



Metodología para la determinación de los requisitos mínimos en los descargadores de sobretensiones de tipo oxido de metal sin explosores para circuitos de alimentación AC (> 1 kV).

Yen Edward Palacios Córdoba

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesor

PhD. Esteban Velilla Hernández

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	Palacios Córdoba [1]
Referencia	[1] Y. E. Palacios Córdoba, “Metodología para la determinación de los requisitos mínimos en los descargadores de sobretensiones del tipo oxido de metal sin explosores para circuitos de alimentación AC (> 1 kV)”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.
Estilo IEEE (2020)	



Créditos a escenario de prácticas, personas, proyectos que aportaron al desarrollo de la práctica (interna y externamente: empresa y área de la empresa, grupo de investigación, proyecto, organización)

Asesor Interno de práctica: Esteban Velilla Hernández

Profesor del curso de Subestaciones Eléctricas UDEA: José de Jesús Jaramillo Serna



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noe Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mis padres, como agradecimiento a su apoyo constante en mi formación como ingeniero.

Agradecimientos

Doy las gracias a la empresa Ingema S.A por permitirme realizar este proceso formativo en dicha entidad. También a todos mis profesores y compañeros de carrera que a lo largo de estos años aportaron su conocimiento a mi formación como ingeniero electricista.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. OBJETIVOS	14
1. Objetivo general	14
2. Objetivos específicos.....	14
III. MARCO TEÓRICO	15
1. Términos y definiciones	15
2. El descargador de sobretensión	21
3. Características I-V para descargador tipo MO.....	24
4. Metodología para la selección del descargador de sobretensiones del tipo MO sin explosor.....	25
4.1. Procedimiento para la selección de descargador de sobretensiones	27
4.1.1 Determinación de la tensión máxima del sistema US	28
4.1.2 Determinación de la tensión continua del sistema UC	30
4.1.3 Determinación de la tensión nominal del descargador Ur	30
4.1.3.1 Aproximación 1: Determinación de la tensión nominal $Ur1$	30
4.1.3.2 Aproximación 2: Determinación de la tensión nominal $Ur2$	31
4.1.3.2.1 Determinación de sobretensión temporal $UTOV$	31
4.1.3.2.2 Determinación del factor $KTOV$	32
4.1.3.2 Cálculo de la tensión nominal Ur	33
4.1.4 Estándares nominales y condiciones de servicio nominal	34

4.1.4.1 Tensión nominales estándar de descargador U_r	34
4.1.4.1 Verificación de U_c y U_r	34
4.1.5 Corriente nominal de descargador I_n	35
4.1.5.1 Corrientes nominales estándar para descargadores.....	35
4.1.6 Clasificación de descargadores	35
4.1.6.1 Clasificación y requerimientos mínimos según IEC 60099-4.....	36
4.1.6.1.1 Parámetros mínimos exigidos por la IEC 60099-4	36
4.1.6.1 Clasificación y requerimientos mínimos según IEEE C6211-2012.....	37
4.1.7 Selección del descargador de prueba	38
4.1.8 Determinación de la distancia de fuga del aislador cerámicos o de vidrio	38
4.1.8.1 Datos de entrada.....	39
4.1.8.2 Determinación de la severidad de la contaminación del sitio SPS	40
4.1.8.3 Determinación de la distancia de fuga unificada de referencia RUSCD	40
4.1.8.4 Determinación de la distancia de fuga unificada USCD.....	41
4.1.8.4.1 Determinación del factor de corrección por altura K_a	41
4.1.8.4.2 Determinación del factor de corrección por tamaño y perfil del aislador K_{ad} ..	42
4.1.8.4.3 Determinación de la distancia de fuga D_{fug} y numero de aisladores $CAis$	43
4.1.8.4.4 Distancia de arco D_{arc}	44
4.1.8 Determinación del CFO	44
4.1.8.1 Determinación del CFO estadístico.....	44
4.1.8.1 Determinación del CFO bajo condiciones estándar	46
4.1.9 Cálculo de la corriente nominal del descargador	46
4.1.9.1 Caso 1: Descargador ubicado en extremo de línea abierta.....	46
4.1.9.2 Caso 2: Descargador ubicado frente a transformador	48
4.1.9.3 Caso 3: Falla de apantallamiento con reflexiones sucesivas.....	49

4.1.9.4 Caso 4: Descargador ubicado frente a transformador con n campos de línea.....	49
4.1.10 Cálculo de la corriente por sobretensión de maniobra	49
4.1.10 Estimación de la carga.....	50
4.1.10.1 Carga y energía ante impulso de rayo	50
4.1.10.1 Carga y energía ante impulso de maniobra	51
4.1.11 Valores mínimos necesarios para especificación de descargador	52
5. Ejercicio de aplicación	52
IV. METODOLOGÍA	55
V. RESULTADOS	56
VI. ANÁLISIS	57
VII. CONCLUSIONES	58
VIII. RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS	60
ANEXOS.....	61

LISTA DE TABLAS

TABLA I SOBRETENSIONES.....	21
TABLA II FACTORES DE FALLA A TIERRA [2]	32
TABLA III VALORES COMERCIALES DE U_r [1]	34
TABLA IV VALORES TÍPICOS DE U_r RESPECTO A U_c [9]	34
TABLA V CLASIFICACIÓN DEL DESCARGADOR SEGÚN IEC 60099-4 [1].....	37
TABLA VI CLASIFICACIÓN DE CORRIENTES Y MÍNIMOS REQUERIMIENTOS	37
TABLA VII VALORES ESTÁNDAR DE CARGA [9]	38
TABLA VIII VALOR DE RUSCD SEGÚN LA CLASE SPS [11].....	41
TABLA IX FACTOR m SEGÚN EL TIPO DE CONDICIÓN [12].....	42
TABLA X VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIA DE LÍNEA [2]	47
TABLA XI VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE LÍNEA SEGÚN NIVEL DE TENSIÓN [2].....	48
TABLA XII DATOS NECESARIOS PARA LA SELECCIÓN DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN [2]	52
TABLA XIII PARÁMETROS AMBIENTALES DE LA SUBESTACIÓN	53
TABLA XIV PARÁMETROS ELECTROMECÁNICOS DE LA SUBESTACIÓN.....	54

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Sobretensiones en un sistema eléctrico [6].	22
Fig. 2. Configuración de componentes según la tecnología del descargador para sistema con tensión nominal de $12\text{ kVp} - p$ [8].	23
Fig. 3. Característica típica de un descargador MO [4].	24
Fig. 4. Característica V-I de un descargador MO típico en un sistema.	26
Fig. 5. Diagrama de flujo de metodología general para la selección del descargador de sobretensión [2].	27
Fig. 6. Característica U-t, $K_{tov} = Tr = U/U_r$ [2].	32
Fig. 7. Metodología para la selección de la distancia de fuga y arco para aisladores cerámicos o de vidrio [7].	39
Fig. 8. Diámetro del aislador [7].	43
Fig. 9. Característica de soportabilidad del aislamiento auto regenerativo [4].	45
Fig. 10. Resultados de implementación en Excel para ejemplo de aplicación nivel de 34.5 kV.	56
Fig. 11. Resultados de implementación en Excel para ejemplo de aplicación nivel de 13.8 kV.	56

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

BIL	Basic Lighting Impulse Insulation Level
BSL	Basic Switching Impulse Insulation Level
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
CFO	Critical Flashover Voltage
DPS	Dispositivo de protección contra sobretensión
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV_{p-p}	Kilo Voltios fase-fase
kV_{p-e}	Kilo Voltios fase-tierra
kA	Kilo Amperios
m	Metros
mm	Milímetros
MCOV	Maximum continuous operating voltage
MOSA	Metal Oxide Surge Arrester
MO	Óxido de Metal
MOV	Varistor de Óxido de Metal
RUSCD	Reference Unified Specific Creepage Distance
SiC	Carburo de Silicio
SPS	Site Pollution Severity
TOV	Temporary Overvoltage
USCD	Unified Specific Creepage Distance

RESUMEN

El descargador de sobretensión o dispositivo de protección contra sobretensiones (DPS) es un elemento clave en los sistemas de potencia, este es el dispositivo encargado de limitar las sobretensiones entrantes que ponen en riesgo el aislamiento de los equipos del sistema.

En las subestaciones eléctricas; las principales sobretensiones que ponen en peligro la integridad de los equipos del sistema son las debidas a maniobras en el sistema y descargas atmosféricas. Para lograr limitar estas sobretensiones, el DPS debe actuar como una resistencia no lineal (Varistor), comportándose como un aislador bajo condición normal de operación y como un conductor ante condiciones de fallas o sobretensión. Esto es posible debido a que está compuesto en su interior por un material no lineal, que puede ser carburo de silicio (SiC) o óxido de metal (MO). En la actualidad el tipo de tecnología de descargador más utilizado, según el material no lineal es la de óxido de metal.

Los estándares normativos que describen la metodología, definiciones y criterios que deben aplicarse para la selección de las características mínimas que debe cumplir el descargador de sobretensiones del tipo óxido de metal (MO) son presentadas en las normas IEC 60099-4 [1] e IEC 60099-5 [2]. Este documento resume la metodología general para selección de descargadores de sobretensión del tipo óxido de metal (MO), junto con un ejemplo de selección de descargador de sobretensiones para una subestación reductora aislada en aire con nivel de tensión nominal de 34.5/13.8 kV.

***Palabras clave* — Descargador de sobretensión, dispositivo de protección contra sobretensión, DPS, Subestación eléctrica, carburo de silicio, óxido de metal, sobretensión, maniobra, rayo, IEC 60099-4, IEC 60099-5.**

ABSTRACT

The surge arrester or surge protection device (DPS) is the main element in power systems for limiting incoming overvoltage that can compromise the isolation of system equipment.

In electrical substations, the surges that endanger the integrity of the system equipment are those due to switching in the system and atmospheric discharges. To limit these surges, the DPS must act as a nonlinear resistor (Varistor), behaving as an insulator under normal operating conditions and as a conductor under surge conditions. This is possible because it is composed inside of a nonlinear material, which can be silicon carbide (SiC) or metal oxide (MO). Currently, the type of discharge technology most widely used is regarded to the non-linear material metal oxide.

The normative standards that describe the methodology, definitions, and criteria to be applied for the selection of the minimum characteristics to be met by the surge arrester of type metal oxide (MO) are based on IEC 60099-4 [1] and IEC 60099-5 [2] standards. This document summarizes the general methodology for selecting metal oxide (MO) surge arrester, along with an example surge arrester selection for an air-insulated step-down substation with a rated voltage level of 34.5/13.8 kV.

Keywords — Surge arrester, surge protection device, DPS , electrical substation, silicon carbide, metal oxide, Overvoltage, switching, lightning, IEC 60099-4, IEC 60099-5.

I. INTRODUCCIÓN

Las subestaciones eléctricas pueden ser consideradas como nodos que habilitan la conexión y desconexión segura entre las líneas de transmisión y distribución del sistema de potencia. Estas son parte vital del sistema global de energía eléctrica que incluye la generación de energía, transmisión y, por último, la distribución para clientes finales. Desde la primera red eléctrica, la combinación de energía y las fuentes de generación han evolucionado, pero el rol de las subestaciones dentro del sistema global de energía permanece tan importante como siempre [3].

Como en todos los sistemas conectados a la red de potencia; en las subestaciones pueden presentarse sobretensiones que ponen en riesgo el funcionamiento e integridad de los equipos que hacen parte de esta. Dichas sobretensiones producto de desbalances por fallas del sistema, impacto de descargas atmosféricas y actividades de maniobra en el sistema son controladas normalmente con un dispositivo de protección contra sobretensiones. Este se encarga de recortar las sobretensiones tensiones pico entrantes a la subestación, a un nivel de tensión (Tensión residual) menor o igual al de soportabilidad de los equipos que la conforman, garantizando así la coordinación de aislamiento de la subestación.

Existen tres tipos de tecnología de descargadores de sobretensiones; con explosores y varistor de carburo de silicio (SiC); conocidos como “Gapped arrester” y con o sin explosores y varistor de óxido de Zinc (ZnO); conocidos como “Metal- Oxide surge arrester”. Estos últimos son los más usados actualmente debido a su característica de no linealidad, lo que permite prescindir de explosores y simplifica su construcción, esto hace que se presente una tensión residual muy estable debido a la ausencia de explosores, menor corriente de fuga y un aumento en la capacidad de disipación de energía [4]. Además de lo anterior, la resolución CREG 025/95 en su anexo CC.1 prohíbe el uso de dispositivos de protección contra sobretensiones con explosor y varistores de carburo de silicio (SiC) [5].

Los estándares normativos que describen la metodología, definiciones y criterios que deben aplicarse para la selección de las características mínimas que debe cumplir el descargador de sobretensiones sin explosores del tipo óxido de metal (Metal-Oxide surge arrester) son presentadas en las normas IEC 60099-4 [1] e IEC 60099-5 [2] . La norma IEC 60099-4 presenta los criterios mínimos para los requisitos y las pruebas a descargadores de sobretensiones de óxido de metal sin espacios que se aplican a sistemas alimentados con corriente alterna (A.C.) con tensión nominales

por encima de 1 kV. Mientras que la norma IEC 60099-5 presenta la metodología y recomendaciones de aplicación según el elemento del sistema de potencia que se desea proteger.

En el año 2018 el comité técnico de la IEC presentó la tercera edición de la norma IEC 60099-5, la cual cancela y reemplaza la segunda edición publicada en el año 2013. Esta edición incluye cambios técnicos significativos con respecto a la edición anterior, como la nueva clasificación de DPS introducida en IEC 60099-4 de 2014, además de plantear una nueva metodología para la selección de la corriente nominal y requerimientos energéticos del DPS.

Teniendo en cuenta el importante papel que desempeña del DPS en el sistema eléctrico de potencia, es de vital importancia realizar una correcta selección de dicho dispositivo, cumpliendo los estándares normativos vigentes, criterios de fabricantes, reglamentos y resoluciones locales; con el fin de garantizar la seguridad y desempeño eficiente del sistema eléctrico de potencia (en este caso equipos de la subestación eléctrica), sin entrar en sobredimensionamiento de equipos.

II. OBJETIVOS

1. Objetivo general

Construir una guía metodológica que describa de forma clara y concisa el procedimiento para la selección del descargador de sobretensiones o dispositivo de protección contra sobretensiones (DPS) para sistemas con nivel de tensión superior a 1kV, de acuerdo con lo establecido en las normas IEC 60099-4 del año 2014 e IEC 60099-5 del año 2018; adaptando dicho procedimiento a los requerimientos exigidos a las subestaciones del sistema eléctrico colombiano.

2. Objetivos específicos

- Estudiar normas o estándares internacionales relacionados con la selección del descargador de sobretensiones.
- Adaptar o implementar una metodología para la selección del descargador de sobretensiones.
- Evaluar la metodología con casos de la empresa para definir las características básicas necesarias para la selección del descargador de sobretensiones.

III. MARCO TEÓRICO

1. *Términos y definiciones*

Los siguientes términos y definiciones (derivadas de las referencias [1],[2],[6],[7]) son necesarias para el entender el desarrollo del presente documento:

Aislamiento: Parte aislante externa de un pararrayos, que proporciona la distancia de fuga necesaria y protege las partes internas del medio ambiente.

Característica V-I: Característica voltaje-corriente.

Característica U-I: Característica voltaje-corriente.

Característica voltaje-corriente: Representación de la dependencia de la tensión del descargador en la corriente. Usualmente los valores pico de tensión están en la ordenada, frecuentemente con valores relacionados con el nivel de protección de impulso tipo rayo. Los valores pico actuales (solo componente resistivo) están en la abscisa, representados logarítmicamente y dentro de un rango de varias décadas de magnitud (por ejemplo, de 10 μ A a 100 kA).

Carga transferida Q : Máxima capacidad de carga transferida especificada de un descargador, en forma de un solo evento o grupo de descargas que puede ser transferidas a un descargador sin causar fallas mecánicas o inestabilidad eléctrica para las resistencias de MO.

Carga térmica transferida Q_{th} : Máxima carga especificada que puede ser transferida a un descargador o sección de descargador durante 3 minutos, en una prueba de recuperación térmica sin causar una avalancha térmica.

Coordinación de aislamiento: La selección de la rigidez dieléctrica de los equipos en relación con las tensiones que pueden presentarse en el sistema al que están destinados los equipos, teniendo en cuenta el entorno de servicio y las características de los dispositivos de protección contra sobretensiones disponibles.

Corriente de descarga: Impulso de corriente que fluye a través del descargador.

Corriente de fuga: Corriente que fluye a través del descargador a una tensión de frecuencia industrial aplicada continuamente.

Corriente nominal del descargador I_n : Valor pico del impulso de corriente del rayo, que se utiliza para clasificar un descargador.

Contorneamiento (flashover): Descarga disruptiva sobre una superficie sólida.

Descarga disruptiva: Fenómeno asociado con la falla del aislamiento bajo estrés eléctrico, que incluye un colapso de voltaje y el paso de corriente.

Descargador: Ver definición de **Descargador de sobretensiones**.

Descargador, distribución: Descargador diseñado para su uso en sistemas de distribución, típicamente de $U_S \leq 52 kV_{p-p}$, para proteger los componentes principalmente de los efectos de los rayos.

Descargador, distribución, clase Alto: Un descargador que normalmente se utiliza para proteger los sistemas de distribución aéreos expuestos a fuertes corrientes de rayos.

Descargador, distribución, clase Bajo: Un pararrayos normalmente instalado y utilizado para proteger los sistemas de distribución subterráneos donde la mayor parte de la corriente del rayo es descargada por un descargador de sobretensiones ubicado en la unión de la línea aérea/cable.

Descargador, distribución, clase Medio: Un descargador que normalmente se usa para proteger los sistemas de distribución aéreos expuestos a corrientes de rayos normales.

Descargador, estación: Descargador diseñado para su uso en estaciones (sistemas con $U_S \geq 52$ kV_{p-p}) para proteger los equipos de sobretensiones transitorias. Aunque son diseñados para sistemas tipo estación, también pueden ser usado en sistemas de distribución ($U_S \leq 52$ kV_{p-p}).

Descargador de sobretensión: Un dispositivo de protección para limitar las sobretensiones en el equipo desviando la sobretensión y devolviendo el dispositivo a su estado original. Es capaz de repetir estas funciones según lo especificado.

NOTA: En lo sucesivo, el término **descargador, dispositivo de protección contra sobretensión (DPS)**, tal como se utiliza en este documento, debe entenderse como **descargador de sobretensión**.

Descargador de sobretensiones de óxido de metal sin explosores: Descargador con resistencias MO no lineales conectadas en serie y/o en paralelo sin vías de chispas integradas en serie o en paralelo, incorporadas en una carcasa con terminales para conexión eléctrica y mecánica

Descargador de sobretensiones de óxido metal: Descargador de óxido de metal.

Descargador de MO: Descargador de óxido de metal.

Descargador de MOV: Descargador de óxido de metal.

Dispositivo de protección contra sobretensión DPS: Descargador de sobretensiones.

Distancia de fuga unificada USCD: distancia de fuga de un aislador dividida por la tensión de operación r.m.s más alto a través del aislador.

Distancia de fuga unificada de referencia RUSCD: valor inicial de la distancia de fuga específica unificada para un sitio de contaminación antes de la corrección por tamaño, perfil, posición de montaje, etc. de acuerdo con esta especificación técnica y generalmente expresado en mm/kV

Energía térmica: Energía máxima especificada, dada en kJ/kV de U_r , que puede ser inyectada en un descargador o sección del descargador durante 3 minutos, en una prueba de recuperación térmica sin causar una avalancha térmica.

Impedancia de línea: Impedancia de sobretensión.

Impedancia de sobretensión: Impedancia relevante para los procesos de ondas viajeras en una línea. Ignorando el componente resistivo, la impedancia transitoria resulta de la inductancia y la capacitancia por unidad de longitud de la línea.

Máxima tensión del sistema: El voltaje más alto al que se opera un sistema.

MOSA: Descargador de óxido de metal.

Nivel de aislamiento de impulso de rayo básico BIL: La resistencia eléctrica del aislamiento expresada en términos del valor de cresta de un impulso de rayo estándar. El nivel de aislamiento de impulso de rayo básico (BIL) puede ser un BIL ESTADÍSTICO o un BIL CONVENCIONAL.

Nivel de aislamiento de impulso de conmutación básico BSL: La fuerza eléctrica del aislamiento expresada en términos del valor de cresta de un impulso de conmutación estándar. El nivel básico de aislamiento de impulso de conmutación (BSL) puede ser un BSL ESTADÍSTICO o un BSL CONVENCIONAL.

Nivel de protección contra impulsos tipo maniobra SIPL o U_{ps} : Tensión residual máxima del descargador para la corriente de descarga de impulso de maniobra especificada para esa clase.

Nivel de protección contra impulsos tipo rayo LIPL o U_{pl} : Tensión residual máxima del descargador para la corriente nominal de descarga.

Resistencia de SiC: Resistencia de Carburo de Silicio.

Resistencia de Carburo de Silicio: (Resistencia de SiC) Resistencia no lineal, que fue usada en descargadores antes de la introducción de la resistencia de óxido de metal. La no linealidad de su característica V-I es considerablemente menos pronunciada que en una resistencia de óxido de metal.

Resistencia de óxido de metal no lineal: Parte del descargador que, por sus características no lineales de tensión frente a corriente, actúa como una baja resistencia a las sobretensiones, limitando así la tensión entre los terminales del descargador, y como una alta resistencia a la tensión normal de frecuencia industrial.

Resistencia MO: Resistencia de óxido de metal no lineal.

Sistema con neutro sólidamente aterrizado: Un sistema dentro del cual uno o más puntos de neutro son directamente conectados a la tierra.

Sobretensión de rayo: Una perturbación eléctrica transitoria en un circuito eléctrico causada por un rayo.

Tensión nominal de un descargador U_r : Máxima sobretensión admisible por 10 segundos que se puede aplicar entre el descargador, como se verifica en la prueba TOV y la prueba de servicio operativo.

Nota: La tensión nominal se utiliza como parámetro de referencia para la especificación de las características de funcionamiento.

Tensión de operación continua de un descargador U_c o MCOV: Valor r.m.s de tensión máxima a frecuencia industrial que puede aplicarse continuamente entre los terminales del descargador.

Tensión residual: Valor pico de tensión que aparece entre los terminales de un descargador durante el paso de la corriente de descarga.

Varistor: Un elemento resistivo de dos terminales, compuesto por un semiconductor electrónico y contactos adecuados que tiene una característica de voltios-amperios marcadamente no lineal.

2. El descargador de sobretensión

El descargador de sobretensiones o dispositivo de protección contra sobretensiones (DPS) constituye una indispensable ayuda en los sistemas eléctricos de potencia, este tiene como función principal proteger los equipos del sistema de potencia ante tensiones pico, denominadas como sobretensiones.

Las sobretensiones son tensiones que exceden los valores límites establecidos como normales de funcionamiento para los elementos de un sistema de potencia (p. ej. generadores, aisladores, líneas de transmisión, transformadores, etc.). Estas producen esfuerzos en los elementos que las reciben, que traen como consecuencia la degradación o ruptura del aislamiento del elemento, es decir; una reducción en la vida útil del equipo o su destrucción inmediata. Pueden variar en magnitud, duración y forma de onda, lo que permite clasificarlas. De acuerdo con su origen pueden ser clasificadas como se muestra en la TABLA I.

TABLA I
SOBRETENSIONES

Sobretensión	Origen	Alternativas para mitigación
Rayo	Descargas atmosféricas (Rayos).	Cables de apantallamiento, Reducción de la resistencia de las torres, Descargadores de sobretensión.
Maniobra	Energización de líneas, recierre monofásico, falla y aclarado de fallas, desconexión de cargas, etc.	Resistencias de cierre en seccionadores (corta circuitos), Descargadores de sobretensión, Conmutación de seccionadores controlada, resistencias de apertura en seccionador, Reactores en derivación.
Temporales	Fallas a tierra, sobrevelocidad de generador, ferresonancia, resonancia, rechazos de carga, etc.	Reactor de puesta a tierra instalado en el punto neutro de los reactores de derivación, Reactores en derivación, Relés de protección de sobretensiones temporales, Descargador de sobretensión ¹ .
Frente muy rápido ²	Operación de desconectores o fallas dentro de subestaciones aisladas en gas (GIS)	-
Contaminación	Tensión normal del sistema en presencia de contaminación.	-

Nota:

¹ solo en situaciones especiales los DPS son dimensionados para limitar las sobretensiones temporales (p. ej. Prevención de sobretensiones debidas a resonancia). Bajo estas circunstancias debe determinarse la capacidad térmica del descargador, junto con los equipos auxiliares necesarios).

² las sobretensiones de frente muy rápido no son objeto de estudio de este documento.

En la Fig. 1 se presentan de forma esquemática las sobretensiones que pueden aparecer en el sistema de potencia, dados en valores por unidad del valor pico de la máxima tensión fase-tierra de operación continua del sistema.

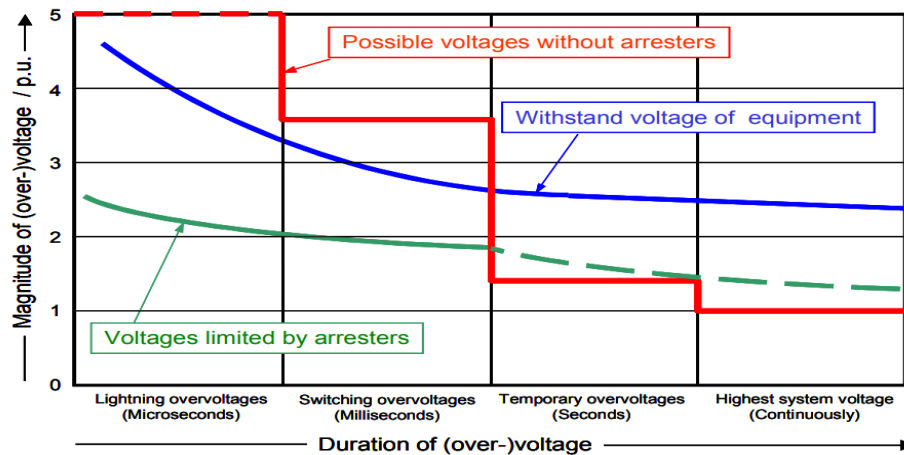


Fig. 1. Sobretensiones en un sistema eléctrico [6].

De la Fig. 1 se extrae que; la tensión de soportabilidad para los equipos de la subestación debe ser superior a las sobretensiones temporales (TOV) del sistema, por esta razón el dispositivo de protección no debe operar bajo estas circunstancias, mientras que en presencia de sobretensiones de maniobra y de tipo rayo, el aislamiento de los elementos no puede soportar los esfuerzos dieléctricos producidos por estas sobretensiones. Además, puede también observarse la influencia del DPS en el corte de las sobretensiones (curva verde), manteniendo el sistema en valores que no ponga en riesgo el funcionamiento de los elementos. De este modo se explica que el descargador de sobretensiones normalmente es dimensionado para operar ante sobretensiones de rayo y maniobra¹.

Para cumplir esta función el descargador de sobretensión debe actuar como una resistencia no lineal, comportándose como un aislador bajo condiciones normales de operación y como un

conductor ante condiciones de alta tensión, de modo que la sobretensión sea conducida de forma controlada a tierra. Por esta razón, el descargador está compuesto en su interior de discos de un material no lineal, los cuales son herméticamente cerrados en un aislador de porcelana o material polimérico, este material no lineal varía su resistencia de acuerdo con el nivel de tensión.

En general el descargador de sobretensiones puede dividirse en tres tipos de tecnologías: Con explosores con varistor de carburo de silicio (SiC) y con o sin explosor con varistor de óxido metal (MO)¹. En las tecnologías que operan con explosores se produce un arco en el interior del descargador el cual recorre las brechas de aire y posteriormente llega al material no lineal, Las brechas de aire se convierten en el componente de resistencia de tensión, mientras que los discos del material no lineal (SiC o MO) se convierte en el componente limitador de corriente. Para la tecnología que funciona sin explosores, los discos de MO son el único componente activo que soporta la sobretensión dejando fluir el impulso de corriente a tierra.

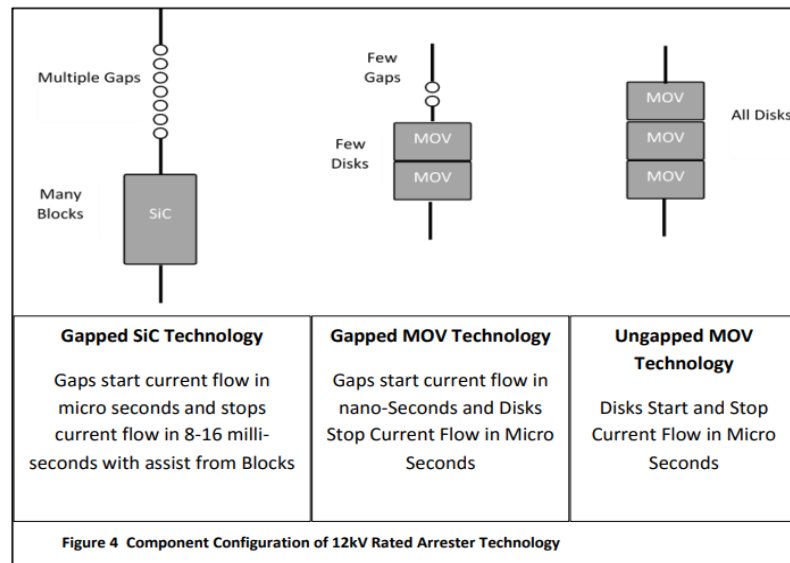


Fig. 2. Configuración de componentes según la tecnología del descargador para sistema con tensión nominal de $12 kV_{p-p}$ [8].

¹ Inicialmente los primeros descargadores de óxido de metal contaban con explosores, con el pasar de los años y los avances en esta tecnología no se hizo necesario el uso de explosores.

Desde hace varios años los descargadores con explosores y varistor SiC² han entrado en desuso debido a las ventajas que presentan los descargadores construidos sin explosores y varistor MO, estos gracias a sus propiedades permiten una mayor simplicidad en su diseño; reduciendo la entrada de humedad, tienen una mayor capacidad de absorción de energía y debido a la eliminación de los explosores presenta una tensión residual muy estable.

3. Características I-V para descargador tipo MO

La característica V-I o curva V-I representa el comportamiento del descargador ante diferentes condiciones u oscilaciones de tensión, al cual este estará sometido. Esta curva está dividida en tres regiones [4].

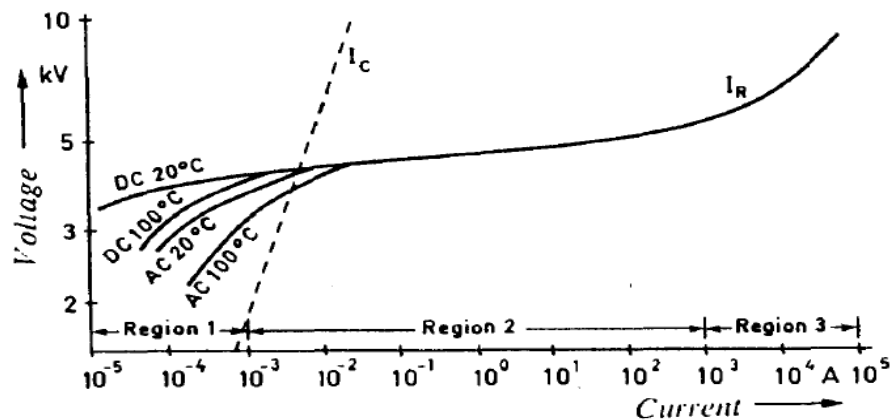


Fig. 3. Característica típica de un descargador MO [4].

Región 1: Región de corriente de fuga o región de tensión máxima de operación continua (MCOV). En esta región se ubica la máxima tensión de operación continua del sistema, la corriente que circula a través del descargador es inferior a 1 mA³ y describe un comportamiento principalmente capacitivo (I_c). Como se observa en la Fig. 3 a medida que aumenta la temperatura aumenta la componente resistiva del descargador, lo que conlleva a la disipación de potencia, para evitar la

² La resolución Creg-025 de 1995 en su Anexo CC.1. establece los requisitos técnicos para la conexión de líneas de transmisión al STN, en este se establece que no es permitido el uso de DPS de carburo de silicio en ningún punto como protección de las líneas de transmisión.

³ Las corrientes que se presentan en esta región son denominadas corrientes de fuga.

inestabilidad térmica del dispositivo, el aislamiento del descargador actúa como elemento intercambiador de temperatura.

Región 2: Región de sobretensiones de maniobra y TOV. En esta región se ubican las TOV que superan el límite de tiempo establecido por el fabricante ⁴ o las sobretensiones mayores a las TOV. La corriente va desde 1 mA hasta aproximadamente los 1000 o 2000 A; describiendo un comportamiento principalmente resistivo (I_R).

Región 3: Región de sobretensiones de rayo o de alta corriente. En esta región se presentan corrientes elevadas que oscilan entre 1 a 100 kA; la cual describen un comportamiento puramente resistivo (I_R).

Las regiones 2 y 3 representan las condiciones donde el descargador debe operar debido a que estas sobretensiones (Maniobra y rayo) ponen en riesgo el aislamiento de los elementos del sistema de potencia.

En síntesis; la característica V-I juega un papel importante en la selección del descargador de sobretensión y en el proceso de coordinación de aislamiento del sistema eléctrico de potencia, esta curva característica contiene toda la información del comportamiento del descargador tanto en régimen permanente como en transitorio.

4. Metodología para la selección del descargador de sobretensiones del tipo MO sin explosor

Como se menciona en el principio de este documento, la tecnología más usada es la de descargadores de Oxido de metal sin explosor (MO), este tipo de tecnología puede usarse para las diferentes etapas del sistema de potencia (Generación, transmisión y distribución) en sus diferentes niveles de tensión Media (MV) , Alta (HV), Extra-Alta (EHV) y Ultra-Alta tensión (UHV)⁵ sin ninguna restricción [9]. Por esta razón el enfoque de la metodología de selección que se describirá

⁴ El límite máximo que el descargador de sobretensiones permite un TOV es normalmente de 10 segundos.

⁵ En la actualidad no existen proyectos de ultra alta tensión en Colombia.

más adelante solo abarca descargadores MO sin explores, en sistemas donde el aislamiento es el aire (AIS)⁶.

La metodología de selección del descargador de sobretensiones describe el proceso para encontrar los puntos relevantes de la curva característica V-I de un descargador de sobretensiones, que se adapte a los requerimientos de los elementos del sistema eléctrico de potencia que se desea proteger.

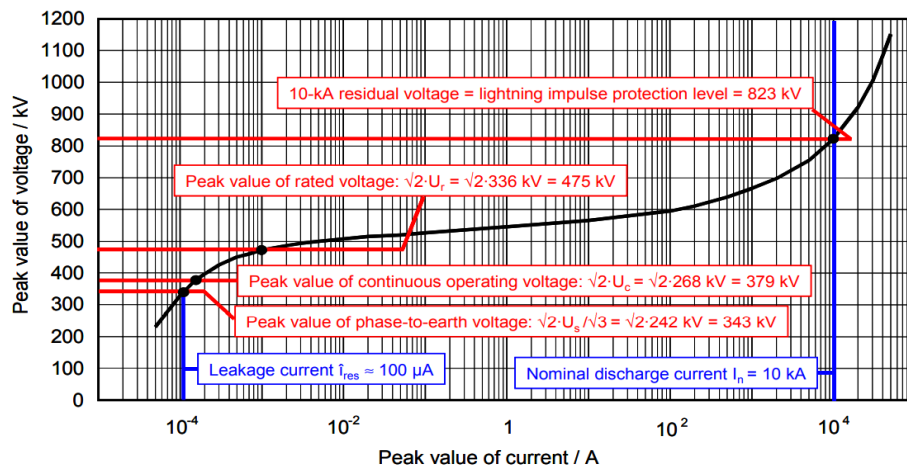


Fig. 4. Característica V-I de un descargador MO típico en un sistema con neutro sólidamente aterrizado de 420 kV [6].

En la Fig. 4 se muestra la curva característica V-I de un descargador MO para un sistema de 420 kV con neutro sólidamente aterrizado. Los puntos relevantes de la curva, los cuales son el objetivo de cálculo de la metodología, se presentan a continuación:

U_S : Tensión máxima del sistema en kV_{p-p} .

U_C : Tensión de operación continua del sistema en kV_{p-e} .

U_r : Tensión nominal del descargador en kV_{p-e} .

I_n : Corriente nominal del descargador en kA .

⁶ Este documento aborda los requerimientos mínimos para sistemas AIS, para sistemas aislados en gas SF6 se recomienda hacer un análisis de las recomendaciones dadas en el estándar IEC 60099-5.

Adicional a estos parámetros deben calcularse otros asociados con los requerimientos de carga y energía del sistema.

La metodología de selección se centra en lo establecido en la norma IEC 60099-5 del año 2018 [2]. A medida que esta es aplicada se apoya en definiciones y recomendaciones de normas estándar como la IEC 60099-4 del año 2014 [1], IEC 60071-1 del año 2011[10] e IEEE C62.11 del año 2012 [9].

4.1. Procedimiento para la selección de descargador de sobretensiones

La Fig. 5. Diagrama de flujo de metodología general para la selección del descargador de sobretensión [2]. resume de forma esquemática la metodología general de selección de descargadores sin explosor:

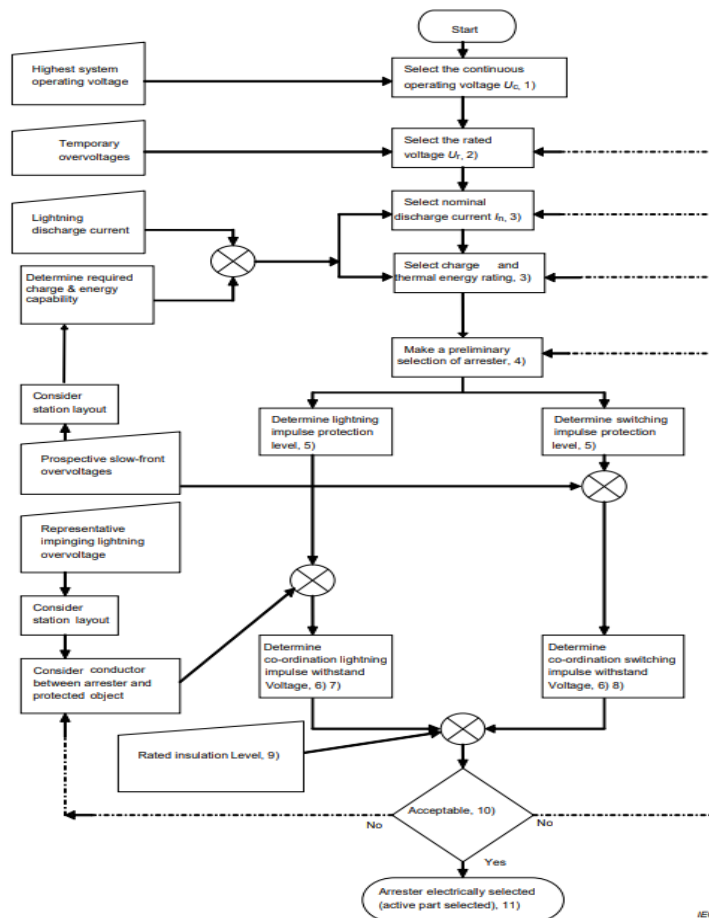


Fig. 5. Diagrama de flujo de metodología general para la selección del descargador de sobretensión [2].

En el diagrama se presenta los parámetros principales de entrada comenzando por la tensión máxima de operación del sistema y el valor de sobretensión temporal esperado del sistema, los cuales permiten definir la tensión de operación continua U_c y la tensión nominal del descargador U_r (Paso 1 y 2).

Con los resultados de los pasos anteriores, se realiza la preselección de los parámetros de corriente de descarga ante impulso tipo rayo (corriente nominal I_n), Carga Q , capacidad de energía W_{th} , nivel de protección contra impulso tipo rayo y nivel de protección contra impulso tipo maniobra del descargador (Tensiones residuales)⁷, (pasos 3, 4, 5). En este punto se debe probar si la preselección realizada es acertada, para esto la normativa de referencia ofrece una serie de ecuaciones para evaluar el descargador antes de ser probado en la coordinación de aislamiento (paso 6). Con esto se habría determinado los requisitos mínimos que debe cumplir el descargador.

Los pasos 7, 8, 9, 10 corresponden a la coordinación de aislamiento (Normativa 60071-2). Esta nos permite saber si el descargador preseleccionado es adecuado para el sistema y protege el aislamiento de los equipos⁸. Este proceso es iterativo, si el descargador no cumple con la garantía de coordinación de aislamiento deber repetirse.

4.1.1 Determinación de la tensión máxima del sistema U_S

Los sistemas eléctricos de potencia se encuentran en constante variación, lo que significa que los valores de tensión y corriente cambian por respecto a su valor nominal, por esta razón se establecen límites de funcionamiento, los cuales garantizan que, aunque exista variación no se altere el funcionamiento normal del sistema. La Resolución Creg-025 de 1995 [5] establece que: las tensiones en estado estacionario a 60 Hz no podrán ser inferiores al 90% de la tensión nominal, ni ser superiores al 110 % de esta durante un periodo superior a un minuto. En el caso de sistemas con tensión nominal mayor o igual a 500 kV, no podrán ser superiores al 105%, durante un periodo superior a un minuto. Por tanto, se tiene que:

⁷ Valores típicos tomados de la norma o catálogos de fabricante.

⁸ Este documento aborda los del pasos 1 al 6.

$$U_{System} = F_{highest} \times U_n \quad [kV_{p-p}] \quad (1)$$

Donde:

U_{System} : tensión máxima del sistema.

U_n : tensión nominal del sistema.

$F_{highest}$: es el factor de aumento máximo permisible (Con base a la Creg-025 de 1995).

Este es igual a:

$$F_{highest} = 1.1, \text{ Para } U_n < 500 \text{ kV}_{p-p} \quad (2)$$

$$F_{highest} = 1.05, \text{ Para } U_n \geq 500 \text{ kV}_{p-p} \quad (3)$$

Debido a que el descargador de sobretensiones se dimensiona respecto a la tensión nominal de los elementos que este debe proteger y esta es normalmente superior a la tensión máxima del sistema, se debe seleccionar de las tablas 2 y 3 de la norma IEC 60071-1 [10], el valor de tensión superior más cercano a U_{System} . De dichas tablas se extraen también el nivel de aislamiento al impulso tipo maniobra y el nivel de aislamiento al impulso tipo rayo. Aplicando lo anterior se tienen las siguientes variables:

U_m : Tensión máxima para el equipo en kV_{p-p} .

BSL : Nivel de aislamiento al impulso tipo maniobra en kV_{p-e} (valor pico).

BIL : Nivel de aislamiento al impulso tipo rayo en kV_{p-e} (valor pico).

Se define que:

$$U_S = U_m \quad [kV_{p-p}] \quad (4)$$

Donde:

U_s : la tensión máxima del sistema, respecto a los equipos que debe proteger.

4.1.2 Determinación de la tensión continua del sistema U_c

La tensión continua de operación U_c hace referencia a toda tensión, la cual ocurre en el descargador, de forma ininterrumpida por un periodo de más de 30 minutos.

Para **sistemas aislados** la referencia [6] establece que:

$$U_c \geq U_s \quad [kV_{p-p}] \quad (5)$$

Para **sistemas sólidamente aterrizados**, se define como:

$$U_c \geq \frac{1.05 \times U_s}{\sqrt{3}} \quad [kV_{p-e}] \quad (6)$$

El factor de en la ecuación (6) es debido a los posibles armónicos que puedan presentarse en el sistema [2], [6].

4.1.3 Determinación de la tensión nominal del descargador U_r

La tensión nominal del descargador se define como la tensión a frecuencia industrial por encima de la tensión de operación continua que puede ser aplicada en un descargador por un periodo de tiempo limitado (10 segundos). Esta se entiende como la tensión más alta de corta duración permisible.

4.1.3.1 Aproximación 1: Determinación de la tensión nominal U_{r1}

La primera aproximación para la determinación de la tensión nominal U_r del descargador se realiza con el cálculo de U_{r1} [6].

Para **sistemas aislados** se define como:

$$U_{r1} \geq 1.25 \times U_s \quad [kV_{p-e}] \quad (7)$$

Para **sistemas sólidamente** aterrizados, se define como:

$$U_{r1} \geq \frac{1.25 \times 1.05 \times U_s}{\sqrt{3}} \quad [kV_{p-e}] \quad (8)$$

El factor de 1.25, es una relación empírica descubierta en la práctica y construcción de descargadores de tipo MO.

4.1.3.2 Aproximación 2: Determinación de la tensión nominal U_{r2}

La segunda aproximación busca la determinación de la tensión nominal U_r examinado las sobretensiones temporales que tal vez ocurran en el sistema [2].

4.1.3.2.1 Determinación de sobretensión temporal U_{TOV}

La sobretensión temporal U_{TOV} para la cual se establece un tiempo de ocurrencia de 10 segundos. Esta se define como:

$$U_{tov} = \frac{F_{fail} \times U_s}{\sqrt{3}} \quad [kV_{p-e}] \quad (9)$$

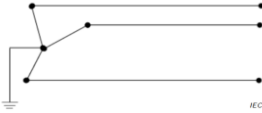
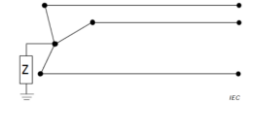
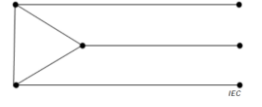
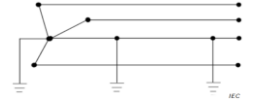
Donde:

U_{tov} : Sobretensión temporal.

F_{fail} : Factor de falla a tierra.

El factor de falla a tierra según el tipo de conexión puede tomar los valores que se presenta en la TABLA II :

TABLA II
FACTORES DE FALLA A TIERRA [2]

Nombre del sistema	Configuración	F_{fail}
Tres hilos simples aterrizado		1.4
Tres hilos con impedancia a tierra		$1.73 \text{ o } \sqrt{3}$
Delta		$1.73 \text{ o } \sqrt{3}$
Cuatro hilos multi-aterrizado - wye		1,25

4.1.3.2.2 Determinación del factor K_{TOV}

Por medio de la característica tensión a frecuencia industrial Vs tiempo o característica U-t. esta muestra la proporción de la tensión a frecuencia industrial permisible y la tensión nominal del descargador U_r , ambos dados como valores r.m.s, sobre el tiempo, representado de forma logarítmica. Esta proporción es llamado factor K_{TOV} [2].

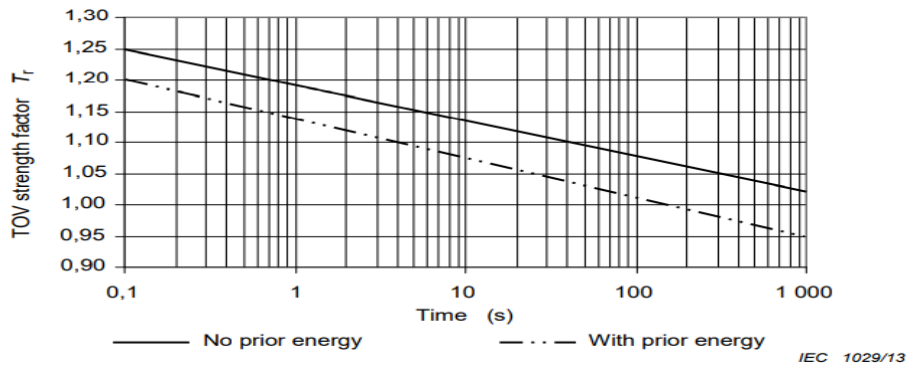


Fig. 6. Característica U-t, $K_{tov} = T_r = U/U_r$ [2].

Para la determinación de K_{tov} se asume un caso adverso donde el descargador ha sido previamente calentado a 60°C , antes de aplicar la tensión a frecuencia industrial ha absorbido toda la energía térmica nominal.

La tensión para 10 segundos está 7.5% por encima de U_r , por lo tanto, se tiene que:

$$K_{tov} = 1.075 \quad (10)$$

Para sistemas **sólidamente aterrizados**, se define como:

$$U_{r2} = U_{tov}/K_{tov} \quad [kV_{p-e}] \quad (11)$$

4.1.3.2 Cálculo de la tensión nominal U_r

Para la determinación de U_r se toma el valor máximo entre U_{r1} y U_{r2} , este valor se redondea al siguiente entero superior divisible por tres (De acuerdo con [1]).

$$U_r = \text{MAX}\{U_{r1}, U_{r2}\} \quad [kV_{p-e}] \quad (12)$$

Si U_{r2} es mayor que U_{r1} la tensión de operación continua U_c debe ser recalculada:

$$U_c = U_r/1.25 \quad [kV_{p-e}] \quad (13)$$

Para **sistemas aislados** U_r se define como:

$$U_r \geq 1.25 \times U_s \quad [kV_{p-e}] \quad (14)$$

4.1.4 Estándares nominales y condiciones de servicio nominal

En este punto de la metodología se busca estandarizar los cálculos hechos, con el fin de adaptarlos a los valores que presentan los fabricantes en el mercado

4.1.4.1 Tensión nominales estándar de descargador U_r

Los valores estándar de tensión nominales U_r para descargadores son especificados en la TABLA III:

TABLA III
VALORES COMERCIALES DE U_r [1]

Rango de tensión nominal [kV _{p-e}]	Pasos de tensión nominal [kV _{p-e}]
3 a 30	1
30 a 54	3
54 a 96	6
96 a 288	12
288 a 396	18
396 a 900	24

Nota: Otros rangos de valores también pueden ser aceptados

4.1.4.1 Verificación de U_c y U_r

Puede verificarse si los resultados obtenidos de U_c y U_r son acordes a los resultados obtenidos por los fabricantes.

TABLA IV
VALORES TÍPICOS DE U_r RESPECTO A U_c [9]

U_c [kV _{p-e}]	U_r [kV _{p-e}]	U_c [kV _{p-e}]	U_r [kV _{p-e}]
2.55	3	115	144
5.1	6	131	168
7.65	9	140	172

8.4	10	144	180
10.2	12	152	192
12.7	15	180	228
15.3	18	190	240
17	21	209	258
19.5	24	212	264
22	27	220	276
24.4	30	230	288
29	36	235	294
31.5	39	245	312
36.5	45	318	396
39	48	335	420
42	54	353	444
48	60	372	468
57	72	392	492
70	90	428	540
76	96	448	564
84	108	462	576
98	120	470	588
106	132	485	612

4.1.5 Corriente nominal de descargador I_n

Corresponde al valor pico de la corriente de impulso tipo rayo, al cual es usado para clasificar un descargador.

4.1.5.1 Corrientes nominales estándar para descargadores

Las corrientes nominales I_n estándar de descarga 8/20 son:

IEC: 20 kA, 10 kA, 5 kA y 2.5 kA.

IEEE: 20 kA, 10 kA, 5 kA, 3 kA y 1.5 kA.

4.1.6 Clasificación de descargadores

La clasificación de los descargadores de sobretensión puede realizarse con base a lo propuesto por la IEC 60099-4 y IEEE C6211-2012.

4.1.6.1 Clasificación y requerimientos mínimos según IEC 60099-4

La IEC 60099-4 clasifica los descargadores como tipo distribución y tipo estación. A su vez estos se clasifican según el aislamiento o robustes del equipo.

4.1.6.1.1 Parámetros mínimos exigidos por la IEC 60099-4

La IEC 60099-4 realiza una clasificación de los descargadores según la tensión máxima del sistema U_s :

Descargador clase estación indicados para uso en sistemas con $U_s \geq 72.5 \text{ kV}_{p-p}$.

Descargador clase Distribución indicado para uso en sistemas con $U_s \leq 52 \text{ kV}_{p-p}$.

Nota: Los descargadores clase estación también pueden usarse en sistemas de distribución $U_s \leq 52 \text{ kV}_{p-p}$.

Los requerimientos mínimos según la clase del descargador seleccionado se presentan en la TABLA V:

TABLA V
CLASIFICACIÓN DEL DESCARGADOR SEGÚN IEC 60099-4 [1]

Clase descargador	Estación			Distribución		
	Designación	SH	SM	SL	DH	DM
Corriente nominal de descarga (I_n)	20 kA	10 kA	10 kA	10 kA	5 kA	2.5 kA
Corriente de descarga por impulso de maniobra ^a	2 kA	1 kA	0.5 kA	-	-	-
$Q(C)$	≥ 2.4	≥ 1.6	≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.2	≥ 0.1
$W_{th}(kJ/kV_{p-e})$	≥ 10	≥ 7	≥ 4	-	-	-
$Q_{th}(C)$	-	-	-	≥ 1.1	≥ 0.7	≥ 0.45

^a Otras corrientes pueden ser especificadas según lo acordado entre el fabricante y el usuario.

Nota: Las letras “H”, “M” y “L” en la designación para ciclo de servicio “Alto”, “Medio” y “bajo”, respectivamente.

4.1.6.1 Clasificación y requerimientos mínimos según IEEE C6211-2012

La IEEE C6211-2012 realiza una clasificación similar a la presentada por la IEC 60099-4. La TABLA VI, resume cada una de las clases de descargador.

TABLA VI
CLASIFICACIÓN DE CORRIENTES Y MÍNIMOS REQUERIMIENTOS
PARA DESCARGADOR SEGÚN IEEE C6211[9]

Código	Parámetro		Corriente de descarga de rayo I_n [kA]	Corriente de descarga de maniobra [A]
	U_r [kV _{p-e}]	U_s [kV _{p-p}]		
Estación	3 - 48	2.55 - 39	10	500
	54 - 312	42 - 245	10	500 - 1000
	396 - 564	318 - 448	15	2000
	576 - 612	462 - 485	20	2000
Intermedio	3 - 144	2.55 - 115	5	500
Distribución alto	3 - 36	2.55 - 29	10	-
Distribución medio	3 - 36	2.55 - 29	5	-
Distribución bajo	3 - 36	2.55 - 29	5	852

Los valores estándar de carga Q en culombios para descargadores son especificados en la TABLA VII:

TABLA VII
VALORES ESTÁNDAR DE CARGA [9]

Rango de carga [C]	Pasos de carga [C]
0.2 a 4.0	0.2
4.0 a 8.0	0.4
8.0 a 16	0.8

4.1.7 Selección del descargador de prueba

Se realiza la selección de un descargador de prueba con base en la estandarización de los resultados obtenidos, lo cual consiste en aproximar los resultados obtenidos a los valores comerciales dados por los fabricantes o la norma.

4.1.8 Determinación de la distancia de fuga del aislador cerámicos o de vidrio

Las dimensiones del descargador son determinadas por la distancia de fuga del aislador, esta se define como la separación más corta a lo largo de la superficie del material aislante entre dos partes conductoras. La normativa que aborda la selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión, destinados a uso en condiciones de contaminación es la IEC 60815. Esta se encuentra dividida en cuatro partes, las cuales son:

IEC 60815-1: Definiciones, información y principios generales.

IEC 60815-2: Aisladores cerámicos y de vidrio para sistemas A.C.

IEC 60815-3: Aisladores poliméricos para sistemas A.C.

IEC 60815-4: Aisladores para sistemas DC.

Debido a que el enfoque de este documento es la determinación de la distancia de fuga para aisladores cerámicos y de vidrio, solo se abordan los conceptos propuestos en las partes 1 y 2 de la norma.

En la parte 1 de la norma, se definen tres aproximaciones para la selección de la longitud de la cadena de aisladores, la primera se enfoca en el uso de experiencias pasadas, la segunda en la medición y prueba, la tercera en la medición y diseño. En este documento se hace uso de la aproximación tres, la cual usa factores de corrección que aporta la norma de acuerdo con las estimaciones o medición de severidad de contaminación del sitio. La Fig. 7 presenta un resumen de esta metodología.

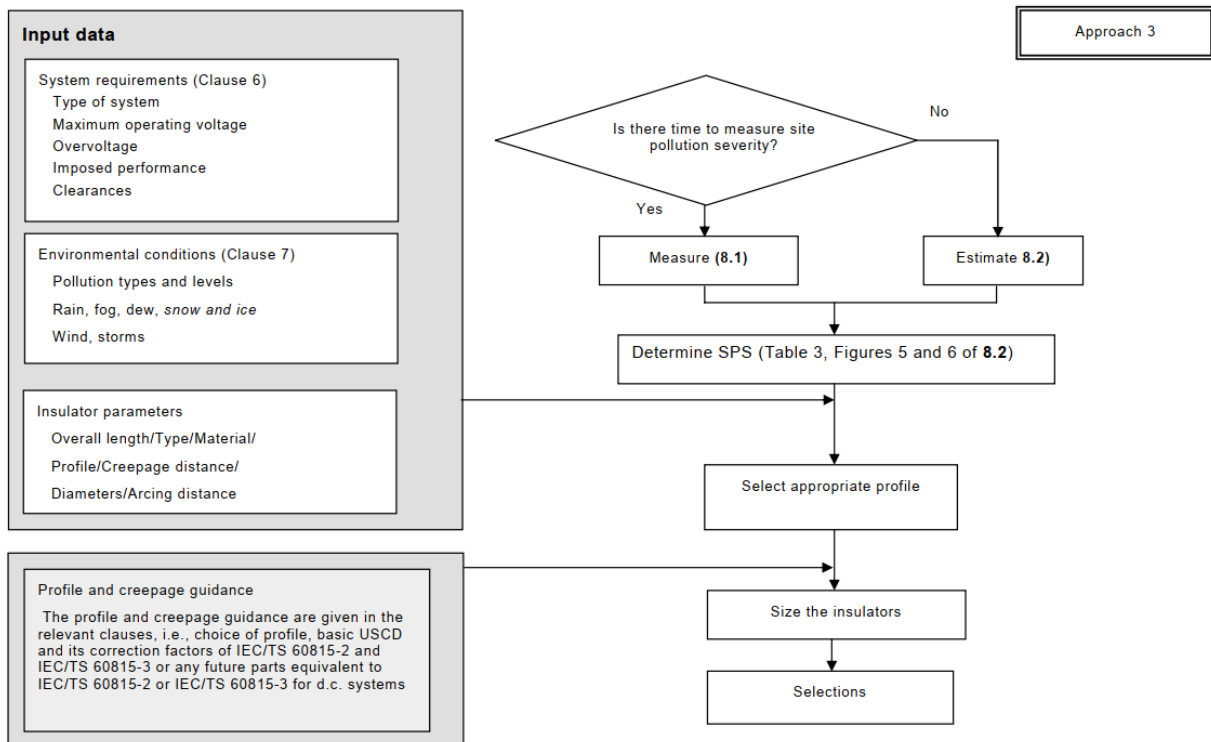


Fig. 7. Metodología para la selección de la distancia de fuga y arco para aisladores cerámicos o de vidrio [7].

4.1.8.1 Datos de entrada

Los parámetros de entrada del sistema se pueden desglosar en tres partes:

-Requerimientos del sistema:

En estos se encuentran el tipo de sistema (AC o DC), voltaje máximo de operación a través del aislador, parámetros de la coordinación de aislamiento como sobretensiones, requerimientos de desempeño impuestos, espacio libre, geometría impuesta y dimensiones.

-Condiciones ambientales:

Se analiza el tipo de contaminación ambiental, la severidad de los contaminantes en el ambiente, temperatura, altura, entre otros factores ambientales.

-Parámetros del aislador:

De acuerdo con las condiciones del lugar se puede hacer una preselección del aislador, en este se pueden tomar como datos el tipo, material y perfil. Tomando como criterio lo presentado en la tabla 1 de la norma IEC 60815-2.

4.1.8.2 Determinación de la severidad de la contaminación del sitio SPS

La determinación de la severidad de la contaminación del sitio (SPS) se realiza de acuerdo con los ejemplos planteados en la tabla 5 de la norma 60815-1 (Titulada: Ejemplos de ambientes típicos). El propósito es encontrar un ejemplo que se adapte a las condiciones del lugar que se está analizando, este nos permitirá encontrar la clasificación de severidad del sistema (SPS). Para lograr esto se debe usar como referencia las figuras 1, 2, 3 de la sección 8.2 de dicha norma.

4.1.8.3 Determinación de la distancia de fuga unificada de referencia RUSCD

La distancia de fuga unificada de referencia selecciona de acuerdo con el tipo y material del aislador, para el caso de aisladores cerámicos y de vidrio, de acuerdo con el SPS se selecciona un valor de la figura 1 de la norma 60815-2 del 2008 (Titulada: RUSCD como una función de la clase SPS). Los valores que se presentan en dicha figura se presentan en la TABLA VIII.

TABLA VIII
VALOR DE RUSCD SEGÚN LA CLASE SPS [11]

Clase SPS	RUSCD [mm/kV _{p-p}]
a - Muy ligero	22.0
b - Ligero	27.8
c - Medio	34.7
d - Pesado	43.3
e - Muy pesado	53.7

4.1.8.4 Determinación de la distancia de fuga unificada USCD

La distancia de fuga unificada se calcula con la siguiente expresión:

$$USCD = RUSCD \times K_a \times K_{ad} \quad [mm/kV_{p-p}] \quad (15)$$

Dónde:

USCD: Distancia de fuga unificada en mm/kV.

RUSCD: Distancia de fuga unificada de referencia en mm/kV.

K_a: Factor de corrección por altura.

K_{ad}: Factor de corrección tamaño y perfil del aislador.

Para el cálculo del *USCD* se debe hacer la preselección de un aislador de prueba, según las características del lugar. En la IEC 60815-2 en la tabla 1.

4.1.8.4.1 Determinación del factor de corrección por altura *K_a*

El factor de corrección por altura *K_a* se determina como:

Para altitudes menores o iguales a 1000 m es:

$$K_a = 1 \quad (16)$$

Para altitud mayores a 1000 m es:

$$K_a = e^{m\left(\frac{H-1000}{8150}\right)} \quad (17)$$

Donde:

H : Es la altura sobre el nivel del mar.

Es un valor fijo m , el cual puede tomar los valores de la TABLA IX (extraído de la IEC/TR 62271-306-2012 numeral 4.5.1).

TABLA IX
FACTOR m SEGÚN EL TIPO DE CONDICIÓN [12]

m	Frecuencia industrial	Impulso de maniobra	Impulso de rayo
Fase a tierra	1	0.75	1
Fase a fase	1	1	1
Longitudinal	1	0.9	1

4.1.8.4.2 Determinación del factor de corrección por tamaño y perfil del aislador K_{ad}

El factor de corrección por tamaño y perfil del aislador K_{ad} se calcula de acuerdo como el diámetro promedio D_a .

El diámetro promedio D_a se calcula como:

$$D_a = \frac{2 D_t + D_{S1} + D_{S2}}{4} \quad [mm] \quad (18)$$

La Fig. 8 muestra respectivamente D_t , D_{S1} , D_{S2} .

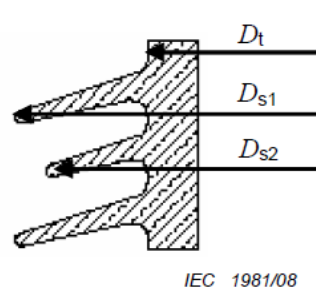


Fig. 8. Diámetro del aislador [7].

Para el caso de aisladores con aleta no alternante se asume que:

$$D_{S1} = D_{S2} \quad [mm] \quad (19)$$

Para D_a menores que 300 mm se tiene que:

$$K_{ad} = 1 \quad (20)$$

Para D_a mayores o iguales que 300 mm se tiene que:

$$K_{ad} = 0.0005 D_a + 0.85 \quad (21)$$

4.1.8.4.3 Determinación de la distancia de fuga D_{fug} y número de aisladores C_{Ais}

La distancia de fuga D_{fug} se calcula como:

$$D_{fug} = \frac{USCD \times U_m}{\sqrt{3}} \quad [mm] \quad (22)$$

El número de aisladores C_{Ais} se determina como:

$$C_{Ais} = \text{redondear} \left(\frac{D_{fug}}{D_{fug-p}} \right) \quad (23)$$

Donde

D_{fug-p} : Distancia de fuga de aislador de prueba

4.1.8.4.4 Distancia de arco D_{arc}

La distancia de arco (D_{arc}) se determina como:

$$D_{arc} = C_{Ais} \times D_{arc-p} \quad [mm] \quad (24)$$

Donde

D_{arc-p} : Distancia de arco de aislador de prueba

4.1.8 Determinación del CFO

La tensión crítica de flameo CFO es la tensión en la cual un aislamiento auto regenerativo tiene una probabilidad de ruptura del 50%. Esta es necesaria para determinar el valor de la sobretensión entrante $U_{entrante}$ al sistema. Como tal en la literatura existen muchas expresiones para encontrar un valor conservativo de CFO, para evaluar el desempeño del descargador [4].

4.1.8.1 Determinación del CFO estadístico

El BIL y BSL representan los valores pico de tensión para los cuales el aislamiento presenta una probabilidad del 90% de soportabilidad al impulso (10% de probabilidad de falla). En el caso del BIL para sobretensión de rayo y para el BSL una sobretensión de maniobra.

La relación entre el BIL, BSL y el CFO se puede aproximar a una distribución Gaussiana, como se muestra en la figura 12.

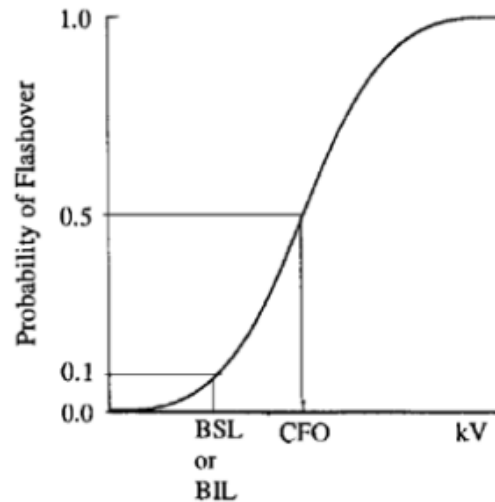


Fig. 9. Característica de soportabilidad del aislamiento auto regenerativo [4].

matemáticamente esta relación se expresa como:

$$BIL = CFO \times \left(1 - n \times \frac{\sigma}{CFO}\right) \quad [kV_{p-e}] \quad (25)$$

$$BSL = CFO \times \left(1 - n \times \frac{\sigma}{CFO}\right) \quad [kV_{p-e}] \quad (26)$$

Donde:

$$n = 1.28 \quad (27)$$

Para BIL:

$$\frac{\sigma}{CFO} \approx 2\% - 3\% \quad (28)$$

Para BSL:

$$\frac{\sigma}{CFO} \approx 5\% - 7\% \quad (29)$$

4.1.8.1 Determinación del CFO bajo condiciones estándar

El CFO determinado a través de pruebas con condiciones estándar se define como:

Para maniobra:

$$CFO_s = k_g \times \frac{3400}{1 + (8/S)} \quad [kV_{p-e}] \quad (30)$$

Para impulso tipo rayo:

$$CFO^+ = 560 \times S \quad [kV_{p-e}] \quad (31)$$

$$CFO^- = 605 \times S \quad [kV_{p-e}] \quad (32)$$

Donde S es la longitud de la cadena de aisladores en metros.

4.1.9 Cálculo de la corriente nominal del descargador

Para el cálculo de la corriente nominal del descargador deben analizarse una serie de casos ya que dependiendo de esto se define el descargador a seleccionar.

4.1.9.1 Caso 1: Descargador ubicado en extremo de línea abierta

Para este caso la corriente del descargador I_{DPS} se calcula como:

$$I_{DPS} = ((2 \times U_{entrante}) - U_{pl})/Z_{linea} \quad [kA] \quad (33)$$

Donde U_{pl} es el nivel de protección de impulso tipo rayo para el descargador.

La $U_{entrante}$ hace referencia a la sobretensión entrante al sistema.

Para flameo inverso se define como:

$$U_{entrante} = 1.2 \times U_{50+} \quad [kV_{p-e}] \quad (34)$$

U_{50+} es la tensión bajo la cual un aislamiento autoregenerativo tiene una probabilidad de ruptura del 50% (también es llamado CFO: Critical Flashover Voltage).

Para falla de apantallamiento (descarga directa):

$$U_{entrante} = 1.2 \times U_{50-} \quad [kV_{p-e}] \quad (35)$$

Donde

$$U_{50-} = 1.08 \times U_{50+} \quad [kV_{p-e}] \quad (36)$$

La impedancia de línea Z_{linea} puede ser asumida como se muestra en la TABLA X

TABLA X
VALORES DE TÍPICOS DE IMPEDANCIA DE LÍNEA [2]

Impedancia de línea	Valor
Z_{linea}	$[\Omega]$
Líneas aéreas de un solo conductor	300 - 450

La impedancia característica puede variar de acuerdo con el número de conductores en un haz, tipo de conductor y configuración de las fases. Según el nivel de tensión esta puede variar como se muestra en la TABLA XI.

TABLA XI
VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE LÍNEA SEGÚN NIVEL DE TENSIÓN [2]

U_s [kV _{p-p}]	Número de conductores en un haz	$Z_{línea}$ [Ω]
3 - 150	1	450
151 - 325	1	400
326 - 400	2	350
400 - 800	3 o 4	320
> 800	6 o 8	300

En caso de contar con datos del sistema puede ser calculado como:

$$Z_{línea} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (37)$$

Donde:

L : Inductancia por unidad de longitud en H/km

C : Capacitancia por unidad de longitud en F/km

4.1.9.2 Caso 2: Descargador ubicado frente a transformador

Para este caso la corriente del descargador I_{DPS} se calcula como:

$$I_{DPS} = 1.6 \times ((2 \times U_{entrante}) - U_{pl}) / Z_{línea} \quad [kA] \quad (38)$$

El factor de 1.6 se debe a que se estima que la capacitancia del transformador incrementa la corriente que circula por el descargador en este factor.

4.1.9.3 Caso 3: Falla de apantallamiento con reflexiones sucesivas

Para este caso se tiene en cuenta las reflexiones sucesivas que pueden estar sometido el descargador cuando está enfrente de elementos inductivos y capacitivos. La corriente del descargador I_{DPS} se calcula como:

$$I_{DPS} = \frac{2 \times (N + 1) \times U_{entrante}}{Z_{línea}} \times \left[1 - N \frac{T_s}{\tau} \right] - \frac{(2N + n) \times U_{pl}}{Z_{línea}} \quad [kA] \quad (39)$$

Donde:

T_s : el tiempo de viaje entre el descargador y el punto de impacto en μs .

τ : la constante de tiempo de cola del impulso entrante en μs , asumido entre 10 μs y 20 μs .

n : campos de líneas conectados, se asumen de $n-1$

N : es el número de reflexiones desde el punto de impacto (debe ser un entero)

La corriente máxima se obtiene para $N = N_m$. Donde N_m es:

$$N_m = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\tau}{T_s} \times \left(1 - \frac{U_{pl}}{U_{entrante}} \right) - 1 \right] \quad (40)$$

4.1.9.4 Caso 4: Descargador ubicado frente a transformador con n campos de línea

Para este caso la corriente del descargador I_{DPS} se calcula como:

$$I_{DPS} = 1.6 \times ((2 \times U_{entrante}/n) - U_{pl})/Z_{línea} \quad [kA] \quad (41)$$

4.1.10 Cálculo de la corriente por sobretensión de maniobra

Para el cálculo del corriente de maniobra solo se debe cambiar U_{pl} por U_{ps} en los casos presentados en la sección 4.1.9. Donde el U_{ps} es el nivel de protección al impulso tipo maniobra que ofrece el descargador.

4.1.10 Estimación de la carga

Máxima capacidad de carga transferida especificada de un descargador, en forma de un solo evento o grupo de descargas que puede ser transferidas a un descargador sin causar fallas mecánicas o inestabilidad eléctrica para las resistencias de MO.

4.1.10.1 Carga y energía ante impulso de rayo

La carga en el descargador ante sobretensiones de impulso tipo rayo Q se calcula como:

$$Q = \left[2 \times U_f - N \times U_{res} \times \left(1 + \ln \left(2 \times \frac{U_f}{N \times U_{res}} \right) \right) \right] \times \frac{T_l}{Z_{linea}} \quad [C] \quad (42)$$

Donde:

Q : es la carga.

U_{res} : corresponde al voltaje residual producido por el impacto de la descarga, se puede aproximar al U_{pl} .

U_f : es el voltaje de flameo inverso del aislamiento de la línea, puede asumirse como igual al CFO.

Z_{linea} : es la impedancia característica de la línea.

N : número de líneas conectadas al descargador ($N = 1$ o $N = 2$).

T_l : es la duración equivalente de la corriente de la descarga, se asume de 3×10^{-4} s.

La energía ante sobretensiones de descargas se calcula como:

$$W_{DPS} = Q \times U_{res} \quad [kJ/kV_{p-e}] \quad (43)$$

4.1.10.1 Carga y energía ante impulso de maniobra

La carga en el descargador ante sobretensiones de maniobra Q_s se calcula como:

$$Q_s = \left(\frac{U_{rp} - U_{res}}{Z_{linea}} \right) \times 2 \times \frac{l}{c} \quad [C] \quad (44)$$

Donde:

Q_s carga en el descargador durante una sobretensión de maniobra

U_{res} corresponde al voltaje residual producido por la sobretensión de maniobra, se puede aproximar al U_{ps}

U_{rp} es el máximo voltaje representativo de maniobra

l es la longitud de la línea con el tiempo de viaje del impulso a la velocidad de la luz, c .

c Velocidad de la luz.

El máximo voltaje representativo de maniobra calcula como:

$$U_{rp} = (1.25 \times U_{e2} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_s) - 0.25 \quad [kV_{p-e}] \quad (45)$$

El valor de U_{e2} se extrae de la figura 1 (Rango de sobretensiones de frente lento del 2 % en el extremo receptor debido a la activación y reactivación de la línea) de la norma IEC 60071-2.

La energía ante sobretensiones de maniobra se calcula como:

$$W_s = Q_s \times U_{res} \quad [kJ/kV_{p-e}] \quad (46)$$

La energía térmica se calcula como:

$$W_{th} = 2 \times Q_s \times U_{res} \quad [kJ/kV_{p-e}] \quad (47)$$

4.1.11 Valores mínimos necesarios para especificación de descargador

Los datos típicos de los fabricantes de pararrayos se necesitan para la selección adecuada de los pararrayos. Los datos de los pararrayos que normalmente se necesitan para hacer una selección adecuada de los pararrayos para la aplicación habitual de protección de transformadores u otros equipos de subestaciones.

TABLA XII
DATOS NECESARIOS PARA LA SELECCIÓN DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN [2]

Datos del descargador	Denotación
Tensión nominal U_r	kV_{p-e} (valor r.m.s)
Tensión de operación continua U_c	kV_{p-e} (valor r.m.s)
Corriente nominal de descarga I_n	kA (valor pico)
Designación	DL, DM, DH, SL, SM, SH
Q	C
W_{th} , descargadores de subestación	kJ/ kV_{p-e}
Q_{th} , descargadores de distribución y líneas	C
Nivel de protección contra impulso tipo rayo, LIPL	kV_{p-e} (valor pico)
Nivel de protección contra impulso tipo rayo, SIPL	kV_{p-e} (valor pico)
Corriente de cortocircuito, I_s	kA (valor pico)

5. Ejercicio de aplicación

En la TABLA XIII y TABLA XIV, se presentan los parámetros de la subestación eléctrica para la cual se desea dimensionar los descargadores de sobretensiones del tipo MO.

TABLA XIII
PARÁMETROS AMBIENTALES DE LA SUBESTACIÓN

Parámetro	Unidad	Valor
Altura sobre el nivel del mar	msnm	163
Temperatura mínima	°C	22
Temperatura media anual	°C	32
Temperatura máxima	°C	34
Humedad promedio mensual	%	80 - 85
Nivel ceráuneo	días/año	150
Velocidad del viento de diseño	m/s	17
Precipitación medio anual	mm	2 000 - 2 500
Nivel de contaminación ambiental	-	Medio
Intensidad de radiación solar	kWh·m ² ·día	4 - 4.5

TABLA XIV
PARÁMETROS ELECTROMECÁNICOS DE LA SUBESTACIÓN

Parámetro	Unidad	34.5 kV	13.8 kV
Tensión de operación del sistema (U_n)	kV_{p-p}	34.5	13.8
Tipo de subestación	-	Celdas AIS	Celdas AIS
Configuración	-	Barra sencilla	Barra sencilla
Número de bahías de línea a instalar	Und	2	2
Número de bahías de transformación a instalar	Und	1	2
Número de bahías de línea futuras	Und	1	1
Número de bahías de transformación futuras	Und	0	0
Tensión máxima del sistema (U_s)	kV_{p-p}	38	15.18
Tensión máxima asignada a equipos (U_m)	kV_{p-e}	36	17.5
Frecuencia asignada	Hz	60	60
Número de fases	-	3	3
Puesta a tierra	-	Sólido	Sólido
Corriente asignada de cortocircuito para el equipo de subestación	kA	5	5
Máxima duración admisible del cortocircuito	s	1	1

IV. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este proyecto se ejecutaron una serie de actividades, por medio de las cuales se esperaba el poder tener un contexto más amplio de las referencias normativas, criterios ingenieriles, resoluciones y acuerdos de fabricante con las que se cuenta actualmente, para sintetizar la metodología de selección de descargadores de sobretensión. Las actividades desarrolladas fueron las siguientes:

Actividad 1. Realizar la revisión de bibliografía y material disponible sobre el diseño y metodología de selección de descargadores de sobretensión.

Actividad 2. Selección de criterios de diseño y dimensionamiento de equipos de subestación eléctrica AIS.

Actividad 3. Elaborar documento guía con las memorias de cálculo y procesos que sean adaptables a cualquier proyecto, independiente de su configuración y nivel de tensión.

Actividad 4. Adaptar las fórmulas de la memoria a un documento de cálculo en Excel.

V. RESULTADOS

El resultado final es un documento guía que resume todas las referencias normativas, criterios ingenieriles, resoluciones y acuerdos de fabricante con las que se cuenta actualmente, para seleccionar un descargador de sobretensión del tipo MO. Estos criterios que en su mayoría hacen referencia a ecuaciones, fueron implementados en un documento de cálculo en Excel para facilitar su aplicación.

Definición	Símbolo	Unidad	Valor calculado	Valor comercial	Check
Tensión máxima del sistema	U _s	kV _{p-p} (valor r.m.s)	38	36	✘
Tensión nominal	U _r	kV _{p-e} (valor r.m.s)	29	30	✔
Tensión máxima de operación	U _c	kV _{p-e} (valor r.m.s)	23	24	✔
Tensión residual 8/20 μs	U _{pl}	kV _{p-e} (valor pico)	-	77.7	✔
Tensión residual 30/60 μs	U _{ps}	kV _{p-e} (valor pico)	-	59	✔
Corriente nominal de descarga	I _n	kA (valor pico)	6.72	10	✔
Corriente maniobra	I _s	kA (valor pico)	0.68	1	✔
Carga	Q	C	1.16	1.6	✔
Disipación de energía	W	kJ/kV _{p-e} (valor r.m.s)	3	4.5	✔
Disipación de energía térmica	W _{th}	kJ/kV _{p-e} (valor r.m.s)	0.4	4.5	✔
Distancia de fuga mínima	D _{fug}	mm	760	760	✔
Distancia de arco	D _{arc}	mm	438	438	✔

Fig. 10. Resultados de implementación en Excel para ejemplo de aplicación nivel de 34.5 kV.

Definición	Símbolo	Unidad	Valor calculado	Valor comercial	Check
Tensión máxima del sistema	U _s	kV _{p-p} (valor r.m.s)	18	18	✔
Tensión nominal	U _r	kV _{p-e} (valor r.m.s)	13	15	✔
Tensión máxima de operación	U _c	kV _{p-e} (valor r.m.s)	11	12	✔
Tensión residual 8/20 μs	U _{pl}	kV _{p-e} (valor pico)	-	42.8	✔
Tensión residual 30/60 μs	U _{ps}	kV _{p-e} (valor pico)	-	32.9	✔
Corriente nominal de descarga	I _n	kA (valor pico)	4.42	10	✔
Corriente maniobra	I _s	kA (valor pico)	0.31	0.5	✔
Carga	Q	C	0.75	1.6	✔
Disipación de energía	W	kJ/kV _{p-e} (valor r.m.s)	2	4.5	✔
Disipación de energía térmica	W _{th}	kJ/kV _{p-e} (valor r.m.s)	0.1	4.5	✔
Distancia de fuga mínima	D _{fug}	mm	351	351	✔
Distancia de arco	D _{arc}	mm	292	292	✔

Fig. 11. Resultados de implementación en Excel para ejemplo de aplicación nivel de 13.8 kV.

VI. ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en las Fig. 10 y Fig. 11, coinciden con los valores típicos de requerimientos mínimos para descargadores en el nivel de tensión de 34.5/13.8 kV (presentados en TABLA III, TABLA IV, TABLA V, TABLA VI, TABLA VII).

VII. CONCLUSIONES

La selección de los requisitos mínimos del descargador es un proceso que se dificulta si la información que se suministra para la realización no es clara y precisa. Entre más información se tenga del sistema, mucho más acertada puede ser la selección.

En la determinación de las sobretensiones entrantes al sistemas, debe hacerse un análisis detallado de los resultados obtenidos, ya que dichas ecuaciones parten de supuestos que en ciertos casos puede ser demasiado conservativos (llevar a sobredimensionamiento). Para mitigar esto puede utilizarse valores de estudios de sobretensiones o hacer un análisis más profundo de los modelos que ofrece el libro de referencia [4] .

Es importante llevar los valores obtenidos, a valores comerciales, ya que esto facilita la cotización y posible adquisición del equipo.

VIII. RECOMENDACIONES

Es necesario llevar un seguimiento de las actualizaciones que se pueden presentar de este dispositivo (Descargador de sobretensiones), ya que esto se puede traducir en una actualización de los criterios ingenieriles, resoluciones y acuerdos de fabricantes. Lo que llevaría a modificaciones de este documento.

REFERENCIAS

- [1] International Electrotechnical Commission, «IEC 60099-4: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems». junio de 2014.
- [2] International Electrotechnical Commission, «IEC 60099-5: Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations». enero de 2018.
- [3] T. Krieg y J. Finn, «International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B3: Substations». Springer, 2019.
- [4] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, 1st ed. Taylor & Francis Group, 1999.
- [5] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS - CREG, «RESOLUCIÓN 25 DE 1995». 24 de junio de 1995.
- [6] V. Hinrichsen, *SIEMENS: Metal-Oxide Surge Arrester Fundamentals*, 1st ed. Berlin, Germany: Siemens AG, 2001.
- [7] International Electrotechnical Commission, «IEC/TS 60815-1: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles». octubre de 2008.
- [8] J. Woodworth, «Understanding Gapped MOV Arrester Technology». 6 de febrero de 2016.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)». 20 de diciembre de 2012.
- [10] International Electrotechnical Commission, «IEC 60071-1: Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules». marzo de 2011.
- [11] International Electrotechnical Commission, «IEC/TS 60815-2: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems.» octubre de 2008.
- [12] International Electrotechnical Commission, «IEC/TR 62271-306: High-voltage switchgear and controlgear –Part 306: Guide to IEC 62271-100, IEC 62271-1 and other IEC standards related to alternating current circuit breakers». diciembre de 2012.

ANEXOS

Documento en Excel

Metodología para la selección de descargador de sobretensiones del tipo oxido de metal sin explosores.