

CASO DE ESTUDIO:

Guía de Selección Apropiaada de Supresores para Subestaciones de Distribución de Media Tensión

Escrito por Ings. Alejandro Viquez López & José Pablo Porras Quirós, 2025-06-30.

SINOPSIS

Un swell representa una falla que incide directamente en los equipos de una subestación de una red eléctrica; comprometiendo de manera significativa su confiabilidad operativa e impactando la calidad de vida de la sociedad cuyo desarrollo depende de la energía eléctrica [5].

SUPRESORES PARA SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN

Los swells en los sistemas de suministro eléctrico son inevitables y son el resultado tanto de los efectos naturales, como la caída de rayos; como de las acciones de conmutación internas del sistema [2]. Además, afectan de diferentes maneras negativamente el sistema, como por ejemplo [6]:

- Daños y mal funcionamiento en los equipos.
- Pérdida de aislamiento de los conductores eléctricos.
- Deterioro prematuro de equipos eléctricos y electrónicos.
- Interrupciones de procesos.
- Pérdida y reducción de la velocidad de transferencia de datos.

Un supresor de picos (surge arrestor) de tensión es un equipo de protección diseñado para reducir los picos de tensión en los sistemas eléctricos, ya sea disipando o desviando la corriente de swell. Su función es controlar el paso de esta energía hacia tierra y puede realizar este proceso de forma repetida conforme a sus especificaciones técnicas [1].

Los dispositivos de protección contra swells cuentan con diferentes clasificaciones y en específico para la etapa de distribución, se dividen en Normal Duty (trabajo normal) o Heavy Duty (trabajo pesado) [5].

Los supresores de óxido metálico (MOSA) están diseñados para reducir de forma repetida los picos de tensión en circuitos de alimentación que operan entre 48 y 64 Hz con tensiones superiores a 1000 V; permitiendo el paso de corrientes de descarga por swell y controlando automáticamente el flujo de corriente del sistema [3].

En los sistemas de distribución, el desafío común no radica en la ausencia de datos, sino en la gran cantidad de puntos de instalación, tipos de swell y variaciones en su duración. Estas diferencias deben ser tomadas en cuenta para definir adecuadamente la capacidad nominal del supresor que se empleará a lo largo del alimentador [4].

Las etapas de selección de los dispositivos para protección contra swells en sistemas de distribución, según la norma IEEE C62.22-2009, se describen a continuación:

1. MCOV (Tensión Máxima de Funcionamiento Continuo)

Corresponde al valor cuadrático medio (rms) máximo designado de la tensión a frecuencia industrial que puede aplicarse de forma continua entre los terminales del supresor [3].

$$V_{L-G(MAX)} = V_{L-L(Max,RMS)}/\sqrt{3}$$

$$MCOV \geq V_{L-G (MAX)}$$

donde $V_{L-L(Max,RMS)}$ es la tensión máxima de funcionamiento del sistema [1].

Para cada ubicación donde se vaya a instalar un supresor de tensión, su MCOV debe ser igual o mayor al valor esperado del sistema. Es fundamental analizar la configuración del sistema (monofásico, delta o estrella) y la forma en que se conectará el supresor (fase a tierra, fase a fase o fase a neutro). El TOV debe ser una consideración principal para los sistemas no conectados a tierra de manera efectiva [4].

En la tabla 1 del estándar IEE C62.22 se muestran las características típicas de estación y supresores de clase intermedia.

Station Class						
Steady-state operation system voltage and arrester ratings effectively grounded systems (NOTE 1)				Protective levels range of industry maxima per unit (crest of 60 Hz) of MCOV		
Max system rms L-L voltage kV*	Max system rms L-G voltage kV*	Min rms MCOV rating kV	Duty- cycle rms voltage rating kV	0.5 μ s FOW protective level (NOTE 2)	8/20 μ s protective level (NOTE 3)	Switching surge protective level (NOTE 4)
4.37	2.52	2.55	3	2.32–2.48	2.10–2.20	1.70–1.85
8.73	5.04	5.1	6–9	2.33–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
13.1	7.56	7.65	9–12	2.33–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
13.9	8.00	8.4	10–15	2.33–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
14.5	8.37	8.4	10–15	2.33–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
26.2	15.1	15.3	18–27	2.33–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
36.2	20.9	22	27–36	2.43–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
48.3	27.8	29	36–48	2.43–2.48	1.97–2.23	1.70–1.85
72	41.8	42	54–72	2.19–2.40	1.97–2.18	1.64–1.84

Tabla 1. Extracto de Tabla 1 (IEE C62.22-1991) - Características típicas de estación y supresores de clase intermedia.

También En las hojas de datos de los fabricantes de los equipos supresores de tensión es común encontrar tablas con el MCOV recomendado para cada configuración de sistema [5].

2. Capacidad TOV (Swell Temporal)

TOV corresponde a un swell oscilatorio asociada a conmutación o fallas (rechazo de carga, fallas monofásicas) y/o no linealidades (efectos de ferresonancia, armónicos) de duración relativamente larga, que no está amortiguada o está ligeramente amortiguada [4]. El supresor puede funcionar durante períodos de tiempo limitados con una tensión superior a la clasificación MCOV.

En esta etapa se debe seleccionar el supresor que resista los swells temporales del sistema en su ubicación. El requisito básico consiste en que la curva de tensión en función del tiempo a frecuencia industrial del supresor sea mayor que la curva de amplitud en función de la duración del TOV en todos los momentos de riesgo [4].

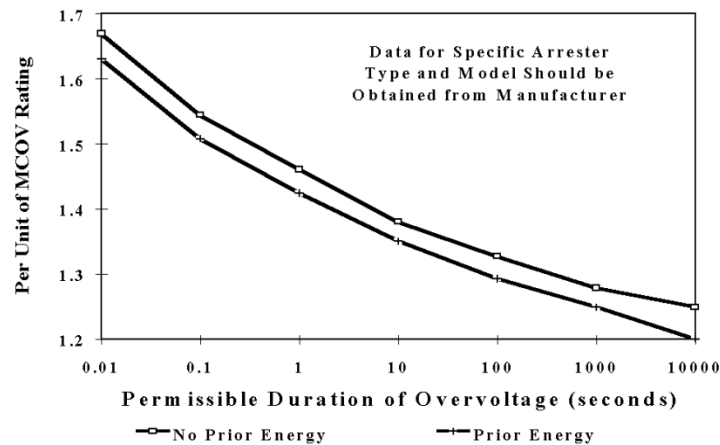


Figura 1. Ejemplo de Datos típicos de swell temporal (TOV) de un supresor [4].

Para las diferentes aplicaciones, los datos de TOV deben obtenerse de los fabricantes. Se debe buscar que el nivel de TOV del dispositivo de protección contra picos de tensión escoger, sea mayor tanto en magnitud, como en duración, al TOV máximo del sistema. Usualmente se desconoce el tiempo de duración de las fallas en los sistemas de distribución, por lo tanto, para dichos sistemas con un aterrizaje no efectivo, se puede utilizar la tensión de línea como MCOV [5].

Si el usuario tiene fallas en el supresor de distribución atribuidas al TOV, la selección de la siguiente clasificación de voltaje más alta puede resolver el problema o, en casos extremos, puede justificarse un estudio del sistema para determinar las amplitudes y duraciones de TOV en las ubicaciones del problema [4].

3. Selección del Tipo de Supresor por Capacidad de Energía (Normal/Heavy Duty)

Al tener establecido los niveles de tensión adecuados de operación, la selección del tipo de supresor por utilizar según a su capacidad de energía de acuerdo con el estándar IEEE C62.22 se deja a criterio de la persona que diseña si se desea de uso normal o pesado [4], pero con la Tabla 1 de dicho estándar como referencia (mostrada en la primera sección).

Adicionalmente se mencionan las siguientes recomendaciones en el estándar IEEE respectivo:

La clase de supresor seleccionada puede variar según la relevancia de la estación o del equipo que se desea proteger. Por ejemplo, los supresores de clase estación son apropiados para subestaciones de gran escala. Los de clase intermedia pueden aplicarse en subestaciones más pequeñas, así como en líneas de subtransmisión y en terminales de cables con tensiones iguales o inferiores a 161 kV. Por su parte, los supresores de clase distribución son adecuados para subestaciones de distribución de menor tamaño, con el fin de proteger los bancos de barras [4].

4. Verificación de los Márgenes de Protección (PM)

El margen de protección es el margen entre la resistencia del aislamiento del equipo y el pico de tensión en sus terminales. Es la base para la coordinación del aislamiento. Se debe tomar en cuenta si el supresor estará sobre (o cerca) del equipo a proteger, o lejos. Si se encuentra lejos, se debe calcular la distancia de separación admisible entre el supresor y el equipo (para tensiones mayores a 69kV - IEEE C62.22-09 Anexo C) [1].

Para el caso donde se colocará el supresor cerca o encima del equipo a proteger, como es común en subestaciones de media tensión, se deben determinar los valores de los siguientes parámetros [5]:

- CWW: Resistencia a la contaminación bajo lluvia.
- BIL: Nivel Básico de Aislamiento de Impulsos Tipo Rayo.
- BSL: Nivel Básico de Aislamiento del Impulso de Conmutación.

Estos para el sistema y los siguientes dos para el dispositivo supresor:

- FOW: Frente de Onda.
- LPL: Nivel de Protección Contra Rayos.
- SPL: Nivel de Protección de Conmutación.

El estándar IEEE C62.22 menciona respecto al parámetro CWW, que si es desconocido se puede asumir un valor según el tipo de aislamiento [5]:

- Aceite o sólido: 1,15 veces el valor del BIL.
- Seco: igual al BIL.

Los valores del FOW y del LPL se encuentran en las hojas de datos del fabricante a utilizar, donde el LPL corresponde a la tensión de descarga del supresor para una corriente de descarga y el FOW corresponde a la tensión de descarga en el supresor con una corriente de impulso con tiempo de subida de 0,5 μ s [5].

La Tabla 1 de la primera sección, muestra los valores típicos de protección. Se tienen tres diferentes relaciones de protección según el estándar IEEE C62.22:

$$a) PM_{L1} = \left(\frac{CWW}{FOW} - 1 \right) * 100\%$$

$$b) PM_{L2} = \left(\frac{BIL}{LPL} - 1 \right) * 100\%$$

$$c) PM_S = \left(\frac{BSL}{SPL} - 1 \right) * 100\%$$

Donde cada uno debe ser mayor o igual a 20% [5].

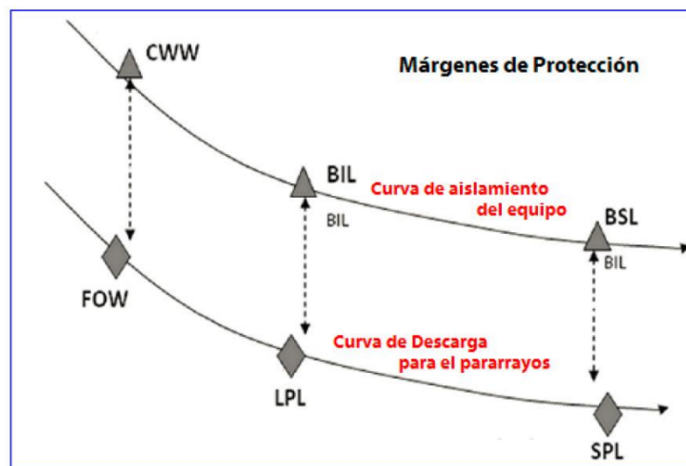


Figura 2. Márgenes de Protección [5].

Nota: La ferroresonancia representa una problemática específica en los sistemas de distribución. En aquellas aplicaciones susceptibles a este fenómeno, es importante considerar cuidadosamente la clasificación y las capacidades del supresor (IEEE C62.22-sección 6.4.4).

CASO REAL

La Subestación de Moín, se encuentra ubicada en la costa atlántica de Costa Rica, específicamente en el sector de Moín en la provincia de Limón; siendo una infraestructura clave en la transmisión y distribución eléctrica nacional. La importancia radica en su capacidad para transformar y distribuir energía a diferentes niveles de tensión, lo que permite conectar fuentes de generación, líneas de transmisión y centros de consumo en la región [9].

Esta subestación opera principalmente en niveles de 138 kV y 230 kV, lo que la vincula con el sistema de interconexión regional (SIEPAC) y la convierte en un nodo estratégico para la transmisión de electricidad a gran escala, incluso hacia Panamá. Sin embargo, también existen instalaciones asociadas a la red local que operan en niveles de 34.5 kV, la cual es la que se utilizará

para la evaluación de este caso en específico, dedicada a la distribución de energía para cargas industriales o portuarias cercanas al área de Moín [9].

Selección de Supresores de Picos de Voltaje para la Subestación de Moín (34,5 kV)

1. Datos Iniciales del Sistema

La subestación Moín opera con una tensión nominal línea a línea de 34,5 kV. Para determinar el valor de funcionamiento continuo que debe soportar un supresor, se utiliza la fórmula para calcular la tensión línea a tierra:

$$V_{L-G(MAX)} = \frac{V_{L-L(Max,RMS)}}{\sqrt{3}} = \frac{34.5 \text{ kV}}{1.732} = 19.919 \text{ kV}$$

De ser necesario, se puede considerar el factor de regulación de tensión para determinar la tensión mencionada. En Costa Rica, la normativa no indica un porcentaje requerido explícitamente, sin embargo, se deben investigar los requisitos correspondientes de acuerdo al país donde se vaya a trabajar.

Por lo tanto, el supresor debe tener un MCOV (Tensión Máxima de Funcionamiento Continuo) mayor a 19,92kV. Un valor típico de MCOV superior y cercano a dicho valor disponible en el mercado es de 22 kV, como se observa en la siguiente tabla; garantizando el cumplimiento adecuado.

MCOV	Duty-cycle voltage	Discharge voltage U_{res} at specified impulse current (Maximum value)										
		Front-of-wave wave 1/...μs		Lightning current impulse wave 8/20 μs						Switching current impulse wave 30/60 μs		
		5 kA	10 kA	1 kA	2.5 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	125 A	250 A	500 A
U_c	U_r	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}	kV _{peak}
kV _{rms}	kV _{rms}											
2.55	3	14.5	16.0	11.7	12.4	13.1	14.0	16.0	19.0	10.4	10.8	11.1
5.10	6	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	28.0	31.9	38.0	20.8	21.5	22.2
7.65	9	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	28.0	31.9	38.0	20.8	21.5	22.2
8.40	10	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	28.0	31.9	38.0	20.8	21.5	22.2
10.20	12	43.3	47.9	34.9	37.0	39.1	42.0	47.8	57.0	31.1	32.2	33.2
12.70	15	43.3	47.9	34.9	37.0	39.1	42.0	47.8	57.0	31.1	32.2	33.2
15.30	18	57.7	63.9	46.5	49.3	52.1	56.0	63.7	75.9	41.5	42.9	44.3
17.00	21	57.7	63.9	46.5	49.3	52.1	56.0	63.7	75.9	41.5	42.9	44.3
19.50	24	72.1	79.8	58.1	61.6	65.1	70.0	79.6	94.9	51.8	53.6	55.3
22.00	27	86.6	95.8	69.8	74.0	78.2	84.0	95.5	113.9	62.2	64.3	66.4
24.40	30	86.6	95.8	69.8	74.0	78.2	84.0	95.5	113.9	62.2	64.3	66.4
27.00	33	101.0	111.8	81.4	86.3	91.2	98.0	111.4	132.8	72.6	75.0	77.5
29.00	36	101.0	111.8	81.4	86.3	91.2	98.0	111.4	132.8	72.6	75.0	77.5
31.50	39	115.4	127.7	93.0	98.6	104.2	112.0	127.3	151.8	82.9	85.7	88.5
34.00	42	115.4	127.7	93.0	98.6	104.2	112.0	127.3	151.8	82.9	85.7	88.5
36.50	45	129.8	143.7	104.6	110.9	117.2	126.0	143.2	170.8	93.3	96.4	99.6

Figura 3. Supresor Hitachi (Antes ABB) tipo POLIM-D [7].

2. Consideraciones de TOV (Swell Temporal)

Además del MCOV, se debe verificar que el supresor seleccionado pueda resistir swells temporales que pueden presentarse en la subestación, que pueden ocurrir por conmutaciones, fallas monofásicas o ferroresonancia, entre otras. El dispositivo debe estar diseñado para soportar valores temporales de swells superiores al MCOV durante ciertos periodos, dependiendo de las condiciones del sistema.

En este caso, al desconocer los detalles específicos del sistema y un estudio detallado de los diferentes tipos de swells temporales, es preferible asumir que el sistema no está conectado a tierra de forma efectiva (factor de aterrizamiento = 1); considerando la tensión línea-línea como el valor base del MCOV [5]. Por lo tanto, se procede a estimar el TOV de la siguiente manera:

$$TOV_{\text{sistema}} = \frac{V_{L-L(Max,RMS)}}{\sqrt{3}} \times \text{factor de aterrizamiento}$$

En este caso, con una tensión máxima de 34 kV (sin considerar una regulación de tensión en el cálculo) y un sistema sólidamente aterrizado (factor de aterrizamiento = 1), se tiene:

$$TOV_{\text{sistema}} = \frac{34.5\text{kV}}{\sqrt{3}} \times 1 \approx 19.919 \text{ KV}$$

Este valor representa el nivel de swell temporal que debe ser soportado por el supresor durante un evento de falla temporal. En el caso de sospechar TOVs frecuentes o prolongados, puede ser apropiado seleccionar un supresor con un MCOV mayor o consultar los datos específicos del fabricante.

Para verificar la adecuación del dispositivo, se consulta la hoja técnica del fabricante.

En este caso se utiliza un supresor ABB tipo POLIM-D con una tensión MCOV (U_c) de 22 kV [7]. Según las guías de ABB para condiciones de TOV con duración de 1 segundo, la tensión TOV admisible se calcula con:

$$TOV_{\text{supresor}} = 1,325 \times U_c = 1,325 \times 22 \text{ kV} = 29.15 \text{ kV}$$

Comparando ambos valores:

$$TOV_{\text{sistema}} = 19,919 \text{ kV} < TOV_{\text{supresor}} = 29.15 \text{ kV}$$

Esto indica que el dispositivo es adecuado para soportar los TOV del sistema bajo las condiciones especificadas. La tensión temporal que podría presentarse en el sistema es menor que la que puede manejar el supresor por al menos 1 segundo.

4. Verificación de Márgenes de Protección (PM)

Para garantizar la protección efectiva del equipo, se deben verificar los márgenes de protección entre la capacidad dieléctrica del aislamiento del equipo y la respuesta del supresor. Los márgenes mínimos recomendados según IEEE C62.22 son del 20%, y se calculan mediante las siguientes fórmulas antes mencionadas [8]:

$$a) PM_{L1} = \left(\frac{CWW}{FOW} - 1 \right) * 100\%$$

$$b) PM_{L2} = \left(\frac{BIL}{LPL} - 1 \right) * 100\%$$

$$c) PM_S = \left(\frac{BSL}{SPL} - 1 \right) * 100\%$$

Se procede a revisar los valores típicos según la cantidad de voltaje

Nominal System Voltage [kV]	Typical System BIL [kV]	Surge Arrester MCOV Rating [kV]	Pressure Relief Capability [kA]	Separation Distance [ft]
12.47 13.2 13.8	110	8.4	65	13
23	150	17	65	10
34.5	200	29	65	8
46	250	36.5	65	23

Figura 4: Valores comunes para Sistemas a diferentes Tensiones [10]

Como se observa en la figura 4 para una subestación con un voltaje nominal de 34.5kV el BIL para usar es el de BIL: 200 kV (según IEEE C62.22 [4])

De la norma IEEE Std C62.11-2020: *for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)* Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits se obtienen valores prácticos aproximados para una subestación de 34.5kV.[3]

- CWW = 1.15 × BIL = 230 kV
- FOW = 150 kV
- LPL = 100 kV
- BSL = 200 kV
- SPL = 150 kV

Para una subestación de 34.5 kV es necesario un supresor cuya tensión nominal exceda la tensión de fase y cuya curva de protección coordine con el BIL elegido. El modelo PEXLIM R-Y, con rango de voltaje de sistema de 24–170 kV, tensión nominal de 18–144 kV, corriente de descarga nominal de 10 kA y clase de descarga de línea 2, cumple estos requisitos: cubre holgadamente el nivel de 34.5 kV en servicio y la curva de disparo del arrester o supresor polimérico se ajusta a impulsos

de hasta un BIL de 200 kV[11], protegiendo al resto de equipos y garantizando así que la sobretensión transitoria se derive de forma confiable.

Con estos datos, los márgenes de protección resultan ser:

$$a) PM_{L1} = \left(\frac{230}{150} - 1 \right) * 100\% = 53.3\%$$

$$b) PM_{L2} = \left(\frac{200}{100} - 1 \right) * 100\% = 100\%$$

$$c) PM_S = \left(\frac{200}{150} - 1 \right) * 100\% = 33.3\%$$

Todos los márgenes superan el 20% requerido. Es importante utilizar valores reales extraídos de hojas técnicas del fabricante del supresor seleccionado para garantizar precisión.

5. Selección del Tipo de Supresor y Recomendaciones Finales

Según IEEE C62.22, para subestaciones como Moín (34.5 kV), se puede utilizar un supresor de clase distribución o intermedia. Específicamente en este caso, se eligió un supresor ABB tipo POLIM-D con una tensión 22 kV de clase intermedia y se asume que será colocado sobre el equipo por proteger. La clase intermedia es recomendable para garantizar mayor robustez frente a condiciones severas.

Es fundamental validar los datos eléctricos reales con mediciones en sitio y consultar las hojas técnicas de los fabricantes por considerar. También es necesario considerar el régimen de conexión a tierra del sistema, la topología (estrella o delta), y las condiciones ambientales de instalación. Una coordinación adecuada del aislamiento protege tanto los activos como la continuidad del servicio.

CONCLUSIÓN

La elección adecuada de los supresores para una subestación eléctrica de media tensión es una tarea que requiere un análisis detallado de las condiciones de funcionamiento del sistema, las características de los equipos a proteger, la distancia a la que se encuentran, las condiciones ambientales, entre otros detalles.

En este estudio, se ha demostrado que, siguiendo los estándares asociados y los cálculos respectivos, un supresor tipo POLIM-D con un MCOV de 22 kV cumple satisfactoriamente los requisitos para proteger una subestación de 34.5 kV contra la presencia de diferentes swells bajo

ciertas condiciones; garantizando que el dispositivo admita un mayor nivel de TOV del esperado en el sistema y que proporcione suficiente margen de protección en comparación con el nivel de aislamiento del equipo.

Finalmente, este trabajo explica y remarca la importancia de dimensionar adecuadamente los equipos de protección contra swells para subestaciones de distribución en media tensión, verificando con los estándares vigentes, hojas de fabricante y cálculos teóricos. Además, de recomendar realizar validaciones empíricas y estudios de las diferentes condiciones tanto del sistema, como del entorno al que se sometería el dispositivo, para así garantizar una selección e implementación segura y eficiente del supresor. Todo esto con el objetivo de extender la vida útil de los equipos, ofrecer una distribución eléctrica continua y minimizar las intervenciones al sistema por mantenimiento o fallas.

REFERENCIAS

1. Xiaoke, Duan & Rifaat, Rasheek. *“Insulation Coordination and Voltage Transients For Industrial Electrical Power Systems”*, PES/IAS Joint Chapter Technical Seminar, 2019.
2. Hitachi Energy. *“Metal-oxide Surge Arresters in Medium-Voltage Systems”*, 2024.
3. IEEE, Std C62.11. *“IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)”*, 2020.
4. IEEE, Std C62.22. *“Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems”*, 2009.
5. Álvarez Calderón, J.P. & Beltrán Bautista, D.A. *“Guía de Selección de Equipos para Protección Contra Sobretensiones en Subestaciones de Sistemas Eléctricos de Distribución Hasta 57.5 kV”*, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2017.
6. Finen, C. *“Low Voltage and Medium Voltage Surge Protection”*, EATON, U.S, 2018.
7. Hitachi Energy, Surge Arrester POLIM-D — Medium-voltage surge arrester. [Online]. Disponible en: <https://publisher.hitachienergy.com/preview?DocumentID=1HC0115033>
8. Abb, High Voltage Surge Arresters – Buyer’s Guide, ABB Switzerland Ltd., 2018. [Online]. Disponible en: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2018/06/High-Voltage-Surge-Arresters-ABB-Buyers-Guide.pdf>
9. Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), *“Sistema de transmisión nacional – Especificaciones técnicas”*, ICE, San José, Costa Rica. [En línea]. Disponible: <https://www.grupoice.com>
10. X. Wu, B. Leece, R. Wellman, y K. Pose, *“Dimensionamiento de pararrayos para sistemas de subtransmisión que utilizan transformadores de puesta a tierra”*, INMR, 16 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.inmr.com/dimensionamiento-de-pararrayos-para-sistemas-de-subtransmision-que-utilizan-transformadores-de-puesta-a-tierra-es/>
11. Hitachi Energy, *“Silicone-housed Surge Arrester PEXLIM”*, Hitachi Energy. [En línea]. Disponible: <https://www.hitachienergy.com/es/es/products-and-solutions/surge-arresters/high-voltage-surge-arresters/silicone-housed-surge-arrester-pexlim>.