

**DISEÑO DE SOFTWARE PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN
SUBESTACIONES DE ALTA Y EXTRA ALTA TENSIÓN**

ESTUDIANTES:

**DANIELA CADRAZCO DE LA ROSA
GABRIEL EDUARDO ROPAIN SEGURA**

ASESOR:

JUAN DIEGO PULGARÍN RIVERA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

**20 DE MAYO DE 2019
UNIVERSIDAD DEL NORTE**



AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por permitirme alcanzar mis metas y el poder culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco a mi familia por su infinito apoyo y colaboración durante mi carrera.

A mi compañero Gabriel le agradezco por todo su apoyo durante lo recorrido de este proyecto y la carrera.

Finalmente, agradezco a mi asesor Juan Diego Pulgarín por guiarnos en la elaboración de este proyecto.

Daniela Cadrazco de la Rosa.

Agradezco a Dios por guiarme en mi camino y por permitirme concluir con mi objetivo.

A mi madre y abuela quienes son mi motor y mi mayor inspiración, que, a través de su amor, paciencia y buenos valores ayudaron a trazar mi camino.

A mis familiares con sus oraciones, consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañaron en todos mis sueños y metas.

A la Universidad y a todas los docentes, por permitirme concluir con una etapa de mi vida, gracias por la paciencia y orientación en el desarrollo de este proyecto y mi vida profesional.

Por último, agradezco a mi compañera de proyecto de grado Daniela por su dedicación y esfuerzo durante la realización de este proyecto y de toda nuestra vida universitaria.

Gabriel Eduardo Ropain Segura.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	4
2.	Objetivos.....	5
2.1	Objetivo general.....	5
2.2	Objetivos específicos.....	5
3.	Delimitación.....	5
3.1	Alcance.....	5
3.2	Limitaciones.....	5
3.3	Entregables.....	5
4.	Estado del arte.....	6
5.	Descripción detallada.....	7
5.1	Metodología.....	7
5.2	Diagrama de flujo.....	7
5.3	Procedimiento y cálculo de sobretensiones	7
5.3.1	Sobretensiones representativas	7
5.3.2	Selección del DPS	9
5.3.3	Tensiones de Soportabilidad de coordinación	11
5.3.4	Tensiones de Soportabilidad requeridas	13
5.3.5	Tensiones de Soportabilidad normalizadas	14
5.4	Diseño del Software.....	16
5.4.1	Software – Análisis del sistema	16
5.4.2	Software – Sobretensiones representativas	17
5.4.3	Software – Selección del DPS	17
5.4.4	Software – Tensiones de Soportabilidad de coordinación	18
5.4.5	Software – Tensiones de Soportabilidad requeridas	18
5.4.6	Software – Tensiones de Soportabilidad normalizadas	18
6.	Pruebas, Resultados y Análisis.....	19
6.1	Prueba #1.....	19
6.2	Prueba #2.....	20
6.3	Prueba #3.....	22
6.4	Prueba #4.....	23
6.5	Análisis de resultados.....	25
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	27
8.	Bibliografía	28

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de sobretensiones, la selección de aislamientos y dispositivos de protección es el objetivo de lo que se conoce como Coordinación de Aislamiento. La selección óptima de los aislamientos y de los dispositivos de protección requiere un conocimiento riguroso de las sobretensiones que se pueden originar [8].

Los equipos e instalaciones eléctricas son sometidos a sobretensiones que pueden afectar su aislamiento y provocar una falla. Una sobretensión es un valor de tensión mayor a la nominal variable en el tiempo, estas se originan como consecuencia de una falla, maniobra o descarga atmosférica. El estudio de sobretensiones es fundamental para determinar el nivel de aislamiento que se debe seleccionar para los distintos casos de un sistema, todo esto se debe realizar conociendo el comportamiento de los distintos aislamientos frente a todo tipo de sobretensiones.

Es impensable seleccionar el nivel de aislamiento de un equipo de forma que pueda soportar cualquier sobretensión que se pueda presentar, la selección se debe realizar teniendo en cuenta los medios de protección que se pueden utilizar y aceptando una probabilidad de fallo [7].

Para el diseño de coordinación de aislamiento en subestaciones existen normativas como la IEC 60071 [1] [3] de la cual se es referencia para aplicar su metodología, ya que está validada y aceptada internacionalmente. Sin embargo, tiene como implicación que se debe realizar la revisión del procedimiento de la norma cada vez que se requiera diseñar la coordinación de aislamiento de una subestación, por ende, se hace oportuno la implementación de software para la automatización de este proceso.

De mantenerse el uso de la normativa de manera manual se tienen tiempos mayores para poder realizar un diseño de coordinación de aislamiento y se podrían presentar sobredimensionamientos de equipos para las subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión.

Como evidencia de lo anterior el propósito de este proyecto es realizar un análisis del estudio de coordinación de aislamiento de la norma IEC 60071 [1] [3] y diseñar un software para la automatización de esta metodología. El software se desarrolla mediante la herramienta computacional MATLAB con la finalidad de crear una interfaz que permita un mayor entendimiento del procedimiento de la normativa y a su vez minimice el tiempo que implicar realizar este proceso.

Finalmente, se busca obtener resultados que permitan un dimensionamiento adecuado de los equipos de protección necesarios.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Desarrollar una herramienta computacional que automatice la metodología de coordinación de aislamiento establecida por las normas IEC 60071-1 [3] y IEC 60071-2 [1].

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la metodología de la coordinación de aislamiento en subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión.
- Implementar un algoritmo e interfaz de acuerdo a la metodología de coordinación de aislamiento para el desarrollo de una herramienta computacional.
- Validar los resultados obtenidos por medio de casos de estudio existentes.

3. DELIMITACIÓN

3.1. Alcances

- El software adaptará la metodología de coordinación de aislamiento establecida por las normas IEC 60071-1 y IEC 60071-2.
- El software recibirá parámetros de entrada propios de la subestación a analizar.
- El software determinará el nivel de aislamiento de la subestación analizada.
- El software determinará el nivel de aislamiento interno y externo de la subestación analizada.
- El software determinará las distancias mínimas de seguridad de la subestación analizada.
- El software recomendará las características del DPS a seleccionar.
- Se mostrará información detallada y organizada a manera de informe de los resultados obtenidos por la herramienta.

3.2. Limitaciones

- Para esta herramienta computacional se hará uso solamente del software Matlab.
- El software solo realizará la coordinación de aislamiento en subestaciones de alta y extra alta tensión.
- La herramienta evaluará únicamente un patio a la vez.
- La herramienta evaluará únicamente un nivel de tensión.
- El software no estará disponible para celulares o tabletas.
- El software analizará el cálculo del nivel de aislamiento bajo la norma IEC 60071-1 y IEC 60071-2.

3.3. Entregables

- Software.
- Manual de usuario.
- Informe Final.
- Presentación en PowerPoint.
- Video del funcionamiento.
- Póster.
- Informe de avance.
- Cronograma.
- Presupuesto.
- Delimitación del proyecto.

4. ESTADO DEL ARTE

Con el desarrollo de software para la automatización de procesos de cálculo, distintos trabajos acerca de la optimización del proceso de coordinación de aislamiento han sobresalido. Algunos trabajos sobresalientes son presentados en [11], [12].

En [11] exponen la implementación de un software que tiene como finalidad automatizar el proceso de coordinación de aislamiento en subestaciones de alta tensión, este está basado en la norma internacional IEC 60071 con una rutina de programación fundamentada en el lenguaje de programación PYTHON. Esta herramienta computacional logra realizar la coordinación de aislamiento únicamente en subestaciones eléctricas de alto voltaje normalizados Gama I. La programación de esta herramienta empieza por la adquisición de datos o parámetros necesarios para determinar qué tipo de acción se va a realizar en la subestación, así mismo la herramienta contempla un catálogo predeterminado siemens en una base de datos de Excel para la selección del pararrayo; mas sin embargo el usuario por criterio propio puede cambiar el catálogo con el que más se ajuste a sus necesidades. Finalmente, el software arroja los siguientes resultados:

- Resumen de voltajes soportados requeridos (U_{rw})
- Voltajes soportados normalizados
- Pararrayos recomendado
- Voltaje más elevado para el material
- Voltaje de corta duración a frecuencia industrial
- Voltaje soportado ante onda tipo rayo
- Nivel de contaminación
- Línea de fuga
- Distancia mínima en el aire-estructura, varilla-conductor

Por otro lado, existen otro tipo de trabajos en donde se ha desarrollado un mayor estudio y empeño a la selección de descargadores de tensión y se ofrece a su vez una guía más amplia del mismo. En [12] se expone un software para la selección de descargadores de óxido de metal en sistemas de potencia. En este se creó una base de datos con los principales modelos de descargadores de los fabricantes más importantes, de tal manera que permite al software realizar comparaciones. En el desarrollo de este software también se presentan en sus resultados las curvas de coordinación de aislamiento, los distintos márgenes de protección, las distancias máximas de ubicación de la protección, curvas de sobretensiones temporales y las energías del sistema y los descargadores como herramienta de comparación entre las alternativas brindadas por los fabricantes.

5. DESCRIPCIÓN DETALLADA

5.1 Metodología para la implementación del algoritmo

Para el desarrollo del algoritmo se hizo la indagación y lectura detallada de los siguientes estándares y normas: IEC 60071-1 [3], IEC 60071-2 [1], NTC 3389 [6]. Esto con el fin de tener de manera clara la metodología de coordinación de aislamiento a implementar; finalmente se resumieron todas formulaciones de la norma en un algoritmo codificado en el lenguaje de programación de Matlab.

5.2 Diagrama de flujo

Se utilizó el siguiente diagrama de flujo como guía para el desarrollo del algoritmo:

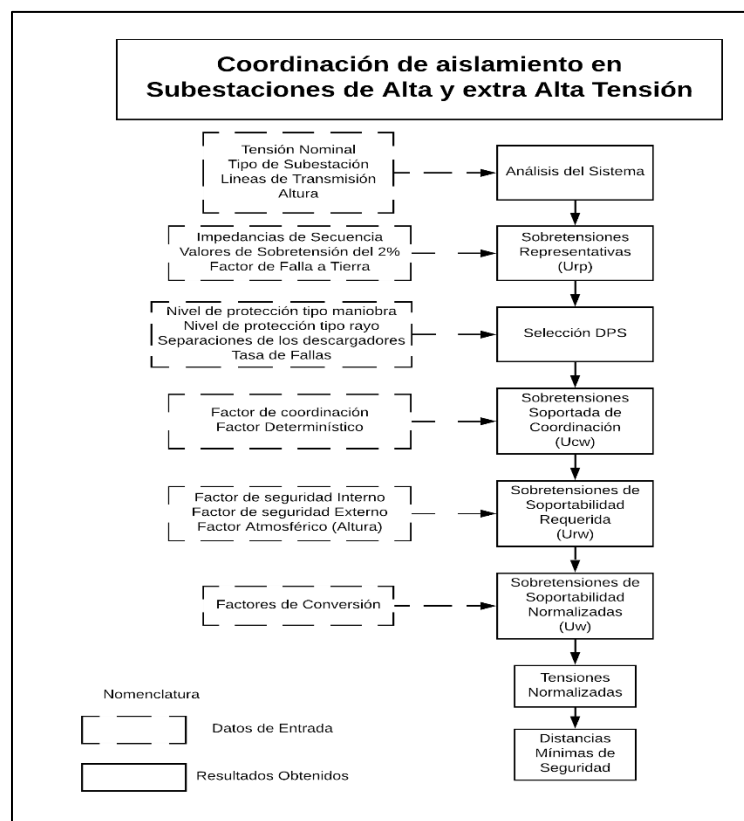


Fig 1. Diagrama de Flujo de Coordinación de aislamiento en Subestaciones de Alta y extra Alta Tensión

5.3 Procedimiento y cálculo de las sobretensiones

5.3.1 Determinación sobretensiones representativas

La determinación de las sobretensiones representativas (Urp) consiste en el análisis del sistema especificando tensiones y sobretensiones que fuerzan el aislamiento en base a su amplitud, forma y duración, incluyendo la selección y ubicación de dispositivos de prevención y limitación de sobretensiones [3].

Para la determinación de las sobretensiones representativas, se estudian sobretensiones temporales, de frente lento y de frente rápido. En este tipo de sobretensiones se analiza el aislamiento fase-tierra y fase-fase

- **Tensión a frecuencia industrial**

Para propósitos de coordinación de aislamiento la tensión de frecuencia industrial es considerada igual a la tensión máxima del sistema: U_{max}

Adicionalmente, es necesario realizar el cálculo de la tensión base: $U_{base} = U_m * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (1)

- **Sobretensiones temporales**

Este tipo de sobretensiones se identifican por su amplitud (sobretensión máxima), forma de onda (tensión normalizada a frecuencia industrial) y duración (hasta de 1 min). Teniendo en cuenta el origen de las sobretensiones de este tipo se tienen los siguientes:

- Fallas a tierra: En un sistema eléctrico las máximas sobretensiones generalmente se producen por fallas monofásicas, estas causan sobretensión fase-tierra pero no entre fases. La amplitud de la sobretensión ocasionada por este evento depende de la puesta a tierra del neutro del sistema y de la ubicación de la falla, se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$U_{rp(p-e)} = K * \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Para la determinación de esta sobretensión es necesario realizar el cálculo del factor de falla a tierra (K), la cual depende de la conexión del neutro. Este se calcula a partir de impedancias complejas Z_2 , Z_1 y Z_0 de las secuencias negativa, positiva y cero y de igual manera se utiliza la impedancia de falla a tierra (Z_f); y adicionalmente utilizando las figuras B.2, B.3, B.4 y B.5 del anexo B norma IEC 60071-2 [1].

- Pérdida de carga: Este tipo de sobretensiones pueden ser de fase a tierra o de fase a fase, esto dependiendo de la carga rechazada, la configuración del sistema después de la desconexión y de las características de las fuentes.

Para calcular la magnitud de la sobretensión fase-tierra y entre fases ante la ocurrencia de ese tipo de eventos, se realiza por medio de las siguientes ecuaciones:

➤ Sobretensión temporal Fase-Tierra:

$$U_{rp(p-e)} = 1.4 * \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

➤ Sobretensión temporal Fase-Fase:

$$U_{rp(p-p)} = 1.4 * U_s \quad (4)$$

La manera de poder controlar este tipo de sobretensiones es por medio de capacitores en serie, compensadores estáticos o reactores de potencia.

- **Sobretensiones de frente lento**

Este tipo de sobretensiones se caracterizan por ser de naturaleza oscilatoria, tener forma de onda (impulso maniobra normalizado) y tener duraciones de decenas de segundos a miles de microsegundos. Teniendo en cuenta el origen de las sobretensiones se tiene lo siguiente:

- Conexión y reenganche de líneas: Este tipo de evento de cierre o recierre de líneas trifásicas ocasionan sobretensiones en las tres fases de cada línea, por lo cual cada operación de maniobra produce tres sobretensiones fase-tierra y tres fases-fases.

Para el cálculo de este tipo de sobretensión, la norma IEC 60071-2 [1] sugiere el uso de la figura 1 “Intervalo de Sobretensiones de Frente Lento del 2% en el extremo de entrada, causadas por la energización y reenergización de la línea” de dicha norma.

En la cual la distribución de sobretensión de frente lento para fase-tierra se caracterizan a partir de U_{e2} y el cálculo de la magnitud representativa fase-tierra se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$U_{et} = \{(1,25 * U_{e2}) - 0,25\} * \frac{\sqrt{2} * U_s}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

U_{et} : Valor de sesgamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase a tierra.

U_{e2} : Valor de sobretensión fase a tierra que tiene la probabilidad del 2% de ser excedido.

La distribución de frente lento para fase-fase se puede determinar a partir del U_{e2} obtenido de las sobretensiones fase-tierra y utilizando la figura 2 “Relación entre los valores del 2% de Sobretensiones de frente lento entre fases y de fase a tierra” de la norma IEC 60071-2 [1]. En la cual, la curva superior se utiliza para sobretensiones de reconexión trifásica rápida y la curva inferior para sobretensiones de conexión trifásica. El cálculo de la magnitud representativa fase-fase se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$U_{pt} = \{(1,25 * U_{p2}) - 0,43\} * \frac{\sqrt{2} * U_s}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

U_{pt} : Valor de sesgamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase a fase.

U_{p2} : Valor de sobretensión fase a fase que tiene la probabilidad del 2% de ser excedido.

- **Sobretensiones de frente rápido**

Este tipo de sobretensiones son originadas debido a descargas atmosféricas de origen externo. Generalmente, en la coordinación de aislamiento se realiza el cálculo sobretensiones representativas de frente rápido utilizando el método simplificado, la cual conduce directamente a las tensiones de soportabilidad de coordinación.

5.3.2 Selección del DPS

Para la selección del DPS se consideran las siguientes recomendaciones del libro *Coordinación de aislamiento en redes* [8].

- Elección de la corriente nominal de descarga (I_n) y de la clase de descarga de la línea.

Se selecciona de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1. Valores habituales de corrientes nominales de descarga y clase de descarga de la línea.
[Fuente: [8]]

Tensión nominal del sistema U_n	Tensión máxima del sistema U_s	Clasificación de pararrayos (I_n)					
		5 kA	10 kA			20 kA	
			Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
$U_n \leq 66 \text{ kV}$	$U_s \leq 72,5 \text{ kV}$	•	•	•			
$66 \text{ kV} < U_n \leq 220 \text{ kV}$	$72,5 \text{ kV} < U_s \leq 245 \text{ kV}$			•	•		
$380 \text{ kV} < U_n \leq 380 \text{ kV}$	$245 \text{ kV} < U_s \leq 420 \text{ kV}$				•	•	
$U_n > 380 \text{ kV}$	$U_n > 420 \text{ kV}$				•	•	

- Elección de la línea de fuga

Se selecciona el valor de línea de fuga específica mínima exigido según el nivel de contaminación de acuerdo a lo que se muestra en la tabla 1 “Distancias de fuga recomendadas” de la norma IEC 60071-2 [1].

Posteriormente se realiza la elección de la línea de fuga de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Línea de fuga (mm)} = U_s(\text{kV}) * \text{Línea de fuga específica nominal mínima} \left(\frac{\text{mm}}{\text{kV}} \right) \quad (7)$$

- Tensión continua de operación

El DPS a instalar en el sistema deberá ser capaz de soportar en permanencia la tensión máxima del sistema, es decir:

$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Donde:

U_s : Mayor tensión de un sistema, kV

U_c : Valor máximo admisible de tensión eficaz a frecuencia industrial, kV

- Capacidad para soportar sobretensiones temporales.

El valor del $TOV_c(10s)$ del DPS debe ser al menos el de la amplitud de la sobretensión temporal representativa equivalente, es decir:

$$TOV_c(10s) \geq U_{eq(Temporal)} \quad (9)$$

Donde:

TOV_c : Capacidad del DPS para soportar sobretensiones temporales

$$U_{eq(Temporal)} = U_t * \left(\frac{T_t}{10} \right)^{0.02} \quad (10)$$

Donde:

U_t : Amplitud de la sobretensión temporal representativa

$$U_t = \frac{k * U_s}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

T_t : Duración de la sobretensión representativa

Tabla 2. Valores de la duración de la sobretensión en base al factor de falla a tierra [Fuente: [8]]

k	T_t
$k \leq 1,4$	$1 \text{ seg} \leq T_t$
$1,4 < k \leq 1,73$	$1 \text{ seg} < k \leq 10 \text{ seg}$
$1,73 < k \leq 1,9$	$T_t > 10 \text{ seg}$

U_{eq} : Amplitud de la sobretensión temporal representativa equivalente para 10 s

- Margenes de protección:

Deberá comprobarse que el DPS cumpla con los criterios anteriores y los márgenes de protección, a partir de las características proporcionadas por el fabricante.

- Margen de protección a impulsos tipo rayo:

$$\frac{LIW}{U_{pl}} \geq 1,2 \quad (12)$$

Donde:

(LIW) Lighting Impulse Withstand Level

- Margen de protección a impulsos tipo maniobra:

$$\frac{SIW}{U_{ps}} \geq 1,5 \quad (13)$$

Donde:

(SIW) Switching Impulse Withstand Level

(U_{ps}) nivel de protección al impulso tipo maniobra

5.3.3 Determinación tensiones de soportabilidad de coordinación

La determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}) consiste en realizar una conversión de las tensiones a condiciones de pruebas estándar apropiadas, por medio de la multiplicación de las sobretensiones representativas (U_{rp}) con factores de coordinación que compensan las diferencias entre pruebas de tensión estándar y las condiciones reales de servicio dentro del aislamiento [3].

- **Sobretensiones temporales**

Para este tipo de sobretensiones la tensión soportada de coordinación se obtiene multiplicando el valor máximo de la sobretensión representativa correspondiente, por el factor de coordinación determinista K_{cd} , para este caso en especial $K_{cd} = 1$.

El cálculo de la magnitud fase-tierra y fase-fase de estas sobretensiones, se calcula por medio de las siguientes ecuaciones:

- Sobretensión temporal Fase-Tierra

$$U_{cw(p-e)} = U_{rp} * K_{cd} \quad (14)$$

- Sobretensión temporal Fase-Fase

$$U_{cw(p-p)} = U_{rp} * K_{cd} \quad (15)$$

- **Sobretensiones de frente lento**

Para este tipo de sobretensiones la tensión soportada de coordinación se obtiene multiplicando el valor máximo de la sobretensión representativa correspondiente, por el factor de coordinación determinista K_{cd} , para este caso este factor depende de la relación entre el nivel de protección al impulso de maniobra del DPS (U_{ps}) y el valor de sobretensión fase-tierra U_{e2} como lo sugiere la figura 6 de la norma IEC 60071-2 “Evaluación del factor de coordinación determinista K_{cd} ” [1].

Para determinar el factor K_{cd} por medio de la figura 6 se tiene en cuenta las siguientes relaciones:

- Factor K_{cd} temporal Fase-Tierra

$$U_{ps} / U_{e2} \rightarrow K_{cd(p-e)} \quad (16)$$

- Factor K_{cd} temporal Fase-Fase

$$2 * U_{ps} / U_{p2} \rightarrow K_{cd(p-p)} \quad (17)$$

El cálculo de la magnitud fase-tierra y fase-fase de estas sobretensiones, se calcula por medio de las siguientes ecuaciones:

- Sobretensión temporal Fase-Tierra

$$U_{cw(p-e)} = U_{rp} * K_{cd(p-e)} \quad (18)$$

- Sobretensión temporal Fase-Fase

$$U_{cw(p-p)} = U_{rp} * K_{cd(p-p)} \quad (19)$$

- **Sobretensiones de frente rápido**

Para este tipo de sobretensiones la tensión soportada de coordinación se obtiene a partir de una aproximación estadística. El factor de coordinación K_{cd} que se aplica en este caso se basa en el efecto de la distancia entre el DPS y el equipo a proteger, como se muestra en la figura 3 de la norma IEC 60071-2 “Diagrama de conexión del pararrayos al objeto protegido” [1].

El cálculo de la magnitud del aislamiento interno como externo de la sobretensión representativa para frente rápido se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} * \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (20)$$

Donde:

U_{pl} : Nivel de protección al impulso tipo rayo del descargador de sobretensión, kV

A : Factor dado en la Tabla F.2 de la norma IEC 60071-2 [1] que describe el comportamiento de la línea ante las descargas eléctricas atmosféricas, kV

n : Número mínimo de líneas conectadas a la subestación ($n=1$ o $n=2$)

L : Distancia de separación entre el DPS y el equipo a proteger en metros,

$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \quad (21)$$

a_1 : Longitud de la conexión del descargador de sobretensión a la línea, m

a_2 : Longitud de la conexión a tierra del descargador de sobretensión, m

a_3 : Longitud del conductor de fase entre el descargador de sobretensión y el equipo a proteger para el aislamiento interno y para el aislamiento externo, m

a_4 : Longitud de la parte activa del descargador de sobretensión, m

L_{SP} : Longitud del vano de la línea, m

L_a : Sección de línea aérea calculada a partir de una tasa de salida igual a una tasa de falla aceptable R_a

R_a : Tasa de falla aceptable para el equipo, 0.0067 fallas/año (1 falla/150 años)

R_{km} : Tasa de fallas por año del primer kilómetro de línea desde la subestación, fallas/año/km

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad (22)$$

5.3.4 Determinación tensiones de soportabilidad requeridas

La determinación de las tensiones soportadas requeridas (U_{rw}) consiste en realizar una conversión de las tensiones a condiciones adecuadas de ensayo normalizado, por medio de la multiplicación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}) con factores de corrección [3].

Los factores de corrección son:

- K_a : Factor de corrección atmosférico, la cual toma en cuenta la altitud de la instalación.

$$K_a = e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)} \quad (23)$$

Donde,

H : Altitud sobre el nivel del mar (en metros)

m : - El valor de 1.0 para tensiones no disruptivas de coordinación al impulso tipo rayo

- De acuerdo a la Figura 9, para tensiones no disruptivas de coordinación al impulso de maniobra

-El valor de 1.0 para tensiones no disruptivas a frecuencia industrial de corta duración de distancias en el aire y aisladores limpios.

Nota: Se utiliza la figura 9 “Vínculo entre el valor del exponente m y el voltaje de soportabilidad de coordinación a impulsos tipo maniobra” de la norma IEC 60071-2 [1].

➤ K_S : Factor de seguridad, que toma en cuenta condiciones de equipamiento.

- Para aislamiento interno $K_S = 1,15$
- Para aislamiento externo $K_S = 1,05$

La determinación de las tensiones soportadas requeridas (U_{rw}) se calculan a partir de la siguientes ecuaciones:

- **Sobretensiones temporales**

Aislamiento externo

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (24)

- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (25)

Aislamiento interno

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S$ (26)

- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S$ (27)

- **Sobretensiones de Frente Lento**

Equipos a la entrada de la línea

Aislamiento externo

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (28)

- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (29)

Para otros equipos

Aislamiento externo

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (30)

- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (31)

Aislamiento interno

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S$ (32)

- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S$ (33)

- **Sobretensiones de frente rápido**

Aislamiento externo

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (34)

- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S * K_a$ (35)

Aislamiento interno

- Fase a tierra $U_{rw} = U_{cw} * K_S$ (36)

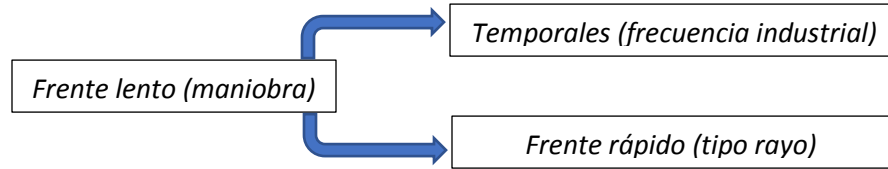
- Fase a fase $U_{rw} = U_{cw} * K_S$ (37)

5.3.5 Determinación tensiones de soportabilidad normalizadas

Primeramente, es necesario realizar la conversión de tensiones dependiendo el nivel de tensión (Gama I o Gama II):

- Gama I (superior a 1 kV e inferior o igual a 245 kV tensión nominal)

Para este nivel de tensión se convierten las tensiones de frente lento (maniobra) a tensiones de soportabilidad normalizadas temporales (frecuencia industrial) y frente rápido (tipo rayo)



Para ello se aplica los factores de conversión de ensayo (FCE) que se pueden observar en la tabla 2 “Factores de conversión de ensayo para gama I, para convertir las tensiones no disruptivas a los impulsos de maniobra, a tensiones no disruptivas a impulsos de rayo y frecuencia industrial de corta duración” de la norma NTC 3389 [6]. A partir de dicha tabla, se obtienen las siguientes formulaciones para realizar las conversiones correspondientes:

Equipos a la entrada de la línea

- **Aislamiento externo**

- Fase a tierra $SDW = U_{rw} * (FCE)$ (38)

- Fase a fase $SDW = U_{rw} * (FCE)$ (39)

Para otros equipos

- **Aislamiento externo**

- Fase a tierra $SDW = U_{rw} * (FCE)$ (40)

- Fase a fase $SDW = U_{rw} * (FCE)$ (41)

- **Aislamiento interno**

- Fase a tierra $SDW = U_{rw} * (FCE)$ (42)

- Fase a fase $SDW = U_{rw} * (FCE)$ (43)

Una vez obtenidas las tensiones temporales (frecuencia industrial) y de frente lento (tipo rayo) convertidas se seleccionan las sobretensiones de soportabilidad normalizadas con la tabla 2 “Niveles de aislamiento normalizados para la gama I” de la norma IEC 60071-1 [3].

- Gama II (superior a 245 kV tensión nominal)

Para este nivel de tensión se convierten las tensiones temporales (frecuencia industrial) a tensiones de soportabilidad normalizadas de frente lento (tipo maniobra).



Para ello se aplica los factores de conversión que se pueden observar en la tabla 3 “Factores de conversión de ensayo para gama II, para convertir las tensiones no disruptivas a frecuencia industrial de corta duración especificadas, a tensiones no disruptivas a impulsos de maniobra” de la norma NTC 3389 [6].

A partir de dicha tabla, se obtienen las siguientes formulaciones para realizar las conversiones correspondientes:

Equipos a la entrada de la línea

- **Aislamiento externo**

- Fase a tierra $LIW = U_{rw} * (FCE)$ (44)

- Fase a fase $LIW = U_{rw} * (FCE)$ (45)

Para otros equipos

- **Aislamiento externo**

- Fase a tierra $LIW = U_{rw} * (FCE)$ (46)

- Fase a fase $LIW = U_{rw} * (FCE)$ (47)

- **Aislamiento interno**

- Fase a tierra $LIW = U_{rw} * (FCE)$ (48)

- Fase a fase $LIW = U_{rw} * (FCE)$ (49)

Una vez obtenida la tensión de frente lento (maniobra) convertida se selecciona la sobretensión de soportabilidad normalizada con la tabla con la tabla 3 “Niveles de aislamiento normalizados para la gama II” de la norma IEC 60071-1 [3].

5.4 Diseño del software para la Coordinación de Aislamiento

El desarrollo del código para la coordinación de aislamiento se realiza por medio de la herramienta computacional Matlab utilizando la metodología que se analizó y describió anteriormente. Se desarrolló una interfaz en donde el usuario interactúa con una ventana que se despliega automáticamente para dar inicio a la Coordinación de Aislamiento.

Esta ventana principal da avance al siguiente paso del proyecto, la cual es implementar la metodología de manera automatizada; de este modo a través de diversas ventanas continuas se llega a un resultado final, que muestra los niveles de aislamiento normalizados y las distancias mínimas de seguridad.

En el diseño de la Interfaz se propuso la división de los segmentos de la Coordinación de Aislamiento para que el usuario conozca el avance que tiene dentro del proceso. Una vez el segmento es culminado el software permite ir a la siguiente ventana, sin embargo, este no deja retroceder de manera manual. Adicionalmente, las ventanas cuentan con un botón de ayuda que abre el manual de usuario para facilitar el proceso. Las divisiones de la Interfaz están mostradas a continuación:

5.4.1 Análisis del sistema

La ventana inicial proyecta una serie de requisitos indispensables para poder iniciar con el proceso de coordinación de aislamiento; estos requisitos son de carácter obligatorio. Una vez el software adquiere todos los datos a través del botón Listo se verifica que estén correctamente ingresados y que no haya datos faltantes. Posteriormente, se habilita el botón Continuar, el cual permite al usuario continuar al siguiente segmento y de manera automática cerrar la ventana de Análisis del Sistema.

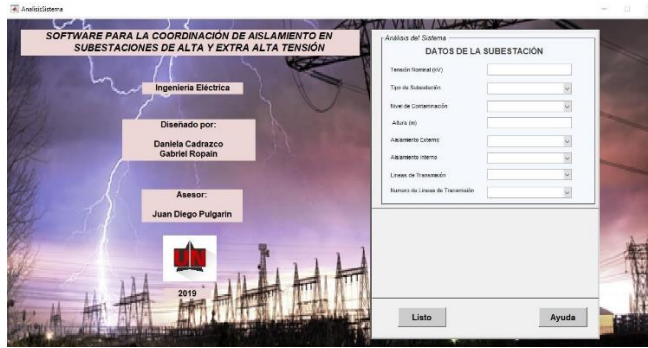


Fig 2. Software – Análisis del sistema [Fuente: Propia]

5.4.2 Sobretensiones representativas

La ventana proyecta nuevamente una serie de requisitos para poder continuar con el proceso, los cuales son requeridos para calcular las sobretensiones representativas; estos requisitos son de carácter obligatorio. Una vez el software adquiere todos los datos a través del Botón Listo se verifica que estén correctamente ingresados y que no haya datos faltantes. Posteriormente, se habilita el Botón Continuar, el cual permite pasar al siguiente segmento y de manera automática cerrar la ventana de sobretensiones representativas.

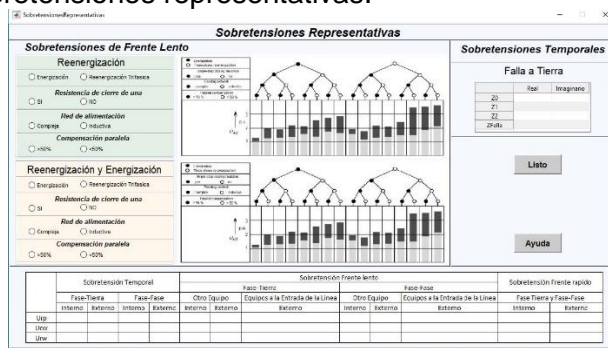


Fig 3. Software – Sobretensiones Representativas [Fuente: Propia]

5.4.3 Selección del descargador de sobretensiones

En primera instancia la ventana proyecta una tabla con información para el usuario y con respecto a esa información el usuario debe realizar la elección del DPS externamente y nuevamente proporcionar una serie de requisitos para poder continuar con el proceso.

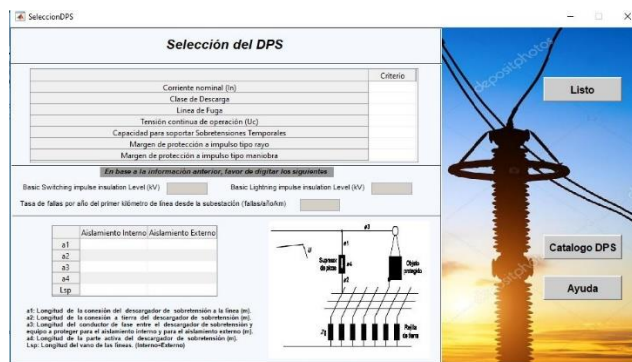


Fig 4. Software – Selección del descargador de sobretensiones [Fuente: Propia]

5.4.4 Sobretensiones de soportabilidad de coordinación

La ventana únicamente proyecta los resultados y se procede a la siguiente etapa a través del botón Continuar, ya que para los cálculos en esta etapa no es necesario ingresar datos por parte del usuario.

	Sobretensión Temporal				Sobretensión Frente lento						Sobretensión Frente rapido			
	Fase-Tierra		Fase-Fase		Otro Equipo		Equipos a la Entrada de la Línea		Otro Equipo		Equipos a la Entrada de la Línea		Fase Tierra y Fase-Fase	
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	
Usp														
Uov														
Uov														

Fig 5. Software – Tensiones soportada de coordinación [Fuente: Propia]

5.4.5 Sobretensiones de soportabilidad requeridas

La ventana únicamente proyecta los resultados y se procede a la siguiente etapa a través del botón Continuar, ya que para los cálculos en esta etapa no es necesario ingresar datos por parte del usuario.

	Sobretensión Temporal				Sobretensión Frente lento						Sobretensión Frente rapido			
	Fase-Tierra		Fase-Fase		Otro Equipo		Equipos a la Entrada de la Línea		Otro Equipo		Equipos a la Entrada de la Línea		Fase Tierra y Fase-Fase	
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	
Usp														
Uov														
Uov														

Fig 6. Software – Tensiones de soportabilidad requeridas [Fuente: Propia]

5.4.6 Sobretensiones de soportabilidad normalizadas

La ventana únicamente proyecta los resultados finales. El usuario puede obtener un informe y resumen de resultados a través del botón Resultado.

		Sin maniobra de los condensadores en la estación remota	Con maniobra de los condensadores en la estación remota
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frecuencia industrial de corta duración		
	Impulso tipo descarga atmosférica (rayo)		
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frecuencia industrial de corta duración		
	Impulso tipo descarga atmosférica (rayo)		
Distancias mínimas de seguridad Vanilla-Estructura	Equipo a la entrada línea		
	Otros equipos		
Distancias mínimas de seguridad Conductor-Estructura	Equipo a la entrada línea		
	Otros equipos		

Fig 7. Software – Tensiones de soportabilidad normalizadas [Fuente: Propia]

6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para comprobar el buen funcionamiento del software se realizaron cuatro pruebas para poder validar los resultados; de igual modo se realizó la respectiva comparación con los resultados de las pruebas y se verificó si existen diferencias entre las pruebas y los resultados arrojados por el software. Finalmente, se analizaron los resultados generales y con base a ellos se pudo concluir y hacer recomendaciones hacia un futuro.

6.1. Prueba #1: Ejemplo Numérico para un sistema en Gama I

La norma IEC 60071-2 [1] tiene como anexo (H) un ejemplo para un sistema en Gama I. El sistema analizado corresponde al presentado en la siguiente Figura. El proceso de coordinación del aislamiento se aplica a la estación 1, con el supuesto de que es una nueva subestación a diseñar.

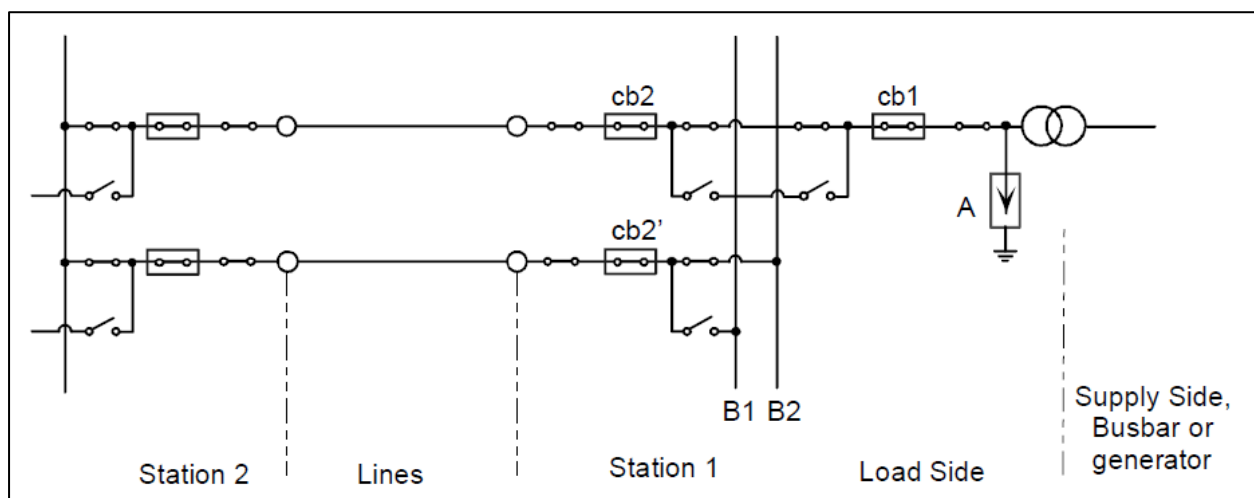


Figura 8. Ejemplo de un esquemático de subestación. [Fuente: [1]]

Para el propósito de este ejemplo, se suponen los siguientes datos:

- Tensión nominal de 230 kV
- El nivel de contaminación es Muy Fuerte
- La altitud es de 1000 m
- La línea de transmisión está conformada por un conductor sencillo
- El número de líneas de transmisión son dos (2)
- Aislamiento externo de aisladores limpios-secos
- Aislamiento interno por inmersión de un líquido

Por la forma de la subestación se da a entender que el tipo de subestación es de maniobra. Por otra parte, hay estudios adicionales que muestran los siguientes datos importantes para continuar con el desarrollo:

- Impedancias de secuencia: $R_0 = 2$, $X_0 = 0$, $R_1 = 0.5$, $X_1 = 1$.
- Reenergización desde la estación 2 con sobretensiones del 2% en el extremo remoto abierto, $U_{e2} = 3 p.u$
- Energización y reenergización en la estación 1 con sobretensiones del 2% en la línea local, $U_{e2} = 1.9 p.u$

Para controlar las posibles sobretensiones severas provenientes de reenergización remota, los

pararrayos de óxido metálico se instalan en la entrada de la línea. Las características de estos pararrayos son:

- Nivel de protección al impulso por maniobra: 410 kV
- Nivel de protección al impulso por descarga atmosférica: 500 kV
- Tasa de fallas: 0.000027 fallas/año/km
- Distancia de separación máxima para el aislamiento interno: 30 m
- Distancia de separación máxima para el aislamiento externo: 60 m
- Longitud del vano de las líneas: 300 m.

Las anteriores características y datos representativos del ejemplo dan como resultado lo siguiente:

Tabla 3. Resultados de ejemplo numérico para Gama I. [Fuente: [1]]

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frec. Industrial de corta duración	395 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	950 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frec. Industrial de corta duración	395 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	950 kV
Distancias mínimas de seguridad V-E*	Equipo a la entrada de la línea	2350 mm
	Otros equipos	1900 mm

*V-E: Varilla-Estructura

Bajo las mismas condiciones mostradas anteriormente e ingresando los datos al software en sus respectivas etapas de análisis se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4. Resultados del Software con respecto al ejemplo para Gama I. [Fuente: propia]

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frec. Industrial de corta duración	395 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	950 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frec. Industrial de corta duración	395 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	950 kV
Distancias mínimas de seguridad V-E*	Equipo a la entrada de la línea	2350 mm
	Otros equipos	1900 mm
Distancias mínimas de seguridad C-E**	Equipo a la entrada de la línea	2200 mm
	Otros equipos	1700 mm

*V-E: Varilla-Estructura

**C-E: Conductor-Estructura

6.2. Prueba #2: Ejemplo Numérico para un sistema en Gama II

La norma IEC 60071-2 [1] tiene como anexo (H) un ejemplo para un sistema en Gama II. El proceso de coordinación del aislamiento se aplica a la estación 1 más sin embargo no se especifica la forma o el tipo de subestación. Debido a que es la misma norma del ejemplo anterior se asumirá de tipo maniobra.

Para el propósito de este ejemplo, se suponen los siguientes datos:

- Tensión nominal de 735 kV
- El nivel de contaminación es Bajo
- La altitud es de 1000 m
- La línea de transmisión está conformada por cuatro conductores en haz

- El número de líneas de transmisión son dos (2)
- Aislamiento externo de aisladores limpios-secos
- Aislamiento interno por inmersión de un líquido

Por otra parte, hay estudios adicionales que muestran los siguientes datos importantes para continuar con el desarrollo:

- Impedancias de secuencia: $R_0 = 2$, $X_0 = 0$, $R_1 = 0.5$, $X_1 = 1$.
- Reenergización desde la estación 2 con sobretensiones del 2% en el extremo remoto abierto, $U_{e2} = 2 p.u$
- Energización y reenergización en la estación 1 con sobretensiones del 2% en la línea local, $U_{e2} = 2 p.u$

Para controlar las posibles sobretensiones severas provenientes de reenergización remota, los pararrayos de óxido metálico se instalan en la entrada de la línea. Las características de estos pararrayos son:

- Nivel de protección al impulso por maniobra: 1300 kV
- Nivel de protección al impulso por descarga atmosférica: 1500 kV
- Tasa de fallas: 0.000005 fallas/año/km
- Distancia de separación máxima para el aislamiento interno: 40 m
- Distancia de separación máxima para el aislamiento externo: 40 m
- Longitud del vano de las líneas: 400 m.

Las anteriores características y datos representativos del ejemplo dan como resultado lo siguiente:

Tabla 5. Resultados de ejemplo numérico para Gama II. [Fuente: [1]]

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Impulso tipo maniobra	1550 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	1950 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Impulso tipo maniobra	1550 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	2100 kV
Distancias mínimas de seguridad V-E*	Fase - Fase	9400 mm
	Fase - Tierra	6400 mm
Distancias mínimas de seguridad C-E**	Fase - Fase	7600 mm
	Fase - Tierra	4900 mm

*V-E: Varilla-Estructura
 **C-E: Conductor-Estructura

Bajo las mismas condiciones mostradas anteriormente e ingresando los datos al software en sus respectivas fases se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados del Software con respecto al ejemplo para Gama II. [Fuente: propia]

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Impulso tipo maniobra	1550 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	1950 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Impulso tipo maniobra	1550 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	2100 kV
Distancias mínimas de seguridad V-E*	Fase - Fase	9400 mm
	Fase - Tierra	6400 mm
Distancias mínimas de seguridad C-E**	Fase - Fase	7600 mm
	Fase - Tierra	4900 mm

*V-E: Varilla-Estructura
**C-E: Conductor-Estructura

6.3. Prueba #3: Estudio de Coordinación de aislamiento de Subestación de 220 kV

El documento presentado ante la empresa solicitante, propone el proyecto que consiste en el diseño de la nueva subestación de 220 kV definidas en el “Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2012-2025”, adoptado mediante Resolución del Ministerio de Minas y Energía en diciembre de 2013.

El documento tiene como objeto presentar la metodología, los datos y los resultados del estudio de coordinación de aislamiento y de selección de los descargadores de sobretensión para determinar el nivel de aislamiento de los equipos a instalar en la subestación 220 kV como parte del proyecto UPME 06-2013.

Para el estudio de Coordinación de aislamiento de la Subestación, se presentan los siguientes datos:

- Tensión nominal de 220 kV
- El nivel de contaminación es Medio
- La altitud es de 82 m
- La línea de transmisión está conformada por dos conductores en haz
- El número de líneas de transmisión son dos (2)
- Aislamiento externo de aisladores limpios-secos
- Aislamiento interno por SF6

A través del informe se especifica el tipo de subestación, la cual corresponde a una de maniobra. Por otra parte, hay estudios adicionales de la empresa diseñadora que nos arrojan los siguientes datos importantes para continuar con el desarrollo:

- Impedancias de secuencia: $R_0 = 1$, $X_0 = 0$, $R_1 = 0.5$, $X_1 = 1$.
- Reenergización desde la estación 2 con sobretensiones del 2% en el extremo remoto abierto, $U_{e2} = 2.54 p.u$
- Energización y reenergización en la estación 1 con sobretensiones del 2% en la línea local, $U_{e2} = 1.63 p.u$

Para controlar las posibles sobretensiones severas provenientes de reenergización remota, los diseñadores sugieren un pararrayos de óxido metálico que debe instalarse en la entrada de la línea. Las características de estos pararrayos son:

- Nivel de protección al impulso por maniobra: 387 kV
- Nivel de protección al impulso por descarga atmosférica: 451 kV
- Tasa de fallas: 0.00005 fallas/año/km
- Distancia de separación máxima para el aislamiento interno: 62.5 m
- Distancia de separación máxima para el aislamiento externo: 64.5 m
- Longitud del vano de las líneas: 400 m.

Las anteriores características y datos representativos del informe dan como resultado lo siguiente:

Tabla 7. Resultados del estudio de 220 kV hecho por una empresa.

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frec. Industrial de corta duración	460 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	1050 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frec. Industrial de corta duración	460 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	1050 kV

Bajo las mismas condiciones mostradas anteriormente e ingresando los datos al software en sus respectivas fases se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultados del Software. [Fuente: propia]

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frec. Industrial de corta duración	395 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	950 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frec. Industrial de corta duración	395 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	1050 kV
Distancias mínimas de seguridad V-E*	Equipo a la entrada de la línea	1900 mm
	Otros equipos	1900 mm
Distancias mínimas de seguridad C-E**	Equipo a la entrada de la línea	1700 mm
	Otros equipos	1700 mm

*V-E: Varilla-Estructura
 **C-E: Conductor-Estructura

6.4. Prueba #4: Estudio de Coordinación de aislamiento de Subestación de 115 kV

El documento presentado ante la empresa solicitante, propone verificar el nivel de aislamiento de los equipos a 115 kV correspondientes para la ampliación de las bahías de línea en la subestación.

El documento tiene como objeto verificar el cumplimiento de los niveles de tensión requeridos para los equipos de protección contra sobretensiones de las nuevas bahías de línea en la Subestación a 115 kV, presentando la metodología, los datos y los resultados del estudio de coordinación de aislamiento. Para la ampliación propuesta, se tomaron como base, los equipos existentes en la Subestación.

Para el estudio de Coordinación de aislamiento de la Subestación, se presentan los siguientes datos:

- Tensión nominal de 115 kV
- El nivel de contaminación es Medio
- La altitud es de 500 m
- La línea de transmisión está conformada por un conductor sencillo
- El número de líneas de transmisión son dos (2)
- Aislamiento externo de aisladores limpios-secos
- Aislamiento interno por inmersión de un liquido

A través del informe se especifica el tipo de subestación, la cual corresponde a una de maniobra. Por otra parte, hay estudios adicionales de la empresa diseñadora que muestran los siguientes datos importantes para continuar con el desarrollo:

- Impedancias de secuencia: $R_0 = 1$, $X_0 = 0$, $R_1 = 0.5$, $X_1 = 1$.
- Reenergización desde la estación 2 con sobretensiones del 2% en el extremo remoto abierto, $U_{e2} = 3.26 p.u$
- Energización y reenergización en la estación 1 con sobretensiones del 2% en la línea local, $U_{e2} = 2.09 p.u$

Para controlar las posibles sobretensiones severas provenientes de reenergización remota, los diseñadores sugieren un pararrayos de óxido metálico que debe instalarse en la entrada de la línea. Las características de estos pararrayos son:

- Nivel de protección al impulso por maniobra: 195 kV
- Nivel de protección al impulso por descarga atmosférica: 235 kV
- Tasa de fallas: 0.000027 fallas/año/km
- Distancia de separación máxima para el aislamiento interno: 46 m
- Distancia de separación máxima para el aislamiento externo: 56 m
- Longitud del vano de las líneas: 250 m.

Las anteriores características y datos representativos del informe dan como resultado lo siguiente:

Tabla 9. Resultados del estudio de 115 kV hecho por una empresa.

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frec. Industrial de corta duración	230 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	550 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frec. Industrial de corta duración	230 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	550 kV

Bajo las mismas condiciones mostradas anteriormente e ingresando los datos al software en sus respectivas fases se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 10. Resultados del Software. [Fuente: propia]

		Resultado
Nivel de aislamiento normalizado externo	Frec. Industrial de corta duración	230 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	550 kV
Nivel de aislamiento normalizado interno	Frec. Industrial de corta duración	230 kV
	Impulso tipo descarga atmosférica	550 kV
Distancias mínimas de seguridad V-E*	Equipo a la entrada de la línea	1100 mm
	Otros equipos	1100 mm
Distancias mínimas de seguridad C-E**	Equipo a la entrada de la línea	0 mm
	Otros equipos	0 mm

*V-E: Varilla-Estructura
 **C-E: Conductor-Estructura

6.5. Análisis de resultados

En las anteriores secciones se observaron cuatro ejemplos de coordinación de aislamiento completos, de la cual dos de los cuatro estudios de coordinación analizados eran casos reales aplicados en el territorio colombiano. Para cada uno de ellos se requirieron datos de entradas diferentes, se realizaron comparaciones para diferentes niveles de tensión de alta y extra alta tensión para observar cómo se comporta el software en cada caso.

Para el primer caso, tomado de la norma IEC 60071-2 del procedimiento de coordinación de aislamiento, los resultados obtenidos coinciden en su totalidad. Con base a los datos de entrada, el Software está adaptado para los requerimientos de la norma y su procedimiento en Gama I. Durante el procedimiento hubo leves cambios en las tensiones debido a la exactitud que maneja el software en comparación de la norma, sin embargo, al momento de normalizar y adoptar las distancias mínimas de seguridad los resultados resultaron ser exactamente iguales. Mediante un análisis más detallado se observó que el caso de estudio presentaba un procedimiento diferente con respecto a las distancias de seguridad mínimas; esto se vio reflejado debido a un valor no normalizado que conllevó a elegir una distancia diferente dentro de las estipuladas por la norma. El software logra adaptar el procedimiento para una mejor funcionalidad y se evidencia a través de los resultados obtenidos.

Para el segundo caso, tomado de la norma IEC 60071-2 del procedimiento de coordinación de aislamiento, los resultados obtenidos coinciden en su totalidad. Se observó que ocurre exactamente lo mismo que en el primer caso, es decir, el Software está adaptado para los requerimientos de la norma y su procedimiento en Gama II. Al ser unas tensiones altas, existen pocos valores normalizados y pocas distancias mínimas normalizadas por lo que resulta poco probable elegir erróneamente los valores a usar.

Para el tercer caso, el software ha desarrollado la coordinación de aislamiento con un caso existente. El estudio presentado corresponde a una subestación de 220 kV y se pudo observar que su procedimiento no fue en su totalidad guiado por lo estipulado por la norma IEC 60071 [1] [3]. Se observa que los resultados finales no son iguales entre el software y la empresa diseñadora. Por parte de la empresa los resultados normalizados fueron superiores a los obtenidos por el software, es decir que durante el proceso pudo haber algún dato mal acondicionado o un procedimiento mal efectuado, los cuales causaron sobredimensionamiento. Mientras que el software sigue lo estipulado por la norma obtiene resultados normalizados más bajos, lo que puede implicar un ahorro significativo en equipos de protección debido a las

diferencias de niveles. Adicionalmente, el estudio de coordinación realizado por la empresa no mostró o indicó las distancias mínimas a tener en cuenta para los equipos a la entrada de la línea y para otros equipos lo que puede llevar a una mala interpretación de los resultados a la empresa que requirió dicho estudio.

Para el cuarto y último caso, el software ha desarrollado la coordinación de aislamiento teniendo en cuenta un caso existente. En este caso la subestación no es nueva, se procederá a realizar una bahía de línea nueva y será igual a una ubicada en el mismo nivel de tensión de la subestación. La coordinación de aislamiento se hizo para esta nueva bahía teniendo en cuenta los mismos factores, datos y descargadores de sobretensión existentes. La coordinación de aislamiento es aplicable para todo tipo de casos (nuevas o antiguas instalaciones), por lo que el resultado obtenido por la empresa fue el mismo que se obtuvo con la otra bahía de línea. Comparando estos con los resultados obtenidos por el software se observó que cumplían con la norma y concordaban en un 100%. Sin embargo, durante el procedimiento hubo resultados diferentes que habría que mirar más en detalle con la empresa que realizó dichos cálculos. Por último, este caso existente no presento las distancias mínimas a tener en cuenta para los equipos a la entrada de la línea y para otros equipos.

El balance general del software es positivo ya que se logró el objetivo de automatizar la metodología de coordinación de aislamiento para subestaciones de alta y extra alta tensión establecida por la norma IEC 60071, así como también se ayuda a un mayor entendimiento del procedimiento de coordinación de aislamiento.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de sobretensiones es fundamental para determinar el nivel de aislamiento que se debe seleccionar para los distintos casos de un sistema, todo esto se debe realizar conociendo el comportamiento de los distintos aislamientos frente a todo tipo de sobretensiones. Evidentemente al comparar los resultados del software con los casos de estudio que se tomaron como ejemplo, se puede concluir que el software tiene un correcto funcionamiento y logra el objetivo de automatizar la metodología de coordinación de aislamiento de gama I y gama II establecida por las normas IEC 60071-1 [3] y IEC 60071-2 [1].

Claramente se da solución a una problemática que existe para la coordinación de aislamiento la cual es el tiempo que se requiere para implementar la metodología de la normativa vigente, el software permitió dar solución a esto ya que únicamente solicita al usuario las variables de entrada necesarias y los cálculos son realizados rápidamente mediante un algoritmo que adopta las formulaciones de la norma. Adicionalmente, el desarrollo del manual de usuario muestra una manera dinámica y eficiente para el usuario de comprender el procedimiento y tomar las decisiones necesarias para tener en cuenta en su diseño.

El desarrollo de este manual resultó ser una herramienta pertinente debido a que se observó durante el desarrollo de este proyecto que en algunos momentos resulta ser difícil el entendimiento de la norma, es por ello que se acudió a los aportes de distintos autores que han estudiado la metodología e incluso se acudió a los estudios de la cual la norma utiliza como referencia. Es así de esta manera que una vez más se comprueba la validez del software ya que se recurrió a distintas fuentes para tener aclaramiento de la norma.

Por otro lado, al comparar nuestra herramienta computacional con otros software desarrollados anteriormente, se puede recalcar de este proyecto que la principal ventaja es el desarrollo de la coordinación de aislamiento en subestaciones de gama II de la cual anteriormente no se había realizado su desarrollo. Esto podría deberse a la poca claridad de la normativa para este nivel de tensión.

Cabe resaltar que dentro del desarrollo del procedimiento se pudo observar que una de las ventajas de nuestra herramienta computacional es que el cálculo del factor de falla a tierra “k” se realiza tal cual como lo estipula la normativa mediante la reconstrucción de las curvas de este factor, mientras que al comparar con otros casos normalmente se utiliza aproximaciones de este factor basándose en la experiencia y en otro tipo de criterios. De igual modo al observar los resultados de los casos de estudios reales analizados se puede resaltar que estos no tienen en cuenta el uso de maniobras de condensadores. La maniobra de las corrientes inductivas o capacitivas puede dar lugar a sobretensiones que ameritan atención ya que puede generar sobretensiones particularmente peligrosas y se hace necesario usar interruptores sin recebado. Además, cuando se energizan bancos de condensadores, en particular aquellos que no cuentan con puestas a tierra, se recomienda tener cuidado para evaluar las sobretensiones entre fases.

Finalmente, se observa como el software desarrollado durante este proyecto es una herramienta más para ser utilizada por un ingeniero debido a su validez y simplicidad de uso. Se recomienda hacia un futuro adaptar recomendaciones por parte de empresas especializadas en realizar coordinación de aislamiento de subestaciones de alta y extra alta tensión.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Insulation Co-ordination - Part 2: Application Guide, IEC 60071-2, 3th ed. Geneva, Switzerland, 1996.
- [2] Surge Arresters- Part 5: Selection and Application recommendations, IEC 60099-5, ed. 1.1 Geneva, Switzerland, 2000.
- [3] Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, Principles and Rules, IEC 60071-1, 7th ed. Geneva, Switzerland, 1993.
- [4] Guide for the Application of Insulation Coordination, IEEE Std 1313.2, 1999.
- [5] Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Std 141, 1993.
- [6] Coordinación de aislamiento, NTC 3389. Guía de aplicación, Bogotá, Colombia, 1999.
- [7] HMV Ingenieros, Subestaciones de alta y extra alta tensión. Medellín, Colombia, 2003.
- [8] J. Martínez, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. España, 2007.
- [9] R. Johnson, The Elements of Matlab Style. San Diego, USA, 2011.
- [10] H. Torres, Aislamiento Eléctrico. Bogotá, Colombia, 2011.
- [11] Pozo Alarcón, D. U. "Aplicación de sistemas expertos a la coordinación de aislamiento para el diseño de subestaciones eléctricas de alto voltaje". Universidad Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [12] Aldana C., Adolfo A., Rodríguez M., Asdrúbal J. "Software para la selección de descargadores de óxido de metal en sistemas de potencia". Universidad de Carabobo, 2007.