

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica**



TESIS

**Verificación de las especificaciones del aislamiento externo de  
los equipos de patio y su protección contra STI en una SE de AT  
a alta cota**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Electricista

Elaborado por

Edwin Daniel Silva Guevara

 [0009-0000-4031-7537](https://orcid.org/0009-0000-4031-7537)

Asesor

Dr. Modesto Tomás Palma García

 [0009-0005-1371-7988](https://orcid.org/0009-0005-1371-7988)

LIMA – PERÚ

2023

---

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Citar/How to cite            | Silva Guevara [1]  |
| Referencia/Reference         | [1] E. Silva Guevara, " <i>Verificación de las especificaciones del aislamiento externo de los equipos de patio y su protección contra STI en una SE de AT a alta cota</i> " [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023. |
| Estilo/Style:<br>IEEE (2020) |  |

---

---

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Citar/How to cite              | (Silva, 2023)   |
| Referencia/Reference           | Silva, E. (2023). <i>Verificación de las especificaciones del aislamiento externo de los equipos de patio y su protección contra STI en una SE de AT a alta cota</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style:<br>APA (7ma ed.) |   |

---

**Dedicatoria:**

A mis padres (Daniel y María), y hermanos, por ser el grupo de apoyo que ha estado presente en toda mi etapa de formación profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

Al asesor Dr. Ing. Modesto Tomás Palma García por su guía, consejos y soporte en la elaboración de la presente investigación.

Al profesor Justo Yanque por su gran ayuda en orientar a un mejor desarrollo y como primer especialista revisor de la presente investigación.

A mis familiares, compañeros y amigos por sus consejos y apoyo desde mi etapa de estudiante hasta el fin de la elaboración de la tesis.

A los colaboradores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIEE-UNI) por las facilidades brindadas, en el procedimiento y en la etapa final de la tesis.

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una verificación de los datos técnicos especificados del aislamiento exterior de los equipos a intemperie de la subestación “220/138-60/10 kV” en altura. Consiste en elaborar circuitos equivalentes para simular maniobras en las subestaciones y descargas atmosféricas en la línea de transmisión, además realizar cálculos de coordinación de aislamiento acuerdo al estándar IEC 60071.

La simulación de eventos de maniobra y descargas atmosféricas en circuitos modelados, consiste en verificar que las sobretensiones producidas por: la energización de la línea de transmisión desde el extremo local con una tensión de operación de 60 kV, desde el extremo local y remoto con una tensión de operación de 138 kV y energización del transformador de potencia con una tensión de operación de 220 kV; además que las sobretensiones producidas por picos de corriente de rayo con probabilidad de ocurrencia de 5 % y 1% (de acuerdo a la fórmula de Anderson) cuyos valores son 96 kA y 182 kA, con forma de onda 1.2/50  $\mu$ s y 2/50  $\mu$ s respectivamente, no superen los valores técnicos especificados para el aislamiento externo de los equipos de 220 kV, 138 kV y 60 kV.

Los valores de las sobretensiones obtenidas en las simulaciones y cálculos, son menores a los valores de sobretensiones especificadas para el aislamiento externo de los equipos. Por ello, los datos técnicos especificados para el aislamiento exterior de los equipos a intemperie de la subestación 220/60-138/10 kV son los adecuados para la altura del proyecto.

***Palabras clave*** - Aislamiento externo, sobretensiones de impulso, evento de maniobra, descarga atmosférica, coordinación de aislamiento, datos técnicos especificados.

## ABSTRACT

In the present work a verification of the specified technical data of the external insulation of the yard equipment of the substation "220/138-60/10 kV" in height. It consists of developing equivalent circuits to simulate switching events in substations and atmospheric discharges in the transmission line, as well as performing insulation coordination calculations according to the IEC 60071 standard.

The simulation of events and atmospheric discharges in modeled circuits consists of verifying that the overvoltages produced by: the energization of the transmission line from the local end with an operating voltage of 60 kV, from the local and remote end with an operating voltage of 138 kV and energization of the power transformer with an operating voltage of 220 kV; In addition, the overvoltages produced by lightning current peaks with a probability of occurrences of 5% and 1% (according to Anderson's formula) whose values are 96 kA and 182 kA, with a waveform of 1.2/50  $\mu$ s and 2/ 50  $\mu$ s respectively, do not exceed the technical values specified for the external insulation of 60 kV, 138 kV and 220 kV equipment, respectively.

The overvoltage values obtained in the simulations and calculations are lower than the overvoltage values specified for the external isolation of the equipment. Therefore, the technical data specified for the external insulation of the yard equipment of the 220 / 60-138 / 10 kV substation are adequate for the height of the project.

**Keywords** - External insulation, impulse surges, switching event, lightning discharge, insulation coordination, specified technical data.

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PRÓLOGO .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1. CAPÍTULO I.....</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                     | <b>3</b>  |
| 1.1. Planteamiento del Problema .....                        | 3         |
| 1.2. Justificación de la Investigación .....                 | 4         |
| 1.3. Objetivos .....   | 4         |
| 1.3.1. Objetivo General.....                                 | 4         |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                           | 4         |
| 1.4. Hipótesis .....   | 5         |
| 1.4.1. Hipótesis General .....                               | 5         |
| 1.4.2. Hipótesis Específicas .....                           | 5         |
| 1.5. Estado del Arte .....                                   | 5         |
| 1.6. Metodología .....                                       | 9         |
| <b>2. CAPÍTULO II.....</b>                                   | <b>10</b> |
| <b>MARCO TEÓRICO.....</b>                                    | <b>10</b> |
| 2.1. Introducción .....                                      | 10        |
| 2.2. Equipamiento de Subestaciones.....                      | 11        |
| 2.2.1. Transformador de Potencia.....                        | 11        |
| 2.2.2. Interruptor de Potencia .....                         | 11        |
| 2.2.3. Seccionador .....                                     | 11        |
| 2.2.4. Transformadores Tensión .....                         | 11        |
| 2.2.5. Transformador de Corriente .....                      | 12        |
| 2.2.6. Pararrayos .....                                      | 12        |
| 2.3. Ondas Viajeras .....                                    | 12        |
| 2.3.1. Ecuación de Onda .....                                | 12        |
| 2.3.2. Reflexión y refracción de ondas viajeras .....        | 15        |
| 2.4. Sobretensiones de Maniobra.....                         | 17        |
| 2.4.1. Energización y recierre de Líneas de Transmisión..... | 18        |
| 2.4.2. Maniobras de corrientes inductivas y capacitivas..... | 18        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.5.      | Sobretensiones por impulso de rayo.....   | 22        |
| 2.5.1.    | El Rayo .....   | 23        |
| 2.5.2.    | Probabilidad de las amplitudes en kiloamperios de las corrientes de rayo.....   | 24        |
| 2.5.3.    | Distribución de la Tasa de Crecimiento del Frente de Onda.....  | 25        |
| 2.5.4.    | Forma de Onda de las Sobretensiones .....   | 25        |
| 2.5.5.    | Impacto de Rayos en Líneas de Transmisión.....  | 26        |
| 2.5.6.    | Contorneo Directo y Contorneo Inverso.....  | 30        |
| <b>3.</b> | <b>CAPÍTULO III.....</b>  | <b>32</b> |
|           | <b>MODELADO DE COMPONENTES .....</b>  | <b>32</b> |
| 3.1.      | Introducción .....  | 32        |
| 3.2.      | Modelado de componentes principales de líneas de transmisión.....   | 33        |
| 3.2.1.    | Modelado del conductor de la Línea de Transmisión .....   | 33        |
| 3.2.2.    | Modelado de Torre de Celosía.....   | 34        |
| 3.2.3.    | Modelado del sistema de puesta a tierra .....   | 39        |
| 3.2.4.    | Modelado del aislamiento de una Línea de Transmisión .....  | 41        |
| 3.3.      | Modelado de los componentes principales de subestaciones .....  | 43        |
| 3.3.1.    | Modelado de la puesta a tierra .....  | 43        |
| 3.3.2.    | Modelado del pararrayos.....  | 43        |
| 3.3.3.    | Modelado del Transformador de Potencia en Alta Frecuencia .....   | 49        |
| <b>4.</b> | <b>CAPÍTULO IV .....</b>  | <b>52</b> |
|           | <b>SIMULACIONES .....</b>   | <b>52</b> |
| 4.1.      | Introducción .....  | 52        |
| 4.1.1.    | Planos y Diagramas de la Subestación 220/60-138/10 kV .....   | 54        |
| 4.2.      | Simulaciones a Impulso de Maniobra .....  | 58        |
| 4.2.1.    | Energización y Re-energización de la Línea de Transmisión en Vacío – 60 kV ..   | 58        |
| 4.2.2.    | Energización y Re-energización de la Línea de Transmisión en Vacío – 138 kV   | 63        |
| 4.2.3.    | Energización y Re-energización del transformador de potencia y de la Línea de Transmisión conectados, en Vacío – 220 kV. .... | 66        |
| 4.3.      | Simulaciones a Impulso de Rayo .....  | 68        |
| 4.3.1.    | Análisis del sistema en 60 kV.....  | 68        |
| 4.3.2.    | Análisis del sistema en 138 kV.....   | 82        |
| 4.3.3.    | Análisis del sistema en 220 kV.....   | 86        |
| <b>5.</b> | <b>CAPÍTULO V .....</b>   | <b>87</b> |
|           | <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>   | <b>87</b> |
| 5.1.      | Análisis de resultados de simulaciones de sobretensiones por impulsos de maniobra.....  | 87        |
| 5.2.      | Análisis de resultados de sobretensiones por impulsos de rayo.....  | 88        |
| 5.3.      | Datos Técnicos de Aislamiento seleccionado de los Equipos.....  | 90        |
|           | <b>CONCLUSIONES.....</b>  | <b>93</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                             | <b>94</b>  |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>97</b>  |
| <b>ANEXO A: CÁLCULO DE SELECCIÓN DE PARARRAYOS .....</b>            | <b>97</b>  |
| A.1. Pararrayos en 60 kV, 138 kV y 220 kV .....                     | 97         |
| <b>ANEXO B: CÁLCULO DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO.....</b>      | <b>102</b> |
| B.1 Aislamiento en 60 kV .....                                      | 102        |
| B.2 Aislamiento 138 kV .....  | 108        |
| B.3 Aislamiento en 220 kV .....                                     | 113        |
| <b>ANEXO C: VALORES DE AISLAMIENTO NORMALIZADO (IEC 60071).....</b> | <b>118</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>TABLA N° 3.1</b> Comportamiento del Pararrayos frente a Transitorios .....                              | 45 |
| <b>TABLA N° 3.2</b> Valores Típicos de $A_0$ y $A_1$ .....   | 48 |
| <b>TABLA N° 4.1</b> Valores de impedancia del Transformador de Tensión en 60 kV.....                       | 59 |
| <b>TABLA N° 4.2</b> Tabla de Datos Propios de las Torres de la Línea de Transmisión.....                   | 60 |
| <b>TABLA N° 4.3</b> Valores de impedancia del Transformador de Tensión en 138 kV (TT138-1 y TT138-2) ..... | 64 |
| <b>TABLA N° 4.4</b> Características Principales en alta frecuencia del Conductor .....                     | 71 |
| <b>TABLA N° 4.5</b> Valores de Impedancia de la torre de Transmisión Típica .....                          | 72 |
| <b>TABLA N° 4.6</b> Valores característicos de un contrapeso .....   | 72 |
| <b>TABLA N° 5.1</b> Resumen de resultados de las simulaciones .....  | 89 |
| <b>TABLA N° 5.2</b> Valores máximos de sobretensiones de simulaciones cálculos.....                        | 90 |
| <b>TABLA N° 5.3</b> Características Principales de los Pararrayos en 60 kV, 138 kV y 220 kV90              |    |
| <b>TABLA N° 5.4</b> Características del aislamiento externo de los equipos en Patio .....                  | 91 |
| <b>TABLA N° 5.5</b> Recorte de la tabla 2 del estándar IEC 60071-1 .....                                   | 92 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig. 2.1</b> Pequeño Elemento de una Línea de Transmisión .....  | 13 |
| <b>Fig. 2.2</b> Función $f_1(x - vt)$ para en dos instantes de tiempo .....   | 15 |
| <b>Fig. 2.3</b> Varias combinaciones de ondas de corriente y tensión .....  | 15 |
| <b>Fig. 2.4</b> Ondas de Tensión y Corriente reflejadas y refractadas en una unión de dos líneas con diferente impedancia. .... | 16 |
| <b>Fig. 2.5</b> Forma de Onda Estandarizada de la Sobretensión de Maniobra .....  | 17 |
| <b>Fig. 2.6</b> Circuito RL .....   | 19 |
| <b>Fig. 2.7</b> Falla en un circuito LC .....   | 21 |
| <b>Fig. 2.8</b> Electrificación de la Nube .....  | 24 |
| <b>Fig. 2.9</b> Forma de Onda de la Sobretensión de Rayo Estandarizada .....  | 26 |
| <b>Fig. 2.10</b> Impacto del rayo en la estructura .....  | 27 |
| <b>Fig. 2.11</b> Impacto del Rayo en el Conductor .....   | 28 |
| <b>Fig. 2.12</b> Contorneo en la Cadena de Aisladores ( $U_R > U_{BIL}$ ).....  | 28 |
| <b>Fig. 2.13</b> Cadena de Aisladores Sin Contorneo ( $U_R < U_{BIL}$ ).....  | 29 |
| <b>Fig. 2.14</b> Impacto de rayo en medio vano del cable de guarda .....  | 30 |
| <b>Fig. 2.15</b> Contorneo Inverso .....  | 31 |
| <b>Fig. 3.1</b> Representación Diferencial del Conductor Aéreo .....  | 33 |
| <b>Fig. 3.2</b> Torre Modelo Cilíndrico .....   | 35 |
| <b>Fig. 3.3</b> Torre Modelo Cónico .....   | 36 |
| <b>Fig. 3.4</b> Modelo de Torre Multiconductor .....  | 37 |
| <b>Fig. 3.5</b> Modelo multipisos de una torre de transmisión.....  | 39 |
| <b>Fig. 3.6</b> Geometría para el cálculo del radio equivalente.....  | 39 |
| <b>Fig. 3.7</b> Circuito Equivalente de un Contrapeso para Altas Frecuencias .....  | 40 |
| <b>Fig. 3.8</b> Circuito equivalente de un sistema de puesta a tierra .....   | 41 |
| <b>Fig. 3.9</b> Circuito Equivalente de Una Cadena de Aisladores .....  | 42 |
| <b>Fig. 3.10</b> Curva (Tensión vs Tiempo) de una Cadena de Aisladores .....  | 42 |
| <b>Fig. 3.11</b> Curva V-I del Pararrayos .....   | 44 |
| <b>Fig. 3.12</b> Representación de un Circuito de un Pararrayos con el Modelo CIGRÉ.....  | 46 |
| <b>Fig. 3.13</b> Circuito Reducido del Pararrayos con el modelo CIGRÉ .....   | 46 |
| <b>Fig. 3.14</b> Circuito Equivalente de un Pararrayos con el Modelo IEEE.....  | 47 |
| <b>Fig. 3.15</b> Curva $A_0$ y $A_1$ .....  | 48 |
| <b>Fig. 3.16</b> Distribución del Impulso de Tensión .....  | 50 |
| <b>Fig. 3.17</b> Circuito Equivalente en Por Unidad del Transformador de Potencia .....   | 50 |
| <b>Fig. 4.1</b> Diagrama Unifilar de la subestación 220/60-138/10 kV en análisis .....  | 55 |
| <b>Fig. 4.2</b> Vista de Planta de la subestación 220/60-138/10 kV en análisis.....   | 56 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 4.3</b> Vista de Corte de la subestación 220/60-138/10 kV en análisis .....  | 57 |
| <b>Fig. 4.4</b> Circuito Equivalente para el Análisis de Sobretensiones de Maniobra en 60 kV.  | 58 |
| <b>Fig. 4.5</b> Curva V-I, Pararrayos PR60-1 y PR60-2 .....  | 59 |
| <b>Fig. 4.6</b> Modelo de la Línea de Transmisión .....  | 60 |
| <b>Fig. 4.7</b> Datos principales del transformador de potencia en operación 220/60/10 kV –<br>Modelo BCTRAN .....   | 61 |
| <b>Fig. 4.8</b> Tiempos de Maniobra .....  | 62 |
| <b>Fig. 4.9</b> Sobretensiones en los bornes del TT60-1, por energización y re-energización<br>local de la L.T. ....   | 62 |
| <b>Fig. 4.10</b> Circuito Equivalente para las sobretensiones de Maniobra en 138 kV .....  | 63 |
| <b>Fig. 4.11</b> Curva V-I de los Pararrayos en 138 kV (PR138-1 y PR138-2) .....   | 64 |
| <b>Fig. 4.12</b> Sobretensión de Maniobra Remota en los Equipos de 138 kV de la Subestación<br>Local .....   | 65 |
| <b>Fig. 4.13</b> Sobretensión de Maniobra local en los Equipos de 138 kV de la Subestación<br>Local .....  | 66 |
| <b>Fig. 4.14</b> Curva V-I del Pararrayos en 220 kV.....   | 67 |
| <b>Fig. 4.15</b> Circuito de energización del Transformador de Potencia y Línea de Transmisión<br>.....  | 67 |
| <b>Fig. 4.16</b> Sobretensiones en el devanado de 220 kV del Transformador de Potencia,<br>debido a la energización del mismo.....                                       | 68 |
| <b>Fig. 4.17</b> Circuito de Simulación Para Impulsos de Rayo .....  | 70 |
| <b>Fig. 4.18</b> Torre de Transmisión Típica.....  | 71 |
| <b>Fig. 4.19</b> Circuito equivalente de Un contrapeso .....   | 72 |
| <b>Fig. 4.20</b> Corriente de Rayo de 96 kA con forma de onda estándar 1.2/50 uS.....  | 73 |
| <b>Fig. 4.21</b> Sobretensión en la punta de la estructura por impacto de una corriente de 96 kA<br>(1.2/50 uS).....   | 74 |
| <b>Fig. 4.22</b> Sobretensiones en fases de la tercera torre (T3) debido a sobretensión por<br>impulso de rayo de 96 kA.....   | 74 |
| <b>Fig. 4.23</b> Comportamiento de la sobretensión de rayo a mientras viaja por la línea de<br>transmisión .....   | 75 |
| <b>Fig. 4.24</b> Tensión Residual en el Pararrayos de Línea y Tensión en el Transformador de<br>tensión .....  | 75 |
| <b>Fig. 4.25</b> Corriente de Rayo de 182 kA con forma de onda estándar 2/50 uS.....   | 76 |
| <b>Fig. 4.26</b> Sobretensión en la punta de la estructura por impacto de una corriente de 182<br>kA (2/50 uS).....  | 76 |
| <b>Fig. 4.27</b> Sobretensiones en las fases de la tercera torre (T3) debido a sobretensión por<br>impulso de rayo de 182 kA.....  | 77 |
| <b>Fig. 4.28</b> Comportamiento de la sobretensión de rayo mientras viaja por la línea de<br>transmisión .....   | 77 |
| <b>Fig. 4.29</b> Tensión Residual en el Pararrayos de Línea y Transformador de tensión .....   | 78 |
| <b>Fig. 4.30</b> Impulso de Rayo en el Cable de Guarda .....   | 78 |
| <b>Fig. 4.31</b> Sobretensión en el Cable de Guarda por efecto del impacto de una corriente de<br>rayo de 96 kA (1.2/50 uS) .....  | 79 |
| <b>Fig. 4.32</b> Sobretensión en el cable de guarda y sobretensiones inducidas en las fases..  | 79 |
| <b>Fig. 4.33</b> Sobretensiones en las fases a medida que viajan a través de la línea de<br>transmisión .....  | 80 |
| <b>Fig. 4.34</b> Tensión residual en el pararrayos de línea y Transformador de tensión .....   | 80 |
| <b>Fig. 4.35</b> Circuito de Análisis del impacto de rayo de 20 kA (1.2/50 uS) en el conductor.  | 81 |
| <b>Fig. 4.36</b> Sobretensión en la Fase A por impacto de un impulso de rayo de 20 kA (1.2/50<br>uS) en el conductor y sobretensiones inducidas en las otras fases. .... | 81 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 4.37</b> Comportamiento de las sobretensiones a medida que viajan hacia la subestación por impacto de una corriente de rayo de 20 kA (1.2/50 $\mu$ S) en la fase A.....                        | 82 |
| <b>Fig. 4.38</b> Tensión Residual en el Pararrayos y transformador de tensión de la bahía de Línea de 60kV.....  | 82 |
| <b>Fig. 4.39</b> Tensión residual en el pararrayos y transformador de tensión de la bahía de línea a la entrada de la subestación por impacto de una corriente de rayo de 96 kA (1.2/50 $\mu$ S).....  | 83 |
| <b>Fig. 4.40</b> Tensión residual en el pararrayos y transformador de tensión de la bahía de línea a la entrada de la subestación por impacto de una corriente de rayo de 182 kA (2/50 $\mu$ S) .....  | 84 |
| <b>Fig. 4.41</b> Tensión Residual en el pararrayos y transformador de tensión de la bahía de línea de la subestación, debido a un impulso de rayo de 96 kA (1.2/50 $\mu$ S) en el cable de guarda..... | 85 |
| <b>Fig. 4.42</b> Tensión residual en el pararrayos y transformador de tensión de 138 kV, por impacto de una corriente de 20 kA (1.2/50 $\mu$ S) en el conductor .....                                  | 85 |

# GLOSARIO DE TÉRMINOS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

## TÉRMINOS

**Coordinación de Aislamiento:** Selección de la resistencia dieléctrica del equipo en relación con las tensiones de funcionamiento y las sobretensiones que pueden aparecer en el sistema para el que está previsto el equipo y teniendo en cuenta el ambiente de servicio y las características de los dispositivos de prevención y protección disponibles.

**Aislamiento Externo:** Las distancias en el aire atmosférico y las superficies en contacto con el aire atmosférico de aislamiento sólido de los equipos que están sujetos a tensiones dieléctricas y los efectos de las condiciones atmosféricas y otras condiciones ambientales del sitio, tales como la contaminación, la humedad, los parásitos, etc.

**Aislamiento Interno:** Las distancias internas del aislamiento sólido, líquido o gaseoso de los equipos protegidos de los efectos de las condiciones atmosféricas y otras condiciones externas.

**Tensión nominal de un sistema, Un:** Valor aproximado adecuado de la tensión utilizada para designar o identificar un sistema.

**Voltaje más alto de un sistema, Us:** El valor más alto de la tensión de funcionamiento de fase a fase (valor r.m.s.) que se produce en condiciones normales de funcionamiento en cualquier momento y en cualquier punto del sistema.

**Voltaje más alto para equipos, Um:** El valor más alto de la tensión fase a fase (valor r.m.s.) para el que el equipo está diseñado con respecto a su aislamiento, así como otras características que se relacionan con esta tensión en las Normas de equipo pertinentes. En condiciones de servicio normales especificadas por el comité de aparatos correspondiente, este voltaje se puede aplicar continuamente al equipo.

**Sistema neutro conectado a tierra:** Sistema (s) cuyo punto (s) neutro (s) esté (n) conectado directamente a tierra.

**Impedancia de puesta a tierra (neutro):** Sistema cuyo punto (s) neutro (s) está (n) conectado (s) a tierra a través de impedancias para limitar las corrientes de falla a tierra

**Factor de falla a tierra, K:** En una localización dada de un sistema trifásico, y para una configuración dada del sistema, la relación de los  $r_m$  más altos. Voltaje de frecuencia de potencia de fase a tierra en una fase sana durante un fallo a tierra que afecta una o más fases en cualquier punto del sistema a la r.m.s. Tensión de frecuencia de potencia de fase a tierra que se obtendría en el emplazamiento dado en ausencia de tal falla.

**Sobretensión:** Cualquier tensión entre un conductor de fase y tierra o a través de un aislamiento longitudinal que tiene un valor máximo que supera el pico del voltaje más alto del sistema dividido por  $\sqrt{3}$  o entre conductores de fase que tienen un valor máximo que supera la amplitud de la tensión más alta del sistema.

**Tensión continua (frecuencia industrial):** Tensión de frecuencia industrial, considerado que tiene un valor eficaz constante. Aplicado continuamente a cualquier par de terminales de una configuración de aislamiento.

**Sobretensión temporal, TOV:** Sobretensión de frecuencia industrial de duración relativamente larga.

**Sobretensión transitoria:** Sobretensión de corta duración de pocos milisegundos o menos, oscilatoria o no oscilatoria, generalmente muy amortiguada.

**Sobretensión de frente lento SFO:** Sobretensión transitoria, usualmente unidireccional, con tiempo para alcanzar el pico de entre  $20 \mu s < T_p \leq 5\ 000 \mu s$ , y la duración de la cola  $T_2 \leq 20\ ms$ .

**Sobretensión de frente rápido FFO:** Sobretensión transitoria, usualmente unidireccional, con tiempo para alcanzar el pico de entre  $0,1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$ , y duración de la cola  $T_2 < 300 \mu s$ .

**Sobretensión de muy rápido frente VFFO:** Sobretensión transitoria, usualmente unidireccional con tiempo hasta pico  $T_f \leq 0,1 \mu s$ , y con o sin oscilaciones superpuestas a la frecuencia  $30\ kHz < f < 100\ MHz$ .

**Tensión de frecuencia industrial estándar de corta duración:** Voltaje sinusoidal con frecuencia entre 48 Hz y 62 Hz, y duración de 60 s.

**Impulso de maniobra estándar:** Voltaje de impulso que tiene un tiempo hasta el pico de 250  $\mu$ s y un tiempo a mitad de valor de 2 500  $\mu$ s.

**Impulso de rayo estándar:** Voltaje de impulso con un tiempo de frente de 1,2  $\mu$ s y un valor de tiempo a mitad del valor máximo de 50  $\mu$ s.

**Sobretensiones representativas, U<sub>rp</sub>:** Sobretensiones asumidas para producir el mismo efecto dieléctrico sobre el aislamiento que las sobretensiones de una clase dada que ocurren en servicio debido a varios orígenes. Consisten en voltajes con la forma estándar de la clase, y pueden ser definidos por un Valor o un conjunto de valores o una distribución de frecuencias de valores que caracterizan las condiciones de servicio.

**Nivel de protección contra los rayos [o conmutación], U<sub>pl</sub> [u U<sub>ps</sub>]:** Valor máximo de tensión pico máximo admisible en los bornes de un dispositivo de protección (pararrayos) sometido a impulsos de rayo (U<sub>pl</sub>= lightning impulse protection level) o maniobra (U<sub>ps</sub>= switching impulse protection level) en condiciones específicas.

**Tensión soportada:** Valor de la tensión de prueba a aplicar en condiciones especificadas en una prueba de tensión de resistencia, durante la cual se tolera un número especificado de descargas disruptivas. El voltaje de resistencia se designa como:

A) voltaje soportado asumido convencional, cuando el número de descargas disruptivas

Tolerada es cero. Se considera que corresponde a una probabilidad de resistencia P<sub>w</sub> = 100%;

B) voltaje de resistencia estadística, cuando el número de descargas perturbadoras toleradas está relacionado con una probabilidad de resistencia especificada. En esta norma, la probabilidad especificada es P<sub>w</sub> = 90%.

NOTA En esta norma, para aislamiento no auto-restaurador se especifican tensiones soportadas convencionales, y para aislamiento auto-restaurador se especifican voltajes estadísticos soportados.

**Tensión de coordinación, U<sub>cw</sub>:** Para cada clase de tensión, el valor de la tensión de resistencia de la configuración de aislamiento en condiciones reales de servicio, que cumpla el criterio de rendimiento.

**Factor de coordinación, K<sub>c</sub>:** Factor por el cual se debe multiplicar el valor de la sobretensión representativa para obtener el valor de la tensión de resistencia de coordinación.

**Tensión de resistencia requerida,  $U_{rw}$ :** Tensión de prueba que el aislamiento debe soportar en una prueba estándar de tensión de resistencia para asegurar que el aislamiento cumplirá el criterio de rendimiento cuando se somete a una clase dada de sobretensiones en las condiciones reales de servicio y durante toda la duración del servicio. El voltaje de resistencia requerido tiene la forma de la tensión de resistencia de coordinación, y se especifica con referencia a todas las condiciones de la prueba de voltaje de resistencia estándar seleccionada para verificarlo.

**Factor de corrección atmosférica,  $K_t$ :** Factor que debe aplicarse a la tensión de resistencia de coordinación para tener en cuenta la diferencia en la resistencia dieléctrica entre las condiciones atmosféricas medias en servicio y las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas.

Se aplica sólo al aislamiento externo, para cualquier altitud.

NOTA 1 El factor  $K_t$  permite la corrección de las tensiones de ensayo teniendo en cuenta la diferencia entre las condiciones atmosféricas reales durante el ensayo y las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas. Para el factor  $K_t$ , las condiciones atmosféricas consideradas son presión de aire, temperatura y humedad.

NOTA 2 Para fines de coordinación del aislamiento, normalmente sólo se debe tener en cuenta la corrección de la presión de aire.

**Factor de corrección de altura,  $K_a$ :** Factor a aplicar a la tensión de resistencia de la coordinación para tener en cuenta la diferencia en la resistencia dieléctrica entre la presión media correspondiente a la altitud en servicio y la presión de referencia estándar.

NOTA El factor de corrección de altitud  $K_a$  es parte del factor de corrección atmosférica  $K_t$ .

**Factor de seguridad,  $K_s$ :** El factor global a aplicar a la tensión de resistencia de coordinación, después de la aplicación del factor de corrección atmosférica (si se requiere), para obtener la tensión de resistencia requerida, teniendo en cuenta todas las demás diferencias en la rigidez dieléctrica entre las condiciones en servicio durante la vida útil y los de la prueba de tensión estándar.

**Tensión de Resistencia Real de un equipo o configuración de aislamiento,  $U_{aw}$ :** El valor más alto posible de la tensión de prueba que se puede aplicar a un equipo o configuración de aislamiento en una prueba de tensión estándar.

**Tensión soportada nominal:** Valor de la tensión de prueba, aplicada en una prueba estándar de tensión soportada que comprueba que el aislamiento cumple con uno o más voltajes de resistencia requeridos. Es un valor nominal del aislamiento de un equipo.

**Tensión estándar soportada nominal,  $U_w$ :** Valor estándar de la tensión de resistencia nominal especificada en esta norma.

**Nivel de aislamiento nominal:** Conjunto de voltajes soportes nominales que caracterizan la resistencia dieléctrica de aislamiento.

**Nivel de aislamiento estándar:** Conjunto de voltajes estándar soportados nominales que están asociados a  $U_m$  como se especifica en esta norma.

## ABREVIATURAS

|       |  |
|-------|--|
| ATP   | Alternative Transients Program.  |
| EMTP  | Electro-Magnetic Transients Program.                                   |
| BIL   | Basic Lightning Impulse Insulation Level.                              |
| BSL   | Basic Switching Impulse Insulation Level.                              |
| CFO   | Critical Flashover Voltage.  |
| MCOV  | Maximum Continuous Over Voltage.                                       |
| MOV   | Varistor de Óxido Metálico.  |
| NBA   | Nivel Básico de Aislamiento.   |
| VCF   | Tensión Crítica de Contorneo.  |
| STI   | Sobretensión de Impulso.   |
| STM   | Sobretensión de Maniobra.  |
| STR   | Sobretensión de Rayo.  |
| ZnO   | Óxido de Zinc.   |
| CIGRE | Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas en Alta Tensión. |
| IEC   | International Electrotechnical Commission.                             |
| IEEE  | Institute of Electrical and Electronics Engineers.                     |
| COES  | Comité de Operación Económica del Sistema.                             |
| SINAC | Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.                             |
| NTCSE | Norma Técnica de Calidad de Los Servicios Eléctricos.                  |

## SÍMBOLOS

|    |            |
|----|------------|
| V  | Volt.      |
| kV | kilovolt.  |
| MV | Megavolt.  |
| A  | Amper.     |
| kA | Kiloamper. |
| m  | metro.     |
| km | kilómetro. |
| S  | Segundo.   |

# PRÓLOGO

El presente trabajo de grado, titulado “**VERIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DEL AISLAMIENTO EXTERNO DE LOS EQUIPOS DE PATIO Y SU PROTECCIÓN CONTRA STI EN UNA SE DE AT A ALTA COTA**”, tiene como propósito verificar que los datos técnicos especificados del aislamiento exterior de los equipos de patio tipo AIS (air insulated system) de la subestación 220/60-138/10 kV sean los adecuados para la altitud de la instalación. Para ello, se modelan los componentes de líneas de transmisión y subestaciones que permitan elaborar circuitos de simulación con el software ATPDraw (Alternative Transientes Program) y analizar posibles eventos que pueden ocurrir en el sistema, además, se realizan cálculos de coordinación de aislamiento con base al estándar IEC 60071 para comprobar que con ningún evento de simulación y/o cálculos se genere en los equipos de la subestación sobretensiones con magnitudes mayores a los valores especificados.

## **Estructuración de la Tesis**

Capítulo I, titulado “Introducción”, plantea el problema, muestra la justificación de la investigación, describe los objetivos, hipótesis, el estado del arte, los alcances y el método empleado.

Capítulo II, titulado “Marco teórico”, desarrolla el marco teórico relacionado a sobretensiones de impulso de maniobra, sobretensiones de impulso de rayo y literatura asociada, para mostrar el comportamiento de las ondas de impulso en los sistemas de potencia.

Capítulo III, titulado “Modelado de componentes”, desarrolla el modelado en alta frecuencia de los equipos principales de patio de la subestación en estudio y el modelado de los componentes de la línea de transmisión asociada.

Capítulo IV, titulado “Simulaciones”, muestra la construcción de los diferentes circuitos de simulación con el software ATPDraw, la simulación de eventos para cada caso y los resultados gráficos de las sobretensiones de impulso.

Capítulo V, titulado “Análisis de resultados”, muestra los máximos valores de sobretensiones obtenidos de cada caso de simulación corregidos para la latitud de la instalación, se compara con las mayores sobretensiones obtenidas en el cálculo que se muestran en el anexo B y se verifica si son menores o iguales a los datos especificados del aislamiento exterior de los equipos de patio de la subestación.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Planteamiento del Problema**

El problema de ingeniería que se plantea en la investigación, consiste en la necesidad de verificar si los datos técnicos especificados para el aislamiento externo de los equipos de patio a suministrar para la subestación 220/60-138/10 kV, son los adecuados para la altitud de la instalación (3700 msnm). Por ello, se hace el análisis de sobretensiones a impulso, implementando circuitos de simulación con componentes modelados de subestaciones y líneas de transmisión, y además cálculos para seleccionar pararrayos y aislamiento coordinado de los equipos.

El modelado de los componentes de sistemas de potencia para implementar circuitos de simulación se hará tomando en consideración las referencias [1] y [2]. Se implementarán circuitos para impulsos de maniobra y circuitos para impulsos de rayo. Se energizará la línea de transmisión en vacío y eventos de maniobra durante el transitorio. En el caso de impulsos de rayo, se analizará cuando éstos caen en: la punta de la tercera estructura más cercana a la subestación, en el cable de guarda y conductor a medio vano entre la tercera y cuarta estructura.

La verificación de los datos técnicos especificados de pararrayos, se hará a través del cálculo de selección de pararrayos, haciendo uso de los estándares IEC que se muestran en las referencias [3] y [4]. Mientras que la verificación de las especificaciones de aislamiento externo de los otros equipos de patio (Transformadores de Tensión, Seccionadores, Interruptores de Potencia, Transformadores de Corriente y Transformador de Potencia) se hará a través del cálculo de coordinación de aislamiento, de acuerdo con los estándares IEC [5] y [6].

## **1.2. Justificación de la Investigación**

Los proyectos de alta tensión, son previamente aprobados por el Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES - SINAC), para evitar problemas de diseño que puedan dificultar la operación del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), por tanto, se deben de verificar que los equipos seleccionados sean capaces de soportar con normalidad cualquier perturbación que puedan ocurrir en el sistema [7]. Esto es para los casos de sobretensiones a frecuencia industrial, de maniobra y sobretensiones por impulso de rayo. Además de acuerdo a su sistema de protección, evitar que estas sobretensiones impacten en los equipos y ocasionen fallas o daños al sistema eléctrico.

Entonces es necesario evaluar las sobretensiones en los sistemas de potencia y en especial para el caso, las sobretensiones que se puedan producir en la Subestación 220/60-138/10 kV con el fin de analizar sus efectos y evitar que causen daños permanentes en cualesquiera de los equipos del patio de la subestación en estudio y haga que salga de servicio y/o su reposición sea duradera.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Comprobar que la especificación del aislamiento de los equipos de patio a instalar en la Subestación en altura 220/60-138/10 kV, sean los adecuados y que soporten con normalidad sobretensiones a impulso de maniobra y sobretensión por impulso de rayo que eventualmente ocurran en el sistema.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Analizar la STI a través de cálculos y simulación de eventos, para verificar si los datos técnicos especificados del aislamiento externo de los equipos de patio de 220 kV, son los adecuados para la altitud de la subestación.
- Analizar la STI a través de cálculos y simulación de eventos, para verificar si los datos técnicos especificados del aislamiento externo de los equipos de patio de 138 kV, son los adecuados para la altitud de la subestación.
- Analizar la STI a través de cálculos y simulación de eventos, para verificar si los datos técnicos especificados del aislamiento externo de los equipos de patio de 60 kV, son los adecuados para la altitud de la subestación.

## **1.4. Hipótesis**

### **1.4.1. Hipótesis General**

Con la adecuada especificación del aislamiento externo de los equipos de patio de la subestación a gran altitud 220/60-138/10 kV y con la verificación con cálculos y simulación de eventos, los equipos tendrán una baja probabilidad de falla debido a las sobretensiones de Maniobra y sobretensiones de impulso de Rayo que eventualmente ocurran en el sistema.

### **1.4.2. Hipótesis Específicas**

- El análisis de STI a través de cálculos y simulación de eventos, permitirá verificar si los datos técnicos especificados del aislamiento externo de los equipos de patio de 220 kV, son los adecuados para la altitud de la subestación.
- El análisis de STI a través de cálculos y simulación de eventos, permitirá verificar si los datos técnicos especificados del aislamiento externo de los equipos de patio de 138 kV, son los adecuados para la altitud de la subestación.
- El análisis de STI a través de cálculos y simulación de eventos, permitirá verificar si los datos técnicos especificados del aislamiento externo de los equipos de patio de 60 kV, son los adecuados para la altitud de la subestación.

## **1.5. Estado del Arte**

Las sobretensiones de impulso de maniobra y rayo, deben ser consideradas para seleccionar el aislamiento de los equipos de alta tensión en subestaciones de alta tensión, especialmente en aquellas a gran altitud. El aislamiento estandarizado de los componentes de subestaciones, normalmente se fabrica para instalación hasta 1000 m.s.n.m., mientras que para mayor altitud se les afecta por un factor de corrección que corresponde al sitio [8]. El cálculo completo de coordinación de aislamiento, se hace de acuerdo a las definiciones del estándar IEC 60071 y el método simplificado mostrado en el estándar IEC 60071-2.

Las sobretensiones en sistemas de potencia, dependiendo de la causa que las produzca y de acuerdo al nivel de Tensión Nominal, pueden ocasionar fallas, daños e inhabilitar definitivamente los equipos involucrados; y por ello se realizan estudios forenses especialmente en Alta Tensión mediante modelamientos y simulaciones. Estos estudios, tienen una particularidad en instalaciones a gran altitud, donde la disminución de la rigidez dieléctrica del aire, aplica factores de corrección para la especificación del aislamiento, tanto para líneas de transmisión [9] como en subestaciones [10].

En la referencia [11] se presenta un Estudio de Sobretensiones en Subestaciones con la Utilización del modelador (ATP) Alternative Transients Program, aplicado a equipos del patio de 500 kV de la Subestación "Margen derecha de ITAPU Binacional", en previsión de su futura instalación, dando como resultado que el uso de descargadores de sobretensiones de óxido de zinc (ZnO) con tensión nominal de 420 kV en los extremos de las líneas de transmisión, elimina la probabilidad de ocurrencia de sobretensiones de Rayo con valores por encima del BIL (Basic Insulation level) de los equipos.

En la referencia [12], se presenta un Análisis de Sobretensiones Transitorias Debidas a la Energización de Líneas de Transmisión en Vacío, para el cual se considera el cierre de interruptores en el valor pico de la senoidal; presentando así una onda que viaja al otro extremo de la línea en abierto, donde el coeficiente de reflexión es +1, dicha onda reflejada de voltaje superpuesta, duplica el voltaje de la onda incidente. Ocurren incluso tensiones más altas cuando una línea se vuelve a cerrar después de una interrupción momentánea. Sin embargo, debido a la componente resistiva en las líneas de transmisión, algunas ondas que viajan hacia los extremos son atenuadas y desaparecen después de algunas reflexiones y otras se pueden reforzar posibilitando que la tensión crezca a tal nivel que superan el nivel básico del aislamiento ocasionando una falla.

En líneas de transmisión ideales, sin pérdidas, las ondas de impulso viajan sin distorsionarse, y tanto las ondas de corriente como tensión tienen la misma forma, estando relacionadas por la impedancia característica de la línea. Una onda de corriente que viaja en la dirección positiva de "x", tiene el mismo signo como la forma de tensión a la que es asociada. Ondas de corriente viajando en la dirección contraria tienen su signo inverso respecto a su onda de tensión. Los cálculos demostrativos del comportamiento de las ondas mientras se propagan a través de líneas de transmisión, se muestran en el subcapítulo 2.4 de la presente investigación.

En todo sistema de potencia se presentan Sobretensiones de Maniobra y Sobretensiones de Impulso Atmosférico, que en el presente caso se consideran la mayor amenaza para el aislamiento externo.

Las sobretensiones de Maniobra y Rayo, son fenómenos de muy corta duración y de alta frecuencia, proporcionalmente mucho más elevadas que la tensión nominal de operación del sistema a frecuencia industrial, aquellas de maniobra provienen de la energización y desenergización de Líneas Eléctricas, de Bancos de Capacitores, fallas, alta velocidad de recierre y otros. Las sobretensiones de maniobra, en líneas de transmisión en niveles de

alta tensión tienen menor impacto que en UHV (Ultra High Voltage), pero su consideración, continúa siendo necesaria [13].

Las sobretensiones de rayo son un efecto de las descargas atmosféricas [14], se propagan a lo largo de las líneas aéreas, al ingresar en las subestaciones pueden ocasionar riesgo de falla en los equipos conectados, cables o transformadores; el uso de descargadores de óxido de Zinc, las deriva a Tierra reduciendo su valor a los niveles de la tensión residual por debajo del nivel de aislamiento de los equipos [15].

Una sobretensión, puede causar muchos efectos en el sistema de potencia. Puede causar falla de aislamiento de los equipos como también puede hacerlos funcionar diferente pudiendo ser perjudicial para el sistema. Las sobretensiones ocurren en un sistema cuando los picos de tensiones superan el 110 % de la tensión nominal y pueden ser causadas por un gran número de eventos; las sobretensiones de impulso de maniobra, debido a energización de líneas de transmisión, desenergización de banco de capacitores, alta velocidad de recierre, energización y desenergización de transformadores de potencia, otros; las sobretensiones de rayo, son causadas por impulsos de rayo. Otras sobretensiones por la falla del equipamiento de control tal como el regulador de tensión, etc.

Las sobretensiones críticas de flameo (CFO = critical flashover voltages) por causa de las sobretensiones de rayo en aisladores de alta tensión. La descarga ocurre en aisladores de líneas de transmisión aérea, para redes de 110 kV, 220 kV y 400 kV, se estudió usando el modelo de progresión líder (LPM = Leader Progression Model). Los resultados del cálculo se compararon con las mediciones de laboratorio y se verificó que el método presentado predice el CFO con buena precisión [16].

Análisis del efecto de la resistencia del sistema a tierra de la torre en la tensión de retorno a través de la cadena de aisladores en un sistema de transmisión. Investigación sobre las líneas de transmisión de 500 kV de Tailandia, con torres de doble circuito y doble cable de guarda. Este estudio incluye la magnitud del impulso de rayo y el tiempo de frente del mismo. Las torres de celosía usan el modelo de torre de varios pisos. El supuesto de los estudios basados en el rango de corriente de impulso de retorno, oscila entre 1 y 200 kA, el tiempo de frente entre 1  $\mu$ s y 3  $\mu$ s. Las simulaciones recrean el efecto de las diferentes resistencias a tierra de la torre que afectan la corriente del rayo. Los resultados de la simulación se analizan como una sobretensión de rayo que causa una sobretensión de retorno en las cadenas de aisladores. Este estudio ayuda a conocer las causas de los

problemas de las sobretensiones de retorno en los sistemas de transmisión y también como guía para resolver el problema de los sistemas de línea de transmisión de 500 kV [17].

En el Reino Unido y Norte América, se tienen grandes cantidades de registros históricos de presencia sobretensiones en sus sistemas de potencia, causados principalmente por descargas atmosféricas tanto en alta tensión como en media. Ello indica que el efecto de rayo es la más grande causa de interrupciones en los sistemas de potencia, cerca del 26 % de las interrupciones en circuitos de 230 kV y acerca del 65% en 345 kV. Esta conclusión ha sido obtenida después de analizar la data obtenida en un periodo mayor a 14 años por unas 42 compañías de operación en Estados Unidos y Canadá. La data ha sido reunida de 386 circuitos de alta tensión representando 41 036.56 km de líneas de transmisión. Un estudio similar se ha hecho el uso de líneas de distribución en el Reino Unido, también en un periodo mayor a 14 años. Más de 50 000 fallas reportadas han sido analizadas en circuitos hasta e incluyendo 33 kV. Se Encontró que el 47% de todos estos incidentes, incluyendo los de origen desconocido han sido causados por rayos.

Investigación que propone una metodología de simulación que permite analizar los transitorios electromagnéticos de frente de onda rápida en subestaciones eléctricas y líneas de transmisión eléctrica, y el cálculo de la magnitud de las sobretensiones ocasionadas por dicho fenómeno. La herramienta computacional empleada para el logro de este objetivo es el programa Alternative Transient Program (ATP) y la metodología que desarrolla el trabajo permite seleccionar adecuadamente los equipos eléctricos y lograr configuraciones óptimas de diseño en subestaciones de alta tensión y líneas de transmisión. Con ello, se reduce la posibilidad de daño en los equipos eléctricos (como transformadores de potencia, interruptores, seccionadores, transformadores de medida) por efecto de las descargas atmosféricas y también se minimiza la salida de operación de las líneas de transmisión por dichos fenómenos [18].

Investigación acerca de las sobretensiones de maniobra describiendo una breve reseña histórica de los sistemas eléctricos de potencia haciendo mención a los grandes cambios que han experimentado los elementos que lo conforman, concepción de los fenómenos transitorios a través de un ejemplo físico y aplicado a circuitos sencillos y luego se determina las ecuaciones en estado estacionario , evaluación de las maniobras más comunes en los sistemas de potencia parametrizando los componentes con el uso del software ATP y técnicas para limitar las sobretensiones de maniobra más severas [19].

En el Perú no se tienen análisis parecidos a los hechos en Estados Unidos, Canadá o el Reino Unido, sin embargo, por tratarse de sistemas de potencia enmallados, las

investigaciones realizadas en los mencionados países son de mucha importancia para esta investigación. Por tanto, es de gran ayuda hacer un análisis de los efectos que puede producir en los sistemas de potencia cualquier sobretensión producida en los mismos.

### **1.6. Metodología**

Para el desarrollo de esta presente investigación, se hizo uso de información previa para diseño de subestaciones de Alta tensión y análisis de sobretensiones en las mismas. Consiste en la: obtención y consulta en la literatura pertinente para el problema, recopilación de información de interés y constitución de la teoría de la investigación [20].

En el diseño, prevalecen las normas internacionales, en especial las IEC y EPRI, para el análisis de sobretensiones prevalecerán los trabajos previos acerca del tema y para comprobar se harán simulaciones con software ATP (Analysis Transient Program). Para ello los siguientes pasos tienen gran relevancia.

- Modelamiento del sistema Eléctrico.
- Simulación con el Software Alternative Transient Program (ATP).

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Introducción**

Las sobretensiones a analizar son las que se producen en cualquier red de alta tensión de un sistema eléctrico, Sobretensiones de Maniobra y Sobretensiones de impulso de rayo.

El estándar “IEC 60071-2 Coordinación de aislamiento – Guía de aplicación”, es la base para el cálculo de coordinación de aislamiento y de acuerdo a ello, se especifica valores estandarizados de aislamiento externo e interno según [5]. Se especifica niveles de aislamiento, tanto a frecuencia industrial como a tensiones de impulso. Por otro lado, las simulaciones se harán tomando como referencia las corrientes de impulso con formas de onda estandarizadas según las referencias anteriores.

El principal equipo de protección de sobretensiones de impulso en todo tipo de subestación es el descargador de sobretensiones o pararrayos. El cual forma también parte importante en el cálculo de la coordinación de aislamiento. Por tanto, la selección de pararrayos es de gran importancia para la selección de equipos. Esta selección de pararrayos, impacta considerablemente en el diseño de la subestación eléctrica, ya que, nos permite seleccionar los niveles básicos de aislamiento del equipamiento y con ello definir las distancias mínimas de: fase – tierra, fase – fase y las distancias mínimas de seguridad.

Para la simulación de eventos y análisis de las sobretensiones de la subestación en estudio, que se presentará en este documento, se usará como elemento de protección de sobretensiones, descargadores de tensión de óxido metálico. Los cuáles serán modelados de acuerdo a las recomendaciones de las normas IEC, CIGRÉ, IEEE y/o fabricantes, similar a ello, se hará con los demás elementos de la subestación.

## **2.2. Equipamiento de Subestaciones**

Los principales equipos de patio en las subestaciones de transmisión y en particular en la subestación en estudio, se describen a continuación.

### **2.2.1. Transformador de Potencia**

Componente eléctrico, que permite disminuir o elevar el nivel de tensión manteniendo en lo posible el mismo valor de potencia. Tanto en la entrada como en la salida. Las pérdidas de potencia de los transformadores de potencia, son muy bajas en proporción a la capacidad de potencia del mismo.

Es el equipo de mayor importancia en una subestación de transmisión, ya que es el equipo que permite el objetivo de tales subestaciones “reducir o elevar el nivel de tensión” y así conectar centrales de generación eléctrica a un sistema eléctrico de potencia, unir dos o más sub sistemas, alimentar cargas, entre otros.

Este equipo, tiene sus propias protecciones mecánicas internas y dispositivos electrónicos para monitoreo, control y protección acoplados al mismo. Y por la importancia del equipo, se instalan a cada lado del transformador de potencia elementos de protección contra sobretensiones.

### **2.2.2. Interruptor de Potencia**

Dispositivo mecánico, capaz de conducir, interrumpir y de restablecer a condiciones normales las corrientes de cortocircuito. Se aplica básicamente para conectar y desconectar de un sistema energizado, Líneas de Transmisión, Transformadores de Potencia, Reactores, Generadores o Barras.

### **2.2.3. Seccionador**

Dispositivo mecánico de seccionamiento de circuitos que por necesidad de operación o mantenimiento de componentes o subsistemas eléctricos. Permite aislar equipos como, interruptores de potencia, barras, generadores o líneas de transmisión.

Los seccionadores a tierra, se usa para poner a tierra componentes de un sistema eléctrico.

Los seccionadores de potencia, pueden operar bajo carga.

### **2.2.4. Transformadores Tensión**

En sistemas de media, alta o extra alta tensión, las medidas de tensión, no se toman directamente de la red, se hace a través de un dispositivo de reducción de tensión. A los transformadores de tensión se les conoce comúnmente como inductivos o capacitivos. Normalmente los transformadores de tensión inductivos, se usan en media tensión, aunque

también se pueden aplicar en alta tensión. Los transformadores de tensión capacitivos se usan generalmente en alta tensión y más aún en extra alta tensión.

Los transformadores de tensión, reflejan fielmente en el secundario las sobretensiones que ocurren en el primario.

### **2.2.5. Transformador de Corriente**

Dispositivos electromecánicos que se usan para medir grandes corrientes en los sistemas de potencia sea en baja, media, alta o extra alta tensión. Eléctricamente, según su construcción, pueden ser de varios núcleos o de secundarios de relación múltiple. Según su utilización son de protección o medición. Actualmente se especifica que los transformadores de corriente incluyan en un solo equipo bobinados secundarios para medición y protección.

Los transformadores de corriente reflejan fielmente en el secundario, las sobre corrientes que ocurran en el primario.

### **2.2.6. Pararrayos**

Dispositivo de protección contra las sobretensiones en los sistemas de potencia, de acuerdo a su especificación técnica, permite el paso de determinados valores de tensiones en relación a la cantidad de corriente que descarga a través del mismo producto de la descarga de la sobretensión. La descarga de sobretensión se disipa en la puesta a tierra a la que se conecta el dispositivo. Se usan para proteger de sobretensiones a subestaciones, líneas de transmisión, transformadores y generadores.

## **2.3. Ondas Viajeras**

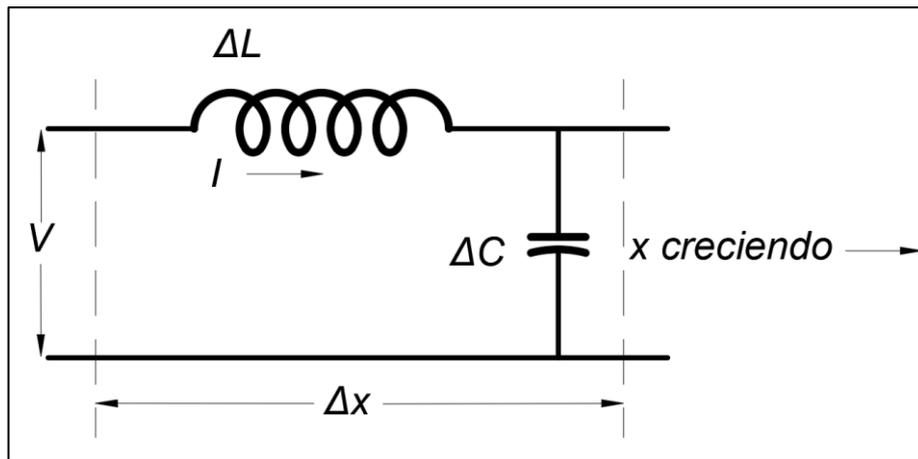
El comportamiento de las ondas en líneas de transmisión por efecto de impulsos de maniobra o rayo, son formalizadas con el desarrollo de la ecuación de onda que demuestre su comportamiento en el tiempo y posición respecto a una referencia.

### **2.3.1. Ecuación de Onda**

Para facilitar con el uso del álgebra en el desarrollo, se considera una línea de transmisión de dos conductores y se asume que son libre de pérdidas.

La Fig. 2.1, muestra una pequeña parte de una línea de transmisión eléctrica, con valores de inductancia de  $L$  henrios por metro y una capacitancia de  $C$  faradios por metro. El pequeño trazo de una longitud elemental de  $\Delta x$  tendría una inductancia de  $L\Delta x$  y una capacitancia de  $C\Delta x$  como se muestra. La tensión a través de este elemento, será:

$$-\Delta V = L\Delta x \frac{dI}{dt} \quad (2.1)$$



**Fig. 2.1** Pequeño Elemento de una Línea de Transmisión

Fuente: [1]

que, en el límite, se puede escribir como:

$$\frac{dV}{dx} = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.2)$$

Usamos derivadas parciales debido a que  $I$  y  $V$  son ambos en función de la posición “ $x$ ” y del tiempo “ $t$ ”.

La corriente que carga la capacitancia elemental  $\Delta C$  esta dado por:

$$-\Delta I = C\Delta x \frac{dV}{dt} \quad (2.3)$$

Que en el límite se convierte en:

$$\frac{dI}{dx} = -C \frac{dV}{dt} \quad (2.4)$$

Ahora derivamos la ecuación 2.2 respecto a  $x$  y a la ecuación 2.4 respecto a  $t$ :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -L \frac{d^2I}{dxdt} \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2I}{dt dx} = -C \frac{d^2V}{dt^2} \quad (2.6)$$

Reemplazamos  $d^2I/dt dx$  de la ecuación 2.6 en la ecuación 2.5, se tiene:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = LC \frac{d^2V}{dt^2} \quad (2.7)$$

de manera similar, se tiene:

$$\frac{d^2I}{dx^2} = LC \frac{d^2I}{dt^2} \quad (2.8)$$

Las ecuaciones 2.7 y 2.8, constituyen las ecuaciones de onda de una línea de transmisión.

Considerando la ecuación de la corriente que se muestra en la ecuación 2.9, D'Alembert demostró que satisface la ecuación general:

$$I(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (2.9)$$

Siendo  $v = 1/\sqrt{LC}$ , que representa una velocidad.

Remplazando la ecuación 2.9 en la ecuación 2.2, podemos obtener:

$$\frac{dV}{dx} = -L \frac{dI}{dt} = Lv[f'_1(x - vt) - f'_2(x + vt)] \quad (2.10)$$

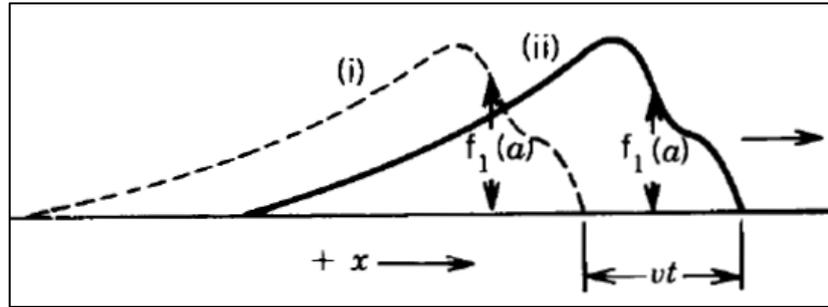
Integrando respecto a x ambas partes de la ecuación, tenemos:

$$V(x, t) = Lv[f_1(x - vt) - f_2(x + vt)] \quad (2.11)$$

Comparando las ecuaciones 2.11 y 2.9, notamos, la proporcionalidad directa entre la tensión y la corriente. La proporcionalidad, está dada por un factor que corresponde a la impedancia característica  $Z_0$ . Recordando que,  $Lv = L/\sqrt{LC} = \sqrt{L/C} = Z_0$ .

Analicemos las aplicaciones físicas de la ecuación 2.11.

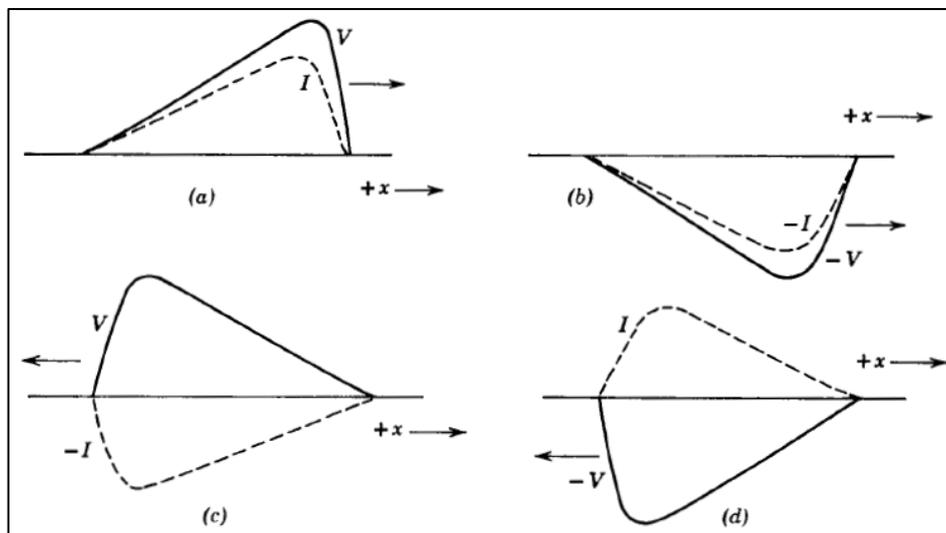
Vamos a considerar la función  $f_1(x - vt)$ . Para un tiempo  $t = 0$ , tiene una distribución longitudinal  $f_1(x)$  y para un valor de  $x = a$ ,  $f_1(a)$ . Ahora siendo  $v = 1/\sqrt{LC}$  la velocidad de propagación de una onda en el conductor de la línea de transmisión, para cualquier tiempo  $\tau$ ,  $x = a + v\tau$  y  $f_1(a + v\tau - (v\tau)) = f_1(a)$ , esto quiere decir, que la onda se propaga en la dirección positiva de x, manteniendo su forma intacta en todo momento. Ello se ilustra en la Fig. 2.2. Similarmente, la función  $f_2(x + vt)$  representa el movimiento en la dirección negativa de "x", a una velocidad de  $v$ . También podemos notar que la corriente y la tensión viajando en la dirección positiva de "x" tienen igual signo, mientras que estas viajando en la dirección negativa de "x" tienen signos contrarios. Se ilustran ejemplos en la Fig. 2.3.



**Fig. 2.2** Función  $f_1(x - vt)$  para en dos instantes de tiempo

**Fuente:** [1]

Recapitulando, se tiene una importante conclusión que, en una línea de transmisión sin pérdidas, las ondas de corriente y tensión tienen la misma forma, estando estas relacionadas con la impedancia característica de la línea, y viajan sin distorsionarse.

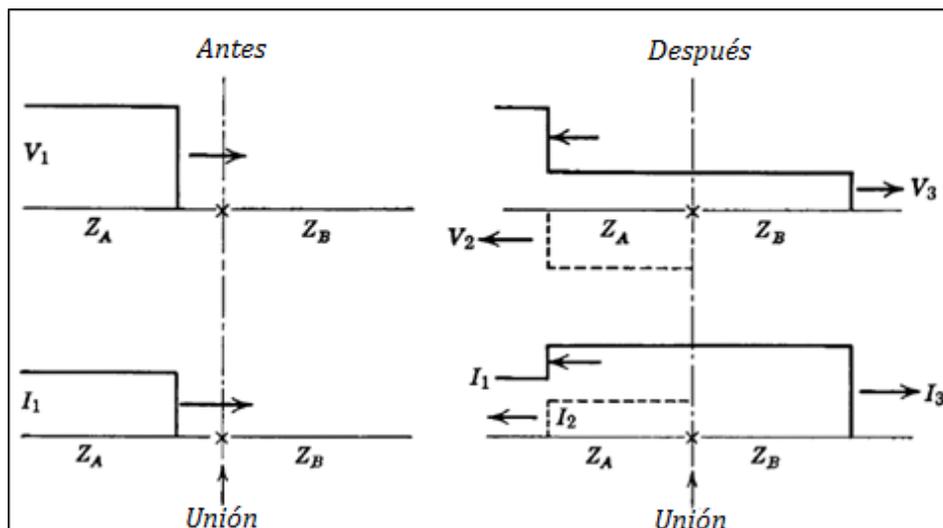


**Fig. 2.3** Varias combinaciones de ondas de corriente y tensión

**Fuente:** [1]

### 2.3.2. Reflexión y refracción de ondas viajeras

Tomando en consideración que una onda de tensión y su respectiva onda de corriente viajan a través del conductor de una línea de transmisión que tiene una impedancia característica  $Z_A$  y esta pasa a través de una unión a otro conductor de otra línea de transmisión con una impedancia característica  $Z_B$ , las amplitudes de las ondas que se reflejan y las ondas que se refractan, son tales que las proporcionalidades tanto de corriente como de tensión son preservadas por cada una, como lo demande la impedancia característica de la línea en que viajan [1].



**Fig. 2.4** Ondas de Tensión y Corriente reflejadas y refractadas en una unión de dos líneas con diferente impedancia.

**Fuente:** [1]

De la figura anterior, la onda de tensión incidente es  $V_1$  y las tensiones refractadas y reflejadas son  $V_2$  y  $V_3$  respectivamente, siendo:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A} \quad (2.12)$$

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_A} \quad (2.13)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_B} \quad (2.14)$$

Note que  $I_2$ , debido a que está viajando en la dirección negativa de "x", tiene un signo opuesto a  $V_2$ . Si la tensión y la corriente van a ser continuas en la unión, se cumple que:

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (2.15)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (2.16)$$

La ecuación 2.16, puede ser reescrita usando las ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14:

$$\frac{V_1}{Z_A} - \frac{V_2}{Z_A} = \frac{V_3}{Z_B} \quad (2.17)$$

De las ecuaciones 2.15 y 2.17, se tiene:

$$V_2 = V_1 \left( \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \right) \quad (2.18)$$

$(Z_B - Z_A)/(Z_B + Z_A)$ , es llamado coeficiente de reflexión ( $a$ ),  $-1 \leq a \leq 1$ .

De una manera similar, de las ecuaciones 2.15 y 2.18, se tiene:

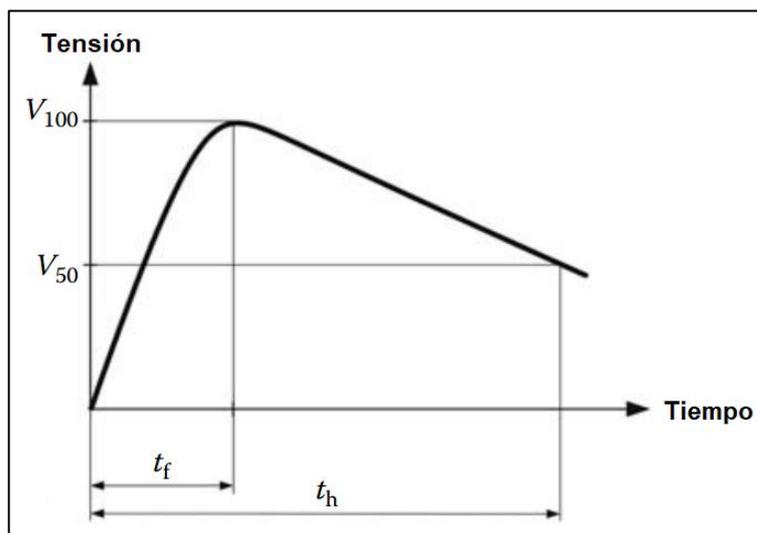
$$V_3 = V_1 \left( \frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} \right) \quad (2.19)$$

$(2Z_B)/(Z_B + Z_A)$ , es llamado coeficiente de refracción ( $b$ ),  $0 \leq a \leq 2$ .

#### 2.4. Sobretensiones de Maniobra

Las sobretensiones de maniobra en sistemas de potencia ocurren por la energización y des-energización de líneas de transmisión, capacitores, reactores y transformadores. La energía es almacenada en los campos eléctricos y magnéticos del sistema, energía magnética almacenada en la inductancia del sistema y energía eléctrica almacenada en la capacitancia. La transferencia de energía entre una línea de transmisión y el sistema durante una maniobra causa picos de tensión [13].

De acuerdo a [13], las sobretensiones de maniobra son de frente lento y la forma de onda estandarizada tiene un tiempo de pico de onda ( $t_f$ ) igual a  $250 \mu s$  y un tiempo de cola ( $t_T$ ), tiempo en que alcanza la mitad del pico igual a  $2500 \mu s$ .



**Fig. 2.5** Forma de Onda Estandarizada de la Sobretensión de Maniobra

**Fuente:** [2]

En los sistemas de potencia, las sobretensiones de maniobra ocurren generalmente por:

- Energización y recierre de Líneas de Transmisión.
- Maniobras de corrientes inductivas y capacitivas.

- Otros.

#### **2.4.1. Energización y recierre de Líneas de Transmisión**

La energización y recierre trifásico de una Línea de Transmisión, produce sobretensiones en todas sus fases, como también entre las fases mismas. Las magnitudes de tales sobretensiones, depende del tipo de mecanismo de maniobra tales como: contar o no con resistencia de cierre, de la potencia de cortocircuito de la barra de la subestación de donde se hace la maniobra, de la compensación usada para mejorar la calidad de la tensión, de la longitud (Existencia de Efecto Ferranti y/o Ferroresonancia), del tipo de terminación (Elementos de conexión en la terminación de la Línea) y otros.

#### **2.4.2. Maniobras de corrientes inductivas y capacitivas**

Las maniobras que interrumpen las corrientes inductivas o capacitivas, se deben tener en cuenta en el análisis de sobretensiones transitorias, ya que pueden llegar alcanzar valores representativos que requerirían particular atención. Se consideran las siguientes maniobras:

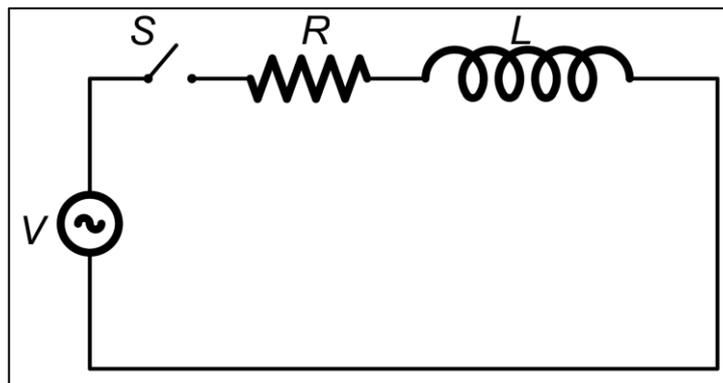
- Energización y des energización de Transformadores de Potencia en vacío.
- Energización y des energización de Reactores.
- Otros.

Aunque en los sistemas de potencia existen muchos elementos que intervienen y su presencia misma afecta en cierta proporción las sobretensiones que se producen en los mismos durante una maniobra, el análisis en determinados nodos, se puede simplificar con la representación de circuitos valores equivalentes de R, L y C, resistencia eléctrica, inductancia y capacitancia respectivamente.

##### **a) Circuito RL**

Como una simple analogía estudiaremos el siguiente circuito y analizaremos las sobretensiones que se producen en los elementos resistivos e inductivos.

Sea el circuito RL:



**Fig. 2.6** Circuito RL

**Fuente:** [Elaboración propia]

Donde:

$$V = V_m \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (2.20)$$

La inclusión del ángulo  $\theta$ , permitirá cerrar el interruptor (S) en cualquier instante.

Cundo el interruptor se cierra, inmediatamente aparece una corriente en el circuito, antes de llegar al estado estable, la magnitud de esta corriente depende del tiempo debido a la magnetización del bobinado. A este corto tiempo entre el cierre del interruptor y el estado estable, se le conoce con el nombre de estado transitorio. En el estado estable la magnitud de la corriente se calcula de la siguiente manera  $I = \frac{V}{Z}$ , siendo  $V$  la magnitud de la tensión de la fuente y  $Z$  la impedancia del circuito ( $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ), mientras en el estado transitorio, la corriente se calcula resolviendo la ecuación diferencial  $V_m(\text{sen}\omega t \cos\theta + \cos\omega t \text{sen}\theta) = RI + L \frac{dI}{dt}$ .

Aplicando la transformada de Laplace a ambas partes de la ecuación, se tiene:

$$V_m \left( \frac{\omega \cos(\theta)}{\omega^2 + S^2} + \frac{S \text{sen}(\theta)}{\omega^2 + S^2} \right) = RI(S) + LSI(S) - LI(0) \quad (2.21)$$

Debido a que el valor de  $\theta$  es asignado al momento de cerrar el circuito, este es constante, por ende  $\cos(\theta)$  y  $\text{sen}(\theta)$ , también lo son. Además, para este circuito en energización, el valor de  $LI(0) = 0$ .

Entonces, se tiene:

$$I(s) = \frac{V_m}{L} \frac{1}{(R/L)} \left( \frac{\omega \cos(\theta)}{\omega^2 + S^2} + \frac{S \text{sen}(\theta)}{\omega^2 + S^2} \right) \quad (2.22)$$

Sea:

$$A = \frac{V_m}{L} \omega \cos(\theta), \quad B = \frac{V_m}{L} \sin(\theta), \quad \alpha = \frac{R}{L}$$

Se puede representar de la siguiente manera:

$$I(s) = \frac{A}{(S + \alpha)(\omega^2 + S^2)} + \frac{BS}{(S + \alpha)(\omega^2 + S^2)} \quad (2.23)$$

Simplificando cada término:

$$\frac{A}{(S + \alpha)(\omega^2 + S^2)} = \frac{A}{\alpha^2 + \omega^2} \left( \frac{1}{(S + \alpha)} - \frac{S}{(\omega^2 + S^2)} + \frac{\alpha}{(\omega^2 + S^2)} \right) \quad (2.24)$$

$$\frac{BS}{(S + \alpha)(\omega^2 + S^2)} = \frac{B}{\alpha^2 + \omega^2} \left( \frac{-\alpha}{(S + \alpha)} + \frac{\alpha S}{(\omega^2 + S^2)} + \frac{\omega^2}{(\omega^2 + S^2)} \right) \quad (2.25)$$

Aplicando inversa de Laplace a cada término, tenemos:

$$\mathcal{L}^{-1} \left( \frac{A}{(S + \alpha)(\omega^2 + S^2)} \right) = \frac{A}{\alpha^2 + \omega^2} (e^{-\alpha t} - \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t) \quad (2.26)$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left( \frac{BS}{(S + \alpha)(\omega^2 + S^2)} \right) = \frac{B}{\alpha^2 + \omega^2} (-\alpha e^{-\alpha t} + \alpha \cos \omega t + \omega \sin \omega t) \quad (2.27)$$

Reemplazando A y B por sus correspondientes valores:

$$I(t) = \frac{V_m}{L(\alpha^2 + \omega^2)} (\omega \cos(\theta) e^{-\alpha t} - \omega \cos(\theta) \cos \omega t + \alpha \cos(\theta) \sin \omega t) - \alpha \sin(\theta) e^{-\alpha t} + \alpha \sin(\theta) \cos \omega t + \omega \sin(\theta) \sin \omega t \quad (2.28)$$

$$I(t) = \frac{V_m}{L(\alpha^2 + \omega^2)} ((\omega \cos \theta - \alpha \sin \theta) e^{-\alpha t} - \omega \cos(\omega t + \theta) + \alpha \sin(\omega t + \theta)) \quad (2.29)$$

Siendo  $\beta$  el ángulo que forma la impedancia  $RL$ , es decir  $\tan(\beta) = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega}{\alpha}$ , entonces  $\sin \beta = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}$  y  $\cos \beta = \frac{\alpha}{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}$

Reemplazando el valor de  $\alpha$ , tenemos:

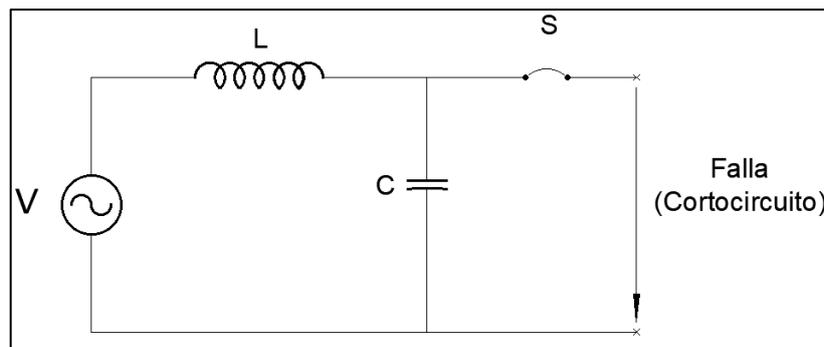
$$I(t) = \frac{V_m}{(R^2 + (\omega L)^2)^{1/2}} (-\sin(\theta - \beta) e^{-\frac{R}{L}t} + \sin(\omega t + \theta - \beta)) \quad (2.30)$$

$$V_R = \frac{R \times V_m}{(R^2 + (\omega L)^2)^{1/2}} (-\sin(\theta - \beta) e^{-\frac{R}{L}t} + \sin(\omega t + \theta - \beta)) \quad (2.31)$$

$$V_L = \frac{V_m}{(R^2 + (\omega L)^2)^{\frac{1}{2}}} (R \cos(\theta - \beta) e^{-\frac{R}{L}t} + (\omega L) \cos(\omega t + \theta - \beta)) \quad (2.32)$$

### b) Circuito LC

Analizaremos un circuito simple LC, como el que se muestra en la Fig. 2.7, que representa, sin considerar las resistencias eléctricas el equivalente en una subestación, en el momento en que el interruptor de potencia libera la falla.



**Fig. 2.7** Falla en un circuito LC

**Fuente:** [Elaboración propia]

$$V = V_m \text{sen}(\omega t) \quad (2.33)$$

$$V_m \cos(\omega t) = L \frac{dI}{dt} + V_C \quad (2.34)$$

Además, se conoce que:

$$I = C \frac{dV_C}{dt} \quad (2.35)$$

Reemplazando la ecuación 2.35 en la ecuación 2.34, tenemos:

$$\frac{V_m}{LC} \cos(\omega t) = \frac{d^2 V_C}{dt^2} + \frac{V_C}{LC} \quad (2.36)$$

Aplicamos la transformada de Laplace para resolver dicha ecuación diferencial.

$$\frac{V_m}{LC} \frac{s}{s^2 + \omega^2} = s^2 V_C(s) - s V_C(0) - V_C'(0) + \frac{V_C(s)}{LC} \quad (2.37)$$

Sea  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ , tenemos que:

$$V_C(s) = \omega_0^2 V_m \frac{s}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_0^2)} + V_C(0) \frac{s}{(s^2 + \omega_0^2)} + V_C'(0) \frac{1}{(s^2 + \omega_0^2)} \quad (2.38)$$

Despreciando el arco del interruptor de potencia durante la maniobra, el segundo término de la ecuación anterior sería cero y, por consiguiente:

$$V_C'(0) = \frac{I(0)}{C} \quad (2.39)$$

Además,

$$\frac{s}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_0^2)} = \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \left[ \frac{s}{(s^2 + \omega^2)} - \frac{s}{(s^2 + \omega_0^2)} \right] \quad (2.40)$$

$$V_C(s) = \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} V_m \left[ \frac{s}{(s^2 + \omega^2)} - \frac{s}{(s^2 + \omega_0^2)} \right] \quad (2.41)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace:

$$V_C(t) = \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} V_m (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) \quad (2.42)$$

## 2.5. Sobretensiones por impulso de rayo

Estas sobretensiones son causadas por las descargas atmosféricas que impactan en las estructuras, en el cable de guarda o incluso en el conductor de una línea de transmisión. Tal descarga ocurre cuando se rompe el gradiente de tensión que se forma temporalmente en una determinada región entre una o varias nubes ionizadas con la superficie terrestre. La diferencia de tensión entre las nubes y la superficie terrestre, es mayor en zonas donde existen protuberancias y las descargas tienden a impactar en ellas. Las líneas de transmisión son protuberancias artificiales muy notorias y por ende es de alta probabilidad de impacto de rayos.

Las líneas de transmisión son la parte más amplia de un sistema de potencia desde el punto de vista físico y el rayo es el fenómeno natural más importante para perturbar su funcionamiento normal. Con el fin de evitar la descarga directa del rayo en los conductores de fase, es habitual utilizar cables de protección. Estos cables casi protegen completamente a los conductores de fase de los impulsos de rayo, pero el impulso de rayo en estos cables puede provocar el fenómeno de Back Flashover (BFO), que a su vez provocará un fallo de fase a tierra en la línea. Los rayos como uno de los varios fenómenos que perturban el funcionamiento normal de las líneas de transmisión de potencia, se han considerado desde 1950 y hasta ahora se han realizado muchas investigaciones en este campo [21].

### 2.5.1. El Rayo

Para dar una descripción coherente de este fenómeno, ingenieros e investigadores han definido los siguientes términos [13].

- **Flash**

Este término abarca toda la descarga eléctrica, desde la nube hasta el objeto donde impacta.

- **Stroke**

Componente de alta corriente en un destello. Un solo destello contiene un primer trazo y puede contener uno o más trazos posteriores.

- **Flashover**

Descarga eléctrica completa desde un conductor energizado a un elemento conectado a tierra. Puede extinguirse por sí solo sin maniobra de un interruptor de potencia.

- **Backflashover**

Descarga eléctrica completa desde un elemento conectado a tierra a un conductor energizado. Puede extinguirse por sí solo sin maniobra de un interruptor de potencia.

- **Tripout**

Es un flashover o backflashover en una línea de transmisión que no desaparece por sí solo. Debe despejarse mediante la operación de un interruptor de potencia.

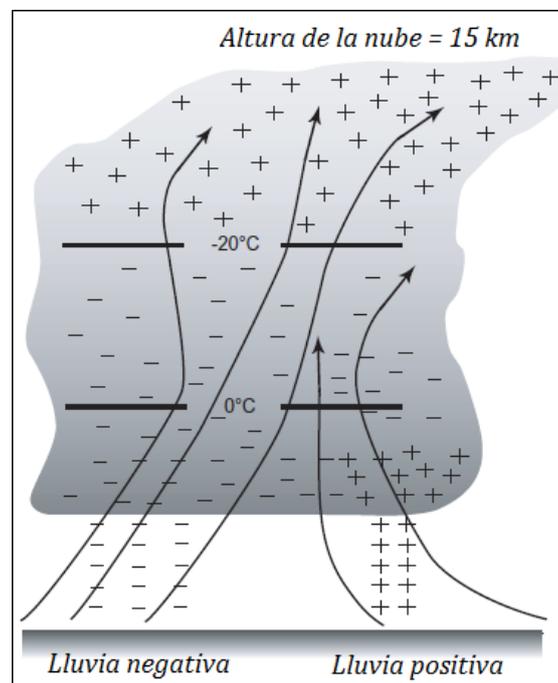
#### a) **Electrificación de la nube**

El aire húmedo caliente que asciende desde la superficie terrestre hasta la estratosfera, a unos 15 km o más, lo hace a altas velocidades. Primero se sobre enfría, y mientras asciende se solidifica convirtiéndose en nieve, granizo y hielo en las regiones superiores. La turbulencia que se genera por el movimiento mezcla y fricción de gotas de agua, nieve, hielo y granizo, provoca una fuerte electrificación. En resumen, en la electrificación de la nube, se produce una carga negativa a temperaturas que oscilan entre  $-15^{\circ}\text{C}$  y  $-30^{\circ}\text{C}$  en medio de la nube, mientras que la carga positiva ocurre entre  $-15^{\circ}\text{C}$  y  $0^{\circ}\text{C}$  en la parte inferior de la nube y a temperaturas por debajo de los  $-30^{\circ}\text{C}$  en la parte superior de la nube [13]. Ver Fig. 2.8.

La nube electrificada, se carga con grandes cargas negativas en regiones inferiores con pequeñas zonas de carga positiva intercaladas con frecuencia, y las regiones superiores de la nube, tienen cargas positivas ampliamente distribuidas. La carga eléctrica neta negativa presente en la parte inferior de la nube provoca la aparición de una carga positiva

similar en la superficie terrestre. Esta diferencia de carga puede ser tan grande que las tensiones entre ellas pueden alcanzar valores de 100 MV o más. Esta acumulación de carga incrementa la tensión entre la nube y tierra hasta que se supera la rigidez dieléctrica del aire húmedo entre ambos, generando así una chispa, entonces se desencadena la descarga eléctrica [13].

Normalmente las descargas atmosféricas ocurren cuando las cargas negativas de la base de la nube encuentran su camino hacia tierra, esto lo hace de manera escalonada debido a que procede como una serie de pasos hacia a tierra. Por otro lado, cuando un objeto alto como una torre de transmisión, torre de telecomunicaciones, un edificio o un mástil, se ubica debajo de la misma electrificación de nubes que se muestra en la Fig. 2.8, puede ocurrir un evento diferente. El campo eléctrico se puede acumular alrededor de la parte superior del objeto conectado a tierra y con tanta fuerza puede iniciar una descarga a tierra el provocada por el objeto. Este tipo de descargas por lo general no son muy comunes, pero sin embargo son las que presentan mayor magnitud de sobretensiones.



**Fig. 2.8** Electrificación de la Nube

Fuente: [13]

### 2.5.2. Probabilidad de las amplitudes en kiloamperios de las corrientes de rayo

La probabilidad de las amplitudes máximas de corriente a causa de los primeros impactos de descargas atmosféricas en líneas de transmisión, propuesta por Anderson y Eriksson, se calcula de acuerdo a la fórmula 2.43.

El rigor en la definición matemática de estas distribuciones estadísticas puede ser académicamente satisfactorio, pero nuestro conocimiento actual es tan limitado que los métodos analíticos rigurosos contribuyen poco a la precisión de las estimaciones finales del comportamiento de las descargas atmosféricas [13].

$$P_{I_R} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_R}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.43)$$

Dónde:

$P_{I_R}$ : es la probabilidad de que una descarga tenga una magnitud  $I_R$ .

$I_R$ : magnitud de la corriente de rayo.

### 2.5.3. Distribución de la Tasa de Crecimiento del Frente de Onda

La probabilidad de que una descarga atmosférica tenga una tasa de crecimiento máxima ( $dI/dt$ ), esta dada por:

$$P_{dI/dt} = \frac{1}{1 + \left(\frac{S_m}{24}\right)^4} \quad (2.44)$$

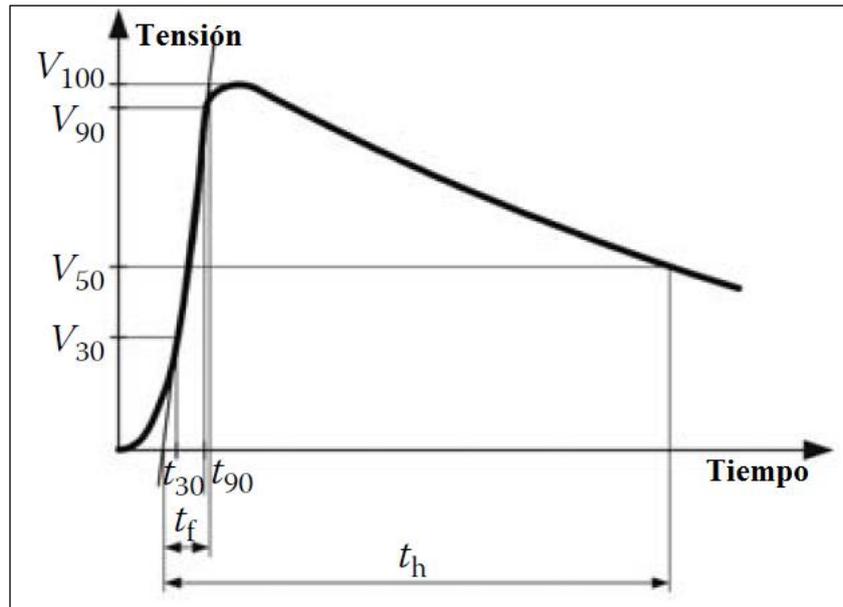
Dónde:

$P_{dI/dt}$ : es la probabilidad de que una descarga tenga una tasa de crecimiento de frente de onda  $S_m$ .

$S_m$ : tasa de crecimiento de frente de onda.

### 2.5.4. Forma de Onda de las Sobretensiones

- Las sobretensiones por impacto de rayo producidas en las Líneas de Transmisión, puede ocasionar interrupciones, perforación y fallas en los aislamientos.
- Las ondas de las sobretensiones de rayo, se comportan de acuerdo a las leyes de la propagación, con velocidades cercadas a la velocidad de la luz en conductores eléctricos y menores en estructuras de celosía (aproximadamente 240 m/  $\mu$ s).
- La forma de onda estandarizada IEC (1.2/50  $\mu$ s) es unidireccional y unipolar, compuesta por un frente ( $t_f = 1.2 \mu$ s) lineal, una cresta ( $kV_c$ ) y una Cola ( $t_h = 50 \mu$ s) de suave descenso [22].



**Fig. 2.9** Forma de Onda de la Sobretensión de Rayo Estandarizada

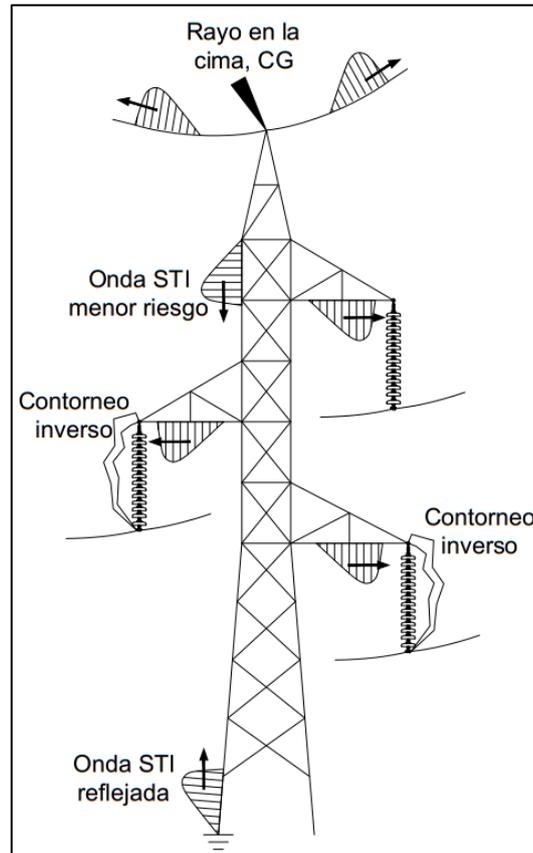
**Fuente:** [2]

### 2.5.5. Impacto de Rayos en Líneas de Transmisión

#### a) En la cima de la torre

Alrededor del 60% del total de las descargas de rayo generalmente impactan en la parte superior de las estructuras como se puede apreciar en la Fig. 2.10. La descarga piloto que cae en la estructura, tiende a distribuirse a través de la misma y la recorre hasta llegar a su puesta a tierra. La impedancia del aterramiento permitirá una buena o deficiente dispersión de la sobretensión de rayo producida. Una puesta a tierra con bajo valor de impedancia al momento de la ionización, servirá como buen elemento de protección; sin embargo, si el valor de la impedancia de la puesta a tierra de la estructura, es alta, esto podría convertirse en un pésimo elemento de protección de sobretensiones ya que una alta impedancia ocasiona valores elevados de sobretensiones de reflexión, que pueden ser mayores en magnitud al Nivel Básico de Aislamiento de la cadena de aisladores [22].

Gran parte de la corriente de la descarga eléctrica que impacta en la cima de la torre recorre la bajada, mientras que el resto viaja hacia ambos lados del cable de guarda dispersándose sucesivamente en las puestas a tierra hasta llegar a anularse. Las fallas de interrupción inversa pueden darse en diferentes formas y hasta simultáneamente. Es decir, solo afectaría a una de las fases ubicadas en el nivel más bajo o afectar de dos en dos hasta el nivel más alto, para el caso de una estructura con doble terna [22].



**Fig. 2.10** Impacto del rayo en la estructura

**Fuente:** [22]

### b) En el conductor protegido

El cable de guarda, no asegura el total de la protección contra las descargas atmosféricas hacia el conductor, esto debido a la posibilidad de las descargas laterales, poco probables, pero posibles. La corriente de la descarga eléctrica que impacta en el conductor, se aleja mitad y mitad a ambos lados del conductor en forma de pulsos de tensión que viajan muy cercanas a la velocidad de la luz en el mismo. Los valores de las sobretensiones que se producen en el conductor a consecuencia del impacto de rayo, dependen de la magnitud de la corriente y de la impedancia característica ( $Z_0$ ) de la Línea de Transmisión. La Fig. 2.11 muestra el comportamiento de las sobretensiones producidas en el conductor [22].

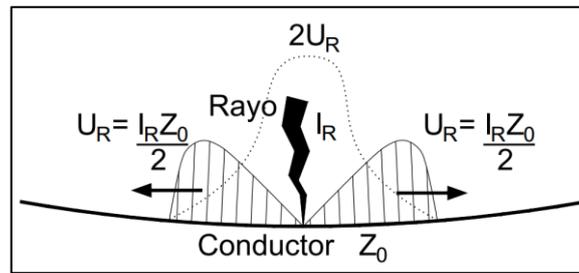
$$U_R = \frac{I_R Z_0}{2} \quad (2.45)$$

Donde:

$U_R$ = Sobretensión de Rayo.

$I_R$ = Corriente de Rayo.

$U_R$  = Impedancia Característica de la Línea de Transmisión.



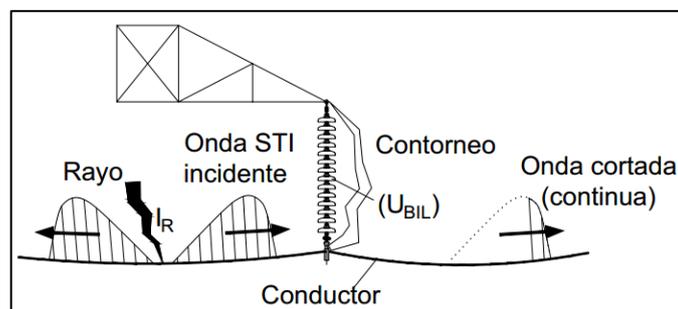
**Fig. 2.11** Impacto del Rayo en el Conductor

Fuente: [22]

Cuando una de los frentes de sobretensión está pasando cerca a la cadena de aisladores, como se muestra en la Fig. 2.12, dependiendo de su magnitud, puede superar o no el Nivel de Aislamiento Básico ( $U_{BIL}$  = Basic Insulator Level, de sus siglas en inglés). Se producirá contorneo desde el conductor hacia tierra, si es que la sobretensión de rayo es superior al sostenimiento de la cadena de aisladores ( $U_R > U_{BIL}$ ). En caso que la sobretensión de rayo no supere el Nivel básico de aislamiento de la cadena, no existirá contorneo, en este caso se dice que existe sostenimiento de la cadena de aisladores frente a las descargas atmosféricas, como se ilustra en la Fig. 2.13.

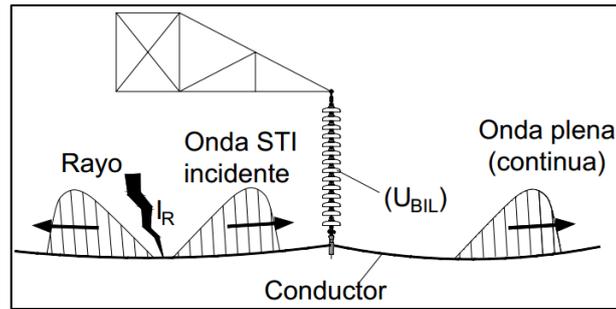
Si  $U_R > U_{BIL}$ , existe contorneo.

Si  $U_R < U_{BIL}$ , existe sostenimiento.



**Fig. 2.12** Contorneo en la Cadena de Aisladores ( $U_R > U_{BIL}$ )

Fuente: [22]



**Fig. 2.13** Cadena de Aisladores Sin Contorneo ( $U_R < U_{BIL}$ )

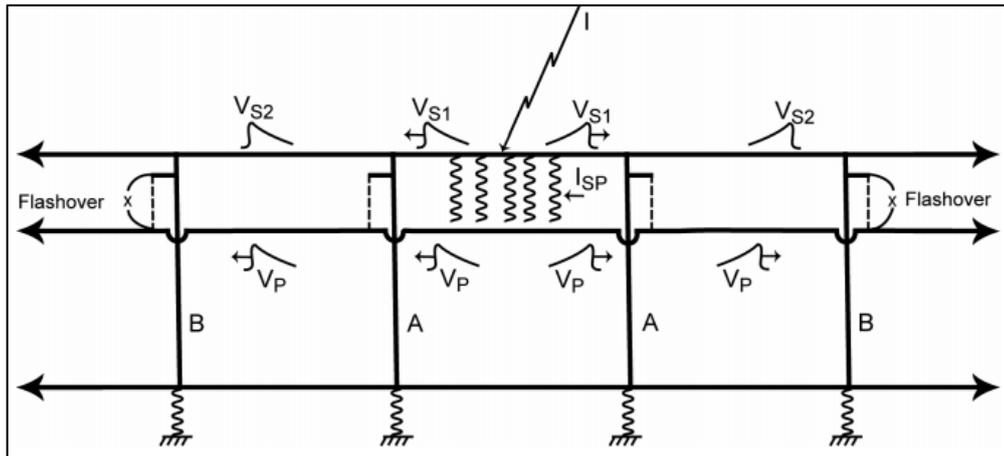
**Fuente:** [22]

Si la magnitud de la sobretensión de rayo es mayor que el BIL (Basic Insulation Level) de la cadena de aisladores, y la sobretensión de rayo presenta una tasa de crecimiento de frente de onda mayor elevado ( $\frac{dI_R}{dt} > 25 \text{ kA}/\mu\text{S}$ ), producirá fallas por perforación en la cadena de aisladores, esto generalmente por reflexión.

### c) En el cable de guarda

Una descarga atmosférica en medio vano del cable de guarda, como se muestra en la Fig. 2.14, podría no causar contorneo en el aislamiento que se encuentra en los soportes extremos del vano, pero si podría causar descargas en las cadenas de aisladores de los soportes siguientes a medida que viaja la sobretensión. En el instante de la descarga, la sobretensión producida ( $2V_{S1}$ ), puede superar el gradiente dieléctrico del aire, que de acuerdo a [13] es de 610 kV/m y como consecuencia de ello aparecerá una sobretensión de  $2V_p$  en la fase más cercana. Ambas ondas viajan hacia los extremos del vano, al alcanzar el aislamiento del primer soporte, la diferencia de tensión  $V_p - V_{S1}$ , podría ser insuficiente para superar el nivel de aislamiento básico de la cadena de aisladores. Cuando las ondas alcancen el aislamiento del siguiente soporte, la diferencia de tensión entre el conductor y la guarda puede ser lo suficientemente grande como para causar una disrupción en la cadena de aisladores, esto debido a que la tensión en el cable de guarda,  $V_{S2}$ , es pequeña como consecuencia de la puesta a tierra del soporte anterior.

Por lo general se considera que aproximadamente el 60% de los impactos de tramo están lo suficientemente cerca para ser considerados impactos de torre y que el otro 40% está lo suficientemente lejos en los tramos para no causar descargas disruptivas.



**Fig. 2.14** Impacto de rayo en medio vano del cable de guarda

Fuente: [13]

### 2.5.6. Contorneo Directo y Contorneo Inverso

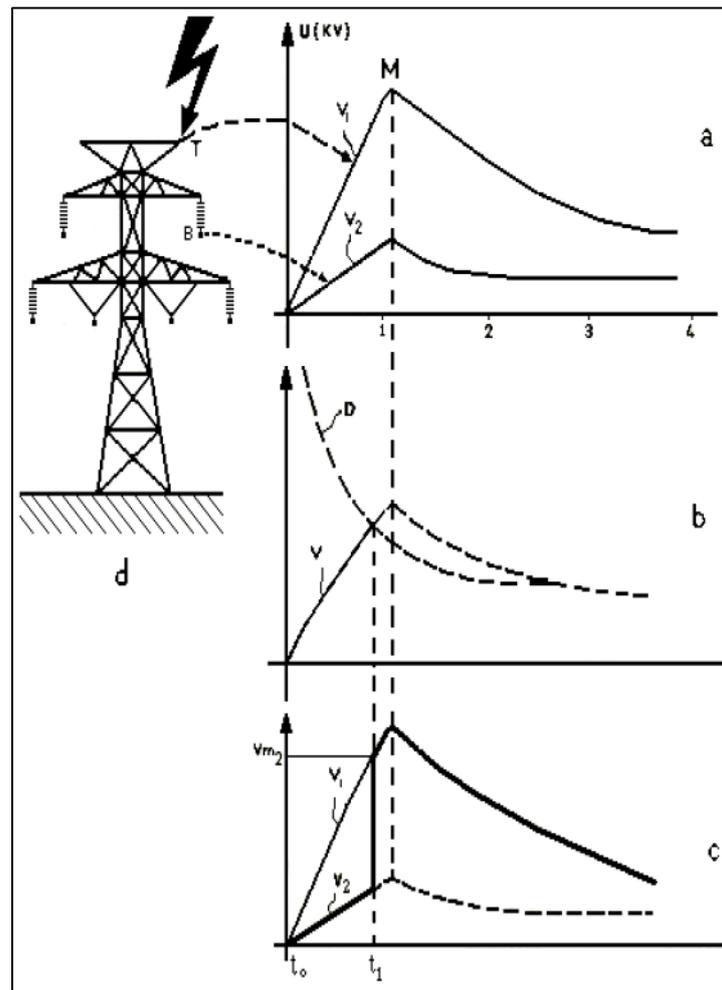
Los contorneos ocurren cuando las sobretensiones de rayo superan la tensión de sostenimiento a impulsos de rayo de la cadena de aisladores más próxima al punto de impacto. En los contorneos directos, la corriente va desde el conductor hacia la torre y en el contorneo inverso ocurre todo lo opuesto.

El aislamiento de líneas de transmisión al igual que las cadenas de aisladores que se usan en los pórticos de las subestaciones, tienen una tensión crítica de flameo directa y una tensión crítica de flameo inversa o negativa, cuyos valores dependerán del número de aisladores que la conformen, al igual que las características técnicas de cada aislador, las cuales varían ligeramente por el tipo de plato y por el fabricante. Cuando la diferencia de tensión entre la ménsula y el conductor supera la tensión crítica de flameo, es cuando aparece una corriente crítica a través de la cadena de aisladores y se produce la descarga.

La descarga eléctrica directa de un rayo en una torre de transmisión produce un aumento de voltaje en la estructura de la torre, cuya forma de onda es según  $V_1$  en la "Fig. 2.15-a". Teniendo en cuenta el acoplamiento de capacitancia e inductancia entre los cables de protección, la estructura de la torre y los conductores de fase, otro voltaje de sobrecarga con la misma forma de onda y menor amplitud induce en los conductores de fase, nombrado como  $V_2$  en la "Fig. 2.15-a". El factor de acoplamiento entre  $V_1$  y  $V_2$  puede ser variable de 15% a 25%. La tensión aplicada al aislador de línea es igual a la diferencia instantánea entre  $V_1$  y  $V_2$  y su forma de onda es según  $V$  en la "Fig. 2.15-b". En la "Fig. 2.15-b", la curva D ilustra la resistencia del aislamiento de la cadena aisladores de la línea y cuando estas curvas se encuentran en  $t_1$ , un arco eléctrico comienza desde la estructura de la torre hacia el conductor de fase. Luego, la mayor parte de las cargas eléctricas se

transmite a los conductores de fase a través del paso de arco y aumenta su voltaje de  $V_2$  a  $V_1$  de repente. Por lo tanto, la sobretensión creada en el conductor de fase como resultado de un BFO será de acuerdo con la curva en negrita en la "Fig. 2.15-c" [21].

Cuando el impacto del rayo es en medio vano del cable de guarda, la sobretensión que se muestra en el instante en que el rayo impacta en el cable, viaja mitad y mitad a ambos extremos de la línea hasta llegar a las estructuras, luego de ello, el resultado es similar al mostrado en la Fig. 2.15.



**Fig. 2.15** Contorneo Inverso

**Fuente:** [21]

Cuando el rayo impacta en el conductor protegido, de muy baja probabilidad de ocurrencia, el contorneo puede ocurrir desde el conductor hacia la torre, con un resultado similar al analizado en la Fig. 2.15.

## **CAPÍTULO III**

### **MODELADO DE COMPONENTES**

#### **3.1. Introducción**

El modelado de los componentes de sistemas eléctricos de transmisión, transformación, generación y distribución, son muy importantes en el caso de que se quiera analizar computacionalmente y reflejar lo más real posible el comportamiento del sistema en condiciones normales de operación y más aún el comportamiento durante perturbaciones en el sistema. Permite realizar cálculos aproximados para un mejor análisis de resultados y con ello una mejor selección de componentes eléctricos.

En baja frecuencia, el modelamiento de las líneas de transmisión, permite calcular la caída de tensión entre los extremos de la misma, pérdidas de energía por transmisión, sobretensiones por ferorresonancia y sobretensiones por el efecto ferranti en líneas de transmisión largas. En los transformadores de potencia, permite determinar las pérdidas en el núcleo y en los bobinados; similar en sistemas de generación y distribución.

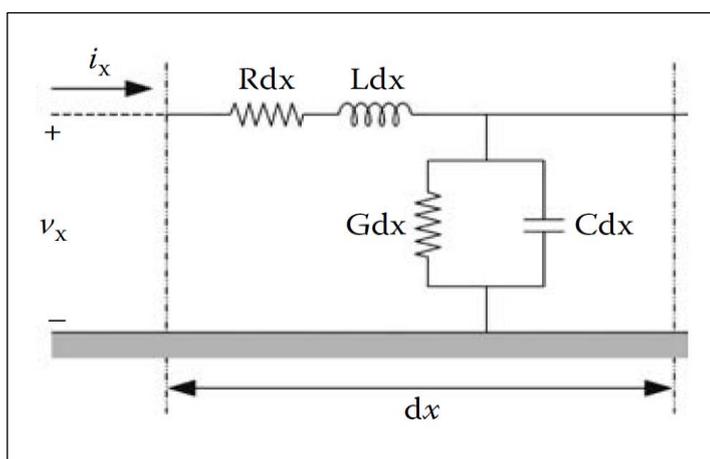
El modelamiento de los sistemas de potencia en alta frecuencia, objetivo de este capítulo permite analizar con mucha precisión los fenómenos transitorios que suceden en el sistema, sobretensiones y sobrecorrientes. Sobretensiones por energización de líneas de transmisión, energización de reactores, energización de Transformadores de Potencia, entre otros; por otro lado, permite analizar las sobretensiones y sobrecorrientes por impulsos atmosféricos. En los transformadores de potencia, un adecuado modelamiento de los parámetros, permite calcular la magnitud de la corriente de inserción durante la energización.

### 3.2. Modelado de componentes principales de líneas de transmisión

#### 3.2.1. Modelado del conductor de la Línea de Transmisión

El modelado de líneas de transmisión para el análisis de transitorios toma los parámetros representativos (R, L, G, C), constantes cuyos valores están en unidades por longitud, a partir de los cuales se calcula los valores de impedancia (Z) y admitancia (Y) a través de un análisis diferencial considerando toda la longitud de la línea uniforme.

La Fig. 3.1, muestra una longitud muy pequeña de una fase de la línea de transmisión, que representa un diferencial de toda su trayectoria con R y L como parámetros constantes longitudinales y G y C, también constantes con respecto a tierra.



**Fig. 3.1** Representación Diferencial del Conductor Aéreo

**Fuente:** [2]

Una representación en ecuaciones diferenciales de la tensión y corriente, es como sigue:

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} \quad (3.1)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

Donde R, L, G y C son parámetros de la línea, representados en unidades por longitud.

Aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones anteriores para poder representar las ecuaciones diferenciales en función de impedancia y admitancia las cuales a su vez dependerán de la frecuencia.

$$-\mathcal{L} \left\{ \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} \right\} = -\frac{\partial v_x(s)}{\partial x} = Ri_x(s) + Lsi_x(s) \quad (3.3)$$

$$-\mathcal{L}\left\{\frac{\partial i(x,t)}{\partial x}\right\} = -\frac{\partial i_x(s)}{\partial x} = Gv_x(s) + Csv_x(s) \quad (3.4)$$

Con  $s = j\omega$ , y con los parámetros dependientes de la frecuencia, las ecuaciones anteriores, se puede representar como sigue:

$$-\frac{dV_x(\omega)}{dx} = Z(\omega)I_x(\omega) \quad (3.5)$$

$$-\frac{dI_x(\omega)}{dx} = Y(\omega)V_x(\omega) \quad (3.6)$$

$Z(\omega)$  y  $Y(\omega)$ , representan la matriz de la impedancia serie y la admitancia Shunt de la Línea:

$$Z(\omega) = R(\omega) + j\omega L(\omega) \quad (3.7)$$

$$Y(\omega) = G(\omega) + j\omega C(\omega) \quad (3.8)$$

### 3.2.2. Modelado de Torre de Celosía

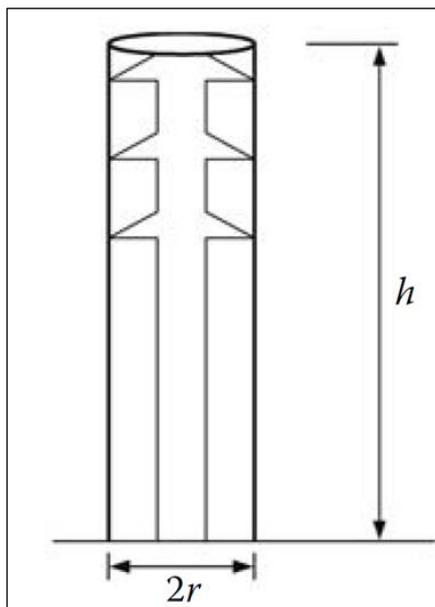
Nos centraremos en dos (02) tipos de modelados empíricos de torres de transmisión, en especial las torres de Celosía, tomando en cuenta que para líneas de transmisión diseñadas para 138 kV como la que está involucrada en este estudio. Los tipos de torres usadas son las tipo cónicas o cilíndricas.

#### a) Modelado de torres sin pérdidas

Usando la teoría de campos electromagnéticos, representando a la torre en una figura simple a la que se asemeje y asumiendo la caída de un rayo en la parte más elevada de la estructura. Wagner y Hileman usaron un modelo cilíndrico y concluyeron que la impedancia de la torre varía a medida que la onda de la sobretensión viaja a tierra. Sargent y Darveniza usaron un modelo cónico y sugirieron una forma modificada del modelo cilíndrico [10].

Los modelos mencionados presentan la misma sobretensión en todas las fases, ya que no distingue los efectos que puede existir en las sobretensiones por el recorrido que hace la onda cuando viaja por las ménsulas en impacto directo o por reflexión de la sobretensión.

## Torre Cilíndrica



**Fig. 3.2** Torre Modelo Cilíndrico

**Fuente:** [2]

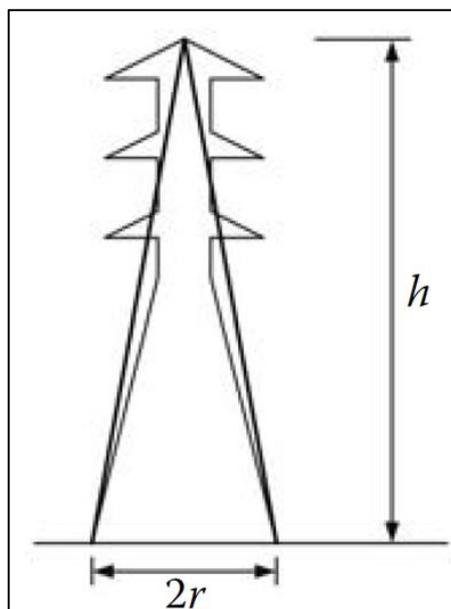
$$Z = 60 \left( \ln \left( 2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 1 \right) \quad (3.9)$$

Dónde:

$h$  = altura de la torre, en metros.

$r$  = radio de la base.

## Torre Cónica



**Fig. 3.3** Torre Modelo Cónico

**Fuente:** [2]

$$Z = 60 \ln \left( \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 + 1} \right) \quad (3.10)$$

Dónde:

$h$  = altura de la torre, en metros.

$r$  = radio de la base.

### **b) Modelo de torre, multiconductor.**

Este modelo representa cada elemento entre las crucetas de la torre como una línea multiconductora vertical, la cual puede ser reducida a un simple conductor. La sección de la torre aumenta de arriba hacia abajo.

Un ejemplo de desarrollo del modelo de torre vertical multiconductor, ha sido desarrollado por Hara y Yamamoto [10], que para esta presente investigación se resume en lo siguiente:

Las impedancias de la torre representada en la Fig. 3.4, se calcula de la manera siguiente:

$$Z_{Tk} = 60. \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h_k}{r_k} \right) - 2 \right) \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3.11)$$

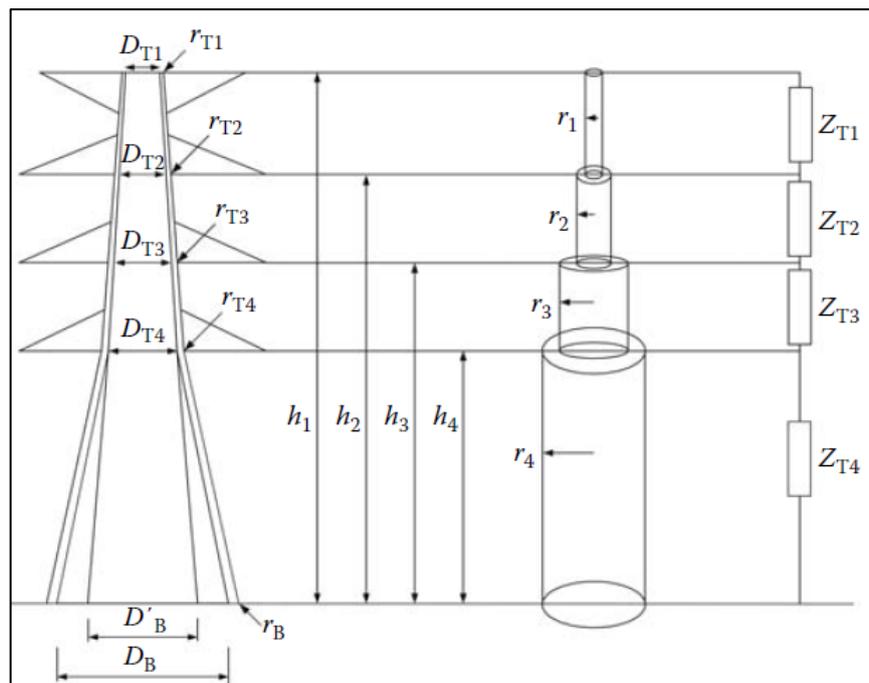
Donde:

$$r_k = 2^{1/8} \cdot \left( \sqrt[3]{r_{Tk} \cdot r_B^2} \right)^{1/4} \cdot \left( \sqrt[3]{D_{Tk} \cdot D_B^2} \right)^{3/4} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3.12)$$

El valor de impedancia está en Ohmios.

Los valores de  $h_k$ ,  $r_{Tk}$ ,  $r_B$ ,  $D_{Tk}$ , y  $D_B$  depende de la geometría de la torre en estudio.

De acuerdo a los autores de este modelo, las ecuaciones mostradas son aplicables para torres con componentes tubulares de sección circular. En caso de torres construidas con componentes de sección angular como es el caso de esta investigación, los valores de  $r_{Tk}$  y  $r_B$  deben ser remplazados por la mitad del lado de sección angular.



**Fig. 3.4** Modelo de Torre Multiconductor

**Fuente:** [2]

### c) Modelo de varios pisos

Este modelo, permite, con el uso de ecuaciones experimentales, modelar una torre de transmisión de alta tensión con resistencias eléctricas, inductancias e impedancias características, como se muestra en la Fig. 3.5.

Siendo las ecuaciones experimentales para el cálculo de las resistencias e inductancias de cada piso, las siguientes:

$$R_i = \frac{-2Z_{T1} \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} h_i, (i = 1, 2, 3) \quad (3.13)$$

$$R_4 = -2Z_{T2} \ln \sqrt{\gamma} \quad (3.14)$$

$$L_i = \alpha R_i \frac{2h}{c}, (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3.15)$$

Donde:

$Z_{T1}$  es la impedancia propia de las tres (03) secciones superiores de la torre.

$Z_{T2}$  es la impedancia propia de la sección inferior de la torre.

$h_i$  es la altura de cada sección de la torre.

$\gamma$  es el coeficiente de atenuación.

$\alpha$  es el coeficiente de amortiguamiento.

El coeficiente de atenuación es de 0.7 a 0.8, mientras que el coeficiente de amortiguamiento, normalmente es elegido como la unidad [10].

Con referencia a la investigación de Yamada [23],  $Z_{T1} = Z_{T2}$ , la cual se calcula de manera aproximada con el uso de la ecuación de Jordan:

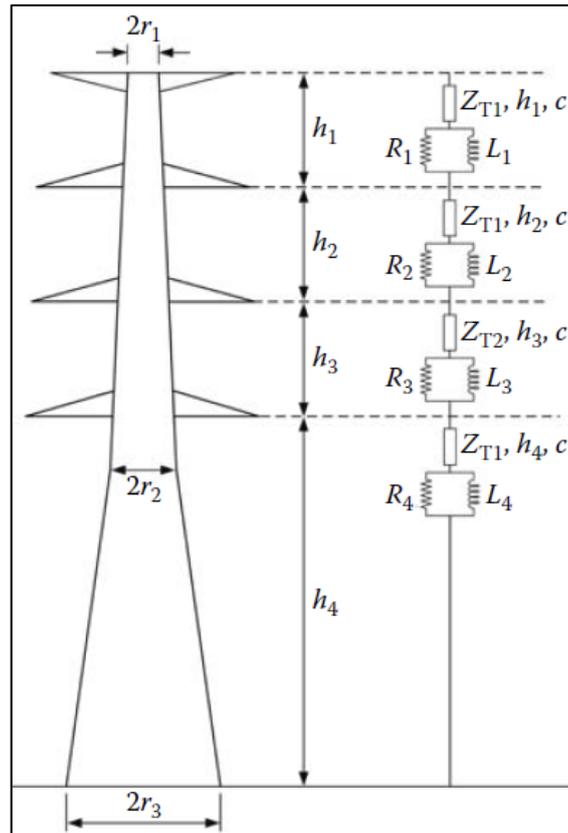
$$Z = 60 \left( \ln \left( \frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) \quad (3.16)$$

Donde:

$h$  = altura total de la torre.

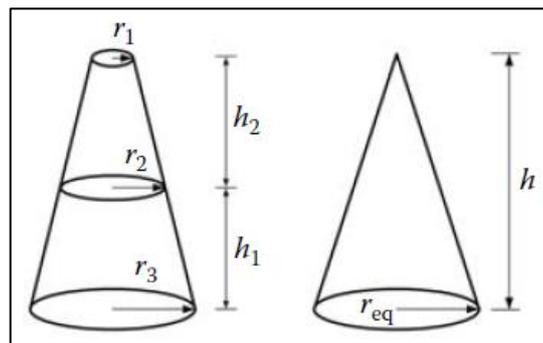
$r_{eq}$  = radio equivalente obtenido de la Fig. 3.6.

$$r_{eq} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} \quad (3.17)$$



**Fig. 3.5** Modelo multipisos de una torre de transmisión

Fuente: [2]



**Fig. 3.6** Geometría para el cálculo del radio equivalente

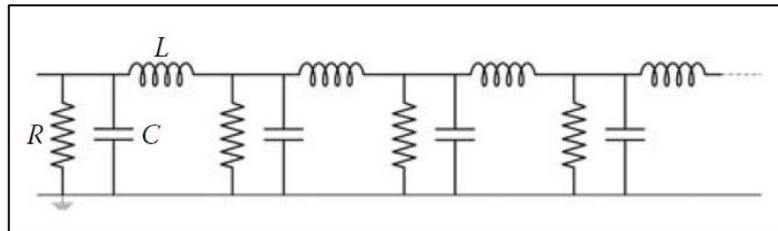
Fuente: [2]

### 3.2.3. Modelado del sistema de puesta a tierra

Existen modelos para la resistencia del aterramiento a alta y baja frecuencia, esto es de acuerdo al tipo de sobretensiones que esté sometido el sistema. Las Líneas de transmisión aéreas, frecuentemente están sometidas a sobretensiones por impulso de rayo, que por la naturaleza de las mismas son de alta o muy alta frecuencia.

**a) Modelo de parámetros distribuidos para conductor horizontal (contrapeso)**

El conductor horizontal o contrapeso es representado en la Fig. 3.7 con R y C la resistencia y capacitancia respectivamente, paralela a tierra y L es la inductancia serie.



**Fig. 3.7** Circuito Equivalente de un Contrapeso para Altas Frecuencias

**Fuente:** [2]

Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de este circuito son muy parecidas a las ecuaciones que modelan a un conductor aéreo, y es como se muestra:

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = sL \cdot I(x,s) \quad (3.18)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = (G + sC) \cdot I(x,s) \quad (3.19)$$

Los parámetros del contrapeso, se representan con las ecuaciones siguientes:

$$R = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right), \Omega \cdot m \quad (3.20)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right), H/m \quad (3.21)$$

$$C = \frac{\pi \varepsilon}{\left( \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right)}, F/m \quad (3.22)$$

Donde:

$l$  es la longitud del cable (m).

$a$  es el radio del cable (m).

$d$  es la profundidad del contrapeso (m).

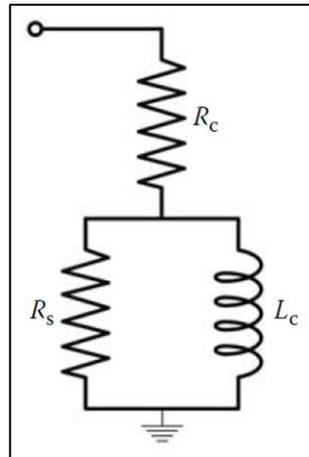
$\rho$  es la resistividad eléctrica del suelo homogéneo ( $\Omega \cdot m$ ).

$\mu_0$  es la permitividad del vacío ( $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ).

$\varepsilon$  es la permitividad del suelo (valor típico  $\varepsilon = 10\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ ).

### b) Modelo de parámetros agrupados

Este modelo es basado en resultados experimentales. La sugerencia de Bewley, tomada en esta presente investigación, sugiere que el comportamiento de los contrapesos frente a impulsos de rayo, pueden ser representados como un simple circuito equivalente [10]. Ver Fig. 3.8.



**Fig. 3.8** Circuito equivalente de un sistema de puesta a tierra

**Fuente:** [2]

Electrodo Vertical:

$$R_C = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \left( \ln \left( \frac{4l}{a} \right) - 1 \right), R_S = Z_C - R_C, L_C = 2l(Z_C - R_C),$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{4l}{a} \right) - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \quad (3.23)$$

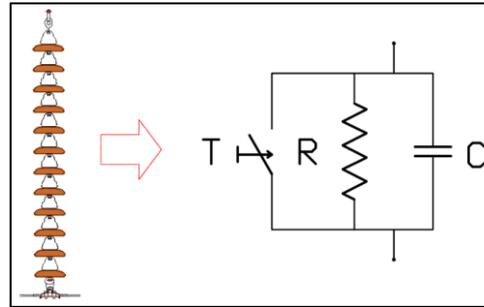
Electrodo Horizontal:

$$R_C = \frac{\rho}{\pi l} \cdot \left( \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2al}} \right) - 1 \right), R_S = Z_C - R_C, L_C = 2l(Z_C - R_C),$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2al}} \right) - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \quad (3.24)$$

#### 3.2.4. Modelado del aislamiento de una Línea de Transmisión

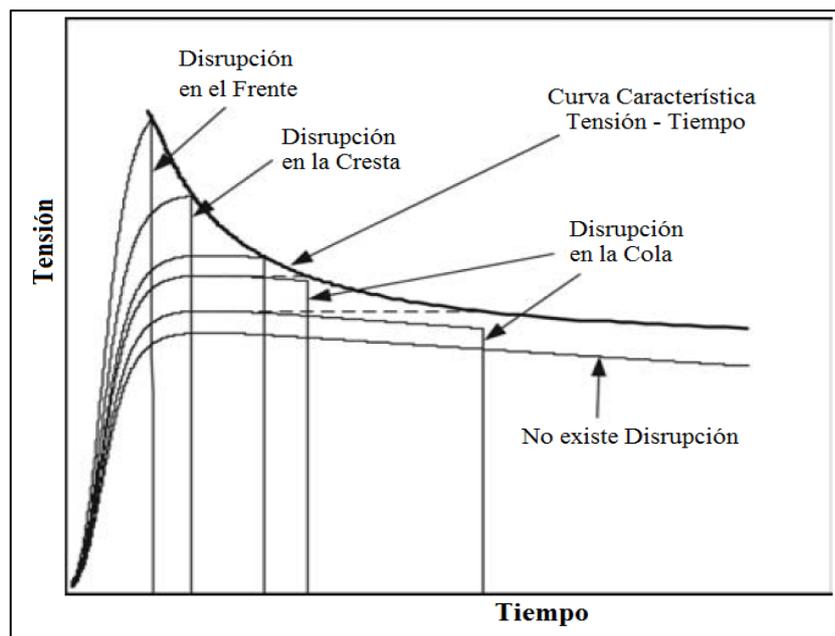
El modelado de una cadena de aisladores, se representa en la figura siguiente como un circuito RC en paralelo, R y C parámetros propios de la cadena de aisladores que son el equivalente de las resistencias y capacitancias propias de la unión de cada plato, respectivamente. T es la representación de un switch controlado por tensión.



**Fig. 3.9** Circuito Equivalente de Una Cadena de Aisladores

**Fuente:** [Elaboración propia]

El hecho de agregar al circuito RC un switch controlado por tensión, es debido a que las descargas por sobretensiones en las cadenas de aisladores, ocurren cuando tales sobretensiones son mayores al BIL de la cadena. Cuando una sobretensión de impulso sea mayor al nivel de aislamiento básico de la cadena, existirán interrupciones y en estos casos el switch se cerrará permitiendo que la descarga se dirija hacia la estructura o hacia el conductor, dependiendo del tipo de sobretensión. En la Fig. 3.10, muestra una representación del comportamiento de la cadena de aisladores, tiempo vs tensión.



**Fig. 3.10** Curva (Tensión vs Tiempo) de una Cadena de Aisladores

**Fuente:** [2]

La curva característica de la cadena de aisladores Tensión – Tiempo, es empírica, deducible a través de un número determinado de pruebas en laboratorio, permite ser de

gran ayuda para deducir cuándo ocurrirá una disrupción con la presencia de una sobretensión, tal es así que se puede afirmar lo siguiente:

Si.

- $U_I < U_{BIL}$ , No produce disrupción en la cadena de aisladores.
- $U_I > U_{BIL}$ , Produce disrupción en la cola de la onda.
- $U_I \gg U_{BIL}$ , Produce disrupción en el frente y en la cresta de la onda.

Donde:

$U_I$  es la sobretensión de impulso de rayo o manobra.

$U_{BIL}$  (Basic Insulation Level) es el nivel de aislamiento básico de la cadena de aisladores.

Las sobretensiones de frecuencia industrial, que de acuerdo a la curva Tensión – Tiempo, requieren mayor tiempo para poder generar disrupción alguna en la cadena, no es tema de análisis ya que tal tiempo es mayor al tiempo estimado de acción de los relés de protección de sobrecorriente, ya que la mayor sobretensión a frecuencia industrial que se produce en un sistema de potencia es por efecto de una falla monofásica a tierra.

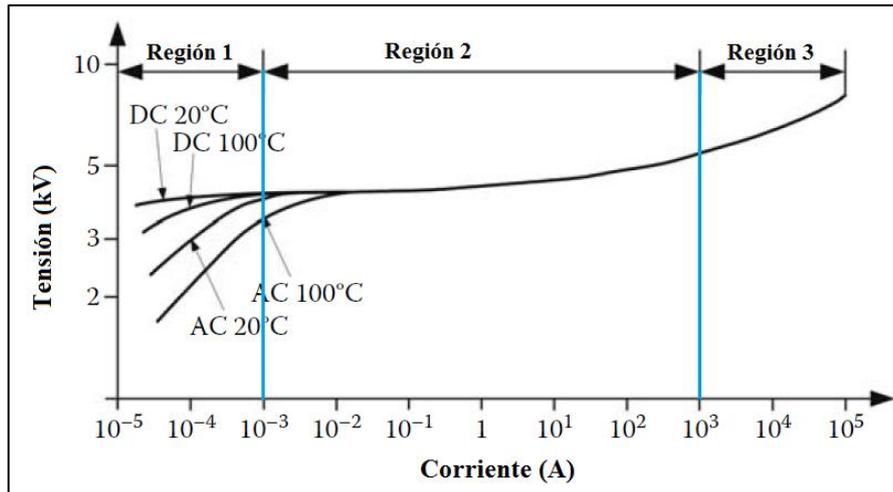
### **3.3. Modelado de los componentes principales de subestaciones**

#### **3.3.1. Modelado de la puesta a tierra**

El sistema de aterramiento de una subestación como la Subestación Local, consiste en una malla profunda a la cual se puede hacer una mejor descripción como una red de contrapesos formando una malla de  $n \times m$  con soldaduras en cada cruce y con electrodos verticales en los alrededores de la misma en las partes centrales cumpliendo algunas funciones particulares como punto de aterramiento de los pararrayos y además todos los electrodos están unidos a la malla.

#### **3.3.2. Modelado del pararrayos**

Los equipos de protección de sobretensiones sean de Carburo de Silicio (SiC) o de Óxido de Zinc (ZnO), tienen un comportamiento Tensión – Corriente (V-I), que se conoce como curva característica del pararrayos. Ver Fig. 3.11.



**Fig. 3.11** Curva V-I del Pararrayos

**Fuente:** [2]

La curva de la figura, obedece a la siguiente ecuación:

$$I = kV^\alpha \quad (3.25)$$

Donde:

$I$  es la corriente a través del pararrayos.

$V$  es la tensión aplicada al pararrayos.

$k$  es un parámetro que depende de las dimensiones de fabricación del bloque de válvulas.

$\alpha$  describe la propiedad no lineal que varía según el material utilizado en el bloque de válvulas.

Típicamente  $\alpha$  tiene un valor de 5 para el pararrayos de SiC y 30 para el de ZnO. El valor de este parámetro es variable en la característica Tensión – Corriente, siendo un máximo aproximado de 50 en la primera región de la curva decreciendo hasta llegar a valores de entre 7 – 10 en la tercera región.

Las tres regiones de la curva V- I (Tensión – Corriente), se describen a Continuación:

- Región 1  $I$  es menor a 1 mA y es principalmente capacitiva.
- Región 2  $I$  va de 1 mA a entre 1000 ó 2000 A y es principalmente resistiva.
- Región 3  $I$  va de 1 a 100 kA. Para muy altas corrientes, el comportamiento es lineal con la tensión, es decir el varistor del óxido de metal se convierte en resistencia pura.

La tabla que se muestra a continuación, de acuerdo al CIGRE, muestra una lista de directrices para representar los pararrayos de un sistema de potencia cuando se calcula los transitorios.

**TABLA N° 3.1** Comportamiento del Pararrayos frente a Transitorios

Fuente: [2]

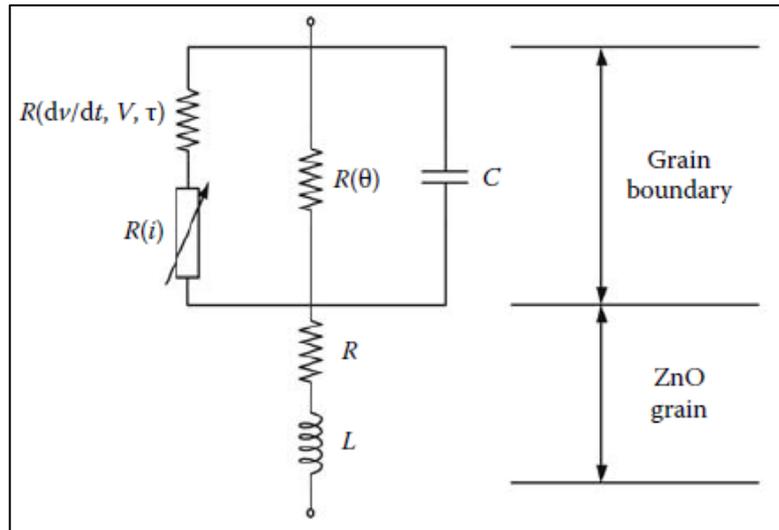
| Características del Modelo                           | Transitorios de baja Frecuencia | Transitorios de Frente Lento | Transitorios de Frente Rápido | Transitorios de Frente Muy Rápido |
|--|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Característica V - I Dependiente de la Temperatura   | Importante                      | Despreciable                 | Despreciable                  | Despreciable                      |
| Característica V - I Dependiente de la Frecuencia    | Despreciable                    | Despreciable                 | Importante                    | Muy Importante                    |
| Impedancia del bloque de válvulas del Óxido Metálico | Despreciable                    | Despreciable                 | Importante                    | Muy Importante                    |
| Inductancia del Líder a Tierra                       | Despreciable                    | Despreciable                 | Importante                    | Muy Importante                    |

#### a) Modelos para transitorios rápidos

La dinámica de la presentación del Pararrayos de Óxido Metálico, ha sido descrito a finales de los 70's. Desde entonces varios modelos han sido desarrollados para tener en cuenta un comportamiento dependiente de la frecuencia. Básicamente, estos modelos incorporan una resistencia no lineal teniendo en cuenta la característica V – I del material del varistor del Óxido Metálico, e incorporan un inductor para incluir el comportamiento dependiente de la frecuencia.

##### - Modelo CIGRÉ

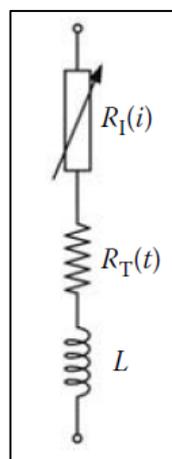
El modelo base para el descargador de sobretensiones de óxido metálico y en especial para los de ZnO, es el que se muestra en la Fig. 3.12, que permite describir el comportamiento dinámico, donde la resistencia dependiente de la corriente en estado estable, es subdividida en resistencia de arranque  $R(\frac{dV}{dt}, V, \tau)$ , resistencia dependiente de la corriente  $R(i)$ , y resistencia dependiente de la temperatura  $R(\theta)$ ; en adición a ello la capacitancia entre las capas granulares (C), todos los parámetros mencionados representan el comportamiento en baja frecuencia, y están relacionados con la zona de límite granular, mientras que R y L representan la zona granular de ZnO.



**Fig. 3.12** Representación de un Circuito de un Pararrayos con el Modelo CIGRÉ

**Fuente:** [2]

Este modelado más tarde fue simplificado y adoptado por el CIGRE. La resistencia dependiente de la temperatura  $R(\theta)$  y la capacitancia de las capas granulares ( $C$ ), pueden ser despreciadas, la resistencia dependiente de la corriente  $R(i)$  y la resistencia ( $R$ ) del ZnO, pueden ser combinadas y representadas por una nueva resistencia  $R_I(i)$ . Entonces el circuito equivalente es representado como un circuito lineal conformado por la resistencia no lineal dependiente de la corriente  $R_I(i)$ , la resistencia lineal de arranque  $R_T$  y la inductancia del camino de la corriente  $L$ . Ver Fig. 3.13.



**Fig. 3.13** Circuito Reducido del Pararrayos con el modelo CIGRÉ

**Fuente:** [2]

La resistencia  $R_I$  puede ser determinada de la tensión de descarga para corrientes de  $8/20 \mu s$  con varios valores pico, la resistencia de arranque puede ser obtenida de una lista de curvas.

El parámetro  $L$  puede ser representado como una inductancia o como una línea ideal con una impedancia de descarga y un tiempo de viaje estimado de la siguiente manera.

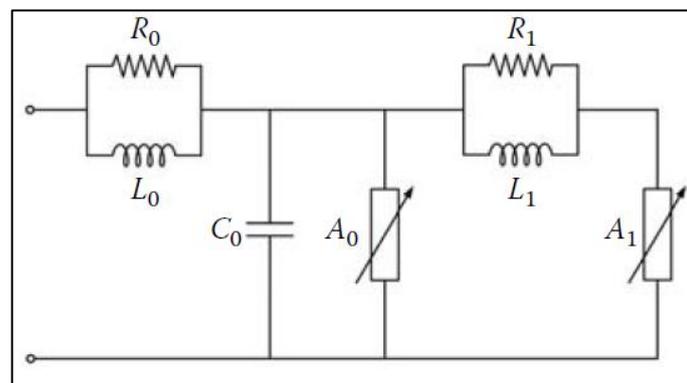
Para pararrayos exteriores Inductancia:  $L=1\mu H/m$  de longitud del pararrayos.

Línea Ideal:  $Z=300 \Omega$ , tiempo de viaje =  $3.33ns/m$  de longitud del pararrayos.

#### - Modelo IEEE

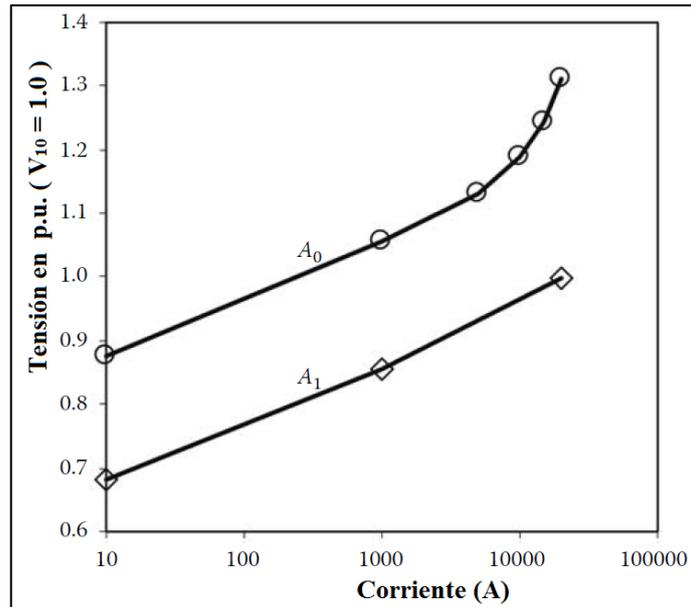
Este modelo entre todos sus parámetros incorpora dos resistencias no lineales independientes del tiempo ( $A_0$  y  $A_1$ ), un par de inductancias lineales ( $L_0$  y  $L_1$ ) paralelas a un par de resistencias lineales ( $R_0$  y  $R_1$ ) y una capacitancia lineal  $C_0$ . La característica  $V - I$  de  $A_1$  es ligeramente menor que la curva de  $8/20 \mu s$  mientras que  $A_0$  es 20% a 30% más alta.  $L_1$  y  $R_1$  forman un filtro pasa bajas que ve un voltaje en caída a través de él. Una inductancia agrupada de aproximadamente  $1 \mu H/m$  también deber ser incluida para la descarga del líder a tierra en serie con el modelo. Este modelo fue propuesto por D.W. Durbak y adoptado por el IEEE. Ver Fig. 3.14.

Las curvas características  $V - I$  de  $A_0$  y  $A_1$  se muestran en la Fig. 3.15 y los valores de las mismas se muestran en la **TABLA N° 3.2**, donde los valores de tensión están en por unidad con base  $V_{10}$



**Fig. 3.14** Circuito Equivalente de un Pararrayos con el Modelo IEEE

**Fuente:** [2]



**Fig. 3.15** Curva  $A_0$  y  $A_1$

**Fuente:** [2]

**TABLA N° 3.2** Valores Típicos de  $A_0$  y  $A_1$

**Fuente:** [2]

| Current (kA) | Voltage (per unit of V10) |       |
|--------------|---------------------------|-------|
|              | $A_0$                     | $A_1$ |
| 0.01         | 0.875                     | 0.681 |
| 1            | 1.056                     | 0.856 |
| 5            | 1.131                     |       |
| 10           | 1.188                     |       |
| 15           | 1.244                     |       |
| 20           | 1.313                     | 1.000 |

$V_{10}$  es la tensión de descarga para una corriente de 10 kA, 8/20  $\mu$ s, en kV.

$V_{ss}$  es la tensión de descarga de maniobra de 10 kA, 8/20  $\mu$ s, en kV, asociado a corriente de descarga de maniobra, en kV.

Para calcular los parámetros del circuito de la Fig. 3.14, se pueden usar las fórmulas siguientes:

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (3.26)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (3.27)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (3.28)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (3.29)$$

$$C_0 = 100 \frac{d}{n} (pF) \quad (3.30)$$

Donde:

$d$  es la altura del pararrayos, en m.

$n$  es la cantidad de columnas paralelas de los discos del óxido metálico.

### 3.3.3. Modelado del Transformador de Potencia en Alta Frecuencia

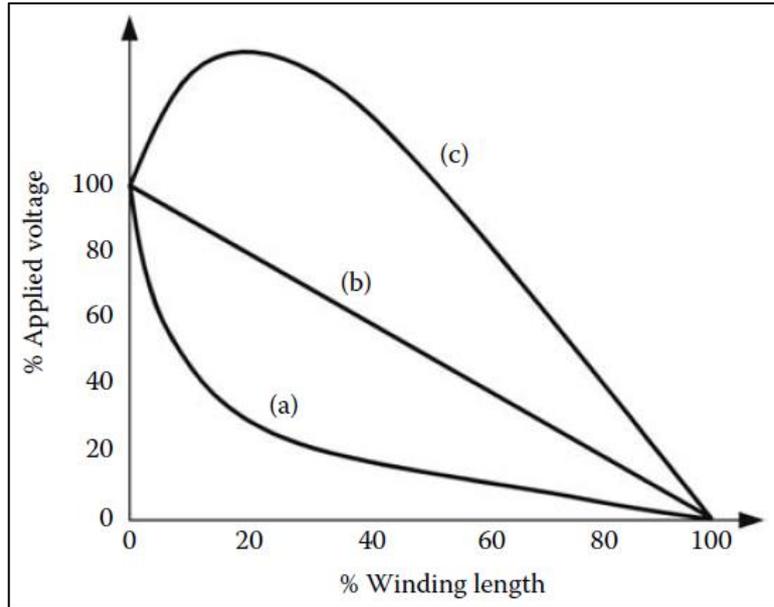
Los transformadores de potencia, son comúnmente estudiados como una caja gris, para el cual se consideran modelos internos. En la Fig. 3.17, se muestra un modelo típico de representación interna de un devanado de transformador de potencia.

La conducta del impulso de propagación en diferentes periodos de tiempo, puede ser descrito por curvas de tensión – distribución.

Donde:

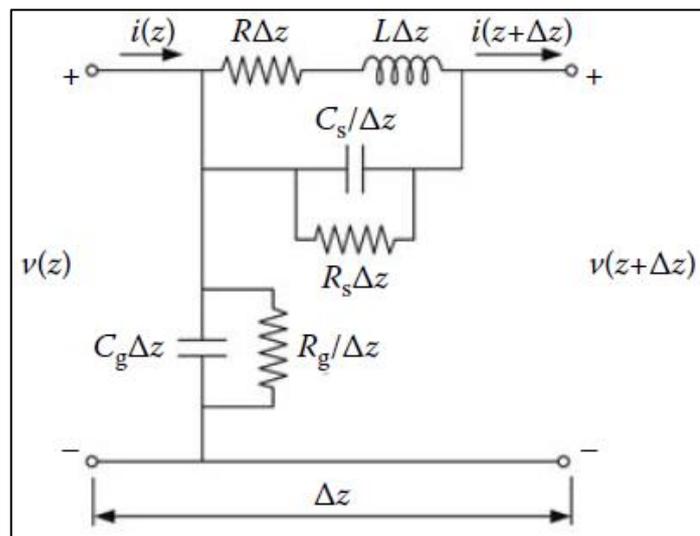
- a) Distribución de Tensión Inicial: al inicio del fenómeno (frente de onda), las capacitancias del circuito son predominantes produciendo distribución de tensiones no uniformes.
- b) Distribución de Tensión Final: al final del transitorio (en la cola de la onda), las resistencias del circuito son predominantes y esto hace que resulte en una distribución de tensión uniforme al final del fenómeno.
- c) Distribución de Tensión Transitoria: en el periodo comprendido entre los tiempos descrito en a) y b), interactúan la energía eléctrica y la energía magnética almacenada en las capacitancias e inductancias del circuito desarrollado.

La distribución de tensiones en el circuito descritos en a), b) y c), se muestran en la Fig. 3.16.



**Fig. 3.16** Distribución del Impulso de Tensión

Fuente: [2]



**Fig. 3.17** Circuito Equivalente en Por Unidad del Transformador de Potencia

Fuente: [2]

$L$  = Inductancia serie del devanado.

$R$  = Resistencia serie del devanado.

$C_s$  = Capacitancia serie del devanado.

$C_g$  = Capacitancia a Tierra del devanado.

$R_g$  = Perdidas de la capacitancia.

En el modelo de la Fig. 3.17, puede ser descrito como representación de parámetros distribuidos, usando las teorías de líneas de transmisión o como conexión escalera de segmentos de parámetros agrupados. Los últimos modelos pueden ser ingresados a programas de simulación de transitorios (ejemplo, EMTP).

En otras investigaciones, tomadas como referencia en [2], se concluye que el modelo de parámetros agrupar puede dar resultados adecuados para transitorios rápidos de hasta 1 MHz. Sin embargo, para frecuencias por encima de 1 MHz, el modelo de parámetros distribuido, sería el más adecuado por brindar mejores resultados.

## **CAPÍTULO IV**

### **SIMULACIONES**

#### **4.1. Introducción**

Las simulaciones consisten en reflejar el comportamiento de los elementos de la subestación 220/60-138/10 kV, que se muestra en el diagrama unifilar (Fig. 4.1), vista de planta (Fig. 4.2) y vista lateral (Fig. 4.3). Los elementos principales han sido modelados considerando sus parámetros principales, los mismos que serán considerados en el software de simulación para analizar las sobretensiones que se pueden producir en los equipos. Las sobretensiones en las que se prestará mayor atención serán a las de maniobra y las atmosféricas.

Las simulaciones son realizados usando el programa ATP (Alternative Transient Program) una versión libre del EMTP (Electromagnetic Transient Program), para evaluar los elementos principales de la Subestación en estudio y verificar su comportamiento.

La subestación 220/138-60/ 10 kV, en análisis, operará inicialmente en 220/60/10 kV y en una etapa posterior lo hará en 220/138/10 kV. Por tal razón, los equipos de patio que estarán al lado secundario del transformador de potencia, en la etapa inicial, de acuerdo a su tensión de operación serán de 60 kV y 138 kV, es decir, solo los transformadores de tensión y los pararrayos serán para 60 kV y los otros equipos serán para 138 kV, pero, estos últimos operarán inicialmente en 60 kV. Posteriormente, la subestación operará en 220/138/10 kV y para ello, se cambiarán los transformadores de tensión y los pararrayos de 60 kV por otros de 138 kV.

Para las simulaciones, las curvas características VI de los pararrayos para proteger a los equipos 220 kV, 138 kV y 60 kV han sido tomadas de la página oficial de ArresterWorks.com [24].

Los equipos que operarán en cada etapa, por su nivel de tensión, se muestran a continuación.

### **Etapas Iniciales**

- Transformador de Potencia 220/60/10 kV.
- Interruptor de Potencia 220 kV.
- Transformador de Corriente 220 kV.
- Pararrayos 220 kV.
- Seccionador de Barra 220 kV.
- Interruptor de Potencia 138 kV.
- Transformador de Corriente 138 kV.
- Seccionador de Línea 138 kV.
- Trampa de Onda 138 kV.
- Transformador de Tensión 60 kV.
- Pararrayos 60 kV.

### **Etapas Definitivas**

- Transformador de Potencia 220/138/10 kV.
- Interruptor de Potencia 220 kV.
- Transformador de Corriente 220 kV.
- Pararrayos 220 kV.
- Seccionador de Barra 220 kV.
- Interruptor de Potencia 138 kV.
- Transformador de Corriente 138 kV.
- Seccionador de Línea 138 kV.
- Trampa de Onda 138 kV.
- Transformador de Tensión 138 kV.

- Pararrayos 138 kV.

De los equipos principales mencionados, solo se modelarán aquellos que tengan efecto considerable en el análisis de sobretensiones (Pararrayos, Transformador de Tensión, Interruptor y Transformador de Potencia).

#### **4.1.1. Planos y Diagramas de la Subestación 220/60-138/10 kV**

La Fig. 4.1, muestra el diagrama unifilar de la subestación en estudio. En dicho diagrama se muestran los datos técnicos principales de cada componente, además, que la subestación en análisis, se conecta a la barra de 220 kV de una subestación existente en operación

La Fig. 4.2, muestra la vista de planta de la subestación. Se puede apreciar, que está ubicada contigua a una subestación existente en operación.

La Fig. 4.3, muestra la vista de perfil de la subestación. Muestra dos (02) niveles de plataformado.

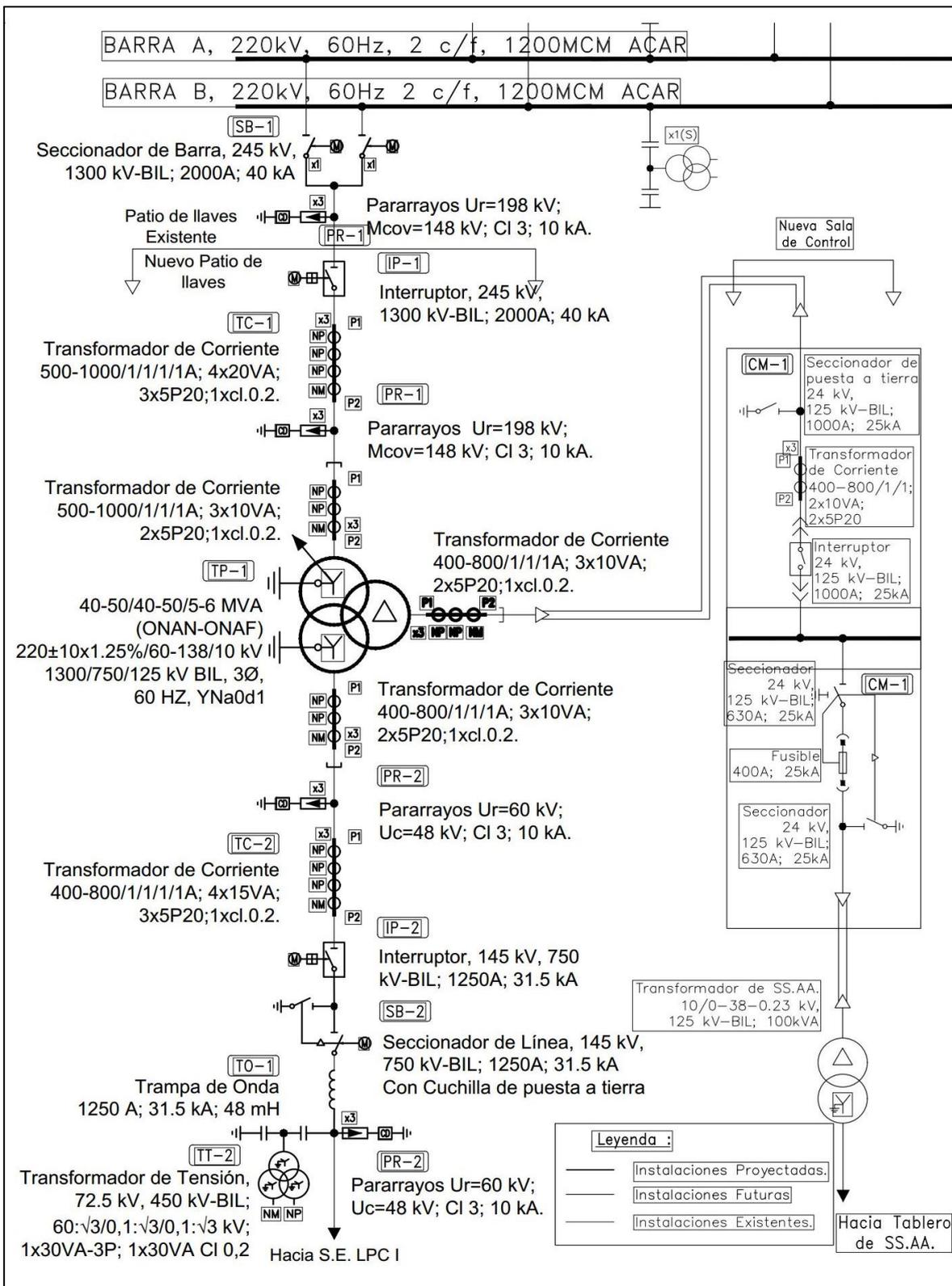


Fig. 4.1 Diagrama Unifilar de la subestación 220/60-138/10 kV en análisis

Fuente: [Elaboración propia]

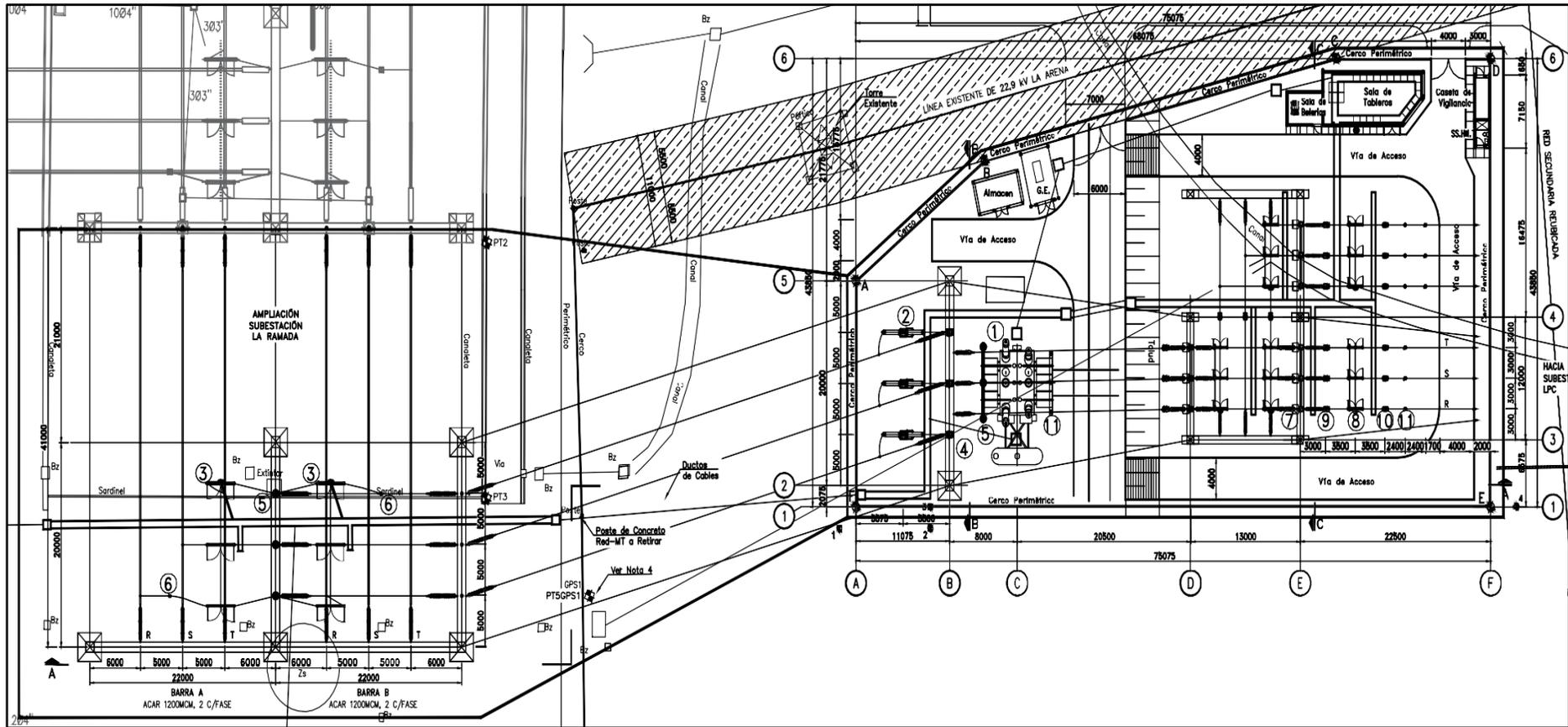


Fig. 4.2 Vista de Planta de la subestación 220/60-138/10 kV en análisis

Fuente: [Elaboración propia]

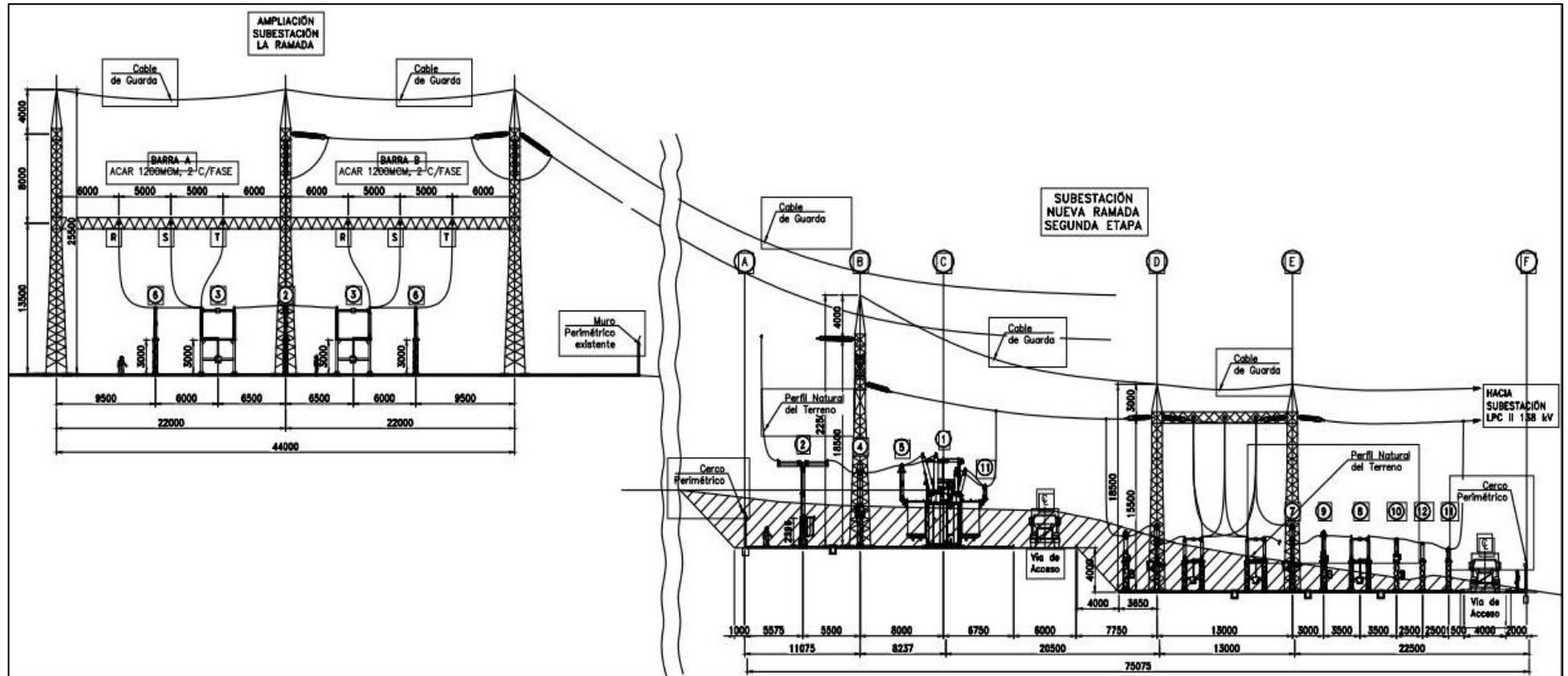


Fig. 4.3 Vista de Corte de la subestación 220/60-138/10 kV en análisis

Fuente: [Elaboración propia]

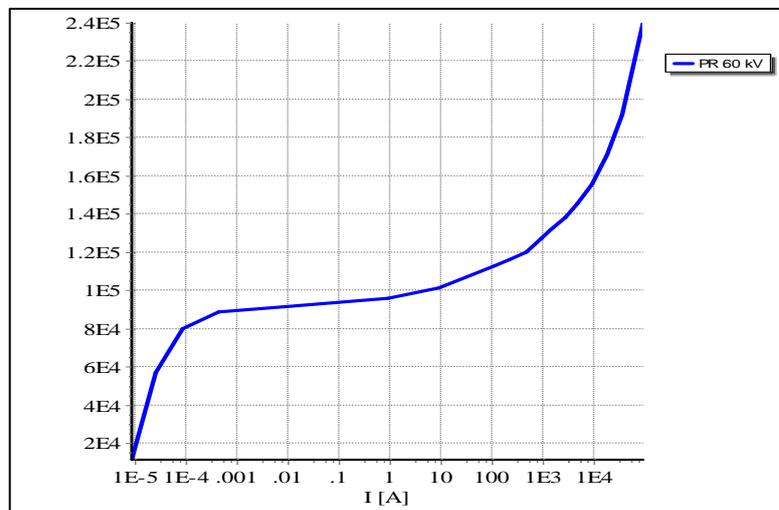


**TABLA N° 4.1** Valores de impedancia del Transformador de Tensión en 60 kV

**Fuente:** [Elaboración propia]

| Component: RLCY3 |         |       |
|------------------|---------|-------|
| Attributes       |         |       |
| DATA             | UNIT    | VALUE |
| L_1              | mH      | 48    |
| C_1              | $\mu$ F | 0.025 |
| R_2              | Ohm     | 0     |
| L_2              | mH      | 48    |
| C_2              | $\mu$ F | 0.025 |
| R_3              | Ohm     | 0     |
| L_3              | mH      | 48    |
| C_3              | $\mu$ F | 0.025 |

Los valores de las capacitancias del transformador de tensión en 60 kV han sido tomados de la referencia [18] . Además, cuenta con bobina de onda portadora.



**Fig. 4.5** Curva V-I, Pararrayos PR60-1 y PR60-2

**Fuente:** [Elaboración propia]

Los valores de característicos de la curva V-I del pararrayos en 60 kV de la subestación en análisis, son datos experimentales publicados en la referencia [19].

Line/Cable Data: LT138

Model Data Nodes

System type  
 Name: LT138  Template  
 Overhead Line  Transposed  
 Auto bundling  
 Skin effect  
 Segmented ground  
 Real transf. matrix  
 #Ph: 4  
 Units:  
 Metric  
 English

Standard data  
 Rho [ohm\*m] 500  
 Freq. init [Hz] 0.005  
 Length [km] 70  
 Set length in icon

Model  
 Type:  
 Bergeron  
 PI  
 JMarti  
 Semlyen  
 Noda

Data  
 Decades 10 Points/Dec 10  
 Freq. matrix [Hz] 10000 Freq.  $\omega$ S [Hz] 60  
 Use default fitting

**Fig. 4.6** Modelo de la Línea de Transmisión

**Fuente:** [Elaboración propia]

**TABLA N° 4.2** Tabla de Datos Propios de las Torres de la Línea de Transmisión

**Fuente:** [Elaboración propia]

Line/Cable Data: LT138

Model Data Nodes

|   | Ph.no. | Rin  | Rout   | Resis       | Horiz | Vtower | Vmid  |
|---|--------|------|--------|-------------|-------|--------|-------|
| # |        | [cm] | [cm]   | [ohm/km DC] | [m]   | [m]    | [m]   |
| 1 | 1      | 0    | 1.1315 | 0.1102      | -3.55 | 23.5   | 15.05 |
| 2 | 2      | 0    | 1.1315 | 0.1102      | 3.55  | 20.75  | 12.3  |
| 3 | 3      | 0    | 1.1315 | 0.1102      | -4.05 | 18     | 9.55  |
| 4 | 4      | 0.5  | 0.645  | 0.35        | 0     | 29.75  | 21.3  |

The screenshot shows the BCTRAN software interface with the following data:

**Structure**

- Name: TP\_220\_138\_1
- Number of phases: 3
- Number of windings: 3
- Type of core: Other
- Test frequency [Hz]: 60
- AR Output  Auto-add nonlinearities

**Ratings**

|                   | Primary | Secondary | Tertiary |
|-------------------|---------|-----------|----------|
| L-L voltage [kV]  | 220     | 60        | 10       |
| Power [MVA]       | 21.74   | 21.74     | 6        |
| Connections       | Y       | Y         | D        |
| Phase shift [deg] |         | 0         | 150      |

Ext. neutral connections

**Factory tests**

Open circuit | Short circuit

Zero sequence data available

**positive sequence**

|         | Imp. (%) | Pow. (MVA) | Loss (kW) |
|---------|----------|------------|-----------|
| Prim-Se | 7.609    | 21.74      | 90.44     |
| Prim-Te | 2.016    | 6          | 25        |
| Sec-Te  | 4.2      | 6          | 21        |

**Fig. 4.7** Datos principales del transformador de potencia en operación 220/60/10 kV – Modelo BCTRAN

**Fuente:** [Elaboración propia]

**a) Desde el Extremo Remoto (Subestación 2)**

En esta etapa de operación (60 kV), no se puede energizar la línea de transmisión desde el extremo remoto, ya que el extremo remoto consiste en una carga.

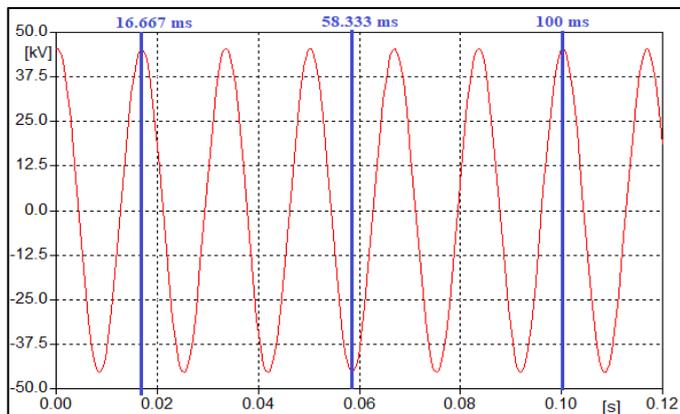
**b) Desde el Extremo Local (Subestación 1)**

En el circuito de la Fig. 4.4, la línea de transmisión está desenergizada y se energizará desde el extremo local con el interruptor IP138-1. Para poder energizar y re-energizar la línea de transmisión en vacío, con fines prácticos, se ha implementado un interruptor de potencia, controlado por tiempo.

Tratando de conseguir las mayores sobretensiones de maniobra, se le ha dado tiempos de operación al interruptor IP138-1 de tal manera que el equipo cierra y apertura en el valor pico de senoidal. Por ello, se le ha dado los siguientes tiempos:

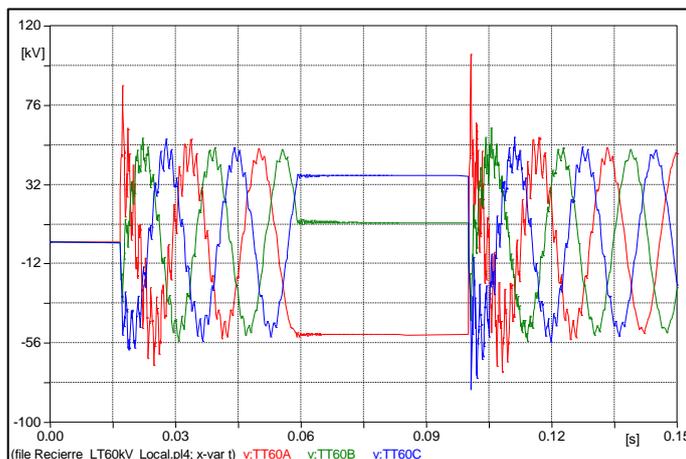
- 1 tiempo de cierre = 16,67 ms.
- 2 tiempo de apertura = 58.33 ms.
- 3 tiempo de re-cierre = 100.00 ms.
- 4 tiempo de apertura = mayor a 1 s.

En la Fig. 4.8, se muestra la tensión de operación normal de la fase A, y de ello se puede apreciar que los tiempos de maniobra del interruptor, corresponden a valores pico de tensión.



**Fig. 4.8** Tiempos de Maniobra

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.9** Sobretensiones en los bornes del TT60-1, por energización y re-energización local de la L.T.

**Fuente:** [Elaboración propia]

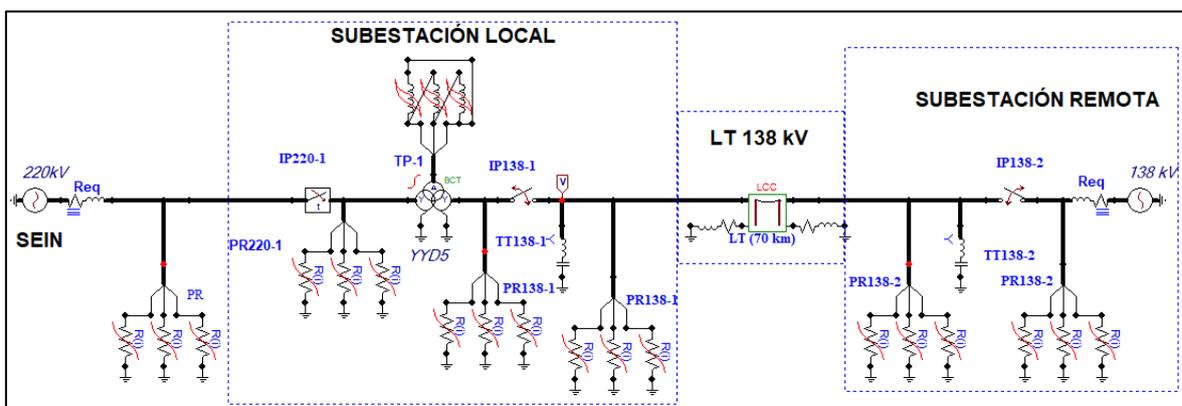
La sobretensión que aparece en los bornes del interruptor de potencia una vez energizado en vacío la Línea de Transmisión, alcanza un valor de unos 87 kVp y, al re-energizar la línea, alcanza unos 104 kVp, como se muestra en la Fig. 4.9.

#### 4.2.2. Energización y Re-energización de la Línea de Transmisión en Vacío – 138 kV

En una etapa definitiva, la subestación en estudio tendrá como tensiones de operación 220/138/10 kV, el lado secundario del transformador de potencia, operaría en 138 kV, además en el extremo remoto de la subestación local, se habrán implementado centrales hidroeléctricas.

Por fines prácticos, se ha tomado un equivalente Thévenin con la base de datos del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), en el punto de conexión de la subestación en estudio al SEIN (220 kV) y también se ha tomado un equivalente Thévenin en la subestación remota, 138 kV.

La Fig. 4.10, muestra el circuito equivalente a analizar, siendo la subestación local la subestación en estudio. Solo se muestran los equipos, cuyas características eléctricas de los mismos, podrían influir en los transitorios electromagnéticos.



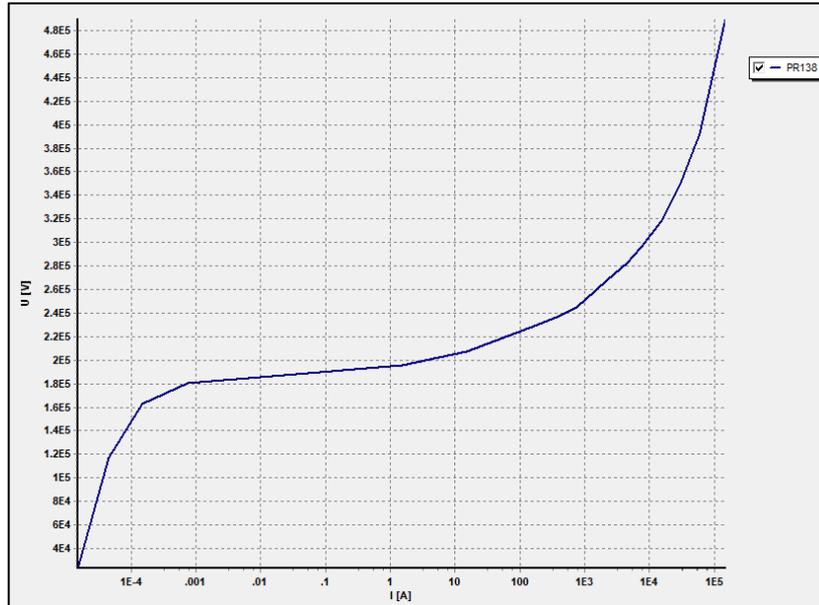
**Fig. 4.10** Circuito Equivalente para las sobretensiones de Maniobra en 138 kV

**Fuente:** [Elaboración propia]

Los tiempos de maniobra, serán los mismos que se describe la sección b) y que se muestran en la Fig. 4.8.

A continuación, se muestran los parámetros eléctricos de los diferentes equipos que influyen en el análisis de las sobretensiones de impulso de maniobra en 138 kV.

Los parámetros eléctricos de la línea de transmisión, se muestran en el análisis de sobretensiones de maniobra en 60 kV, por ello no se mostrará en esta parte de la investigación.



**Fig. 4.11** Curva V-I de los Pararrayos en 138 kV (PR138-1 y PR138-2)

**Fuente:** [Elaboración propia]

Los valores de características de la curva V-I del pararrayos en 138 kV de la subestación en análisis, son datos experimentales publicados en la referencia [19].

**TABLA N° 4.3** Valores de impedancia del Transformador de Tensión en 138 kV (TT138-1 y TT138-2)

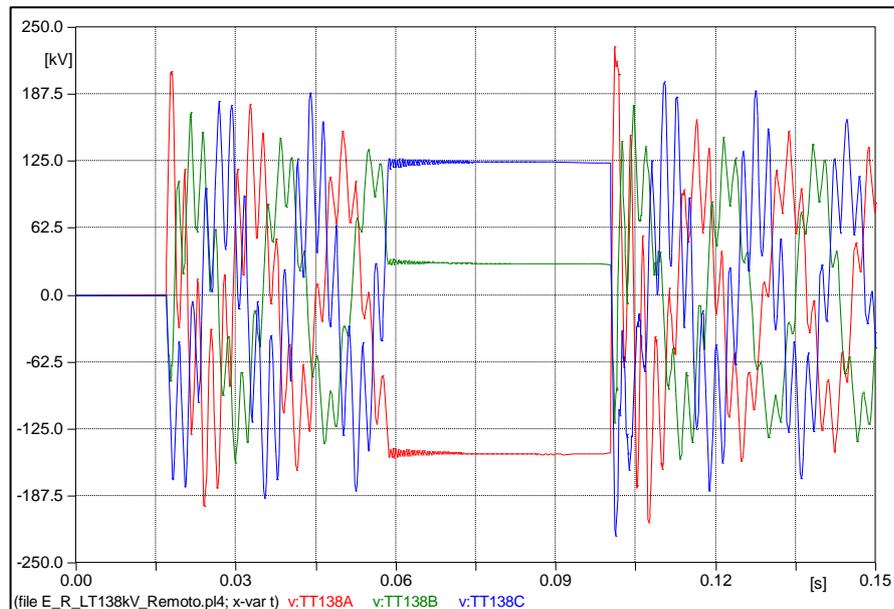
**Fuente:** [Elaboración propia]

| Component: RLCY3 |      |        |
|------------------|------|--------|
| Attributes       |      |        |
| DATA             | UNIT | VALUE  |
| L_1              | mH   | 48     |
| C_1              | μF   | 0.0129 |
| R_2              | Ohm  | 0      |
| L_2              | mH   | 48     |
| C_2              | μF   | 0.0129 |
| R_3              | Ohm  | 0      |
| L_3              | mH   | 48     |
| C_3              | μF   | 0.0129 |

Los valores de las capacitancias del transformador de tensión en 138 kV han sido tomados de la referencia [18].

### a) Desde el extremo remoto (subestación Remota)

En el circuito de la Fig. 4.10, la línea de transmisión está desenergizada y se energizará y re-energizará desde el extremo remoto con el interruptor controlado por tiempo IP138-2.



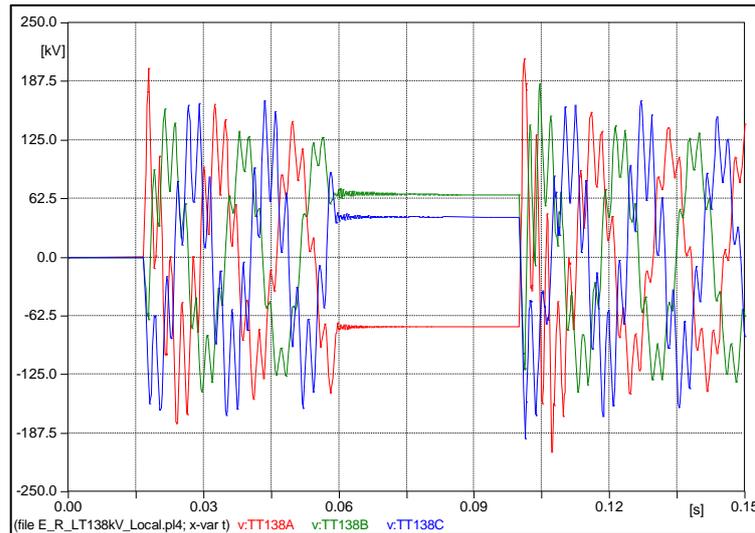
**Fig. 4.12** Sobretensión de Maniobra Remota en los Equipos de 138 kV de la Subestación Local

**Fuente:** [Elaboración propia]

La sobretensión que aparece en los bornes de los equipos de 138 kV de la subestación local, al energizar la Línea de Transmisión en vacío, con una tensión nominal de 138 kV, alcanza un valor de unos 208 kVp, y al re-energizar la línea, alcanza 232 kVp, como se muestra en la Fig. 4.12.

### b) Desde el extremo local (Subestación 1)

Para este caso, consideraremos un nuevo caso en el que el circuito de la Fig. 4.10, la línea de transmisión está desenergizada y se energizará y re-energizará desde el extremo local con el interruptor controlado por tiempo IP138-1.



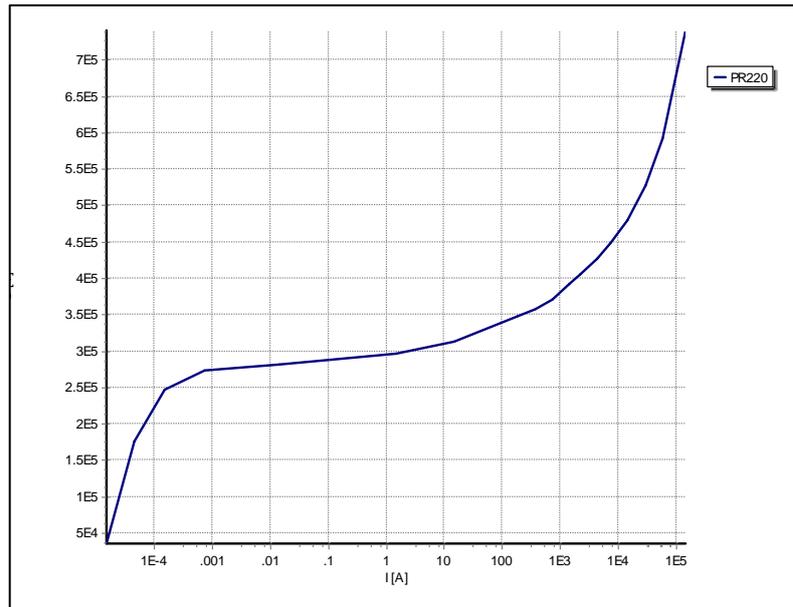
**Fig. 4.13** Sobretensión de Maniobra local en los Equipos de 138 kV de la Subestación Local

**Fuente:** [Elaboración propia]

La sobretensión que aparece en los bornes de los equipos de 138 kV de la subestación local, al energizar la Línea de Transmisión, en vacío, con una tensión nominal de 138 kV, alcanza un valor de unos 202 kVp y, al re-energizar la línea, alcanza unos 212 kVp, como se muestra en la Fig. 4.13.

#### **4.2.3. Energización y Re-energización del transformador de potencia y de la Línea de Transmisión conectados, en Vacío – 220 kV.**

La energización en vacío del transformador de potencia, no conlleva a sobretensiones representativas como las sobretensiones que se producen al energizar una línea de transmisión en vacío y en particular la energización desde el extremo remoto. Debido a ello se ha considerado un caso particular de análisis. El cual consiste en la energización del transformador de potencia, estando éste conectado a la línea de transmisión en vacío. Es decir, transformador de potencia y línea de transmisión como un solo elemento.

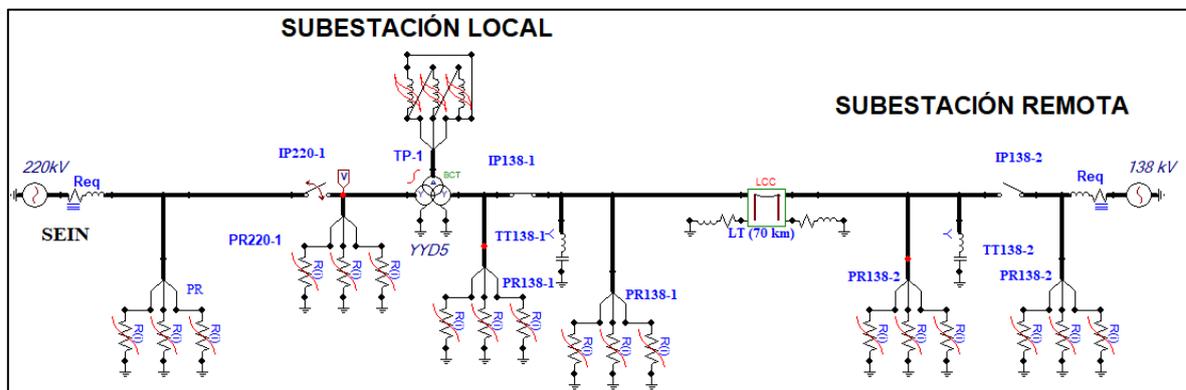


**Fig. 4.14** Curva V-I del Pararrayos en 220 kV

**Fuente:** [Elaboración propia]

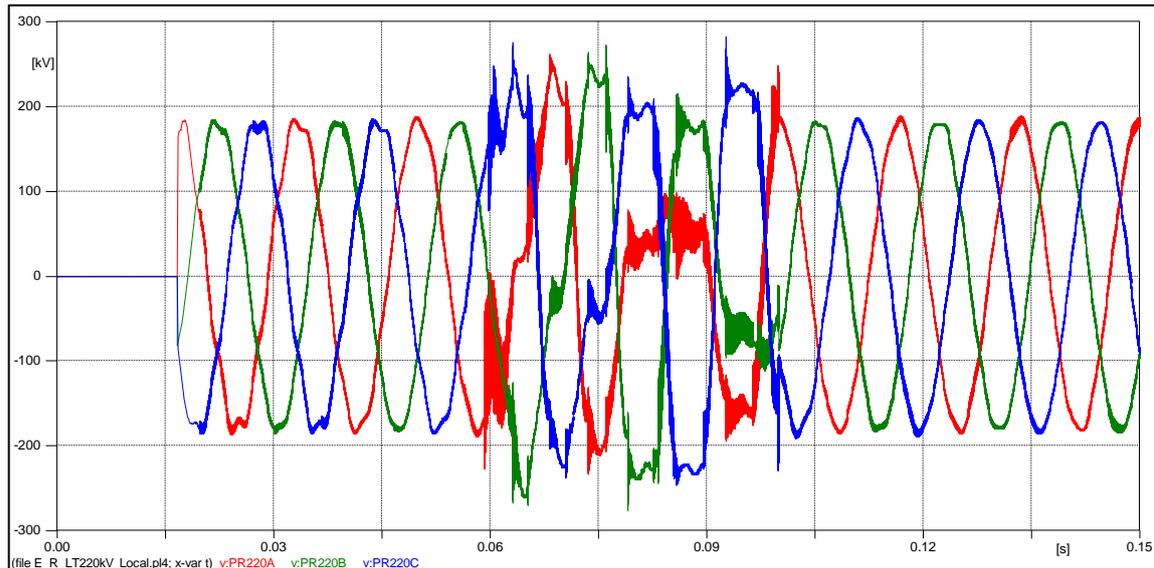
Los valores de características de la curva V-I del pararrayos en 220 kV de la subestación en análisis, son datos experimentales publicados en la referencia [19].

En el siguiente circuito, el transformador de potencia está conectado con la línea de transmisión, estando la línea desconectada desde la subestación remota. Este bloque Transformador – Línea de Transmisión, se energiza maniobrando el interruptor IP 220 – 1 de la subestación local.



**Fig. 4.15** Circuito de energización del Transformador de Potencia y Línea de Transmisión

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.16** Sobretensiones en el devanado de 220 kV del Transformador de Potencia, debido a la energización del mismo

**Fuente:** [Elaboración propia]

El valor de las sobretensiones en las fases del lado primario, debido a la energización del transformador de potencia, alcanza unos 282 kVp.

### 4.3. Simulaciones a Impulso de Rayo

Los casos a analizar de los impulsos de rayo son los siguientes:

- Impulso en la Punta de la estructura (mayor probabilidad de ocurrencia).
- Impulso el cable de guarda a la mitad del vano.
- Impulso en el conductor a la mitad del vano.

Además, como ya es conocido que los valores de las sobretensiones de rayo, van disminuyendo de amplitud a medida que se propagan a través de las líneas de transmisión, se analizarán los tres casos mencionados a una distancia no mayor de un (01) km de la subestación Local. Por tal razón es que se ha considerado que los análisis de los impulsos sean a 2 veces el vano promedio, para el caso del impulso en la punta de la estructura y a 2.5 veces el vano promedio para el caso de impulso a la mitad de vano, todo ello a partir de la torre terminal. El vano promedio tiene un valor aproximado de 360 m.

#### 4.3.1. Análisis del sistema en 60 kV

El análisis en 60 kV, corresponde a la operación inicial de la subestación Local. En este primer caso simularemos el efecto que produce el impulso de rayo en la línea de transmisión que une la Subestación Local y la Subestación remota. En tal caso se ha

considerado que la descarga se produce en la punta de una estructura que está a 720 m de la torre terminal y para el caso que el impulso de rayo cae en la mitad del vano ya sea en el conductor o en el cable de guarda, el impacto será a 900 m de distancia de la torre terminal.

Las corrientes de impulso de rayo que se desea analizar serán aquellas con una probabilidad de 5% y 1% de acuerdo a la probabilidad aplicable de Anderson y Erikson cuyos valores son, 96 kA y 182 kA respectivamente. La forma de onda del impacto de rayo, será la estándar de acuerdo a la IEC, 1,2/50 uS para el impacto de 96 kA y 2/50 uS para la descarga de 182 kA.

El circuito de simulación que se muestra en la Fig. 4.17, muestra las torres numeradas T1, T2 y T3, cercanas a la subestación en estudio, T1 es la torre terminal. En la torre T3 y en el vano adyacente derecho, es donde se analizarán los impulsos de rayos.

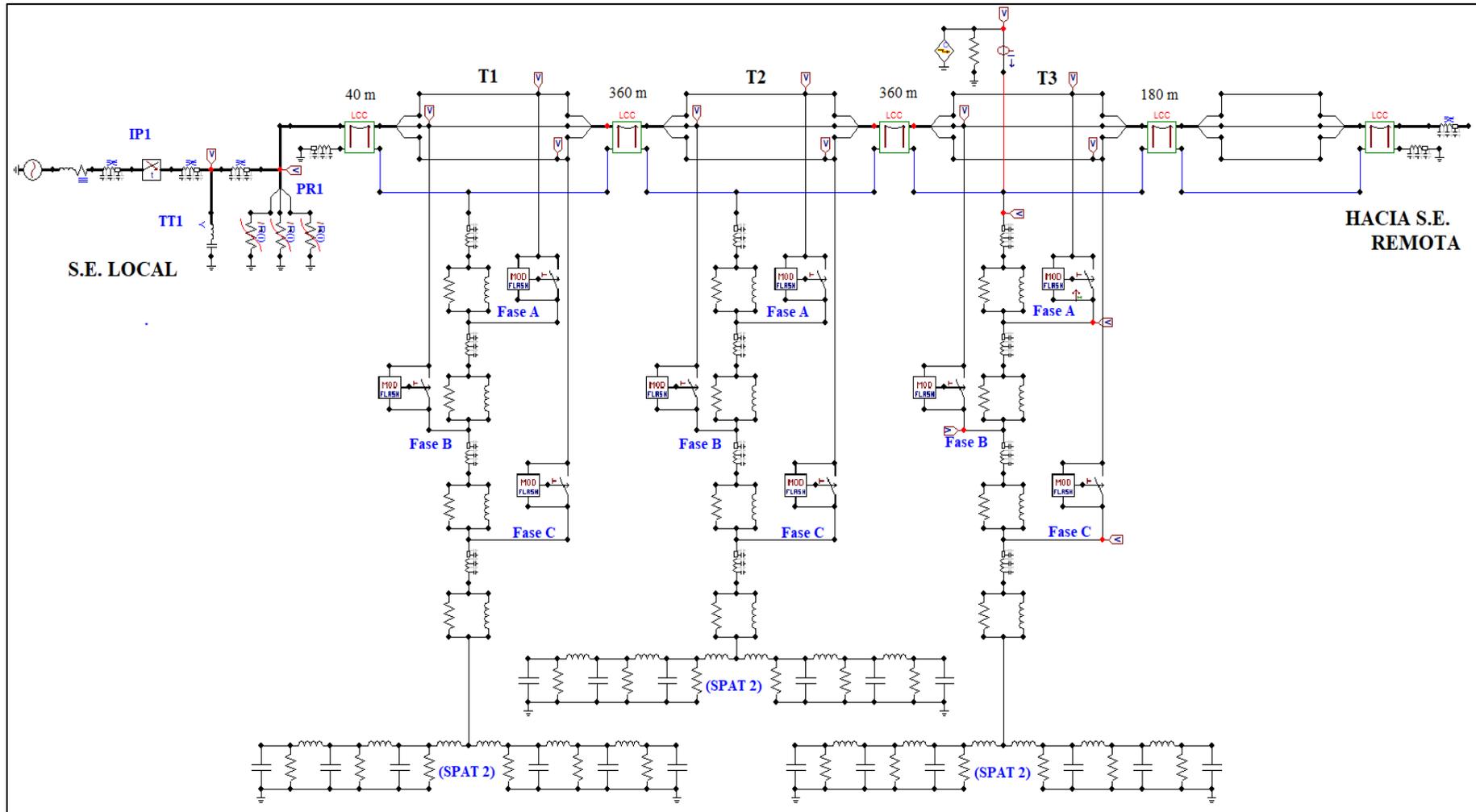


Fig. 4.17 Circuito de Simulación Para Impulsos de Rayo

Fuente: [Elaboración propia]

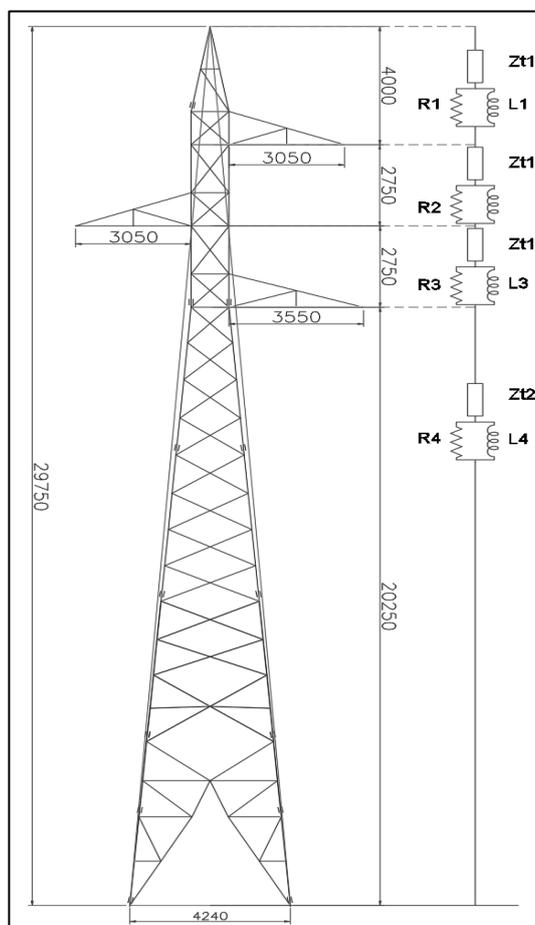
### a) Características de los elementos a alta frecuencia

Se muestran las características de los elementos a alta frecuencia, los cuales son afectados directa o indirectamente por un impulso de rayo en el sistema.

**TABLA N° 4.4** Características Principales en alta frecuencia del Conductor

**Fuente:** [Elaboración propia]

| DATA | UNIT  | VALUE     |
|------|-------|-----------|
| R'+  | Ohm/m | 0         |
| R'0  | Ohm/m | 0         |
| Z+   | ohm   | 300       |
| Z0   | ohm   | 300       |
| v+   | m/s   | 280000000 |
| v0   | m/s   | 280000000 |



**Fig. 4.18** Torre de Transmisión Típica

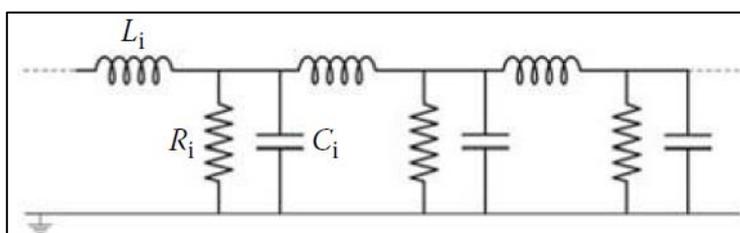
**Fuente:** [Elaboración propia]

**TABLA N° 4.5** Valores de Impedancia de la torre de Transmisión Típica

Fuente: [Elaboración propia]

|     |       |
|-----|-------|
| Zt1 | 98.48 |
| R1  | 11.93 |
| L1  | 2.37  |
| Zt2 | 98.48 |
| R2  | 8.20  |
| L2  | 1.63  |
| Zt3 | 98.48 |
| R3  | 8.20  |
| L3  | 1.63  |
| Zt4 | 98.48 |
| R4  | 56.66 |
| L4  | 11.24 |

La puesta a tierra más común es con 2 contrapesos.

**Fig. 4.19** Circuito equivalente de Un contrapeso

Fuente: [2]

De manera práctica, se ha considerado que  $i = 1, 2$  y  $3$ .

**TABLA N° 4.6** Valores característicos de un contrapeso

Fuente: [Elaboración propia]

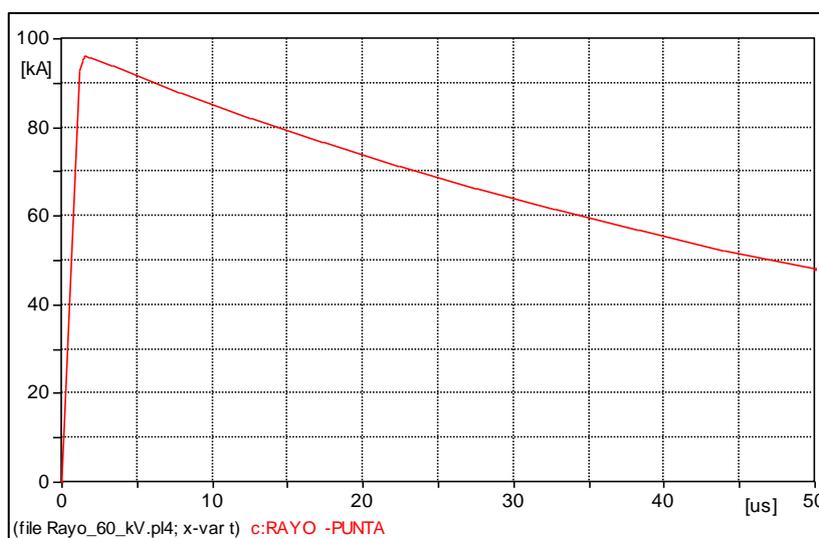
| Descripción                 | Símbolo | i               |                 |                 |
|-----------------------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                             |         | 1               | 2               | 3               |
| Resistividad del Suelo      | p       | 800             | 800             | 800             |
| Longitud de cada Contrapeso | l       | 40              | 40              | 40              |
| Profundidad                 | d       | 0.6             | 0.6             | 0.6             |
| Radio del Conductor         | a       | 0.00535         | 0.00535         | 0.00535         |
| Resistencia (Ohm)           | R       | <b>37.60</b>    | <b>75.20</b>    | <b>112.80</b>   |
| Inductancia (mH)            | L       | <b>4.72E-02</b> | <b>2.36E-02</b> | <b>1.57E-02</b> |
| Capacitancia (uF)           | C       | <b>6.44E-03</b> | <b>3.22E-03</b> | <b>2.15E-03</b> |

## b) Impulso en la punta de la Estructura

### - Impulso de rayo con 96 kA con forma de onda estándar 1.2/50 $\mu$ S

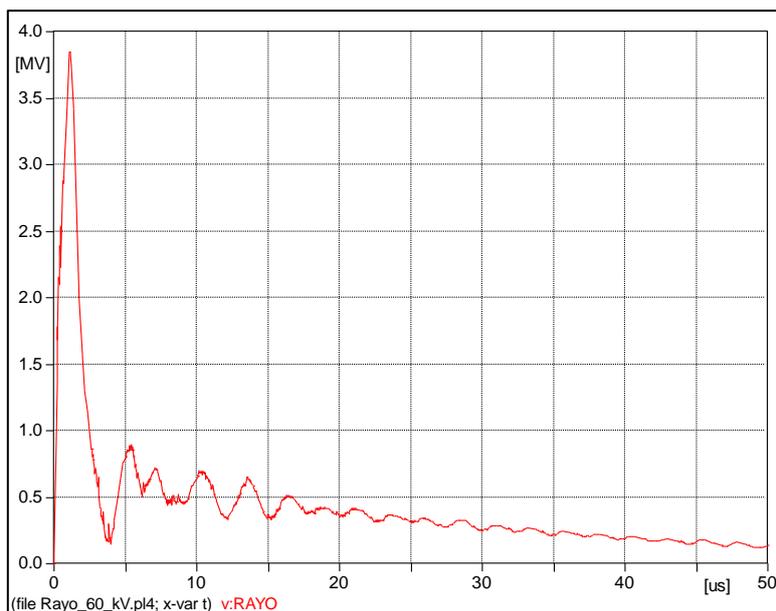
Las sobretensiones por efecto del impacto de un impulso de rayo de 96 kA con forma de onda 1.2/50  $\mu$ S (Fig. 4.20), en la punta de la estructura de la torre 3 del circuito que se muestra en la Fig. 4.17, presenta un valor en la torre de 3850 kVp (Fig. 4.21) y valores muy elevados de sobretensiones en los conductores de fase de la Línea. Tales sobretensiones son cercanas a los 3 600 kVp como se muestra en la Fig. 4.22.

Si bien las sobretensiones se van amortiguando a medida que se propagan a lo largo de la Línea (Fig. 4.23), estas alcanzan valores considerables cuando llega al pórtico de la Subestación. En este caso el pararrayos de línea a la entrada, opera descargando corrientes, limitando las tensiones hacia los otros equipos (Fig. 4.24).



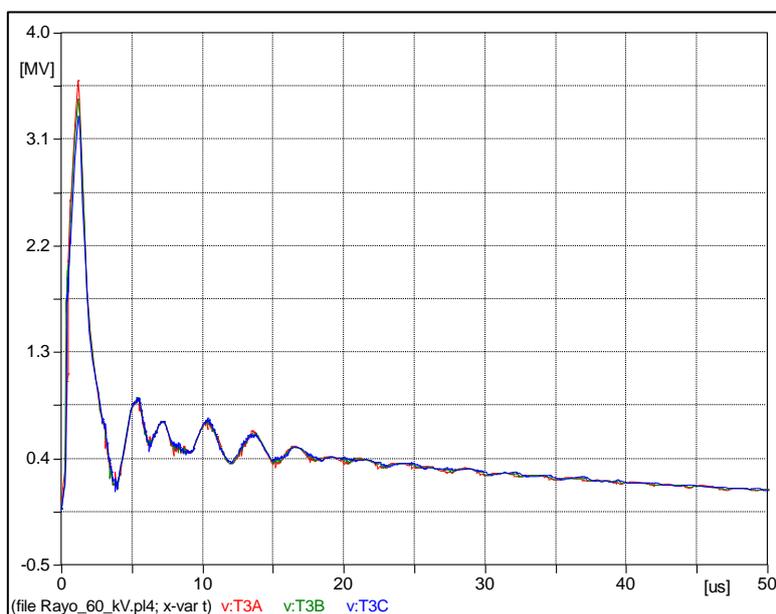
**Fig. 4.20** Corriente de Rayo de 96 kA con forma de onda estándar 1.2/50  $\mu$ S.

**Fuente:** [Elaboración propia]



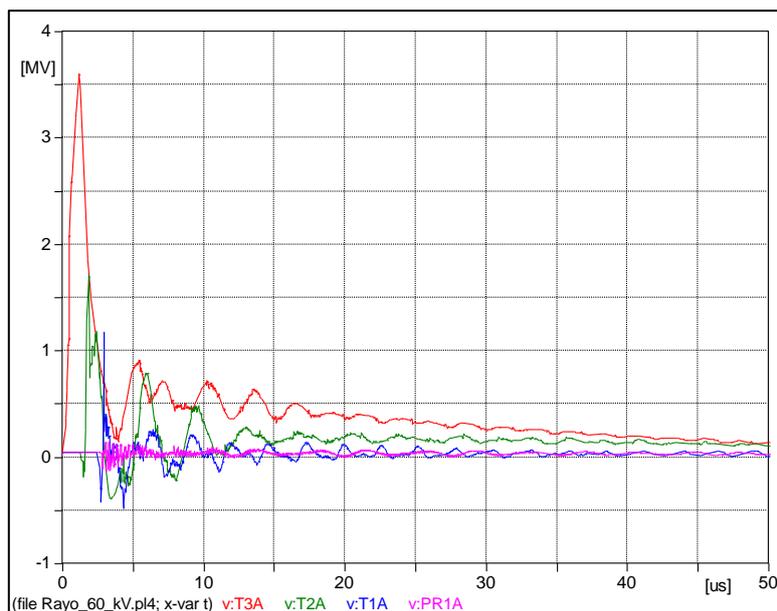
**Fig. 4.21** Sobretensión en la punta de la estructura por impacto de una corriente de 96 kA (1.2/50  $\mu$ S)

**Fuente:** [Elaboración propia]



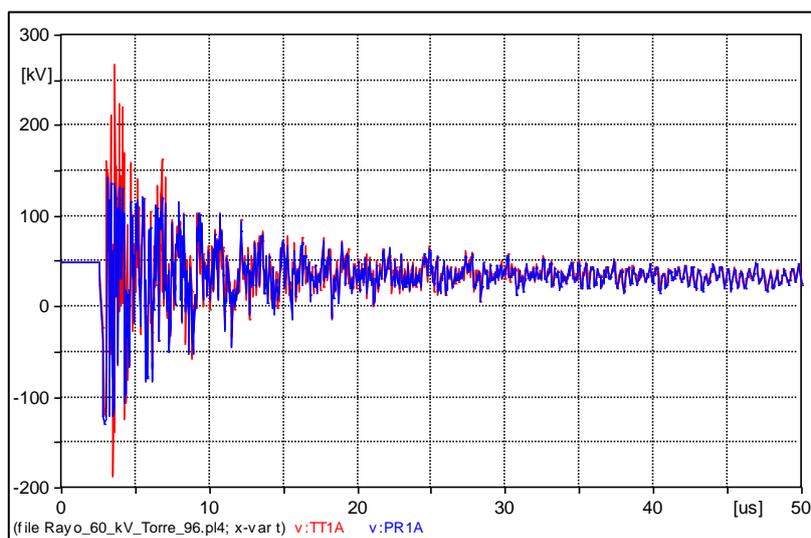
**Fig. 4.22** Sobretensiones en fases de la tercera torre (T3) debido a sobretensión por impulso de rayo de 96 kA.

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.23** Comportamiento de la sobretensión de rayo a mientras viaja por la línea de transmisión

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.24** Tensión Residual en el Pararrayos de Línea y Tensión en el Transformador de tensión

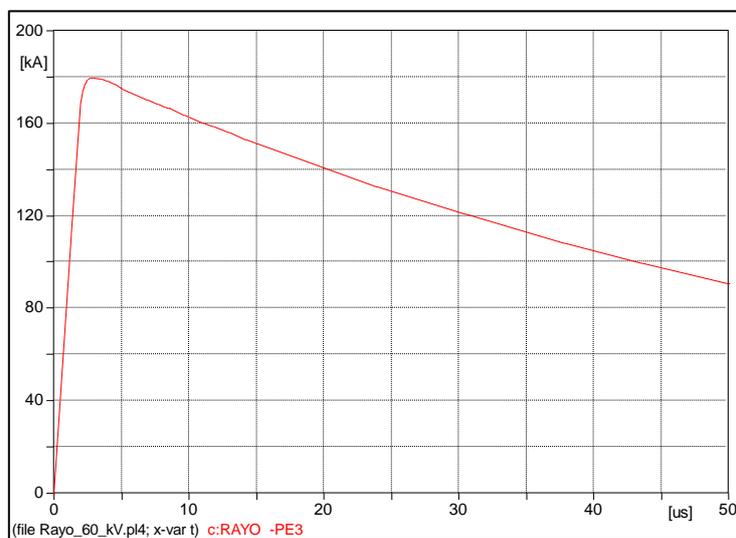
**Fuente:** [Elaboración propia]

**- Impulso de rayo con 182 kA con forma de onda estándar 2/50  $\mu$ S**

Las sobretensiones por efecto del impacto de un impulso de rayo de 182 kA con la configuración de onda presentada en la Fig. 4.25, en la punta de la estructura (torre 3), presenta un valor en la torre de unos 5 350 kVp (Fig. 4.26) y valores muy elevados de sobretensiones en los conductores de fase de la Línea. Tales sobretensiones son muy

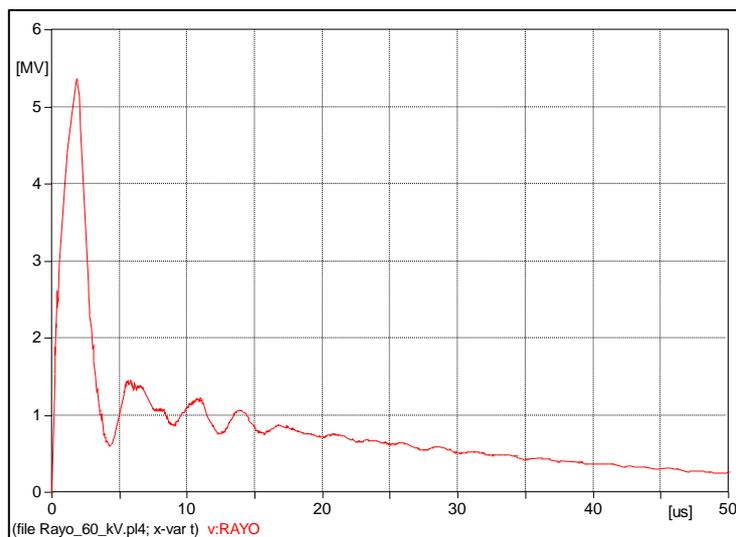
similares a la de la torre, con valores cercanos a los 5 000 kVp como se muestra en la Fig. 4.27.

Si bien las sobretensiones se van amortiguando a medida que se propagan a lo largo de la Línea, estas alcanzan valores considerables cuando llegan al pórtico de la Subestación. En este caso el pararrayos de línea a la entrada, opera descargando corrientes pico, limitando las tensiones hacia los otros equipos. Ver Fig. 4.28 y Fig. 4.29.



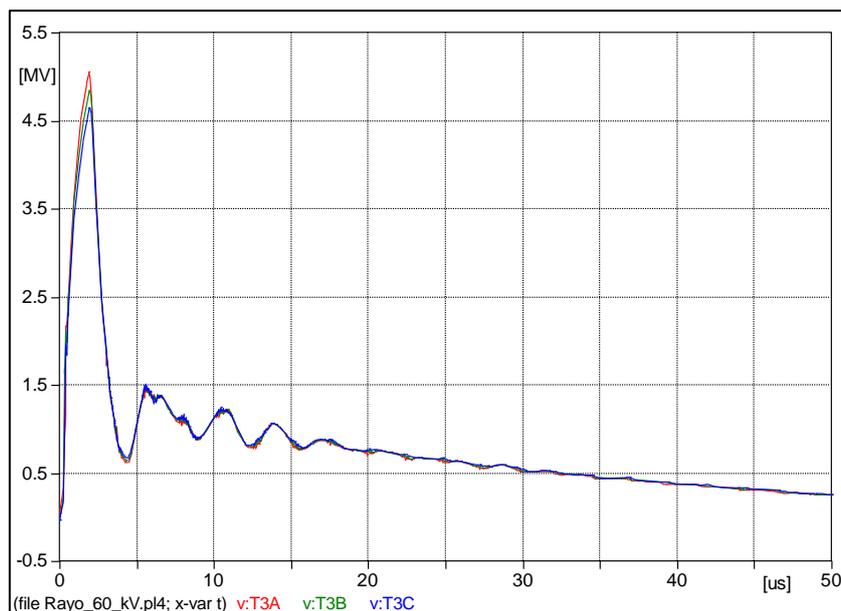
**Fig. 4.25** Corriente de Rayo de 182 kA con forma de onda estándar 2/50  $\mu$ S

**Fuente:** [Elaboración propia]



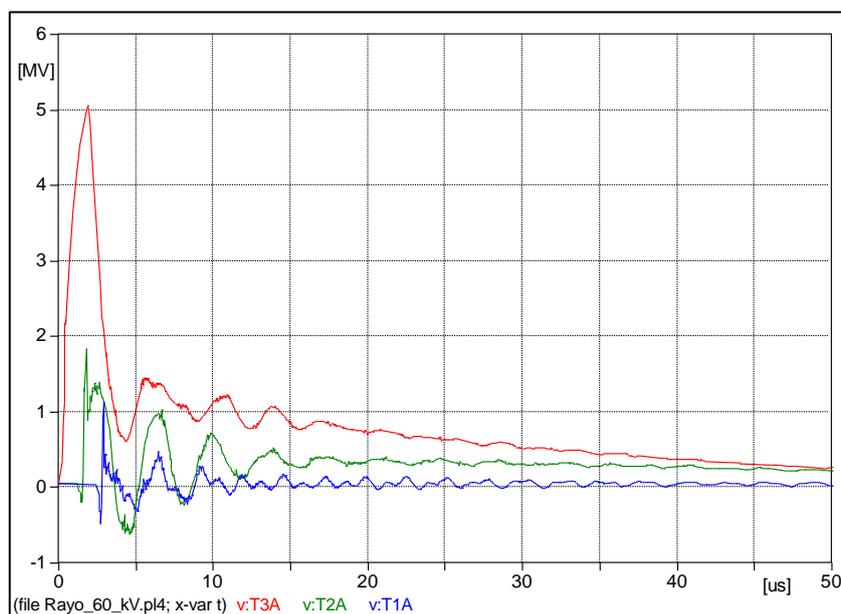
**Fig. 4.26** Sobretensión en la punta de la estructura por impacto de una corriente de 182 kA (2/50  $\mu$ S)

**Fuente:** [Elaboración propia]



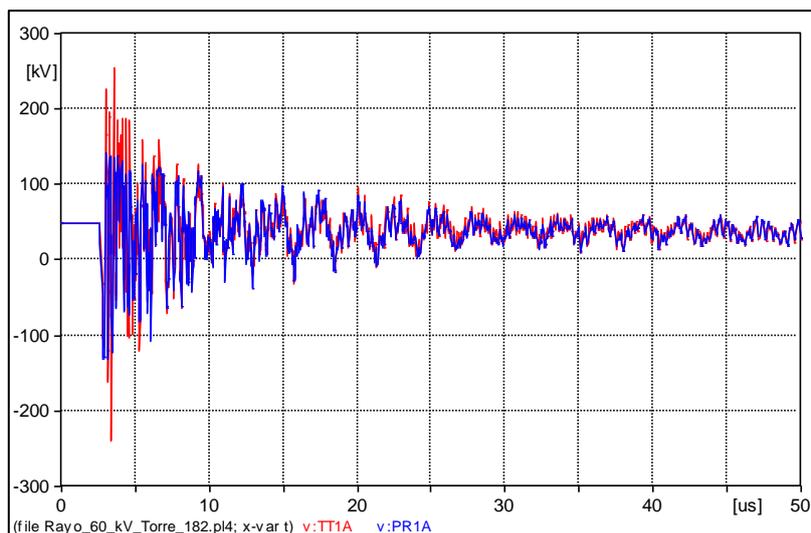
**Fig. 4.27** Sobretensiones en las fases de la tercera torre (T3) debido a sobretensión por impulso de rayo de 182 kA

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.28** Comportamiento de la sobretensión de rayo mientras viaja por la línea de transmisión

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.29** Tensión Residual en el Pararrayos de Línea y Transformador de tensión

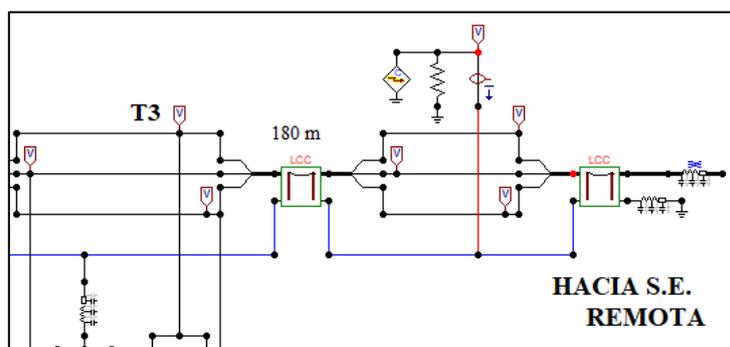
Fuente: [Elaboración propia]

### c) Impulso a medio vano del Cable de Guarda

La probabilidad que una descarga atmosférica impacte en medio vano del cable de guarda, es menor que la probabilidad que una descarga impacte en la punta de una estructura. Por ello, se analizará para un impulso de rayo cuya magnitud tenga una probabilidad de ocurrencia de ser excedida del 5%, es decir para 96 kA con forma de onda 1.2/50 us.

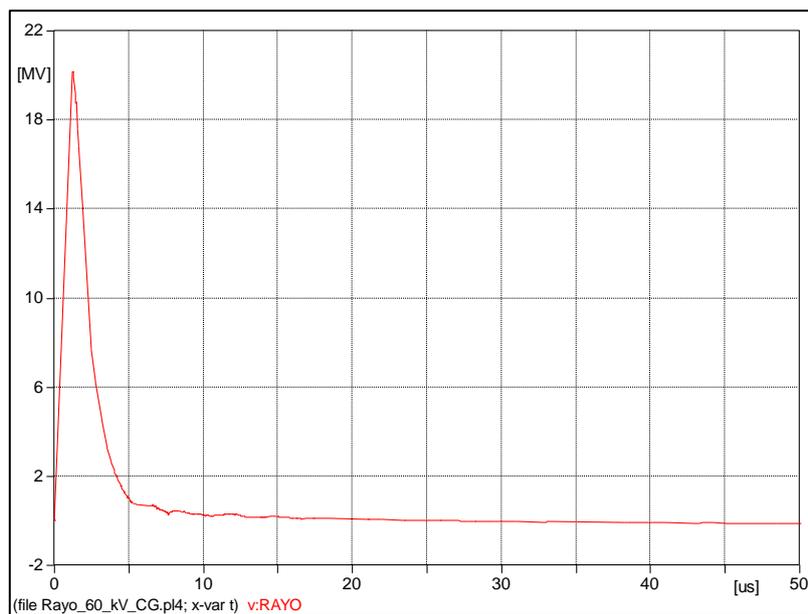
El circuito de la Fig. 4.30, muestra la zona donde será el punto de impacto, en medio vano entre la torre 3 y 4 a 900 metros de la torre terminal.

La tensión en el punto de impacto es muy elevada, con un valor aproximado de 20 MVp (Fig. 4.31), además en las fases se muestran valores de sobretensiones con valores elevados llegando al pórtico de la SE con un valor aproximado de 1100 kVp.



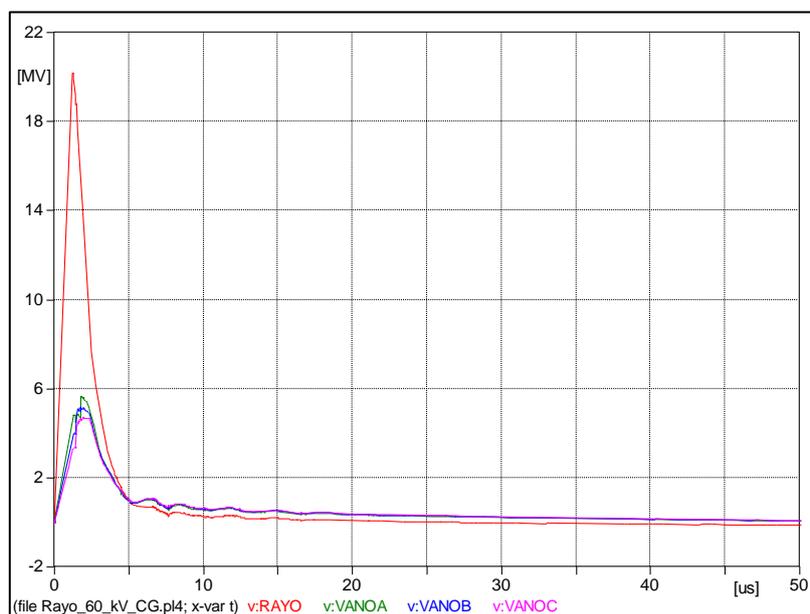
**Fig. 4.30** Impulso de Rayo en el Cable de Guarda

Fuente: [Elaboración propia]



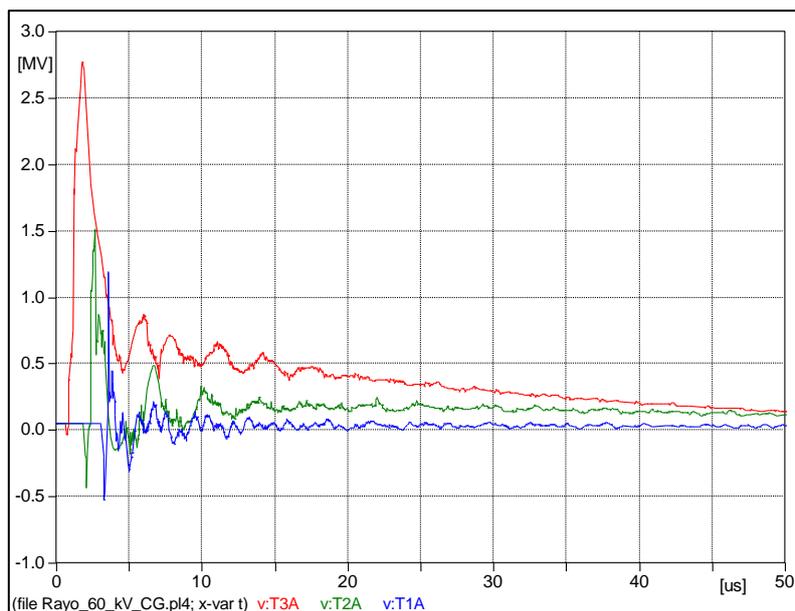
**Fig. 4.31** Sobretensión en el Cable de Guarda por efecto del impacto de una corriente de rayo de 96 kA (1.2/50  $\mu$ S)

**Fuente:** [Elaboración propia]



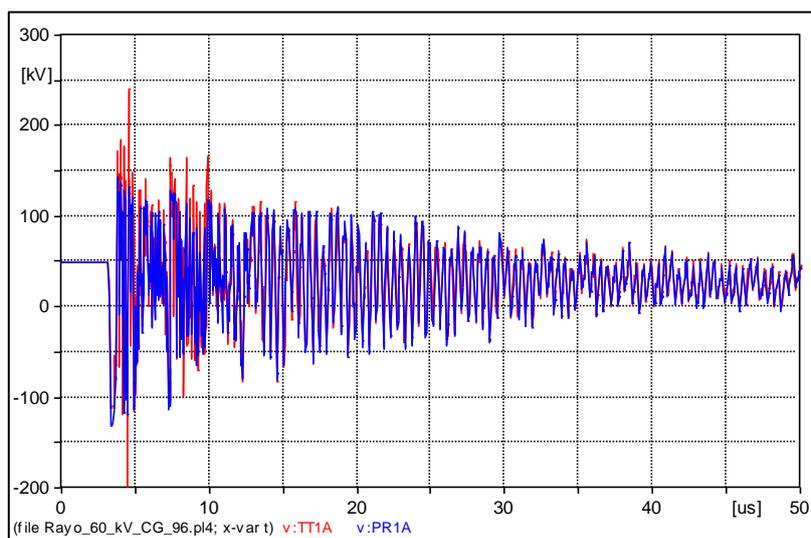
**Fig. 4.32** Sobretensión en el cable de guarda y sobretensiones inducidas en las fases

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.33** Sobretensiones en las fases a medida que viajan a través de la línea de transmisión

Fuente: [Elaboración propia]



**Fig. 4.34** Tensión residual en el pararrayos de línea y Transformador de tensión

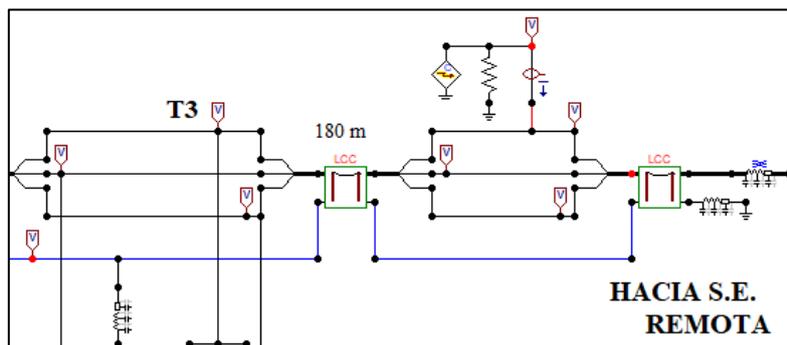
Fuente: [Elaboración propia]

#### d) Impulso a medio vano del conductor

Este caso, es el de menor probabilidad de ocurrencia, ya que el diseño del apantallamiento de líneas de transmisión se hace con la idea de proteger al conductor. De acuerdo al capítulo 6 de la referencia [13], generalmente, los impulsos de corriente inferiores a 20 kA son responsables de las descargas disruptivas de fallas de

apantallamiento. Por ello, se analizará para un impulso de rayo con un valor de 20 kA con forma de onda con 1.2/50  $\mu$ s.

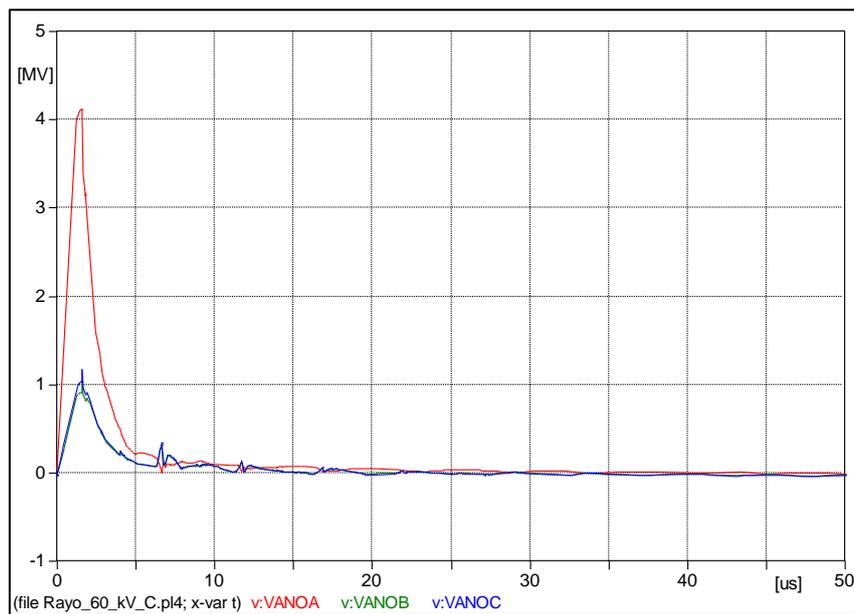
La fase de impacto, se ha considerado la Fase A. Ver figura siguiente.



**Fig. 4.35** Circuito de Análisis del impacto de rayo de 20 kA (1.2/50  $\mu$ S) en el conductor

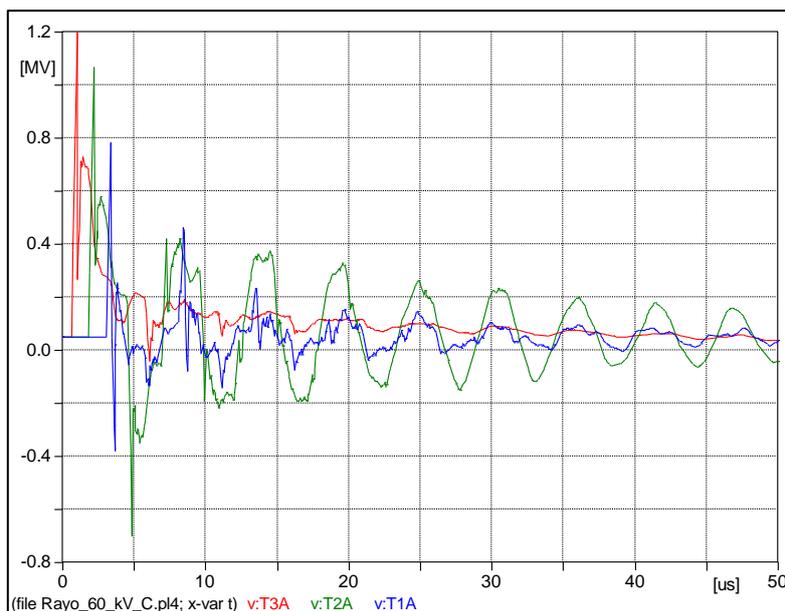
**Fuente:** [Elaboración propia]

El impacto de rayo de 20 kA en el conductor de la línea de transmisión, genera una sobretensión de unos 4 150 kVp en la fase A y esto induce sobretensiones en las otras fases cercanas a 1 200 kVp.



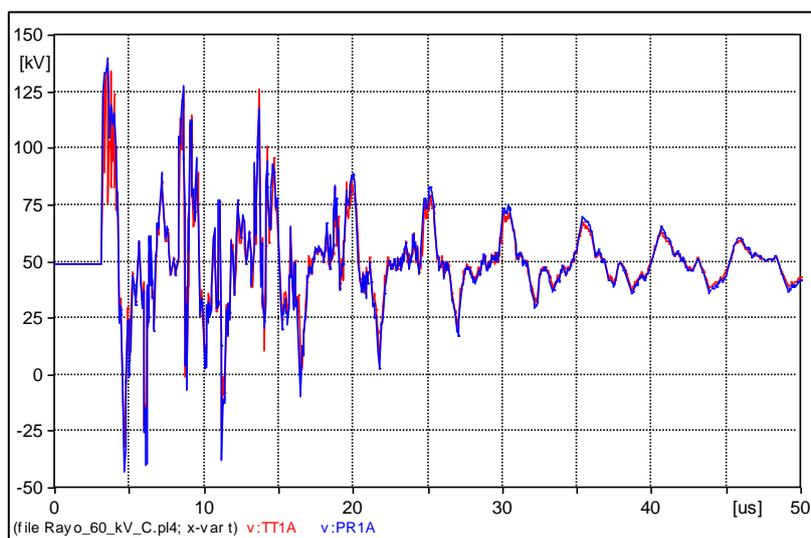
**Fig. 4.36** Sobretensión en la Fase A por impacto de un impulso de rayo de 20 kA (1.2/50  $\mu$ S) en el conductor y sobretensiones inducidas en las otras fases.

**Fuente:** [Elaboración propia]



**Fig. 4.37** Comportamiento de las sobretensiones a medida que viajan hacia la subestación por impacto de una corriente de rayo de 20 kA (1.2/50  $\mu$ S) en la fase A

Fuente: [Elaboración propia]



**Fig. 4.38** Tensión Residual en el Pararrayos y transformador de tensión de la bahía de Línea de 60kV

Fuente: [Elaboración propia]

#### 4.3.2. Análisis del sistema en 138 kV

El análisis en 138 kV, corresponde a la operación definitiva de la subestación Local (subestación en estudio). El análisis en este caso es similar a lo analizado por la etapa de operación en 60 kV.

Las corrientes de impulso de rayo que se desea analizar serán aquellas con una probabilidad de ser excedida de 5% y 1% de acuerdo a la probabilidad aplicable de

Anderson y Erikson cuyos valores son 96 kA y 182 kA respectivamente la forma onda del impulso de rayo, será la estándar de acuerdo a la IEC 1.2/50 uS para la corriente de 96 kA y de 2/50 uS para el impulso de 182 kA.

#### a) Características de los elementos a alta frecuencia

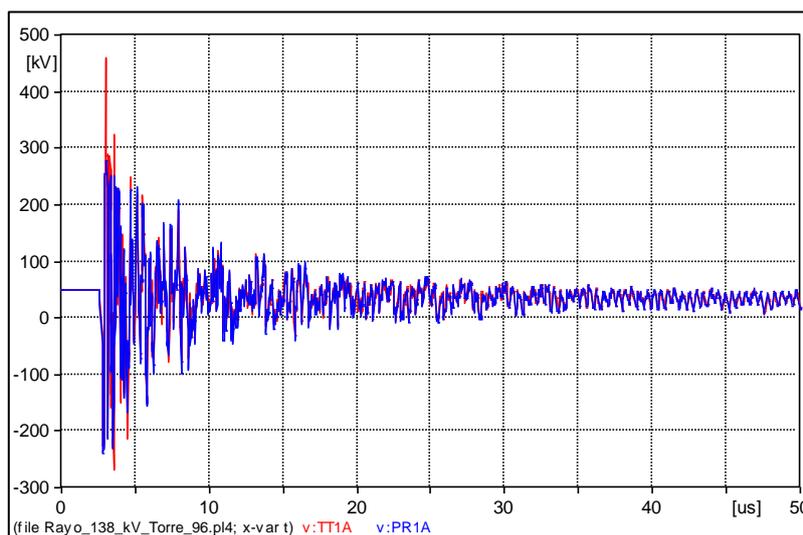
Con respecto al análisis en 60 kV, los elementos que varían son los pararrayos y los transformadores de tensión cuyas características correspondientes se muestran en el inciso 4.2.

#### b) Impulso en la punta de la Estructura

##### - Impulso de rayo con 96 kA con forma de onda estándar de 1.2/50 uS

Debido a que se ha analizado el impulso de rayo en la tercera estructura de la línea de transmisión (T3), el efecto de las sobretensiones a través del conductor, es el mismo que el análisis en 60 kV, ya que se trata de los mismos elementos.

El valor residual en el pararrayos en la entrada de la subestación, es diferente con respecto al análisis en 60 kV, por el hecho de tratarse de pararrayos para operar en 138 kV. Ver Fig. 4.39.



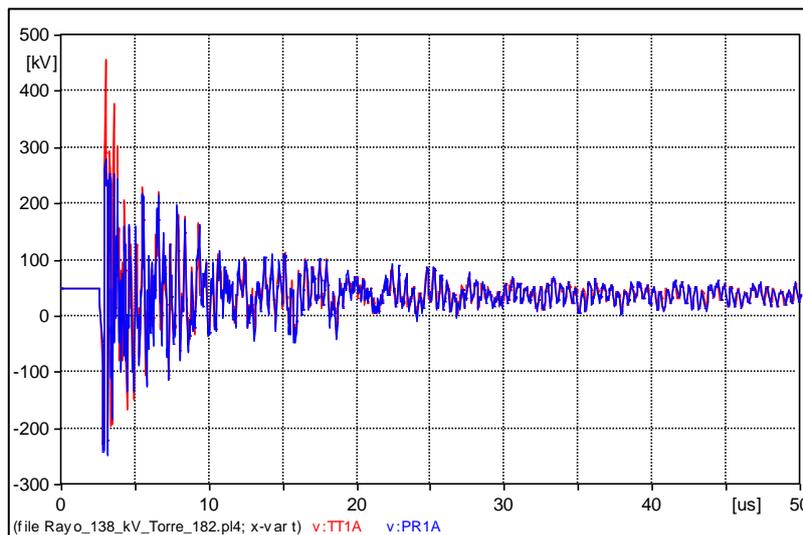
**Fig. 4.39** Tensión residual en el pararrayos y transformador de tensión de la bahía de línea a la entrada de la subestación por impacto de una corriente de rayo de 96 kA (1.2/50 uS)

**Fuente:** [Elaboración propia]

### - Impulso de rayo con 182 kA con forma de onda estándar 2/50 $\mu$ S

Debido a que se ha analizado el impulso de rayo en la tercera estructura de la línea de transmisión (T3), el efecto de las sobretensiones a través del conductor, es el mismo que el análisis en 60 kV, ya que se trata de los mismos elementos.

El valor residual en el pararrayos en la entrada de la subestación, es diferente con respecto al análisis en 60 kV, por el hecho de tratarse de pararrayos para operar en 138 kV. Ver Fig. 4.39.



**Fig. 4.40** Tensión residual en el pararrayos y transformador de tensión de la bahía de línea a la entrada de la subestación por impacto de una corriente de rayo de 182 kA (2/50  $\mu$ S)

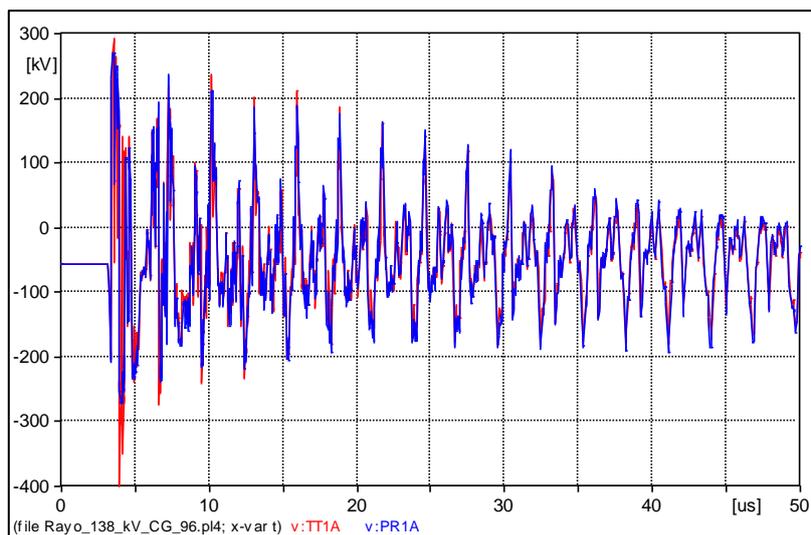
**Fuente:** [Elaboración propia]

### c) Impulso a medio vano del Cable de Guarda

Se ha analizado para un impulso de rayo cuya magnitud tenga una probabilidad de ocurrencia de ser excedida del 5%, es decir para 96 kA con forma de onda 1.2/50  $\mu$ s.

El circuito de análisis es el mismo que se muestra en la Fig. 4.30, donde será el punto de impacto, es en medio vano entre la torre 3 y 4 a 900 metros de la torre terminal.

Los valores de sobretensión son muy similares para el caso analizado en 60 kV. Sin embargo, la tensión residual en el pararrayos de entrada en la subestación (PR1) es mayor, como se puede ver en la Fig. 4.41. Esto por tratarse de un pararrayos de 138 kV de operación.

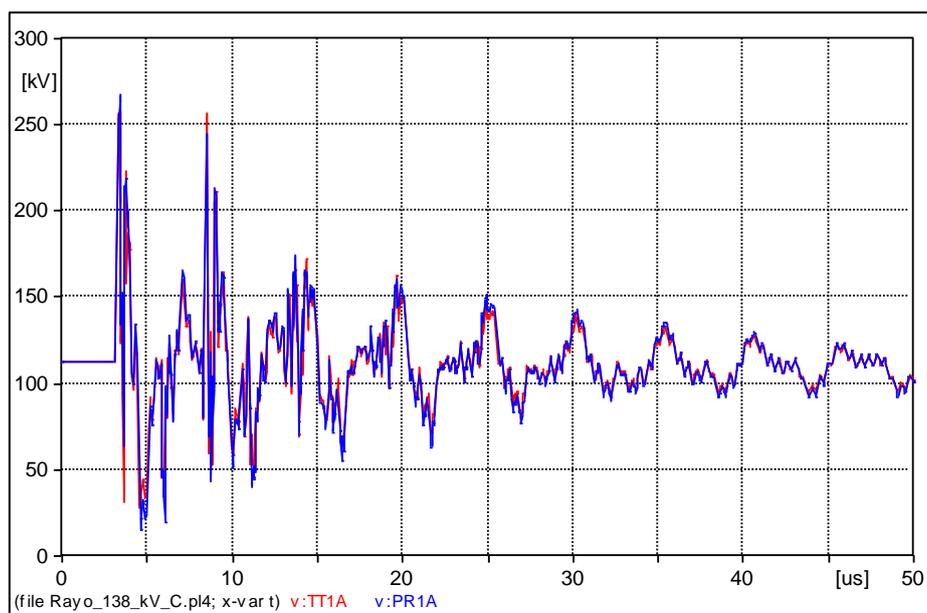


**Fig. 4.41** Tensión Residual en el pararrayos y transformador de tensión de la bahía de línea de la subestación, debido a un impulso de rayo de 96 kA (1.2/50  $\mu$ S) en el cable de guarda

**Fuente:** [Elaboración propia]

#### d) Impulso a medio vano del conductor

El análisis es similar al que se muestra en el capítulo 4.3.1.4, sólo que en este caso el pararrayos de la bahía de línea de la subestación es de 138 kV. En tal sentido, en la Fig. 4.42, muestra la tensión residual en el mencionado pararrayos.



**Fig. 4.42** Tensión residual en el pararrayos y transformador de tensión de 138 kV, por impacto de una corriente de 20 kA (1.2/50  $\mu$ S) en el conductor

**Fuente:** [Elaboración propia]

#### **4.3.3. Análisis del sistema en 220 kV**

La subestación eléctrica en altura 220/60-138/10 kV, está conectado a un sistema de doble barra de una subestación existente en 220 kV, manteniendo una distancia entre subestaciones no mayor a 60 metros de longitud; estando este tramo apantallado contra descargas atmosféricas y no cuenta con alguna estructura intermedia; se conectan de pórtico a pórtico. Por tanto, las descargas atmosféricas, no tiene efecto significativo, ya que, las descargas ocurrirán ya sea en el pórtico o en el cable de guarda, disipándose en la malla de puesta a tierra de baja resistencia de las subestaciones. Razón por la que no es necesario implementar un circuito de simulación.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Análisis de resultados de simulaciones de sobretensiones por impulsos de maniobra

- a) La energización en vacío de la línea de transmisión con tensión de operación de **60 kV**, desde la subestación local, genera sobre tensiones pico de 87 kV fase - tierra y la re-energización, 104 kV fase - tierra. Ver Fig. 4.6.

La sobretensión que soportará el equipo es fase - tierra, mientras que la de fase a fase, estaría representada por la distancia de aire.

Multiplicando a la sobretensión fase a tierra, por un factor de corrección por altura  $(e^{\frac{mH}{8150}} = 1,58$ ; para  $m=1$  y  $H=3730$  msnm) y factor de conversión a sobretensiones de rayo (**1,3** para aislamiento externo, tabla 1 del estándar IEC 60072-2), se tiene una sobretensión externa en los equipos de **214 kV**. Ver **TABLA N° 5.1**.

En la **TABLA N° 5.4**, se muestra un BIL externo seleccionado de **450 kV** para los equipos en 60 kV de la subestación en estudio, con ello afirmamos que estos equipos han sido especificados adecuadamente para sobretensiones de maniobra.

- b) La re-energización en vacío de la línea con tensión de operación de **138 kV**, desde la subestación remota y local, genera sobre tensiones pico fase a tierra de 232 kV (**Fig. 4.12**) y 212 kV (**Fig. 4.13.**) respectivamente. Multiplicando a la mayor sobretensión fase a tierra, por factores de corrección por altura y conversión a sobretensiones de rayo correspondientes, se tiene valores de sobretensiones de **477 kV** para aislamiento externo. Ver **TABLA N° 5.1**.

En la **TABLA N° 5.4**, se muestra un BIL de **750 kV** externo de los equipos en 138 kV de la subestación en estudio, con ello afirmamos que estos equipos han sido especificados adecuadamente para sobretensiones de maniobra.

- c) La energización y re-energización en vacío de la línea de transmisión y transformador de potencia del lado de **220 kV**, desde la subestación local, genera sobretensiones pico fase a tierra de **282 kV**. Ver Fig. 4.16.

Multiplicando a la sobretensión fase a tierra, por factores de corrección por altura y conversión a sobretensiones de rayo correspondientes, se tiene valores de **579 kV** para aislamiento externo. **TABLA N° 5.1**.

En la **TABLA N° 5.4**, se muestra un BIL **1 300 kV** externo seleccionados de los equipos en 220 kV de la subestación en estudio, con ello afirmamos que estos equipos han sido especificados adecuadamente para sobretensiones de maniobra.

## **5.2. Análisis de resultados de sobretensiones por impulsos de rayo**

- a) El análisis de sobretensiones por impulsos de rayo, con la línea de transmisión operando a 60 kV, muestra que las sobretensiones son amortiguadas a medida que viajan a través de la línea de transmisión y al llegar a la subestación local, son descargadas por el pararrayos que se encuentra en la entrada, permitiendo éste pasar sólo una sobretensión residual, que es un valor característico del equipo. Por ello, los casos analizados, impulsos en la punta de la estructura y, en medio del vano del conductor y de cable de guarda con impulsos de 96 kA con forma de onda 1,2/50 us y de 182 kA con forma de onda 2/50 us, no generan sobretensión alguna que sobrepase los valores especificados de los equipos de la subestación local, ya que, el análisis de sobretensiones, muestra que con la línea de transmisión operando en 60 kV, es decir con pararrayos de 60 kV en la entrada de la línea, la sobretensión máxima que llega al transformador de tensión es de 267 kVp, Fig. 4.24. Al multiplicar a dicho valor por un factor de corrección de acuerdo a la zona, se tiene una sobretensión pico de **422 kV**. Ver **TABLA N° 5.1**.

En la **TABLA N° 5.4**, se muestra un BIL externo seleccionado de **450 kV** para los equipos en 60 kV de la subestación en estudio, con ello afirmamos que los equipos de patio en 60 kV han sido especificados adecuadamente para sobretensiones de impulso de rayo.

- b) El análisis de sobretensiones por impulsos de rayo, con la línea de transmisión operando a 138 kV, muestra que las sobretensiones son amortiguadas a medida que viajan a través de la línea de transmisión y al llegar a la subestación local,

son descargadas por el pararrayos que se encuentra en la entrada, permitiendo éste pasar sólo una sobretensión residual, que es un valor característico del equipo. Por ello, los casos analizados, impulsos en la punta de la estructura y, en medio del vano del conductor y de cable de guarda con impulsos de 96 kA con forma de onda 1,2/50 us y de 182 kA con forma de onda 2/50 us, no generan sobretensión alguna que sobrepase los valores especificados de los equipos de la subestación local, ya que ,el análisis de sobretensiones, muestra que con la línea de transmisión operando en 138 kV, es decir con pararrayos de 138 kV en la entrada de la línea, la sobretensión en el transformador de tensión es de 459 kVp, Fig. 4.40. Al multiplicar a dicho valor por un factor de corrección de acuerdo a la zona, se tiene una sobretensión pico de **722 kV**.

En la **TABLA N° 5.4**, se muestra un BIL externo seleccionado de **750 kV** para los equipos en 138 kV de la subestación en estudio, con ello afirmamos que los equipos de patio en 138 kV han sido especificados adecuadamente para sobretensiones de impulso de rayo.

**TABLA N° 5.1** Resumen de resultados de las simulaciones

**Fuente:** [Elaboración propia]

| Ítem  | Descripción                                       | Tensión de Operación (kV) |            |            |            |
|---|---|---------------------------|------------|------------|------------|
|   |   | Unidad                    | 60         | 138        | 220        |
| 1   | Maniobra Remota                                   | kVp                       | -          | 232        | -          |
| 2   | Maniobra Local                                    | kVp                       | 104        | 212        | 282        |
| 3   | Impulso en la torre (96 kA - 1,2/50 uS)           | kVp                       | 267        | 459        | -          |
| 4   | Impulso en la torre (182 kA - 2/50 uS)            | kVp                       | 255        | 457        | -          |
| 5   | Impulso en el cable de guarda (96 kA - 1.2/50 uS) | kVp                       | 242        | 398        | -          |
| 6   | Impulso en el conductor (20 kA - 1,2/50 uS)       | kVp                       | 175        | 260        | -          |
| Factor de corrección altura                                       |   | ka =                      | 1,58       |            |            |
| Sobretensiones corregidas por altura                              |   |                           |            |            |            |
| 7   | Maniobra Remota                                   | kVp                       | -          | 367        | -          |
| 8   | Maniobra Local                                    | kVp                       | 164        | 335        | 446        |
| 9   | Impulso en la torre (96 kA - 1,2/50 uS)           | kVp                       | <b>422</b> | <b>725</b> | -          |
| 10  | Impulso en la torre (182 kA - 2/50 uS)            | kVp                       | 403        | 722        | -          |
| 11  | Impulso en el cable de guarda (96 kA - 1.2/50 uS) | kVp                       | 382        | 629        | -          |
| 12  | Impulso en el conductor (20 kA - 1,2/50 uS)       | kVp                       | 277        | 411        | -          |
| Conversión de sobretensiones de maniobra a rayo (Fase-Tierra 1,3) |   |                           |            |            |            |
| 13  | Maniobra Remota                                   | kVp                       | -          | 477        | -          |
| 14  | Maniobra Local                                    | kVp                       | 214        | 435        | <b>579</b> |

**TABLA N° 5.2** Valores máximos de sobretensiones de simulaciones cálculos.

Fuente: [Elaboración propia]

| Ítem  | Descripción  | Tensión de Operación (kV) |     |     |       |
|---|--|---------------------------|-----|-----|-------|
|   |  | Unidad                    | 60  | 138 | 220   |
| <b>Simulaciones (Corregidas por altura)</b>   |  |                           |     |     |       |
| 1   | Valores máximos de sobretensiones de maniobra (convertida a tipo rayo) | kVp                       | 214 | 477 | 579   |
| 2   | Valores máximos de sobretensiones de Rayo                              | kVp                       | 422 | 725 | 579   |
| <b>Cálculo de coordinación de aislamiento</b> |  |                           |     |     |       |
| 3   | Valores máximos de sobretensiones de maniobra                          | kVp                       | 200 | 400 | 659   |
| 4   | Valores máximos de sobretensiones de Rayo                              | kVp                       | 437 | 664 | 1,243 |

En las simulaciones, se ha podido reproducir valores de sobretensiones, en particular las de impulso de rayo, similares a las calculadas para equipos de 60 kV y 138 kV y, a la vez cercanos a los valores estandarizados seleccionados. Como se puede ver en la **TABLA N° 5.2** y **TABLA N° 5.4**, los resultados cuyos valores máximos de sobretensiones representan el 97,11%, 96,70 % y 95,62% de los niveles de aislamiento básico seleccionado de 450 kV, 750 kV y 1300 kV respectivamente.

### 5.3. Datos Técnicos de Aislamiento seleccionado de los Equipos

En la **TABLA N° 5.3**, se muestra las características de los pararrayos de la subestación 220/60-138/10 kV en 220 kV, 138 kV y 60 kV.

La **TABLA N° 5.3** y **TABLA N° 5.4**, muestran las características del aislamiento de los equipos de la subestación 220/60-138/10 kV en 220 kV, 138 kV y 60 kV respectivamente.

**TABLA N° 5.3** Características Principales de los Pararrayos en 60 kV, 138 kV y 220 kV

Fuente: [Elaboración propia]

|  |         |         |         |     |
|--|---------|---------|---------|-----|
| Tensión nominal de la red                                      | 60      | 138     | 220     | kV  |
| Tensión nominal  | 60      | 120     | 198     | kV  |
| Tensión máxima de operación continua (Uc ó MCOV)               | 48      | 98      | 160     | kV  |
| Sobre tensión temporal soportada (TOV) a 10 seg.               | 66      | 132     | 217     | kV  |
| Tensión residual máxima a impulso maniobra 2 kA (30/60 µs)     | 124     | 248     | 408     | kV  |
| Tensión residual máxima a impulso rayo 20 kA (8/20 µs)         | 156     | 311     | 512     | kVp |
| Corriente de descarga  | 10      | 10      | 10      | kA  |
| Capacidad de disipación de energía                             | Clase 3 | Clase 3 | Clase 3 |     |
| Distancia de arco (Housing) >                                  | 567     | 1130    | 1861    | mm  |
| Aislamiento exterior del revestimiento a impulso tipo rayo     | 450.00  | 750.00  | 1300.00 | kVp |
| Aislamiento exterior del revestimiento a frecuencia industrial | 185.00  | 325.00  | 460.00  | kV  |
| Longitud de fuga   | 2078    | 4156    | 7093    | mm  |

**TABLA N° 5.4** Características del aislamiento externo de los equipos en Patio

Fuente: [Elaboración propia]

| <b>Aislamiento Externo</b>                               |   |            |            |                 |
|--|---|------------|------------|-----------------|
| Tensión nominal de la red                                | = | <b>60</b>  | <b>138</b> | <b>220</b> kV   |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | 185        | 325        | 460 kV          |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 185        | 360        | 460> kV         |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>450</b> | <b>750</b> | <b>1300</b> kVp |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 450        | 850        | 1425 kVp        |

La selección de los niveles básicos de aislamiento (BIL en inglés), que se muestran en la **TABLA N° 5.4**, para los equipos con tensiones de operación menores o iguales a 245 kV de acuerdo con la tabla 2 (Anexo C) del estándar IEC 60071-1, es como sigue.

Para mejor entendimiento de la selección de datos técnicos normalizados, se muestra la **TABLA N° 5.5** que es un recorte de la tabla 2 del estándar IEC 60071-1.

- **Primero:** seleccionar un valor estandarizado de soportabilidad a impulso de rayo inmediato superior al mayor valor obtenido en las simulaciones y/o cálculos. Para el caso de los equipos de 138 kV, el mayor valor obtenido de las simulaciones es 725 kVp; entonces el mayor valor estandarizado es 750 kVp.
- **Segundo:** Seleccionar un valor estandarizado de soportabilidad a frecuencia industrial inmediato superior al obtenido en los cálculos. Para el caso de los equipos de 138 kV, el mayor valor obtenido de los cálculos es 145 kV; entonces el mayor valor estandarizado es 185 kV.
- **Tercero:** Se debe verificar si estos valores corresponden a una misma fila de la tabla, si tales valores corresponden a la misma fila, entonces esos valores serán los seleccionados. Sin embargo, si los valores están en diferentes filas, en ese caso se selecciona los valores de la fila más inferior.

**TABLA N° 5.5** Recorte de la tabla 2 del estándar IEC 60071-1

Fuente: [5]

| Niveles de aislamiento normalizado para tensiones asignadas del rango I<br>(1 kV < V <sub>m</sub> < 245 kV) |  |  |
|---|--|--|
| Tensión Máxima del Equipo (U <sub>m</sub> ) en kV<br>(Valor Eficaz)   | Tensión de soportabilidad normalizada de corta duración a frecuencia industrial [kV]<br>(Valor Eficaz) | Tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo [kV] (Valor Pico) |
| 72.5  | 140  | 325  |
| 123   | 185  | 450  |
|   | 230  | 550  |
| 145   | 185  | 450  |
|   | 230  | 550  |
|   | 275  | 650  |
| 170   | 230  | 550  |
|   | 275  | 650  |
|   | 325  | 750  |

Los resultados obtenidos, son concordantes con las hipótesis establecidas en el capítulo I de la presente investigación, ya que, se ha verificado que los datos técnicos especificados para el aislamiento externo de la subestación 220/60-138/10 kV, son adecuados para la altura de la instalación.

## CONCLUSIONES

- Los resultados de los análisis han permitido comprobar:
  - Que las especificaciones técnicas del aislamiento externo de los equipos de patio a instalar en la Subestación en altura 220/60-138/10 kV, son valores adecuados para equipos con tensión de operación de 60 kV, 138 kV y 220 kV, ver **TABLA N° 5.4**.
  - Que los equipos a fabricar con los parámetros especificados, soportan con normalidad ondas de sobretensión de impulso tipo maniobra y tipo rayo, ver **TABLA N° 5.1 y TABLA N° 5.2**.
- De acuerdo a los parámetros utilizados para la simulación de evento por el nivel de tensión de operación, se concluye:
  - Que los análisis de las STM y STR para la verificación del aislamiento externo de los equipos de 220 kV mediante el modelado de eventos han reproducido valores que no sobrepasan los especificados del proyecto, ver **TABLA N° 5.1**.
  - Que la forma como se realizaron los análisis de STM y STR para la verificación del aislamiento externo de los equipos de 138 kV mediante el modelado de eventos han reproducido valores que no sobrepasan los especificados del proyecto, siendo las STR mayores a las STM. ver **TABLA N° 5.1**
  - Que la forma como se realizaron los análisis de STI para la verificación del aislamiento externo de los equipos de 60 kV mediante el modelado de eventos han reproducido valores que no sobrepasan los especificados del proyecto, siendo las STR mayores a las STM. ver **TABLA N° 5.1**.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, Unated States of America, 1991.
- [2] J. A. Martines - Velasco, Power System Transients, Unated States of America, 2010.
- [3] IEC 60099 - 1, Surge Arresters - Part 1: Non-linear Resistor Type Gapped Surge Arresters for a.c. Systems, Ginebra, 1991.
- [4] IEC 60099 5, Surge Arresters - Part 5: Selection and Applications Recommendations, Ginebra, 1996.
- [5] IEC 60071-1, Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, Principles and Rules, Ginebra, 1996.
- [6] IEC 60071-2, Insulation Co-ordination - Part 2: Aplication Guide, Ginebra, 2018.
- [7] COES - SINAC, Procedimiento Técnico del Comité de Operación Económica del SEIN (PR20): Ingreso, Modificación y Retiro de Instalaciones en el SEIN, Lima, 2013.
- [8] Mejía Villegas, Subetaciones de Alta y Extra Alta Tensión, Colombia, 2003.
- [9] A. Maraví y G. Casalino, «Factores de Corrección por Altitud para el Diseño del Aislamiento de Líneas de Transmisión,» Lima.
- [10] H. Disenfeld y O. Falconi, «Optimización del Aislamiento en un Proyecto E.T. 220 kV a Elevadas Altitudes,» *XIII ERIAC*, 2009.

- [11] M. L. Sosa Ríos, «Estudio de Sobretensiones en Subestaciones con utilización del Alternative Transients Program (ATP),» *Revista Científica Politécnica*, pp. 45-50.
- [12] C. Tejada Martínez, P. Gómez Zamorano y G. Basilio Rodríguez, «Análisis de Sobretensiones Transitorias Debidas a la Energización de Líneas de Transmisión Multiconductoras,» *9° CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS*, 2006.
- [13] EPRI - Electric Power Research Institute, *AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above*, California: Electric Power Research Institute, INC., 2005.
- [14] V. Pawar y S. Shembekar, «Transient Overvoltages in Power System,» *PRATIBHA: INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE, SPIRITUALITY, BUSINESS AND TECHNOLOGY (IJSSBT)*., vol. 2, pp. 60-64, 2013.
- [15] H. Schmitt y W. Winter, «Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems,» *Dept. EV SE NC3 Siemens AG.*, 2015.
- [16] Dalibor, Bozidar y Ivo, «Lightning critical Flashover Voltage of High Voltage Insulators:Laboratory Measurements and Calculations,» *International Review of Electrical Engineering*, vol. 7, pp. 4321-4328, 2012.
- [17] B. Marungsri, S. Boonpoke, A. Rawangpai, A. Oonsivilai y C. Kritayakornupong, «Study of Tower Grounding Resistance Effected Back Flashover to 500 kV Transmission Line in Thailand by using ATP/EMTP,» *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, pp. 1061-1068, 2008.
- [18] M. A. Linares Vrgas, «SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FRENTE RÁPIDO DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN,» FIEE-UNI, LIMA PERÚ, 2013.
- [19] E. E. Chaj Ramírez, «ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES DEBIDO A TRANSITORIOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MAYORES A 300 KV,» Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2008.
- [20] Hernandez Sampieri, *Metodología de la Investigación*, México D.F., 2010.

- [21] M. Saeedollah Talaei y S. Taghi, «Back Flashover Phenomenon Analysis in Power Transmission Substation for Insulation Coordination,» Tabrize, Iran, 2012.
- [22] J. E. Yanque M., Alta Tensión y Técnicas de Pruebas de Laboratorio, Lima, 2004.
- [23] T. Yamada, A. Mochizuki y J. Sawada, «EXPERIMENTAL EVALUATION OF A UHV TOWER MODEL FOR LIGHTNING SURGE ANALYSIS,» *IEEE*, vol. 10, nº 1, pp. 393-401, 1995.
- [24] Arrester Works, «Arrester Works,» [En línea]. Available: <http://www.arresterworks.com/arresterfacts/arresterfacts.php>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [25] ABB, Outdoor Instrument Transformers - Buyer's Guide, Ludvika, Suecia: ABB AB, 2011.
- [26] IEC 60099 - 4, Surge Arresters - Parte 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, Ginebra, 2006.
- [27] ABB, Descargadores de Sobretensiones de Alto Voltage - Guía para el comprador, Ludvika, Suecia, 2005 - 2010.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A: Cálculo de Selección de Pararrayos**

#### **A.1. Pararrayos en 60 kV, 138 kV y 220 kV**

**SELECCIÓN DE PARARRAYOS EN 60 KV, 138 kV y 220 kV**

**1 CÁLCULO DEL PARARRAYO DE OXIDO METÁLICO**

**Datos del Sistema**

|   |      |     |     |       |
|---|------|-----|-----|-------|
| Tensión nominal del sistema                     | 60   | 138 | 220 | kV    |
| Máxima tensión de Operación (Um)                | 72.5 | 145 | 245 | kV    |
| Longitud del vano promedio de la línea          | 300  | 300 | 300 | m     |
| Tiempo de duración de la sobretensión temporal. | 10   | 10  | 10  | s     |
| Nivel de Contaminación ambiental (Lf0)          | 25   | 25  | 25  | mm/kV |

**1.1 Tensión máxima de operación continua. (MCOV)**  $MCOV = \frac{U_m \times Fs}{\sqrt{3}}$

Es la tensión máxima que puede aparecer en operación, en los terminales del pararrayos es.

|             |   |       |       |        |           |           |   |      |
|-------------|---|-------|-------|--------|-----------|-----------|---|------|
| <b>MCOV</b> | = | 43.95 | 87.90 | 148.52 | <b>kV</b> | <b>Fs</b> | = | 1.05 |
|-------------|---|-------|-------|--------|-----------|-----------|---|------|

Dónde:

Fs = factor de seguridad para compensar la presencia de armónicos, que acompañan las sobretensiones y elevan las tensiones en forma transitoria.

**1.2 Sobretensión temporal (TOV)**  $TOV = K_e \times MCOV$

Tensión que excede a la tensión nominal del sistema y que se presentan debido a fallas a tierra, también después de disminución de cargas. La amplitud y duración de esta sobretensión temporal es un factor crítico en la selección del pararrayos.

|            |   |       |        |        |           |
|------------|---|-------|--------|--------|-----------|
| <b>TOV</b> | = | 61.53 | 123.06 | 215.36 | <b>kV</b> |
|------------|---|-------|--------|--------|-----------|

Sistema de Transmisión con:

Neutro Rígido a tierra:

Neutro aislado:

|                         |
|-------------------------|
| <b><math>K_e</math></b> |
| 1.4                     |
| 1.73                    |

Dónde:

$K_e$  = factor de falla a tierra.

**1.3 Tensión Nominal (Ur)**

La tensión nominal del pararrayos, es el valor mayor entre Ro y Re, lo definimos como:

$$U_r = \text{Max}\{R_o, R_e\} \quad R_o = \frac{MCOV}{K_o} \quad R_e = \frac{TOV}{K_t}$$

Las relaciones a usar son:

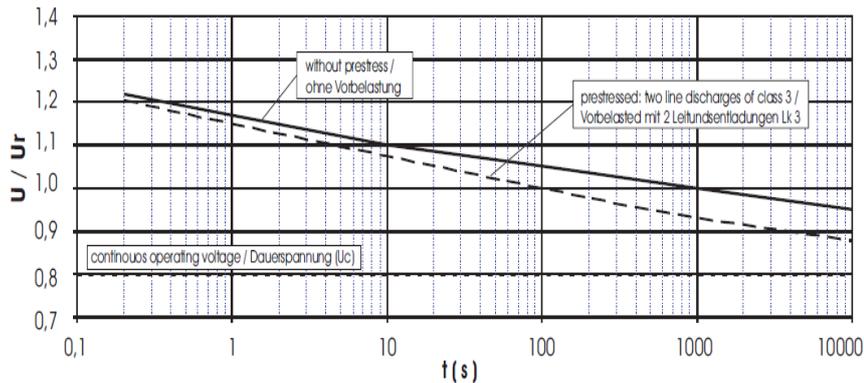
Dónde:

$K_o$  = Factor de diseño del pararrayos.

$K_t$  = Capacidad del pararrayos y depende del tiempo de duración de la sobretensión temporal.

Usamos la siguiente gráfica para hallar el valor de  $K_t$ .

**Power frequency voltage versus time characteristic (TOV) (initial temperatur +60 °C)**  
**Wechselspannungs - Zeit - Kennlinie (TOV) (Ausgangstemperatur +60°C)**



| Tiempo de duración de la sobretensión temporal TOV | $k_t$ | $k_t$ (para el cálculo) |
|--|-------|-------------------------|
| 1 Seg.   | 1.15  | 1.1                     |
| 10 Seg.  | 1.1   |                         |
| 100 Seg.   | 1.05  |                         |

| Valores Standard    |      |
|---------------------|------|
| Factor (Ko)         | 0.8  |
| Factor de seguridad | 1.05 |

Por tanto se procede al cálculo de los siguientes valores:

|       |   |        |    |       |   |        |    |
|-------|---|--------|----|-------|---|--------|----|
| $R_o$ | = | 54.94  | kV | $R_e$ | = | 55.94  | kV |
|       | = | 109.88 | kV |       | = | 111.87 | kV |
|       | = | 185.65 | kV |       | = | 195.78 | kV |

|                                   |   |       |        |        |           |                                   |
|-----------------------------------|---|-------|--------|--------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Máx(<math>R_o, R_e</math>)</b> | = | 55.94 | 111.87 | 195.78 | <b>kV</b> | Máximo valor entre ( $R_o, R_e$ ) |
|-----------------------------------|---|-------|--------|--------|-----------|-----------------------------------|

Verificando la Tabla 1 del standard IEC 60099-1 y el catálogo de pararrayos, el valor próximo y normalizado es:

|       |   |    |     |     |           |                                       |
|-------|---|----|-----|-----|-----------|---------------------------------------|
| $U_r$ | = | 60 | 120 | 198 | <b>kV</b> | Tensión nominal normalizada ( $U_r$ ) |
|-------|---|----|-----|-----|-----------|---------------------------------------|

**2 ENERGÍA A DISIPAR POR EL PARARRAYOS.**

El pararrayos ó descargador que se debe instalar, debe ser capaz de disipar y absorber la energía debida a los fenómenos transitorios que originan las sobretensiones que se originan por diferentes causas, como se describen a continuación:

- Recierre monofásico de líneas largas y su conexión.
- Descargas atmosféricas

**2.1 Recierre de líneas y su conexión**

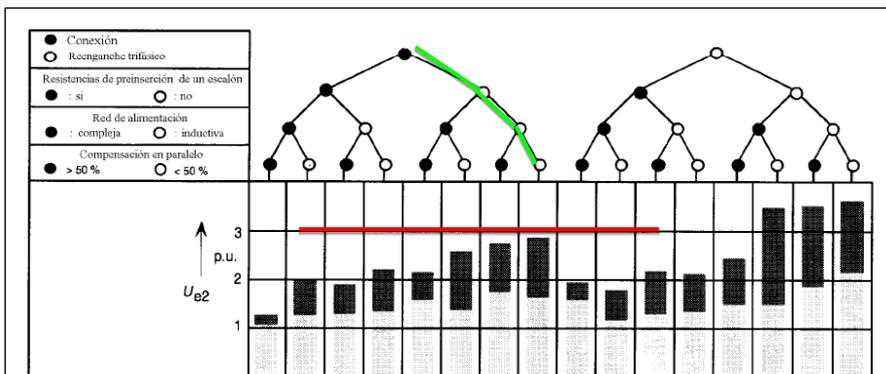
Se define la siguiente relación:

$$W_1 = \frac{2 \times U_{ps} \times (U_e - U_{ps}) \times T_w}{Z}$$

Dónde:

|                 |   |  |        |        |        |                             |
|-----------------|---|--|--------|--------|--------|-----------------------------|
| $W_1$           | = | Energía absorbida por el pararrayos  | 10     | 39     | 117    | <b>kJ</b>                   |
| $U_{ps}$ (SIPL) | = | Nivel de protección al impulso de maniobra con onda 30/20 $\mu$ s (1kA)  | 124    | 248    | 408    | <b>kVp</b>                  |
| $U_e$           | = | Sobretensión esperada sin pararrayos, que es obtenida de la fig. N° 1 ( $U_{e2} = k \times U_m \times \sqrt{2} + \sqrt{3}$ ) | 172    | 343    | 580    | <b>kVp</b>                  |
| $Z$             | = | Impedancia característica de la línea, ohmios  | 300    | 300    | 300    | <b>Ohmios</b>               |
| $T_w$           | = | Tiempo de viaje de la onda   | 250.00 | 250.00 | 250.00 | <b><math>\mu</math>s</b>    |
|                 |   | • Longitud de la línea más larga que sale de la S.E.   | 75     | 75     | 75     | <b>km</b>                   |
|                 |   | • Velocidad de Propagación   | 0.3    | 0.3    | 0.3    | <b>km/<math>\mu</math>s</b> |
| $k$             | = | Factor de sobretensión obtenido de la Fig. 1   | 2.9    | 2.9    | 2.9    |                             |

Se define el tiempo de viaje de la onda como:  $T_w = \frac{\text{Longitud de Línea (km)}}{\text{Velocidad de Pr opagación}}$



**Fig. 1 – Rango de sobretensiones de frente lento 2% en el extremo de recepción debida la conexión y reenganche de la línea**

**2.2 Descargas atmosféricas.**

$$W_2 = \left[ 2 \times U_f - N(U_{pl}) \times (1 + \ln(2 \times U_f / U_{pl})) \right] \times \frac{U_{pl} \times T_1}{Z}$$

Dónde:

|                              |   |  |        |        |        |               |
|------------------------------|---|--|--------|--------|--------|---------------|
| <b>W<sub>2</sub></b>         | = | Energía absorbida por el pararrayos durante la descarga  | 212.66 | 321.73 | 874.38 | <b>kJ</b>     |
| <b>U<sub>pl</sub> (LIPL)</b> | = | Tensión residual del pararrayos al impulso tipo rayo   | 156    | 311    | 512    | <b>kV</b>     |
| <b>U<sub>f</sub></b>         | = | Tensión de flameo inverso negativo de la línea   | 955    | 955    | 1575   | <b>kV</b>     |
| <b>Z</b>                     | = | Impedancia característica de la línea, ohmios  | 300    | 300    | 300    | <b>Ohmios</b> |
| <b>N</b>                     | = | Número de líneas conectadas al pararrayos  | 1      | 1      | 1      | <b>líneas</b> |
| <b>T<sub>1</sub></b>         | = | Duración equivalente de la corriente de la descarga incluyendo la primera y las descargas subsecuentes | 300    | 300    | 300    | <b>µs</b>     |

| <b>W<sub>2</sub></b>     |         | <b>W<sub>p</sub></b> |         |         |
|--------------------------|---------|----------------------|---------|---------|
| <b>Energía Calculada</b> |         | <b>Capacidad del</b> |         |         |
| 212.66                   | kJ      | 468                  | kJ      |         |
| 3.54                     | kJ/kVUr | 7.8                  | kJ/kVUr | Clase 3 |
| 321.73                   | kJ      | 468                  | kJ      |         |
| 2.68                     | kJ/kVUr | 7.8                  | kJ/kVUr | Clase 3 |
| 874.38                   | kJ      | 468                  | kJ      |         |
| 4.42                     | kJ/kVUr | 7.8                  | kJ/kVUr | Clase 3 |

W<sub>p</sub> > W<sub>1</sub> **Correcto**  
 W<sub>p</sub> > W<sub>2</sub> **Correcto**

**3 CÁLCULO DEL AISLADOR CONTENEDOR DEL PARARRAYOS.**

**3.1 Tensiones de Soportabilidad**

Del catálogo, tenemos:

|  |     |     |     |    |
|--|-----|-----|-----|----|
| Nivel de protección a un impulso de manobra a 2 kA (50/60 µs), U <sub>ps</sub> | 124 | 248 | 408 | kV |
| Nivel de protección a un impulso de rayo a 20 kA (8/20 µs), U <sub>pl</sub>    | 156 | 311 | 512 | kV |

**Aislamiento hasta 1 000 m.s.n.m.**

|  |       |        |        |       |
|--|-------|--------|--------|-------|
| LIWV (Lightning Impulse Withstand Voltage) $LIWV = 1.3 U_{pl}$                 | 202.8 | 404.3  | 665.6  | kVp   |
| Tensión soportada a impulso tipo rayo  |       |        |        |       |
| PFWV (Power-Frequency Withstand Voltage) $PFWV = 1.06 \frac{U_{ps}}{\sqrt{2}}$ | 92.94 | 185.88 | 305.81 | kVrms |
| Tensión soportada a frecuencia industrial                                      |       |        |        |       |

**Factor de corrección por altura (mayores a 1000 msnm)**  $K_a = e^{m(\frac{H-1000}{8150})}$  m = 1

**Aislamiento a una altura de 3730 m.s.n.m.**

|  |        |        |        |       |
|--|--------|--------|--------|-------|
| LIWV (Lightning Impulse Withstand Voltage) $LIWV = 1.3 K_a U_{pl}$                 | 283.49 | 565.17 | 930.44 | kVp   |
| Tensión soportada a impulso tipo rayo  |        |        |        |       |
| PFWV (Power-Frequency Withstand Voltage) $PFWV = 1.06 K_a \frac{U_{ps}}{\sqrt{2}}$ | 129.92 | 259.85 | 427.49 | kVrms |
| Tensión soportada a frecuencia industrial  |        |        |        |       |

|  |               |            |            |                |              |
|--|---------------|------------|------------|----------------|--------------|
| <b>Los valores normalizados seleccionados, son los mismos seleccionados en la memoria de cálculo de coordinación de aislamiento.</b> | <b>LIWV =</b> | <b>450</b> | <b>750</b> | <b>1300.00</b> | <b>kVp</b>   |
|  | <b>FPWV =</b> | <b>185</b> | <b>325</b> | <b>460.00</b>  | <b>kVrms</b> |

**3.2 Determinación de la Distancia de Arco mínima (H)**

$$H = \frac{U_{pl}(\text{Corregido})}{500 \text{ kV/m}}$$

|            |            |             |             |           |
|------------|------------|-------------|-------------|-----------|
| <b>H =</b> | <b>567</b> | <b>1130</b> | <b>1861</b> | <b>mm</b> |
|------------|------------|-------------|-------------|-----------|

**3.3 Longitud de Fuga**

$$L_{fTotal} = k_a l_{f0} U_m k_{ad}$$

$k_a = e^{0.5(\frac{H-1500}{8150})}$  Corrección por altura de acuerdo a la norma IEC 60815, H>1500 msnm.  
 $l_{f0} = 25 \text{ mm/kV}$   
 $U_m = 72.5 \quad 145 \quad 245 \text{ kV}$   
 $k_{ad} = 1$  Si el diámetro del aislador es menor a 300 mm.  
 $k_{ad} = 0.0005Da + 0.85$  Si el diámetro del aislador es mayor o igual a 300 mm.  
 Da Diámetro del aislador  
 kad = 1 Da < 300 mm  
**L<sub>fTotal</sub> = 2078 4156 7093 mm**

**4 CONCLUSIONES.**  
 Los pararrayos a instalar tendrán las siguientes características

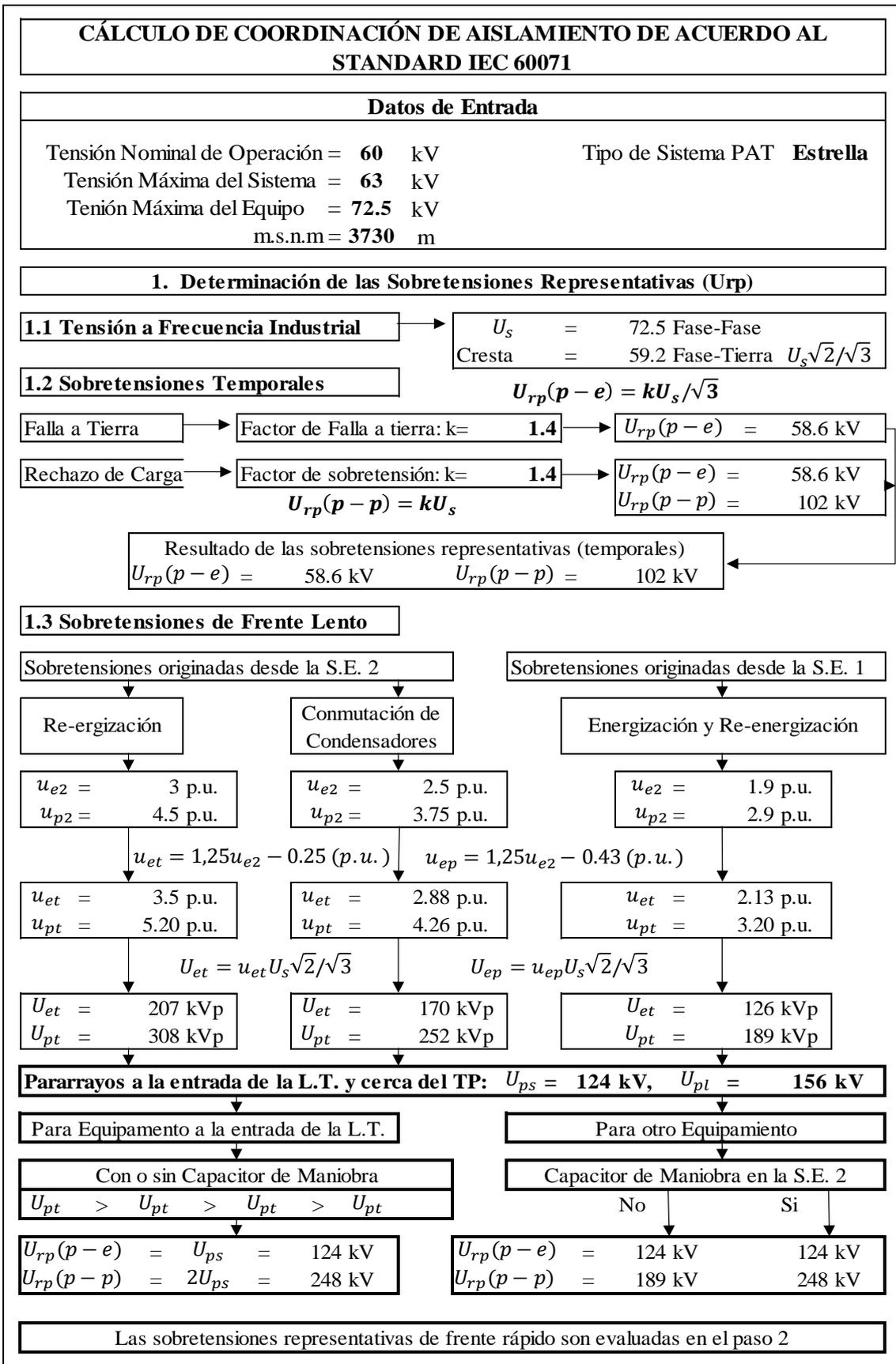
|  |         |         |         |     |
|--|---------|---------|---------|-----|
| Tensión nominal de la red                                      | 60      | 138     | 220     | kV  |
| Tensión nominal  | 60      | 120     | 198     | kV  |
| Tensión máxima de operación continua (Uc ó MCOV)               | 48      | 98      | 160     | kV  |
| Sobre tensión temporal soportada (TOV) a 10 seg.               | 66      | 132     | 217     | kV  |
| Tensión residual máxima a impulso maniobra 2 kA (30/60 µs)     | 124     | 248     | 408     | kV  |
| Tensión residual máxima a impulso rayo 20 kA (8/20 µs)         | 156     | 311     | 512     | kVp |
| Corriente de descarga  | 10      | 10      | 10      | kA  |
| Capacidad de disipación de energía                             | Clase 3 | Clase 3 | Clase 3 |     |
| Distancia de arco (Housing) >                                  | 567     | 1130    | 1861    | mm  |
| Aislamiento exterior del revestimiento a impulso tipo rayo     | 450.00  | 750.00  | 1300.00 | kVp |
| Aislamiento exterior del revestimiento a frecuencia industrial | 185.00  | 325.00  | 460.00  | kV  |
| Longitud de fuga   | 2078    | 4156    | 7093    | mm  |

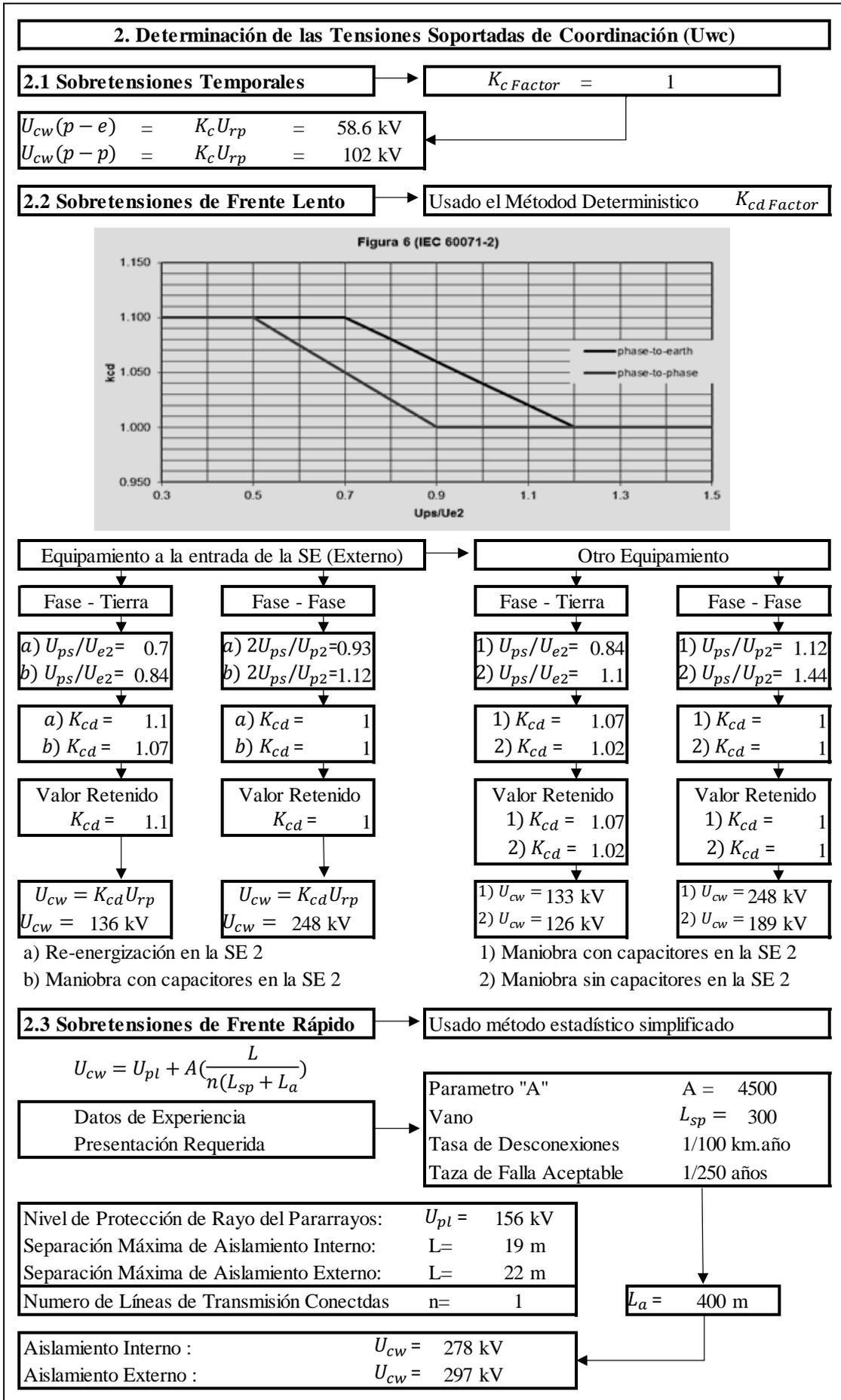
**5 CATÁLOGO DEL PARARRAYOS**

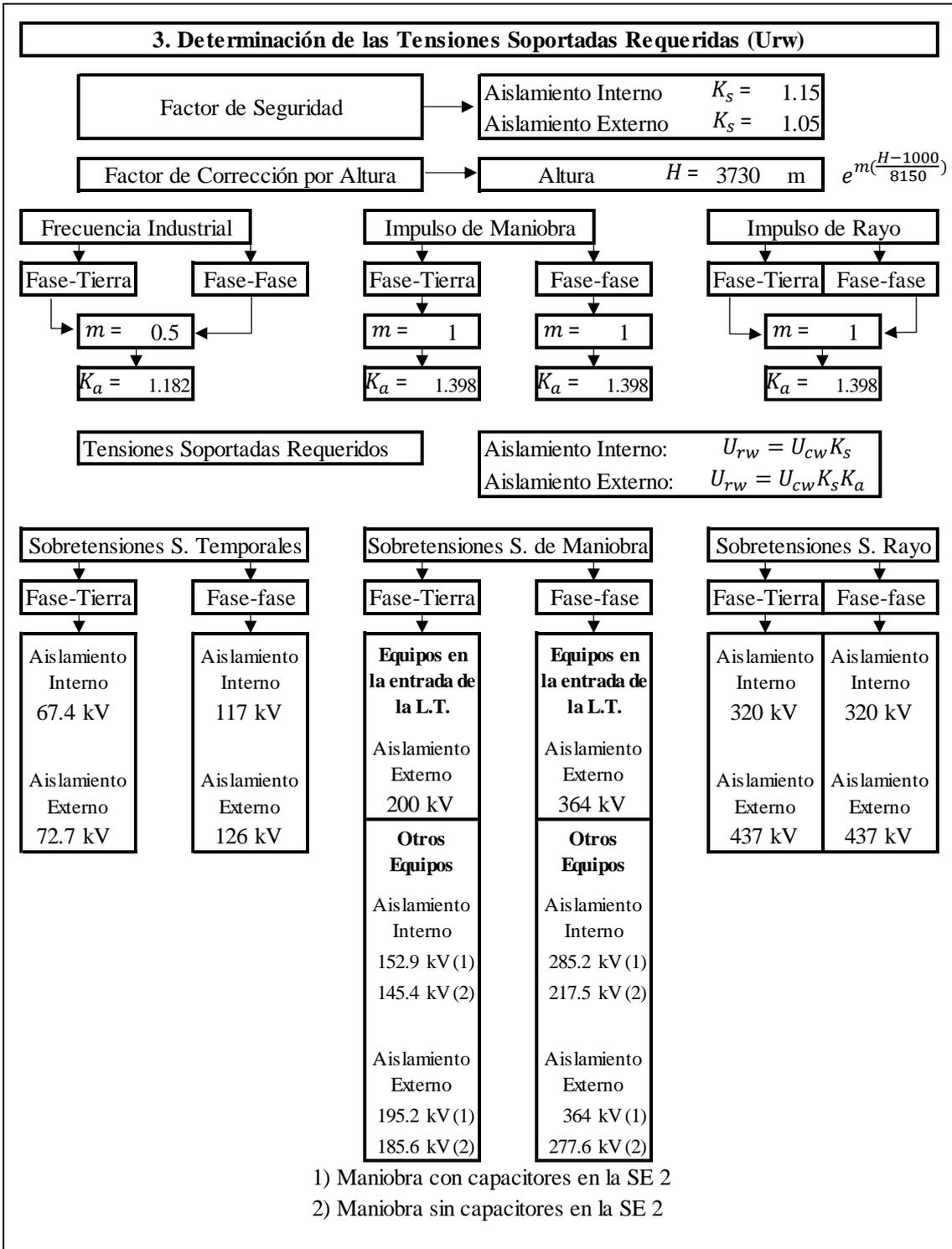
| Tensión máxima de red               | Tensión nominal                     | Tensión de trabajo continuo máxima 1) |                           | Capacidad de sobretensiones temporales 2) |                           | Tensión residual máxima con onda de corriente |                            |                            |                            |                             |                             |                             |      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---|---------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|
|                                     |                                     | según IEC                             | según ANS/IEEE            | 1 s                                       | 10 s                      | 30/60 µs                                      |                            |                            |                            | 8/20 µs                     |                             |                             |      |
|                                     |                                     |                                       |                           |   |                           | U <sub>c</sub>                                | MCOV                       | 1 s                        | 10 s                       | 0,5 kA                      | 1 kA                        | 2 kA                        | 5 kA |
| U <sub>m</sub><br>kV <sub>rms</sub> | U <sub>r</sub><br>kV <sub>rms</sub> | U <sub>c</sub><br>kV <sub>rms</sub>   | MCOV<br>kV <sub>rms</sub> | 1 s<br>kV <sub>rms</sub>                  | 10 s<br>kV <sub>rms</sub> | 0,5 kA<br>kV <sub>pico</sub>                  | 1 kA<br>kV <sub>pico</sub> | 2 kA<br>kV <sub>pico</sub> | 5 kA<br>kV <sub>pico</sub> | 10 kA<br>kV <sub>pico</sub> | 20 kA<br>kV <sub>pico</sub> | 40 kA<br>kV <sub>pico</sub> |      |
| 36 <sup>3</sup>                     | 24                                  | 19.2                                  | 19.5                      | 27.8                                      | 26.4                      | 46.1  | 47.6                       | 49.5                       | 53.6                       | 56.4                        | 62.1                        | 69.4                        |      |
|                                     | 30                                  | 24.0                                  | 24.4                      | 34.8                                      | 33.0                      | 57.6  | 59.5                       | 61.8                       | 67.0                       | 70.5                        | 77.6                        | 86.8                        |      |
|                                     | 33                                  | 26.4                                  | 26.7                      | 38.2                                      | 36.3                      | 63.4  | 65.4                       | 68.0                       | 73.7                       | 77.6                        | 85.4                        | 95.4                        |      |
|                                     | 36                                  | 28.8                                  | 29.0                      | 41.7                                      | 39.6                      | 69.2  | 71.4                       | 74.2                       | 80.4                       | 84.6                        | 93.1                        | 105                         |      |
|                                     | 39                                  | 31.2                                  | 31.5                      | 45.2                                      | 42.9                      | 74.9  | 77.3                       | 80.3                       | 87.1                       | 91.7                        | 101                         | 113                         |      |
| 52                                  | 42                                  | 34                                    | 34.0                      | 48.7                                      | 46.2                      | 80.7  | 83.3                       | 86.5                       | 93.8                       | 98.7                        | 109                         | 122                         |      |
|                                     | 48                                  | 38                                    | 39.0                      | 55.6                                      | 52.8                      | 92.2  | 95.1                       | 98.9                       | 108                        | 113                         | 125                         | 139                         |      |
|                                     | 51                                  | 41                                    | 41.3                      | 59.1                                      | 56.1                      | 98.0  | 102                        | 105                        | 114                        | 120                         | 132                         | 148                         |      |
|                                     | 54                                  | 43                                    | 43.0                      | 62.6                                      | 59.4                      | 104   | 107                        | 112                        | 121                        | 127                         | 140                         | 157                         |      |
|                                     | 60                                  | 48                                    | 48.0                      | 69.6                                      | 66.0                      | 116   | 119                        | 124                        | 134                        | 141                         | 156                         | 174                         |      |
| 72                                  | 54                                  | 43                                    | 43.0                      | 62.6                                      | 59.4                      | 104   | 107                        | 112                        | 121                        | 127                         | 140                         | 157                         |      |
|                                     | 60                                  | 48                                    | 48.0                      | 69.6                                      | 66.0                      | 116   | 119                        | 124                        | 134                        | 141                         | 156                         | 174                         |      |
|                                     | 66                                  | 53                                    | 53.4                      | 76.5                                      | 72.6                      | 127   | 131                        | 136                        | 148                        | 156                         | 171                         | 191                         |      |
|                                     | 72                                  | 58                                    | 58.0                      | 83.5                                      | 79.2                      | 139   | 143                        | 149                        | 161                        | 170                         | 187                         | 209                         |      |
|                                     | 75                                  | 60                                    | 60.7                      | 87.0                                      | 82.5                      | 144   | 149                        | 155                        | 168                        | 177                         | 194                         | 217                         |      |
| 100                                 | 84                                  | 67                                    | 68.0                      | 97.4                                      | 92.4                      | 162   | 167                        | 173                        | 188                        | 198                         | 218                         | 243                         |      |
|                                     | 90                                  | 72                                    | 72.0                      | 104                                       | 99.0                      | 173   | 179                        | 186                        | 201                        | 212                         | 233                         | 261                         |      |
|                                     | 96                                  | 77                                    | 77.0                      | 111                                       | 105                       | 185   | 191                        | 198                        | 215                        | 226                         | 249                         | 278                         |      |
|                                     | 108                                 | 78                                    | 84.0                      | 125                                       | 118                       | 208   | 214                        | 223                        | 242                        | 254                         | 280                         | 313                         |      |
|                                     | 120                                 | 78                                    | 98.0                      | 139                                       | 132                       | 231   | 238                        | 248                        | 268                        | 282                         | 311                         | 347                         |      |
| 123                                 | 132                                 | 78                                    | 106                       | 153                                       | 145                       | 254   | 262                        | 272                        | 295                        | 311                         | 342                         | 382                         |      |
|                                     | 138                                 | 78                                    | 111                       | 160                                       | 151                       | 265   | 274                        | 285                        | 309                        | 325                         | 357                         | 399                         |      |
|                                     | 145                                 | 108                                   | 86                        | 86.0                                      | 125                       | 118   | 208                        | 214                        | 223                        | 242                         | 254                         | 280                         | 313  |
|                                     |                                     | 120                                   | 92                        | 98.0                                      | 139                       | 132   | 231                        | 238                        | 248                        | 268                         | 282                         | 311                         | 347  |
|                                     |                                     | 132                                   | 92                        | 106                                       | 153                       | 145   | 254                        | 262                        | 272                        | 295                         | 311                         | 342                         | 382  |
| 170                                 | 138                                 | 92                                    | 111                       | 160                                       | 151                       | 265   | 274                        | 285                        | 309                        | 325                         | 357                         | 399                         |      |
|                                     | 144                                 | 92                                    | 115                       | 167                                       | 158                       | 277   | 286                        | 297                        | 322                        | 339                         | 373                         | 417                         |      |
|                                     | 132                                 | 106                                   | 106                       | 153                                       | 145                       | 254   | 262                        | 272                        | 295                        | 311                         | 342                         | 382                         |      |
|                                     | 144                                 | 108                                   | 115                       | 167                                       | 158                       | 277   | 286                        | 297                        | 322                        | 339                         | 373                         | 417                         |      |
| 245                                 | 162                                 | 108                                   | 131                       | 187                                       | 178                       | 312   | 321                        | 334                        | 362                        | 381                         | 419                         | 469                         |      |
|                                     | 168                                 | 108                                   | 131                       | 194                                       | 184                       | 323   | 333                        | 346                        | 376                        | 395                         | 435                         | 486                         |      |
|                                     | 180                                 | 144                                   | 144                       | 208                                       | 198                       | 346   | 357                        | 371                        | 402                        | 423                         | 466                         | 521                         |      |
|                                     | 192                                 | 154                                   | 154                       | 222                                       | 211                       | 369   | 381                        | 396                        | 429                        | 452                         | 497                         | 555                         |      |
|                                     | 198                                 | 156                                   | 160                       | 229                                       | 217                       | 381   | 393                        | 408                        | 443                        | 466                         | 512                         | 573                         |      |
| 245                                 | 210                                 | 156                                   | 170                       | 243                                       | 231                       | 404   | 417                        | 433                        | 469                        | 494                         | 543                         | 608                         |      |
|                                     | 216                                 | 156                                   | 175                       | 250                                       | 237                       | 415   | 428                        | 445                        | 483                        | 508                         | 559                         | 625                         |      |
|                                     | 219                                 | 156                                   | 177                       | 254                                       | 240                       | 421   | 434                        | 451                        | 489                        | 515                         | 567                         | 634                         |      |
|                                     | 222                                 |                                       |                           |   |                           |   |                            |                            |                            |                             |                             |                             |      |
|                                     | 228                                 | 156                                   | 180                       | 264                                       | 250                       | 438   | 452                        | 470                        | 510                        | 536                         | 590                         | 660                         |      |

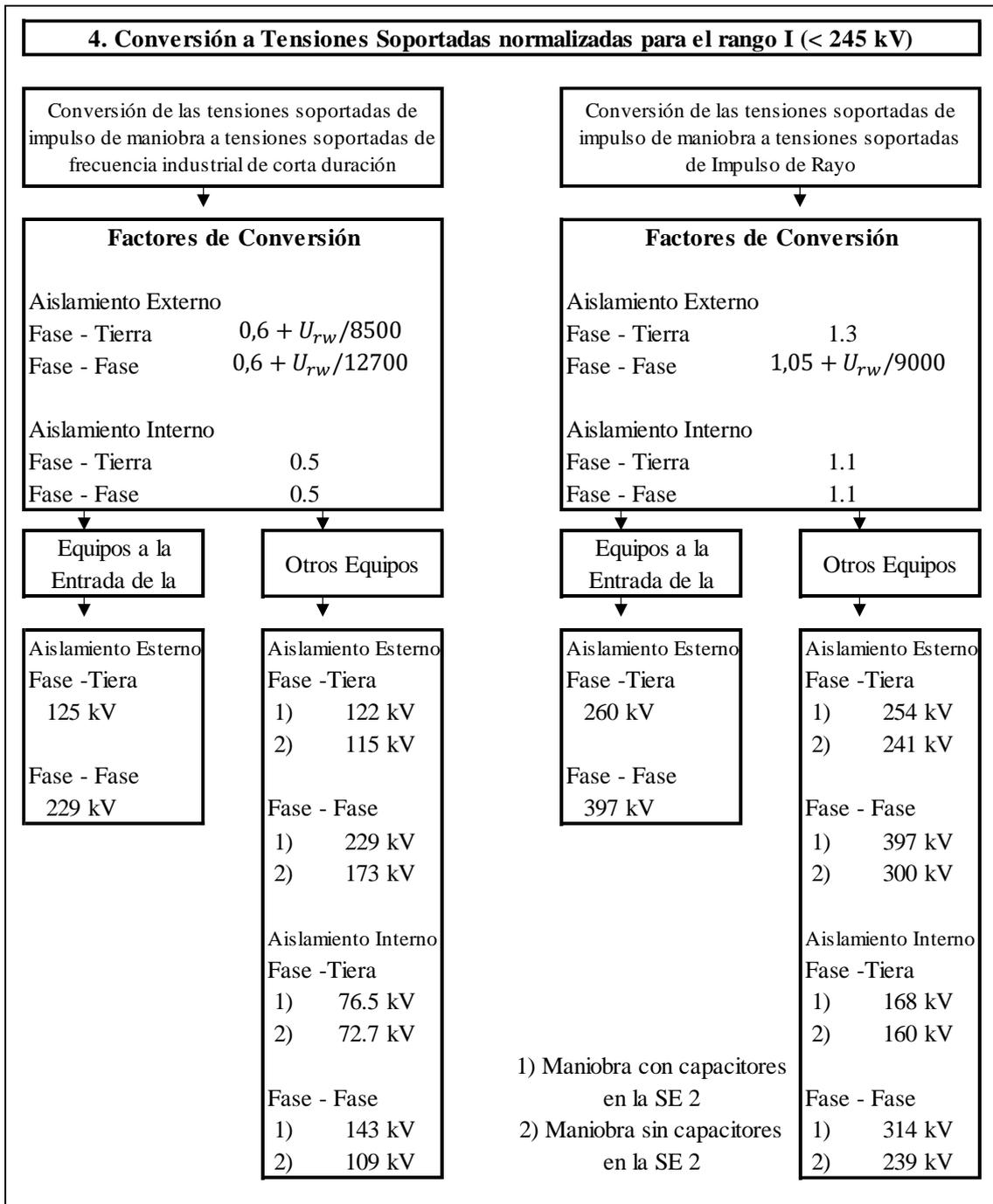
## **ANEXO B: Cálculo de la Coordinación de Aislamiento**

### **B.1 Aislamiento en 60 kV**









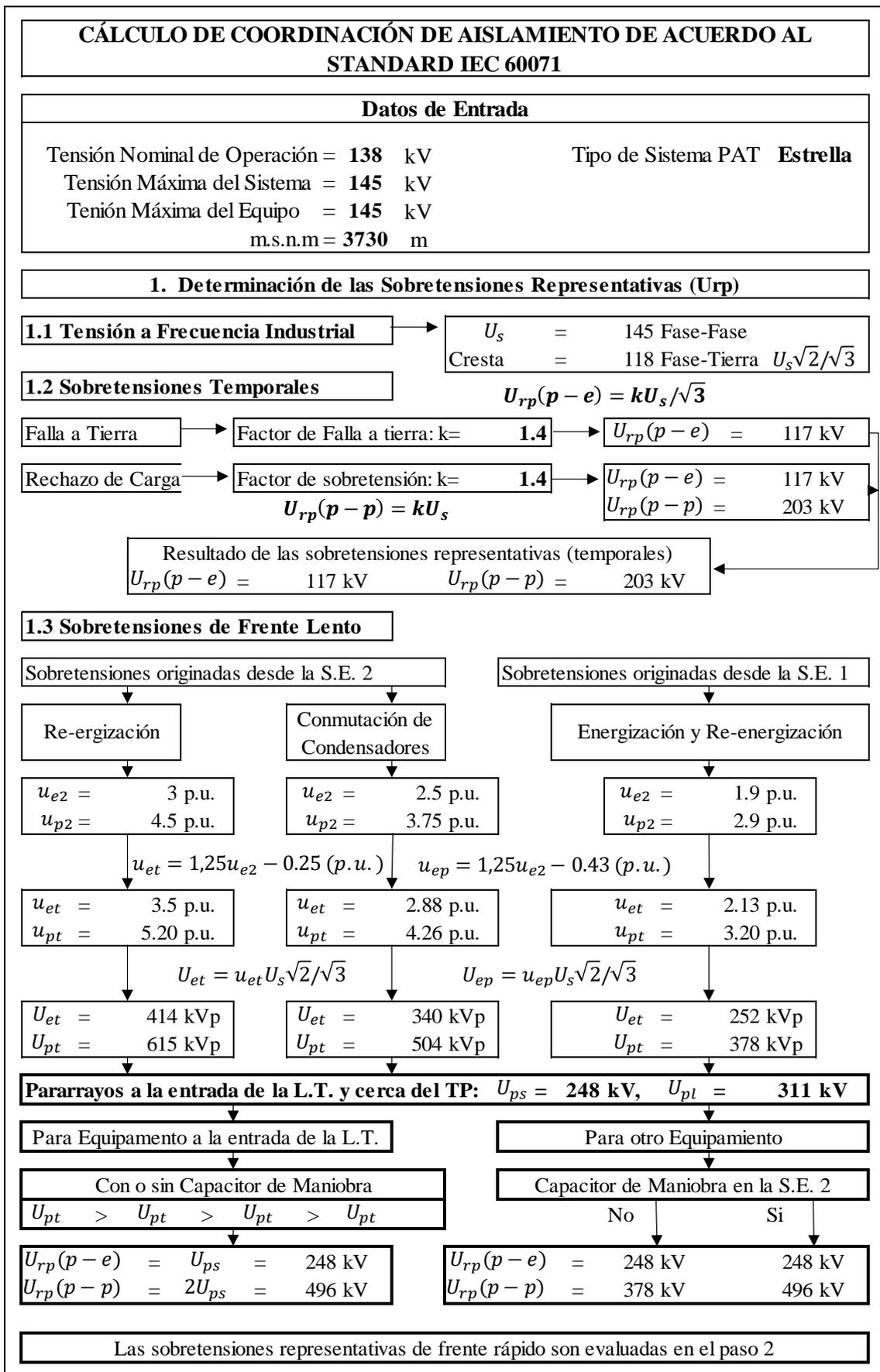
### 5. Selección de Valores de Tensiones soportadas Estandarizadas

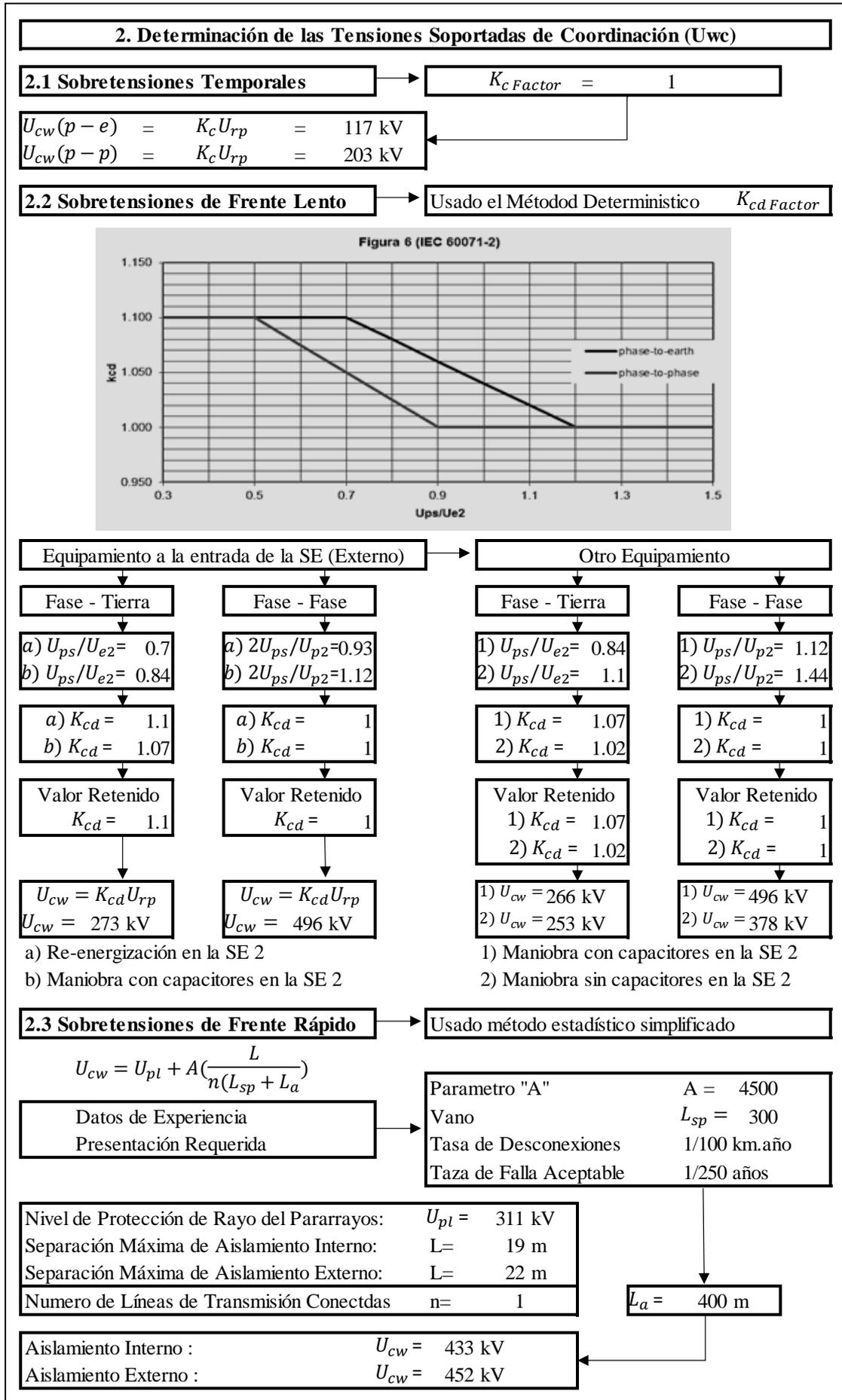
| KVrms para frecuencia industrial<br>KVpico para impulsos de maniobra y rayo |             | Aislamiento Externo                             |             |                   |             | Aislamiento Interno |             |
|---|-------------|---|-------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|
|   |             | Equipos a la Entrada de la Línea de Transmisión |             | Otro Equipamiento |             |                     |             |
|   |             | $U_{rw}(s)$                                     | $U_{rw}(c)$ | $U_{rw}(s)$       | $U_{rw}(c)$ | $U_{rw}(s)$         | $U_{rw}(c)$ |
| A frecuencia industrial   | Fase-Tierra | <b>73</b>                                       | 125         | <b>73</b>         | 122         | <b>67</b>           | 76          |
|   | Fase-Fase   | <b>126</b>                                      | 229         | <b>126</b>        | 229         | <b>117</b>          | 143         |
| Impulso de maniobra   | Fase-Tierra | 200   | -           | 195               | -           | 153                 | -           |
|   | Fase-Fase   | 364   | -           | 364               | -           | 285                 | -           |
| Impulso de Rayo   | Fase-Tierra | <b>437</b>                                      | 260         | <b>437</b>        | 254         | <b>320</b>          | 168         |
|   | Fase-Fase   | 437   | <b>397</b>  | 437               | 397         | 320                 | <b>314</b>  |

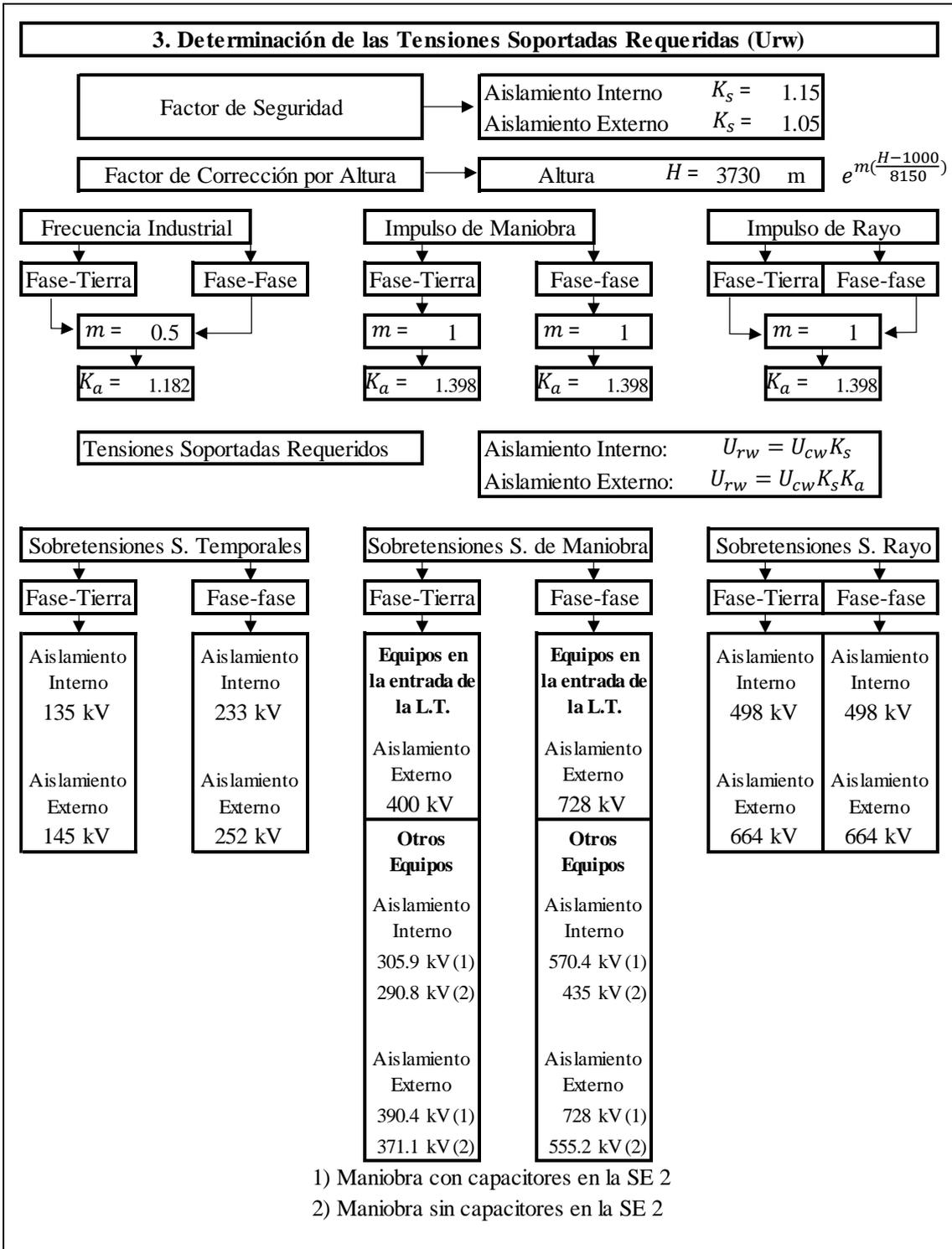
#### Valores de sostenimiento estandarizados Seleccionados

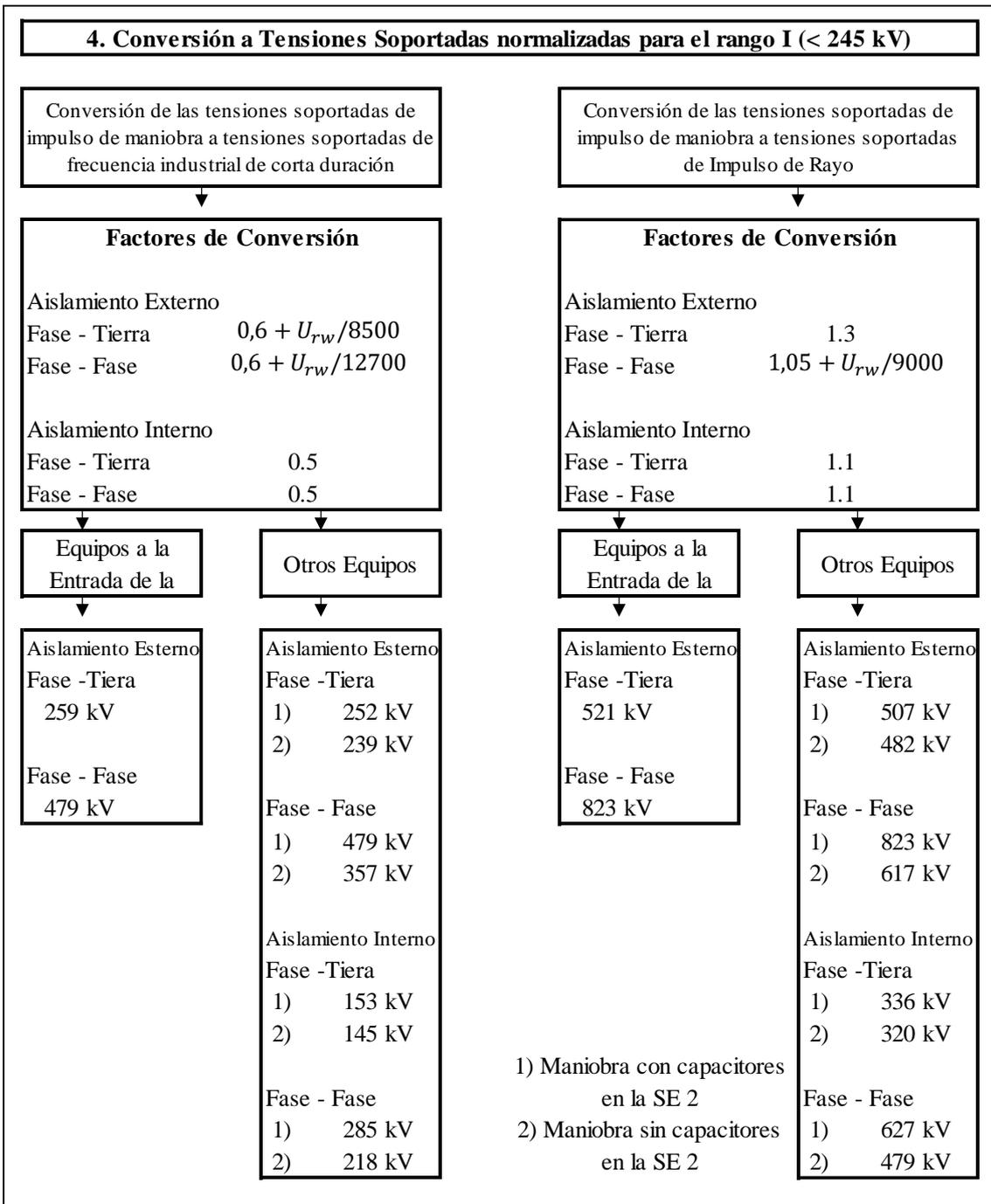
| Aislamiento Externo                                      |   |            |       |
|--|---|------------|-------|
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | <b>185</b> | kVrms |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 185        | kVrms |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>450</b> | kVp   |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 450        | kVp   |
| Aislamiento Interno                                      |   |            |       |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | <b>140</b> | kVrms |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 140        | kVrms |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>325</b> | kVp   |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 325        | kVp   |

## B.2 Aislamiento 138 kV









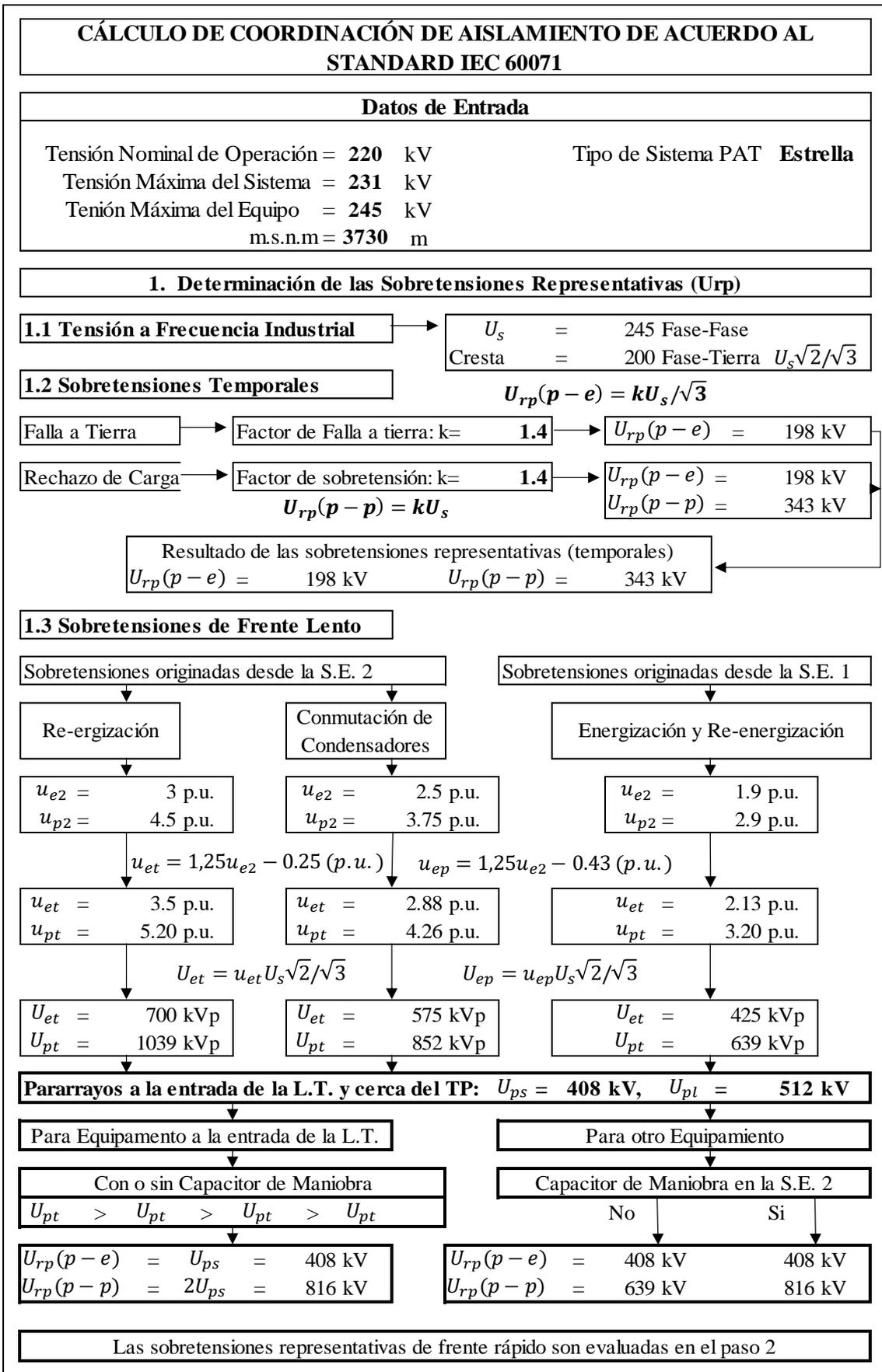
### 5. Selección de Valores de Tensiones soportadas Estandarizadas

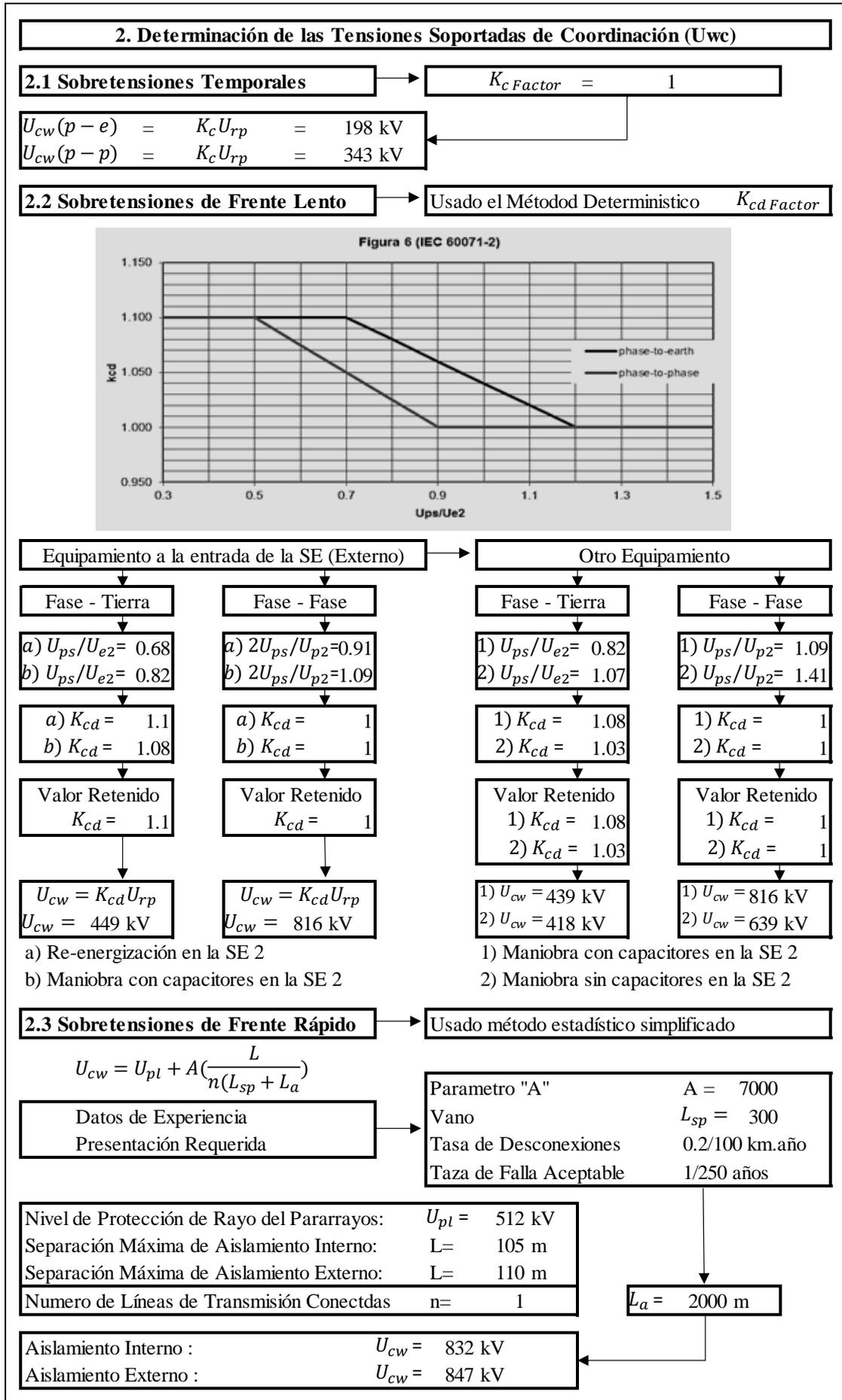
| KVrms para frecuencia industrial<br>KVpico para impulsos de maniobra y rayo |             | Aislamiento Externo                             |             |                   |             | Aislamiento Interno |             |
|---|-------------|---|-------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|
|   |             | Equipos a la Entrada de la Línea de Transmisión |             | Otro Equipamiento |             |                     |             |
|   |             | $U_{rw}(s)$                                     | $U_{rw}(c)$ | $U_{rw}(s)$       | $U_{rw}(c)$ | $U_{rw}(s)$         | $U_{rw}(c)$ |
| A frecuencia industrial   | Fase-Tierra | <b>145</b>                                      | 259         | <b>145</b>        | 252         | <b>135</b>          | 153         |
|   | Fase-Fase   | <b>252</b>                                      | 479         | <b>252</b>        | 479         | <b>233</b>          | 285         |
| Impulso de maniobra   | Fase-Tierra | 400   | -           | 390               | -           | 306                 | -           |
|   | Fase-Fase   | 728   | -           | 728               | -           | 570                 | -           |
| Impulso de Rayo   | Fase-Tierra | <b>664</b>                                      | 521         | <b>664</b>        | 507         | <b>498</b>          | 336         |
|   | Fase-Fase   | 664   | <b>823</b>  | 664               | 823         | 498                 | <b>627</b>  |

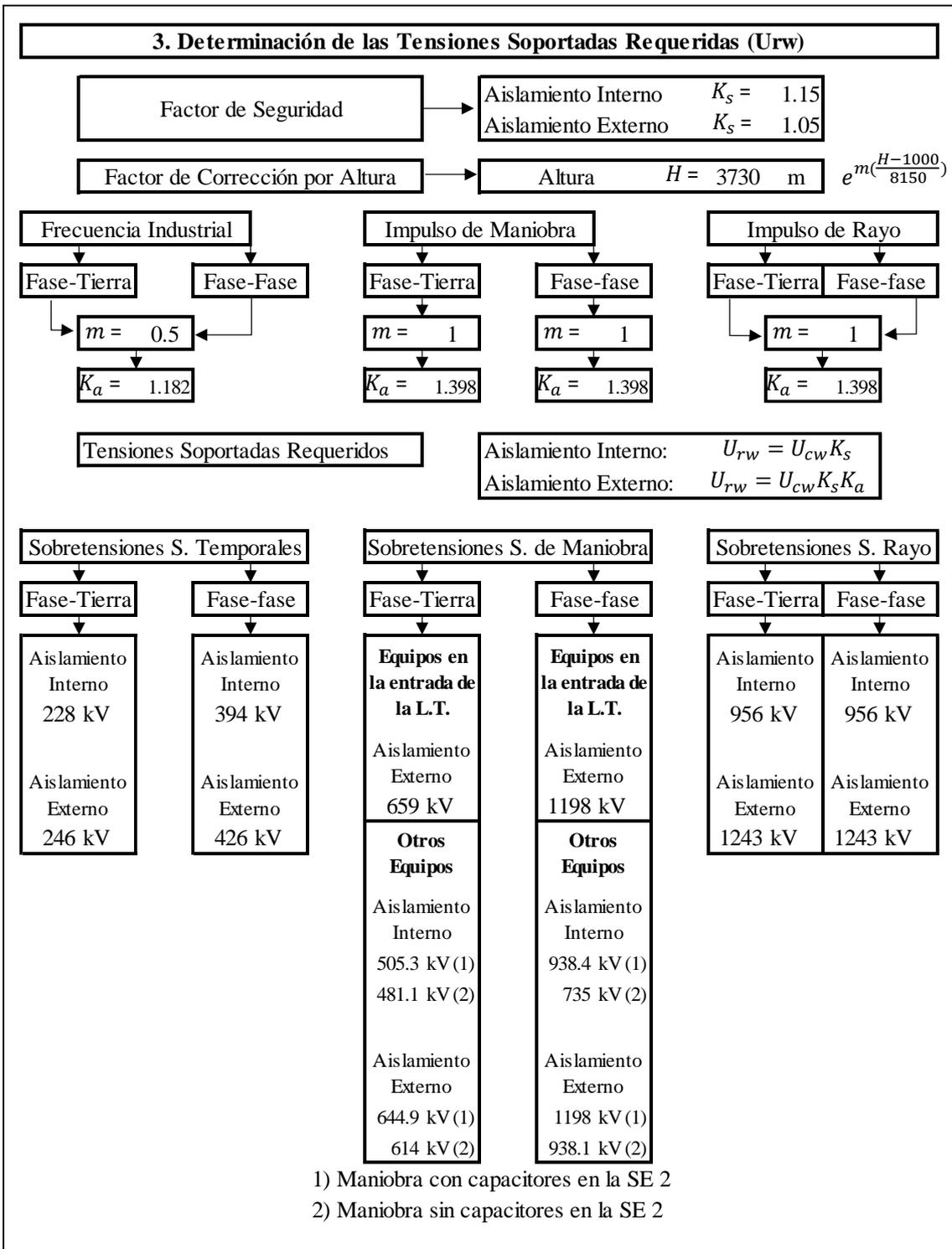
#### Valores de sostenimiento estandarizados Seleccionados

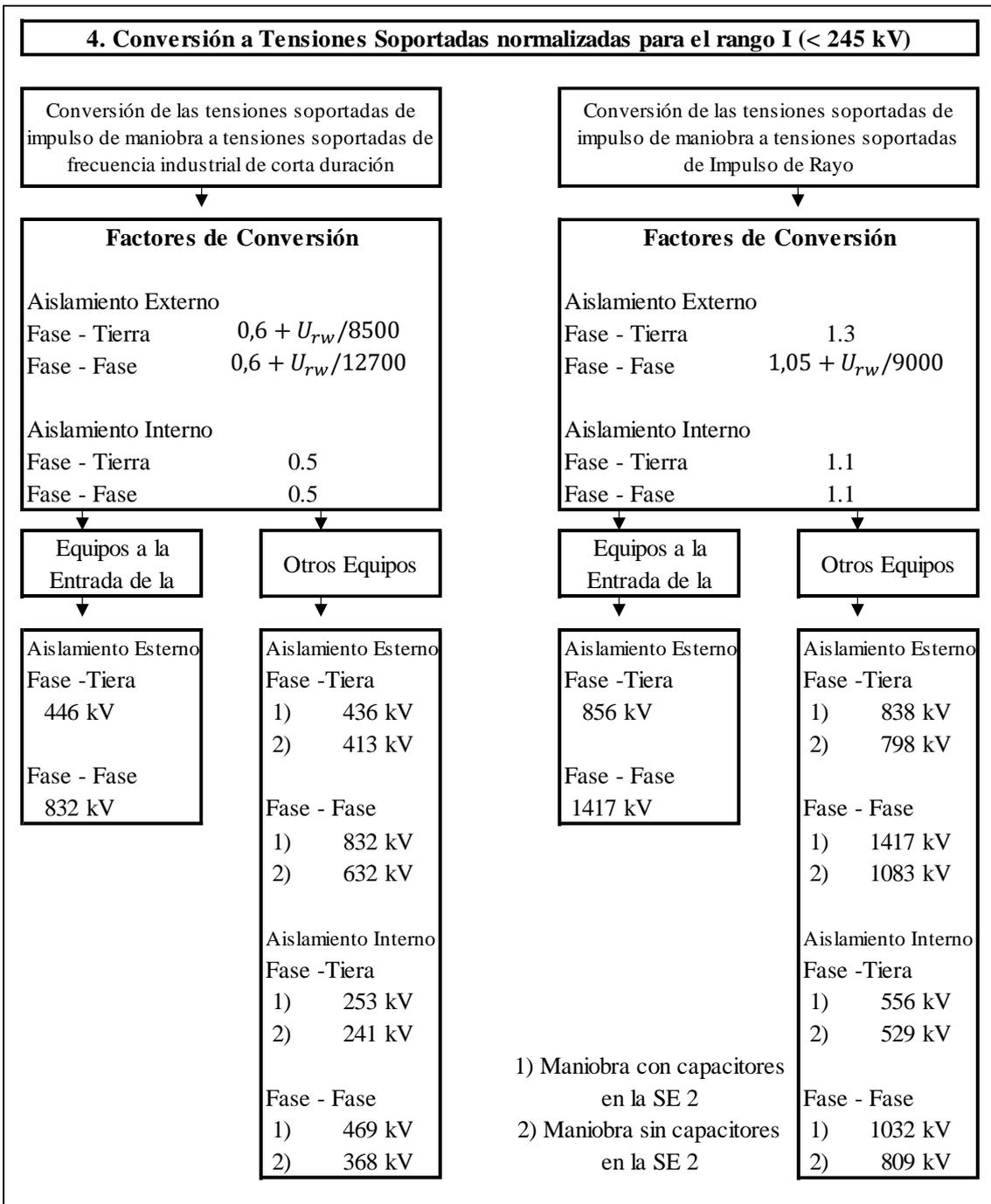
| Aislamiento Externo                                      |   |            |       |
|--|---|------------|-------|
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | <b>325</b> | kVrms |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 360        | kVrms |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>750</b> | kVp   |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 850        | kVp   |
| Aislamiento Interno                                      |   |            |       |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | <b>275</b> | kVrms |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 275        | kVrms |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>650</b> | kVp   |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 650        | kVp   |

**B.3 Aislamiento en 220 kV**









### 5. Selección de Valores de Tensiones soportadas Estandarizadas

| KVrms para frecuencia industrial<br>KVpico para impulsos de maniobra y rayo |             | Aislamiento Externo                             |             |                   |             | Aislamiento Interno |             |
|---|-------------|---|-------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|
|   |             | Equipos a la Entrada de la Línea de Transmisión |             | Otro Equipamiento |             |                     |             |
|   |             | $U_{rw}(s)$                                     | $U_{rw}(c)$ | $U_{rw}(s)$       | $U_{rw}(c)$ | $U_{rw}(s)$         | $U_{rw}(c)$ |
| A frecuencia industrial   | Fase-Tierra | <b>246</b>                                      | 446         | <b>246</b>        | 436         | <b>228</b>          | 253         |
|   | Fase-Fase   | <b>426</b>                                      | 832         | <b>426</b>        | 832         | <b>394</b>          | 469         |
| Impulso de maniobra   | Fase-Tierra | 659   | -           | 645               | -           | 505                 | -           |
|   | Fase-Fase   | 1198  | -           | 1198              | -           | 938                 | -           |
| Impulso de Rayo   | Fase-Tierra | <b>1243</b>                                     | 856         | <b>1243</b>       | 838         | <b>956</b>          | 556         |
|   | Fase-Fase   | 1243  | <b>1417</b> | 1243              | 1417        | 956                 | <b>1032</b> |

#### Valores de sostenimiento estandarizados Seleccionados

| Aislamiento Externo                                      |   |             |       |
|--|---|-------------|-------|
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | <b>460</b>  | kVrms |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 460>        | kVrms |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>1300</b> | kVp   |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 1425        | kVp   |
| Aislamiento Interno                                      |   |             |       |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase -Tierra | = | <b>460</b>  | kVrms |
| Tensión Normalizada a Frecuencia Industrial Fase - Fase  | = | 460         | kVrms |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase -Tierra       | = | <b>1050</b> | kVp   |
| Tensión Normalizada a Impulso de Rayo Fase - Fase        | = | 1050        | kVp   |

**ANEXO C: Valores de Aislamiento Normalizado (IEC 60071)**

| Niveles de aislamiento normalizado para tensiones asignadas del rango I<br>(1 kV < V <sub>m</sub> < 245 kV) |  |  |
|---|--|--|
| Tensión Máxima del Equipo (U <sub>m</sub> ) en kV<br>(Valor Eficaz)   | Tensión de soportabilidad normalizada de corta duración a frecuencia industrial [kV]<br>(Valor Eficaz) | Tensión de soportabilidad normalizada al impulso tipo rayo [kV] (Valor Pico) |
| 3.6   | 10   | 20   |
|   |  | 40   |
| 7.2   | 20   | 40   |
|   |  | 60   |
| 12  | 28   | 60   |
|   |  | 75   |
|   |  | 95   |
| 17.5  | 38   | 75   |
|   |  | 95   |
| 24  | 50   | 95   |
|   |  | 125  |
|   |  | 145  |
| 36  | 70   | 145  |
|   |  | 170  |
| 52  | 95   | 250  |
| 72.5  | 140  | 325  |
| 123   | 185  | 450  |
|   | 230  | 550  |
| 145   | 185  | 450  |
|   | 230  | 550  |
|   | 275  | 650  |
| 170   | 230  | 550  |
|   | 275  | 650  |
|   | 325  | 750  |
| 245   | 275  | 650  |
|   | 325  | 750  |
|   | 360  | 850  |
|   | 395  | 950  |
|   | 460  | 1050   |