

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA COORDINACIÓN DE  
AISLAMIENTO EN REDES ELÉCTRICAS DE EXTRA ALTO  
VOLTAJE USANDO MODELACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y  
DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE SOBREVOLTAJES.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA ELÉCTRICA**

**CARLA DANIELA GARZÓN OBANDO**

**DIRECTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

**CODIRECTOR: FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI**

**Quito, agosto 2022**

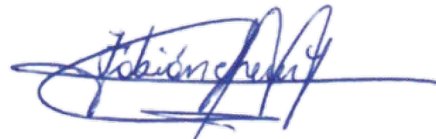
## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Carla Daniela Garzón Obando, bajo nuestra supervisión.



---

**CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**



---

**FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI**  
**CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Carla Daniela Garzón Obando, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



---

Carla Daniela Garzón Obando

# DEDICATORIA

A mis amados padres Marcela y Ricardo,

A mis queridos hermanos Alejandro y David,

Con todo el esfuerzo y cariño, con el que hemos dado frente al intrépido camino que, al presente, finaliza reflejado en la obtención de mi título universitario, este trabajo es para  
Uds.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a La Virgen Santísima por bendecirme y cuidarme en cada momento de mi vida a través del amor, respeto, y consejo de mis padres y hermanos.

A la que, desde ahora en más, será mi Alma Máter, La Escuela Politécnica Nacional, porque ha sido bajo su seno que he podido ser alumna de grandes maestros y adquirir los conocimientos que hoy en día me catapultan a adentrarme en el mundo profesional.

A mi muy apreciado director, Ing. Carlos Barrera, porque ha sido quien, a lo largo del desarrollo de mi trabajo de titulación, se ha hecho presente con su incondicional apoyo y su altruista guía.

A mi siempre estimado codirector, Dr. Fabián Pérez, porque con su vasta e implacable experiencia siempre ha estado presto a direccionarme.

A los ingenieros Juan Ramírez y Washington Varela por la ayuda, tiempo y atención que me han brindado.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT.....	IX
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.1.1 OBJETIVO GENERAL .....	1
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.2 ALCANCE .....	2
1.3 ESTADO DEL ARTE .....	3
CAPITULO II.....	5
2. COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO .....	5
2.1 AISLAMIENTO ELÉCTRICO [3]. .....	6
2.1.1 CLASIFICACIÓN DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO [2], [3], [6]. .....	6
2.2 NIVELES DE VOLTAJE [2].....	7
2.3 SOBREVOLTAJES [2], [7].....	7
2.3.1 CLASIFICACIÓN DE SOBREVOLTAJE [2], [3], [5]. .....	8
2.4 APANTALLAMIENTO [3]. .....	18
2.4.1 APANTALLAMIENTO EN LÍNEAS AÉREAS [3], [8]. .....	19
2.4.2 APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES [3]. .....	21
2.5 PUESTA A TIERRA [3], [9].....	22
2.5.1 PARARRAYOS [9]. .....	23
2.6 CRITERIOS GENERALES PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO [5], [6]. .....	24
2.6.1 NIVEL DE AISLAMIENTO [3], [2], [10]. .....	25
2.6.2 ESTUDIO DETERMINÍSTICO [4], [10].....	27
2.6.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO [4], [10], [6].....	28
2.7 PROCEDIMIENTO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO [2], [10]. ..	29
2.7.1 VOLTAJES Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS URP [2], [4]. .....	30

2.7.2	VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN $U_{cw}$ [2], [4].....	31
2.7.3	VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS $U_{rw}$ [2], [4]. ....	32
2.7.4	SELECCIÓN DEL NIVEL DE AISLAMIENTO NORMALIZADO [2], [4], [10]. ....	34
CAPITULO III	.....	36
3.	MODELOS ELECTROMAGNÉTICOS.....	36
3.1	TRANSITORIOS EN REDES ELÉCTRICAS [12], [13].....	36
3.1.1	TIPOS DE TRANSITORIOS EN REDES ELÉCTRICAS.....	36
3.2	CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN [14], [15], [16].....	37
3.2.1	MODELOS DE LÍNEAS DE TRASMISIÓN [17]. ....	38
3.3	CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE FUENTES DE GENERACIÓN [16]. ....	46
3.4	CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE TRANSFORMADORES [16].47	
3.5	CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE DISYUNTORES [16].....	48
3.6	CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE TORRES [16], [18].....	49
3.6.1	RESISTENCIA DE PIE DE TORRE [3], [19].....	49
3.6.2	FORMAS DE TORRES [6][3].....	50
CAPÍTULO IV	.....	54
4.	DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA [3].....	54
4.1	MÉTODO DE MONTE CARLO [3].....	54
4.1.1	VARIABLES ALEATORIAS [3].....	55
4.1.2	FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN [3].....	55
4.2	DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE SOBREVOLTAJES [3].....	58
CAPÍTULO V	.....	61
5.	METODOLOGÍA PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN REDES DE EXTRA-ALTO VOLTAJE.....	61
5.1	DETERMINACIÓN DE VOLTAJES Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS $U_{rp}$ [2], [11], [16]. ....	62
5.1.1	MODELAMIENTO DE LA RED ELÉCTRICA.....	62
5.1.2	DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE MÁS ELEVADO DEL EQUIPAMIENTO DE LA RED $U_m$ .....	62
5.1.3	SOBREVOLTAJES TEMPORALES.....	62
5.1.4	SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO.....	64
5.2	DETERMINACIÓN DE VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN $U_{cw}$ [2], [11], [16].....	65

5.2.1 SOBREVOLTAJES TEMPORALES.....	65
5.2.2 SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO .....	65
5.2.3 SOBREVOLTAJES DE FRENTE RÁPIDO .....	67
5.3 DETERMINACIÓN DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS $U_{rw}$ [2], [11], [16]. .....	69
5.3.1 SOBREVOLTAJES TEMPORALES.....	70
5.3.2 SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO .....	70
5.3.3 SOBREVOLTAJES DE FRENTE RÁPIDO .....	71
5.4 CONVERSIÓN DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS TEMPORALES A VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS DE FRENTE LENTO [2], [11], [16].....	71
5.5 SELECCIÓN DEL NIVEL DE AISLAMIENTO [2], [11], [16]. .....	72
5.6 ESQUEMATIZACIÓN DE LOS PASOS ESTABLECIDOS EN LA METODOLOGÍA DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA REDES ELÉCTRICAS DE EXTRA ALTO VOLTAJE A TRAVÉS DE UNA INTERFAZ PROGRAMADA EN MATLAB. ....	73
CAPÍTULO VI.....	84
6. SISTEMA DE APLICACIÓN. ....	84
CAPÍTULO VII.....	95
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	95
7.1 CONCLUSIONES.....	95
7.2 RECOMENDACIONES .....	96
CAPÍTULO VIII.....	97
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
ANEXO A.....	99
ANEXO B.....	109



## RESUMEN

El presente documento plasma una metodología para la coordinación de aislamiento en redes eléctricas de extra alto voltaje, guía que plantea la obtención de los sobrevoltajes a través del análisis de modelamiento electromagnético y distribución probabilística, acción para la cual se involucra el uso de la herramienta computacional EMTP. La latente metodología se presenta acompañada de una interfaz gráfica, en la cual se ingresan los valores y datos requeridos de la red eléctrica en el orden y bajo los parámetros que se han establecido en la metodología propuesta.

La exposición del presente estudio se ve conformado por la conceptualización de siete capítulos, en los cuales se contempla en primera instancia la introducción e importancia de la temática, en conjunto con los objetivos que direccionan al estudio y alcance del trabajo. Para el segundo capítulo, se aborda en su mayoría lo más significativo a la argumentación de la coordinación de aislamiento, sobrevoltajes y, la secuencia y parámetros que establece la normativa IEC 60071 para la determinación de coordinación de aislamiento. Dentro del tercer capítulo se ilustra la representación electromagnética que adoptan los componentes más relevantes de una red eléctrica. Seguido, en un cuarto capítulo se expone la síntesis de lo relacionado a la distribución probabilística. En cuanto que, el capítulo quinto exterioriza la metodología propuesta y la interfaz desarrollada. Continuado en un sexto capítulo se muestra un sistema de aplicación. Y finalmente, el séptimo capítulo expone las conclusiones y recomendaciones concernientes al presente estudio.

**PALABRAS CLAVE:** Coordinación de aislamiento, metodología, gama II, extra alto voltaje, IEC 60071, modelamiento electromagnético.

## **ABSTRACT**

The following paper exposes a methodology for coordination of insulation in the highest voltage electric systems, this guide obtains overvoltages through the analysis of electromagnetic modeling and probabilistic distribution, for which the computational tool EMTP is used. The methodology is presented accompanied by a graphical interface, in which the data required from the electric system are entered in the order that has been established in the proposed methodology.

This study is conceptualized in seven chapters, first chapter has the introduction and importance of the study, together with the objectives of this work. The second chapter has the most significant aspects of: insulation coordination, overvoltages, and the parameters established by the IEC 60071 standard. The third chapter illustrates the electromagnetic representation by the most relevant components of an electric system. Next, fourth chapter, explains about the probabilistic distribution. The fifth chapter exposes the proposed methodology and the developed interface. Continue, sixth chapter has an application system by be used as example. And finally, the seventh chapter presents the conclusions and recommendations concerning the present study.

**KEYWORDS:** Insulation coordination, methodology, range II, extra high voltage, IEC 60071, electromagnetic modeling.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia se encuentran en constante expansión, esto se debe a que, las redes eléctricas son proporcionales al crecimiento de la demanda eléctrica. Las ya antes mencionadas redes eléctricas son instalaciones que se encuentran generalmente a la intemperie y son muy susceptibles a fenómenos naturales y ambientales, razón por la cual, la coordinación de aislamiento representa la acción de blindaje para las instalaciones en cuestión.

Comprendiéndose que, la rigidez dieléctrica es una propiedad latente en los elementos de una red y que, representa a la capacidad de soportar a los valores máximos de sobrevoltajes que pueden presentarse, sin estropear el aislamiento de los elementos se denota que, el dimensionamiento del nivel de aislamiento se lo hace tanto para condiciones normales de operación (energización, apertura o cierre de líneas, etc.), así como para situaciones enmarcadas como condiciones de vulnerabilidad (descargas atmosféricas, contaminación ambiental, sismos, viento, etc.).

Por consiguiente, la precisión a la hora de determinar el nivel de aislamiento en redes eléctricas, específicamente hablando de aquellas que se encuentran a un nivel de extra alto voltaje, es indiscutible, pues de la mano con la meticulosidad que se desarrolla la coordinación de aislamiento para determinar niveles apropiados de protección también se ve involucrado el tema económico ya que, es justamente el aislamiento de un equipo lo que determina su precio, y al tratarse de un nivel de extra alto voltaje se puede establecer que, mientras más grande sea el margen de error mucho más cuantioso y estrafalario puede llegar a ser el costo de la red eléctrica, es por ello que, el planteamiento de la siguiente metodología en la cual se encuentra embebida la distribución probabilística de los sobrevoltajes representativos simboliza una respuesta muy acertada para determinar en redes de gama II el correcto nivel de aislamiento.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología estadística para la coordinación de aislamiento usando modelos electromagnéticos en conjunto con distribución probabilística de sobrevoltajes

representativos, para ser aplicada en sistemas eléctricos que estén a un nivel de voltaje mayor a 245 kV.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Modelar en representación electromagnética los elementos que conforman a una instalación eléctrica utilizando el software EMTP-RV.
- Establecer los pasos de la coordinación de aislamiento, planteada en la norma IEC 60071, utilizando los resultados obtenidos de modelos electromagnéticos y distribución probabilística para obtener los sobrevoltajes representativos de frente lento y rápido.
- Elaborar una guía en la cual se describan los pasos para el proceso de coordinación de aislamiento en redes eléctricas mayores a 245 kV en base a las modelaciones y simulaciones realizadas.
- Estructurar una interfaz usando la herramienta GUI de MATLAB que permita a un usuario ingresar los valores obtenidos en el proceso de la coordinación de aislamiento para encontrar niveles normalizados de aislamiento.

## **1.2 ALCANCE**

El eje de partida para el desarrollo de la metodología estadística para la coordinación de aislamiento descrita anteriormente es la indagación, revisión y recopilación de toda aquella información que permita conocer conceptos y lineamientos fundamentales para la elaboración de la metodología en cuestión.

Consiguientemente, la modelación electromagnética de los elementos del sistema eléctrico involucrado y la distribución probabilística que permitirá la obtención de sobrevoltajes representativos de los componentes de una red eléctrica, se realizarán utilizando el software EMTP-RV. A continuación, se hará uso de aquellos resultados para realizar una descripción de los pasos que tiene el método de coordinación de aislamiento para redes eléctricas de extra alto voltaje, dando así lugar a la presentación de una metodología mucho más precisa que los métodos determinísticos que se emplean para obtener la coordinación de aislamiento en instalaciones que están a un nivel de voltaje mayor a 245 kV.

Se realizará una interfaz utilizando la herramienta GUI de MATLAB en la cual de manera didáctica se podrá ingresar los valores que se obtendrán al usar la metodología propuesta y, se determinará el nivel normalizado de aislamiento.

### 1.3 ESTADO DEL ARTE

La coordinación de aislamiento en redes eléctricas se ha visto direccionada gracias a la norma internacional IEC 60071, en dicho estándar se manifiestan una serie de conceptos relacionados al tema y que a su vez permiten el planteamiento de directrices que se deben seguir para poder establecer el nivel de aislamiento, consecuente, según un estudio que se ha realizado anteriormente [1] se puede constatar que, si bien es cierto toda red eléctrica tiene un definido nivel de aislamiento, la determinación del mismo depende en primer lugar del nivel de voltaje al cual se encuentra, sean estos niveles de voltaje de gama I o gama II [2], para el caso de estudio anteriormente citado se ve en concerniente el desarrollo de un programa que permite la automatización de la coordinación de aislamiento para un nivel de voltaje de gama I, en dicho estudio efectivamente se obtiene el aislamiento de una red en base exclusivo a los pasos y tablas que se encuentran descritos en la norma puntual, no obstante, si bien se comparte el ímpetu de automatizar la coordinación de aislamiento, en el presente estudio se da un enfoque para la coordinación de aislamiento de redes eléctricas que están a un nivel de voltaje de gama II, a más de ello se determina una serie de pasos que se deben seguir para dicha coordinación pero viéndose involucrados en dicho análisis aspectos que marcan una gran diferencia como son: distribución probabilística para los sobrevoltajes y modelación electromagnética. La diferencia antes mencionada radica en cuanto a que, se precisa mucho más los valores máximos que se pueden soportar de los sobrevoltajes disminuyendo de esta forma el margen de error al momento de dictaminar el nivel de aislamiento de una instalación eléctrica de gama II, lo cual es muy favorable tanto para el nivel de protección de la instalación eléctrica, así como para el costo de la misma.

Dándose un enfoque a la coordinación de aislamiento y con un respaldo de documentos previos [3], [4], [5] se puede definir que, existen dos metodologías que se adoptan para el desarrollo de la coordinación descrita, entre estos están la metodología determinística y estadística, de donde la elección de la misma depende de parámetros tales como: la cantidad de elementos que se tiene en una base de datos, la precisión con la cual se desea obtener el nivel de aislamiento y fundamentalmente el nivel de voltaje al cual se está trabajando sea este de gama I o gama II [2]. De modo que, se comparte con un estudio realizado anteriormente [4] en que, para realizar una coordinación de aislamiento en gama II, es decir en redes eléctricas que se encuentren a un nivel de voltaje mayor a los 245 kV, la metodología idónea es la estadística, ya que si se toma dicho camino se puede hacer uso de los datos pertinentes y determinar de forma probabilística y

modelada los sobrevoltajes representativos. Sin embargo, la discrepancia radica en que, en dicho trabajo [5] el estudio y determinación de aislamiento se enmarca para un solo escenario, mientras que, la finalidad que tiene el desarrollo del presente trabajo es plantear una guía que permita ejecutar los pasos para realizar la coordinación de aislamiento para redes eléctricas de gama II haciendo uso de modelación electromagnética y distribución probabilística para la obtención de los sobrevoltajes.

## CAPITULO II

### 2. COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

Al discurrir en cuanto a la coordinación de aislamiento de una red eléctrica el término de rigidez dieléctrica se ve latente en el tema puesto que, es justamente esta propiedad la que desencadena el estudio que conlleva la determinación del nivel de aislamiento, comprendiéndose pues, que la rigidez dieléctrica es la capacidad que posee cierto elemento para soportar un valor máximo de sobrevoltaje sin destruir su aislamiento y evitando de esta manera perjudicar su estructura y funcionamiento.

Por lo tanto, al conocer que las instalaciones eléctricas se encuentran susceptibles a situaciones en las cuales se presentan sobrevoltajes es que, surge la necesidad de protegerlas a través del nivel de aislamiento, ahora bien, la determinación de dicho nivel de aislamiento es dictaminado según la coordinación de aislamiento. Y es así que, se entiende la magnitud de importancia que tiene la correcta ejecución de los pasos que se ven involucrados en dicha coordinación.

De manera que, la precisión con la cual se ejecuta la coordinación de aislamiento no solo determina la protección de los componentes de una red eléctrica, sino que también se puede establecer que, el aislamiento con el cual se requiere a los componentes marcará su costo, entendiéndose que, mientras más elevado sea el grado de aislamiento que posea el elemento mucho más costoso será éste, y si se traslada dicho argumento a una escala elevada, es decir a instalaciones eléctricas que se encuentren operando a un nivel de voltaje de extra alto voltaje las cantidades que se están mencionando pueden llegar a ser muy cuantiosas.

De allí que, nace la necesidad de adentrarse mucho más en el tema de la coordinación de aislamiento, ya que, sencillo sería plantear en los parámetros el nivel más elevado de aislamiento para los componentes de una red eléctrica, no obstante, para mermar el aspecto económico se desglosa mucho más la forma en cómo se ejecuta la coordinación. Dado la gran escala que representan las redes eléctricas que se encuentran a un nivel de extra alto voltaje es que, en el presente documento se plantea el estudio de coordinación de aislamiento, que desde luego se rige a lo contemplado en la normativa internacional IEC 60071, pero que, hace uso de modelación electromagnética y distribución probabilística para la determinación de los valores de sobrevoltajes, con lo cual se obtiene

mucha más precisión a la hora de abordar la determinación del nivel de aislamiento en redes eléctricas de gama II.

A continuación, se plantean aquellos términos en los que se ha puntualizado o descrito anteriormente, para de esta manera aterrizar de forma conceptual sobre ellos.

## **2.1 AISLAMIENTO ELÉCTRICO [3].**

La coordinación de aislamiento tiene dentro de sus finalidades el hecho de determinar el nivel de aislamiento de un componente de la red eléctrica, con lo cual se está impartiendo las características que debe tener el aislamiento de un elemento, y partiendo de allí se estaría resguardando al grado de rigidez dieléctrica del mismo.

El aislamiento eléctrico de los elementos se puede catalogar dependiendo de su capacidad de regeneración ante cualquier perturbación o fenómeno que se manifieste, así como también del medio en cual están presentes.

### **2.1.1 CLASIFICACIÓN DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO [2], [3], [6].**

#### **2.1.1.1 Según su capacidad de regeneración**

Aislamiento autoregenerable: aquel aislamiento capaz de recuperar sus propiedades aislantes inminentemente después de haber sufrido una descarga disruptiva.

Aislamiento no autoregenerable: aquel aislamiento incapaz de recurar total o parcialmente sus propiedades aislantes después de haber sufrido una descarga disruptiva.

Compréndase como descarga disruptiva a aquella que enmarca a las causas que generan los sobrevoltajes.

Se contempla de manera general que, los aislamientos de naturaleza sólida (cerámico) son considerados no autoregenerables, mientras que los aislamientos líquidos y gaseosos (aceite, SF<sub>6</sub>, aire) son autoregenerables.

#### **2.1.1.2 Según su disposición**

Aislamiento interno: Correspondiente a la parte intrínseca del aislante, la cual se encuentra protegida de las sollicitaciones ambientales y efectos atmosféricos.



Aislamiento externo: trayectoria latente en las superficies perceptibles con el aire y, que está presta a las sollicitaciones ambientales y efectos atmosféricos.

## 2.2 NIVELES DE VOLTAJE [2].

La normativa internacional IEC 60071 establece ciertos parámetros que son de obligado acatamiento, a continuación, se plasma de manera conceptual los criterios relacionados al término de voltaje.

- Voltaje nominal: dato con el cual se identifica a una red eléctrica.
- Voltaje máximo: es el valor eficaz más elevado entre las fases latente en condiciones normales de operación.
- Voltaje permanente o a frecuencia industrial: el valor eficaz del voltaje es constante, considérese como aquel voltaje al cual opera el sistema eléctrico.
- Sobrevoltaje transitorio: excedente de voltaje que puede ser oscilatorio o no, de muy corta duración.

Según el estándar mencionado se contemplan dos escenarios designados como Gama I y Gama II, los cuales se encuentran definidos por el nivel de voltaje:

$$1kV < Gama I \leq 245 kV$$

$$245kV < Gama II$$

## 2.3 SOBREVOLTAJES [2], [7].

Entendiéndose al término de sobrevoltaje como aquel valor de voltaje que excede al voltaje máximo de una red eléctrica, se puede contemplar a las sollicitaciones de voltaje que se encuentran presentes en la coordinación de aislamiento, las cuales no son sino la parametrización por la duración, forma y efecto de los sobrevoltajes. A continuación, se describen a los mencionados sobrevoltajes no sin antes exponer que, existe una previa clasificación de los mismos según su origen externo o interno. Los sobrevoltajes de origen externo son aquellos que se suscitan a causas que son ajenas a la red eléctrica, dicho origen recae más bien a causas atmosféricas, ambientales, catástrofes naturales, etc., mientras que, los sobrevoltajes de origen interno son aquellos que nacen debido a consecuencia de

acciones realizadas en las instalaciones eléctricas, a estos sobrevoltajes se les atribuye los de maniobra y temporales.

## **2.3.1 CLASIFICACIÓN DE SOBREVOLTAJE [2], [3], [5].**

### **2.3.1.1 Sobrevoltajes temporales**

Son aquellos sobrevoltajes que tienen una duración considerablemente extensa y de frecuencia menor o mayor a la de frecuencia industrial. Las causas más comunes para que se presenten este tipo de sobrevoltajes son: fallas a tierra, pérdida de carga, resonancia y ferresonancia.

### **2.3.1.2 Sobrevoltajes de frente lento**

Mantienen una duración relativamente corta en el orden de los milisegundos, y en términos generales son originados por maniobras, es por ello que se le cataloga como un sobrevoltaje transitorio de origen interno.

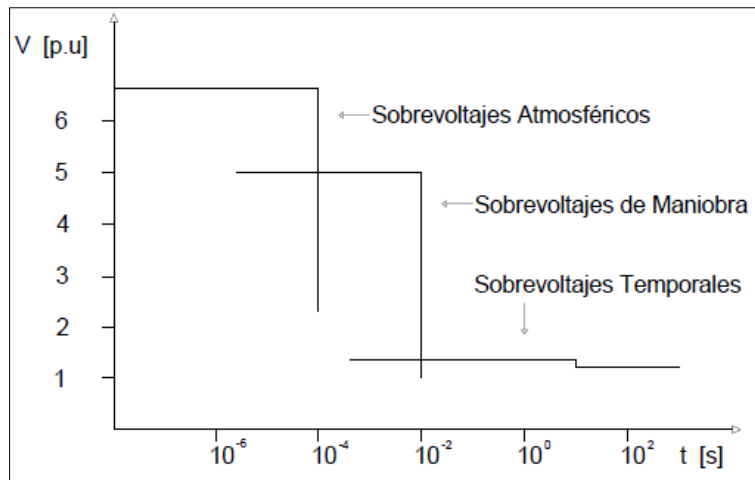
### **2.3.1.3 Sobrevoltajes de frente rápido**

Sobrevoltaje transitorio característico por su corta duración, la cual se encuentra en el orden de los microsegundos, mantiene un valor muy excedido en comparación al voltaje máximo de la red eléctrica, son consecuencia de descargas atmosféricas.

### **2.3.1.4 Sobrevoltajes de frente muy rápido**

Son aquellos sobrevoltajes transitorios que tienen duración extremadamente minúscula, se habla del orden de los nanosegundos, y se origina en las maniobras de equipos aislados en SF6, su frecuencia está comúnmente mayor al 1MHz.

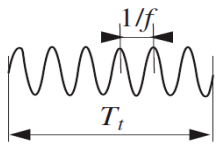
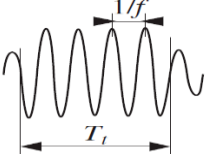
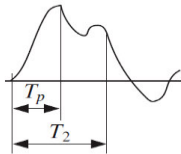
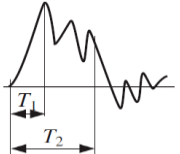
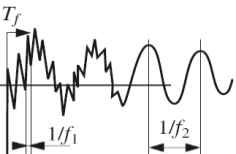
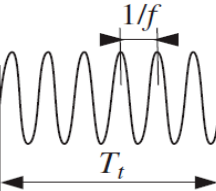
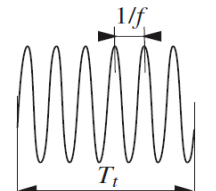
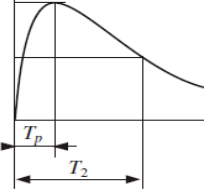
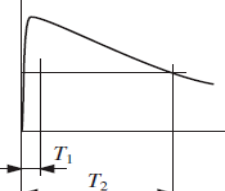
Posteriormente, en base a lo que se observa en la **Figura 2.1.**, se puede apreciar la relación que existe entre los sobrevoltajes anteriormente mencionados y su duración.



**Figura 2.1.** Clasificación de Sobrevoltajes [3].

En base a la normativa internacional IEC 60071 se plantea la siguiente **Tabla 2.1.** En la cual evidentemente se plasma la manera en cómo se parametriza a cada sobrevoltaje, es decir, la normalización de su forma de onda, amplitud y rangos de duración, e incluso las características de los ensayos de voltajes normalizados; aspectos que, permiten dentro del proceso de coordinación de aislamiento la determinación de datos requeridos.

**Tabla 2.1.** Clasificación y formas de onda de voltajes y sobrevoltajes [2].

TIPO	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continuo	Temporal	Frente Lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Gamas de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f = 50 \text{ o } 60 \text{ [Hz]}$ $T_t \geq 3.600 \text{ [s]}$	$10 < f < 500 \text{ [Hz]}$ $0,02 \leq T_t \leq 3.600 \text{ [s]}$	$20 < T_p \leq 5.000 \text{ [}\mu\text{s]}$ $T_2 \leq 20 \text{ [ms]}$	$0.1 < T_1 \leq 20 \text{ [}\mu\text{s]}$ $T_2 \leq 300 \text{ [}\mu\text{s]}$	$T_f \leq 100 \text{ [ns]}$ $0.3 < f_1 < 100 \text{ [MHz]}$ $30 < f_2 < 300 \text{ [kHz]}$
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					.
	$f = 50 \text{ o } 60 \text{ [Hz]}$	$48 \leq f \leq 68 \text{ [Hz]}$ $T_t = 60 \text{ [s]}$	$T_p = 250 \text{ [}\mu\text{s]}$ $T_2 = 2.500 \text{ [}\mu\text{s]}$	$T_1 = 1,2 \text{ [}\mu\text{s]}$ $T_2 = 50 \text{ [}\mu\text{s]}$	.
Ensayo de voltaje soportado normalizado	.	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	.
• Se define por los comités de producto correspondientes					

### 2.3.1.5 Causantes de Sobrevoltajes [3], [5], [6].

- Fallas a tierra.



Comprendiéndose a una falla como aquel evento que interfiere con el normal funcionamiento de un circuito eléctrico se puede exteriorizar que, al presentarse una falla lo más óptimo es que de manera inmediata exista una reconexión de la/s línea/s afectada/s mediante interruptores dispuestos en el sistema, no obstante, si después de manifestarse una falla es imposible la reconexión se determina a dicha falla como falla permanente, dichas fallas son causadas cuando la/s línea/s caen a tierra. Comúnmente este tipo de fallas representan al 70 u 80% del total de fallas que se suscitan en líneas de transmisión. Por lo tanto, enfocándose en las descritas fallas se puede comprender que, al entrar en contacto una o dos fases del sistema con tierra se genera en ese propicio instante un transitorio que desencadena a un sobrevoltaje a una frecuencia dispareja con la de operación normal, sin embargo, una vez que se atenúa el proceso transitorio, como resultado se tiene/n a la/s fase/s sana/s con un voltaje elevado respecto al voltaje normal de operación.

Es por ello que, para lo que se refiere al estudio de los sobrevoltajes temporales causados por fallas a tierra, comúnmente se efectúa el estudio de fallas monofásicas (línea a tierra) debido a que, son estos casos los que presentan el mayor valor de sobrevoltaje latente en el momento transitorio.

En la **Figura 2.2.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



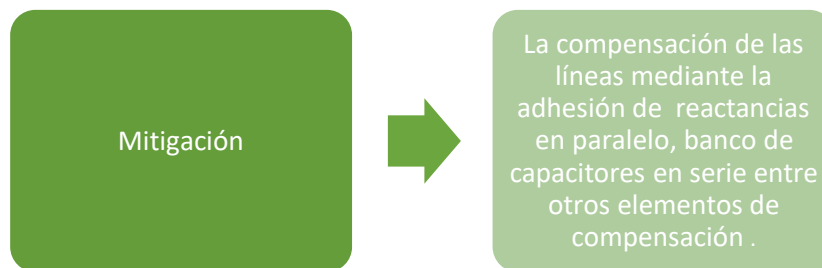
**Figura 2.2.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes por fallas a tierra.

- Pérdida de carga.



El elemento precedente a una carga es el interruptor, es por ello que cuando se enfatiza en la pérdida de carga la responsabilidad de la salida repentina de dicho elemento recae en la apertura del interruptor, ahora bien, se entiende que la apertura puede ser debido a una mala maniobra considerada como una mala operación por parte del personal adjunto o porque se trató de proteger a la carga de alguna sobretensión o falla latente en el sistema.

En la **Figura 2.3.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



**Figura 2.3.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes por pérdida de carga.

- Resonancia.



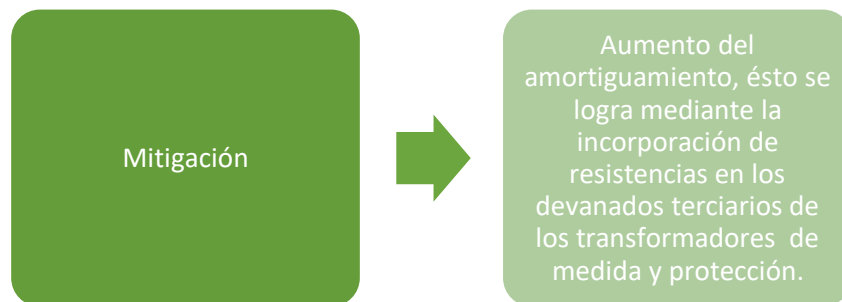
Al adherirse o restarse cargas comprendidas por elementos capacitivos y/o inductivos, la red eléctrica tiene que sufrir los estragos de la magnetización no lineal propia de este tipo de carga, razón por la cual se generan los sobrevoltajes. Los valores de los sobrevoltajes que se propician a causa de la resonancia pueden ser valores muy elevados, no obstante, la solución a dicho percance se da a través de las distintas configuraciones de conexión que pueden tener dichas cargas en la instalación eléctrica.

- Ferroresonancia.



Este fenómeno se desencadena del anterior (resonancia), debido a que nace por el comportamiento que tienen las cargas capacitivas e inductivas dentro de una red eléctrica. Generalmente, cuando se está tratando con la adhesión en serie de una carga capacitiva y una reactancia naturalmente saturable, en un medio eléctrico que posee un amortiguamiento muy bajo, y existe la presencia de un transformador, es justamente la combinación del comportamiento en resonancia del capacitor y la característica lineal de la inductancia la razón por la cual se inyecta como resultado una corriente extremadamente elevada a la red eléctrica, lo cual evidentemente da origen a que se generen sobrevoltajes muy elevados.

En la **Figura 2.4.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



**Figura 2.4.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes por ferroresonancia.

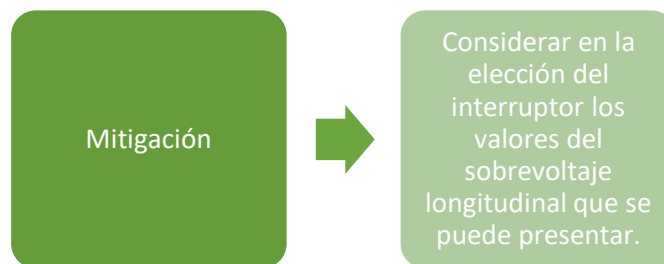
- Sobrevoltajes longitudinales.



Estos sobrevoltajes se suscitan en un escenario que plantea a dos redes eléctricas que se encuentran independientes una de la otra pero que, sin embargo, mantienen una conexión mediante un interruptor, el cual al cerrarse se busca que se sincronicen las dos

redes y en consecuencia dejen de lado la independencia de cada una. Por lo tanto, el problema y el origen de la perturbación en cuestión surge cuando, en el diferencial de voltaje que existe en los extremos del interruptor los voltajes son opuestos, lo cual una vez que se cierra el interruptor se genera un voltaje con un valor que dobla al valor del voltaje de fase a tierra, y que permanece así incluso durante algunos minutos, a dicho excedente voltaje se lo determina como un sobrevoltaje longitudinal.

En la **Figura 2.5.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



**Figura 2.5.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes longitudinales.

- Energización y recierre de líneas de transmisión.



Estas acciones son propias de operaciones de maniobra que se efectúan en las redes eléctricas. Los sobrevoltajes que se generan a partir de estas operaciones pueden ser encasillados en el estudio de la distribución de probabilidad para determinar su magnitud. Los métodos estadísticos a través de los cuales se realiza dicha distribución son:

- Método fase – cresta

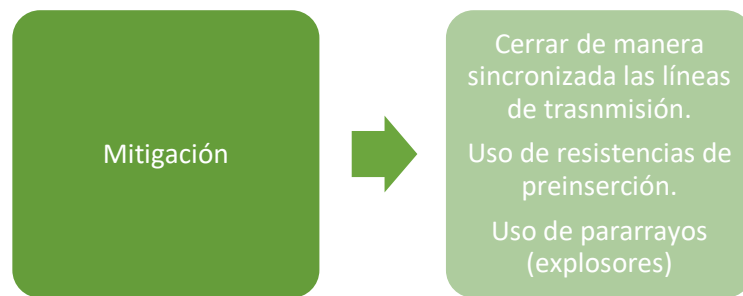
La función de densidad de los sobrevoltajes se determina a partir de sobrevoltajes (línea-tierra) latentes en una fase, de donde se asume que dichos valores son los mismos para las tres fases. La maniobra expresa en conclusión tres valores de voltajes máximos para la distribución de probabilidad de los sobrevoltajes representativos.



➤ Método caso – cresta

La función de densidad de los sobrevoltajes se obtiene a partir del sobrevoltaje línea-tierra latente en la fase en la cual se realiza la maniobra. Entonces se comprende que, la maniobra determina en sí un solo valor de voltaje máximo para la distribución de probabilidad de los voltajes representativos.

En la **Figura 2.6.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



**Figura 2.6.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes por energización y recierre de líneas de transmisión.

- Fallas y despeje de las mismas.



Al presentarse fallas en una red eléctrica aparece un problema en el correcto funcionamiento del sistema eléctrico, puesto que, se producen sobrevoltajes que entorpecen la operación normal, no obstante, al despejar la falla aún se mantienen problemas con la presencia de sobrevoltajes, puesto que, se está reincorporando a una fase, que se encontraba con un voltaje nulo de operación, a las condiciones normales de operación.

- Pérdida de carga.



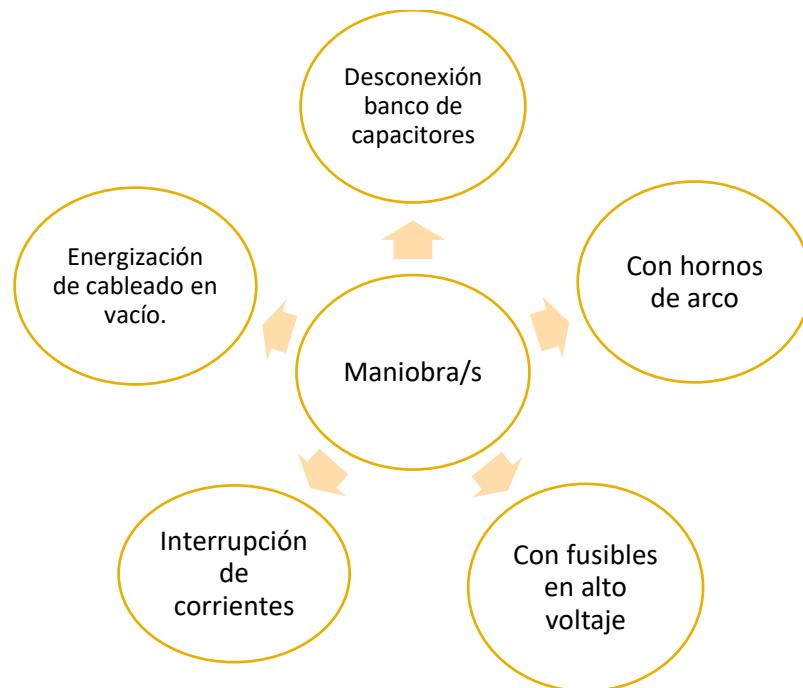
Se considera a esta causa como origen de sobrevoltajes de frente lento cuando, principalmente surgen en redes eléctricas que tienen transformadores a los terminales de salida del generador o presencia de líneas de transmisión muy extensas.

- Maniobra de cargas capacitivas e inductivas.



Estas maniobras originan sobrevoltajes en los sistemas eléctricos de potencia, dado que, en cada una de estas maniobras se ven latentes elementos capacitivos e inductivos, mismos que tienen una característica no lineal de comportamiento.

En la **Figura 2.7.** se encuentran descritos los tipos de maniobras que originan los sobrevoltajes en cuestión.



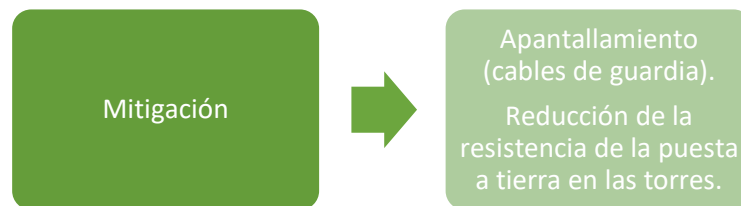
**Figura 2.7.** Tipos de maniobras.

- Descarga atmosférica (rayo).



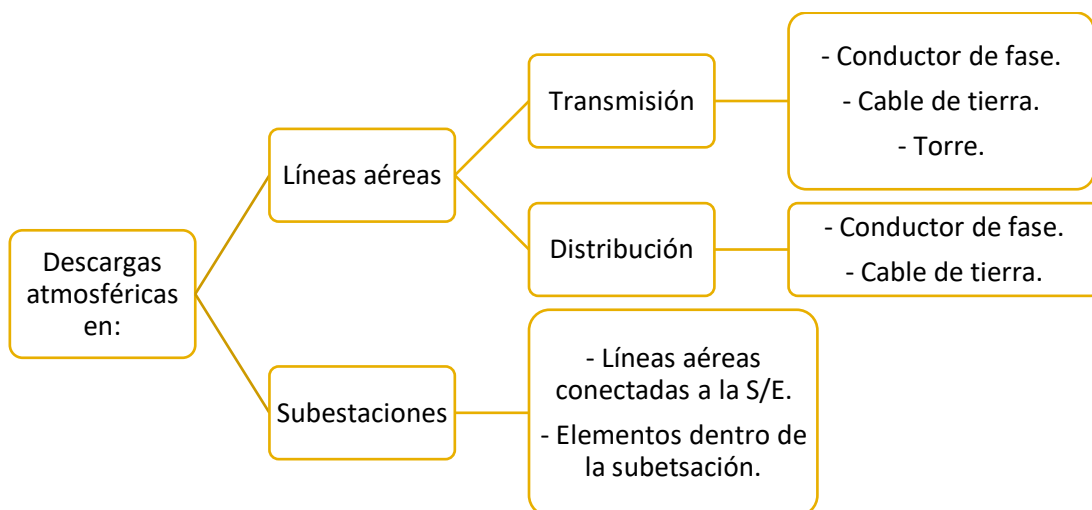
Comprendiéndose a una descarga atmosférica como aquellos impactos directos de los rayos, se puede hacer hincapié en que, cuando dichos impactos son sobre líneas eléctricas se generan ondas inducidas de sobrevoltajes que se propagan entre las líneas, generalmente el valor de tales sobrevoltajes está alrededor de los 300 kV, razón por la cual son muy representativos para redes eléctricas de gama I. Aun así, no se puede omitir el hecho de que las descargas atmosféricas son variables de carácter estadístico, por lo que, es justamente mediante estadísticas que se determina los valores de dichos sobrevoltajes representativos en la coordinación de aislamiento de redes de gama II, obteniendo a través de dicho método estadístico valores más precisos.

En la **Figura 2.8.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



**Figura 2.8.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes por descarga atmosférica.

A continuación, en la **Figura 2.9.** se plantea los escenarios más comunes donde se manifiestan los impactos de rayo.



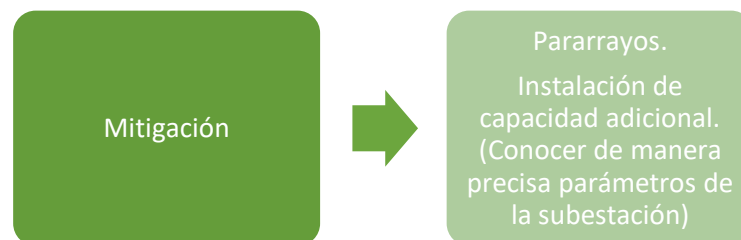
**Figura 2.9.** Lugares de impacto de rayo.

- Maniobra de seccionadores en subestaciones GIS.



La acción que engloba a la maniobra de seccionadores dentro de subestaciones GIS (Gas Insulated Substations), es justamente la responsable de propiciar sobrevoltajes de frente muy rápido, esto debido a que, las propiedades del gas ( $SF_6$ ) tienen una disrupción muy rápida de sus electrodos lo cual permiten una inminente propagación de las ondas de sobrevoltaje dentro de la subestación, además que, dicha propagación se caracteriza por ser muy poco amortiguada. Estas maniobras pueden superar frecuencias del orden de 20 MHz, con una duración de 3 ns. Aun cuando son extremadamente rápidas pueden ser repetitivas dentro de una misma maniobra.

En la **Figura 2.10.** se encuentra descrito el aspecto referente a la acción de mitigar el sobrevoltaje en cuestión.



**Figura 2.10.** Aspectos a considerarse para atenuar los sobrevoltajes por maniobra de seccionadores en S/E GIS.

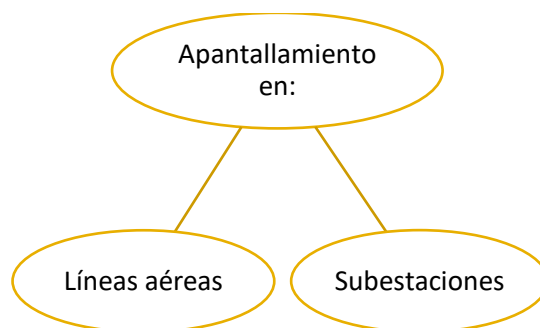
## 2.4 APANTALLAMIENTO [3].

El apantallamiento representa a una acción de mitigación de sobrevoltajes de frente rápido, es decir aquellos sobrevoltajes que se ven latentes en un sistema eléctrico una vez que en éste incide una descarga atmosférica es decir el impacto directo de un rayo.

La idea central del funcionamiento del apantallamiento radica en direccionar a los sobrevoltajes a desembocar a tierra, evitando de esta manera las interrupciones de desconexión del sistema a causa de los impactos de rayos en las líneas o subestaciones.

Importante comprender que, el método del apantallamiento puede converger en tres representaciones: cables de guardia, puntas Franklin, e incluso en una instalación donde se vean involucrados los cables de guardia y apartarrayos.

En la **Figura 2.11.** se presenta el esquema de apantallamiento, en el cual claramente se observa los escenarios en los cuales se aplica el apantallamiento.



**Figura 2.11.** Esquema de Apantallamiento.

#### **2.4.1 APANTALLAMIENTO EN LÍNEAS AÉREAS [3], [8].**

Dentro de las líneas aéreas se ven concernientes a aquellas líneas de transmisión y distribución, mismas que se encuentran tendidas a lo largo de la red eléctrica, al estar localizadas a la intemperie son susceptibles a descargas atmosféricas, dado el caso en el que, el impacto sea en una línea nace una sobretensión que al sobrepasar el nivel de aislamiento se genera el cebado de los aisladores, en tal cuestión se pueden presentar dos escenas, primera, dicho sobrevoltaje se desemboca a tierra produciendo de esta manera una falla a tierra, o, segunda, los aisladores permanecen afectados aún por el arco motivo por el cual las protecciones del sistema proceden a la apertura de la línea, y al momento que se aísla el elemento que se detectó con falla se interrumpe la operación normal del sistema.

Por lo tanto, para evitar las escenas anteriormente descritas es que, el apantallamiento, representado como un cable de guardia que se coloca en la parte superior de las torres, cumpla con el objetivo de que, sobre este cable impacten los rayos y que se pueda llevar a tierra a los sobrevoltajes que surgen a raíz de dicha descarga atmosférica.

Ahora bien, considerando la forma de onda normalizada y acogida por la normativa IEC 60071, **Figura 2.1.**, se aprecia que los parámetros característicos de ésta son: los tiempos de subida ( $t_1$ ) y de descenso o cola ( $t_2$ , valor que generalmente es el 50% del  $I_p$ ), y el valor pico de la forma de onda ( $I_p$ ). A pesar de que, se esté trabajando con una forma

de onda estandarizada son justamente los parámetros detallados previamente los cuales deben ser obtenidos y analizados a partir de una distribución estadística, lo cual nos encarrila a otro punto a considerarse, éste es la parte geográfica, pues, dependiendo del lugar en el cual se realicen los estudios variará la variable estadística de las descargas atmosféricas, por lo que es de gran importancia los datos que son proporcionados por los mapas ceráunicos de cada región, pues de ello depende el nivel isoceráunico, es decir la cantidad de descargas atmosféricas en una determinada zona e incluso su ubicación exacta de impacto dentro de la región.

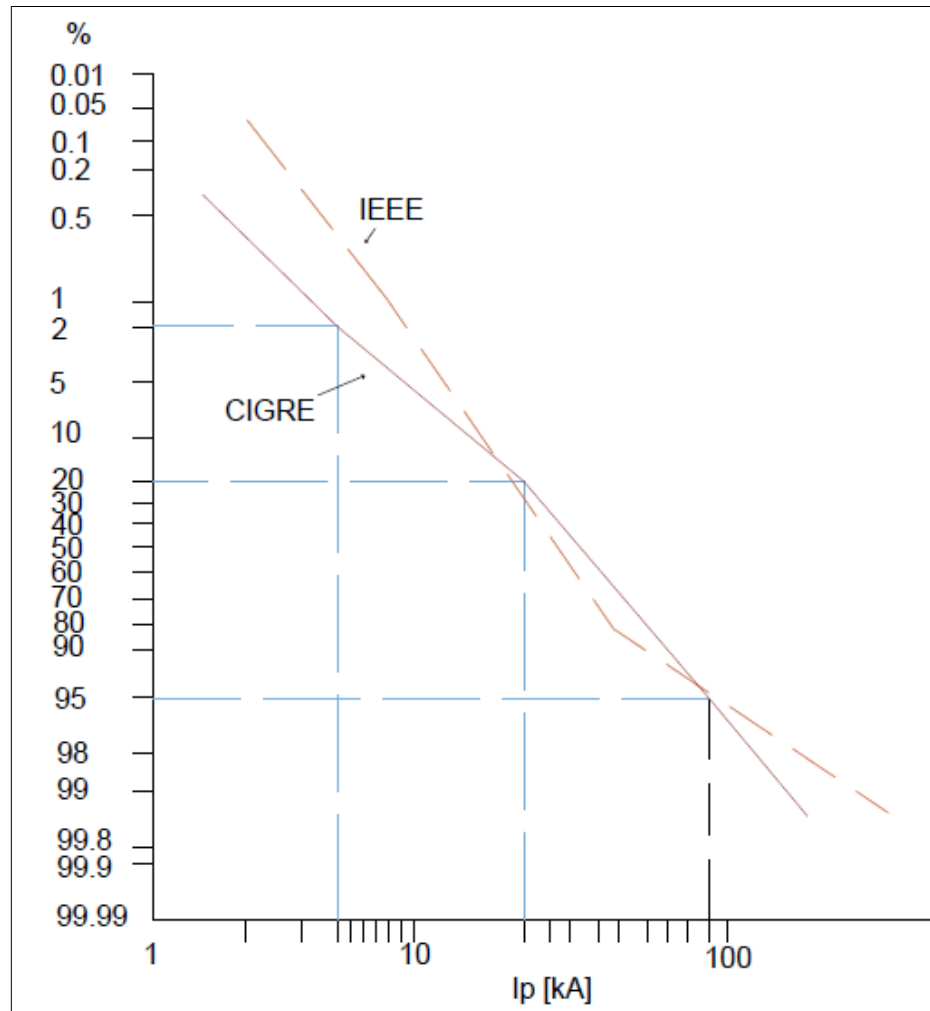
A continuación, se plantea la distribución fraccionaria que representa a la función de distribución de la forma de onda de una descarga atmosférica, **Ecuación 2.1.**

$$F(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Ip}{Io}\right)^{nc}}$$

**Ecuación 2.1.** Función de distribución.

De esta ecuación se obtiene en sí la probabilidad de que, ( $Ip > Io$ ) la corriente pico de la forma de onda del rayo sea mayor que una corriente planteada ( $Io$ ).

Ahora bien, CIGRE plantea las distribuciones de referencia para las amplitudes de las formas de onda de las corrientes de rayo, como se ilustra en la **Figura 2.12.**, de allí que adopta los valores para la función de distribución la corriente de referencia ( $Io$ ).



**Figura 2.12.** Distribuciones de referencia para las amplitudes de las formas de onda de las corrientes de rayo [8].

De las distribuciones planteadas por la CIGRE, es que la normativa internacional IEEE Std 1410-1997, establece que los valores para ( $I_0$  y  $n_c$ ) dentro de la función de distribución en el estudio de líneas de distribución son de 31 kA y 2.6 respectivamente.

Por otro lado, importante es mencionar que dentro de lo que se refiere al diseño del apantallamiento en líneas aéreas están los aspectos a considerarse como son: la distancia crítica, la ubicación geométrica de los elementos, ángulo total de apantallamiento.

#### **2.4.2 APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES [3].**

Una ventaja que se puede deducir de los impactos por rayo que sufren las líneas aéreas es que, los sobrevoltajes que se generan se amortiguan en cierta medida dado a la longitud de las líneas; acción de amortiguamiento que no sucede cuando las descargas

atmosféricas son directamente sobre las subestaciones o las líneas convergentes a esta instalación eléctrica. Por lo que, los sobrevoltajes nacientes de dichos impactos directos de rayo son extremadamente dañinos para los elementos que constituyen la subestación. Para brindar la acción de apantallamiento se puede emplear cables de guardia, puntas Franklin u ambas.

Debido a que son muchos los elementos que se deben proteger en una subestación, la metodología para diseñar el apantallamiento es muy diferente a la que se utiliza en el apantallamiento de líneas, donde se hace uso de una función de distribución; es por ello que, para determinar los parámetros del apantallamiento en subestaciones se sigue una serie de fórmulas planteadas en normativas internacionales, tal como la IEEE Std 998-1996.

## **2.5 PUESTA A TIERRA [3], [9].**

Los sistemas de puesta a tierra permiten la derivación a tierra de aquellos sobrevoltajes que se ven latentes en instalaciones eléctricas, dichos sobrevoltajes pueden ser fruto de descargas atmosféricas o por los distintos tipos de maniobras que se ejecutan en la operación de dicha red eléctrica.

Físicamente hablando se comprende a una puesta a tierra como la unión entre sí de uno o varios conductores metálicos, conductores que se los denomina electrodos.

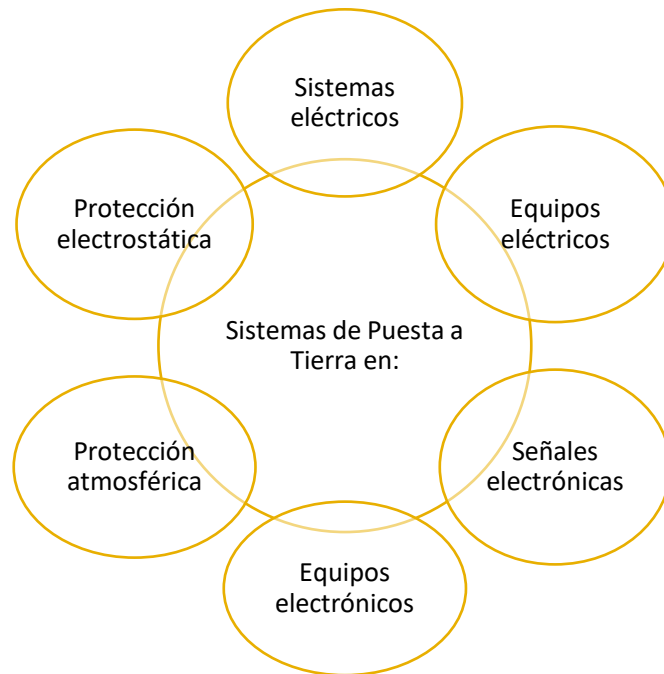
El objetivo que tienen estos sistemas es el preservar y garantizar la seguridad, en primer lugar, de los individuos que se encuentran en o cerca de la instalación eléctrica, segundo, la protección de las instalaciones y todos sus componentes, especialmente de aquellas cargas sensibles (equipo electrónico). Dicho fin se lleva a cabo cuando se evitan las diferencias potenciales a las que el ser humano es susceptible, como son: voltajes de paso y toque.

Dentro de lo que hace mención al estudio de un sistema de puesta a tierra se considera un aspecto muy importante como es la resistividad en los electrodos y en suelo. La resistividad es determinada como una magnitud que calcula la resistencia que se contrapone a la circulación de la corriente en los materiales. Ahora bien, comprendiéndose que el objetivo de una puesta a tierra es conducir a los sobrevoltajes a aterrizar a tierra es que, tanto los electrodos como el suelo deben tener una resistividad muy baja, de allí la razón por la cual en una puesta a tierra los electrodos son metálicos, y que para el estudio



del suelo se verifican aspectos que pueden modificar su resistividad como son: humedad, temperatura, salinidad, variaciones estacionarias, compactación, entre otros.

El sistema de puesta a tierra según los sistemas en los que es requerido se clasifica de la siguiente manera, obsérvese en la **Figura 2.13**.



**Figura 2.13.** Esquema de Sistemas de Puesta a Tierra.

Es así que, enfocándose en la aplicación de un sistema de puesta a tierra referente a protección atmosférica se comprende que, con el afán de canalizar la energía excedente que se genera de los impactos de rayo, se recurre a colocar un sistema de puesta a tierra representado en este caso por una malla metálica, misma que, es colocada en el suelo sobre el cual se encuentra el equipo a ser protegido. No obstante, existe el hecho de que las descargas atmosféricas tienen un comportamiento estadístico, con lo cual, se puede determinar por medio del estudio de probabilidades la cantidad de descargas atmosféricas y sus parámetros, determinación que da paso a la inserción de los pararrayos.

### 2.5.1 PARARRAYOS [9].

El diseño de un pararrayo depende de manera directa de la zona geográfica en la cual va a ser establecido, esto se debe a que, dependiendo del área se determina el comportamiento estadístico de las descargas atmosféricas, y en base a dicho estudio estadístico, sobre las descargas atmosféricas, determinar los parámetros del pararrayo,

elemento mediante el cual se pretende disminuir considerablemente los impactos directos de los rayos sobre los elementos o instalaciones que son el objetivo a ser protegido, es decir que, se deriva de manera controlada el exceso de energía a tierra.

El funcionamiento de un pararrayo está descrito en la **Figura 2.14**.



**Figura 2.14.** Esquema de funcionamiento de un pararrayo.

## **2.6 CRITERIOS GENERALES PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO [5], [6].**

La coordinación de aislamiento cumple con la finalidad de blindar a una red eléctrica respecto de aquellos sobrevoltajes a los cuales es muy perceptible. Un sistema eléctrico mantiene cierto perfil de vulnerabilidad ante acciones que se pueden manifestar tanto en su interior como en las que se dan en el medio exterior al cual pertenece, efectivamente se está hablando de aquellas maniobras que se llevan a cabo dentro de la operación de las instalaciones eléctricas, así como de aquellos fenómenos ambientales y atmosféricos.

Comprensible entonces, es el hecho de que, mediante la esquematización de los sobrevoltajes exista una metodología que permita determinar de manera normalizada los valores máximos de sobrevoltajes que una red eléctrica pueda soportar, acción que permite en base a dichos valores normalizados la determinación del nivel de aislamiento de la red

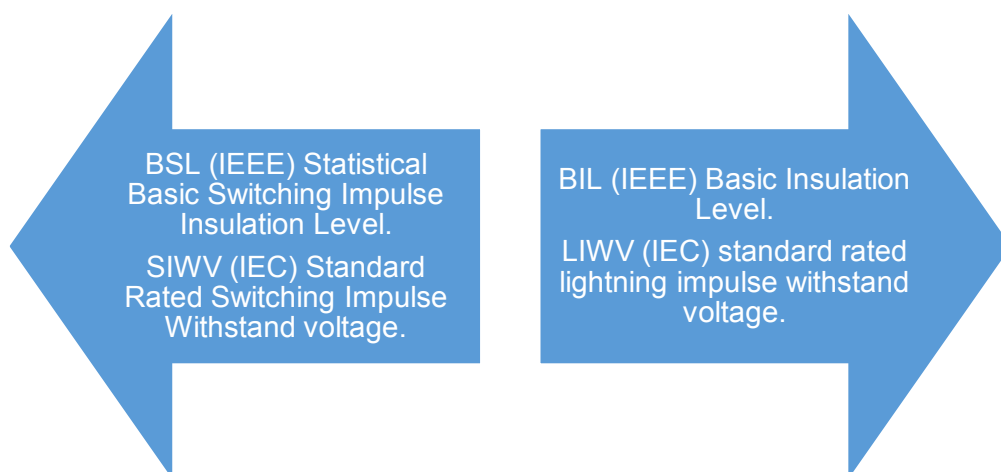
en cuestión, nivel a través del cual finalmente se selecciona el aislamiento de la instalación eléctrica.

### 2.6.1 NIVEL DE AISLAMIENTO [3], [2], [10].

El nivel de aislamiento es aquella determinación que se obtiene a partir de estudiar los sobrevoltajes a los que una red eléctrica está susceptible. Se concibe entonces que, el nivel de aislamiento es la resistencia que tiene el aislamiento en función de voltajes soportados, de allí la importancia de realizar un estudio cabal en lo que se refiere a la determinación de los valores de voltajes y sobrevoltajes en una red.

Con certeza se puede expresar que, el aislamiento en una red eléctrica es el resultado final de la coordinación de aislamiento, y a través de la cual se está protegiendo a la instalación eléctrica, sin embargo, dichas instalaciones dependiendo de su aislamiento toman cierto valor económico, por lo que, la coordinación de aislamiento no solo se trata de dictaminar como resultado a valores exagerados de sobrevoltajes para marcar como nivel de aislamiento uno sobredimensionado, sino que, obtener lo más preciso posible dichos valores para dimensionar de manera precisa al nivel de aislamiento.

Dentro de lo que se refiere a la determinación del nivel de aislamiento se toman en cuenta dos tipos de nivel básico de aislamiento, dicha consideración se prescribe tanto en la normativa internacional IEC e IEEE, **Figura 2.15**.



**Figura 2.15.** Esquema de niveles básicos de aislamiento.

Considerándose que:

- BSL es el nivel básico de aislamiento para sobrevoltajes por maniobras.

- BIL es el nivel básico de aislamiento para sobrevoltajes por descargas atmosféricas.

Se vislumbra que, dentro de la coordinación de aislamiento para gama I se toma el nivel básico de aislamiento BIL, mientras que para los de gama II el BSL. Dicha asignación mantiene mucha lógica y se ve justificada con conceptos mencionados en puntos anteriores, pues se especificaba que para lo que se refiere redes de gama II los sobrevoltajes más representativos son los originados por maniobras, mientras que para los de gama I, mucho más representativos son los sobrevoltajes tipo rayo.

Posteriormente, se exponen las **Tablas 2.2. y 2.3** que son las expuestas por la normativa IEC 60071 para la determinación de los valores de los voltajes soportados normalizados según la gama.

**Tabla 2.2.** Niveles normalizados de aislamiento para gama I [2].

Voltaje más elevado de la red Um [kV]	Voltaje soportado asignado normalizado a frecuencia industrial de corta duración [kV]	Voltaje soportado asignado normalizado a impulso tipo rayo [kV]
	(valor eficaz)	(valor cresta)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5 **	38	75 95 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52 **	95	250
72,5	140	325
100 ***	150 • 185	380 • 450
123	185 • 230	450 • 550
145	185 • 230 275	450 • 550 650
170 **	230 • 275 325	550 • 650 750
245	275 • 325 • 360 395 460	650 • 750 • 850 950 1050
• Se amerita ensayos adicionales de voltaje soportado entre fases que corroboren el cumplimiento de los voltajes soportados requeridos entre fases.		
•• Valores de Um que son muy poco frecuentes, no son datos preferenciales en la IEC 60038		
••• Valores de Um que se omiten en la IEC 60038, sin embargo, se las incluye en esta gama para ciertos productos.		

**Tabla 2.3.** Niveles normalizados de aislamiento para gama II [2].

Voltaje más elevado de la red Um [kV]	Voltaje soportado asignado normalizado a impulso tipo maniobra			Voltaje soportado asignado normalizado a impulso tipo rayo [kV]
	Aislamiento longitudinal [kV]	Fase a tierra [kV]	Fase-fase (relación con el valor de cresta fase-tierra)	
(valor eficaz)	(valor cresta)			(valor cresta)
300 •	750	750	1,5	850
	750	850	1,5	950
362	850	850	1,5	950
	850	950	1,5	1050
420	850	850	1,6	950
	950	950	1,5	1050
	950	1050	1,5	1175
550	950	950	1,7	1050
	950	1050	1,6	1175
	950	1175	1,5	1300
	1050			1425
800	1175	1300	1,7	1550
	1175	1425	1,7	1675
	1175	1550	1,6	1800
	1300			1800

• Um no es un dato preferencial en la IEC 60038

El nivel de aislamiento no puede seleccionarse de manera tal que, exista un margen extenso en cuanto a los valores máximos de voltaje soportados puesto que, se sobredimensionaría el aislamiento de la red eléctrica, es por ello que, el hecho de realizar un estudio probabilístico para la determinación de los sobrevoltajes favorece a que la coordinación de aislamiento sea estrictamente más ajustado, con lo cual se merma el sobredimensionamiento y con ello el costo del aislamiento de la instalación eléctrica. Pese a ello, se ha considerado que, es justamente el nivel de voltaje, al cual se encuentra la red eléctrica, el cual define el tipo de estudio que se debe implementar, estableciéndose así, un estudio determinístico para gama I, mientras que, para lo que se refiere a la gama II, donde se ve involucrado un nivel de extra alto voltaje, se debe realizar con mucha más sensibilidad el estudio de la determinación de los sobrevoltajes por lo que el estudio estadístico es la decisión más acertada.

### 2.6.2 ESTUDIO DETERMINÍSTICO [4], [10].

El mencionado estudio es un método que es aplicable en aquellos casos en los cuales no se tiene datos estadísticos para poder conocer la distribución estadística de un

fenómeno, dichos datos son los resultados que se consiguen de escenarios estadísticos en los cuales se observa y cuantifica los parámetros de comportamiento del fenómeno. Por lo tanto, direccionando el presente método a lo que se refiere la coordinación de aislamiento se comprende que, para la selección de aquellos sobrevoltajes representativos que mantienen un origen y/o comportamiento estadístico lo que se procede a realizar es la elección de niveles de aislamiento donde se considere el valor máximo de sobrevoltaje soportable, no obstante, dicho accionar conlleva a posibles sobredimensionamientos, pese a ello, es más aceptable aplicar este método en cuestión en redes de gama I.

### **2.6.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO [4], [10], [6].**

Este estudio en particular es considerado el método a aplicarse para cuando se conoce la distribución probabilística de un sobrevoltaje de origen y/o con comportamiento estadístico. En consecuencia, este método es el apropiado para lo que se refiere al estudio de aquellos sobrevoltajes a los cuales son susceptibles las redes eléctricas, pues mediante este método se encasilla el margen de la frecuencia con la cual se suscitan dichos sobrevoltajes, con lo que, se determina de manera mucho más precisa los límites de los valores máximos de voltajes soportados.

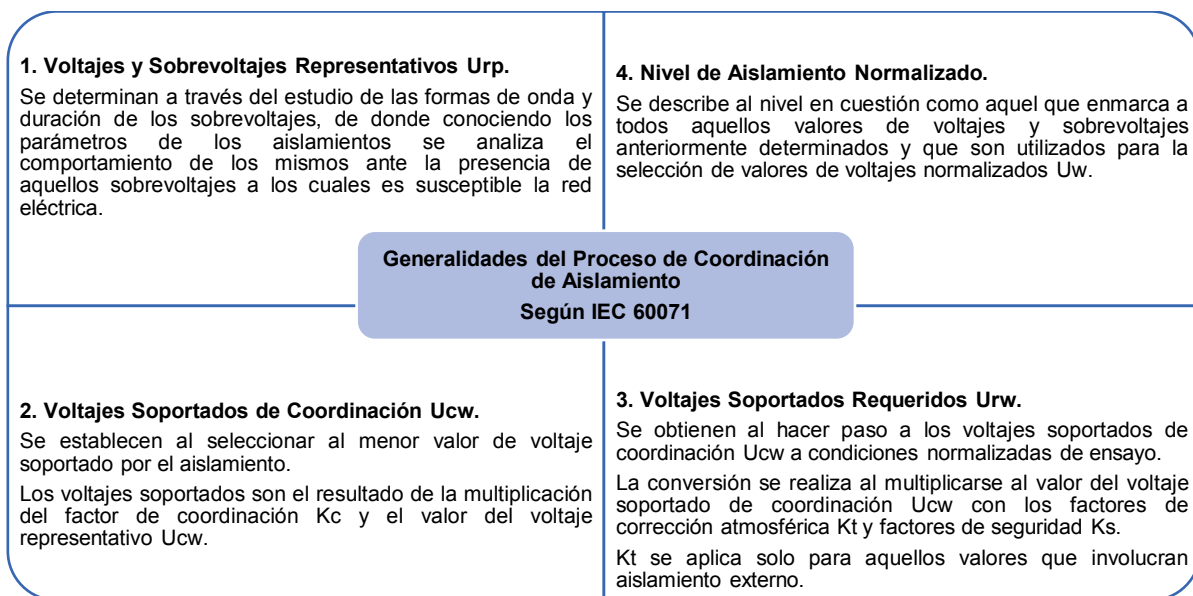
Importante es resaltar que, se considera un método muy apropiado para lo que hace referencia a las redes eléctricas que se encuentran a un nivel de voltaje de gama II, ya que, dentro de los valores de extra alto voltaje un sobredimensionamiento representa un exorbitante costo de la instalación eléctrica.

Ahora bien, enfatizando en el presente caso de estudio que, enmarca la coordinación de aislamiento para redes eléctricas que están dispuestas a un nivel de voltaje de gama II, se utiliza el método estadístico, en el cual efectivamente se determinan los máximos valores de voltajes a ser soportados mediante la distribución probabilística de los sobrevoltajes, para ello, en el particular caso se hace uso de la herramienta de software EMTP, donde es factible realizar simulaciones considerando la mayoría posible de los escenarios vulnerables a los cuales están expuestas las redes eléctricas. En dichas simulaciones la representación de los elementos que conforman a las redes eléctricas es mediante modelamiento electromagnético, lo que implica que, la representación es peculiar considerando el hecho de que, generalmente se reconocen a los elementos de una instalación eléctrica dado su representación por modelamientos transitorios.

## 2.7 PROCEDIMIENTO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO [2], [10].

Como bien se ha descrito a lo largo del presente documento la coordinación de aislamiento tiene como objetivo la determinación del nivel de aislamiento de una red eléctrica, dicho nivel es a través del cual se resguarda a las instalaciones eléctricas de aquellos sobrevoltajes que surgen de situaciones ante las cuales las redes eléctricas son vulnerables; no obstante, dicho estudio de coordinación mantiene un proceso de ejecución bajo el cual se determinan los valores máximos de voltajes soportados y sobrevoltajes representativos; el proceso en cuestión sintetiza las consideraciones a tomarse y describe los pasos que se deben ir ejecutando dentro del desarrollo de coordinación de aislamiento. A través de normas internacionales se sistematiza a dicho proceso, dentro de los mencionados estándares internacionales se encuentran los puntualizados por la IEEE e IEC, para consideración del presente trabajo se socializa con la normativa IEC 60071, ya que es justamente esta normativa la cual es adoptada en Ecuador para la coordinación de aislamiento en redes eléctricas.

Según la normativa internacional IEC 60071, para cada clase de sobrevoltaje se obtienen los valores de sobrevoltajes representativos, voltajes soportados de coordinación, y voltajes soportados especificados; los cuales representan al conjunto de valores de voltajes y sobrevoltajes normalizados que permiten determinar el nivel de aislamiento de una red eléctrica. Véase en la **Figura 2.16**.

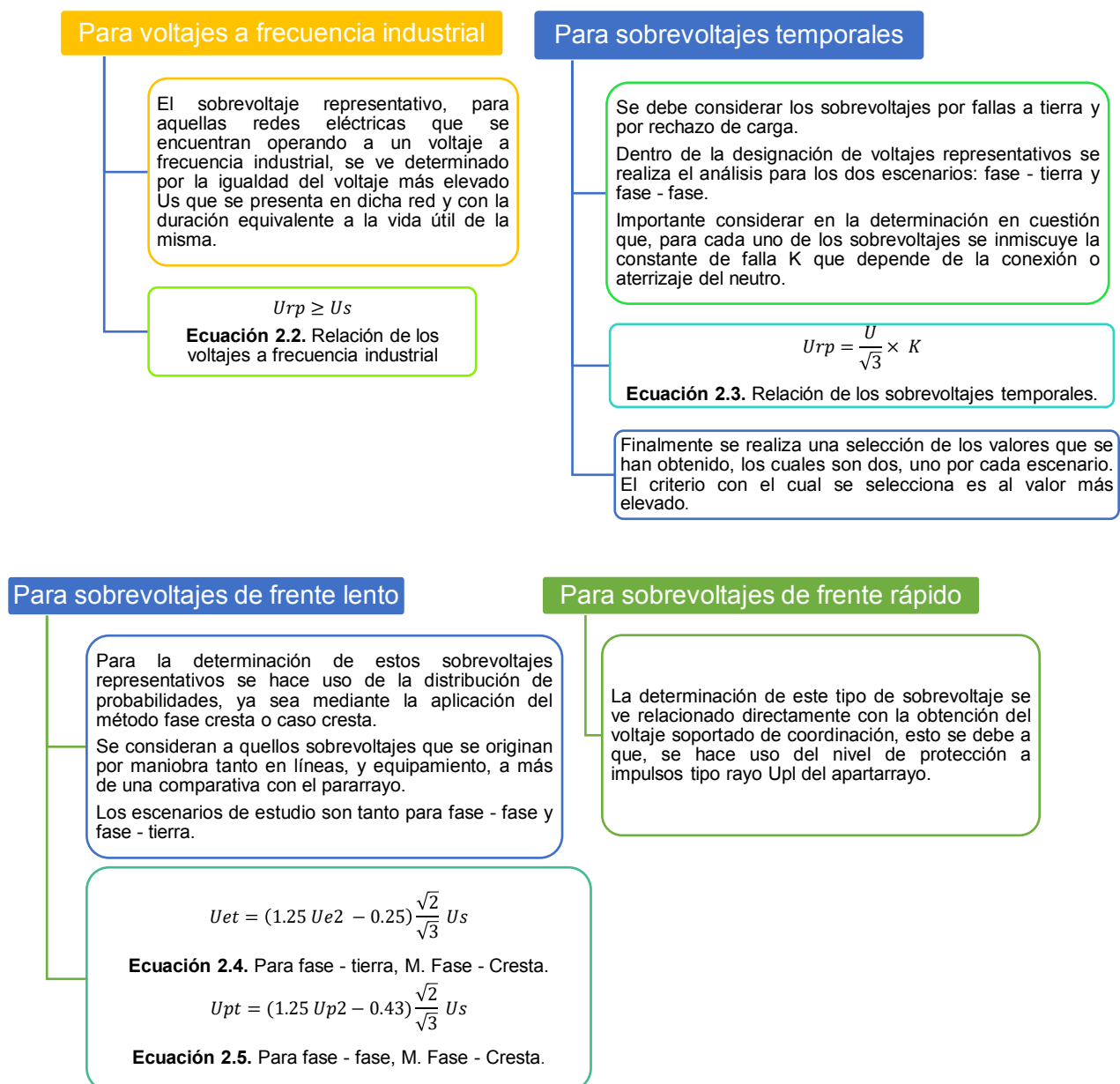


**Figura 2.16.** Generalidades del Proceso de Coordinación de Aislamiento.

### 2.7.1 VOLTAJES Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS $U_{rp}$ [2], [4].

Para cada voltaje y sobrevoltaje que se encuentra representado y parametrizado en la **Tabla 2.1** se determina el valor representativo. Estos voltajes y sobrevoltajes representativos se pueden obtener a partir de: asumir un valor máximo, un conjunto de datos de cresta o una distribución estadística de datos de cresta.

A continuación, según la norma IEC 60071, para cada tipo de voltaje y sobrevoltaje se indican las consideraciones a tomarse para designar los voltajes representativos, específicamente cuando se asume un valor máximo. **Figura 2.17.**

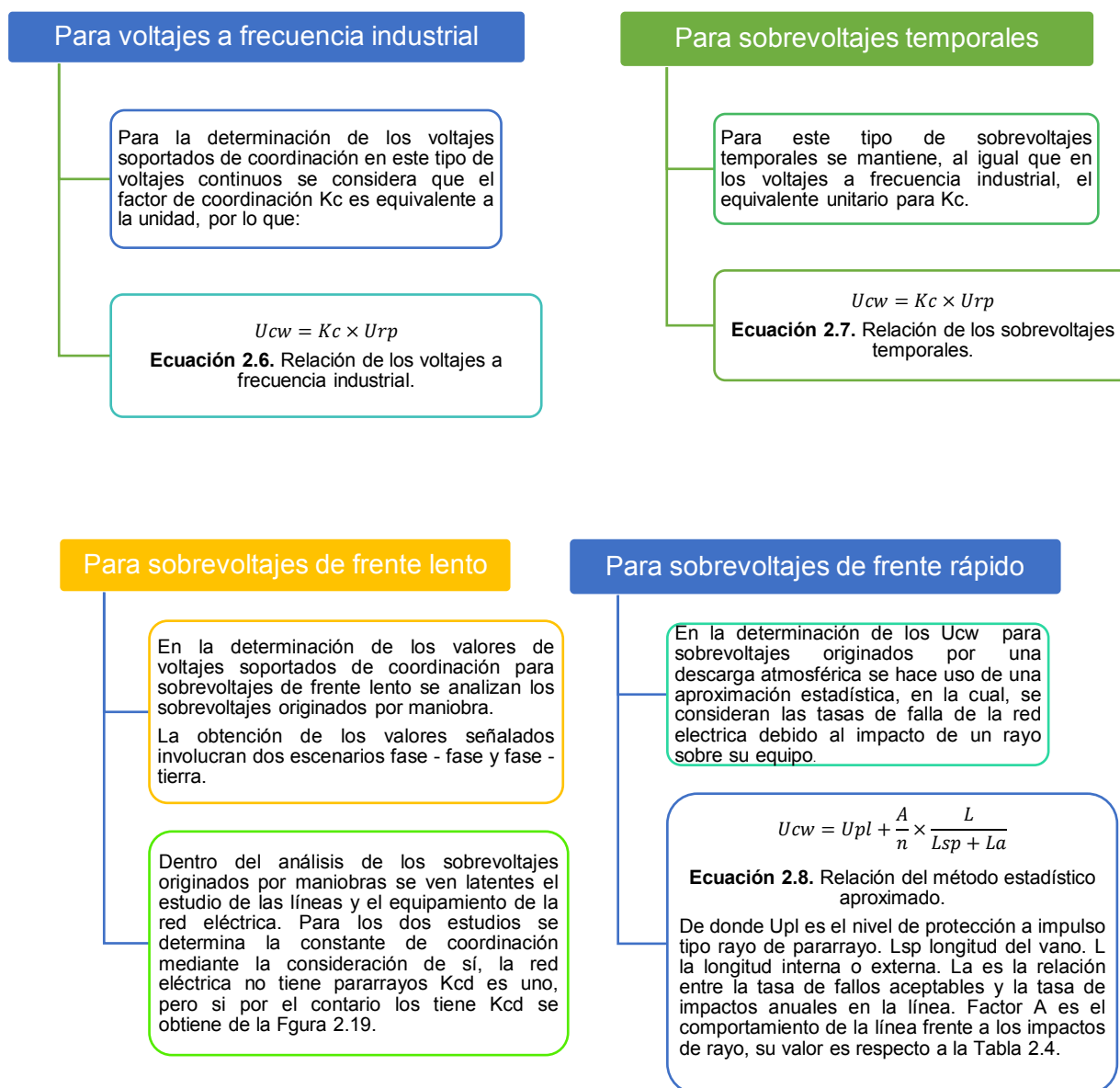


**Figura 2.17.** Consideraciones para el cálculo de los voltajes representativos.

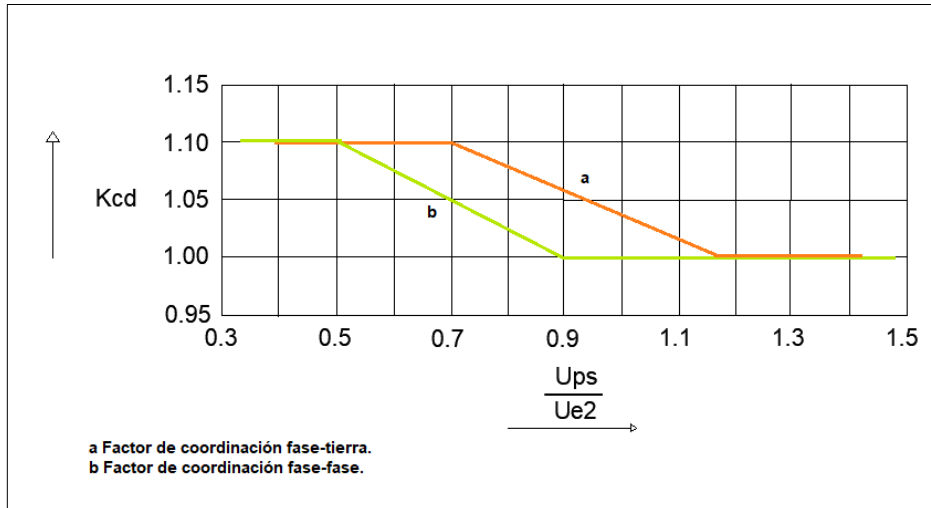


## 2.7.2 VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN $U_{cw}$ [2], [4].

Estos voltajes soportados de coordinación se sintetizan como aquellos valores de voltajes representativos que el aislamiento es capaz de soportar bajo condiciones de operación. Por lo tanto, al transmitir lo mencionado, a la obtención matemática de los voltajes en cuestión es que, se ven involucrados tanto los valores de los voltajes representativos (obtenidos anteriormente) en conjunto con constantes de coordinación. **Figura 2.18.**



**Figura 2.18.** Consideraciones para el cálculo de los voltajes soportados de coordinación.



**Figura 2.19.** Comportamiento del factor de coordinación  $K_{cd}$  [11].

**Tabla 2.4.** Valores del factor A, dentro de la determinación del voltaje soportado de coordinación para sobrevoltajes de frente rápido.

<b>TIPO DE LÍNEA</b>	<b>L. Distribución</b>	Crucetas	900	<b>A (kV)</b>
		Apoyos de madera	2700	
	<b>L. Transmisión</b>	Un solo conductor	4500	
		Doble haz	7000	
		Cuádruple haz	11000	
		Haz de 6 u 8 conductores	17000	

### 2.7.3 VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS $U_{rw}$ [2], [4].

Este tipo de voltajes son el resultado del paso de los voltajes soportados de coordinación a condiciones normalizadas de ensayos, es decir que, matemáticamente hablando, se multiplica a los  $U_{cw}$  con factores que representan la compensación de las condiciones atmosféricas (factor de corrección atmosférico  $K_t$ ), y diferentes efectos (factor de seguridad  $K_s$ ) tales como: diferencias en el acoplamiento de los materiales, calidad de los materiales e instalación, envejecimiento entre otras.

Para la determinación de los valores de los voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$  se establecen dos escenarios de trabajo, los cuales dependen directamente con la naturaleza del aislamiento, si se trata de la determinación de  $U_{rw}$  para elementos que se encuentran a la intemperie se ven inmiscuidos los factores tanto atmosférico  $K_t$  como de seguridad  $K_s$ ,

con sus respectivos valores, pero, si se trata de la determinación de aislamiento interno se omite el factor atmosférico debido a que no hay afectación por las condiciones ambientales y atmosféricas.

### 2.7.3.1 Factor de Corrección Atmosférico [2], [5], [11].

Según la IEC60071-2 se establece al factor de corrección atmosférico en función de la humedad y densidad relativa del aire, **Ecuación 2.9.**

$$K_t = k_1 \times k_2$$

**Ecuación 2.9.** Factor de corrección atmosférico.

De donde se comprende que:

$k_1$  y  $k_2$  son factores que representan las correcciones de la densidad del aire y la humedad respectivamente.

Al comprender que, la rigidez dieléctrica se ve afectada directamente por la densidad del aire, se enfoca al factor de corrección por altura, ya que, a través de resultados procedentes de una gama de pruebas se concreta que, la presión del aire decrece de manera exponencial con afinidad a la altura, es decir que, la rigidez dieléctrica también decrece de manera exponencial. De ello que se define al factor de altura como, **Ecuación 2.10.:**

$$K_a = e^{m \times \left(\frac{H}{8150}\right)}$$

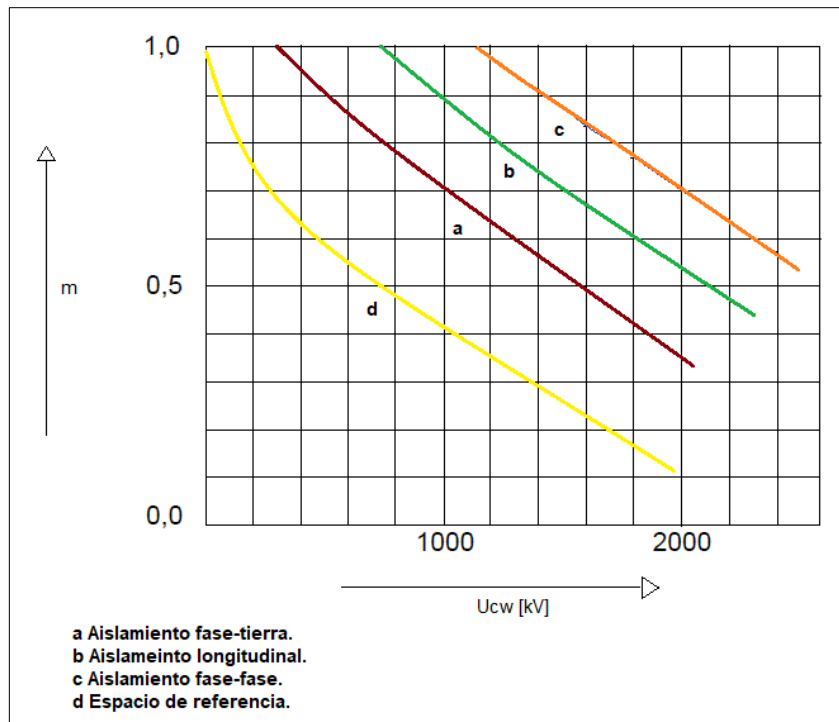
**Ecuación 2.10.** Factor de altura.

De donde:

**H** representa a la altura en metros, respecto a un punto sobre el nivel del mar.

**m** es un dato exponencial de origen experimental, este valor varía dependiendo de la categoría de sobrevoltaje con el cual se está trabando. Para sobrevoltajes temporales **m** depende del nivel de contaminación a la cual están expuestos los aisladores, de donde se comprende que, al dotar a **m** con un valor unitario se establece que la contaminación es extremadamente baja, mientras que para lugares donde existe un alto nivel de contaminación el valor que adopta **m** varía entre 0.5 y 0.8. Por otro lado, para sobrevoltajes de frente rápido **m** se dictamina con el valor de 1. No obstante, para los sobrevoltajes de

frente lento, originados por impulsos tipo maniobra se determina  $m$  a partir de la ilustración de la **Figura 2.20**.



**Figura 2.20.** Comportamiento del exponente  $m$ , determinación de voltajes soportados requeridos para impulsos tipo maniobra [11].

### 2.7.3.2 Factor de Seguridad [2], [5].

Este factor es considerado en la determinación de los voltajes soportados requeridos sin excepción, es decir, se ve latente tanto para la coordinación de aislamiento interno, así como para el externo. Este factor es el valor que cubre todas aquellas afectaciones relacionadas a la calidad del material, ensambladura de los equipos, vida útil de los elementos, entre otros. ante las cuales la red eléctrica está predominantemente expuesta. El valor depende del tipo de escenario ante el cual se esté realizando el análisis, para aislamiento interno  $K_s = 1.15$ , mientras que, para el aislamiento externo  $K_s = 1.05$ .

### 2.7.4 SELECCIÓN DEL NIVEL DE AISLAMIENTO NORMALIZADO [2], [4], [10].

La selección del nivel en cuestión relaciona dos aspectos importantes para la designación del aislamiento en las redes eléctricas, éstos son: el voltaje más elevado que

puede presentarse en los elementos que conforman a la red, y los voltajes soportados que se han definido en los pasos anteriormente detallados.

Para la elección del aislamiento normalizado se toman los valores estandarizados de la **Tabla 2.2** y **Tabla 2.3**, no obstante, existen ciertas apreciaciones que deben ser consideradas dentro de la pertinente elección.

Para la gama I: se realiza la migración de voltajes soportados de impulso tipo maniobra hacia los voltajes soportados a frecuencia industrial de corta duración y los de impulso tipo rayo, dicha conversión se realiza considerando los escenarios de fase-fase y fase-tierra, tanto para aislamiento interno como externo, tal como se detalla en la **Tabla 2.4**.

**Tabla 2.4.** Factores de Conversión para Voltajes de Gama I [11].

Aislamiento			A frecuencia industrial de corta duración	A impulso tipo rayo
Externo	Limpio y seco	fase-tierra	$0,6 + Urw / 8500$	$1,05 + Urw / 6000$
		fase-fase	$0,6 + Urw / 12700$	$1,05 + Urw / 9000$
	Limpio y mojado		0,6	1,3
Interno	GIS		0,7	1,25
	Aceite		0,5	1,10
	Sólido		0,5	1,00

Para la gama II: se ejecuta una migración de los voltajes soportados de frecuencia industrial de corta duración, es decir los temporales hacia los voltajes soportados de impulso tipo maniobra. Para la conversión en cuestión se consideran las categorías de aislamiento interno y externo, tal como se muestra en la **Tabla 2.5**.

**Tabla 2.5.** Factores de Conversión para Voltajes de Gama II [11].

Aislamiento		A impulso tipo maniobra
Externo	Limpio y seco	1,4
	Limpio y mojado	1,7
Interno	GIS	1,6
	Aceite	2,3
	Sólido	2,0

## CAPITULO III

### 3. MODELOS ELECTROMAGNÉTICOS

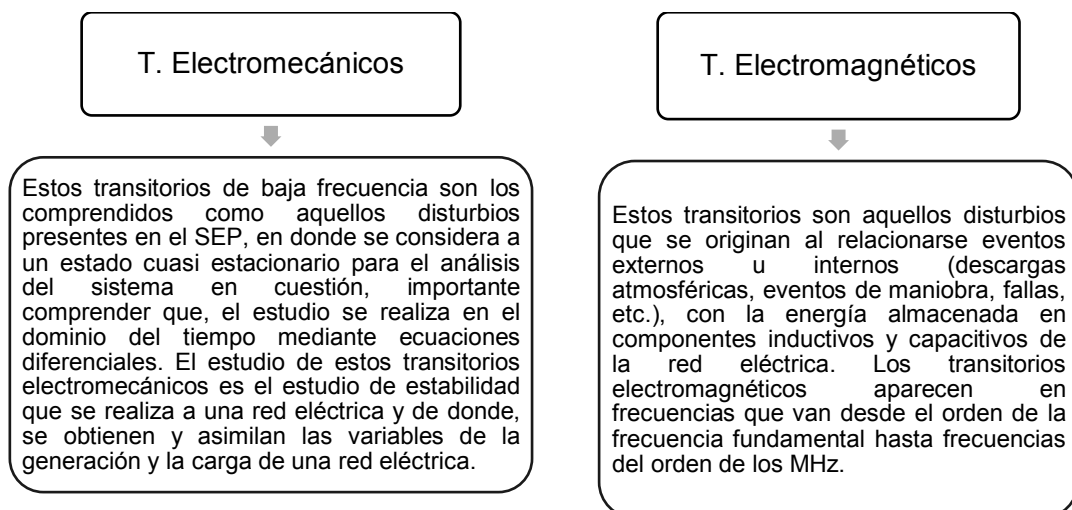
Dentro del presente capítulo se exponen los elementos que conforman a una red eléctrica, sin embargo, el enfoque de dichos componentes se basa en la modelación electromagnética de cada uno de ellos. En la descripción de los elementos se asocian incluso a los métodos mediante los cuales se realiza su estudio para la representación electromagnética, dicha presentación se expone a continuación, pero no sin antes, hacer una acotación a brevedad de lo que involucran los transitorios y su correlación con la representación electromagnética de los elementos de una red eléctrica.

#### 3.1 TRANSITORIOS EN REDES ELÉCTRICAS [12], [13].

Los transitorios son aquellos cambios súbitos o bruscos de corta duración y de gran magnitud, que comúnmente su ocurrencia es menor a un ciclo de la frecuencia fundamental del Sistema Eléctrico de Potencia. Las fuentes de origen de los transitorios radican generalmente en: eventos de conmutación, descargas atmosféricas, fallas, energización de capacitores, energización de transformadores, etc.

##### 3.1.1 TIPOS DE TRANSITORIOS EN REDES ELÉCTRICAS

En la **Figura 3.1.** se describen los transitorios electromecánicos y electromagnéticos.



**Figura 3.1.** Esquema de Tipos de Transitorios.

Por lo tanto, se comprende que, la relación existente entre la presentación de los componentes de la red eléctrica y sus representaciones electromagnéticas tiene como punto de partida que, en el estudio electromagnético se considera el comportamiento del equipamiento ante transitorios que dependen de la frecuencia, dando como resultado mediante este estudio electromagnético las especificaciones técnicas de los elementos que componen a la red eléctrica.

Una vez establecido el punto de los transitorios electromagnéticos y su relación con la representación electromagnética de los componentes de la red eléctrica, se procede a describir al equipamiento del sistema eléctrico.

### **3.2 CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN [14], [15], [16].**

Dentro de las acciones que se ejecutan en un sistema eléctrico de potencia, son justamente las líneas de transmisión, los componentes que cumplen con la acción de transportar la energía eléctrica desde un punto a otro.

Los parámetros que definen el funcionamiento de una línea de transmisión son: la resistencia, capacitancia, inductancia, y conductancia.

#### **✓ RESISTENCIA**

Es una propiedad física latente, en este caso, en los conductores que conforman a las líneas de transmisión, y que representa la acción de oposición u obstrucción al flujo de la corriente.

Para analizar la resistencia en corriente continua se hace uso de la siguiente relación descrita en la **Ecuación 3.1.**, de donde se establece que la distribución de la corriente DC es uniforme.

$$R_{cd,T} = \frac{\rho_T \times l}{A} [\Omega]$$

**Ecuación 3.1.** Resistencia DC.

De donde:

$\rho_T$  Resistividad del conductor dependiente de la temperatura.

A Superficie transversal del conductor.

$l$  Longitud del conductor.

En cuanto que, para la corriente alterna el flujo de la misma no es uniformemente distribuida a lo largo del conductor, y se conceptualiza que mientras aumenta la frecuencia la densidad de la corriente disminuye, relación que describe al fenómeno catalogado como efecto piel.

✓ INDUCTANCIA

La inductancia, para el estudio en cuestión, se comprende como la propiedad presente en los conductores, en donde se ve inmiscuida la intensidad del campo magnético, y la corriente que pasa a través del conductor. La acción que representa la inductancia en los conductores es el hecho de tener capacidad de guardar energía equivalente a campos magnéticos. La disposición de los conductores y su configuración es elemental para obtener la inductancia, la cual se la consigue a través de la aplicación de la Ley de Ampere.

✓ CAPACITANCIA

La capacitancia, dentro del contexto, se comprende como el almacenaje de energía que existe en los conductores en forma de campos eléctricos, para el estudio en cuestión se aplica la Ley de Gauss, esto se debe a que, es justamente lo que plantea esta ley (la carga en un área cerrada es igual al flujo eléctrico que sale de la misma), lo que permite obtener entre los conductores el resultado de la diferencia que existe de potencial.

✓ CONDUCTANCIA

Se comprende a la conductancia como aquella perdida de potencia que se genera entre la tierra y conductores, la perdida se origina debido a la fuga de corrientes en los aisladores, no obstante, comúnmente se omiten dentro del análisis de sistemas de potencia ya que es un valor mínimo.

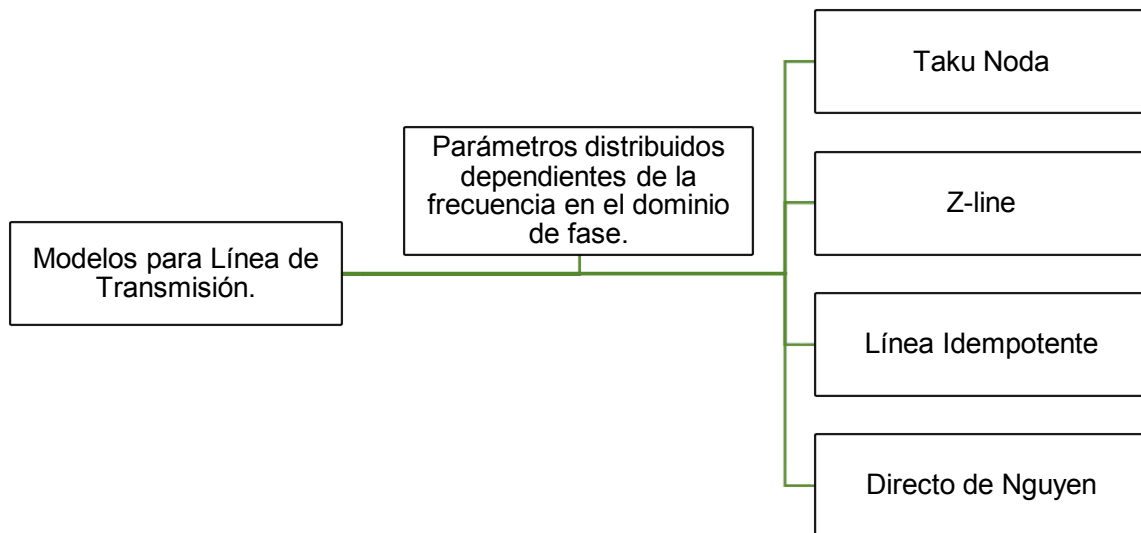
### **3.2.1 MODELOS DE LÍNEAS DE TRASMISIÓN [17].**

La modelación de las líneas de transmisión depende, en primer lugar, de la naturaleza de la etapa transitoria que se busque analizar, de allí la importancia de comprender la diferencia entre los transitorios electromecánicos y electromagnéticos que pueden manifestarse en las líneas de transmisión, para el presente estudio se requiere



analizar el comportamiento y el perfil que adoptan las líneas de transmisión ante transitorios electromagnéticos, ya que, justamente éstos son los que están ligados directamente con eventos ante los cuales el sistema eléctrico es vulnerable y que, se parametrizan mediante la frecuencia.

Posteriormente, en la **Figura 3.2.** se plasman aquellos modelos que representan a las líneas de transmisión para el análisis de transitorios electromagnéticos y dependiente de la frecuencia.



**Figura 3.2.** Esquema de los modelos de L/T, dependientes de la frecuencia en el dominio de fase.

➤ Taku Noda

Este modelo plantea el hecho de que los parámetros que caracterizan a la línea de transmisión son dependientes de la frecuencia, el dominio en el cual se desarrolla este modelo es el de fase, a continuación, en la **Ecuación 3.2.** se plantea la relación que existe de la corriente y voltaje en los puntos externos de la línea de transmisión.

$$I_k(\omega) = Y_c(\omega) \times V_k(\omega) - e^{-i\omega t} \times H^T(\omega) \times \{Y_c(\omega) \times V_m(\omega) + I_m(\omega)\}$$

$$I_m(\omega) = Y_c(\omega) \times V_m(\omega) - e^{-i\omega t} \times H^T(\omega) \times \{Y_c(\omega) \times V_k(\omega) + I_k(\omega)\}$$

**Ecuación 3.2.** Corriente y voltajes en los extremos de una L/T.

De donde:

$I_k, I_m$  Corriente en los puntos extremos de la línea de transmisión.

$V_k, V_m$  Voltajes en los puntos extremos de la L/T.

$Y_c$  Admitancia de la L/T.

Importante recalcar que dichas expresiones pueden ser trasladadas al dominio del tiempo.

➤ Z-line

Este modelo, caracterizado por el análisis en el dominio de la fase, permite realizar el estudio de distintos tipos de configuraciones asimétricas que pueden tener las líneas de transmisión, eso debido a que, se excluyen gracias al dominio en el cual se trabaja, dificultades que comúnmente surgen al operar con matrices dependientes de la frecuencia y con transformación modal.

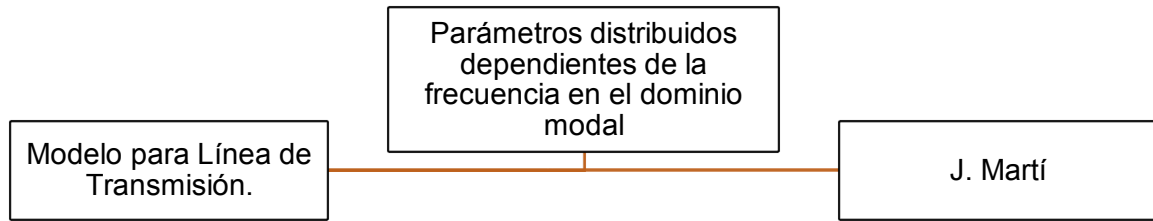
Este modelo se configura en dos secciones, en la primera se considera la propagación que enmarca a los campos eléctricos y magnéticos externos al conductor, y que dependen de la geometría de la disposición de las líneas. Mientras que, para la segunda sección, se consideran las inductancias y resistencias internas de los conductores y tierra, en esta sección se toma en cuenta la dependencia de todos los parámetros con la frecuencia. Por lo tanto, se comprende a la primera parte como una sección ideal de línea, en cuanto que, para la segunda parte, a una sección no ideal de la línea.

➤ Línea Idempotente

Este modelo mantiene cierta semejanza con el modelo de J. Martí, con la diferencia que al usar vectores propios en la descomposición modal se evita los problemas que surgen al trabajar las matrices que son transformadas modales y dependientes de la frecuencia.

➤ Directo de Nguyen

Este modelo hace uso de la aproximación de la matriz que representa a la admitancia característica de la línea de transmisión, y el paso de la matriz de propagación al dominio de fase haciendo uso de funciones racionales, con lo cual se ejecutan menos pasos para trasladar al dominio del tiempo el comportamiento de la línea.



**Figura 3.3.** Esquema de los modelos de L/T, dependientes de la frecuencia en el dominio modal.

➤ J. Martí

Este modelo utiliza la dependencia de los parámetros con respecto a la frecuencia, por lo tanto, para obtener las ecuaciones de la línea de transmisión en el dominio de la frecuencia se hace uso de las siguientes expresiones de voltaje, **Ecuación 3.3.**

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega) \times I_k(\omega) + E_{mh}(\omega)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega) \times I_m(\omega) + E_{kh}(\omega)$$

**Ecuación 3.3.** Voltajes dependientes de la frecuencia.

En donde:

$V_k$  ,  $V_m$  Voltaje en los puntos extremos de la L/T.

$Z_c$  Impedancia característica.

$I_k$  ,  $I_m$  Corriente en los extremos de la línea de transmisión.

$E_{mh}$  ,  $E_{kh}$  representan a las fuentes de voltaje en los nodos extremos.

Para la equivalencia de las fuentes de voltaje en los extremos considérese la **Ecuación 3.4.**

$$E_{mh} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega) \times I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l}$$

$$E_{kh} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega) \times I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l}$$

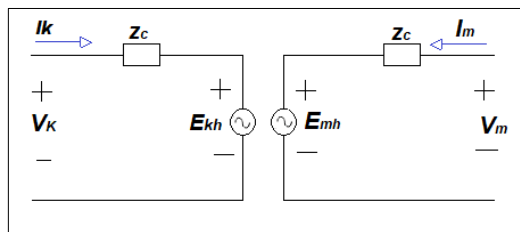
**Ecuación 3.4.** Voltajes de las fuentes en los nodos.

Donde:

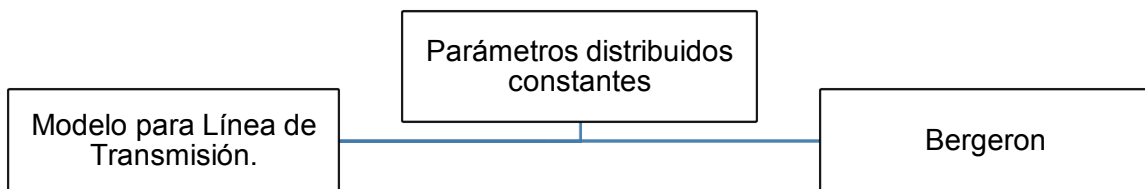
$Z_c$  Impedancia característica.

$\gamma$  Constante de propagación.

En la **Figura 3.4.** se ilustra al circuito equivalente de las ecuaciones anteriormente descritas.



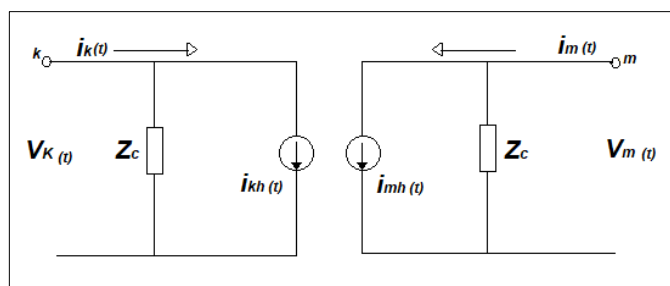
**Figura 3.4.** Modelo J. Martí en el dominio de la frecuencia [17].



**Figura 3.5.** Esquema de los modelos de L/T con parámetros distribuidos.

➤ Bergeron

La propagación de las ondas a través de una línea de transmisión sin pérdidas, en conjunto con la presencia de las constantes distribuidas de  $L'$  y  $C'$  (inductancia y capacitancia por unidad de longitud), constituyen la base fundamental del modelo de Bergeron. Su representación es la ilustrada en la **Figura 3.6.**



**Figura 3.6.** Modelo Bergeron [17].

Por otro lado, las expresiones matemáticas que relacionan las corrientes y voltajes en los puntos externos de la línea se representan en la **Ecuación 3.5**.

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} V_k(t) + i_{kh}(t)$$

$$i_m(t) = \frac{1}{Z_c} \times V_m(t) + i_{mh}(t)$$

**Ecuación 3.5.** Corriente y voltajes en los extremos de una L/T.

En donde:

$i_k$  ,  $i_m$  Corriente en los extremos de la L/T.

$V_k$  ,  $V_m$  Voltaje en los puntos extremos de la L/T.

$i_{kh}$  ,  $i_{mh}$  Fuentes de corriente en el circuito equivalente de la L/T.

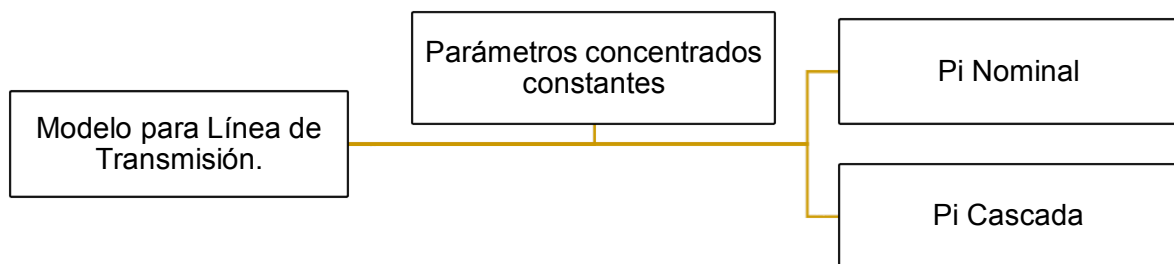
$Z_c$  Impedancia característica.

La impedancia característica se obtiene a partir de la expresión descrita en la **Ecuación 3.6**.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

**Ecuación 3.6.** Impedancia característica.

De donde,  $L'$  y  $C'$  son los parámetros que representan a las constantes distribuidas en la L/T.



**Figura 3.7.** Esquema de los modelos de L/T con parámetros concentrados constantes.

➤ Pi Nominal

El modelo en contexto representa a un análisis muy exacto que se puede aplicar en el estudio del comportamiento de las líneas cortas de transmisión en un estado estacionario, este modelo es la base para el desarrollo del modelo Pi Cascada. A continuación, se exponen aquellas expresiones que relacionan al voltaje y corriente en los extremos de la línea de transmisión:

$$V_k = \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) \times V_m + Z \times i_m$$

$$i_k = Y \times \left(\frac{ZY}{4} + 1\right) \times V_m + \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) \times i_m$$

**Ecuación 3.7.** Corriente y voltajes en los extremos de una L/T.

En donde:

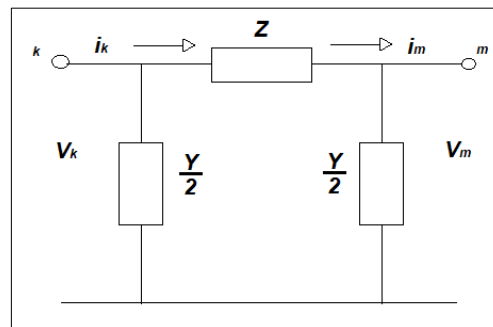
$V_k$  ,  $V_m$  Voltaje en los puntos extremos de la L/T.

$i_k$  ,  $i_m$  Corriente en los extremos de la L/T.

$Y$  Admitancia en derivación de la L/T.

$Z$  Impedancia serie de la L/T.

La ilustración en la **Figura 3.8.** representa el circuito en base al cual se deducen las expresiones anteriormente planteadas.



**Figura 3.8.** Modelo Pi Nominal [17].

De donde también se comprende que las expresiones para  $Z$  e  $\frac{Y}{2}$  son las expresiones descritas en la **Ecuación 3.8**.

$$Z = l \times (R' + j\omega L')$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{l}{2} \times (G' + j\omega C')$$

**Ecuación 3.8.** Impedancia característica y admitancia.

De donde:

$l$  Longitud total de la L/T [km].

$R'$  Resistencia por unidad de longitud [ $\Omega$ /km].

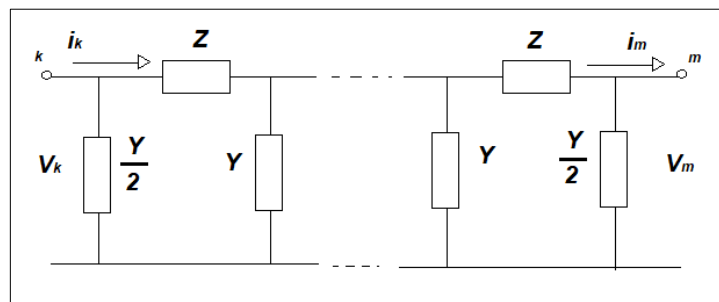
$G'$  Conductancia por unidad de longitud [S/km].

$L'$  Inductancia por unidad de longitud [H/km].

$C'$  Capacitancia por unidad de longitud [F/km].

➤ Pi en Cascada

Este modelo es una representación de aproximación discreta que se aplica a los parámetros distribuidos constantes en una línea de transmisión, tal como se muestra en la **Figura 3.9**. Este modelo no se le considera como el más exacto para fenómenos que se expresan a través de ondas viajeras como son los sobrevoltajes originados por maniobras o por descargas atmosféricas.

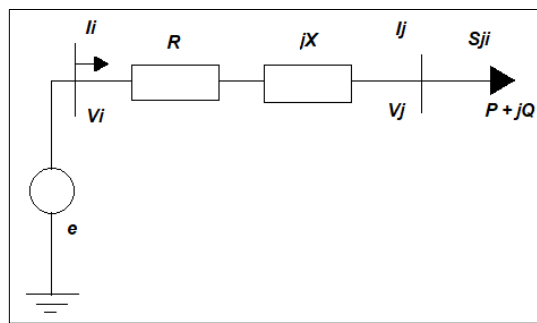


**Figura 3.9.** Modelo Pi en Cascada [17].

### 3.3 CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE FUENTES DE GENERACIÓN [16].

El modelamiento y representación de fuentes de generación depende mucho del estado transitorio que se desea analizar, en consiguiente, para el estudio en cuestión, evidentemente al ser los transitorios electromagnéticos los que se desea estudiar, existe una diferencia en las representaciones, la dicotomía radica en el tipo de sobrevoltaje que marca el escenario de estudio.

Para lo que se refiere al análisis de la fuente dentro del estudio de sobrevoltajes temporales se tiene el siguiente modelo, **Figura 3.10**.



**Figura 3.10.** Representación del Modelo de fuente [16].

Para este modelo las simulaciones se basan en ecuaciones que se rigen a los ejes de cuadratura y directo, si bien es cierto los parámetros están a dependencia de la frecuencia, la modelación se ejecuta considerando la estabilidad transitoria, teniendo de esta manera las siguientes expresiones que argumentan el comportamiento de la **Figura 3.5**.

$$Z = R + jX$$

$$S_{ji} = -(P + jQ) = P_{ji} + jQ_{ji}$$

$$P = -P_{ji} = (Rx V_i V_j \cos \delta - X V_i V_j \sen \delta - R V_j^2) / (R^2 + X^2)$$

$$Q = -Q_{ji} = (Xx V_i V_j \cos \delta - R_i V_j \sen \delta - X V_j^2) / (R^2 + X^2)$$

**Ecuación 3.9.** Impedancia y potencia en el modelamiento de fuentes.

De donde:



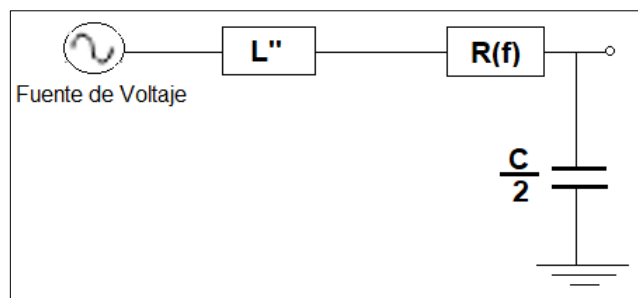
$Z$  Impedancia de la L/T.

$S_{ji}$  Potencia aparente en el extremo del Sistema.

$P$  Potencia activa de la carga del Sistema.

$Q$  Potencia reactiva de la carga del Sistema.

Ahora bien, la modelación de la fuente para el escenario de estudio de sobrevoltajes de frente lento toma las siguientes acotaciones y su representación tal cual se ilustra en la **Figura 3.11**.



**Figura 3.11.** Representación de una fuente [16].

En este modelo se considera la impedancia respecto a la frecuencia industrial, y se observa el comportamiento normal de operación de la fuente a la frecuencia nominal, en cuanto que, para cuando se simula la fuente en el acto de energización o re-energización de las líneas, se debe colocar al nivel del voltaje de la fuente lo más bajo respecto al voltaje de la línea a ser conmutada.

En cuanto que, para el estudio del comportamiento de las fuentes, en un escenario con sobrevoltajes de frente rápido, el modelo se establece con un voltaje a frecuencia industrial de una fuente de voltaje en conjunto con una resistencia en serie.

### **3.4 CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE TRANSFORMADORES [16].**

Para lo que se refiere a la modelación de los transformadores se considera que, cuando se está estudiando el comportamiento de éstos ante sobrevoltajes temporales los transformadores actúan como componentes inductivos, se consideran en el modelamiento las pérdidas de magnetización y cobre, al igual que el aspecto de saturación, importante

recalcar que las inductancias y resistencias son valores que se determinan a partir de herramientas informáticas.

De igual manera, para cuando se analizan los sobrevoltajes de frente lento, la modelación del transformador debe considerar las pérdidas, el flujo remanente y capacitancias parásitas.

Por lo tanto, adentrándose en el estudio del comportamiento de los transformadores ante la presencia de sobrevoltajes de frente rápido se tiene las siguientes consideraciones: los valores de los voltajes a tierra del transformador se modelan por la capacitancia a tierra, dicha capacitancia se obtienen a partir de la **Ecuación 3.10.**, de donde se comprende que es la representación para una conexión Y, mientras que, si se desea para una conexión D, la capacitancia expresada en la ecuación se divide para dos.

$$C = 0.52 \times P^{0,4}$$

**Ecuación 3.10.** Capacitancia a tierra para el modelamiento de transformadores.

De donde, importante considerar que las unidades a las cuales se encuentran los parámetros planteados en la **Ecuación 3.10.** son:  $C$  la capacitancia en  $nF$ ,  $P$  la potencia nominal en  $MVA$ .

Continuando, se representan valores estandarizados, **Tabla 3.1.** para la elección de la capacitancia del transformador en función del nivel de voltaje de operación.

**Tabla 3.1.** Capacitancias para el modelamiento de transformadores de potencia [5].

Voltaje Nominal [kV]	Capacitancia [nF]
362	1,5 - 4,0
420	1,5 - 6,0
425	1,5 - 8,0
765	1,5 - 10,0

### 3.5 CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE DISYUNTORES [16].

Para el estudio del comportamiento de los disyuntores ante presencia de sobrevoltajes temporales, se considera, como representación del interruptor de potencia,

a un nodo. No obstante, para cuando se toma en cuenta a los sobrevoltajes de frente lento se tienen las siguientes explicaciones, se puede representar al disyuntor a través de un interruptor ideal, el cual dependiendo si está abierto o cerrado se expresa como una resistencia ya sea infinita o nula, respectivamente. Para lo que se refiere al escenario con sobrevoltajes de frente rápido, los disyuntores se ven representados como capacitancias.

### **3.6 CRITERIOS PARA EL MODELAMIENTO DE TORRES [16], [18].**

Debido a los valores tan minúsculos de impedancia y admitancia de una torre dentro del estudio de los sobrevoltajes temporales, es que se representan a las torres como un nodo. Por otro lado, para el análisis que involucra a los sobrevoltajes de frente lento, la representación de las torres se considera omisa, más, sin embargo, para cuando se comprende que, la torre es directamente el punto de origen de los sobrevoltajes, entonces se modela a dicho componente del sistema eléctrico como una resistencia, el valor de dicha resistencia es equivalente a la resistencia de pie de torre.

Para el escenario donde se ven latentes los sobrevoltajes de frente rápido se representa a las torres como una línea de propagación con parámetros constantes y sin pérdidas, tal como lo expresa **Ecuación 3.11**.

$$Z = 60 \times \ln \frac{H\sqrt{2}}{r}$$

**Ecuación 3.11.** Impedancia característica.

De donde, **H** es la altura de la torre, y **r** equivale al radio de la base de la torre. Por lo tanto, se comprende que es fundamental la configuración de la estructura que tiene la torre al igual que su base y altura.

#### **3.6.1 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE [3], [19].**

Al estudiar la conducta de las torres ante sucesos relacionados a eventos que originan transitorios electromagnéticos, se denota cierto comportamiento no lineal en la resistencia de pie de torre o también denominada impedancia de puesta de tierra de la estructura, pues ésta se ve dependiente de la velocidad con la cual la corriente se propaga, debido a tal dependencia se puede determinar el comportamiento de la resistencia a través de la expresión expuesta en la **Ecuación 3.12.**, importante recalcar que, debido al

fenómeno que se genera de la ionización del suelo es que se ve afectada la resistencia de pie de torre.

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{Ig}}}$$

**Ecuación 3.12.** Resistencia de pie de torre.

De donde se entiende que:

$R_T$  Resistencia de pie de torre.

$R_0$  Resistencia de pie de torre a baja frecuencia y baja corriente.

$I$  Corriente de la descarga atmosférica que circula por la resistencia de pie de torre.

$Ig$  Corriente inminente a la ionización del suelo, misma que viene dada por la expresión planteada en la **Ecuación 3.13**.

$$Ig = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2}$$

**Ecuación 3.13.** Corriente de Ionización.

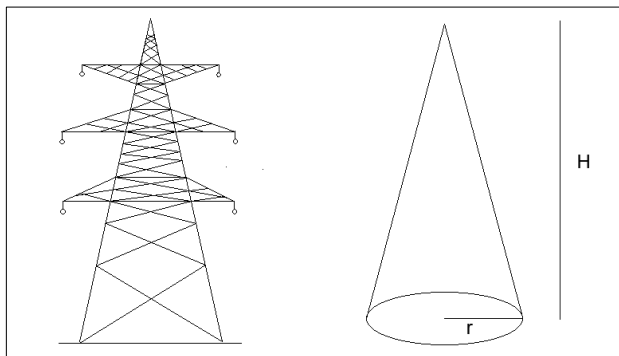
Donde,  $\rho$  representa a la resistividad del suelo,  $E_0$  gradiente de ionización (valor comprendido entre los valores de 300 y 400 [kV/m]).

Por lo tanto, según las expresiones planteadas se entiende que, la resistencia ocupa valores altos para cuando las corrientes producidas por una descarga atmosférica son pequeñas.

### 3.6.2 FORMAS DE TORRES [6][3].

Las torres se pueden clasificar según su función, geometría o forma, para el estudio en cuestión se enfoca dicha clasificación en la forma general que tienen las torres, eso debido a que, para la obtención de la impedancia característica, dentro de la representación de las torres bajo la presencia de sobrevoltajes de frente rápido, se utilizan las variables (altura, radio) que se obtienen según la forma de las torres.

- ✓ Forma cónica



**Figura 3.12.** Forma Cónica de una torre [6].

Comúnmente a este tipo de torres se les identifica por llevar la silueta de una cónica, tal como se ilustra en la **Figura 3.12.**, incluso se les identifica porque a través de éstas pasa un solo hilo de guardia. Su impedancia característica se obtiene usando la **Ecuación 3.11.**, y el tiempo de propagación se obtiene a partir de la **Ecuación 3.14.**

$$t = \frac{H}{c}$$

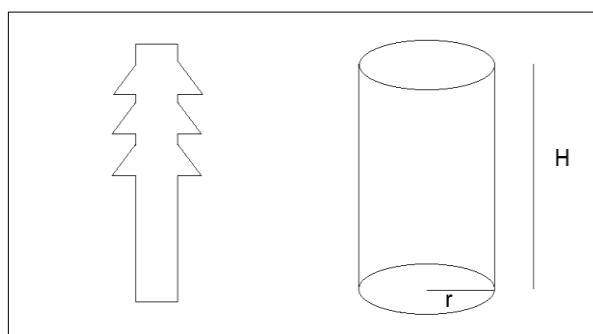
**Ecuación 3.14.** Tiempo de propagación.

En donde:

**H** Altura de la estructura de la torre.

**c** Velocidad de la luz.

- ✓ Forma cilíndrica



**Figura 3.13.** Forma Cilíndrica de una torre.

Dentro del análisis de este tipo de torres se calcula la impedancia característica considerando la intromisión de los cables de guardia, tal como se expresa en la **Ecuación 3.15.**, por otro lado, tenemos a la **Ecuación 3.16.** en donde se expresa el tiempo de propagación.

$$Z = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{2H}{r} \right) - 60$$

**Ecuación 3.15.** Impedancia Característica.

$$t = \frac{H}{0.85 \times c}$$

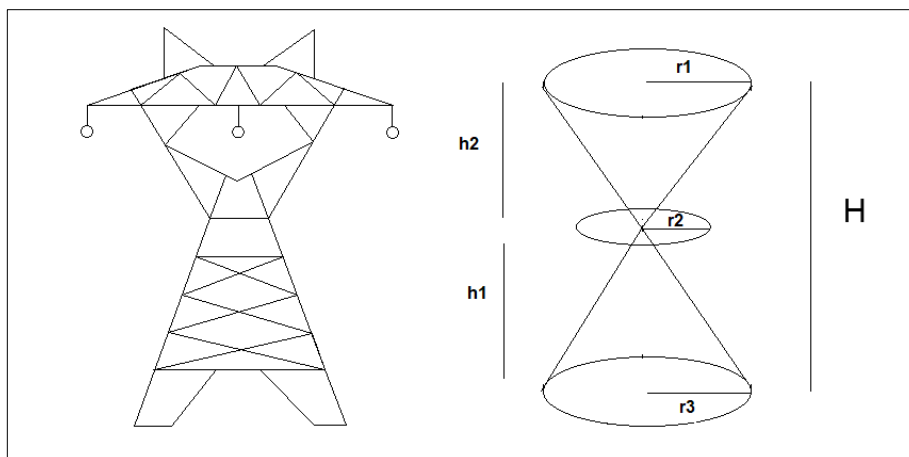
**Ecuación 3.16.** Tiempo de propagación.

En donde:

**H** Altura de la estructura de la torre.

**c** Velocidad de la luz.

✓ Forma cintura



**Figura 3.14.** Forma Cintura de una torre [6].

Generalmente la impedancia se encuentra dentro de los valores de 150 – 300 ohm, cabe mencionar que en este tipo de forma de torre se ven involucrados dos hilos de guardia. No obstante, para el cálculo exacto de la impedancia característica considérese la expresión dispuesta en la **Ecuación 3.17.**

$$Z = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \times 60 \times \left[ \ln \left( \cot \left( \frac{\tan^{-1}(r/H)}{2} \right) - \ln(\sqrt{2}) \right) \right]$$

**Ecuación 3.17.** Impedancia Característica.

De donde,  $r$  que es el término referente al radio equivalente de la torre se obtiene a partir de la **Ecuación 3.18**.

$$r = \frac{r1 \times h2 + r2 \times H + r3 \times h1}{H}$$

**Ecuación 3.18.** Radio de una torre de forma cintura.

Tomando en cuenta que:

$r1$  radio superior de la forma de la torre.

$r2$  radio medio de la forma de la torre.

$r3$  radio inferior de la forma de la torre.

$h2$  altura superior de la forma de la torre.

$h1$  altura inferior de la forma de torre.

$H$  altura total de la torre.

Para el cálculo del tiempo de propagación se tiene la **Ecuación 3.19**.

$$t = \frac{H}{0.85 \times c}$$

**Ecuación 3.19.** Tiempo de propagación.

En donde:

$H$  Altura de la estructura de la torre.

$c$  Velocidad de la luz.

## CAPÍTULO IV

### 4. DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA [3].

La distribución de probabilidad es la función a través de la cual se parametriza a una variable de naturaleza aleatoria ante la probabilidad de su ocurrencia, esto con la clara finalidad de estudiar al comportamiento inconstante de dicha variable. Dentro del estudio en cuestión, se comprende como variables de carácter aleatorio o estadístico a los sobrevoltajes, ya sean éstos tipo maniobra o tipo rayo.

En cuanto que, para el desarrollo de la aplicación de la distribución probabilística existen ciertos pasos específicos que se consideran:

- Selección de la función de distribución probabilística para la variable aleatoria.
- Desarrollo de la función seleccionada en base a los datos proporcionados del comportamiento histórico de la variable.

Generalmente, los procesos que se entablan en las funciones de distribución de probabilidad se basan en el método de Monte Carlo.

#### 4.1 MÉTODO DE MONTE CARLO [3].

El método de Monte Carlo emplea en su ejecución variables de naturaleza aleatorio, por lo cual es utilizado para el análisis de aquellos problemas de carácter estadístico. A pesar de que, se publicase el método con el nombre que actualmente se lo conoce en el año 1949, no es hasta cuando se pudo implementar herramienta computacional, que se ejecutó el método en cuestión. Por tal motivo se considera que, el proceso que emplea este método es un proceso simulado iterativo. A continuación, se describen los principios que se consideran en el desarrollo del método de Monte Carlo:

- ✓ Conocimiento del modelo y comportamiento del sistema o elemento a analizar.
- ✓ Identificación de las variables de entrada y, la determinación de la función de densidad probabilística para las mismas.
- ✓ Generación de las variables aleatorias a través de las simulaciones.
- ✓ Obtención de la distribución probabilística de las variables de salida.

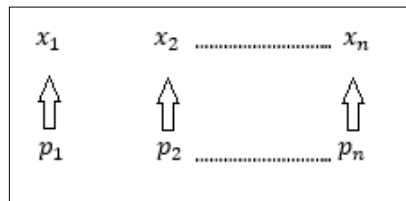


El carácter estadístico de las variables, que se ven inmiscuidas en este método, son justamente la desventaja que tiene el método, ya que, los resultados que se obtienen en el proceso poseen un nivel de incertidumbre, no obstante, la solución a tal negativa puede verse atenuado si se expande tanto el número de simulaciones y tiempo de estudio.

#### 4.1.1 VARIABLES ALEATORIAS [3].

Ahora bien, las ya antes mencionadas “Variables Aleatorias” se definen como aquellos valores numéricos que surgen de hechos fortuitos y que no hay manera de predecirlos, no obstante, existen dos tipos de variables aleatorias: discretas y continuas.

Las variables aleatorias discretas son aquellas que tienen restringido el conjunto de valores  $x_1, \dots, x_n$ , comúnmente se les encasilla de la siguiente manera, **Figura 4.1**.



**Figura 4.1.** Representación de la tabulación típica de las variables discretas.

De donde se comprende que:  $x_i$  son los valores de las variables y  $p_i$  representa a la probabilidad de las variables.

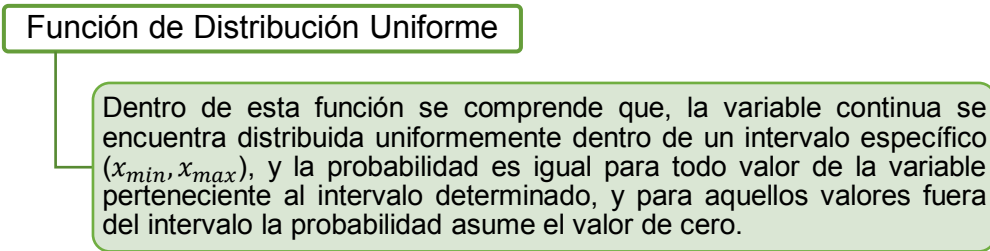
En este tipo de variables se limita a los valores que representan a las probabilidades, las cuales deben ser siempre números positivos y a más de ello la suma de todas las probabilidades debe ser 1.

En cuanto que, para las variables aleatorias continuas, se comprende que son aquellas variables que asumen su valor respecto a un intervalo especificado ( $x_{min}, x_{max}$ ). Este tipo de variable se define a través de su función de densidad de probabilidad  $f(x)$ .

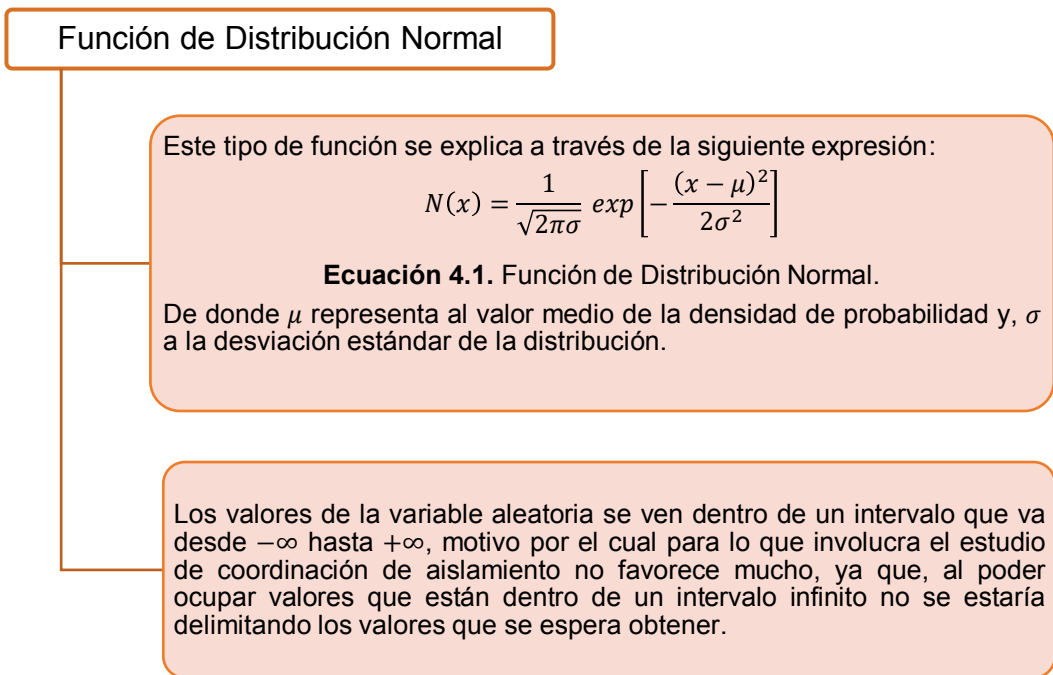
#### 4.1.2 FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN [3].

Las funciones de distribución representan al comportamiento de las variables a través de la probabilidad de ocurrencia de las mismas y el número de veces que se puede suscitar tal evento de ocurrencia.

Dentro de las funciones de distribución que se ven latentes para las variables aleatorias continuas, y que, en consecuencia, son consideradas dentro de la coordinación de aislamiento son:



**Figura 4.2.** Esquematación de la Función de Distribución Uniforme.



**Figura 4.3.** Esquematación de la Función de Distribución Normal.

## Función de Distribución Weibull

Comúnmente para estudios de coordinación de aislamiento se considera la ejecución de esta función de distribución, misma que se refleja en la siguiente expresión:

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - \lambda}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

**Ecuación 4.2.** Función de Distribución.

De donde  $\alpha$  es un factor de escala,  $\beta$  representa a un factor de forma, y  $\lambda$  es la ubicación.

Para la desviación estándar se considera la función Gamma, la cual evidentemente se ve contemplada dentro de la expresión que refleja a la desviación:

$$\mu = \lambda + \alpha \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

**Ecuación 4.3.** Desviación estándar.

Los siguientes ajustes, que se hacen a la función de Weibull, se ejecutan con la finalidad de poder utilizarse en lo que se refiere a la coordinación de aislamiento, pautas recomendadas por la norma IEC.

Primero: se delimita el intervalo de la siguiente manera  $x_{min} = \mu - 4\sigma$

y  $x_{max} = \mu + 4\sigma$ , para un  $F(x) = 0, x = \lambda$ . De donde se tiene que:  $F(x) = 0.5$ , si  $x = \mu$ .

Con lo cual se obtiene:  $\alpha = \frac{4\sigma}{(\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}}$

No obstante el valor de  $F(x) = 0.16$ , si  $x = \mu - \sigma$ . Con lo cual  $\beta = 4.8$ , valor que se redondea a 5 según lo establecido por la IEC. Teniendo finalmente la siguiente expresión para la función de Weibull:

$$F(z) = 1 - 0.5 \exp \left[ \left( \frac{z}{4} + 1 \right)^5 \right]$$

**Ecuación 4.4.** Función de Weibull.

**Figura 4.4.** Esquematización de la Función de Distribución Weibull.

## Función de Distribución Logarítmico-Normal

La siguiente expresión representa a la densidad de la presente función:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(x) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

**Ecuación 4.5.** Densidad de la Función.

No obstante, según estudios realizados en la coordinación de aislamiento (estudio de los sobrevoltajes de frente rápido) la expresión que representa a la densidad de la función en cuestión toma la siguiente notación.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(x) - \ln(m)}{\sigma} \right)^2 \right]$$

**Ecuación 4.6.** Densidad de la Función para sobrevoltajes.

Donde  $m$  representa, respecto de la función, a la mediana. Es decir, representa a la probabilidad del 50% de ser sobrepasado.

**Figura 4.5.** Esquematización de la Función de Distribución Logarítmico-Normal.

## 4.2 DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE SOBREVOLTAJES [3].

Los sobrevoltajes, específicamente hablando los que son originados por maniobras o descargas atmosféricas, se ven analizados dentro de estudios de distribución probabilística, esto debido a que, la frecuencia con la cual se manifiestan y las magnitudes de voltajes y corriente que pueden llegar a tener son imprevistas. Sin embargo, al determinar a una indumentaria concreta para el análisis se puede delimitar el área y número de simulaciones estadísticas a desarrollarse. De donde, una vez recopilada la información se realiza el análisis para la coordinación de aislamiento, importante enmarcar que, una vez que se aplica la distribución probabilística los resultados se almacenan de tal manera que, se indique el número de simulaciones o muestras que se han recopilado en un periodo determinado de tiempo.

La siguiente expresión representa en forma general la probabilidad de que se produzca un sobrevoltaje, y que los valores que pueden alcanzarse se encuentren dentro de un intervalo específico de valores.

*Intervalo de valores*  $(u, u + \Delta\mu)$

$$P[u < U \leq u + \Delta\mu] = \frac{n_u}{n_{total}}$$

**Ecuación 4.7.** Probabilidad de sobrevoltaje.

De donde se comprende a  $n_u$  como el número de simulaciones o muestras que se encuentran dentro del intervalo de valores, mientras que,  $n_{total}$  es el total de muestras que se obtuvieron.

E aquí la importancia que nace del hecho de la aplicación de la función de densidad, **Ecuación 4.8.**, pues ésta cumple con el objetivo de aumentar las muestras indefinidamente.

$$f_s(u) = \lim_{n_{total} \rightarrow \infty} \frac{n_u}{n_{total}}$$

**Ecuación 4.8.** Función de Densidad.

Acción que se ve justificada con lo anteriormente planteado, mientras más muestras, simulaciones o respuestas se obtengan mucho más preciso es el estudio.

Para lo que se refiere al estudio de coordinación de aislamiento el número que se debe considerar para el total de muestras se ve ligado al hecho del tipo de sobrevoltaje y el tamaño de la red eléctrica. Para lo que se refiere a sobrevoltajes por maniobra es recomendable un número de muestras comprendido entre 200 a 300, a más de ello se entiende que, la función de densidad de sobrevoltajes permite conocer el riesgo de falla, mientras que, la integración de dicha función de densidad permite conocer la probabilidad que existe de que se manifieste un sobrevoltaje con un valor pico menor a un valor determinado. **Ecuación 4.9.**

$$F_s(u) = P[U \leq u] = \int_0^u f_s(U) dU$$

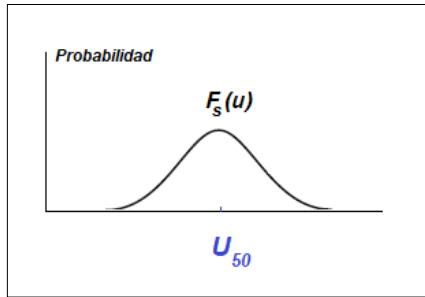
**Ecuación 4.9.** Función de Probabilidad de sobrevoltaje.

Por otra parte, la función complementaria, **Ecuación 4.10.**, da a conocer la probabilidad que existe de que se manifieste un sobrevoltaje con un valor pico mucho mayor al valor determinado.

$$P[U > u] = \int_u^{\infty} f_s(U) dU$$

**Ecuación 4.10.** Función de Complementaria.

La función de densidad para sobrevoltajes por maniobra suele tener un comportamiento de distribución gaussiana, tal como se muestra en la **Figura 4.6.**



**Figura 4.6.** Función de distribución gaussiana para sobrevoltajes por maniobra [3]

Por otro lado, para aquellos sobrevoltajes que enmarcan a los originados por descargas atmosféricas optan otras funciones de distribución de densidad, como por ejemplo las logarítmicas, como se ha mencionado anteriormente.

## **CAPÍTULO V**

### **5. METODOLOGÍA PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN REDES DE EXTRA-ALTO VOLTAJE.**

La metodología en cuestión se rige a los pasos que se encuentran propuestos en la IEC 60071 para la coordinación de aislamiento, sin embargo, para el desarrollo de la guía se considera el modelamiento electromagnético de los componentes de una red eléctrica y la distribución probabilística para la determinación de los valores de los sobrevoltajes, valores con los cuales se ejecutarán los pasos propuestos en la normativa internacional, anteriormente mencionada. Estas consideraciones se toman debido a la importancia de analizar al equipamiento de la red en la etapa transitoria electromagnética, y la precisión que se obtiene al inmiscuir el análisis estadístico.

La metodología para la determinación de coordinación de aislamiento en redes eléctricas de gama II, toma un matiz jerárquico congruente al de la normativa IEC 60071. Lo cual mantiene en el mismo horizonte el orden de los pasos a ejecutarse, pero con una temática diferente en cuanto a los miramientos que se hacen para desarrollarse dichos pasos.

Recapitulando, los pasos que se registran para la coordinación de aislamiento son:

- a) Voltajes y sobrevoltajes representativos.
- b) Sobrevoltajes soportados de coordinación
- c) Sobrevoltajes soportados requeridos
- d) Selección del nivel de aislamiento

Ahora bien, el primer eslabón que se analiza es el desarrollo, acciones y datos que se ven inmiscuidos para la determinación de los voltajes y sobrevoltajes representativos.

## **5.1 DETERMINACIÓN DE VOLTAJES Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS URP [2], [11], [16].**

### **5.1.1 MODELAMIENTO DE LA RED ELÉCTRICA**

El hecho de realizar una coordinación de aislamiento para redes de extra alto voltaje involucra el acontecimiento de ejecutar dicha coordinación lo más precisa posible, principalmente por dos razones, primero, se mitiga lo máximo posible el tema de sobredimensionar el nivel de aislamiento, acto que involucra el aspecto económico y, segundo, se provee la protección necesaria para el equipamiento de una red eléctrica, acto que conlleva al funcionamiento correcto de la red.

Para el presente método se ha entablado como primer acto el plasmar en una herramienta computacional de transitorios electromagnéticos (EMTP), a la red eléctrica sobre la cual se va a realizar la coordinación de aislamiento, es decir, se simula a los elementos, que conforman a dicha red, según su modelo electromagnético. Y posterior a ello, se ejecuta sobre dicha simulación ciertos eventos que propicien los datos necesarios para la determinación de sobrevoltajes temporales y de frente lento, el énfasis de simular específicamente eventos para determinados sobrevoltajes radica en que, según el máximo nivel de aislamiento en redes de gama II, éste se ve determinado por los sobrevoltajes de frente lento conocido también por sus siglas en inglés por BSL.

### **5.1.2 DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE MÁS ELEVADO DEL EQUIPAMIENTO DE LA RED $U_m$**

El segundo paso, dentro de la obtención de los sobrevoltajes representativos, reside en determinar el voltaje más elevado del equipamiento de la red eléctrica  $U_m$ , para ello se parte del voltaje nominal del sistema  $U_s$ , seguido de su equivalencia inmediata superior con los valores predispuestos en la Tabla 2.3. del presente documento, misma que es equivalente a la Tabla 3 de la normativa IEC 60071\_1.

### **5.1.3 SOBREVOLTAJES TEMPORALES**

Como tercer paso se tiene la determinación de los valores de los voltajes representativos de los escenarios que originan a los sobrevoltajes temporales, como son fallas a tierra y pérdida de carga. Para la determinación de estos voltajes se busca el factor de falla a tierra  $K$ , pues tal como se observa en la siguiente ecuación este factor es el dato que permite obtener el voltaje representativo.



$$U_{rp} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \times K$$

#### **Ecuación 5.1.** Sobrevoltaje representativo.

Para el evento de falla a tierra se consideran dos caminos mediante los cuales se puede obtener el factor de falla a tierra  $K$ , para los dos casos el punto de partida es la ejecución de fallas dentro de la simulación de la red, se recomienda la aplicación de fallas monofásicas dado a que representan al peor escenario dentro de las fallas que pueden suscitarse en el sistema. Como primera opción se tiene que, al realizarse la falla a tierra se obtienen las resistencias y reactancias de secuencia positiva y cero, valores mediante los cuales se dirige a las gráficas (A.1 - A.5) expuestas en el Anexo A de la normativa IEC 60071\_1, de donde se selecciona a la gráfica, que se utilizará para determinar al factor de falla a tierra  $K$ , según el equivalente de la resistencia de secuencia positiva. Por otro lado, el segundo camino mediante el cual también se obtiene el factor de falla a tierra es, una vez ejecutada la falla monofásica observar el máximo valor de sobrevoltaje que tienen las dos fases sanas, y se toma al valor más elevado, posteriormente, si el dato está en unidades de kV se procede a la representación en por unidad de dicho sobrevoltaje, considerando como voltaje base al voltaje pico nominal de la red  $U_s$  para un escenario de fase a tierra. En fin, al factor determinado se reemplaza en la **Ecuación 5.1.** planteada previamente, y se obtiene un sobrevoltaje representativo de fase - tierra.

En cuanto que, para el evento de pérdida de carga se parte de la aplicación de varias simulaciones en las que se desconectan distintas cargas o elementos conectados en la red que se está trabajando, esto con la finalidad de seleccionar al sobrevoltaje más elevado dentro del grupo de valores de sobrevoltajes que se obtienen de las simulaciones de eventos, al igual que en los sucesos de fallas monofásicas, de no estar en por unidad los sobrevoltajes se convierten a p.u. utilizando el mismo voltaje base que anteriormente se explicó. Ahora bien, según lo que dictamina la norma IEC 60071\_1 existen valores predispuestos a tomarse una vez que se cataloga el tamaño del sistema eléctrico, en dicha elección se omite la acción de simular los eventos de pérdida de carga, ya que los valores que establece la normativa tienen embebida una base experimental, no obstante, el hecho de simular sobre la red que se está analizando permite tener valores mucho más finos, razón que justifica el por qué se realiza la simulación de eventos de pérdida de carga. Finalmente, del dato obtenido, que efectivamente representa al factor  $K$  dentro de la **Ecuación 5.1.**, se obtiene el valor de sobrevoltaje representativo tanto en el escenario de fase - tierra como en el de fase – fase.

Evidentemente, existen dos valores de sobrevoltajes representativos que compiten debido a que se encuentran dentro del mismo escenario de fase a tierra, dicotomía que finaliza con la elección del sobrevoltaje representativo más elevado.

#### 5.1.4 SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO

Dentro de la obtención de los sobrevoltajes representativos se tiene como un cuarto paso el análisis para los sobrevoltajes de frente lento, originados por acciones tales como energización y desenergización de: líneas, reactores, banco de capacitores, transformadores, autotransformadoras, entre otros, que convergen en la red eléctrica de estudio, el análisis para dichos eventos involucra una observación estadística, motivo por el cual se procede a la simulación de tales eventos haciendo uso de un interruptor estadístico dentro de la red, los resultados a obtenerse son solicitados en la parametrización del evento simulado, de donde partiendo de las siguientes ecuaciones y métodos que se muestran posteriormente y que se encuentran descritas dentro del Anexo C de la IEC 60071\_2, se solicita como dato al valor del sobrevoltaje más elevado que se presenta en la simulación, adicionado un 2% de su valor total, porcentaje que representa al posible incremento del valor. Según el número de eventos que se ejecuten serán los resultados que se obtengan, lo cual representa una matriz extensa de datos, mismos que deben ser distinguidos por el escenario al cual representan, como son los escenarios de fase-tierra y fase-fase, de allí que para cada uno de los casos se selecciona al máximo valor, obteniendo de esta manera  $U_{e2}$  (fase-tierra) y  $U_{p2}$  (fase-fase), importante recalcar que dichos valores deben ser llevados a por unidad, para ser utilizados en la obtención de los sobrevoltajes  $U_{et}$  y  $U_{p2}$ , tómesese en cuenta como voltaje base al voltaje pico nominal de la red en condición de fase – tierra.

✓ Para fase – tierra

Método de Fase - Cresta:

$$U_{et} = (1.25 U_{e2} - 0.25) \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_m$$

**Ecuación 5.2.** Método fase-cresta (fase-tierra).

- ✓ Para fase – fase:

Método de Fase - Cresta:

$$U_{pt} = (1.25 U_{p2} - 0.43) \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_m$$

**Ecuación 5.3.** Método fase-cresta (fase-fase).

Sin embargo, estos valores logrados serán utilizados en los pasos posteriores establecidos en la metodología presente, ya que, según lo entablado en la normativa IEC 60071, los voltajes representativos de frente lento son los niveles de protección previstos por los pararrayos, teniendo de esta manera a los voltajes máximos admitidos en los terminales de un equipo ante impulsos de frente rápido  $U_{pl}$  y de conmutación  $U_{ps}$ .

## **5.2 DETERMINACIÓN DE VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN $U_{cw}$ [2], [11], [16].**

Los voltajes soportados de coordinación se obtienen a partir de la aplicación de un factor de coordinación  $K_c$  a los sobrevoltajes representativos detallados en el apartado 5.1 del presente documento.

### **5.2.1 SOBREVOLTAJES TEMPORALES**

Para lo que se refiere los voltajes temporales representativos se considera un equivalente unitario para el factor de coordinación  $K_c$ , teniendo como resultado el mismo valor del voltaje temporal representativo para el valor del voltaje temporal soportado de coordinación, considerando dicha referencia tanto para el aislamiento interno, así como para el externo, se afirma que los valores obtenidos son los mismos para los dos tipos de aislamiento.

$$U_{rp} = U_{cw} \text{ (fase-fase y fase-tierra)}$$

**Ecuación 5.4.** Sobrevoltaje representativo.

### **5.2.2 SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO**

Dentro de los valores obtenidos de los voltajes representativos de frente lento son los sobrevoltajes de maniobra de pararrayos los cuales se consideran para voltajes

soportados de coordinación, puesto que, en un sistema eléctrico con pararrayos, es esta conmutación la que genera el máximo sobrevoltaje de frente lento.

Ahora bien, mencionado el punto de los sobrevoltajes que se consideran para la determinación de los  $U_{cw}$ . Se da un enfoque a los voltajes soportados de coordinación de frente lento para aislamiento interno, para lo cual se procede a la obtención del factor de coordinación  $K_{cd}$ , en primera instancia, se necesita formular un valor para el escenario de fase-tierra, dicho dato es una relación entre el voltaje representativo del pararrayo  $U_{ps}$  y el máximo sobrevoltaje latente en las maniobras de energización denotados como  $U_{e2}$

Para el  $K_{cd}$  fase-tierra:

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}}$$

**Ecuación 5.5.** Relación para la obtención de  $K_{cd}$ .

Para la determinación de cada dato, anteriormente mencionado, los valores de los sobrevoltajes deben estar en las mismas unidades. Con el valor calculado se dirige a la recta de las abscisas de la **Figura 2.19.** del presente documento, ilustración que es congruente con la manifestada en la IEC 60071\_2 para determinar al factor  $K_{cd}$ , de allí que, se proyecta el valor hasta cortar la función lineal, dando como respuesta, desde luego, a una coordenada, de donde el dato correspondiente al de las ordenadas representa al factor  $K_{cd}$ .

Para la determinación de estos voltajes soportados de coordinación de frente lento para aislamiento interno, se aplica la siguiente ecuación, misma que refleja la aplicación del factor de coordinación a los sobrevoltajes representativos de frente lento.

$$U_{cw} = K_{cd} \times U_{ps} \text{ (fase - tierra)}$$

**Ecuación 5.6.** Voltaje Soportado de Coordinación.

Y, para los voltajes soportados de coordinación de frente lento para aislamiento externo se considera el valor de  $U_{e2}$  y  $U_{p2}$  en unidades de kV, valores a los cuales aplicando el factor de coordinación estadístico  $K_{cs}$  se obtiene el voltaje soportado de coordinación. Ahora bien, para obtener el factor  $K_{cs}$ , tal cual se marca en la normativa IEC 60071\_2, es necesario considerar un riesgo de fallo  $R$ , el cual puede denotarse desde un valor de  $10^{-1} - 10^{-4}$ , valores establecidos en el eje de las ordenadas en la Figura 8. de la

normativa en cuestión, en la mencionada ilustración se representa funciones de  $Ue2$ , de donde una vez que se selecciona  $R$  se puede proyectar el punto en la función correspondiente consiguiéndose de esta forma el valor de la coordenada en el eje de las ordenadas, el cual corresponde, desde luego, al valor de  $Kcs$ , generalmente se establece que para una consideración de  $R = 10^{-4}$  el valor de  $Kcs = 1.15$

$$U_{cw} = Kcs \times Ue2 \text{ (fase-tierra)}$$

$$U_{cw} = Kcs \times Up2 \text{ (fase-fase)}$$

**Ecuación 5.7.** Voltajes soportados de coordinación.

### 5.2.3 SOBREVOLTAJES DE FRENTE RÁPIDO

Si bien en la determinación de los voltajes representativos se omite el hecho de enfocarse en los sobrevoltajes de frente rápido, no es el mismo caso para los voltajes soportados de coordinación, esto debido a que, en la norma se especifica que para el trato de estos sobrevoltajes por descargas atmosféricas no hace falta su equivalente representativo, ya que, aplicando el método estadístico simplificado, expuesto en el Anexo E de la IEC 60071\_2, se obtiene directamente los valores de los voltajes soportados de coordinación de frente rápido.

Por lo tanto, partiendo de la siguiente expresión, misma que se encuentra planteada dentro del método estadístico simplificado, se comprende a cada término de la siguiente manera.

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \times \frac{L}{L_{sp} + L_a}$$

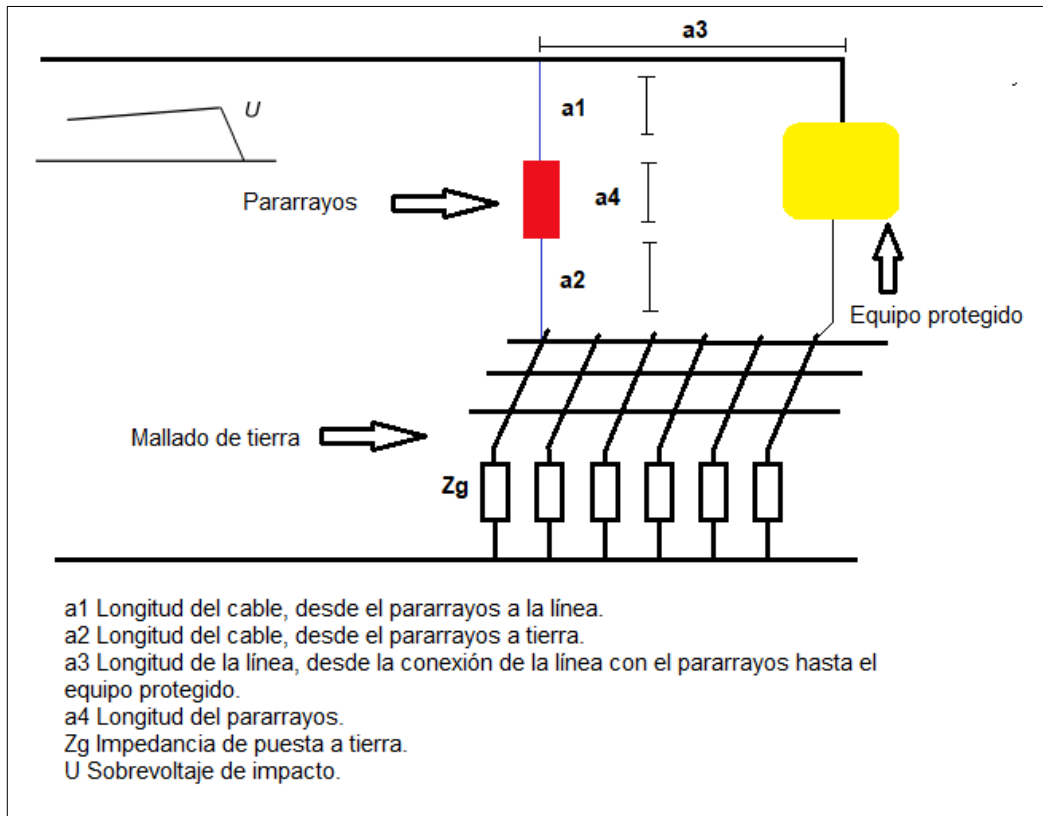
**Ecuación 5.8.** Método Estadístico Simplificado.

$U_{pl}$  un valor conocido anteriormente en el análisis de los sobrevoltajes de frente lento con los pararrayos que, efectivamente representa al nivel de protección del pararrayos expresado en unidades de kV.

$A$  es un factor que representa el rendimiento que tienen las líneas ante la presencia de descargas atmosféricas, su valor depende del tipo de línea con la que se esté trabajando, pues dependiendo de ello se selecciona el equivalente del factor de la **Tabla 2.4** del presente documento, la cual es congruente con la **Tabla E.2.** expresada en la normativa IEC 60071\_2.

$n$  es el número mínimo de líneas conectadas, según lo establece la normativa puede adquirir valores de 1 o 2.

$L$  evidentemente este es un término que representa una longitud, sin embargo, dicha magnitud se ve compuesta por distancias que para una mejor comprensión se ilustra la siguiente **Figura 5.1**.



**Figura 5.1.** Conexión del Pararrayos. [11]

Comprendiéndose que, al ser  $L$  el equivalente de la suma de las longitudes  $a1$ ,  $a2$ ,  $a3$ ,  $a4$ , se desprenden dos valores que adopta el término en cuestión, uno definido como longitud de aislamiento interno y el otro como longitud de aislamiento externo, la diferencia entre los dos radica en la distancia  $a3$ , la que tiene que ver con la trayectoria desde el punto de conexión del pararrayos con la línea hasta el punto donde se encuentra el equipo protegido.

$L_{sp}$  es la longitud del vano en unidades de metro.

$L_a$  corresponde a la sección de la línea que se ve plasmada por la relación de la tasa de falla aceptable del equipo  $R_a$  con la tasa de interrupción de la línea por año

$R_{km}$ . De donde se cataloga como datos generales de 1/ (400 año) para  $R_a$ , mientras que, para  $R_{km}$  un valor genérico es el de 1/ (100 km/año).

Finalmente, al reemplazarse los valores en cada uno de los términos que comprenden a la ecuación de la metodología estadística simplificada de la normativa, se tienen dos voltajes soportados de coordinación de frente rápido, el correspondiente al aislamiento interno y externo, aun así, según lo establecido por la normativa IEC 60071 se puede excluir el hecho de obtener el voltaje soportado de coordinación para aislamiento externo, puesto a que éste no se requiere en la obtención de los voltajes soportados requeridos.

Importante mencionar que, es admisible a través de simulación la obtención de los voltajes soportados de coordinación de frente rápido, no obstante, se comprende que, a través del método estadístico simplificado, establecido por la normativa internacional IEC 60071, se determina de manera más fina a los valores de los voltajes en cuestión, evitando de esta manera el margen de error que se presenta al realizar simulaciones de eventos de descargas atmosféricas. Pese a ello, para fines pertinentes se ha desarrollado una guía en la cual se establecen los pasos para la modelación electromagnética en EMTP de los sobrevoltajes de frente rápido. Encuéntrese dicha guía en el Anexo A del presente documento.

### **5.3 DETERMINACIÓN DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS $U_{rw}$ [2], [11], [16].**

Dentro de lo que se refiere a la determinación de estos voltajes existen dos grandes escenarios que se analizan, aislamiento interno y externo, ya que de ello dependen los factores de seguridad y atmosférico que se aplican a los sobrevoltajes soportados de coordinación para obtener los voltajes requeridos.

$U_{rw}$  para aislamiento interno:

$$U_{rw} = K_s \times U_{cw}$$

$$K_s = 1.15$$

**Ecuación 5.9.** Voltaje Soportado Requerido, Aislamiento interno.

U<sub>rw</sub> para aislamiento externo:

$$U_{rw} = K_s \times K_a \times U_{cw}$$

$$K_s = 1.05$$

**Ecuación 5.10.** Voltaje Soportado Requerido, Aislamiento externo.

$$K_a = e^{m \times \left(\frac{H}{8150}\right)}$$

**Ecuación 5.11.** Factor de corrección atmosférico.

### 5.3.1 SOBREVOLTAJES TEMPORALES

Recapitulando, los valores que se obtuvieron en la determinación de voltajes soportados de coordinación temporales son dos, los cuales se encuentran dispuestos tanto para fase-fase como para fase-tierra. A estos valores se los ocupa por igual para los dos escenarios de aislamiento. Obteniéndose en conclusión dos voltajes soportados requeridos para aislamiento interno, así como 2 voltajes soportados requeridos para aislamiento externo.

En cuanto que, para la determinación de la constante atmosférica los valores que adquiere *m* para los sobrevoltajes temporales, como ya se ha mencionado en el Capítulo 2 en el apartado 2.7.3.1 del presente documento, depende del nivel de contaminación de los aisladores.

### 5.3.2 SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO

Al deducir los valores de los voltajes soportados de coordinación de frente lento se analiza al igual que en los voltajes soportados de coordinación las dos atmósferas de aislamiento, es decir, los valores para el aislamiento interno así como para el externo.

Para lo que se refiere a los valores del aislamiento externo se toma en consideración a la **Figura 2.20.** del presente documento, imagen que es congruente con la planteada en la Figura 9. de la IEC 60071\_2, para de allí conseguir el valor de *m*, término embebido en la determinación del factor de corrección atmosférica *K<sub>a</sub>*. Los estipulados valores de *m* se obtienen a través del trazado de funciones, latentes en la **Figura 2.20.**, las cuales están descritas tanto para los valores fase-fase, así como para los valores de fase-tierra. Para obtener el valor de *m* es necesario ubicar en la recta de las abscisas al valor del voltaje



soportado de coordinación de frente lento y proyectar dicho punto hasta cortar con la función trazada requerida, obteniendo en el corte las coordenadas tanto para el eje de las abscisas, que es el valor conocido, así como el valor en el eje de las ordenas el cual efectivamente corresponde a  $m$ .

Una vez situado el término de  $m$  se procede a la determinación del factor  $K_a$ , factor que al multiplicarse en conjunto con el factor de seguridad de aislamiento externo  $K_s = 1.05$ , y con el voltaje soportado de coordinación de frente lento (aislamiento externo) se obtiene finalmente el valor del voltaje soportado requerido de frente lento, tanto para fase-fase como para fase-tierra.

Por otro lado, la determinación del voltaje soportado requerido de frente lento para aislamiento interno únicamente reside en la multiplicación del factor de seguridad  $K_s = 1.15$  por el valor del voltaje soportado de coordinación de frente lento (aislamiento interno).

### **5.3.3 SOBREVOLTAJES DE FRENTE RÁPIDO**

Por otro lado, para lo que se refiere a la determinación de los voltajes soportados requeridos de frente rápido según lo dictamina la IEC 60071, se considera únicamente al voltaje soportado de coordinación de aislamiento interno, el cual se obtiene a partir de la multiplicación de dicho voltaje por el factor de seguridad  $K_s = 1.15$ .

## **5.4 CONVERSIÓN DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS TEMPORALES A VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS DE FRENTE LENTO [2], [11], [16].**

Una de las diferencias latentes en el estudio de la coordinación de aislamiento de gama II respecto a la de gama I, es la conversión de los voltajes soportados requeridos, puesto que, para el nivel de extra alto voltaje se hace una migración desde los voltajes requeridos temporales hacia los voltajes requeridos de maniobra, mientras que, para la gama I, la conversión se realiza desde los voltajes requeridos de maniobra hacia los de frente lento y frente rápido.

Para ejecutar la conversión se multiplica al valor del voltaje soportado requerido temporal por un factor de conversión dispuesto en la Tabla 2.5. del presente documento, tabla que a su vez se encuentra expuesta en la normativa IEC 60071 bajo la enumeración de Tabla 2. Si se verifica lo anteriormente citado, se puede observar que, existe tanto los factores para la conversión de los voltajes que son de aislamiento interno, así como para

los de aislamiento externo. Importante recordar que dentro de cada uno de los voltajes se analizan escenarios de fase-fase y fase-tierra.

## 5.5 SELECCIÓN DEL NIVEL DE AISLAMIENTO [2], [11], [16].

Para la selección del nivel de aislamiento se utilizan los valores determinados para los voltajes soportados requeridos. De manera didáctica se recomienda hacer una tabla que permita categorizar y visualizar los datos obtenidos anteriormente. Sírvase observar la siguiente recomendación para la elaboración de la tabla.

**Tabla 5.1.** Esquema recomendado para organizar los valores de los voltajes soportados requeridos.

Voltajes Soportados Requeridos		Aislamiento Externo		Aislamiento Interno	
		U <sub>rw</sub>	U <sub>rw</sub> (c)	U <sub>rw</sub>	U <sub>rw</sub> (c)
Frente Lento	fase-fase			-	
	fase-tierra				
Frente Rápido	fase-fase		-		-
	fase-tierra		-		-

Como se puede observar existe una subclasificación denotada como U<sub>rw</sub> (c), que hace referencia a los voltajes temporales convertidos, motivo por el cual se omite para los voltajes soportados requeridos de frente rápido, por otro parte, se plantea dos espacios para los voltajes de frente rápido, definidos para los valores de aislamiento interno y externo, sin embargo, según lo entablado por la normativa, no existe un valor calculado para el aislamiento externo, es por ello que, el valor correspondiente al aislamiento externo de frente rápido dependiendo si el equipo externo tiene protección se utiliza el mismo valor del voltaje de aislamiento interno, pero de encontrarse sin protección el nivel de voltaje de aislamiento externo corresponde al valor superior del valor de voltaje estandarizado de aislamiento interno.

Ahora bien, para finalizar la coordinación de aislamiento se procede a la estandarización de los voltajes, para ello se dirige a la Tabla 2.3. del presente documento, o a la Tabla 3. de la IEC 60071\_1, en primer lugar, se selecciona el grupo de valores que enmarca el U<sub>m</sub>, dato que se estandarizó en los primeros pasos de la presente metodología de coordinación de aislamiento para gama II, seguido se toma el máximo voltaje calculado de los soportados requeridos de frente lento dentro del escenario de fase-tierra, y se procede a la comparación de este valor con los que ofrece la tabla de valores estandarizados (columna tres de la tabla), seleccionando de esta manera al valor

estandarizado que sea igual o superior al voltaje requerido de maniobra calculado. Continuando, se considera nuevamente al máximo voltaje calculado, pero en esta ocasión dentro del escenario de fase-fase, y se procede a la obtención del voltaje estandarizado, valor que se consigue al multiplicar al voltaje estandarizado anteriormente seleccionado para fase-tierra por su correspondiente factor de fase-fase señalado en la columna cuatro de la misma tabla. Una vez que se obtiene el valor estandarizado se verifica que éste sea igual o mayor al máximo voltaje de maniobra soportado requerido de fase-fase, valor considerado previamente. En cuanto que, para la estandarización del voltaje soportado requerido de frente rápido, no se hace distinción por el escenario de fase-fase o fase-tierra, ya que los voltajes son los mismos en los dos escenarios, es por ello que, como se ha mencionado en el detalle anteriormente, se compara al voltaje calculado de aislamiento interno con las opciones que ofrece la Tabla 2.3 o 3. en la columna cinco, tomando al valor estándar que sea igual o mayor al valor calculado.

Finalmente, se comprende que, la presente metodología planteada para la coordinación de aislamiento de redes eléctricas de extra alto voltaje haciendo uso de modelación electromagnética y distribución probabilística de sobrevoltajes, está conformada por cinco magnos pasos, secuencia que es establecida por la normativa internacional IEC 60071, en la ejecución de los mencionados pasos existen ciertas pautas que deben ser consideradas, y que previamente se han mencionado dentro de la descripción de la metodología, conforme a ello se presenta la esquematización de los pasos de la coordinación de aislamiento a través de una interfaz creada en MATLAB.

## **5.6 ESQUEMATIZACIÓN DE LOS PASOS ESTABLECIDOS EN LA METODOLOGÍA DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA REDES ELÉCTRICAS DE EXTRA ALTO VOLTAJE A TRAVÉS DE UNA INTERFAZ PROGRAMADA EN MATLAB.**

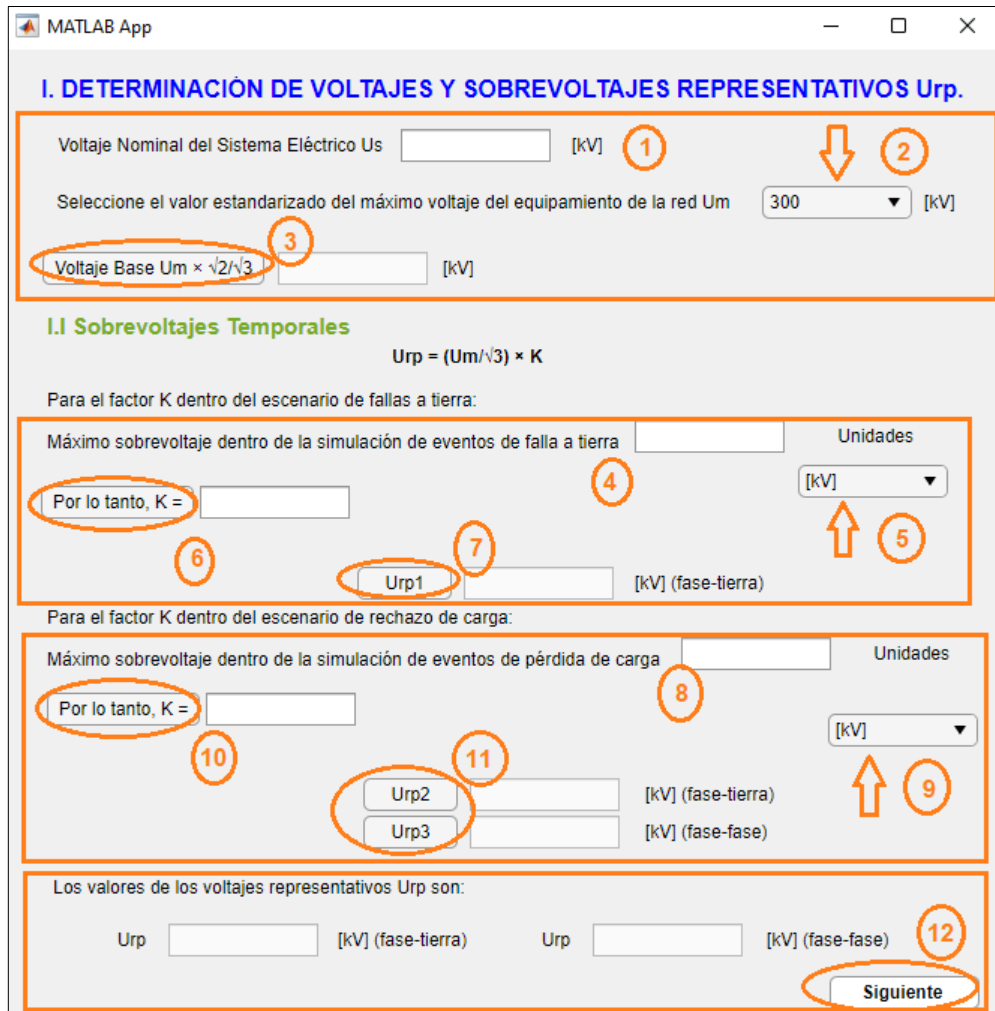
A través de la herramienta computacional MATLAB, se desarrolló una interfaz gráfica que tiene como finalidad la ejecución de determinados pasos embebidos en la metodología establecida en el presente documento, para proceder con la utilización de la interfaz gráfica, tal cual como se ha señalado en la mencionada metodología, se debe en primera instancia realizar las simulaciones pertinentes mediante las cuales se obtienen los valores de los sobrevoltajes temporales y de frente lento.

A continuación, se presenta las distintas ventanas que conforman a la interfaz gráfica desarrollada, en conjunto con la detallada explicación de su utilización.



**Figura 5.2.** Presentación de la interfaz gráfica.

Una vez desplegada la primera ventana de la interfaz gráfica (**Figura 5.2.**) se puede empapar de la información plasmada en la misma y proceder a la siguiente ventana dando clic sobre el botón denominado como “Siguiete”.

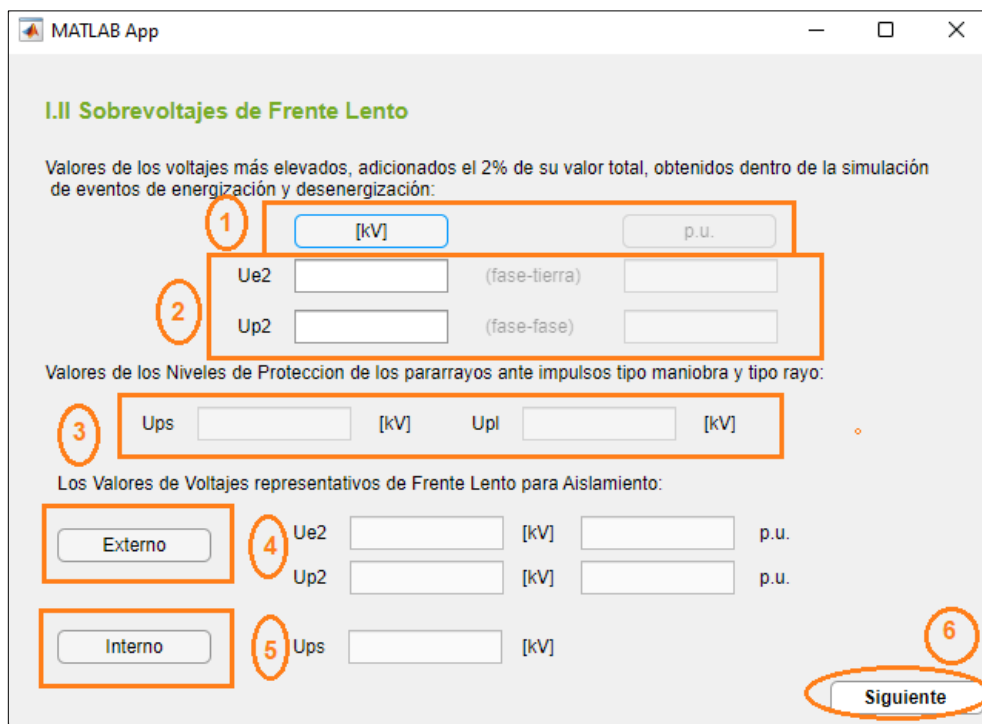


**Figura 5.3.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes y sobrevoltajes representativos Urp.

Una vez expuesta la segunda ventana (**Figura 5.3.**) se puede observar que, como parámetros de entrada se solicita el Voltaje Nominal del Sistema Eléctrico ( $U_s$ ) en [kV] (1). Seguido de la selección del valor estandarizado del Máximo Voltaje del Equipamiento de la Red ( $U_m$ ), valores a los cuales se puede acceder dando clic sobre la barra de opciones (2), dichos valores están en [kV], y son los voltajes establecidos en la normativa internacional IEC 60071\_1. Seguido de ello, se calcula el voltaje base en [kV], haciendo uso de los valores ingresados, dando únicamente clic sobre el botón descrito como “Voltaje Base  $U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ ” (3).

Continuando, se procede con la obtención de los voltajes representativos temporales, para lo cual se distinguen dos valores de factores K a ser ingresados (4) (8), uno procedente de la simulación de fallas (4) y otro correspondiente al rechazo de carga (8). Como son datos que se obtienen a partir de simulaciones puede suscitarse el caso de

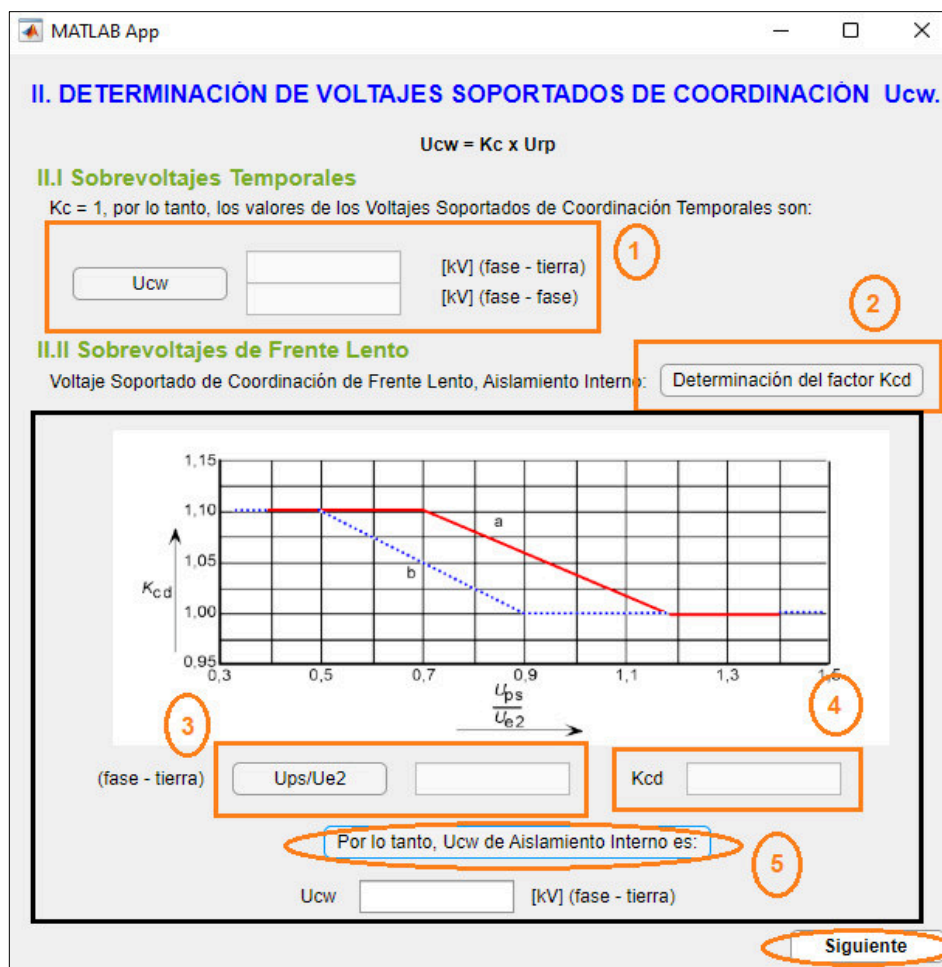
tener a dichos datos en unidades de [kV] o en p.u. razón por la cual es indispensable que, una vez ingresado el valor del factor K, se seleccione el tipo de unidad (5) (9), abriéndose el caso en el cual, de ser un valor en p.u. simplemente se procede a presionar el botón “Por lo tanto, K =”, de donde se traspasa el valor ya ingresado del factor K a la pantalla de salida del botón anteriormente presionado, luego se debe presionar el botón “Urp” (7) (11) para obtener el/los voltaje/s representativo/s calculado/s, mientras que, para cuando la unidad del valor de K está en [kV], se calcula internamente en la interfaz el voltaje base, dato que permitirá obtener una vez se presione el botón “Por lo tanto, K =” el valor de K en p.u., y al igual que en el primer caso se continua, al presionar el botón “Urp” (7) (11), con el/los valores calculado/s de los voltaje/s representativo/s. Después de obtener los voltajes representativos temporales para los dos eventos anteriormente mencionados se arroja los valores que corresponden a los Urp tanto para fase - tierra, así como para fase - fase. De donde finalmente para proceder con los Urp de frente lento se da clic sobre el botón “Siguiente” (12).



**Figura 5.4.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes y sobrevoltajes representativos Urp.

Para cuando se despliega la tercera ventana (**Figura 5.4.**) los resultados a obtenerse son los voltajes representativos de frente lento tanto para aislamiento interno, así como para el externo. Para lo cual, en primer lugar, se selecciona (1), al presionar el

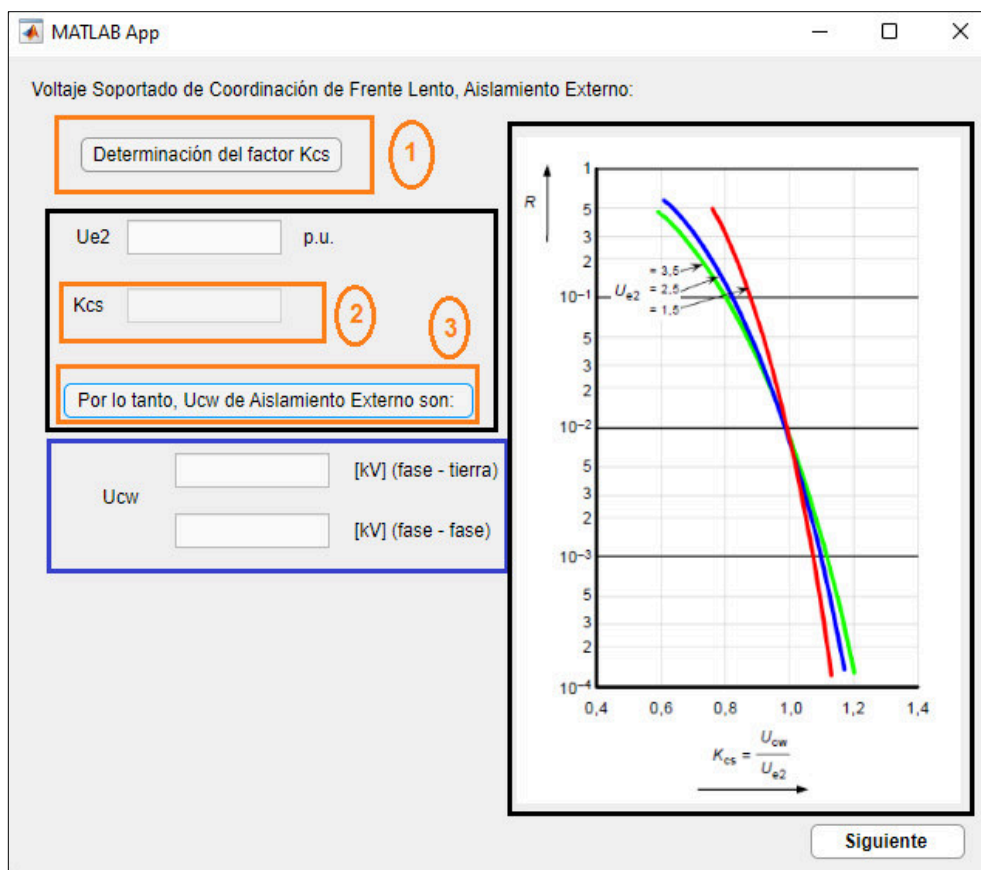
botón correspondiente “[kV]” o ”p.u.”, las unidades en las cuales, a partir de la simulación de eventos, se obtuvieron los valores de  $U_{e2}$  y  $U_{p2}$ , esto, seguido evidentemente, del ingreso de dichos valores (2). Continuando, se debe ingresar en [kV] los valores de los niveles de protección de los pararrayos ante impulsos tipo rayo  $U_{pl}$  y tipo maniobra Ups. De donde para finalizar se presiona los botones “Externo” e “Interno”, y se consigue los valores calculados de los voltajes que desde un inicio se detallaron en el presente párrafo. Y presionando el botón “Siguiente” se contempla a la siguiente ventana.



**Figura 5.5.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes soportados de coordinación  $U_{cw}$ .

Para cuando se llega a la cuarta ventana de la interfaz (**Figura 5.5.**) a simple vista es lógico entender que, se inicia la etapa de determinación de los voltajes soportados de coordinación, en donde se vislumbra que, para los  $U_{cw}$  temporales el valor del factor de coordinación  $K_c$  es equivalente a la unidad, razón por la cual, al presionar el botón “Ucw” (1), se obtienen consecuentemente los valores de los voltajes soportados de coordinación temporales, que como bien se puede entender son los  $U_{rp}$  temporales. Continuando se da pie al cálculo de los  $U_{cw}$  de frente lento, en donde al dar clic sobre el botón “Determinación

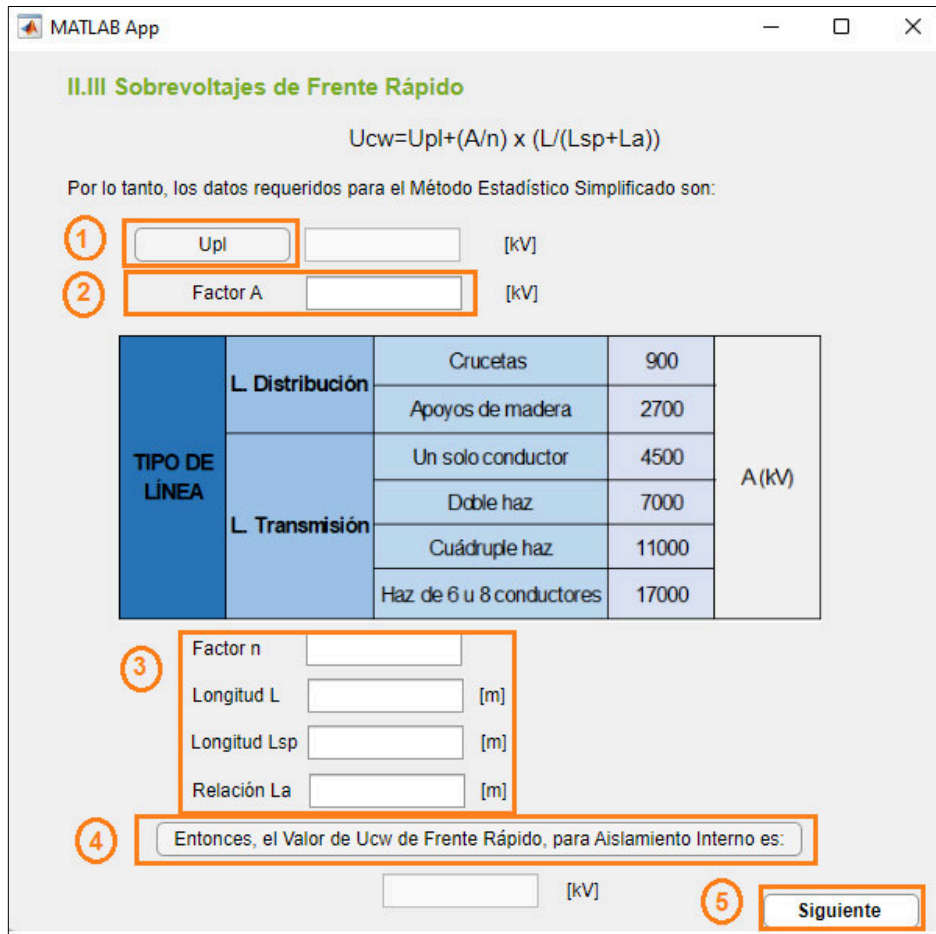
del factor  $K_{cd}$ ” (2), se visualizan todos los elementos enmarcados en color negro, siendo así que, al presionar el botón “ $U_{e2}$ ” (3) se obtiene al valor de dicha relación, dato con el cual se ubica en el esquema ilustrado para determinar (ingresar) el valor de  $K_{cd}$  (4). Una vez se haya ingresado el valor de  $K_{cd}$  se presiona finalmente el botón “Por lo tanto,  $U_{cw}$  de Aislamiento Interno es:” (5), para que, tal como menciona el nombre del botón, se obtenga el voltaje  $U_{cw}$  de frente lento. En cuanto que, para proceder con la siguiente ventana se da clic sobre el botón de “Siguiente”



**Figura 5.6.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes soportados de coordinación  $U_{cw}$ .

La quinta ventana (**Figura 5.6**) consiste en la determinación de los  $U_{cw}$  de frente lento para aislamiento externo, en donde como primer paso se debe dar clic sobre el botón “Determinación del factor  $K_{cs}$ ” (1), lo cual detona la aparición de los elementos enmarcados de color negro, de allí que, como dato se arroja el valor en p.u. de  $U_{e2}$ , valor con el cual se prosigue con la determinación (ingreso) de  $K_{cs}$  (2), finalmente dando clic sobre el botón “Por lo tanto,  $U_{cw}$  de Aislamiento Externo son:” (3) se visualizan los voltajes tal cual se exponen en el marco de color azul. Nuevamente, aplicando el mismo proceso, se presiona sobre el botón “Siguiente”, para abrir la siguiente ventana.





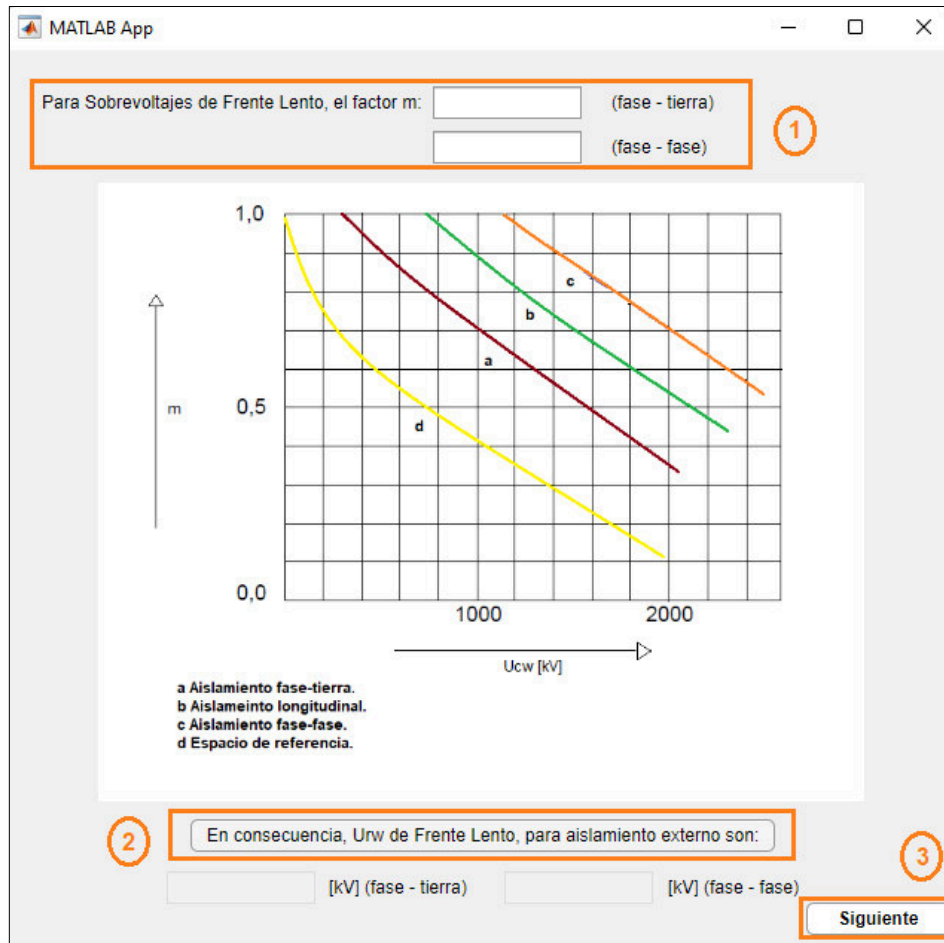
**Figura 5.7.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes soportados de coordinación Ucw.

En la sexta ventana, tal como se ilustra en la **Figura 5.7**, se calcula el voltaje soportado de coordinación de frente rápido, para dicha determinación se utiliza el método estadístico simplificado, establecido en la normativa IEC 60071. Dentro de la operación de la interfaz el primer paso es la ejecución del botón “Upl” (1), acción con la cual se trae el dato anteriormente ingresado del valor de Upl, para segundo acto se tiene la introducción del valor del factor A (2), para lo cual se ha plasmado dentro de la ventana la respectiva tabla para la determinación del factor en mención. Continuando, se ingresan todos los datos requeridos dentro de la interfaz (3), todo ello con la finalidad de proceder con la ejecución del botón “Entonces, el Valor de Ucw de Frente Rápido, para Aislamiento Interno es:” (4), paso en el cual se obtiene el valor Urw de frente lento. Retomando nuevamente el paso que lleva a la siguiente ventana, se comprende que se ejecuta el botón “Siguiete”.



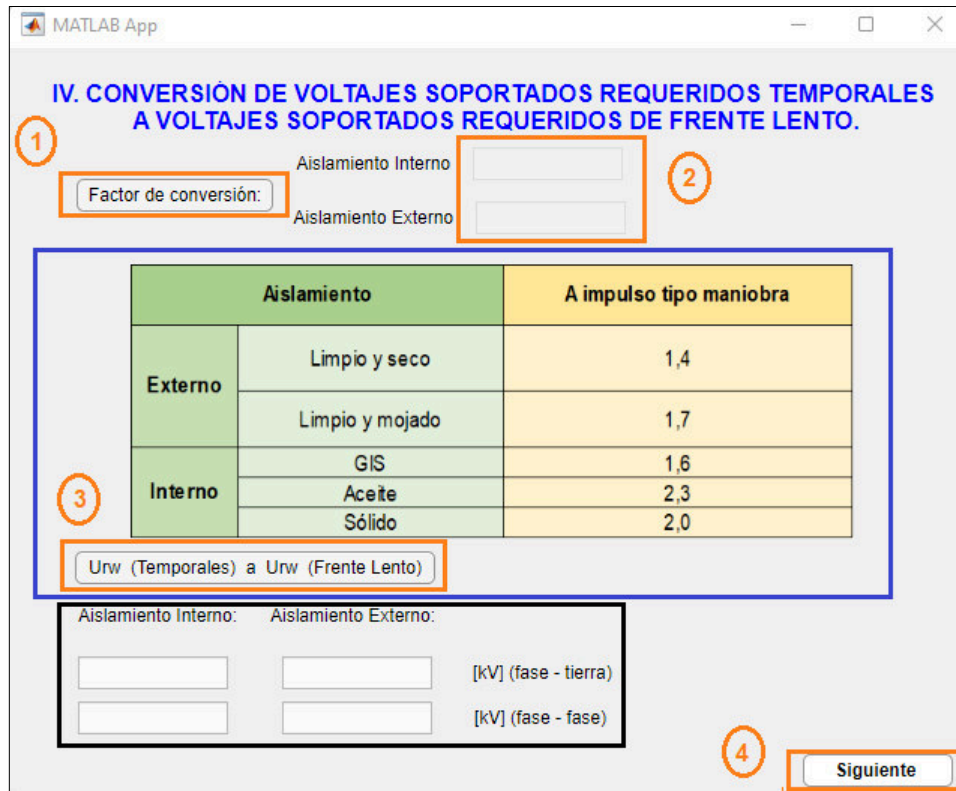
**Figura 5.8.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$ .

Para lo que se refiere a la ventana 7, véase la **Figura 5.8**, se da marcha a la determinación de los voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$ , en donde se parte en primer lugar de la determinación de los  $U_{rw}$  de aislamiento interno, para dichos valores únicamente se debe ejecutar el botón “ $U_{rw}$ ” (1), en cuanto que, para el cálculo de los  $U_{rw}$  de aislamiento externo se calcula los escenarios correspondientes a los sobrevoltajes temporales seguido de los de frente lento. Por lo tanto, como segundo paso a realizarse dentro de la interfaz, se tiene el ingreso del valor del factor  $m$  y  $H$  (2), seguido de la que vendría a ser la tercera acción que es la ejecución del botón “ $U_{rw}$ ” (3), y finalmente proceder a la siguiente ventana a través de la actuación del botón “Siguiete” (4).



**Figura 5.9.** Interfaz gráfica, determinación de voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$ .

Ahora bien, al desplegarse la ventana 9 (**Figura 5.9.**), se tiene la determinación de los  $U_{rw}$  de frente lento de aislamiento externo, para la cual, la primera acción a aplicarse es la introducción de los valores del factor  $m$  (1), para lo cual sírvase utilizar la imagen ilustrada dentro de la interfaz, una vez introducidos los valores se continua con la ejecución del botón “En consecuencia,  $U_{rw}$  de Frente Lento, para aislamiento externo son:” (2), acción con la cual, en efecto, se obtienen los  $U_{rw}$  de frente lento. Se procede como tercer paso a la actuación del botón “Siguiete” (3).



**Figura 5.10.** Interfaz gráfica, conversión de voltajes.

Dentro de la coordinación de aislamiento para redes de extra alto voltaje se realiza la conversión de valores de los voltajes soportados requeridos temporales hacia los voltajes soportados requeridos de frente lento, y es justamente dicha migración de valores la cual se plasma en la ventana 10 de la interfaz desarrollada (Figura 5.10), la ejecución del botón “Factor de conversión:” (1) despliega los elementos enmarcados en azul, de donde sirviéndose de la ilustración presente se procede con el ingreso de los valores del factor de aislamiento (2), para continuar con el tercer paso se realiza la actuación del botón “Urw (Temporales) a Urw (Frente Lento)” (3) de donde desplegándose los elementos enmarcados en negro se reflejan los valores convertidos. Nuevamente, dando clic sobre “Siguiete” se da paso a la ventana consecutiva.



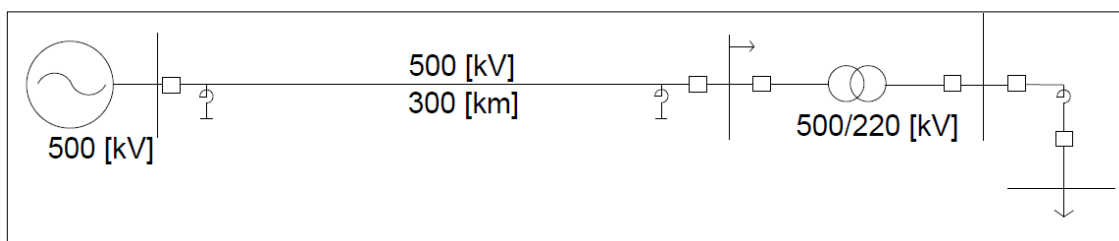
**Figura 5.11.** Interfaz gráfica, selección de aislamiento.

Al llegar a la ventana 10, tal cual se ilustra en la Figura 5.11., se asimila el paso final de la coordinación de aislamiento dentro de la interfaz, en donde justamente se trata de la selección de aislamiento, pues como primer paso se tiene la representación de la tabla resumen (1), en la cual se evidencia los valores de los voltajes soportados requeridos tanto para aislamiento interno como externo, a más de ello, presionando el botón “Por lo tanto, los voltajes a ser estandarizados son:”(2), se reflejan los valores de los voltajes más elevados dentro de cada fila, datos con los cuales se procede a la estandarización de los mismos, haciendo uso de la Tabla 3 ilustrada en la IEC 60071\_1, tal cual se detalló en la metodología del presente documento. Y para concluir, actuando el botón “Finalizar”, se cierra la ventana, dando fin con la interfaz.

## CAPÍTULO VI

### 6. SISTEMA DE APLICACIÓN.

En el presente capítulo se contempla que, a través de un sistema de prueba se aplica la metodología planteada en el presente documento.

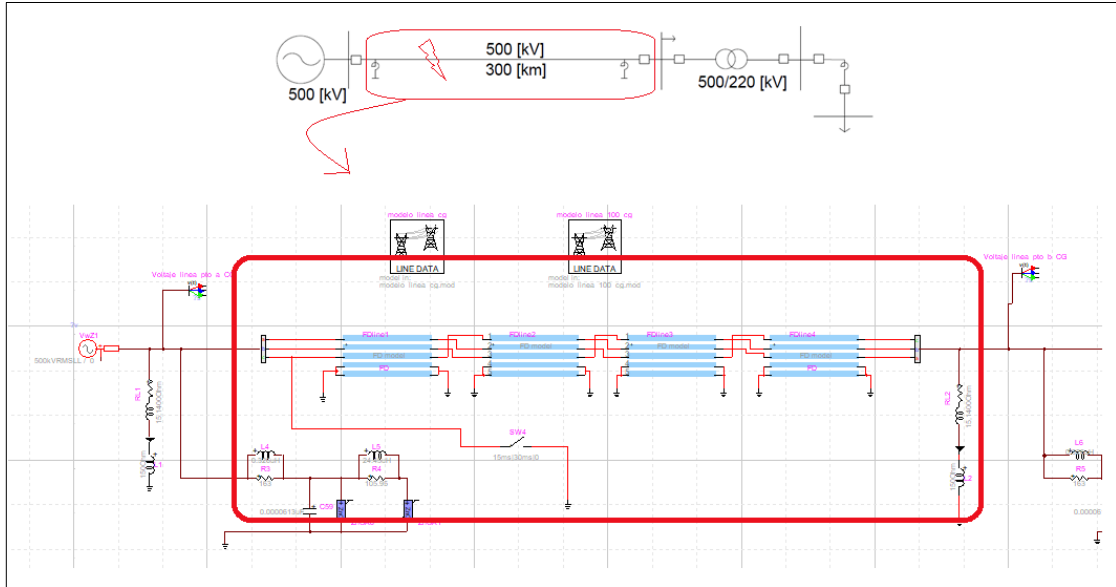


**Figura 6.1.** Esquema unifilar del sistema de prueba.

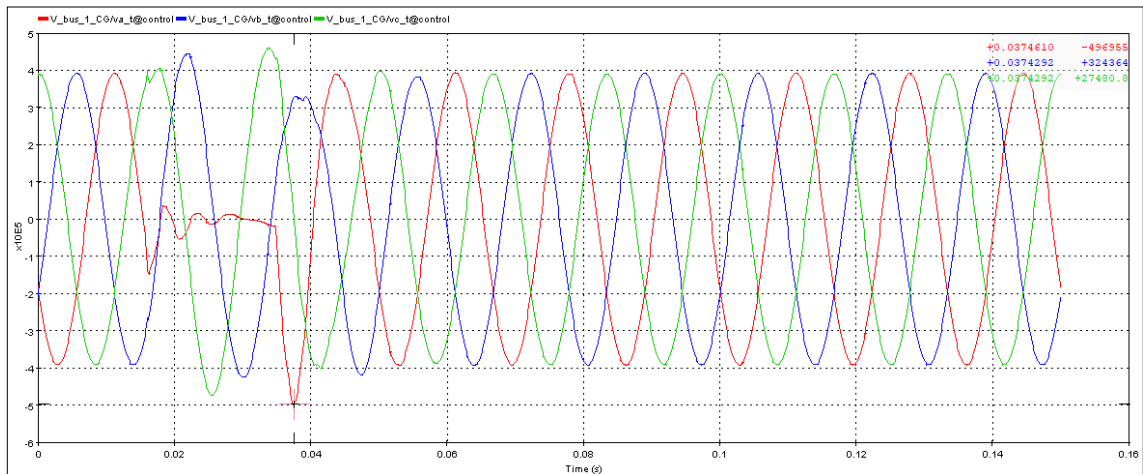
Por lo tanto, basándose en los pasos establecidos en la metodología, la primera acción a ejecutarse es la simulación del sistema de prueba dentro de un programa que permita el análisis de los transitorios electromagnéticos, en el presente caso se hace uso de la herramienta computacional EMTP. Obteniendo de esta simulación valores que justifican los datos para los sobrevoltajes temporales y de frente lento. Sírvase encontrar en el **Anexo B** el desarrollo de la representación electromagnética del esquema de prueba.

A continuación, se presentan los resultados que se obtienen de la simulación de la red eléctrica y las acciones que se emplean con dichos resultados.

Para los sobrevoltajes temporales se ejecutan dos eventos dentro del sistema de prueba, a través de los cuales se obtienen los valores para la determinación del factor  $k$  de los voltajes y sobrevoltajes representativos  $U_{rp}$ , en el primer escenario, véase la **Figura 6.2.**, se establece un evento de una falla monofásica a tierra en la línea de transmisión de 500 [kV], para lo cual se evidencia que, el mayor sobrevoltaje que se obtiene, como resultado de la falla en mención, en valor p.u. es: 1,22, tal como se ilustra en la **Figura 6.3.**, dato con el cual se obtiene el potencial valor para el sobrevoltaje representativo  $U_{rp}$  (fase-tierra). Y se expresa como potencial valor ya que, compite con el valor que se obtenga del  $U_{rp}$  del evento de rechazo de carga.

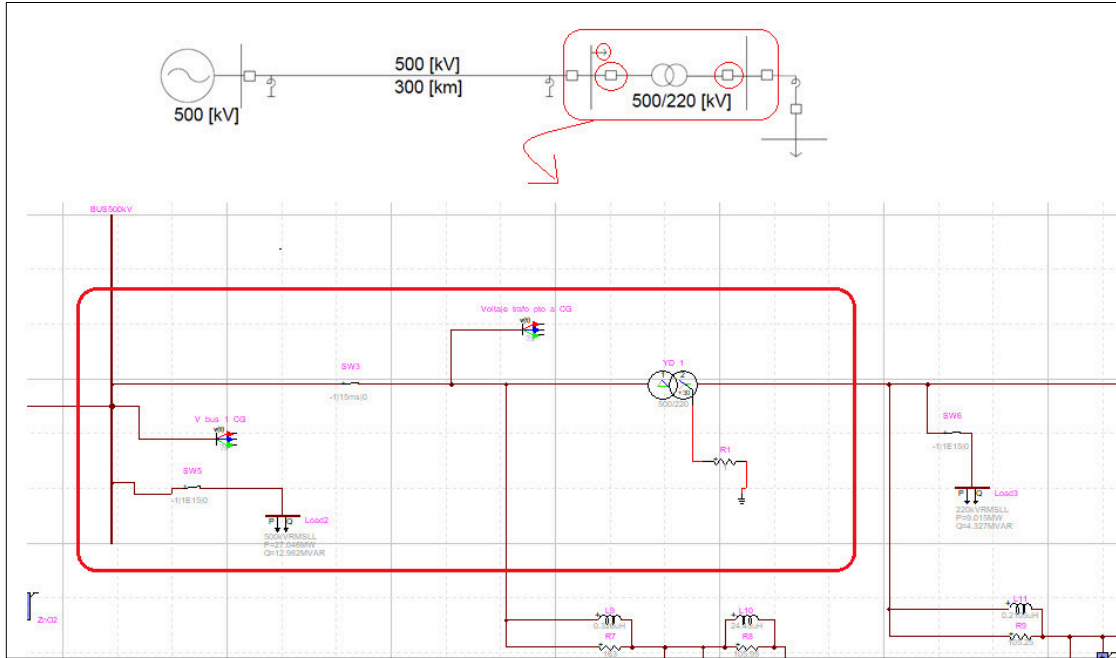


**Figura 6.2.** Falla monofásica a tierra en la L/T de 500 [kV].



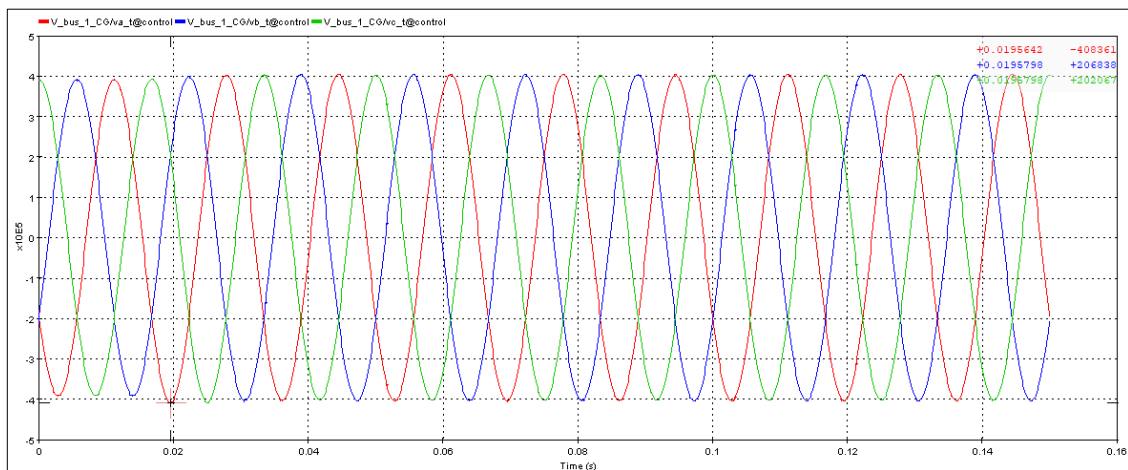
**Figura 6.3.** Forma de onda de voltaje en la subestación de 500 [kV], evento falla monofásica.

En cuanto que, para el evento de rechazo de carga, en el presente caso, se considera a dos desastres de carga, los cuales corresponden al transformador y a la carga de la S/E de 500 [kV], obsérvese en la **Figura 6.4.**



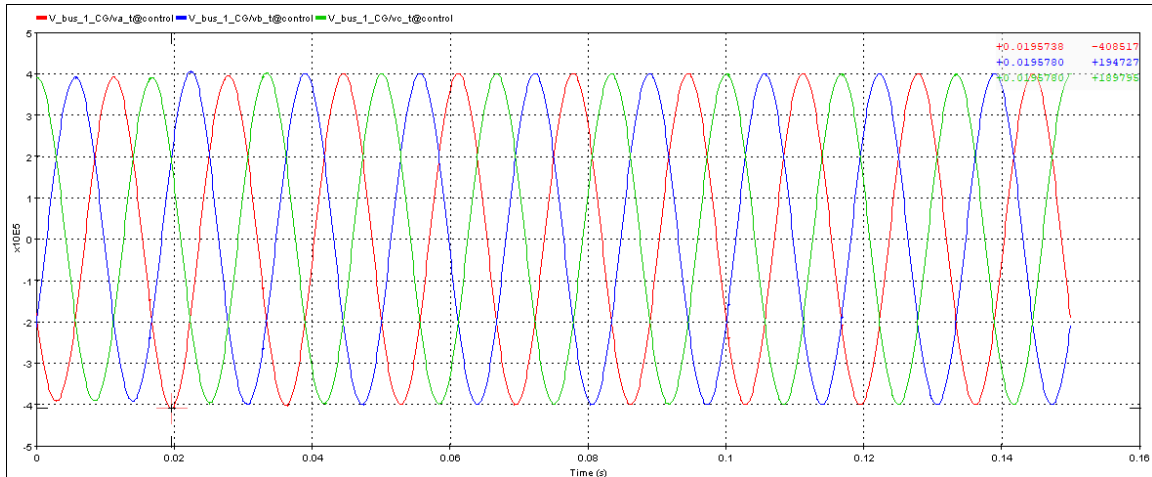
**Figura 6.4.** Rechazo de carga en la S/E de 500 [kV].

Obteniéndose los siguientes valores en p.u. para la determinación del factor  $k$ : 1,0003 y 1,001, evidénciese en la **Figura 6.5.** y **6.6.**, por lo tanto, compréndase que, de todos los valores que se obtienen, para la determinación del factor  $k$ , a través de las simulaciones de deslastre de carga se selecciona al dato más elevado de todos, en este caso  $k = 1,001$ . Y se procede con la obtención del sobrevoltaje representativo  $U_{rp}$  tanto para fase-tierra, así como para fase-fase, tal cual se especifica en la metodología latente en el capítulo anterior.



**Figura 6.5.** Formas de onda de voltaje en la S/E de 500 [kV], evento desconexión de transformador 500/220 [kV].





**Figura 6.6.** Formas de onda de voltaje en la S/E de 500 [kV], evento desconexión de carga de la S/E de 500 [kV].

Es así que, haciendo uso de la interfaz gráfica, ilustrada en el capítulo V, se tienen los siguientes resultados para los voltajes representativos  $U_{rp}$  de sobrevoltajes temporales:

**I. DETERMINACIÓN DE VOLTAJES Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS  $U_{rp}$ .**

Voltaje Nominal del Sistema Eléctrico  $U_s$   [kV]

Seleccione el valor estandarizado del máximo voltaje del equipamiento de la red  $U_m$   [kV]

Voltaje Base  $U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$   [kV]

**II Sobrevoltajes Temporales**

$U_{rp} = (U_m/\sqrt{3}) \times K$

Para el factor K dentro del escenario de fallas a tierra:

Máximo sobrevoltaje dentro de la simulación de eventos de falla a tierra  Unidades

Por lo tanto, K =

[kV] (fase-tierra)

Para el factor K dentro del escenario de rechazo de carga:

Máximo sobrevoltaje dentro de la simulación de eventos de pérdida de carga  Unidades

Por lo tanto, K =

[kV] (fase-tierra)

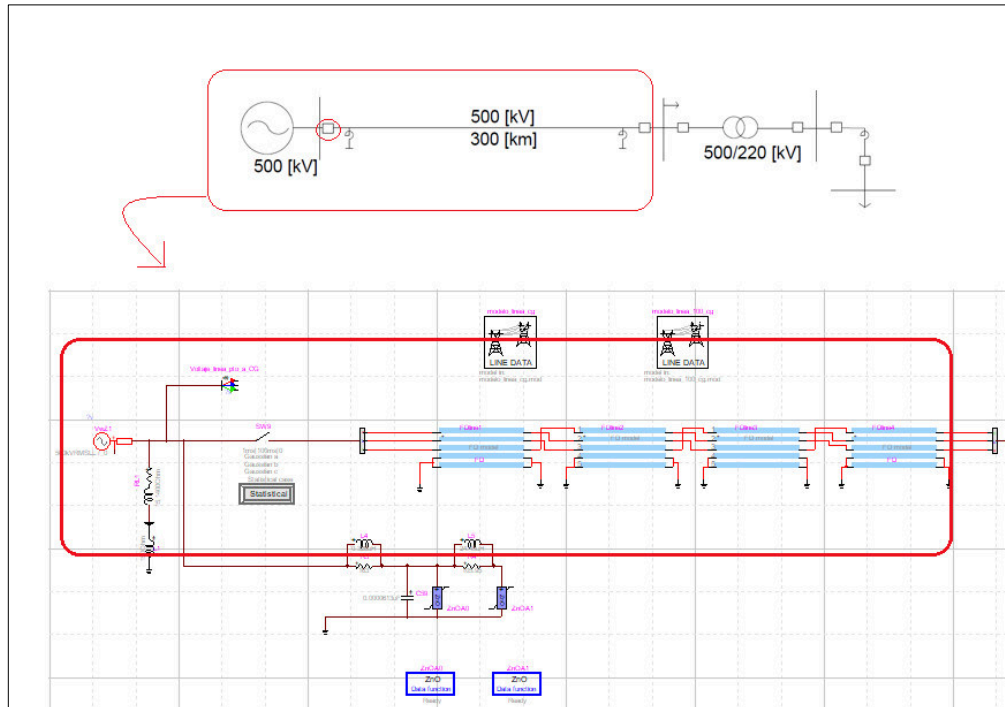
[kV] (fase-fase)

Los valores de los voltajes representativos  $U_{rp}$  son:

[kV] (fase-tierra)   [kV] (fase-fase)

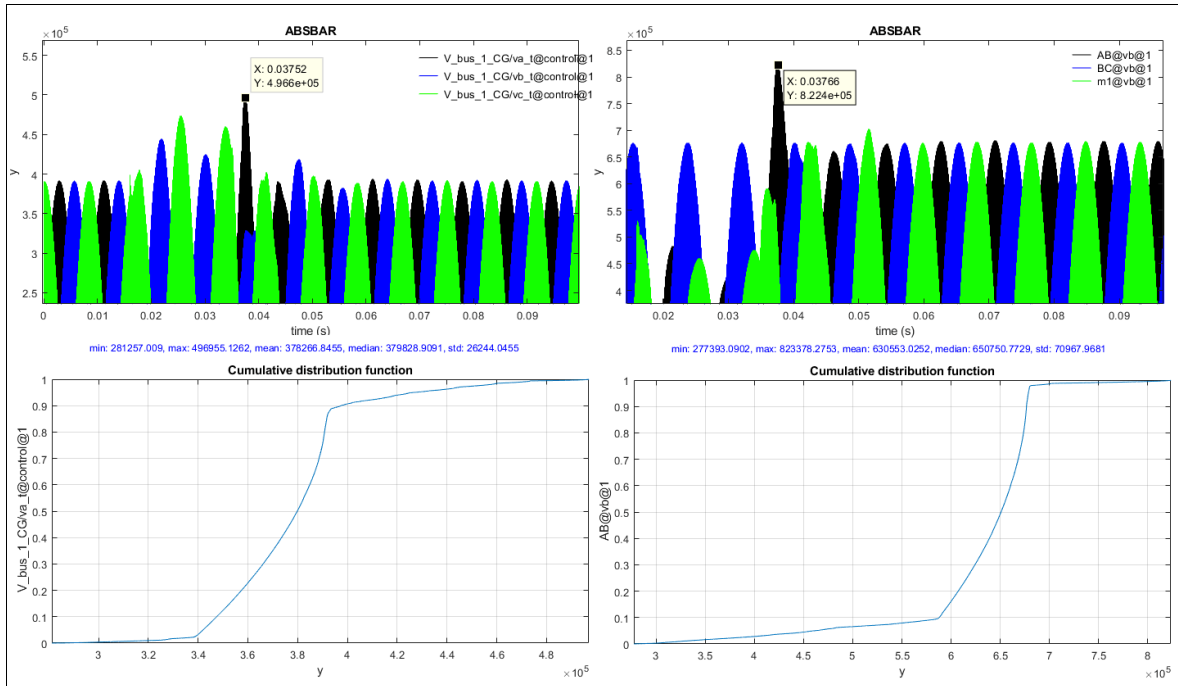
**Figura 6.7.** Valores de los voltajes representativos  $U_{rp}$ , sobrevoltajes temporales.

Ahora bien, para lo que se refiere a los sobrevoltajes de frente lento, en el presente caso, se procede con la simulación en la cual se energiza la L/T 500 [kV], en dicho evento se utiliza un switch estadístico, opción a través de la cual se tiene la distribución probabilística de estos sobrevoltajes, estudio que se desarrolla a través del software EMTP.



**Figura 6.8.** Energización en la L/T de 500 [kV].

De dónde, una vez realizadas las 200 conmutaciones, que se especificó para el evento en cuestión, se tienen los resultados en los que se denota un máximo sobrevoltaje de 506.84 [kV] (fase - tierra) y 839,86 [kV] (fase - fase), valores a los cuales ya se encuentran adicionados el 2% que se considera dentro de la coordinación de aislamiento.

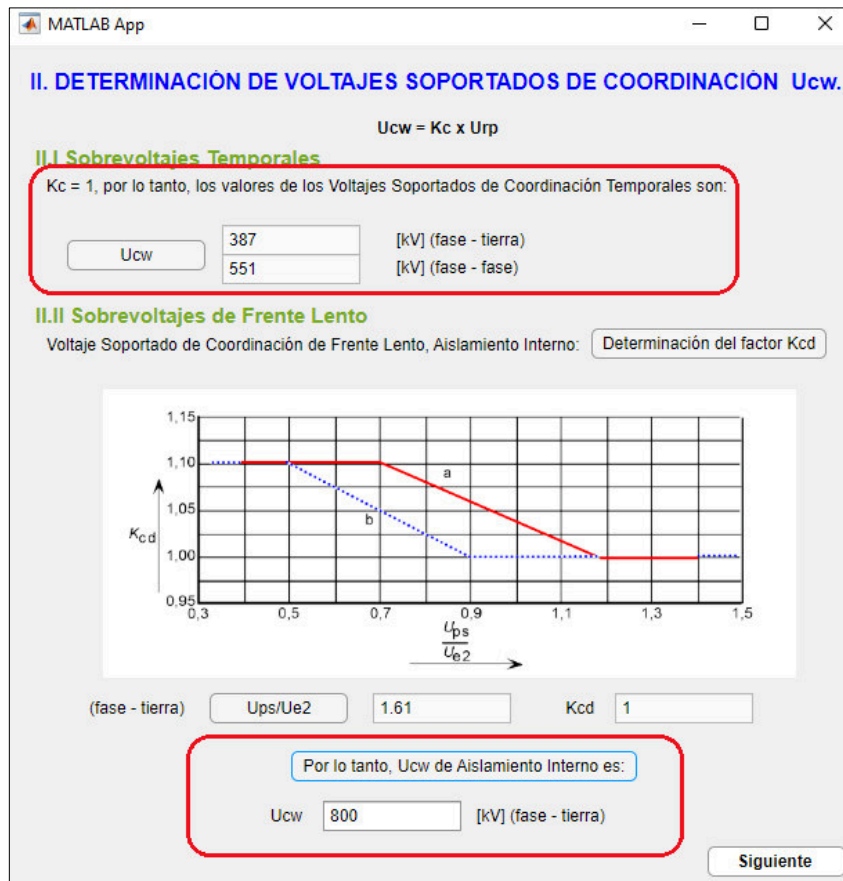


**Figura 6.9.** Resultados del evento de energización en la L/T de 500 [kV].

Estos resultados nos permiten proceder con la determinación de la coordinación de aislamiento, tal cual como se detalla en la guía metodológica del presente documento. Haciendo uso de la interfaz gráfica presentada se tienen los siguientes datos:

**Figura 6.10.** Valores de los voltajes representativos Urp, sobrevoltajes frente lento.

Continuando, la determinación de los voltajes soportados de coordinación, voltajes soportados requeridos, la conversión de estos valores y, los resultados a ser estandarizados son los siguientes pasos en la ejecución de la metodología, tal como se ilustra en seguida, haciéndose uso de la interfaz gráfica desarrollada.



**Figura 6.11.** Valores de los voltajes soportados de coordinación  $U_{cw}$ , sobrevoltajes temporales y frente lento aislamiento interno (fase - tierra).

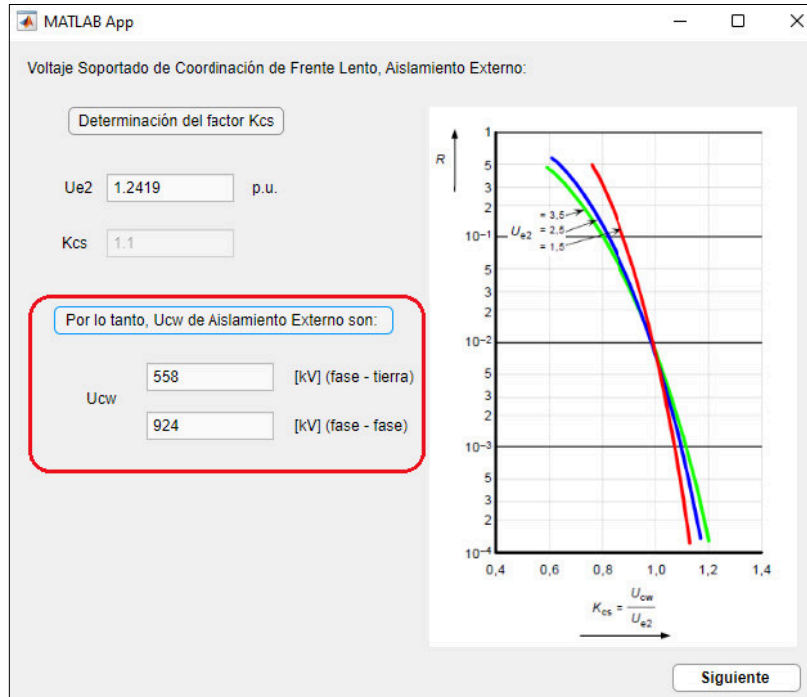


Figura 6.12. Valores de los voltajes soportados de coordinación Ucw, sobrevoltajes frente lento aislamiento externo (fase – tierra y fase – fase).

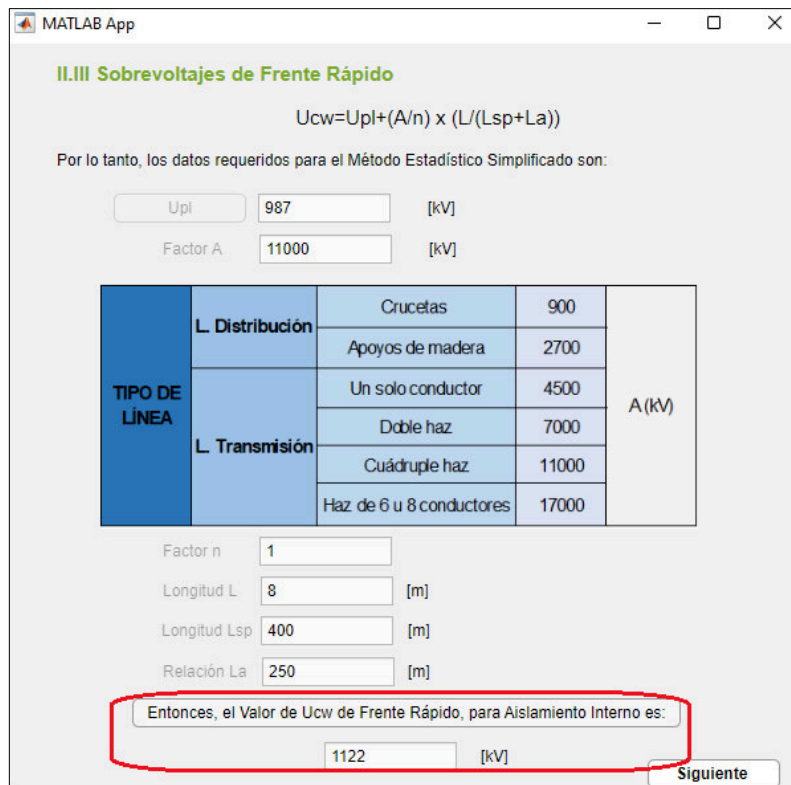
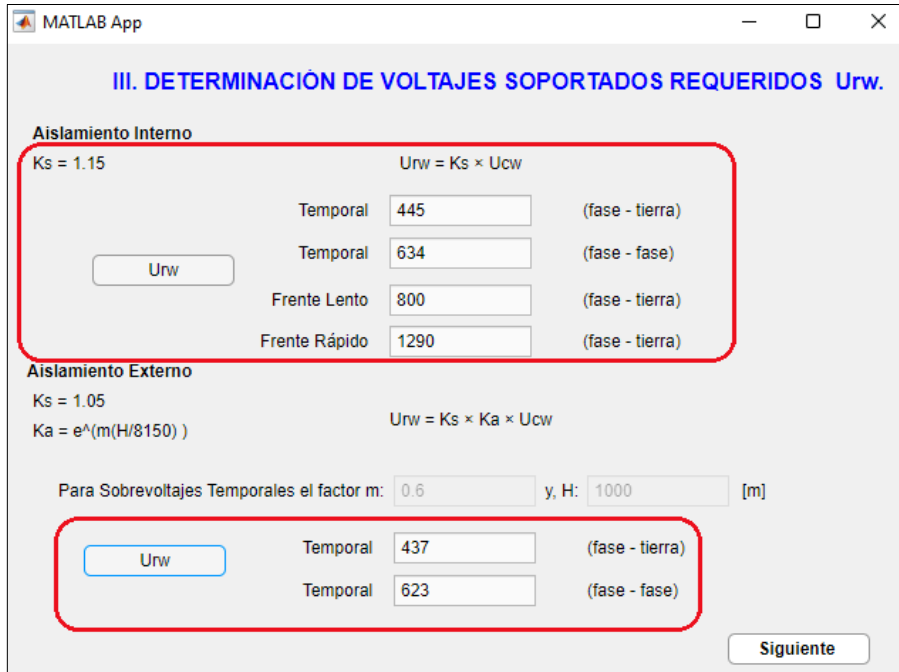
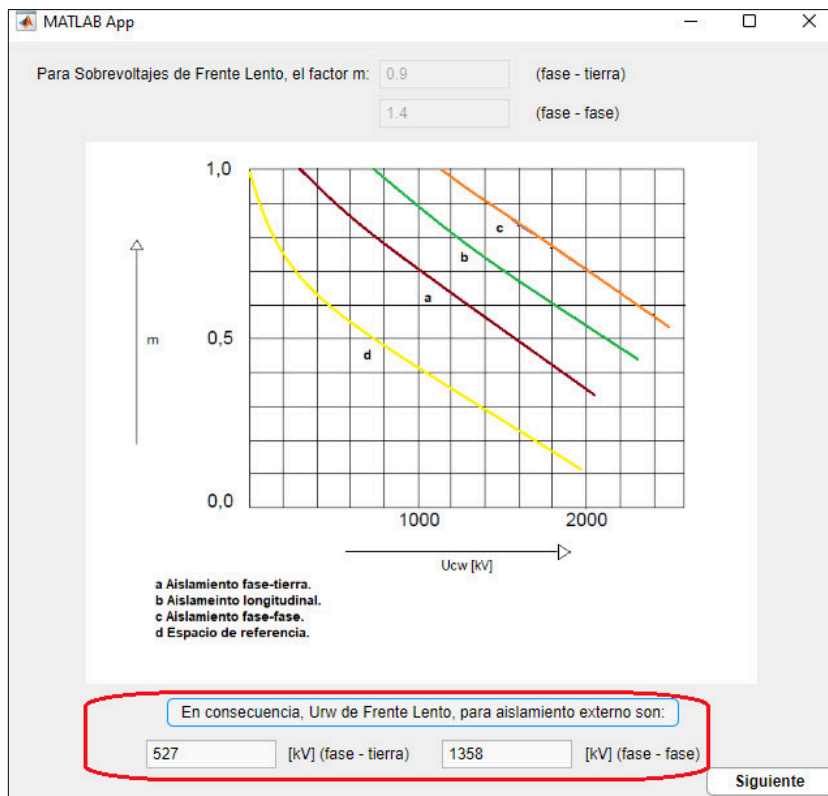


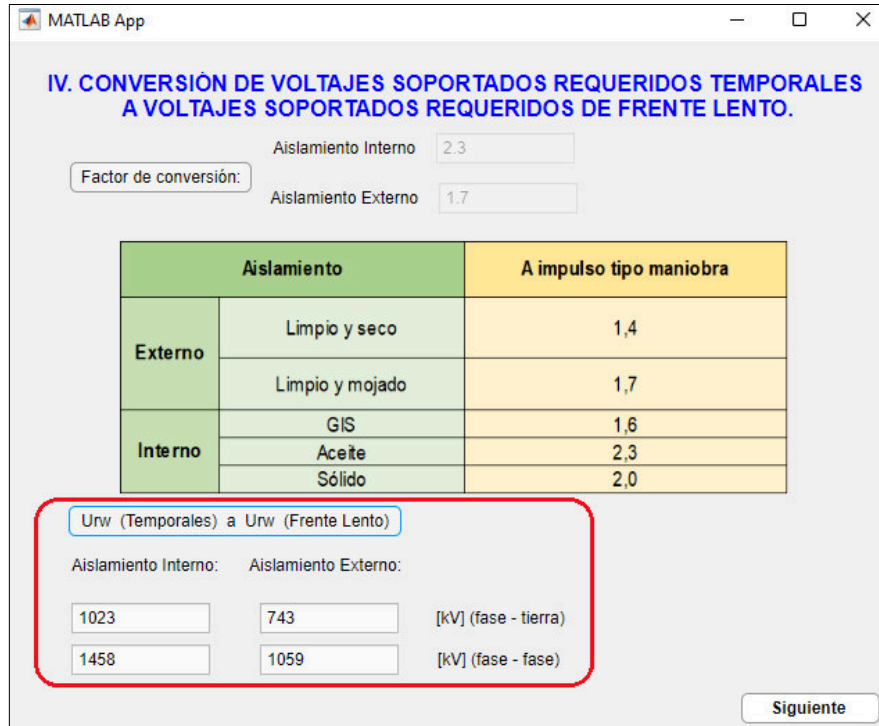
Figura 6.13. Valores de los voltajes soportados de coordinación Ucw, sobrevoltajes frente rápido aislamiento interno.



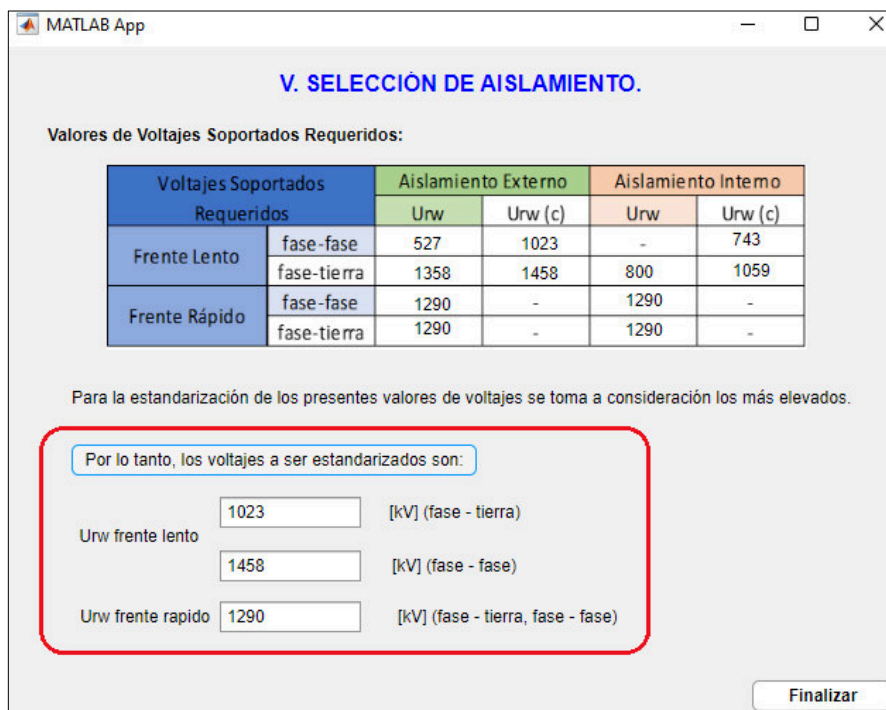
**Figura 6.14.** Valores de los voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$ , aislamiento interno y externo.



**Figura 6.15.** Valores de los voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$ , aislamiento interno y externo.



**Figura 6.16.** Conversión de voltajes soportados requeridos (temporales a frente lento).



**Figura 6.17.** Selección de Aislamiento, valores a ser estandarizados.

Table 3 – Standard insulation levels for range II ( $U_m > 245$  kV) (1 of 2)

Highest voltage for equipment, $U_m$ kV (RMS value)	Standard rated switching impulse withstand voltage			Standard rated lightning impulse withstand voltage <sup>b</sup> kV (peak value)
	Longitudinal insulation <sup>a</sup> kV (peak value)	Phase-to-earth kV (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value)	
300 <sup>c</sup>	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1 050
362	850	850	1,50	950
				1 050
	850	950	1,50	1 175
420	850	850	1,60	1 050
				1 175
	950	950	1,50	1 175
	950	1 050	1,50	1 300
550	950	950	1,70	1 300
				1 425
	950	1 050	1,60	1 300
				1 425
	950 1 050	1 175	1,50	1 425 1 550

**Figura 6.18.** Estudio de Coordinación de Aislamiento, estandarización de valores.

Finalmente, tal cual se especifica en la metodología de coordinación de aislamiento para redes de extra alto voltaje, se toman los valores del estudio de coordinación para proceder con la respectiva estandarización de dichos datos, obsérvese en la **Figura 6.18.** dicha acción. Concluyendo para el presente caso de estudio que el sobrevoltaje de frente lento es: 1.050 (fase - tierra), 1.680 (fase - fase) [kV] y, de frente rápido es: 1.300 [kV].



## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

Se propone una metodología para la coordinación de aislamiento de redes de extra alto voltaje en la cual, se encuentra encabezando la lista de los pasos a ejecutarse, la acción de simular al sistema eléctrico considerándose la representación electromagnética de los elementos que lo conforman, esto debido a que, el modelamiento electromagnético permite analizar de manera muy precisa al comportamiento que tiene la red eléctrica ante aquellos sobrevoltajes que se suscitan en niveles de frecuencia elevados. Se cataloga de gran importancia el hecho de simular a la red eléctrica en un software que sea una herramienta de estudio de transitorios electromagnéticos, cómo lo es EMTP, pues, de esta manera se tienen resultados de carácter estadístico y de análisis de distribución probabilístico.

Se detalla dentro de la metodología propuesta los pasos que se deben seguir para realizarse un estudio de coordinación de aislamiento en redes eléctricas, la descripción en mención mantiene el lineamiento que establece la normativa IEC 60071 adicionado el proceso que se debe llevar a cabo en la simulación del sistema eléctrico. La descripción de la toma de decisiones que se encuentra dentro de la metodología planteada mantiene como base un estudio estadístico.

Se presenta una interfaz gráfica, la cual se ha desarrollado a través de la herramienta computacional MATLAB, que permite a partir de los resultados que se obtienen de la simulación de aquellos eventos que representan a los sobrevoltajes de frente lento y temporales, la ejecución sistemática de todos los pasos que se encuentran descritos en la metodología planteada, arrojando como datos finales a los valores a ser estandarizados de los sobrevoltajes de frente lento y frente rápido, datos a través de los cuales una vez se estandarizan, ocupando la Tabla 3. que se encuentra en la IEC 60071 o la Tabla 2.3. del presente documento, finalmente se tiene los datos para el aislamiento de la red eléctrica.

Se concluye que, la precisión con la cual se realiza un estudio de coordinación de aislamiento principalmente en redes eléctricas de gama II es de gran importancia puesto que, un dimensionamiento erróneo en la determinación del nivel de aislamiento pone en riesgo la calidad de energía, y al tratarse de sistemas eléctricos de gama II el sobredimensionamiento del nivel de aislamiento representa una pérdida cuantiosa de inversión. Es por ello que, al considerar medidas que justifiquen una coordinación de

aislamiento precisa, como las que se encuentran planteadas en la presente metodología, se puede mermar a aquellas dificultades que se manifiestan al realizar estudios de coordinación de aislamiento.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar el mayor número de eventos posibles para la determinación de los valores de los sobrevoltajes que se pueden suscitar en el sistema eléctrico en el cual se realiza la coordinación de aislamiento, ya que con ello se tendrían valores que permitan realizar un estudio meticuloso.

Dentro del proceso de estandarización de los valores del estudio de coordinación de aislamiento existe la posibilidad en la cual, sí bien un valor de sobrevoltaje se encuentra justificado, los otros valores pueden no estar cubiertos por los que plantea la tabla de estandarización para lo cual, se procede con la selección del siguiente nivel de aislamiento, no obstante, un camino sugerido para evitar el paso al siguiente nivel de aislamiento es el adicionar resistencias de precisión o descargadores.

Se recomienda hacer uso de los Anexos del presente documento como base para el modelamiento electromagnético de un sistema eléctrico, al cual se desee simular dentro del escenario que contemple a eventos de sobrevoltajes de frente lento, frente rápido y, temporales.

## CAPÍTULO VIII

### 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Pozo, "Aplicación de sistemas expertos a la coordinación de aislamiento para el diseño de subestaciones eléctricas de alto voltaje.," Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [2] IEC60071-1, *BSI Standards Publication Insulation co-ordination*. 2019.
- [3] J. A. Martínez Velasco, "Coordinación De Aislamiento En Redes Eléctricas De Alta Tensión," *Coordinación de Aislamiento en redes Eléctricas*, vol. 1. p. 632, 2007.
- [4] V. Pamela, "Verificación de la coordinación de aislamientos de una subestación.," p. 171, 2011.
- [5] B. Escobar, "Coordinación de aislamiento en forma determinística, ante descargas atmosféricas en subestaciones aisladas en SF6. Aplicación: patio de 230 kv de la subestación sopladora.," Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [6] J. Zambrano, "Análisis de la coordinación de aislamiento de la línea quixal tactic," 2011, [Online]. Available: [biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0168\\_ME.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0168_ME.pdf).
- [7] A. Madueño Alcina, "DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSION DE ENSAYO PARA IMPULSOS TIPO RAYO CON OSCILACIONES SUPERPUESTAS EN ESPACIOS DE AIRE SOMETIDOS A CAMPOS ELÉCTRICOS NO HOMOGÉNEOS," *Univ. Alcalá*, pp. 1–322, 2014, [Online]. Available: <https://docplayer.es/77540368-Tesis-doctoral-tesis-doctoral.html>.
- [8] CIGRE, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," no. October, 1991.
- [9] R. Chiriboga, "Proyecto de un sistema de puesta a tierra normalizada para centros de transformación en el sector del nuevo aeropuerto de Quito parroquia de Tababela," 2008, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/901>.
- [10] D. Villalba, "Comparación entre normas IEEE e IEC sobre coordinación de aislamiento (en sistemas de distribución hasta 69kV)," 2016, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14758>.

- [11] IEC60071-2, *INTERNATIONAL STANDARD INTERNATIONALE*. 2018.
- [12] J. Constante, "Methodology for Steady-State and Dynamic Modelling of S . N . I in HYPERsim , Application in the Electromagnetic Transient Analysis for 500 kV Systems Metodología para Modelación Estacionaria y Dinámica del S . N . I en HYPERsim , Aplicación del Modelo en," *CENACE*, no. 16, pp. 40–49, 2020, [Online]. Available: <http://revistaenergia.cenace.gob.ec>.
- [13] L. Pazmiño, D. Echeverría, and J. Cepeda, "Electromagnetic Transients Analysis in the Interconnected National System ( S . N . I . ) at 230 kV and 500 kV voltage level using the real-time digital simulator HYPERsim Análisis de transitorios electromagnéticos en el Sistema Nacional Interconectado ( S," *CENACE*, no. 15, pp. 11–20, 2018.
- [14] J. Grainger and W. J. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia," *Cenace, Uanl*. p. 743, 1996.
- [15] V. José, "APLICACIÓN DEL PROGRAMA DILATE EN EL DISEÑO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA," *Univ. San Carlos Guatemala*, 2013.
- [16] IEC60071-4, "Insulation co-ordination," vol. 3, 2004.
- [17] L. H-Restrepo, G. Caicedo, and F. Castro-Aranda, "Modelos de Línea de Transmisión para Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Potencia.," *Esc. Ing. Eléctrica y Electrónica, Univ. del Valle.*, vol. 16, no. 1, pp. 21–32, 2008.
- [18] J. Das, *Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation*. 2010.
- [19] CIGRE, *International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B2: Overhead Lines*. Paris, France.
- [20] I. W. G. 3.4.11, "MODELING OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS," *Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 1, pp. 302–309, 1992.

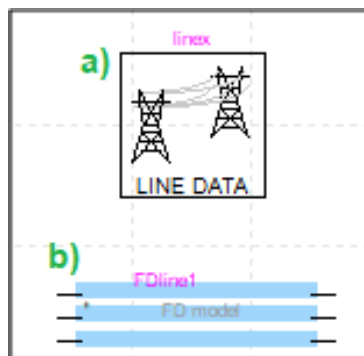
## ANEXO A

### MODELACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON EMTP

EMTP es una herramienta digital que permite la modelación electromagnética de los elementos que componen a una red eléctrica y a través de la cual se simula ciertos eventos de los cuales se obtienen los valores de los sobrevoltajes que se podrían suscitar en el elemento.

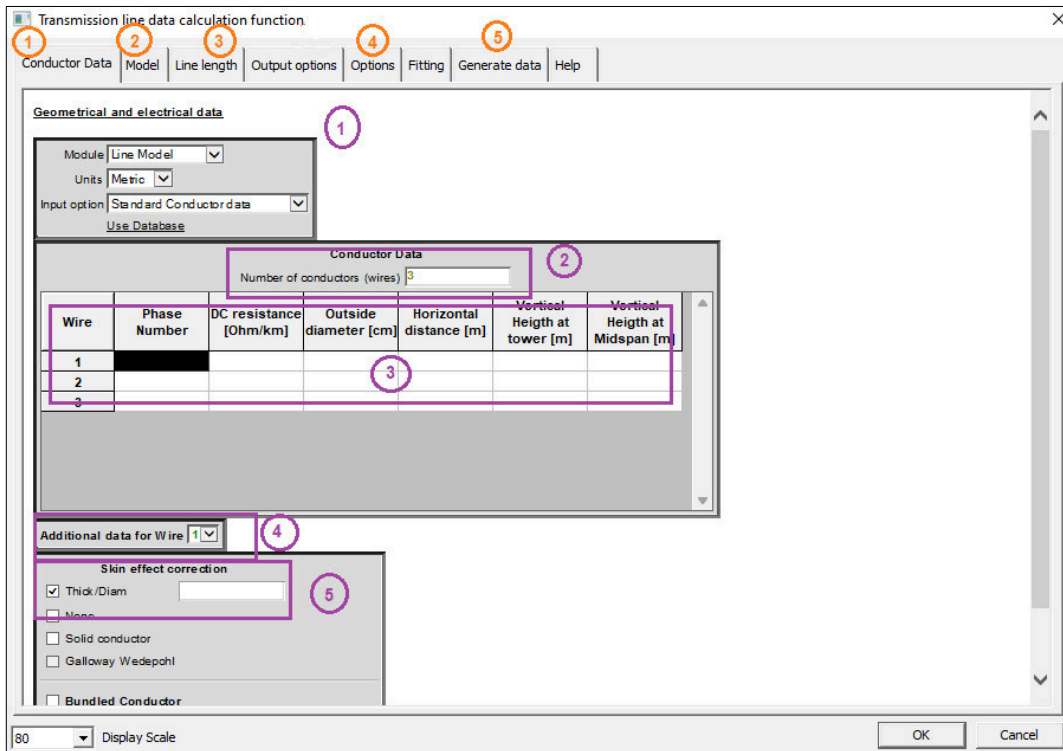
Como anteriormente se ha descrito, para la modelación electromagnética de las líneas de transmisión se utilizará la representación del modelo de J. Martí, considérese las siguientes instrucciones para la implementación de una línea de transmisión y los parámetros que se solicitan en el software EMTP.

✓ De la librería se seleccionará dos elementos, uno que permita ingresar los datos de la línea, así como también el modelo (Line Data), y otro elemento (Frequency dependent line) que corresponde a la representación gráfica de la línea dentro del software. Tal como se ilustra en la siguiente figura.



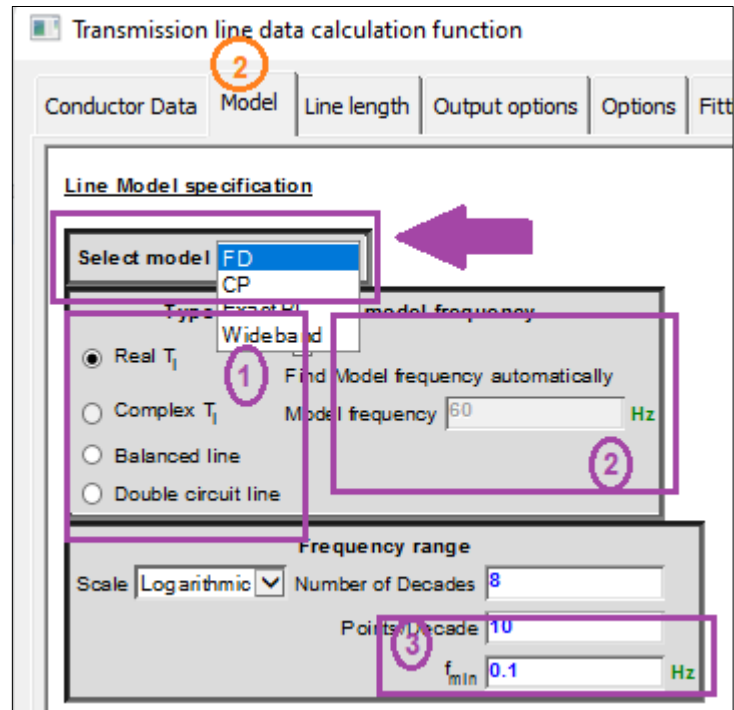
**Figura A.1.** Elementos para modelar una línea de transmisión en EMTP, a) datos de la L/T (Line Data), b) representación esquemática de la L/T (Frequency dependent line).

✓ Doble clic derecho en Line Data, se despliega una ventana con opciones que permiten ir parametrizando al modelo de la línea, para ello es fundamental conocer la geometría y datos de los conductores.



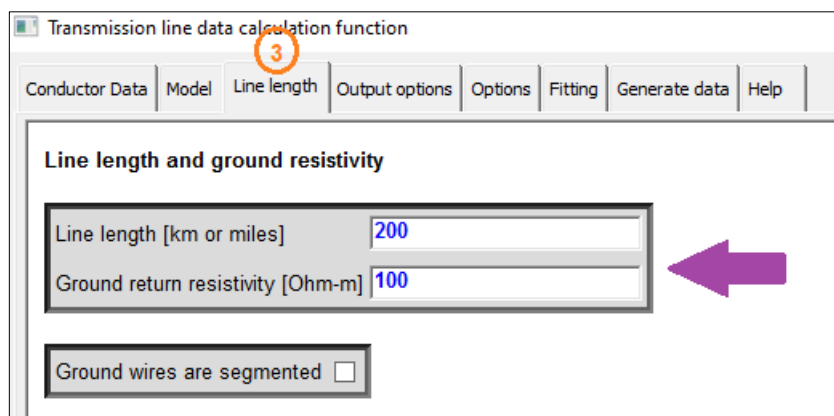
**Figura A.2.** Parametrización para el modelo de la L/T, Conductor Data.

De la **Figura A.2.** se observa que, en la parte superior izquierda se tiene la barra, donde enumeradas, se encuentran las pestañas que tienen relevancia a la hora de ir detallando los datos de la L/T. Enfocándose en la pestaña 1 (Conductor Data), se tienen las opciones: en primer lugar (1), de escoger el módulo que se desee para ingresar los datos de los conductores y las unidades en las que se desea trabajar. Esto seguido de la designación del número de conductores que se desea modelar, en esta selección (2) significativo es considerar las tres fases y el cable de guardia, razón por la cual generalmente se definen 4 conductores, continuando, importante como ya antes se mencionó, conocer la disposición geométrica de los conductores y la resistencia DC de los mismos, ya que es información que se solicita (3). En la información adicional de los cables (4) se va seleccionando uno por uno, colocando para cada uno de éstos los valores que tiene el diámetro del espesor de la corriente que circula por el conductor en relación con el efecto piel (5).

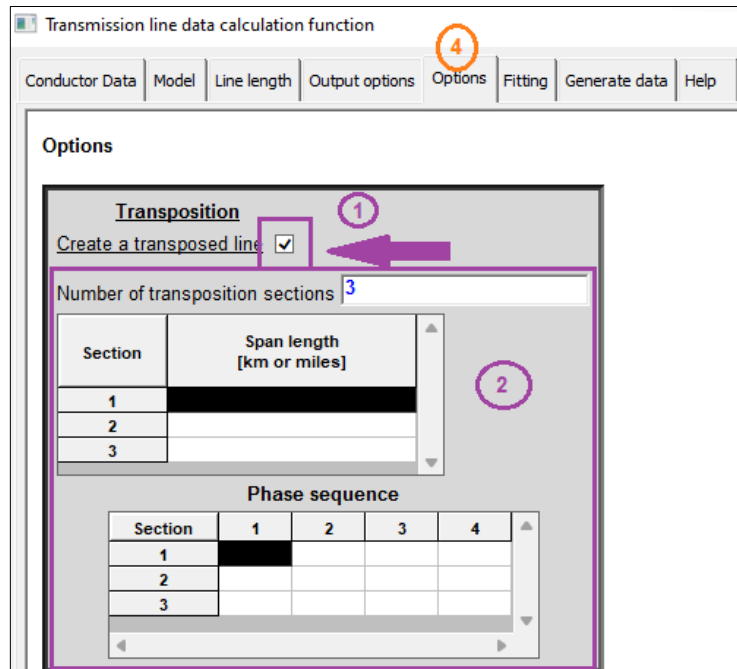


**Figura A.3.** Parametrización para el modelo de la L/T, Model.

Para la pestaña 2 (Model), de la **Figura A.3.** se define el modelo al cual se va a regir el estudio del comportamiento de la L/T, para el análisis en cuestión, como se ha mencionado con antelación se escogerá el modelo J. Martí, denotado en la barra de opciones como FD (Frequency Dependent), para dicho modelo se puede seleccionar (1): la traspuesta real, línea balanceada o circuito doble línea, sin embargo, al seleccionar la traspuesta real se habilita la opción del rango de la frecuencia (2), ya sea para que se acople de manera automática a la frecuencia que se manifieste o se coloque una frecuencia en específico. Finalmente, se marca la frecuencia mínima de la línea (3).

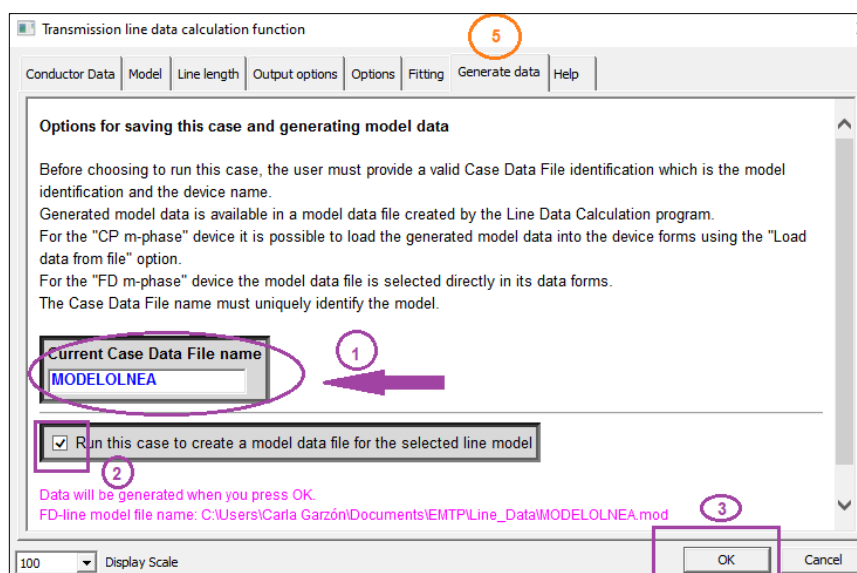


**Figura A.4.** Parametrización para el modelo de la L/T, Line length.



**Figura A.5.** Parametrización para el modelo de la L/T, Options.

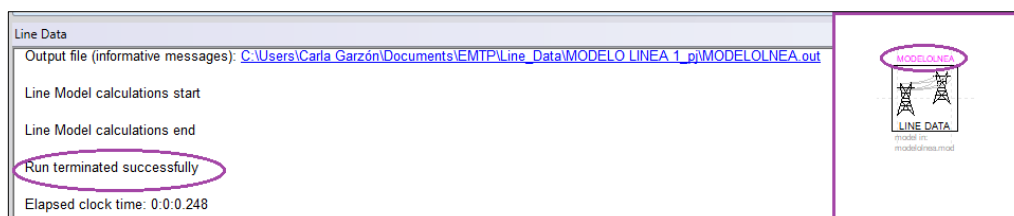
En cuanto que, para las **Figura A.4. y A.5.** se define en la pestaña 3 (Line length) la longitud de la L/T, si se trabaja en unidades métricas recordar que la longitud a ser ingresada está en [km], a su vez también se define la resistividad de la tierra. Mientras que, en la pestaña 4 (Options) se selecciona ya sea la consideración de que la línea de transmisión sea traspuesta o no (1), de ser el caso afirmativo se procede a llenar los datos que se solicitan (2).



**Figura A.6.** Parametrización para el modelo de la L/T, Generate data.

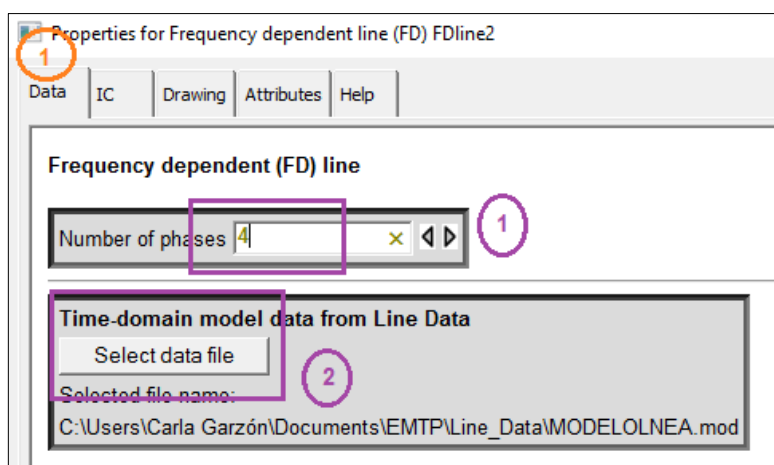


En la pestaña 5 (Generate data), se realizan tres acciones, primero (1) bautizar al modelo que acabamos de parametrizar, con el nombre que se desee, segundo (2) seleccionar la opción de crear una carpeta para archivar el modelo, y finalmente (3) presionar en el botón “OK”, hecho con el cual se crea y ejecuta el modelo que se ha venido describiendo. Para comprobar que se ha ejecutado correctamente el modelo se observa la ventana de resultados, tal como se muestra en la **Figura A.7.** y a más de ello que, el ícono de Line Data se encuentra nombrado tal como se lo hizo en la pestaña 5.



**Figura A.7.** Ejecución del modelo creado de la L/T.

✓ Adjudicar a la L/T que se encuentra esquematizada **Figura A.1.**, el modelo creado, dando doble clic derecho sobre el esquema de las líneas, y definiendo en la primera pestaña el número de conductores (1) y seleccionando la carpeta donde se guardó el modelo anteriormente (2). Sírvase guiarse de la **Figura A.8.** que se muestra a continuación.

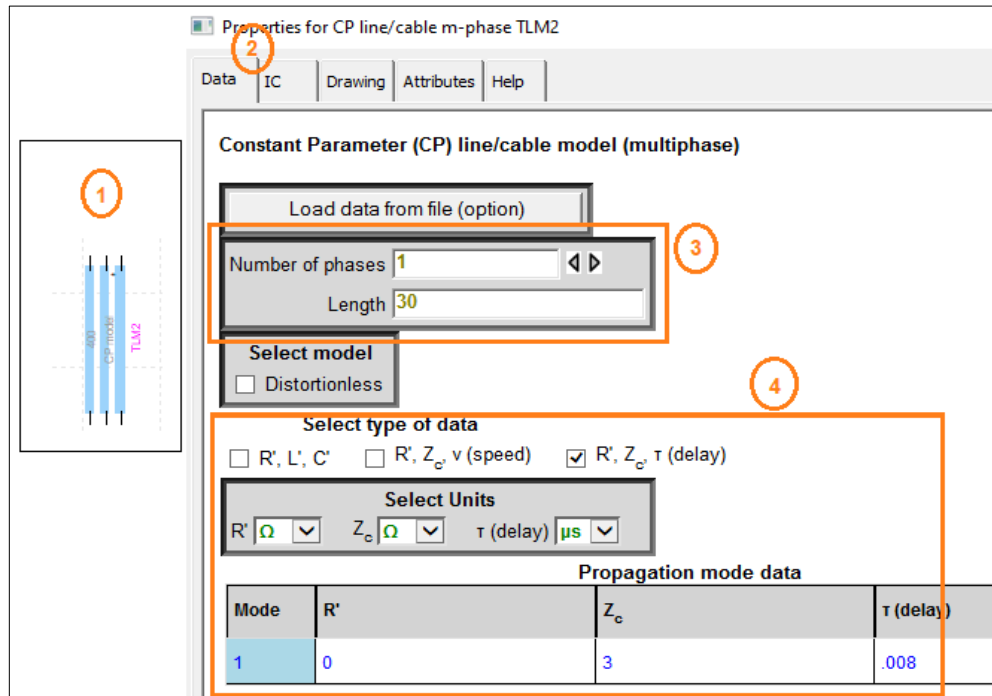


**Figura A.8.** Adjudicación del modelo de L/T, al esquema de líneas.

Por otro lado, para la modelación de las torres en EMTP es muy importante conocer el modelo geométrico que se desea implementar, ya que, mediante dicho conocimiento se obtiene la impedancia de la torre, dato que se ve involucrado dentro de los parámetros que se requieren para la representación de la estructura, según lo dictamina la IEC 60071, para los sobrevoltajes por descargas atmosféricas, a cada segmento de la torre se le representa

como una inductancia en paralelo con una resistencia de amortiguamiento y a su vez se encuentra inmiscuido dentro de tal modelación la resistencia de pie de torre.

✓ Partiendo del hecho de que, según la normativa internacional IEC 60071, la representación de una torre es equivalente a una línea monofásica de propagación, es por tanto que, la primera consideración en la modelación es la implementación de dicha línea, tal como se describe a continuación.

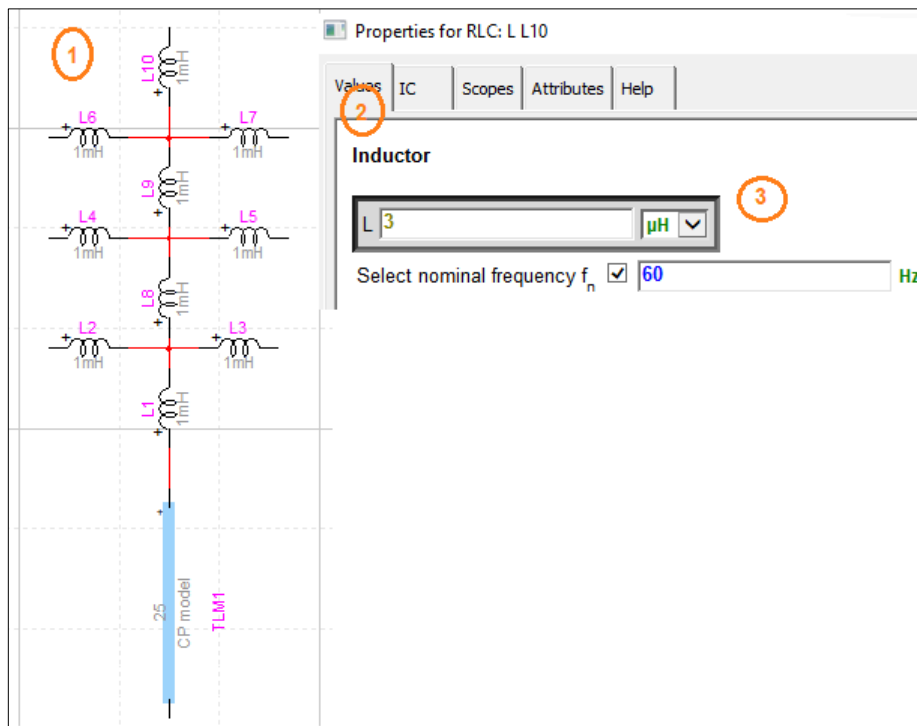


**Figura A.9.** Parametrización para el modelo de una torre.

Una vez que se ha seleccionado de la barra de la librería a la representación de una línea (1) se procede a ingresar a las propiedades de la misma (2), en donde, se tiene la capacidad de seleccionar el número de fases (3), al considerar lo que anteriormente se ha expuesto, lo correcto es seleccionar una fase, a más de ello se coloca la altura de la torre, dicho dato tiene el ingreso en unidades de metro, seguido se tiene las opciones que permiten determinar los valores y tipo de datos que se ingresarán (4), en donde incluye dos barras adicionales para especificar las unidades de los datos que se ingresarán y desde luego la barra en la cual se ingresan las cifras.

✓ Para la representación de cada tramo de la torre se utiliza la configuración de una serie de circuitos L, esto en base a lo que se plantea en la normativa. Pues para cada segmento vertical de la torre se considera: la impedancia media característica en serie con el paralelo de la inductancia y la resistencia amortiguadora. No obstante, al obtener el

equivalente de dicha configuración fácilmente se puede representar a cada segmento como una inductancia que se expresa en ohmios. Ahora bien, para lo que involucra la representación de los cruces o los brazos de la estructura se representa a través de inductancias que toman los valores de  $1\mu F$  por cada metro.

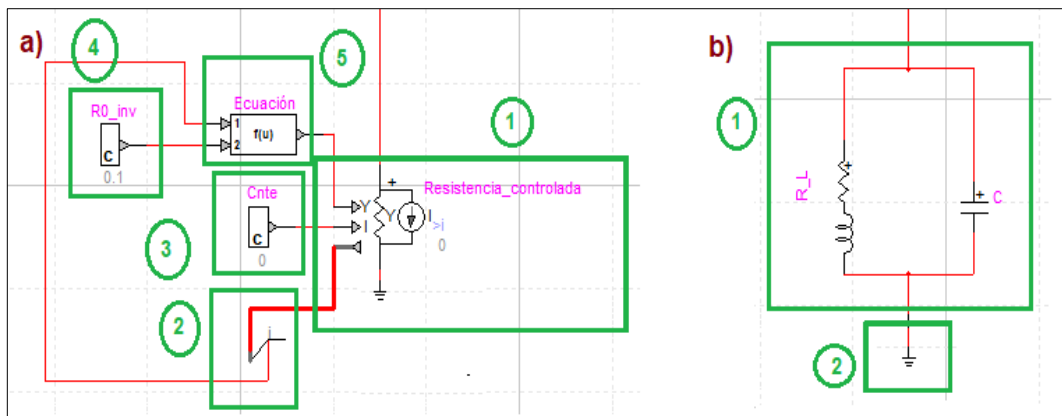


**Figura A.10.** Parametrización para el modelo de una torre, tramos.

De igual manera para adjuntar un elemento se selecciona de la librería el esquema de un circuito L, se adicionan tantos circuitos sean necesarios para esquematizar a la torre en cuestión (1), para este caso se ha considerado la torre cónica plasmada en la **Figura A.5.** del presente documento. El valor de cada tramo depende de la longitud y radio de la zona donde se está esquematizando a la estructura, ingresando a la propiedad de cada uno de los circuitos (2) se puede colocar el valor de la inductancia, las unidades en las cuales se expresan y, la frecuencia a la cual se desea trabajar (3). Tal como se observa en la **Figura A.10.** la esquematización con circuitos L de la torre se conectan con la línea que anteriormente se creó.

✓ En cuanto que, para lo que se refiere a la impedancia de la puesta a tierra según lo establecido por la normativa IEC 60071 se tiene dos aceptables representaciones dentro del estudio de los sobrevoltajes de frente rápido, una más compleja que la otra, si se considera el modelo de la ionización del suelo se estaría abarcando el proceso en el cual se entabla que, al circular una corriente extremadamente elevada a través de la puesta a

tierra, la resistencia del suelo pasa de un lumbral en el cual se mantiene constante a una zona en la cual varía de manera decreciente, es decir que el valor de la resistencia tiene un comportamiento no lineal, y mediante dicha modelación se tiene los valores que va a adquirir la resistencia de puesta a tierra basándose desde luego en los valores de la corriente que circula a través de la misma. Mientras que, para cuando se representa a la resistencia de puesta a tierra mediante el modelo simplificado se considera el paralelo de un circuito RL con un circuito C, este modelo es considerado el más sencillo y es totalmente aceptado para la modelación de las subestaciones. En cuanto que, para la representación de la resistencia de pie de torre en estudios de sobrevoltajes temporales y de frente lento según lo describe la norma internacional IEC 60071, se representa mediante una resistencia constante. A continuación, se plantean los modelos que se pueden ejecutar dentro del estudio de los sobrevoltajes de frente rápido.



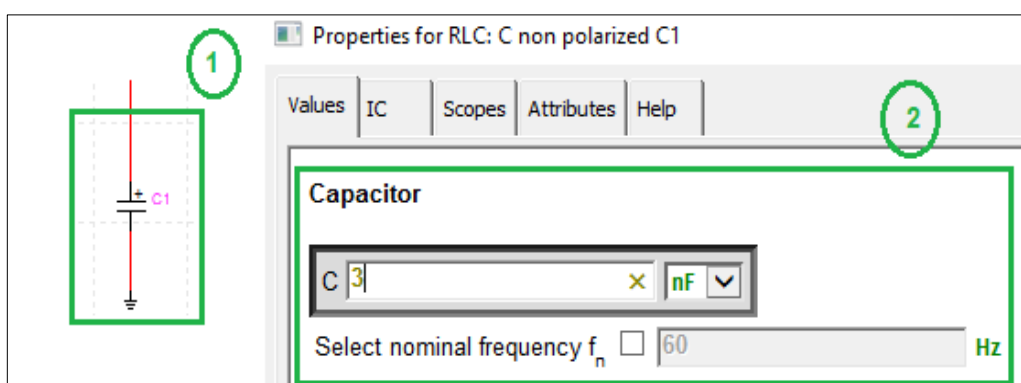
**Figura A.11.** Parametrización para la representación de la resistencia de la puesta a tierra. a) Modelo Ionización del Suelo. b) Modelo simplificado.

Conforme a lo expresado anteriormente, se ilustran dos modelos a través de los cuales se puede representar la resistencia de la puesta a tierra en el estudio de los sobrevoltajes de frente rápido, partiendo del modelo A, se ha implementado en el EMTP en primera instancia el equivalente de una resistencia no lineal y controlada (1), no obstante, dicha resistencia es equivalente a una admitancia, dato muy importante a considerarse para la introducción de la ecuación. Como bien se puede observar, existe una fuente de corriente en paralelo a la resistencia, y dicho valor se ve involucrado a través de la entrada marcada como I, debido a que no es necesaria dicha fuente para los fines pertinentes de la representación de la resistencia, el valor de dicha entrada se lo marca como nulo (3). Por otro lado, la salida de la señal (2) del esquema de la resistencia representa a la corriente que circula por dicha admitancia, es decir la corriente de la

descarga atmosférica, dato que se ve involucrado dentro de la ecuación que determina el comportamiento de la resistencia de pie de torre. En consiguiente, al comprenderse que la entrada Y, es la entrada que controla los valores que va a adquirir la resistencia, se utiliza un bloque de función (5), el cual hace las veces de figurar a la ecuación de resistencia de pie de torre, función que considera al modelo de la ionización del suelo, es por ello que, como entradas a dicha función se tiene el valor de la corriente del rayo, y una constante que representa el valor de la resistencia del suelo (4) bajo condiciones normales (frecuencia normal).

En el mismo horizonte, se ilustra el modelo simplificado de la representación de la impedancia de la puesta a tierra, el cual debido a su sencillez es recomendado para la representación de la subestaciones, este modelo no toma en cuenta la ionización del suelo, y únicamente representa a la resistencia en cuestión como el paralelo que se ilustra (1) (2), los valores que se consideran para los elementos son: tal cual lo establecido por la IEC 60071, valores excesivos para los  $\mu H$  y valores mínimos para los  $pF$ , mientras que, la resistencia toma el valor constante a frecuencia normal.

✓ En cuanto que, dentro de la representación de los transformadores se considera el comportamiento capacitivo de los mismos, ya que, es dicha característica la que se ve latente ante la presencia de aquellos transitorios de elevadas frecuencias, continuando se ilustra la representación dentro del EMTP del elemento en mención.

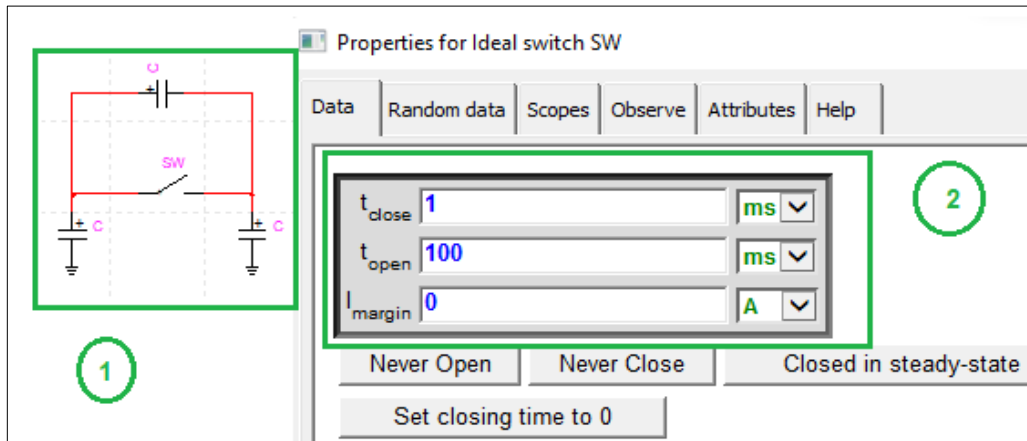


**Figura A.12.** Parametrización del transformador.

Según lo expuesto anteriormente, la representación de un transformador es un capacitor (1), el valor del mismo depende del nivel máximo de voltaje al cual se esté trabajando, pues el rango de valores que se pueden optar para el modelamiento se encuentra en relación al voltaje. Dentro de la parametrización del capacitor (2) se puede seleccionar las unidades y, además se incluye una sección para marcar la frecuencia a la

cual se encuentra el capacitor o dejar abierto el campo para que automáticamente el programa identifique la frecuencia a la cual se está operando.

✓ Para los disyuntores y seccionadores que se encuentran comandando las conexiones y desconexiones dentro de una red eléctrica y sus componentes se modelan a partir de un interruptor en conjunto con la presencia de capacitores. Tal como se ilustra a continuación.



**Figura A.13.** Parametrización de disyuntores y seccionadores.

Una vez que se esquematiza lo planteado por la normativa IEC 60071 (1), se procede a colocar los valores de las capacitancias, datos que se encuentran establecidos según los rangos de voltajes ante los cuales se está trabajando, en cuanto que, para la configuración del interruptor lo que se especifica es el tiempo en el cual se abre o cierra (2), dependiendo de la actividad a desempeñarse.

## ANEXO B

### MODELACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEL CIRCUITO DE APLICACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE SOBREVOLTAJES TEMPORALES Y DE FRENTE LENTO.

En base al circuito de aplicación que se ilustra en la **Figura 6.1.**, se describe a continuación, el modelamiento de los elementos.

- ✓ Para lo que se refiere a la fuente se considera los siguientes parámetros:

The screenshot shows the configuration window for an AC voltage source and impedance. It is divided into three main sections:

- Source Selection:** A radio button labeled '1' is selected for 'AC voltage source and impedance'.
- Properties for AC voltage source and impedance VwZ1:**
  - Equation:  $v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta)$   $\omega = 2\pi f$   $\theta = \text{Phase}$
  - Radio buttons: 'Positive sequence voltage data' (unselected) and 'Generic 3-phase voltage source data' (selected).
  - Table of parameters for Phase A, Phase B, and Phase C:

	Phase A	Phase B	Phase C	
$V_m$	500	500	500	kVRMSLL
$f$	60	60	60	Hertz
$\theta$	0	-120	120	deg
$t_{start}$	-1	-1	-1	s
$t_{stop}$	1E15	1E15	1E15	s
  - Checkbox: 'balanced' (checked).
- Properties for AC voltage source and impedance VwZ1:**
  - Section: 'Source Impedance'.
  - Radio buttons: 'Short-circuit data input' (unselected) and 'Impedance data input' (selected).
  - Section: 'Impedance real part' (R,  $\Omega$ ):

	Zero	Positive	Negative
R	144.39	96.26	96.26
  - Section: 'Impedance imaginary part' (L,  $\Omega$ ):

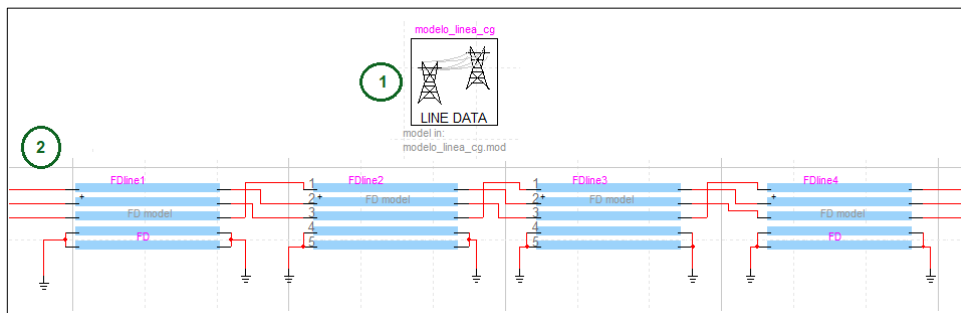
	Zero	Positive	Negative
L	221.39	96.26	96.26

**Figura B.1.** Parámetros de la fuente.

En primera instancia se debe seleccionar una fuente trifásica de voltaje adicionada su impedancia (1), una vez que se selecciona la fuente descrita, dentro de las propiedades

se tiene el espacio donde se colocan las características tales como (2): el nivel de voltaje y sus unidades, la frecuencia y, el ángulo de desfasaje, mientras que, en la segunda pestaña de las propiedades de la fuente se redactan los valores de las impedancias cero y positiva (3), en el programa (EMTP) es necesario colocar valores a la impedancia de secuencia negativa esto a fin de evitar inconvenientes al momento de ejecutar la simulación.

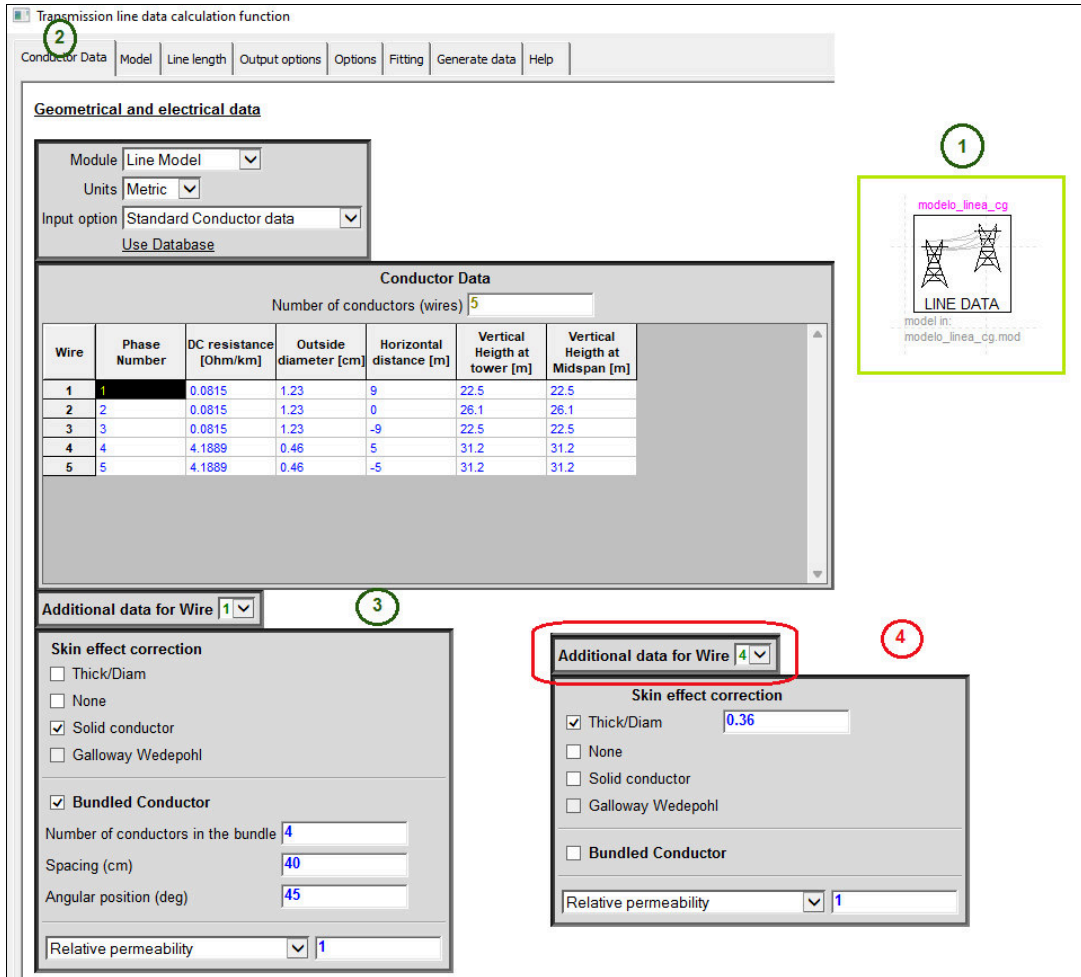
✓ Para lo que se refiere al modelamiento de la línea de transmisión de 500 [kV], se toma a consideración dos aspectos, primero la base de datos de la línea (1) y, segundo, la representación gráfica de la línea a la cual se le carga la base de datos (2). Véase **Figura B.2.**



**Figura B.2.** Modelamiento L/T 500 [kV].

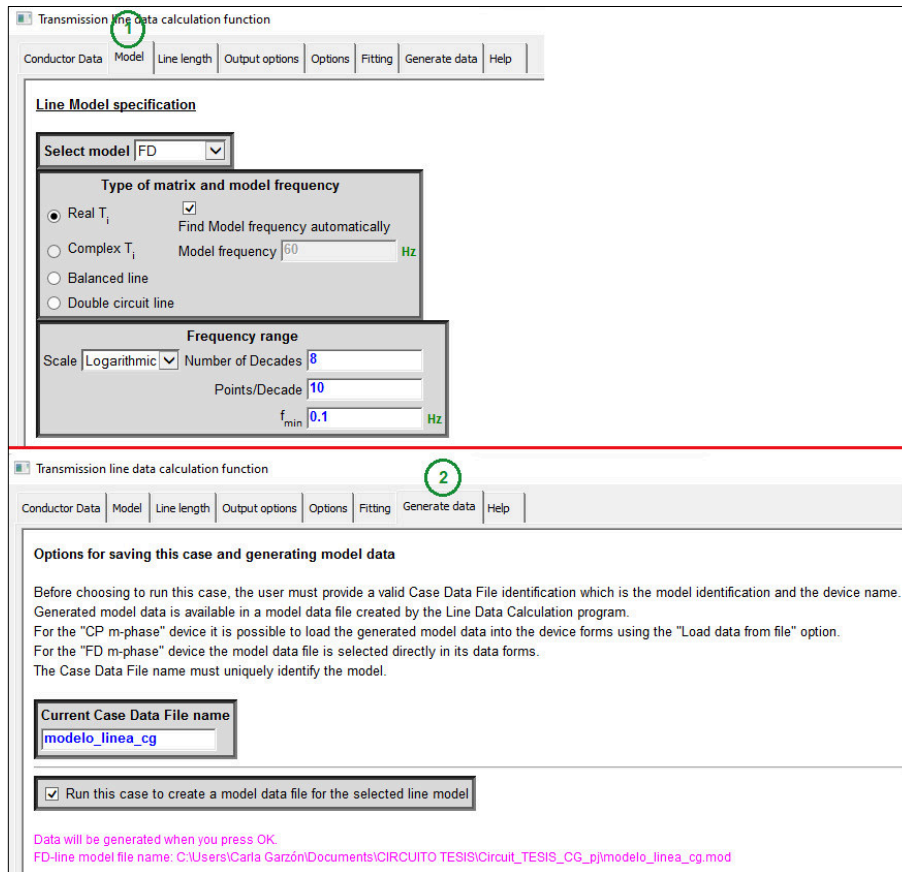
Ahora bien, para la base de datos se toma en cuenta los siguientes ítems, tal como se ilustra en la **Figura B.3.**, dando doble clic sobre “LINE DATA” (1) se despliega la ventana que permite ingresar los datos de la línea (2), en esta ocasión se procede con la parametrización de: el número de conductos que tiene la L/T, en este caso 5, los cuales corresponden a 3 de fase y 2 de cable de guardia, este último depende de la estructura de la torre, en donde se utiliza doble cable de guardia, la resistencia DC, y puntos de distancia que se ven marcados acorde a la estructura de la torre. En cuanto que, en la parte inferior de la pestaña (2), se tiene el espacio donde se coloca los datos para cada conductor anteriormente descrito (3), tómesese a consideración que, para el caso en cuestión se ha detallado como conductor sólido a los cables de fase, a su vez que, cada fase se encuentra conformada por cuatro conductores que tienen un ángulo de posición de  $45^{\circ}$  y 40 [cm] de espaciamiento entre ellos. Por otro lado, en la descripción de los cables de guardia se tiene que, cada uno de éstos se coloca el valor que tiene el diámetro del espesor de la corriente que circula por el conductor en relación con el efecto piel (4).





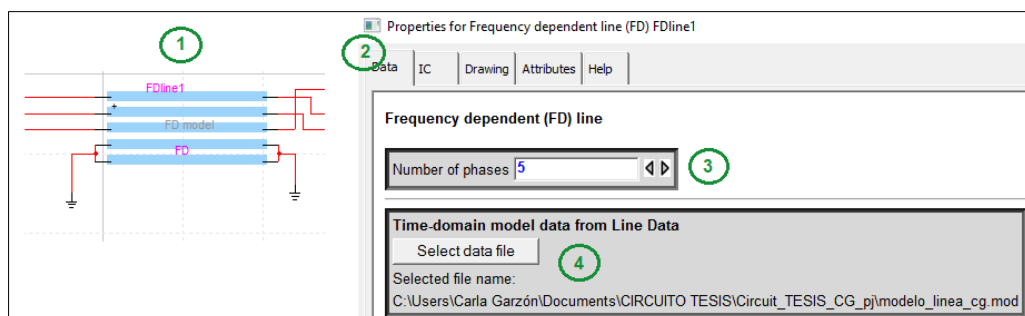
**Figura B.3.** Modelamiento L/T 500 [kV], "LINE DATA".

Dentro de la descripción de las propiedades de "LINE DATA" se constata dos pestañas que son elementales para finalizar con la base de datos de la L/T, y son las "Model" (1) y "Generate Data" (2), tal cual se señalan en la **Figura B.4**. Lo principal de la pestaña (1) es que, se selecciona el modelo de la línea como dependiente de la frecuencia "FD", y la escala dentro del rango la frecuencia. Y finalmente, en la pestaña (2) se destina tanto el nombre del modelo que se acaba de redactar y se visualiza la carpeta en donde se va a crear.



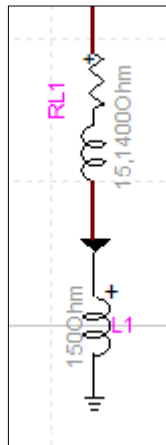
**Figura B.4.** Modelamiento L/T 500 [kV], “LINE DATA”.

Para proceder con el diseño de la línea de transmisión se selecciona en la librería la línea dependiente de la frecuencia (1), y dando doble clic sobre esta se encuentra la primera pestaña (2) en la cual se realiza dos acciones elementales, colocación del número de cables (3), el cual debe ser coherente con la base de datos que se creó anteriormente, en este caso, como se puede observar (**Figura B.5.**), se colocó 5, y segundo se selecciona al archivo que se generó en el “LINE DATA” (4).



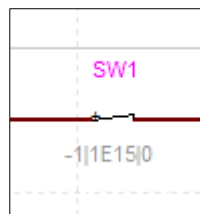
**Figura B.5.** Modelamiento L/T 500 [kV] dependiente de la frecuencia.

- ✓ Los reactores de línea se modelan a través de un circuito RL en serie con una inductancia monofásica. Tal como se observa en la siguiente **Figura B.6**.



**Figura B.6.** Modelamiento reactores de línea.

- ✓ Para los interruptores que gobiernan en las subestaciones se ocupó modelos ideales de switches, que se encuentran censados para estar inicialmente cerrados.



**Figura B.7.** Modelamiento de interruptores.

- ✓ Importante recalcar que, para la simulación de eventos de sobrevoltajes de frente lento y temporales las torres no ameritan ser modeladas, al igual que las barras de las subestaciones.
- ✓ Para la intromisión de descargadores en la simulación se utiliza el modelo planteado por la IEEE. [20]