-70	Aislador sintético tipo suspensión 35 kV a 70 kN	16	217108	ASSI-115N-5YB	Aislador sintético tipo suspensión 115 kV alta contaminación 5YB	1
213011	ASSI-69N-5YB	Aislador sintético tipo suspensión 69 kV alta contaminación 5YB	1	217107	ASSI-115C-5YB	Aislador sintético tipo suspensión 115 kV muy alta contaminación 5YB	1

CARACTERÍSTICAS		ASSI-115N-SYB	ASSI-115C-SYB	ASSI-115N-SSB	ASSI-115C-SSB	ASSI-115N-SHL	ASSI-115C-SHL
Descripción corta CFE		115SYB120dA	115SYB120eA	115SSB120dA	115SSB120eA	115SHL120dA	115SHL120eA
Tensión nominal del sistema (kV)		115	115	115	115	115	115
Tensión máxima de diseño (kV)		123	123	123	123	123	123
Tensión de flameo a 60 Hz	En seco (kV)	370	370	370	370	370	370
	En húmedo (kV)	333	333	333	333	333	333
Tensión crítica de flameo al impulso polaridad	Positivo (kV)	612	612	612	612	612	612
	Negativo (kV)	-	-	-	-	-	-
Tensión máxima de radio de interferencia a 500 kHz (µV)		<10	<10	<10	<10	<10	<10
Distancia mínima de fuga (mm)		3 116	3 821	3 116	3 821	3 116	3 821
Resistencia mecánica	A la tensión (kN)	120	120	120	120	120	120
	A la torsión (N-m)	56	56	56	56	56	56
Masa neta aproximada (kg)		4,49	5,91	4,49	5,91	4,49	5,91

CARACTERÍSTICAS		ASSI-138N-SYB	ASSI-138C-SYB	ASSI-138N-SSB	ASSI-138C-SSB	ASSI-138N-SHL	ASSI-138C-SHL
Descripción corta CFE		138SYB120dA	138SYB120eA	138SSB120dA	138SSB120eA	138SHL120dA	138SHL120eA
Tensión nominal del sistema (kV)		138	138	138	138	138	138
Tensión máxima de diseño (kV)		145	145	145	145	145	145
Tensión de flameo a 60 Hz	En seco (kV)	450	450	450	450	450	450
	En húmedo (kV)	395	395	395	395	395	395
Tensión crítica de flameo al impulso polaridad	Positivo (kV)	715	715	715	715	715	715
	Negativo (kV)	735	735	735	735	735	735
Tensión máxima de radio de interferencia a 500 kHz (µV)		<10	<10	<10	<10	<10	<10
Distancia mínima de fuga (mm)		3 737	4 601	3 737	4 601	3 737	4 601
Resistencia mecánica	A la tensión (kN)	120	120	120	120	120	120
	A la torsión (N-m)	56	56	56	56	56	56
Masa neta aproximada (kg)		5,73	6,21	5,73	6,21	5,73	6,21

14

www.iusa.mx

Figura 3.8 Aislador polimérico marca IUSA

Herrajes

El arreglo que se considerará para la cadena de aisladores en este caso será en “I”, conjuntos en suspensión para un conductor por fase, tomando como referencia la especificación **NRF-043-CFE-2011**.

Tabla 8. Listado de herrajes para aislador tipo suspensión polimérico

Catalogo	Descripción	Especificación CFE
CECOHESA E-120	Eslabón de acero forjado galvanizado por inmersión en caliente, resistencia mecánica de 120 [kN], peso 0.18 [kg]. (ver Figura 3.9.1)	-
CECOHESA COLV-35	Calavera ojo larga ANSI 52.5, cuerpo de acero forjado galvanizado por inmersión en caliente, resistencia mecánica de 140 [kN], peso de 1.47 [kg]. (ver Figura 3.9.2)	-
CECOHESA GSLC-35	Grapa de suspensión libre de efecto corona para conductor ACSR de diámetro de 30.4-36.3 mm, resistencia mecánica de 111[kN], peso 2.09 [kg] y par apriete de 55 [Nm]. Cuerpo de aleación de aluminio y tornillera de acero galvanizado por inmersión en caliente. (ver Figura 3.9.3)	2C500-68

Se seleccionan los herrajes tomando en cuenta que el acabado del aislador polimérico ya cuenta con herrajes de conexión Y-Clevis (Horquilla “Y”) en la parte superior y bola en la parte inferior.

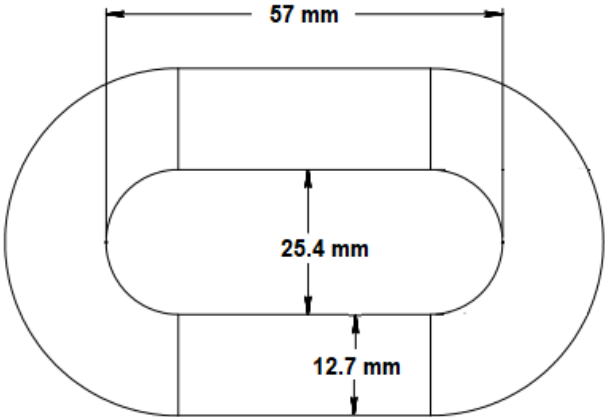


Figura 3.9.1 Detalle y dimensiones Eslabón

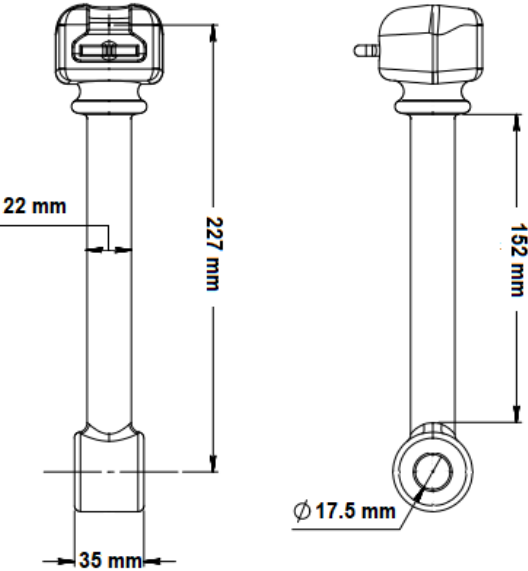


Figura 3.9.2 Detalle y dimensiones Calavera-Ojo

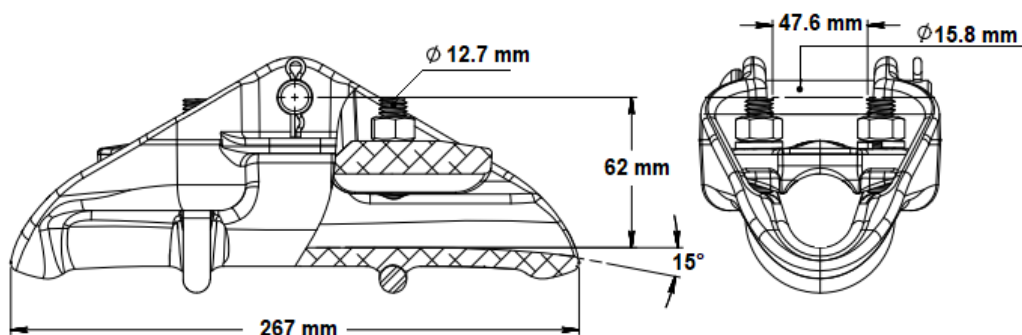


Figura 3.9.3 Detalle y dimensiones Grapa Suspensión

NOTA: Detalles y dimensiones obtenidas de catálogo de CECOHESA.

3.5.3 Línea de transmisión 3, Zumpango

Para la selección de aisladores de este sistema se tomó en cuenta el nivel de contaminación, el nivel de tensión y la resistencia mecánica que debe tener la cadena debido a la longitud de los claros de este tipo de sistemas por lo que se optó por usar aisladores de vidrio templado. En el “*Manual de diseño electromecánico de líneas de transmisión aéreas*” de CFE se indican las claves de aisladores que se usan frecuentemente por la empresa en proyectos de alta tensión como son; 25SVC111C, 25SPC111C, 25SVC111CC y 25SPC111CC, cuyas características pueden ser encontradas en la especificación *CFE 52210-02* con la cual se elegirán los aisladores para el sistema de este rubro.

Con base en lo anterior, se usarán aisladores con la clave **25SVC111CC** que a continuación se describe.

Abreviatura	Descripción
25	Diámetro del esbozo.
S	Tipo suspensión.
V	Material, para este caso es “V” para vidrio aunque también puede ser “P” para porcelana.
C	Tipo de acoplamiento, “C” para calavera y bola y “H” para horquilla y ojo.
111	Resistencia mecánica en [kN].
C	Corrosión.
C	Nivel de contaminación, “C” para alta y “M” para muy alta.

Los datos relevantes obtenidos de los cálculos antes realizados son los siguientes:

$$V_n = 400 [kV], D_f = 10500 [mm], D_{f-t} = 3.81 [m], D_{f-f} = 7.24 [m]$$

Además, los datos de importancia característicos del aislador para obtener el número de discos en la cadena son el espaciamiento (paso) y la distancia de fuga, ambas en milímetros, cuyos valores son 146 [mm] y 432 [mm], respectivamente, para este tipo de aislador (según especificación), estos datos podrían modificarse de acuerdo con las características del fabricante.

Por distancia de fase a tierra:

$$\# \text{ Aisladores} = \frac{D_{f-t}}{D_{f-t} \text{ del aislador}} = \frac{3780 [mm]}{146 [mm]} = 25.89 \text{ discos}$$

Por distancia de fuga:

$$\# \text{ Aisladores} = \frac{D_f}{D_f \text{ del aislador}} = \frac{10,500 [mm]}{432 [mm]} = 24.30 \text{ discos}$$

Como se dijo anteriormente se da prioridad al cálculo de aisladores por distancia de fase a tierra el cual podemos cerrar en 26 discos, pero también se acostumbra adicionarle un 5%, con lo cual el total de discos que conformarán la cadena será de **27 discos** de aisladores tipo suspensión de vidrio templado.

De acuerdo con las características antes mencionadas y las que se encuentran en la tabla de la especificación que ilustra la Figura A5 (Ver Anexo), se hizo la comparación con respecto al catálogo del proveedor que en este caso es **IUSA** y, como se puede observar, se encontraron algunas discrepancias en cuanto a las dimensiones del aislador cuya nomenclatura se había definido anteriormente y las establecidas en la figura antes mencionada, por lo cual se optó por cambiar al aislador con la nomenclatura **28SVC111CC** el cual tiene las mismas características eléctricas pero las dimensiones en cuanto al diámetro del esbozo y la distancia de fuga son 28 [mm] y 445 [mm].

A pesar de lo anterior el número de aisladores no se ve afectado pues el espaciamiento es el mismo valor con el cual se hizo el cálculo, a continuación, se muestra el catálogo del aislador elegido.

AISLADORES

VIDRIO TEMPLADO TIPO SUSPENSIÓN

Descripción general

» Soporte no conductor compuesto por un esbozo de vidrio aislante y herrajes para el acoplamiento con otras unidades en serie. Tiene un herraje de sujeción para el soporte no rígido de los conductores eléctricos.

Características

» Acoplamiento de Calavera-Bola y Horquilla-Ojo.

Aplicaciones

» Para uso en redes de transmisión y distribución en zonas normales, de corrosión y alta contaminación.

Ventajas

» Se pueden generar cadenas de aisladores de acuerdo a tensión de operación y nivel de contaminación.
» Nuestro modelo N-160 con y sin manguito de zinc cumple con la descripción de CFE 28SVC160, 28SVC160C, 29SVC160 y 29SVC160C.

Normas aplicables

» CFE 52210-02
» NMX-J-245-ANCE
» ANSI C29.1
» ANSI C29.2
» IEC 60120
» IEC 60305
» IEC 60383-1

Acotación

» 17: Diámetro del esbozo
» 25: Diámetro del esbozo
» 28: Diámetro del esbozo
» 29: Diámetro del esbozo
» 32: Diámetro del esbozo
» S: Tipo suspensión
» V: Material vidrio
» H: Acoplamiento horquilla
» C: Acoplamiento calavera
» Q44: Resistencia mecánica
» 111: Resistencia mecánica
» 160: Resistencia mecánica
» C: Corrosión
» CC: Corrosión y contaminación
» CM: Corrosión y alta contaminación
» SN: Súper niebla
» P: Niebla y zonas corrosivas



CÓDIGO	CAT.	DESCRIPCIÓN	MASTER	CÓDIGO	CAT.	DESCRIPCIÓN	MASTER
310950	CT-4	Aislador vidrio templado tipo suspensión CT-4	6	311401	N-160	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-160	3
310961	N-12	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-12	6	392914	N-160	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-160 con manguito	3
311682	N-12	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-12 con manguito	6	318712	N-111 SN	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-111 SN	3
311402	N-120 P	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-120 P	6	311403	N-160 P	Aislador vidrio templado tipo suspensión N-160 P	3

CARACTERÍSTICAS		CT-4	N-12	N-12	N-120 P	N-160	N-160	N-111 SN	N-160 P
Descripción corta CFE		17SVH044	25SVC111	25SVC111C	28SVC111CC	29SVC160	29SVC160C	32SVC111CM	32SVC160CC
Clase ANSI		52-1	52-5	52-5	52-5	52-8	52-8	52-5	52-8
Tensión de flameo a 60 Hz	En seco (kV)	60	80	80	100	80	80	110	100
	En húmedo (kV)	30	50	50	60	50	50	60	65
Tensión crítica de flameo al impulso polaridad	Positivo (kV)	100	125	125	140	125	125	160	170
	Negativo (kV)	100	130	130	140	130	130	170	160
Tensión de radio interferencia	Tensión de prueba a 60 Hz (kV)	7,5	10	10	10	10	10	10	10
	Tensión máxima a 1 MHz (µV)	50	50	50	50	50	50	50	50
Tensión de perforación a baja frecuencia (kV)		80	110	110	130	110	110	130	130
Resistencia mecánica (kN)		44	111	111	111	160	160	111	160
Resistencia al impacto (N-m)		5	7	7	10	10	10	10	10
Carga mecánica de rutina 3 segundos (kN)		22,0	55,5	55,5	55,5	80,0	80,0	80,0	80,0
Diámetro nominal (mm)		175	258	258	280	298	298	330	325
Espaciamento (mm)		140	146	146	146	146	146	146	171
Distancia mínima de fuga (mm)		178	320	320	445	370	370	612	540
Masa neta aproximada (kg)		2,0	4,0	4,0	5,4	6,2	6,4	8,8	8,7

Figura 3.10 Aislador tipo suspensión vidrio templado

Adicionalmente, a modo de establecer una comparativa e ilustrar el cómo afectan los factores de corrección por altitud y contaminación al número y tipo de aisladores en una cadena se establece que, si se considerará, la altitud de la región menor o igual a 1000 msnm con una contaminación media de 20 [mm/kV], se puede decir lo siguiente:

- 1) Ya que la altura es menor o igual a 1000 msnm no es necesario realizar una corrección de la TCF por altitud, el cálculo de las distancias mínimas dieléctricas es más sencillo e incluso, con ayuda de la especificación, más práctico puesto que dicho documento ya establece distancias normalizadas para estos casos. Según el nivel de tensión que se tiene de 420 [kV], las distancias mínimas dieléctricas son las siguientes:

$$D_{f-t} = 2600 [mm] \text{ y } D_{f-f} = 4100 [mm]$$

- 2) La distancia de fuga, dado el nivel de contaminación es:

$$D_f = Kfe * V_m = \left(20 \left[\frac{mm}{kV} \right] \right) (420 [kV]) = 8400 [mm]$$

- 3) Por lo tanto, el número de discos en la cadena con estos nuevos datos y, considerando el mismo tipo de aislador anteriormente mencionado sería:

Por distancia de fase a tierra:

$$\# \text{ Aisladores} = \frac{D_{f-t}}{D_{f-t \text{ del aislador}}} = \frac{2600 [mm]}{146 [mm]} = 17.80 \text{ o } 18 \text{ discos}$$

Por distancia de fuga:

$$\# \text{ Aisladores} = \frac{D_f}{D_f \text{ del aislador}} = \frac{8400 [mm]}{432 [mm]} = 19.44 \text{ o } 19 \text{ discos}$$

Como se dijo anteriormente, se da prioridad al cálculo por distancia de fase a tierra lo que indica que, con estos datos, la cadena estaría conformada por 18 aisladores. Como se puede observar, la diferencia entre este cálculo y el anterior es significativa con 9 aisladores de diferencia en la cadena. Con lo anterior se puede concluir que el impacto de los factores de corrección es realmente significativo cuando se seleccionan los aisladores incluso, dado el nivel de contaminación medio, se podría optar por un tipo de aislador diferente.

Herrajes

El arreglo que se considerará para las cadenas de aisladores (con los datos originales) será cadenas en “V” para dos conductores por fase, tomando como referencia la especificación **NRF-043-CFE-2011**: herrajes y conjuntos de herrajes para líneas de transmisión aéreas de 69 [kV] a 400 [kV].

Tabla 8. Listado de herrajes para cadena de aisladores en “V” de vidrio templado

Catalogo	Descripción	Especificación CFE
CECOHESA HYBLV-140	Horquilla “Y”- Bola larga ANSI 52.5, cuerpo y tornillería de acero forjado galvanizado por inmersión en caliente, chaveta de acero inoxidable, resistencia mecánica 140 [kN], peso de 1.45 [kg]. (Ver Figura 3.10.1)	
CECOHESA CHY-140	Calavera-Horquilla corta ANSI 52.5, cuerpo y tornillería de acero forjado galvanizado por inmersión en caliente, chaveta de acero inoxidable, resistencia mecánica 140 [kN], peso de 1.17 [kg]. (Ver Figura 3.10.2)	
CECOHESA YTL-170-450AE	Yugo trapezoidal para anillo equipotencial, placa de acero galvanizado por inmersión en caliente, resistencia mecánica de 170 [kN], peso de 7.44 [kg]. (Ver Figura 3.10.3)	
CECOHESA AE-400	Anillo equipotencial de 400 [kV], cuerpo de aleación de aluminio y tornillería de acero galvanizado por inmersión en caliente, peso de 2.78 [kg]. (Ver Figura 3.10.4)	
CECOHESA HYOR-44	Horquilla- Ojo corta tipo HYOR, cuerpo de acero forjado galvanizado por inmersión en caliente, tornillería de acero galvanizado, chaveta de acero inoxidable, resistencia mecánica de 140 [kN] y peso de 1.22 [kg]. (Ver Figura 3.10.5)	
CECOHESA GSLC-35	Grapa de suspensión libre de efecto corona para conductor ACSR de diámetro de 30.4-36.3 mm, resistencia mecánica de 111[kN], peso 2.09 [kG] y par apriete de 55 [Nm]. Cuerpo de aleación de aluminio y tornillería de acero galvanizado por inmersión en caliente. (Ver Figura 3.9.3)	

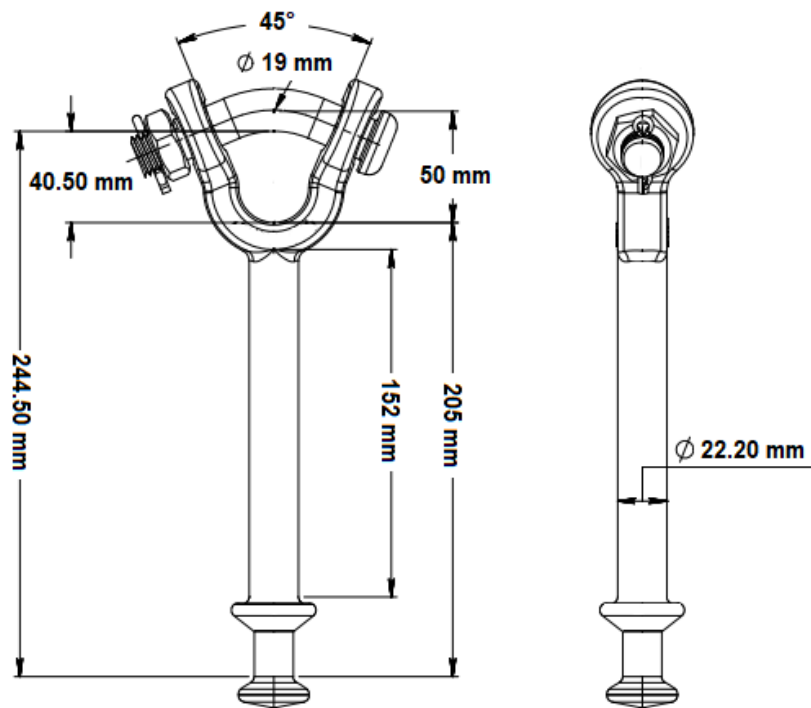


Figura 3.10.1 Detalle y dimensiones Horquilla “Y”-Bola

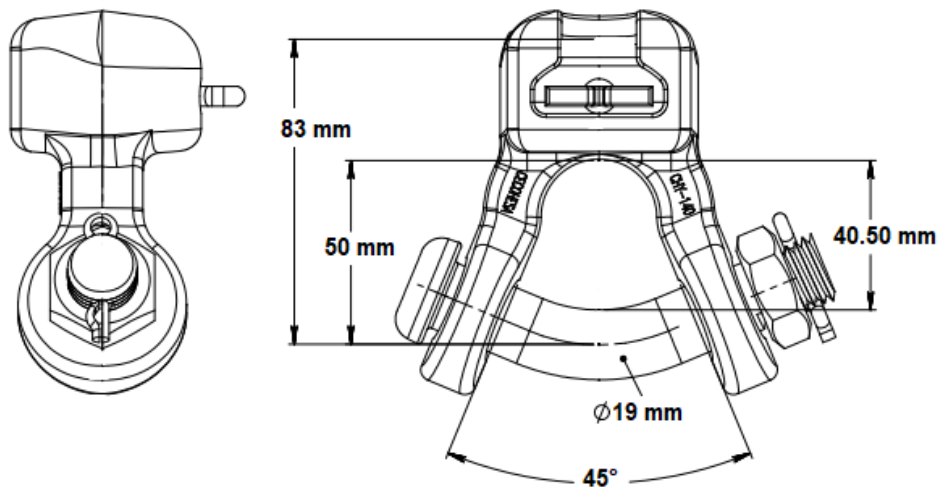


Figura 3.10.2 Detalle y dimensiones Calavera-Horquilla corta

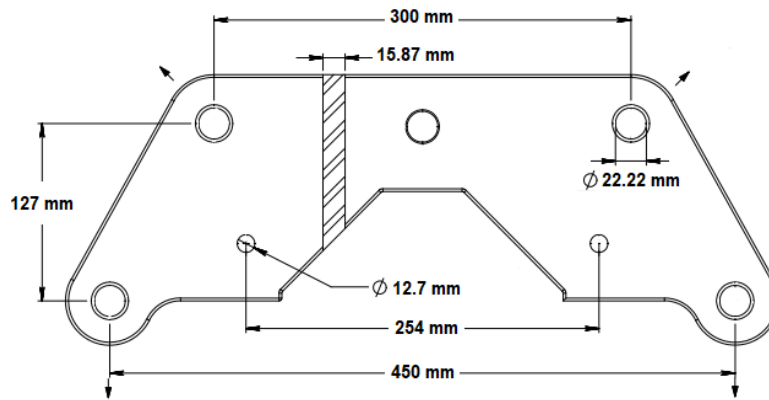


Figura 3.10.3 Detalle y dimensiones Yugo Trapezoidal

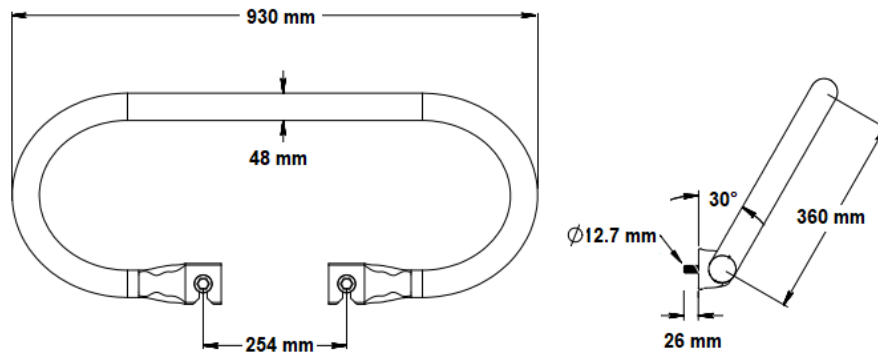


Figura 3.10.4 Detalle y dimensiones Anillo Equipotencial

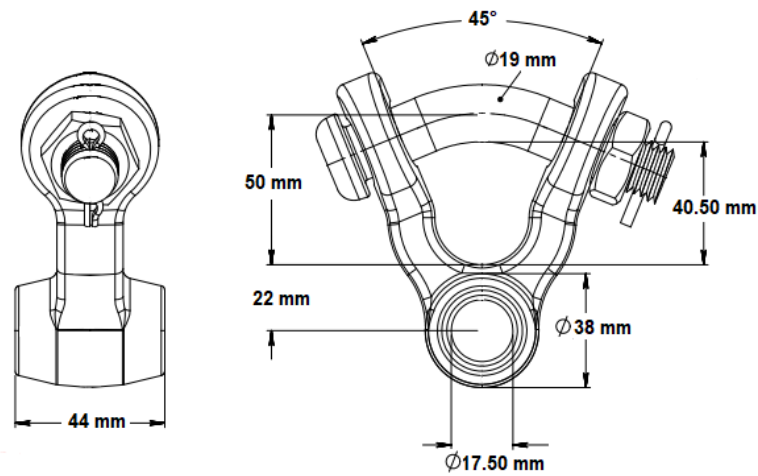


Figura 3.10.5 Detalle y dimensiones Horquilla-Ojo corta

NOTA: Detalles y dimensiones obtenidos del catálogo de CECOHESA.

3.6 Protección para aisladores

Recubrimiento elastomérico

El recubrimiento elastomérico es un aislamiento para alta tensión utilizado para dar mayor resistencia y protección a los aisladores contra altos niveles de contaminación y flameos o arcos. Suele estar compuesto de hule de silicón y es sumamente adherente a los materiales de los que están hechos los aisladores (porcelana, vidrio y polímeros) y su forma de aplicación es como si fuese una pintura común y corriente.



Figura 3.11 Aisladores con recubrimiento elastomérico

Características del recubrimiento elastomérico:

- Impide efecto corona
- Evita arcos
- Fácil aplicación en sistemas energizados o no
- Larga vida útil
- No es tóxico ni corrosivo

Sombreros chinos

Como se dijo anteriormente, la contaminación es un factor importante a considerar cuando se trata de la integridad del aislamiento, la presencia de fauna aérea impacta en este rubro, y en el caso de los aisladores, por el excremento que las aves producen y la naturaleza o características de este, ya que con frecuencia es depositado en el esbozo de los aisladores rompiendo la rigidez dieléctrica y ocasionando flameos.

Para solucionar este problema se utilizan múltiples dispositivos adicionales que se colocan en la línea, todo esto, dependiendo del tipo de aves, hábitos de alimentación, etc. Para las cadenas de aisladores y generalmente para aquellas cuya disposición es en "I", se utilizan cubiertas que se ponen en el aislador superior y más próximo al anclaje llamados coloquialmente "Gorros Chinos" (Ver Figura 3.12) los cuales son de una anchura mayor a la de los aisladores de modo que el excremento cae en ellos y no en la cadena de aisladores y se han observado buenos resultados. Sin embargo, el uso de estos dispositivos presenta las siguientes desventajas a considerar:

- Después de un tiempo presentan oxidación en la calavera del aislador
- Reduce el auto lavado por lluvia
- Pueden convertirse en sobrecarga mecánica



Figura 3.12 Sombrero chino colocado en cadena de aisladores de vidrio

Capítulo IV. Conclusiones

- Los aisladores son elementos imprescindibles en las líneas de transmisión. Proporcionan sujeción mecánica y seguridad a la instalación, así como continuidad y confiabilidad al Sistema Eléctrico.
- La selección del tipo de aislador (porcelana, vidrio, polimérico) radica en las características ambientales del sitio, así como de las sobretensiones que se puedan presentar.
- La porcelana es rígida y resistente a daños físicos, pero pesada, lo que la hace de uso preferente de un tipo soporte, mientras que, el vidrio proporciona ligereza y resistencia al momento de formar cadenas lo que lo hace el material más utilizado para este fin. Por otra parte, cuando se trata de características ambientales con altos niveles de contaminación o vandalismo se prefiere usar aisladores poliméricos ya que son más resistentes bajo estas circunstancias.
- En los ejemplos prácticos se pudo observar lo siguiente: En la LT 1 de Torreón, Coahuila (34.5 kV) se seleccionaron aisladores de porcelana tipo poste dado el nivel de tensión y la baja contaminación de la zona. En la LT 2 ubicada en Coatzacoalcos, Veracruz (115 kV) se eligieron aisladores poliméricos principalmente por el nivel alto de contaminación de la zona ya que es cercana al mar y a la industria petrolera, lo que indica dos tipos de contaminación, salina e industrial. Por último, para la LT 3 de Zumpango, Edo. de México (400 kV) se eligieron aisladores de vidrio por el alto aislamiento que requiere el nivel de tensión y su ligereza y resistencia que deben tener las cadenas.
- El nivel de tensión marca la pauta para seleccionar el nivel de aislamiento de acuerdo con los valores de sobretensiones que se puedan presentar ya sea que estén referidos con base en la norma o en un estudio de sobretensiones.
- La aplicación de factores de corrección correspondientes en cuanto a contaminación y altitud es indispensable para asegurar el aguante del aislamiento y seleccionar de mejor manera la longitud de las cadenas de aisladores de forma que se conserven las distancias mínimas dieléctricas de la instalación y de esta manera disminuya la probabilidad de fallas.

- La selección final de los aisladores se realiza con base en las distancias de fuga, de fase a tierra y entre fases. La intención es seleccionar un tipo de aislador con las dimensiones adecuadas que conserve esas distancias de modo que se asegure un aislamiento satisfactorio en la instalación.
- Adicionalmente a lo anterior, la densidad de la contaminación de la zona en la que se ubica la instalación en la que estarán operando aisladores puede requerir acciones adicionales; como aplicar un recurso extra como el recubrimiento elastomérico en aisladores de vidrio templado o porcelana, o bien, elegir un aislador polimérico que resista de mejor manera las condiciones de contaminación sin decaer su vida útil.

Anexo

TABLA 2 Distancia específica de fuga de aisladores tipo poste de 13.8 kV a 34.5kV

Tensión Eléctrica nominal del sistema operación (kV)	Tensión máxima De diseño (kV)	Distancia de fuga (Nota1)					
		DF 1	DF 2	DF 3	DF 4		
					Total (Nota 2)	Protegida	
13.8	15.5	300	375	465	465	180	
23	27	516	645	800	800	380	
34.5	38	760	950	1 178	1 178	600	
69	72.5	1 450	1 810	2 245			
85	100	2 460	3 075	3 813			
115	123	2 460	3 075	3 813			
138	145	2 900	3 625	4 495			

Figura A1. Especificación CFE 52000-91 TABLA2

TABLA 5. Características dimensionales y electromecánicas de aisladores tipo poste de 13.8 kV a 34.5 Kv

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5		Columna 6	Columna 7		Columna 8	Columna 9	
Tensión nominal del sistema (kV)	Tensión máxima del sistema (kV)	Aplicación (Nota 3)	Material (Nota 4)	Prueba de contaminación		Distancia mínima de fuga (Nota 6)	Tensión de flameo a 60 Hz		Tensión crítica de flameo al impulso de rayo (+) (kV)	Tensión de radio interferencia	
				Salinidad (Kg/m ³)	Tensión de prueba a 60 Hz (kV)		En seco (kV)	En húmedo (kV)		Valor máximo (µV)	Tensión de prueba a 60 Hz (kV)
13.8	15	Descargas atmosféricas	P, CP	14	8.4	1	70	40	110	100	15
			CP, HS	Véase nota 5							
		Contaminación	P, CP	40	8.4	2, 3 y 4					
			CP, HS	Véase nota 5							
23	27	Descargas atmosféricas	P, CP	14	14.6	1	95	65	150	100	22
			CP, HS	Véase nota 5							
		Contaminación	P, CP	40	14.6	2, 3 y 4					
			CP, HS	Véase nota 5							
34.5	38	Descargas atmosféricas	P, CP	14	22	1	125	95	200	200	30
			CP, HS	Véase nota 5							
		Contaminación	P, CP	40	22	2, 3 y 4					
			CP, HS	Véase nota 5							

Figura A2. Especificación CFE 52000-91 TABLA 5

TABLA 1 Distancia mínima de fuga

Nivel de contaminación	Distancia mínima de fuga requerida (mm)					
	13.8 kV	23 kV	34.5 kV	69 kV	115 kV	138 kV
d Alto	375	645	950	1 810	3 075	3 625
e Muy Alto *	465	800	1 170	2 245	3 813	4 495

Figura A3. Especificación CFE 52100-65 TABLA 1

TABLA 3 Características y dimensiones aisladores de 13.8 a 138 kV

Características		Tensión del sistema kV						
		13.8	23	34.5	69	115	138	
Dimensiones	Longitud nominal L (mm)	330 ± 15	430 ± 35	525 ± 55	956 ± 60	1 248 ± 60	1 394 ± 100	
	Distancia mínima de fuga	Véase TABLA 1						
Eléctricas	Tensión de flameo a 60 Hz (kV)	En seco kV	90	130	145	245	370	450
		En húmedo kV	65	110	130	240	333	395
	Tensión crítica de flameo al impulso por rayo (kV)	Impulso positivo	140	215	250	410	612	715
		Impulso negativo	--	--	--	--	--	735
Mecánicas	Resistencia última a la tensión kN	45	45	45	120	120	120	
	Resistencia a la torsión N-m	47	47	47	50	50	50	

Figura A4. Especificación CFE 52100-65 TABLA 3

TABLA 2 - Características electromecánicas y dimensionales

Características	Descripción corta	17SVH044	25SVC111	33SVC160C	25SVC111CC	28SVC111CC	28SVC160	29SVC160	32SVC160CC	32SVC111CM	33SVC111	
		17SPH044 (5)	25SPC111	33SPC160C	25SPC111CC	28SPC111CC	28SPC160	29SPC160	32SPC160CC	32SPC111CM	33SPC111C	
	Clave	1	2	11	4	5	6	7	8	9	10	
	Figura representativa	1	2	3	2	2	2	2	2	2	3	
Dimensiones	Diámetro nominal	mm 175	254	330	254	280	280	298	321	321	330	
	Espaciamiento	mm 140	146	146	146	146	146	146	171	146	146	
	Distancia mínima de fuga	mm 178	292	295	432	445	370	279	540	612	612	
Eléctricas	Flameo a baja frecuencia	En seco kV	60	80	60	80	100	80	80	100	110	75
		En húmedo kV	30	50	55	50	60	50	50	65	60	55
	Tensión crítica de flameo	Al impulso positivo kV	100	125	100	125	140	125	125	170	160	100
		Al impulso negativo kV	100	130	100	130	140	130	130	160	170	100
	Tensión de perforación a baja frecuencia	kV 80	110	110	110	130	130	110	130	130	110	
Mecánicas	Resistencia mecánica (°)	kN 44	111	160	111	111	160	160	160	111	111	
	Resistencia al impacto	N.m 5	7	10	10	10	10	10	10	10	10	
De radio interferencia	Tensión de prueba a baja frecuencia (rcm a tierra)	kV 7.5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
	Tensión máxima de radio interferencia 1 000 kHz	µV 50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Herraje de acoplamiento:		Horquilla - Ojo (7)		Calavera y Bola (6)								

Figura A5. Especificación CFE 52210-02 TABLA 2

Bibliografía y referencias

- Electrical Distribution Engineering, Anthony J. Pansini, Ed. The Fairmont Press, 3a Edición, 2007, EUA, pg. 558.
- Manual para diseño electromecánico de líneas de transmisión aéreas, Comisión Federal de Electricidad, 1ª Edición, año 2012, México D.F., Pg. 355.
- Especificación CFE L0000-06: Coordinación de aislamiento (1991)
- Especificación CFE L0000-06: Coordinación de aislamiento (1980)
- Especificación CFE L0000-41: Guía de aplicación de Coordinación de Aislamiento
- Especificación CFE 52000-91: Aisladores tipo poste
- Especificación CFE 52210-02: Aisladores tipo suspensión de porcelana y vidrio templado
- Especificación CFE 52210-47: Aisladores tipo suspensión sintéticos para líneas aéreas de 161 [kV] a 400 [kV]
- Especificación CFE DCCAIMBT: Construcción de instalaciones aéreas en media y baja tensión
- Especificación CFE 21000-01: Herrajes y sus accesorios
- NMX-J-271/1-ANCE-2007
- Técnicas de las altas tensiones, Ing. Gilberto Enríquez Harper, Vol. 1, 2ª Edición, Editorial LIMUSA, México 1980.
- Instalaciones Eléctricas generales, Enciclopedia CEAC de electricidad, José Ramírez Vázquez, 7ª Edición, Editorial Ediciones CEAC, Barcelona (España) 1990.
- Catálogo CONHESA:
<http://www.conhesa.com.mx/wp-content/uploads/2017/03/catalogo-conhesa.pdf>
- Catálogo CECOHESA:
<http://www.cecohesa.com.mx/CATALOGO%20CECOHESA.pdf>
- Catálogo IUSA :
http://www.iusa.com.mx/brochure/catalogo_media_y_alta_tension.pdf
- Catálogo ANKER ELECTRIC:
<http://www.industriareal.com/catalogos/catalogo-anker-electric-herrajes-electricos-ago-2017.pdf>