

**GUÍA DE SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA PROTECCIÓN CONTRA
SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV.**

**JEAN PAUL ÁLVAREZ CALDERÓN
DIEGO ARMANDO BELTRÁN BAUTISTA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2017**

**GUÍA DE SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA PROTECCIÓN CONTRA
SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV.**

**ING. JEAN PAUL ÁLVAREZ CALDERÓN
ING. DIEGO ARMANDO BELTRÁN BAUTISTA**

**Monografía presentada para optar al título de Especialista en Sistemas de
Distribución de Energía Eléctrica**

**Director:
M.P.E. Julio César Chacón Velasco**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2017**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	13
2. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	14
2.1 DEFINICIÓN	14
2.2 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	17
2.2.1 Subestaciones receptoras secundarias o reductoras	17
2.2.2 Circuitos primarios	17
2.2.3 Circuitos transformadores de distribución	17
2.2.4 Circuito secundario	18
3. FALLA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	20
3.1 FALLA POR SOBRECORRIENTE	20
3.1.1 Cortocircuito	20
3.1.2 Sobrecarga	21
3.1.3 Fallas por incremento de tensión	21
4. SOBRETENSIÓN	22
4.1 DEFINICIÓN	22
4.2 ORIGEN DE LA SOBRETENSIÓN	23
4.3 TIPOS DE SOBRETENSIÓN	23
4.3.1 Sobretensiones temporales	23
4.3.2 Sobretensiones de maniobra	24
4.3.3 Sobretensiones externas o atmosféricas	24

5. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)	25
5.1 DEFINICIÓN	25
5.2 FUNCIONAMIENTO	29
5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)	30
6. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV	32
6.1 DETERMINACIÓN DEL MCOV	32
6.2 DETERMINACIÓN DEL TOV	33
6.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE DESCARGADOR POR CAPACIDAD DE ENERGÍA (NORMAL DUTY/HEAVY DUTY)	35
6.4 VERIFICACIÓN DE LOS MÁRGENES DE PROTECCIÓN	35
7. APLICACIÓN PRÁCTICA DE SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV	40
7.1 DETERMINACIÓN DEL MCOV DEL DESCARGADOR	40
7.2 DETERMINACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL TOV	43
7.3 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE DESCARGADOR (NORMAL DUTY/ HEAVY DUTY)	44
7.4 VERIFICACIÓN DE LOS MÁRGENES DE PROTECCIÓN	46
8. CONCLUSIONES	52
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	54
BIBLIOGRAFÍA	56

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Clasificación por niveles de tensión según CREG 097 de 2008.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2 Características generales de diseño de un DPS.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3 Funcionamiento de un DPS de Óxidos metálicos.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4 Factor de aterrizamiento según configuración del sistema.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5 Duración de la sobretensión en segundos.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6 Márgenes de protección.</i>	<i>38</i>

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Niveles de protección típicos según norma IEEE C62.22.</i>	36
<i>Tabla 2. Tabla de datos para descargadores POLIM-D de ABB.</i>	42
<i>Tabla 3. TOV de descargadores POLIM-D de ABB.</i>	43
<i>Tabla 4. Descargador tipo Heavy duty POLIM-D de ABB.</i>	45
<i>Tabla 5. Tabla de datos POLIM-D de ABB.</i>	47
<i>Tabla 6. Valor de FOW según norma IEEE C62.22.</i>	48
<i>Tabla 7. Tabla de datos POLIM-D de ABB.</i>	49

RESUMEN

TITULO: GUÍA DE SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV.

AUTORES: ALVAREZ, Calderón Jean Paul - BELTRAN, Bautista Diego Armando.**

PALABRAS CLAVE: Sobretensión, IEEE C62.22, dispositivos de protección contra sobretensiones, descargadores, sistemas de distribución, MCOV, TOV, BIL.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO:

La sobretensión es una condición de falla la cual afecta directamente los equipos de un sistema eléctrico impactando directamente sobre la confiabilidad de este. Es importante conocer las especificaciones con las que cada equipo cuenta, es decir la sensibilidad que este tenga ante posibles perturbaciones provocadas por los cambios en el nivel de tensión. Por esta razón es de gran importancia establecer, estudiar e implementar métodos correctos para la protección de los sistemas eléctricos contra este fenómeno, haciendo énfasis en la correcta selección de equipos de protección contra sobretensiones en subestaciones eléctricas de los sistemas de distribución hasta 57,5 kV, el cual constituye el objetivo general de esta monografía.

En este trabajo se describirán de manera general las sobretensiones, sus causas y consecuencias como también los equipos destinados a la protección contra este fenómeno en los sistemas eléctricos de distribución, los cuales son los descargadores o dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS),

También se utilizarán los principios establecidos en la norma IEEE C62.22 para determinar los criterios de una correcta selección de los equipos de protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución con el fin de mejorar y garantizar la confiabilidad de estos.

Finalmente se utilizará un ejemplo de aplicación para la selección de un dispositivo de protección contra sobretensiones en un sistema de distribución a 34,5 kV en el cual se ilustrará el procedimiento sugerido por la norma IEEE C62.22 mencionado anteriormente.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Director: M.P.E. Julio César Chacón Velasco

ABSTRACT

TITLE: EQUIPMENT SELECTION GUIDE FOR PROTECTION AGAINST SURGES IN SUBSTATIONS OF ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS UP TO 57.5 KV'.

AUTHORS: ALVAREZ, Calderón Jean Paul - BELTRAN, Bautista Diego Armando.**

KEYWORDS: Surge, IEEE C62.22, surge protection devices, dischargers, distribution systems, MCOV, TOV, BIL.

CONTENT DESCRIPTION:

Surge is a failing (fault, failure, negative) condition which affects the equipment of an electrical system directly affecting its reliability. It is necessary to outline the importance of knowing the specifications of the equipment. For instance, the sensitivity it might have in possible perturbations provoked by changes in the tension level. Consequently, it is of great importance to establish, study and implement the right methods in order to protect electrical systems against this phenomenon; emphasizing in the appropriate selection of surge protection devices against surge in electrical substations of distribution systems up to 57.5 kV, which is the general objective of this monograph.

This paper will provide a general overview about surge, its causes and consequences, as well as the equipment assigned to the protection against this phenomenon in the electrical distribution systems, which are the surge arresters or devices of protection against surges (DPS).

Moreover, we will use the principles established in the IEEE C62.22 norm in order to determine the criteria, which will be used to choose the correct protection equipment against surge in the distribution systems. This intends to improve and guarantee the reliability of it.

Finally, an example of the application will be used for the selection of a surge protection device in a 34.5 kV distribution system, in which we illustrate the procedure as suggested by IEEE C62.22.

* Monograph

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering Specialization in Electrical Energy Distribution Systems Director M.P.E. Julio César Chacón Velasco M.P.E. Julio César Chacón Velasco

INTRODUCCIÓN

La confiabilidad y calidad del servicio de los sistemas eléctricos de distribución está asociada directamente a la disponibilidad de la red para entregar energía de manera continua sin interrupciones, esta confiabilidad se mide por los indicadores SAIFI (frecuencia media de interrupciones por cliente por año) y SAIDI (tiempo total promedio de interrupción por cliente) [1] los cuales determinan la calidad y confiabilidad de los sistemas eléctricos y son la herramienta de los agentes reguladores para establecer políticas de incentivos positivos o negativos a los operadores de red [2]. Estos indicadores se ven afectados directamente por las interrupciones o cortes de energía y su duración, estas interrupciones obedecen a procedimientos de maniobras o fallas en el sistema, estas últimas son interrupciones no deseadas y se tratan de reducir al máximo. Las fallas eléctricas surgen por diversos motivos, de forma general por condiciones de sobrecorriente o sobretensión [3]. La sobretensión es una condición de falla la cual afecta directamente los equipos de una subestación de un sistema eléctrico impactando directamente sobre la confiabilidad del sistema repercutiendo en la calidad de vida de una sociedad dependiente en todos sus procesos económicos de la energía eléctrica[4], por lo tanto es de gran importancia establecer, estudiar e implementar métodos correctos para la protección de los sistemas eléctricos contra las sobretensiones haciendo énfasis en la correcta selección de equipos de protección contra sobretensiones en subestaciones eléctricas hasta 57,5 kV el cual constituye el objetivo general de esta monografía. En este trabajo se describirán de manera general las sobretensiones, sus causas y consecuencias como también los equipos destinados a la protección contra estas. Finalmente se utilizarán los principios establecidos en la norma IEEE C62.22 para determinar los criterios de una correcta selección de los equipos de protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución con el fin de mejorar y garantizar la confiabilidad y calidad de estos.

1. JUSTIFICACIÓN

Las consecuencias de las sobretensiones en los sistemas eléctricos afectan al operador de red en lo relacionado a las políticas emitidas por el ente regulador concernientes al cumplimiento de indicadores mínimos de confiabilidad del sistema el cual podría generarle sanciones a este, también afecta a los equipos asociados a la subestación generando daños o degradación de la vida útil [5] incurriendo en costos adicionales de reparación o reemplazo, el usuario final de igual forma se ve afectado en su calidad de vida y finalmente la sociedad debido a su dependencia total de la energía eléctrica en sus procesos económicos [3]. Un sistema eléctrico se puede proteger de estas sobretensiones implementando un esquema adecuado de protección basado en la selección correcta de los equipos de protección, por lo tanto, el desarrollo de una guía con criterios de selección de equipos de protecciones resulta de gran importancia y utilidad en este campo de aplicación de la ingeniería y es lo que pretende esta monografía para subestaciones de sistemas de distribución hasta 57,5 kV. La correcta implementación de un sistema de protección contra sobretensiones en un sistema eléctrico involucra una adecuada selección de los equipos de protección según el caso o las características del sistema a proteger.

2. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

2.1 DEFINICIÓN

Un sistema eléctrico de potencia por definición general es el conjunto de elementos, dispositivos e instalaciones utilizados para generar, transportar y distribuir energía eléctrica a los usuarios y procesos que la requieran, es decir, la finalidad de un sistema eléctrico de potencia es la producción de energía eléctrica y su transporte hasta los centros de consumo [6]. Existen tres etapas generales en los sistemas eléctricos de potencia para tal fin y son las siguientes:

- **Generación:** Esta etapa del sistema eléctrico de potencia busca como su nombre lo indica, generar energía eléctrica a partir de la transformación de otros tipos de energía tal como la energía térmica, química, cinética, nuclear, entre otras, siendo las más comunes la generación hidroeléctrica y termoeléctrica. Para la generación de energía se utilizan máquinas generadoras que convierten la energía fuente en energía eléctrica para que sea transportada posteriormente. [7].
- **Trasmisión:** en esta etapa se transporta la energía generada hasta los centros de distribución por medio de dispositivos tales como líneas conductoras, estructuras de apoyo, entre otros.[8]
- **Distribución:** una vez transportada la energía a los centros de distribución, esta debe ser repartida a los diferentes usuarios y cargas del sistema, como su nombre lo indica, en esta etapa se distribuye la energía a los usuarios finales.

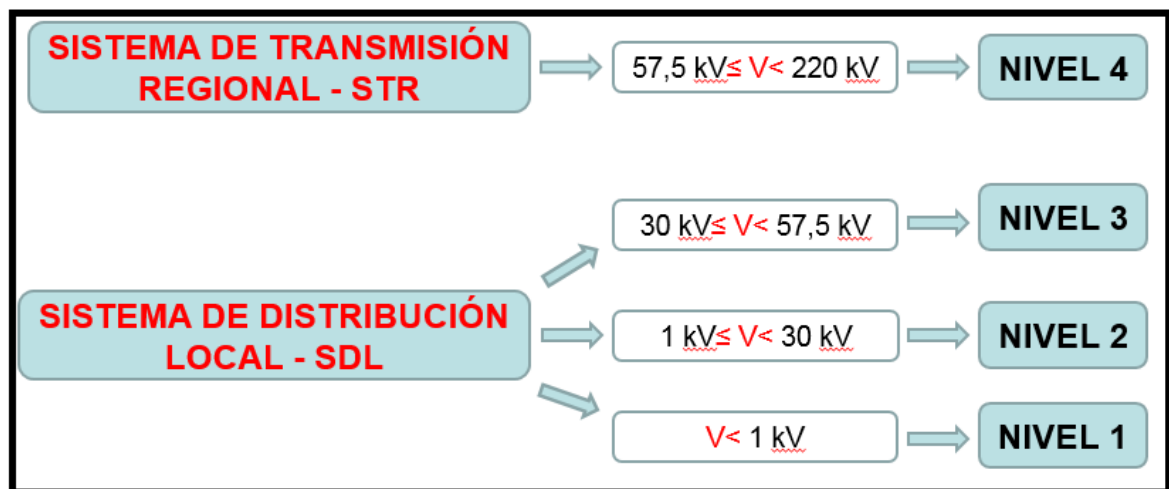
Las subestaciones eléctricas son las encargadas de interconectar las tres etapas mencionadas, es decir, las subestaciones eléctricas son el componente del sistema eléctrico de potencia en la cual se controlan las variables de tensión y corriente según la etapa del sistema donde se ubique. Son además punto de interconexión

para la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Estas están clasificadas según su función y construcción entre las que tenemos [9]:

- Elevadoras
- Reductoras
- De maniobra
- Encapsuladas
- Tipo interior y exterior
- Entre otras

El objetivo de este trabajo es estudiar la protección contra sobretensiones en la etapa de distribución por lo que se hará énfasis solo en esta etapa y no se profundiza en las otras, la CREG 097 de 2008 establece según el nivel de tensión que la distribución en Colombia está entre 1kV y 57,5 kV, es decir hasta nivel 3 según la clasificación de la figura 1 [10].

Figura 1 Clasificación por niveles de tensión según CREG 097 de 2008.



Fuente: Autor

La CREG define el sistema de distribución como : “Sistema de transporte de energía eléctrica compuesto por el conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos

asociados, que operan a los Niveles de Tensión 3, 2 y 1 dedicados a la prestación del servicio en un Mercado de Comercialización.”[10]

Existen diferentes tipos de sistemas de distribución y se pueden clasificar [6] de la siguiente manera:

Por su construcción:

- Sistemas de distribución aéreos.
- Sistemas de distribución subterráneos.

Por niveles nominales de tensión en Colombia:

- Sistemas de distribución primarios (13,2/7,62 kV- configuración estrella con neutro sólido a tierra)
- Sistemas de distribución secundaria
 - Monofásico trifilar 240/120 V con punto central a tierra.
 - Trifásico tetrafilar 208/120 V con neutro a tierra y 220/127 V con neutro a tierra.
 - Trifásico en Delta (triángulo) con transformadores monofásico con uno conectado a tierra 240/120 V.
 - Trifásico 480/277 V en estrella.
 - Trifásico 480/240 V en delta.

Por su ubicación geográfica:

- Sistemas de distribución urbanas.
- Sistemas de distribución rurales.
- Sistemas de distribución suburbanas (intermedias)
- Sistemas de distribución turísticas (perfiles de carga que varían con temporadas del año como vacaciones, generalmente subterráneas)

Por el tipo de carga:

- Sistemas de distribución para cargas tipo residencial.

- Sistemas de distribución para cargas tipo comercial.
- Sistemas de distribución para cargas tipo industrial.
- Sistemas de distribución para cargas de alumbrado público.
- Sistemas de distribución para cargas tipo mixto.

2.2 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El sistema de distribución como se mencionó anteriormente es el conjunto de elementos dedicados a transportar la energía eléctrica para su distribución a usuarios finales caracterizado por un nivel de tensión máximo de 57,5 kV según lo establecido por la comisión de regulación de energía y gas (CREG) para Colombia.

Estos sistemas de distribución en términos generales están compuestos por los siguientes elementos para llevar a cabo su finalidad de distribución de energía [6]:

2.2.1 Subestaciones receptoras secundarias o reductoras Estas subestaciones reciben y transforman la energía recibida de la etapa de transmisión, específicamente reduciendo los niveles de tensión a niveles de distribución (menor a 57,5 kV). Estas subestaciones representan el inicio de los circuitos primarios de distribución.

2.2.2 Circuitos primarios Estos circuitos entregan la energía a través de líneas conductoras distribuidas geográficamente en la zona de distribución a niveles de tensión típicos de 13,2 kV, 11,4 kV, 34,5 kV, etc. El final de estos circuitos son los transformadores de distribución.

2.2.3 Circuitos transformadores de distribución Estos dispositivos bajan los niveles de tensión de los circuitos primarios a niveles de tensión de utilización final

típicamente a 120 /208 V, estos equipos están distribuidos a través de la red cercanos al usuario final

2.2.4 Circuito secundario Estos circuitos son la salida de los transformadores de distribución y son los que llevan finalmente la energía eléctrica a niveles generales de tensión de 120/208 V típicamente hasta los 600 V a los usuarios finales.

Como es evidente, uno de los componentes más importantes de los sistemas de distribución son las subestaciones reductoras o receptoras de los niveles de transmisión ya que estas dan inicio a la etapa de distribución dentro del sistema eléctrico de potencia, por la CREG se sabe, como se mencionó anteriormente que estas subestaciones pueden ser máximo hasta 57,5 kV en su lado secundario.

Una de las características más importantes de los sistemas de distribución, es que estos deben poder ser capaces de transportar la energía hasta el usuario final a través de sus redes de manera confiable, continua y segura, cabe aclarar que en esta etapa del sistema eléctrico de potencia es donde los índices de pérdidas son los más altos debido a la gran cantidad de equipos que la conforman y los niveles de tensión más bajos en relación a la etapa de generación y transmisión [6].

La confiabilidad y calidad del servicio de los sistemas eléctricos de distribución está asociada directamente a la disponibilidad de la red para entregar energía de manera continua sin interrupciones, esta confiabilidad se mide por los indicadores SAIFI y SAIDI [1] los cuales determinan la calidad y confiabilidad de los sistemas eléctricos y son la herramienta de los agentes reguladores para establecer políticas de incentivos positivos o negativos a los operadores de red [2]. Estos indicadores se ven afectados directamente por las interrupciones o cortes de energía y su duración, estas interrupciones obedecen a procedimientos de maniobras o fallas en el sistema, estas últimas son interrupciones no deseadas y se tratan de reducir al máximo. Las fallas eléctricas son causadas por diversos motivos, de forma general

por condiciones de sobrecorriente o sobretensión [3], siendo la sobretensión una condición de falla la cual afecta directamente los equipos de una subestación de un sistema eléctrico, impactando directamente sobre la confiabilidad del sistema y repercutiendo en la calidad de vida de una sociedad dependiente en todos sus procesos económicos de la energía eléctrica [4]. En el próximo capítulo se describirá los tipos de falla que afectan directamente los sistemas de distribución ya sea por sobrecorriente o sobretensión haciendo énfasis en esta última el cual constituye el objetivo de este trabajo.

3. FALLA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Como se mencionó anteriormente las fallas en los sistemas eléctricos de deben básicamente a condiciones anormales en sus corrientes y tensiones, a continuación de describirá de forma general estas condiciones anormales de operación un sistema eléctrico general.

3.1 FALLA POR SOBRECORRIENTE

Este tipo de falla como su nombre lo indica, se caracteriza por el incremento de los valores de corriente en el sistema más allá de los valores permisibles de operación, generando interrupciones, daños a equipos y riesgos a personas. Principalmente estas sobre corrientes pueden ser por cortocircuitos y sobre cargas, las cuales se definirán a continuación [11].

3.1.1 Cortocircuito Este tipo de falla se caracteriza por los altos niveles de corriente en sistema en relación a los valores permisibles de operación y se presentan ya que la fuente encuentra baja impedancia elevando el valor de corriente a niveles dañinos para el sistema.

Alguna de las consecuencias del cortocircuito es que incrementa los esfuerzos térmicos en el sistema debido a la liberación de calor durante el cortocircuito regido por el efecto Joule. Además se incrementan los esfuerzos dinámicos de los elementos del sistema generando daños y averías.

Este tipo de falla debe ser despejada instantáneamente por los equipos de encargados para esta función.

3.1.2 Sobrecarga Son incrementos de corriente en los circuitos del sistema por encima de la corriente de operación normal (corriente nominal de los equipos), aunque estos incrementos no alcanzan los niveles de corriente del cortocircuito, estos pueden generar daños si duran demasiado tiempo en el sistema, por lo que deben ser despejados después de un cierto tiempo para evitar daños a los equipos.

3.1.3 Fallas por incremento de tensión Como su nombre lo indica, en este caso el incremento en los valores de operación del sistema se da en la tensión y pueden llegar a ocasionar daños en los equipos del sistema, estas sobretensiones pueden ser permanentes o transitorias y pueden ser originadas por diferentes causas. En el próximo capítulo se describirán más detalladamente las características de este fenómeno, origen, tipos, etc.

4. SOBRETENSIÓN

4.1 DEFINICIÓN

En principio la sobretensión se define como la diferencia de potencial entre fases o entre fases y tierras de un sistema eléctrico ya sea transitoria o permanente y se caracteriza porque su valor de cresta es mayor a la tensión máxima de operación de diseño del sistema, este incremento en la diferencia de potencial puede afectar el aislamiento del sistema y los equipos que lo conforman poniendo en riesgo la continuidad del servicio y su calidad [12].

La relación entre la sobretensión (V_s) y la tensión máxima del sistema (V) se conoce como factor de sobretensión y se calcula como:

$$x(t) = \text{Re}[X_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}] = \text{Re}[X_m \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}] \quad (1)$$

Las sobretensiones presentan una naturaleza probabilística, lo que hace difícil su estudio, predicción y lo más importante su control [12]. Los equipos se pueden ver afectados debido a las descargas que producen estas sobretensiones en su aislamiento.

Los peligros que presentan las sobretensiones no se limitan simplemente a los valores cresta de tensión por encima de los valores máximos del sistema sino también a la forma de la onda que estas pueden tener, es decir la capacidad destructora de las sobretensiones se debe también a la gran cantidad de energía que puede transportar en la onda [12].

4.2 ORIGEN DE LA SOBRETENSIÓN

Básicamente el origen de la sobretensión obedece a los impactos directos o indirectos de descargas atmosféricas en los quipos del sistema tal como líneas, estructuras y en las subestaciones, como también resultan de las acciones de maniobra como aperturas y cierres de equipos dentro del mismo sistema. Es decir el origen de las sobretensiones puede ser:

- Origen por descargas atmosféricas.
- Origen por maniobras en el sistema.

Estas sobretensiones no pueden ser evitadas por el sistema de distribución y como se ha mencionado anteriormente representan un peligro para este y los equipos que lo conforman. Por este motivo se han venido desarrollando y perfeccionando sistemas de protección contra estas sobretensiones indeseables. [12].

4.3 TIPOS DE SOBRETENSIÓN

Dependiendo de su origen y características se puede clasificar las sobretensiones en tres tipos generales como se describe a continuación [13]:

4.3.1 Sobretensiones temporales Estas sobretensiones ocurren como reacción del sistema de distribución a la salida o rechazo de carga o por causa de una falla en una conexión a tierra. Estas sobretensiones son de frecuencia industrial y tienen una duración de entre 0,1 segundo y varias horas. En general esta onda no excede el valor de $\sqrt{3}$ p.u de la tensión del sistema por lo que no representa un peligro para la red, pero si es importante tener en cuenta a la hora de dimensionar los dispositivos de protección contra sobretensiones.

4.3.2 Sobretensiones de maniobra Estas sobretensiones ocurren como su nombre lo indica durante las acciones de maniobra en el sistema tal como apertura y cierre de equipos. Estas sobretensiones se caracterizan por presentar mayormente frecuencias mayores a los kHz y puede llegar a magnitudes de hasta 3 p.u de la referencia para tensión del sistema. Para las maniobras en circuitos inductivos el frente de onda de la sobretensión típicamente se mantiene entre 0,1 μ s y 10 μ s y los valores pico pueden llegar a ser hasta de 4 p.u representando un peligro para el aislamiento del equipo y por lo tanto comprometiendo las operatividad y continuidad del sistema de distribución. [12]. Este tipo de sobretensión también puede presentarse cuando existen líneas activas, los valores típicos para este pueden alcanzar hasta los 2.2 p.u máximo lo cual no representa un riesgo para el sistema.

4.3.3 Sobretensiones externas o atmosféricas Estas se presentan por descargas atmosféricas en partes del sistema, ya sea en líneas, estructuras o subestaciones, normalmente alcanzan su valor pico en algunos microsegundos alcanzando valores a nivel de media tensión de hasta 10 p.u para decaer luego rápidamente. [12].

Las sobretensiones de tipo atmosféricas son las que representan más peligro para los sistemas en media tensión, es decir para las redes de distribución.

5. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)

5.1 DEFINICIÓN

Se denomina DPS o descargador de tensión al dispositivo encargado de descargar a tierra las sobretensiones que se puedan presentar en un sistema de distribución y que puedan llegar a generar daños al aislamiento de los equipos y por lo tanto interrupciones en dicho sistema, estas sobretensiones pueden ser producidas por descargas atmosféricas, maniobras y otras causas. [12]

Para entender el funcionamiento y características de los DPS o descargadores, a continuación se definirán algunos términos relacionados a estos dispositivos:

- Nivel Básico de Aislamiento (BIL/SIL): Existen dos definiciones según tipo de nivel básico de aislamiento, este puede ser estadístico o convencional.
 - ✓ Nivel básico de aislamiento estadístico: corresponde al valor pico o cresta de un impulso atmosférico (1,2/50 μ s) o de maniobra (250/2500 μ S) tal que el aislamiento representa el 90 % de probabilidad de soportar la prueba o lo contrario, el 10% de fallarla. [12]
 - ✓ Nivel básico de aislamiento convencional: corresponde al valor pico o cresta de un impulso típico o estándar que el aislamiento puede soportar sin ruptura y sin presentar daños permanentes al ser expuesto a dicho impulso un número determinado de veces. [19]
- Valor cresta o valor pico de una onda: valor máximo alcanzado por la onda.
- Tensión máxima de la red (V_m): Tensión máxima entre fases del sistema en condición de operación normal.
- Corriente de descarga nominal (según IEC): corresponde al valor máximo del impulso de corriente de descarga, esta se utiliza para clasificar al DPS.

- Corriente de clasificación de descarga (según ANSI/IEEE): hace referencia a la corriente de descarga nominal que se utiliza para realizar las pruebas de clasificación de los descargadores.
- Corriente continua del DPS: Es la corriente que circula por el equipo cuando se le aplica la tensión de operación en sus terminales.
- Tensión nominal (V_r): Según IEC, es la tensión que el DPS o descargador debe resistir durante 10 segundos después de ser precalentado a 60 °C y sometido a inyección de energía, es decir la tensión nominal del descargador, esta tensión se utiliza como parámetro de referencia del equipo.
- Tensión de funcionamiento nominal: según ANSI, es la tensión nominal máxima admisible entre terminales para el funcionamiento del descargador.
- Tensión de trabajo continuo (V_c): Corresponde a la tensión de frecuencia industrial eficaz máxima admisible que puede ser aplicada de forma continua entre los terminales del DPS. Permite al fabricante decidir la tensión U_c . Este valor en normatividad ANSI corresponde al parámetro MCOV.
- Tensión de reacción: Es el valor de tensión aplicado al equipo que da inicio a la descarga.
- Sobretensiones temporales (TOV): A diferencia de las instantáneas, son sobretensiones de frecuencia industrial oscilantes de duración relativamente larga (entre pocos ciclos y horas). La forma más habitual de sobretensión se produce en las fases sanas de una red, durante una pérdida a tierra en una fase o varias. Otras fuentes de sobretensiones temporales son el rechazo de carga, energización de líneas, etc.

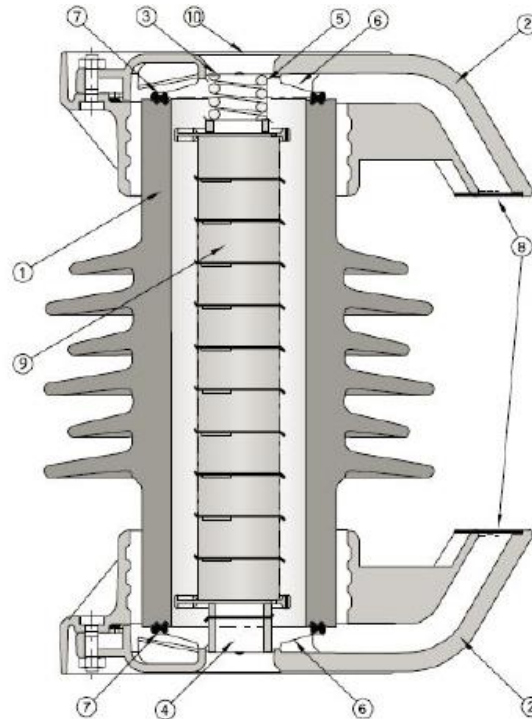
- Tensión residual o de descarga: Es la tensión que aparece en los terminales del equipo al pasar por él una corriente de descarga, esta depende de la magnitud y la forma de onda de dicha corriente.
- Capacidad de energía: Es la cantidad de energía que el equipo puede resistir sin sufrir daños cuando ocurra una sobretensión.
- Energía de impulso único: Hace referencia a la energía máxima admisible a la que puede ser sometido un equipo en un solo impulso de duración de 4 ms o más, manteniéndose la estabilidad térmica con la sobretensión temporal y V_c especificadas.
- Capacidad de cortocircuito: Se refiere a la capacidad de un DPS o descargador de conducir la corriente de cortocircuito de servicio resultante sin sufrir alguna ruptura violenta la cual podría causar daños en los equipos cercanos o al personal operativo.
- Resistencia del aislamiento externo: es el valor máximo de la tensión aplicada la cual no genera un arco en el equipo.

Hasta mediados de la década de los 80, los dispositivos de protección contra sobretensiones eran exclusivamente utilizados en las redes de media tensión, estos se componían básicamente de un conjunto de resistores de Carburo de Silicio (SiC) conectados en serie con un entrehierro entre placas, durante el aumento de la sobretensión surgía un cortocircuito a tierra al actuar el entrehierro del dispositivo [12].

En los últimos años se presentaron dos desarrollos importantes en la tecnología utilizada por los dispositivos de protección contra sobretensiones en lo relacionado a los resistores de Carburo de Silicio y el entrehierro de placas ya que estos fueron

reemplazados por resistores de Óxidos Metálicos sin entrehierros. Por otro lado los materiales de recubrimiento o encapsulado del dispositivo típicamente de porcelana y vidrio fueron reemplazados por un nuevo recubrimiento fabricado con polímeros, es decir, materiales sintéticos. [12]

Figura 2 Características generales de diseño de un DPS.



1	Aislador de porcelana	6	Tapa sellante
2	Conducto de escape	7	Anillo sellante
3	Resorte	8	Placas de características
4	Bolsa de desecante	9	Bloques de ZnO
5	Chapa de cobre	10	Tapa de brida

Fuente: ALDANA C, Adolfo, “Software para la selección de descargadores de óxido de metal en sistemas de potencia”, Universidad de Carabobo, 2007.

En esta monografía se trabajará con dispositivos de protección de sobretensiones con tecnología de Óxidos metálicos (MO-resistors) como el mostrado de forma general en la figura 2.

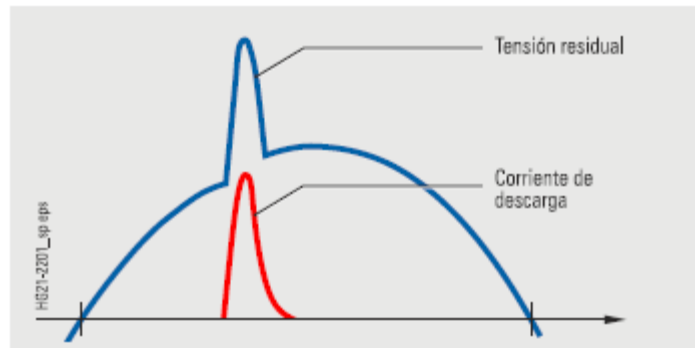
5.2 FUNCIONAMIENTO

En términos generales, el dispositivo de protección contra sobretensiones en condiciones normales debe tener el comportamiento de un aislador, al aplicarle una sobretensión este debe comportarse como un conductor permitiendo el flujo de corriente de descarga. De la misma forma al desaparecer la sobretensión, debe convertirse nuevamente en un aislador interrumpiendo la corriente que ha circulado a través de él.

El comportamiento de las resistencias de óxidos metálicos es altamente no lineal, es decir que la relación de corriente- tensión es muy curvada, esto quiere decir que por debajo de un cierto valor de tensión existirá el flujo de una mínima corriente de fuga. Estos equipos están diseñados para que en servicio normal de operación bajo tensión de funcionamiento continuo solo fluya la corriente mínima de fuga [15].

Las resistencias de óxido metálico se vuelven muy conductivas al presentarse sobretensiones ya sea tipo atmosférico o por maniobra, de este modo la corriente de impulso o de descarga puede drenarse a tierra reduciendo así la sobretensión al valor de la caída de tensión en el equipo o tensión residual (ver figura 3). Durante este proceso, las corrientes pueden alcanzar para sobretensiones tipo maniobra hasta 1 kA y hasta 20 kA para sobretensiones tipo atmosférico [15].

Figura 3 Funcionamiento de un DPS de Óxidos metálicos.



Fuente: SIEMENS, “catalogue surge arresters limiters 3ee 3ef” es [en línea] disponible en: <https://es.scribd.com/document/299077182/Catalogue-Surge-Arresters-Limiters-3ee-3ef-En>

En caso tal que las sobretensiones alcancen valores no admisibles, los dispositivos de protección contra sobretensiones deben estar diseñados para descargar estas sobretensiones a valores aceptables tanto entre fases como entre fases y tierra [15].

5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)

Según su ubicación, características y capacidades de energía existen varios tipos de DPS [12] los cuales se describirán a continuación:

- **DPS de distribución:** Como su nombre lo indica son diseñados para proteger sistemas de distribución, cuentan con las mayores tensiones de descarga y usualmente se dividen entre Normal Duty (trabajo normal) y Heavy Duty (trabajo pesado).

- DPS clase Intermedia: Este tipo presenta características mejoradas en la protección, manejan mayores cantidades de energía sin afectar su durabilidad, son en gran medida más costosos que los de distribución,
- DPS clase Subestación: Este tipo suministra los mayores índices de protección, poseen las mayores capacidades de absorción de energía y mayor durabilidad, protegen los equipos de las subestaciones lo cual representa un trabajo de gran importancia y criticidad, estos son los más costosos y robustos.
- DPS clase línea: Estos descargadores son similares en características eléctricas a los anteriores (tipo subestación), pero con diferencias en los materiales de construcción y robustez, son diseñados para ofrecer altos niveles de protección a líneas de transmisión de sobretensiones y principalmente de los flashovers o arcos inversos. Estos dispositivos son más livianos para facilitar su instalación en las líneas eléctricas.
- DPS especiales: Estos son diseñados y fabricados para funciones muy específicas, pueden tener características combinadas de los tipos anteriores. Estos se crean a partir de las necesidades de una aplicación particular por lo que su adquisición no es fácil y sus costos son elevados.

6. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV

En este capítulo se describirá el procedimiento general para la selección de los dispositivos en los sistemas de distribución. Generalmente los sistemas de distribución no están protegidos contra el impacto directo de descargas eléctricas a diferencia de los sistemas de transmisión que cuentan con hilos de guarda los cuales protegen sus líneas, por esta razón, los sistemas de distribución son más susceptibles a impactos de descargas eléctricas. [16]

Las sobretensiones transitorias producto de las descargas eléctricas son las de mayor preocupación en relación a las sobretensiones de maniobra ya que estas representan un mayor peligro para el sistema. Por lo tanto la coordinación de aislamiento en los sistemas de distribución se basa principalmente en las descargas de tipo atmosférico. [16]

De forma general, el procedimiento descrito por la norma (IEEE 62.22) establece las siguientes etapas para la correcta selección de los dispositivos de protección contra sobretensiones en sistemas de distribución.

6.1 DETERMINACIÓN DEL MCOV

Se debe determinar el MCOV del descargador apropiado a utilizar en todos los lugares similares del sistema a proteger. Estos dispositivos están constantemente expuestos a las tensiones de fase del sistema ya que son instalados para despejar sobretensiones a tierra. Por lo tanto el MCOV, el cual ya se definió en el capítulo 4, debe ser como mínimo igual a esta tensión de fase del sistema en ese punto del

sistema, es decir la tensión de fase en el punto de instalación del descargador se toma como referencia para determinar el MCOV. Se debe tener en cuenta para el cálculo del MCOV los índices de regulación establecidos para las empresas de distribución que para el caso colombiano es de 5% según la CREG [17].

A manera de ejemplo para un sistema en estrella a 34,5 kV de tensión nominal, a aplicar el factor de regulación de 5 % y convertirla en tensión de fase, queda 20,9 kV, el cual da la referencia del valor mínimo del MCOV del dispositivo a utilizar. En el capítulo 7 se ampliará más detalladamente con un ejemplo práctico la selección de estos parámetros.

6.2 DETERMINACIÓN DEL TOV

Un dispositivo de protección contra sobretensiones es capaz de trabajar con un valor de tensión por encima de su MCOV por un periodo limitado de tiempo, este nivel de sobretensión que el dispositivo puede soportar depende del tiempo al que sea expuesto.

Un correcto diseño debe buscar que el nivel de TOV del dispositivo de protección contra sobretensiones no sea superado ya sea en magnitud ni en duración del TOV máximo presente en el sistema. Pero resulta que en un mismo sistema de distribución debido a su extensión, se pueden presentar diferentes valores de TOV tanto en magnitud como en duración para diferentes puntos en este, por lo que hacer una comparación directa del TOV del sistema con el TOV del dispositivo de protección resulta complicado.

Las sobretensiones temporales (TOV) más comunes son causadas por fallas monofásicas a tierra. La amplitud de estas se puede obtener en caso de desconocimiento como, tensión máxima de la red / $\sqrt{3}$ multiplicado por el factor de aterrizamiento [15] de la figura 4.

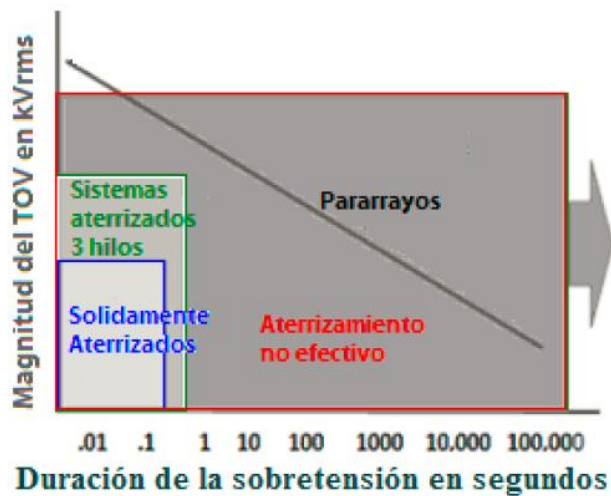
Figura 4 Factor de aterrizamiento según configuración del sistema.

Red con neutro puesto a tierra rígidamente = 1,0
Red con neutro puesto a tierra a través de impedancia = 1,4
Red con neutro aislado= 1,73
Red con neutro a tierra a través de resonancia= 1,73

Fuente: Autores

Una vez determinado el TOV máximo del sistema, se debe comparar con la curva del TOV del dispositivo de protección contra sobretensiones a escoger y se debe garantizar que el TOV del sistema no sobrepase al del dispositivo.

Figura 5 Duración de la sobretensión en segundos.



Fuente: VALVERDE MUÑOZ, A. "Determinación de la localización y la selección óptima de pararrayos para un sistema de distribución eléctrica de media tensión.", Universidad de Costa Rica, Julio, 2010.

Normalmente en los sistemas de distribución se desconoce el tiempo de duración de las fallas, por tal motivo para sistemas de distribución con un aterrizamiento no efectivo, se utilizará la tensión de línea como MCOV. La mayoría de fabricantes presentan tablas con el MCOV recomendado según la configuración del sistema.

6.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE DESCARGADOR POR CAPACIDAD DE ENERGÍA (NORMAL DUTY/HEAVY DUTY)

Una vez establecidos los niveles de tensiones adecuados para el dispositivo de protección contra sobretensiones, se debe determinar el tipo de dispositivo a utilizar en relación a su capacidad de energía, ya sea de uso pesado (Heavy duty) o de uso normal (Normal Duty) según la clasificación de la norma IEEE C62.22 utilizada para la selección de los equipos de protección contra sobretensiones. Esta selección como específica la norma, se realiza según el criterio de quien realiza la selección, sin embargo existen algunas consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el dispositivo tal como la cantidad de energía esperada que el dispositivo debe soportar. Algunas de estas consideraciones son por ejemplo, la ubicación en lugares con altos índices de nivel ceraúnico o donde se presenten repentinos aumentos de energía por maniobras de cargas capacitivas, otro aspecto a considerar es la distancia entre descargadores ya que no toda la energía se descarga por un único dispositivo.

6.4 VERIFICACIÓN DE LOS MÁRGENES DE PROTECCIÓN

Esta etapa es la referente con la coordinación de aislamiento del sistema en lo relacionado a la verificación de los márgenes de protección. Para este fin se deben conocer los valores del CWW y BIL del sistema, como también el FOW y el LPL del dispositivo (ver figura 5), en donde:

CWW: Nivel de protección de onda cortada del equipo a proteger.

FOW: Nivel de protección de frente de onda del dispositivo de protección contra sobretensiones.

LPL: Nivel de protección contra descargas atmosféricas

BIL: Nivel básico de aislamiento al equipo a proteger.

Para el CWW la norma IEEE 62.22 permite asumirlo, en caso de que no se conozca, como 1,15 veces el valor del BIL para aislamiento en aceite o sólido, para aislamiento seco recomienda tomarlo igual al BIL.

Para el caso del FOW y LPL se deben revisar las hojas de datos de los fabricantes, donde en otras palabras, el LPL corresponde a la tensión de descarga del descargador para una corriente de descarga que se considerará de 10 kA (8/20 μ s) en condiciones donde no se presente alta densidad de descarga, de lo contrario se utilizara 20 kA. El FOW se puede definir también como la tensión de descarga en el descargador con una corriente de impulso con tiempo de subida de 0,5 μ s. a continuación se muestran algunos valores típicos de estos parámetros en p.u del MCOV.

Tabla 1. Niveles de protección típicos según norma IEEE C62.22.

Operación en estado estable				Niveles de Protección (P.U MCOV)		
Tensión L-L Máxima kVrms	Tensión L-G Máxima kVrms	MCOV	Tensión Nominal	FOW 0,5 μ s, 10 kA	8/20 μ s	Descarga de switcheo
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	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

Fuente: IEEE, Std C62.22, "Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", 2009.

La norma IEEE 62.22 presenta entonces dos niveles de protección, margen de protección de frente de onda (MPL1) y margen de protección de onda completa (MPL2) los cuales se establece que deben ser mayores o superiores al 20% (ver ecuaciones 2 y 3). Un procedimiento más estricto y conservador incluye un tercer margen de protección que involucra la tensión de descarga debido a maniobras en el sistema conocido como Switching protective level, este corresponde a la tensión de descarga debido a una corriente cuyo tiempo de subida oscila entre 45 y 60 μ s, este margen de protección (MPL2) también debe ser superior al 20%. A continuación se presentan expresiones para el cálculo de estos márgenes:

$$MPL1 = \left[\frac{CWW}{FOW} - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

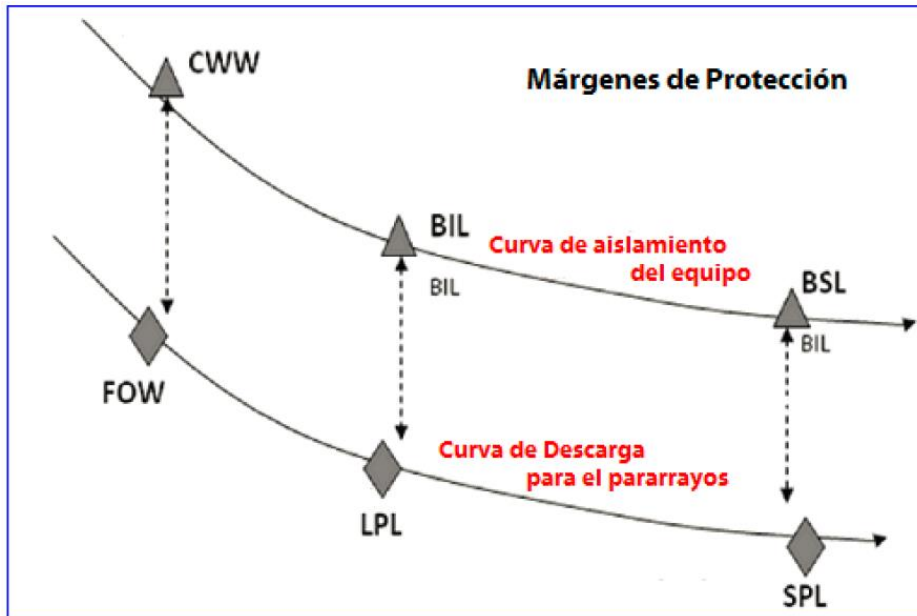
$$MPL2 = \left[\frac{BIL}{LPL} - 1 \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$MPL3 = \left[\frac{BSL}{SPL} - 1 \right] \times 100\% \quad (4)$$

Donde para el tercer margen de protección, BSL corresponde a Basic Switching Level y SPL a Switching Protective Level, ambos parámetros relacionados a respuestas de tensión debido a maniobras en el sistema.

A continuación se representan gráficamente los márgenes de protección.

Figura 6 Márgenes de protección.



Fuente: IEEE, Std C62.22, "Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", 2009.

En resumen, se presenta a continuación el procedimiento general para la correcta selección de los dispositivos de protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución, comenzando con la determinación del MCOV mínimo del dispositivo con base en la tensión nominal del sistema y la regulación de tensión por parte del distribuidor. Posteriormente se compara la curva del TOV del dispositivo de protección con las magnitudes y duraciones de las posibles sobretensiones en el sistema dependiendo de la configuración de este y su aterrizamiento. Luego se determina según la cantidad de energía esperada si el dispositivo de protección será Normal Duty o Heavy Duty, esto depende, entre otros, de la densidad de descargas atmosféricas en la zona de instalación. Por último se verifica el cumplimiento de los márgenes de protección entre los parámetros de la curva de aislamiento del sistema y los parámetros del dispositivo de protección contra sobretensiones que deben ser mayores al 20 % según lo estipula la norma.

A continuación se pueden visualizar las etapas generales en la correcta selección de dispositivos de protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución.

Criterios de selección de dispositivos de protección contra sobretensiones basado en la norma IEEE C62.22:

- ✓ Determinación del MCOV mínimo
 - Tensión máxima de operación de fase del sistema.
 - Considerar regulación de tensión.

- ✓ Verificación del TOV del sistema y el dispositivo de protección (DPS)
 - Magnitud y duración de las sobretensiones en condiciones de falla.
 - Tipo de sistema y puesta a tierra de este.

- ✓ Determinación del tipo de DPS (Normal Duty/Heavy Duty)
 - Cantidad de energía esperada que el DPS pueda soportar.
 - Distancia entre dispositivos.

- ✓ Verificación de los márgenes de protección
 - CWW vs FOW.
 - BIL vs LPL.
 - BSL vs SPL.

7. APLICACIÓN PRÁCTICA DE SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN HASTA 57,5 kV

En esta sección se presenta un ejemplo de selección de un dispositivo de protección contra sobretensiones tipo línea siguiendo los criterios plasmados en el capítulo 5 de este trabajo los cuales están basados en el estándar C62.22 de la norma IEEE.

Para el ejemplo se considerará un sistema de distribución con las siguientes características:

Sistema de distribución de 3 hilos rígidamente aterrizado.

Tensión nominal: 34,5 kV

Regulación de tensión: 5%

Sobretensión de maniobra en p.u: 3,5 p.u

Tiempo de despeje de fallas: 1 s

BIL del equipo a proteger: 170 kV

Nivel Ceraunico: 98.

Corriente por descarga atmosférica: 10 kA

Corriente por descarga de maniobra: 0,5 kA

Para este ejemplo, se utiliza dispositivos de protección marca ABB de la familia POLIM-D, el cual está diseñado específicamente para transformadores y equipos en media tensión.

7.1 DETERMINACIÓN DEL MCOV DEL DESCARGADOR

Inicialmente se debe calcular la tensión máxima del sistema con base en la regulación la cual para este ejemplo es del 5%, por lo tanto.

$$T_{max} = 34,5 \text{ kV} \times 1,05 \quad (5)$$

$$T_{max} = 36,225 \text{ kV} \quad (6)$$

Una vez calculada la tensión máxima esperada en el sistema por regulación, se calcula la tensión de fase máxima esperada, la cual corresponderá al valor mínimo del MCOV del dispositivo de protección a seleccionar ya que este estará conectado entre fase y tierra y será esta tensión de fase, la tensión máxima que el descargador debe soportar.

$$MCOV_{min} = \frac{36,225 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

$$MCOV_{min} = 20,914 \text{ kV} \quad (8)$$

Al tener el valor mínimo de MCOV para el dispositivo a seleccionar, se procede a buscar en las tablas del fabricante deseado los equipos que posean MCOV mayores al calculado.

Tabla 2. Tabla de datos para descargadores POLIM-D de ABB¹.

U_c Continuous operating voltage	U_r Rated voltage	Residual voltage U_{res} in kV peak at specified impulse current									
		wave 1/... μ s		wave 8/20 μ s				wave 30/60 μ s			
		5 kA peak	10 kA peak	1 kA peak	2.5 kA peak	5 kA peak	10 kA peak	20 kA peak	125 A peak	250 A peak	500 A peak
4	5.0	14.5	16.0	11.7	12.4	13.1	14.0	15.9	10.4	10.8	11.1
6	7.5	21.7	24.0	17.5	18.5	19.6	21.0	23.9	15.6	16.1	16.6
8	10.0	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	28.0	31.8	20.8	21.5	22.2
10	12.5	36.1	39.9	29.1	30.8	32.6	35.0	39.8	25.9	26.8	27.7
12	15.0	43.3	47.9	34.9	37.0	39.1	42.0	47.7	31.1	32.2	33.2
14	17.5	50.5	55.9	40.7	43.2	45.6	49.0	55.7	36.3	37.5	38.8
16	20.0	57.7	63.9	46.5	49.3	52.1	56.0	63.6	41.5	42.9	44.3
18	22.5	64.9	71.9	52.3	55.5	58.6	63.0	71.6	46.7	48.2	49.8
20	25.0	72.1	79.8	58.1	61.6	65.1	70.0	79.5	51.8	53.6	55.3
22	27.5	79.4	87.8	64.0	67.8	71.7	77.0	87.4	57.0	59.0	60.9
24	30.0	86.6	95.8	69.8	74.0	78.2	84.0	95.4	62.2	64.3	66.4
26	32.5	93.8	103.8	75.6	80.1	84.7	91.0	103.3	67.4	69.7	71.9
28	35.0	101.0	111.8	81.4	86.3	91.2	98.0	111.3	72.6	75.0	77.5
30	37.5	108.2	119.7	87.2	92.4	97.7	105.0	119.2	77.7	80.4	83.0
32	40.0	115.4	127.7	93.0	98.6	104.2	112.0	127.2	82.9	85.7	88.5
34	42.5	122.6	135.7	98.8	104.8	110.7	119.0	135.1	88.1	91.1	94.1
36	45.0	129.8	143.7	104.6	110.9	117.2	126.0	143.1	93.3	96.4	99.6

Fuente: ABB Applications Guidelines

Para este caso se selecciona el valor de MCOV inmediatamente mayor al calculado, sin embargo se puede seleccionar un valor mayor a este dependiendo del criterio del diseñador y el sobredimensionamiento que este pretenda manejar. Este valor seleccionado inicial puede variar al calcular los márgenes de protección descritos anteriormente los cuales pueden obligar a seleccionar un valor mayor con el fin que los márgenes cumplan el criterio del 20 % establecido en la norma IEEE C62.22.

$$MCOV = 22 \text{ kV} \quad (9)$$

¹ U_r es el término usado en la normatividad Europea (IEC), que se puede decir que es lo igual que V_r en el sistema Americano

7.2 DETERMINACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL TOV

En este punto se debe determinar el TOV del sistema para luego compararlo con el del dispositivo de protección.

Como se mencionó anteriormente, las sobretensiones temporales (TOV) más comunes son las causadas por las fallas monofásicas a tierra, en caso que no se cuente con información del sistema acerca de estas sobretensiones, el TOV se puede calcular como el producto de la relación entre la tensión máxima del sistema y raíz de 3 por el factor de aterrizamiento [15] (Ver figura 4).

Para este caso el factor de aterrizamiento es de 1 el cual corresponde a un sistema sólidamente aterrizado, por lo tanto:

$$TOVsistema = \frac{36,225 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \times 1 \quad (10)$$

$$TOVsistema = 20,914 \text{ kV} \quad (11)$$

Para el dispositivo de protección seleccionado de ABB (POLIM-D), se verificará el TOV, este dato puede ser dado por los fabricantes de forma gráfica o en forma de ecuación como en este caso, en el cual para el sistema de ejemplo el tiempo de despeje de falla es de 1 s, por lo tanto se procede a calcular el TOV del dispositivo para $t = 1$ s según la ecuación del fabricante mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 3. TOV de descargadores POLIM-D de ABB.

Power frequency voltage versus time characteristic (TOV) with prior energy input	
$t = 1 \text{ s}$	$U_{TOV} = 1.325 \times U_c$
$t = 3 \text{ s}$	$U_{TOV} = 1.300 \times U_c$
$t = 10 \text{ s}$	$U_{TOV} = 1.275 \times U_c$

Fuente: ABB Applications Guidelines

El parámetro U_c corresponde al MCOV ya calculado y que corresponde a 22 kV, esta nomenclatura depende de la norma utilizada, para este caso, ABB utiliza la norma europea. Por lo tanto el MCOV del dispositivo se calcula como:

$$TOV_{descargador} = 1,325 \times 22 \text{ kV} \quad (12)$$

$$TOV_{descargador} = 29,15 \text{ kV} \quad (13)$$

Se debe garantizar que el TOV del descargador debe ser mayor al TOV del sistema, en este caso se puede observar que el TOV del descargador no supera el TOV del sistema por lo tanto es posible afirmar que el equipo seleccionado hasta este punto es adecuado para la protección del sistema.

$$TOV_{sistema} = 20,914 \text{ kV} < TOV_{descargador} = 29,15 \text{ kV} \quad (14)$$

7.3 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE DESCARGADOR (NORMAL DUTY/ HEAVY DUTY)

En esta etapa se debe determinar si el dispositivo a utilizar será Normal Duty o Heavy Duty, la norma (IEEE C62.11) en el cual está basado este procedimiento de selección de dispositivos de protección contra sobretensiones, deja a criterio del diseñador el tipo de descargador a utilizar, sin embargo como se mencionó anteriormente existen algunas consideraciones según la cantidad de energía esperada que deba soportar el descargador.


Para el ejemplo de este capítulo, usarán los parámetros de coordinación de protecciones correspondientes a la corriente de descarga atmosférica de 10 kA; al utilizar este parámetro, se garantiza la protección para la corriente de descarga por maniobra ya que esta es menor.

Al revisar la Tabla 4. Descargador tipo Heavy duty POLIM-D de ABB, de este capítulo, se puede observar que el tipo Heavy Duty está probado para corrientes de descarga de 10 kA, por lo tanto cumple con el criterio para estas corrientes, sin embargo los descargadores tipo Normal Duty podrían cumplir también con el criterio de la corriente de descarga, evidenciando que no es determinante este parámetro para la selección del tipo de descargador. Como se mencionó anteriormente, el criterio de selección del tipo de descargador queda a consideración del diseñador según lo sugiere la norma IEC 62.22 dependiendo básicamente de la cantidad de energía esperada que el descargador deba soportar. Para este ejemplo, se selecciona descargador tipo Heavy Duty ya que se supone en el ejemplo un sistema en una ubicación geográfica con alto nivel cerámico.

TIPO DE DESCARGADOR = HEAVY DUTY para corrientes de descargas de 10kA

Tabla 4. Descargador tipo Heavy duty POLIM-D de ABB.

Surge arrester
POLIM-D



Technical data

Surge arrester with metal oxide resistors without spark gaps (MO surge arrester), direct molded in silicone housing, grey color, designed and tested according to IEC 60099-4.

Nominal discharge current I_n 8/20 μ s	10 kA peak
Line discharge class (LD)	1
High current impulse I_{hc} 4/10 μ s	100 kA peak
Long duration current impulse	250 A / 2000 μ s
Short circuit rating I_s 50 Hz	20 kA rms for 0.2 s
Classification according to	
IEEE (ANSI) C62.11	distribution heavy duty

The thermal stability of the MO surge arrester is proved in the operating duty test with a high current impulse $I_{hc} = 100$ kA, which gives an energy input of 3.6 kJ/kV (U_c).

Fuente: ABB Applications Guidelines

7.4 VERIFICACIÓN DE LOS MÁRGENES DE PROTECCIÓN

Hasta este momento se ha seleccionado para el ejemplo propuesto, el descargador POLIM-D del fabricante ABB con MCOV de 22 kV y tipo heavy Duty, se comprobó que el TOV de este equipo para tiempos de despeje de fallas de 1 segundo no es mayor al TOV del sistema por lo tanto garantiza su correcto funcionamiento para los niveles de tensión máximos que se puedan presentar.

Ahora se debe garantizar que este descargador cumpla con los márgenes de protección establecidos en la norma IEEE C62.22 y que fueron descritos en el capítulo 5.

Se tiene entonces que calcular o determinar los valores CWW, FOW, LPL, BIL, BSL y SPL.

Como se mencionó anteriormente, la norma permite asumir del valor de CWW como 1,15 veces el valor del BIL el cual es un dato conocido. Para este ejemplo se desconoce el valor CWW por lo tanto se asumirá como lo especifica la norma, se tiene entonces:

$$CWW = 1,15 \times BIL \quad (15)$$

$$CWW = 1,15 \times 170 \text{ kV} \quad (16)$$

$$CWW = 195,5 \text{ kV} \quad (17)$$

Para la selección del LPL, se debe recurrir a la hoja de datos del fabricante, donde este parámetro corresponde a la tensión de descarga del descargador para una corriente de descarga que generalmente se considerará 10 kA (8/20µs) a no ser que

se presenten condiciones de alta densidad de descarga, en este caso se utilizará 20 kA. Tomando entonces de la tabla del fabricante el valor para LPL,

Tabla 5. Tabla de datos POLIM-D de ABB.

U_c Continuous operating voltage	U_r Rated voltage	Residual voltage U_{res} in kV peak at specified impulse current									
		wave 1/... μ s		wave 8/20 μ s				wave 30/60 μ s			
kV rms	kV rms	5 kA peak	10 kA peak	1 kA peak	2.5 kA peak	5 kA peak	10 kA peak	20 kA peak	125 A peak	250 A peak	500 A peak
4	5.0	14.5	16.0	11.7	12.4	13.1	14.0	15.9	10.4	10.8	11.1
6	7.5	21.7	24.0	17.5	18.5	19.6	21.0	23.9	15.6	16.1	16.6
8	10.0	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	28.0	31.8	20.8	21.5	22.2
10	12.5	36.1	39.9	29.1	30.8	32.6	35.0	39.8	25.9	26.8	27.7
12	15.0	43.3	47.9	34.9	37.0	39.1	42.0	47.7	31.1	32.2	33.2
14	17.5	50.5	55.9	40.7	43.2	45.6	49.0	55.7	36.3	37.5	38.8
16	20.0	57.7	63.9	46.5	49.3	52.1	56.0	63.6	41.5	42.9	44.3
18	22.5	64.9	71.9	52.3	55.5	58.6	63.0	71.6	46.7	48.2	49.8
20	25.0	72.1	79.8	58.1	61.6	65.1	70.0	79.5	51.8	53.6	55.3
22	27.5	79.4	87.8	64.0	67.8	71.7	77.0	87.4	57.0	59.0	60.9
24	30.0	86.6	95.8	69.8	74.0	78.2	84.0	95.4	62.2	64.3	66.4
26	32.5	93.8	103.8	75.6	80.1	84.7	91.0	103.3	67.4	69.7	71.9
28	35.0	101.0	111.8	81.4	86.3	91.2	98.0	111.3	72.6	75.0	77.5
30	37.5	108.2	119.7	87.2	92.4	97.7	105.0	119.2	77.7	80.4	83.0
32	40.0	115.4	127.7	93.0	98.6	104.2	112.0	127.2	82.9	85.7	88.5
34	42.5	122.6	135.7	98.8	104.8	110.7	119.0	135.1	88.1	91.1	94.1
36	45.0	129.8	143.7	104.6	110.9	117.2	126.0	143.1	93.3	96.4	99.6

Fuente: ABB Applications Guidelines

$$LPL = 77 \text{ kV} \quad (18)$$

El FOW como se mencionó anteriormente, es la tensión de descarga en el descargador con una corriente de impulso cuyo tiempo de subida es 0,5 μ s, algunos valores típicos para estos parámetros en p.u de MCOV los estipula la norma en la tabla 6. Para el ejemplo desarrollado se recuerda que el MVCO seleccionado para el dispositivo es de 22 kV.

Tabla 6. Valor de FOW según norma IEEE C62.22.

Operación en estado estable				Niveles de Protección (P.U MCOV)		
Tensión L-L Máxima kVrms	Tensión L-G Máxima kVrms	MCOV	Tensión Nominal	FOW 0,5 μ s, 10 kA	8/20 μ s	Descarga de switcheo
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	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

Fuente: IEEE, Std C62.22, “Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems”, 2009.

Para este caso, el valor típico de FOW está entre 2,43 p.u y 2,48 del MCOV que es de 22 kV. Se seleccionará un valor inicial de FOW de 2,45 p.u del MCOV, por lo tanto:

$$FOW = 22 \text{ kV} \times 2,45 \quad (19)$$

$$FOW = 53,9 \text{ kV} \quad (20)$$

Para la determinación del BIL y BSL se tiene:

$$BIL = 170 \text{ kV} \quad (21)$$

Para el valor del BSL se toma el dato de entrada en cual especifica que la sobretensión debido a maniobras es 3,5 p.u. se toma la tensión de fase, por lo tanto:

$$BSL = 20,914 \text{ kV} \times 3,5 \quad (22)$$

$$BSL = 73,199 \text{ kV} \quad (23)$$

El valor SPL se extrae de las tablas del fabricante.

Tabla 7. Tabla de datos POLIM-D de ABB.

U_c Continuous operating voltage	U_r Rated voltage	Residual voltage U_{res} in kV peak at specified impulse current									
		wave 1/... μ s		wave 8/20 μ s					wave 30/60 μ s		
kV	kV	5 kA	10 kA	1 kA	2.5 kA	5 kA	10 kA	20 kA	125 A	250 A	500 A
rms	rms	peak	peak	peak	peak	peak	peak	peak	peak	peak	peak
4	5.0	14.5	16.0	11.7	12.4	13.1	14.0	15.9	10.4	10.8	11.1
6	7.5	21.7	24.0	17.5	18.5	19.6	21.0	23.9	15.6	16.1	16.6
8	10.0	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	28.0	31.8	20.8	21.5	22.2
10	12.5	36.1	39.9	29.1	30.8	32.6	35.0	39.8	25.9	26.8	27.7
12	15.0	43.3	47.9	34.9	37.0	39.1	42.0	47.7	31.1	32.2	33.2
14	17.5	50.5	55.9	40.7	43.2	45.6	49.0	55.7	36.3	37.5	38.8
16	20.0	57.7	63.9	46.5	49.3	52.1	56.0	63.6	41.5	42.9	44.3
18	22.5	64.9	71.9	52.3	55.5	58.6	63.0	71.6	46.7	48.2	49.8
20	25.0	72.1	79.8	58.1	61.6	65.1	70.0	79.5	51.8	53.6	55.3
22	27.5	79.4	87.8	64.0	67.8	71.7	77.0	87.4	57.0	59.0	60.9
24	30.0	86.6	95.8	69.8	74.0	78.2	84.0	95.4	62.2	64.3	66.4
26	32.5	93.8	103.8	75.6	80.1	84.7	91.0	103.3	67.4	69.7	71.9
28	35.0	101.0	111.8	81.4	86.3	91.2	98.0	111.3	72.6	75.0	77.5
30	37.5	108.2	119.7	87.2	92.4	97.7	105.0	119.2	77.7	80.4	83.0
32	40.0	115.4	127.7	93.0	98.6	104.2	112.0	127.2	82.9	85.7	88.5
34	42.5	122.6	135.7	98.8	104.8	110.7	119.0	135.1	88.1	91.1	94.1
36	45.0	129.8	143.7	104.6	110.9	117.2	126.0	143.1	93.3	96.4	99.6

Fuente: ABB Applications Guidelines

$$SPL = 59 \text{ kV} \quad (24)$$

Una vez obtenidos todos los parámetros de los márgenes de protección, se procede entonces al cálculo de estos. Se reitera que para que el descargador pueda soportar las condiciones de trabajo, estos márgenes deben ser superiores al 20% según la norma.

Primer margen de protección de frente de onda:

$$MPL1 = \left[\frac{CWW}{FOW} - 1 \right] \times 100\% \quad (25)$$

$$MPL1 = \left[\frac{172,5}{53,9} - 1 \right] \times 100\% \quad (26)$$

$$MPL1 = 220,03\% \quad (27)$$

Segundo margen de protección de onda completa (descargas atmosféricas):

$$MPL2 = \left[\frac{BIL}{LPL} - 1 \right] \times 100\% \quad (25)$$

$$MPL2 = \left[\frac{170}{77} - 1 \right] \times 100\% \quad (26)$$

$$MPL2 = 120,77\% \quad (27)$$

Tercer margen de protección de sobretensiones de maniobra:

$$MPL3 = \left[\frac{BSL}{SPL} - 1 \right] \times 100\% \quad (28)$$

$$MPL3 = \left[\frac{73,199}{59} - 1 \right] \times 100\% \quad (29)$$

$$MPL3 = 24,06\% \quad (30)$$

En definitiva, los márgenes de protección fueron:

$$MPL1 = 220,03\% \quad (28)$$

$$MPL2 = 94,8\% \quad (29)$$

$$MPL3 = 24,06\% \quad (30)$$

Como es evidente, todos los márgenes sobrepasaron el 20% sugerido por la norma para garantizar que el equipo seleccionado opere de manera correcta y soporte las sobretensiones posibles en el sistema para diferentes tipos de impulso.

Se tiene entonces para el dispositivo de protección contra sobretensiones las siguientes características:

Marca: ABB

Familia: POLIM-D

Tipo: Heavy Duty (Uso Pesado)

MCOV: 22 kV

TOV: 29,15 kV (Mayor al TOV del sistema)

MPL1: 220,03% (mayor a 20%)

MPL2: 94,8% (mayor a 20%)

MPL3: 24,06% (mayor a 20%)

Se puede concluir entonces que el dispositivo de protección contra sobretensiones seleccionado es adecuado y garantiza una correcta protección para las características del sistema de distribución tomado como ejemplo.

8. CONCLUSIONES

- Las sobretensiones son incrementos de los valores normales de operación en los sistemas eléctricos tales que pueden poner en riesgo la integridad de los equipos o representar directamente daños y averías en estos, poniendo en riesgo la continuidad de la operación del sistema eléctrico.
- Las sobretensiones pueden originarse por diferentes causas, ya sea por factores externos al sistema eléctrico tal como las descargas atmosféricas que puedan impactar en los elementos del sistema como también por condiciones propias de operación del sistema tal como las maniobras de apertura y cierre de equipos.
- El objetivo de los dispositivos de protección contra sobretensiones es proteger el sistema eléctrico contra las sobretensiones, despejándolas a tierra y evitando que estas lleguen a los componentes del sistema.
- El comportamiento de un dispositivo de protección contra sobretensiones debe ser de circuito abierto ante condiciones normales de operación del sistema y de cortocircuito al presentarse condiciones anormales en las magnitudes de tensión del sistema eléctrico específicamente en los bornes del dispositivo.
- Hasta la década de los 80 los dispositivos de protección contra sobretensiones eran construidos con resistores de Carburo de Silicio (SiC) conectados en serie separados por un entrehierro, hoy en día esos resistores se reemplazaron por resistores de Óxidos Metálicos los cuales por sus características no necesitan entrehierro. Un descargador de Óxidos Metálicos reduce más rápido la sobretensión que los descargadores de Carburos de Silicio.
- Una correcta protección del sistema eléctrico contra las sobretensiones depende directamente de una correcta selección de dispositivo de protección contra

sobretensiones según las características eléctricas del componente y punto del sistema a proteger.

- Se debe garantizar, según lo establecido por la norma IEEE C62.22 que los márgenes de protección sea superiores al veinte por ciento para asegurar que el dispositivo de protección contra sobretensiones opere de manera correcta y pueda soportar lo incrementos de tensión esperados según el estudio de la coordinación de aislamiento.
- El estándar utilizado para determinar los criterios de una correcta selección de equipos contra sobretensiones para los sistemas de distribución fue el de la IEEE C62.22.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GONZÁLEZ ARIAS, A. “Mejoramiento de confiabilidad en sistemas de distribución mediante reconfiguración de circuitos primarios”, Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2007, P 8.

[2] CREG., Resolución 037 25 de Junio de 2004, P4. Diciembre 23, 2015.

[3] RAMÍREZ CASTAÑO, S. “Protección de sistemas eléctricos”, Primera edición, Universidad Nacional de Manizales, 2003, P 293.

[4] SECRETARIA DE ENERGÍA Estrategia nacional de energía, México, P 9.

[5] Ficha técnica aplicaciones tecnológicas: ¿Qué son y qué daños producen las sobretensiones? http://at3w.com/upload/ficheros/que_son_y_danos_de_las_sobretensiones.pdf, P 2.

[6] RAMÍREZ CASTAÑO Samuel, Redes de distribución de energía, Universidad Nacional de Colombia, tercera edición, 2004

[7] CAJAMARCA Álvaro, Técnicas para la generación de energía [en línea] disponible en: <http://en.calameo.com/read/004080166167df51b614e>

[8] JIMÉNEZ MESA Obed Renato Líneas de trasmisión y distribución de energía eléctrica, Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 2006.

[9] MAR PÉREZ José Guillermo Descripción y función del equipo de una subestación eléctrica, Universidad Veracruzana, 2011.

[10] Resolución CREG 097 de 2008

[11] CARRILLO CAICEDO, G. "Protecciones eléctricas", Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1985.

[12] ALDANA C, Adolfo, "Software para la selección de descargadores de óxido de metal en sistemas de potencia", Universidad de Carabobo, 2007

[13] ABB Applications Guidelines

[14] SCHNEIDER ELECTRIC, "Protección contra las sobretensiones, capítulo J." [En línea] disponible en: http://acceso.siweb.es/content/26140/Guia_Schneider/capitulo-j-proteccion-sobretensiones.pdf

[15] SIEMENS, "catalogue surge arresters limiters 3ee 3ef" es [en línea] disponible en: <https://es.scribd.com/document/299077182/Catalogue-Surge-Arresters-Limiters-3ee-3ef-En>

[16] IEEE, Std C62.22, "Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", 2009.

[17] CREG., Resolución 024 de 2005, Abril 26, 2015.

[18] VALVERDE MUÑOZ, A. "Determinación de la localización y la selección optima de pararrayos para un sistema de distribución eléctrica de media tensión.", Universidad de Costa Rica, Julio, 2010.

[19] NTC 2166, "Descargadores de sobretensiones de resistencia variable con explosores para redes de corriente alterna."

BIBLIOGRAFÍA

ABB Applications Guidelines

ALDANA C, Adolfo, “Software para la selección de descargadores de óxido de metal en sistemas de potencia”, Universidad de Carabobo, 2007

CAJAMARCA Álvaro, Técnicas para la generación de energía [en línea] disponible en: <http://en.calameo.com/read/004080166167df51b614e>

CARRILLO CAICEDO, G. “Protecciones eléctricas”, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1985.

CREG., Resolución 024 de 2005, Abril 26, 2015.

CREG., Resolución 037 25 de Junio de 2004, P4. Diciembre 23, 2015.

Ficha técnica aplicaciones tecnológicas: ¿Qué son y qué daños producen las sobretensiones? http://at3w.com/upload/ficheros/que_son_y_danos_de_las_sobretensiones.pdf, P 2.

GONZÁLEZ ARIAS, A. “Mejoramiento de confiabilidad en sistemas de distribución mediante reconfiguración de circuitos primarios”, Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2007, P 8.

IEEE, Std C62.22, “Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems”, 2009.

JIMÉNEZ MESA Obed Renato Líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica, Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 2006.

MAR PÉREZ José Guillermo Descripción y función del equipo de una subestación eléctrica, Universidad Veracruzana, 2011.

NTC 2166, “Descargadores de sobretensiones de resistencia variable con explosores para redes de corriente alterna.”

RAMÍREZ CASTAÑO Samuel, Redes de distribución de energía, Universidad Nacional de Colombia, tercera edición, 2004

RAMÍREZ CASTAÑO, S. “Protección de sistemas eléctricos”, Primera edición, Universidad Nacional de Manizales, 2003, P 293.

Resolución CREG 097 de 2008

SCHNEIDER ELECTRIC, “Protección contra las sobretensiones, capítulo J.” [En línea] disponible en: http://acceso.siweb.es/content/26140/Guia_Scheider/capitulo-j-proteccion-sobretensiones.pdf

SECRETARIA DE ENERGÍA Estrategia nacional de energía, México, P 9.

SIEMENS, “catalogue surge arresters limiters 3ee 3ef” es [en línea] disponible en: <https://es.scribd.com/document/299077182/Catalogue-Surge-Arresters-Limiters-3ee-3ef-En>

VALVERDE MUÑOZ, A. “Determinación de la localización y la selección optima de pararrayos para un sistema de distribución eléctrica de media tensión.”, Universidad de Costa Rica, Julio, 2010.