

Protecciones eléctricas en subestaciones eléctricas: análisis documental

Electrical protections in electrical substations: documentary analysis

Proteções elétricas em subestações elétricas: análise documental

Alejandro Javier Martínez Peralta

amartinez8875@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1176-5001>

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

Byron Fernando Chere-Quiñónez

bchere8077@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1886-6147>

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Martha Montes Molina

martha.montes@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6952-4190>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Jonathan Leonardo Preciado Adum

jonathan.preciado@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1741-1757>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Julio Cesar Yépez Quiroz

julio.yepetz@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0982-3308>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Cristhian Alfonso Acosta Carrillo

cristhian.acosta@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7896-0656>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Gabriel Alexander Ayovi Gruezo

gabriel.ayovi@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0753-7762>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

RESUMEN

Las subestaciones están diseñadas para una alta confiabilidad, pero todos los sistemas están expuestos a fallas, en las diferentes partes de la instalación, por esta razón se determina las protecciones para las instalaciones de la subestación, en vista que los sistemas están expuestos a fallas, para precautelar el buen funcionamiento de los equipos que conforman la subestación y prevenir algún riesgo al factor humano de cualquier falla provocado en el sistema. Para el diseño de un sistema de protección para las subestaciones se debe cumplir los criterios de confiabilidad, para evitar hacer operaciones incorrectas en las fallas, como también entra la velocidad en la que este sistema de protección va a actuar para despejar la falla en el sistema, y una buena sensibilidad para detectar cualquier falla en el sistema, como sería los problemas de estabilidad en el sistema, posterior a eso implementar las respectivas medidas de seguridad, las cuales tienen que actuar en microsegundos ante cualquier falla, ya que cualquier anomalía

en la subestación desencadena una condición anormal, lo cual depende de la magnitud y el tipo de falla que se presente en la subestación.

Palabras Claves: Protecciones, fallas, cortocircuito, sobretensiones.

ABSTRACT

The substations are designed for a high reliability, but all the systems are exposed to failures, in the different parts of the installation, for this reason the protections are determined for the installations of the substation, in view that the systems are exposed to failures, to precaution the good operation of the equipment that conform the substation and to prevent some risk to the human factor of any failure caused in the system. In order to design a protection system for the substations, the reliability criteria must be met in order to avoid incorrect operations in the faults, as well as the speed at which this protection system will act to clear the fault in the system, and a good sensitivity to detect any fault in the system, as would be the problems of stability in the system, after that implement the respective safety measures, which have to act in microseconds to any fault, since any anomaly in the substation triggers an abnormal condition, which depends on the magnitude and type of fault that occurs in the substation.

Keywords: Protections, faults, short circuits, overvoltage's.

RESUMO

As subestações são projetadas para alta confiabilidade, mas todos os sistemas estão expostos a falhas, nas diferentes partes da instalação, por isso são determinadas as proteções para as instalações das subestações, uma vez que os sistemas estão expostos a falhas, para garantir o bom funcionamento dos equipamentos que compõem a subestação e evitar qualquer risco ao fator humano de qualquer falha causada no sistema. Para o projeto de um sistema de proteção para subestações, devem ser atendidos os critérios de confiabilidade, para evitar operações incorretas sobre faltas, bem como a velocidade com que esse sistema de proteção atuará para eliminar a falta no sistema, e uma boa sensibilidade a detectar qualquer falha no sistema, como problemas de estabilidade do sistema, após isso implementar as respectivas medidas de segurança, que devem agir em microssegundos no caso de qualquer falha, pois qualquer anomalia na subestação desencadeia uma condição anormal, que depende da magnitude e tipo de falha que ocorre na subestação.

Palavras-chave: Proteções, falhas, curto-circuito, surtos.

I. INTRODUCCIÓN

Las subestaciones están diseñadas con el objetivo de poder mantener una alta confiabilidad. No obstante, una falla puede ocurrir en cualquier punto del sistema o en los equipos, ocasionando un mal funcionamiento de una o varias partes de la subestación eléctrica.

Según (Mora Flórez, Carrillo Caicedo, and Ariza Castillo 2011), las fallas se pueden clasificar de acuerdo a su severidad en: destructivas y no destructivas. Las fallas destructivas son aquellas que se consideran graves, puesto que implican una pérdida total del equipo, ocasionando la disminución de la confiabilidad, flexibilidad y seguridad del sistema, por otro lado, las fallas no destructivas son consideradas como leves, ya que pueden ser solventadas por el personal de mantenimiento, aunque disminuyen capacidad de todo el sistema.

Las fallas pueden ser causadas por los factores considerados en (Haifeng 2010), los cuales son: Polvo, humedad, alta temperatura, contaminación, sobrecargas, cortocircuitos, transitorios electromagnéticos y armónicas de corriente y voltaje. Estos factores pueden incidir directamente en la estabilidad del sistema y en muchos casos impedir la operación del servicio eléctrico de forma continua.

De acuerdo a los factores que causan las fallas en una subestación se determinan las protecciones a utilizar en el sistema, puesto que es de vital importancia precautelar los equipos y a la vez la continuidad del servicio.

Según (Christodoulou, Vita, and Ekonomou 2017), el sistema de protección de una subestación debe ser un conjunto de equipos necesarios para la detección y eliminación de cualquier tipo de falla mediante el disparo de interruptores que aíslen la parte del circuito de la red donde se haya producido la falla.

El sistema de protección a más de precautelar los equipos que conforman la subestación, también preserva el factor humano, puesto que evitan que los operadores tengan contacto directo con la falla producida en el sistema, precautelando de esta manera su salud. Otro objetivo de los sistemas de protección es evitar las pérdidas económicas en la explotación de la subestación, ya que se debe tomar en cuenta que la construcción de esta estructura y la implementación de cada equipo que la conforma requiere de una gran inversión, por lo que al sufrir daño un equipo o al paralizarse el servicio eléctrico, esto tiende a repercutir en una pérdida económica grande.

El diseño de un sistema de protecciones para cualquier tipo de subestaciones debe realizarse de tal manera que se cumplan los siguientes criterios (Christodoulou et al. 2017) (MAGAZINE 2019):

Confiabilidad: Capacidad que tiene el sistema para realizar una función correctamente cuando se lo requiera y evitar operaciones innecesarias o incorrectas durante la falla.

Velocidad: Rapidez para despejar una falla.

Selectividad: Permitir el aislamiento de la falla, desconectando una sección mínima del circuito y manteniendo la continuidad del servicio.

Seguridad: Evitar que el circuito se desenergice por condiciones falsas de falla.

Sensibilidad: Debe detectar fallas temporales o permanentes sin importar la distancia a la que se encuentre del interruptor general (Christodoulou et al. 2017)(Cevallos 2010).

Según (Cevallos 2010)], cada falla que se presenta en el sistema, desencadena una condición anormal, lo cual depende de la magnitud y tipo de falla que aparece en la subestación.

Recordemos que los tipos de fallas causan condiciones anormales entre las cuales podemos señalar las siguientes: Sobrecargas, sobrecorrientes, desbalances de corrientes y sobretensiones. Cada tipo de falla se produce por varias condiciones como, por ejemplo: el desbalance de corriente y la sobretensión de los conductores causa sobrecarga; y los voltajes elevados y sobrecorrientes causan sobretensión (AJ et al. 2018).

Conociendo las condiciones que causan las fallas en el sistema, podemos determinar el elemento de protección más adecuado para detectar y despejar la falla.

La estructura del artículo es la siguiente: En la Sección 2, se presentan los problemas de estabilidad, en los cuales se detallan las fallas que ocurren en las subestaciones. En la Sección 3, se plantean las medidas de seguridad que despejaran las fallas. Finalmente, en la Sección 4, se describen las conclusiones.

II. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD

Las subestaciones pueden presentar diversos problemas de estabilidad, puesto que los sistemas eléctricos que la conforman tienden a fallar por diversas condiciones, a continuación, analizaremos las fallas más comunes:

A. *Altas temperaturas en los conductores*

Según (YEPES 2015), para seleccionar un conductor con la capacidad de corriente que cumpla con las necesidades de la subestación, se debe tener en cuenta los siguientes factores: Corriente de carga, temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar.

Es importante determinar la temperatura límite de cada conductor para garantizar dos condiciones:

1. No exceder la temperatura límite de diseño de los cables, con el objetivo de no alterar las propiedades mecánicas del material.
2. Las flechas de los conductores deben conservar las distancias eléctricas de seguridad, de tal forma que no produzcan flameos durante condiciones de falla (cortocircuito, viento y sobretensión).

Se deben tener en cuenta dos aspectos, el eléctrico y el meteorológico para el cálculo de la temperatura de los conductores, ya que los parámetros meteorológicos influyen en el estado térmico del conductor. Éste está afectado principalmente por la velocidad de viento, su dirección y turbulencia, la temperatura ambiente y la radiación solar. Para el cálculo de la temperatura en el conductor se recurre a un balance de energía, balance que sólo es posible si se trabaja con la premisa que la corriente de carga es la misma, tanto para corriente alterna como corriente directa a igual temperatura del conductor. Este balance está dado por:

$$Q_g = Q_p \quad (1)$$

$$P_j + P_m + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (2)$$

Dónde:

Q_g : Calor ganado

Q_p : Calor perdido

P_j : Calentamiento por efecto Joule

P_m : Calentamiento por efecto magnético

P_s : Calentamiento solar

P_i : Calentamiento por efecto corona

P_c : Enfriamiento por convección

P_r : Enfriamiento por radiación

P_w : Enfriamiento por evaporación

El calentamiento por efecto corona es únicamente significativo con gradientes superficiales de tensión elevados, los cuales se presentan durante lluvias y alto viento.

Las gradientes de tensiones elevadas cada vez mayores hacen que el fenómeno de efecto corona aumente y a su vez provoque: pérdidas de potencia, ruido audible (afecta a los operadores), distorsión de ondas e interferencia electromagnética (Uhl et al. 2016).

El calentamiento por efectos magnéticos es debido a la presencia de flujos magnéticos los cuales producen calentamiento debido a la generación de corrientes de Eddy, histéresis y viscosidad magnética.

Según (Vázquez and Delgado 2014), un efecto que conlleva al sobrecalentamiento de los conductores en una subestación es la sobrecorriente, la cual al incidir directamente en el conductor puede averiar el aislamiento. Si el deterioro del aislamiento es severo y progresivo puede producir un arco eléctrico provocando un incendio, o destruyendo total o parcialmente la instalación y los equipos asociados a ella.

B. Sobrecargas

Las sobrecargas en una subestación por lo general aparecen cuando se sobrepasa la intensidad nominal, por lo que cada línea o aparato se diseña con el valor máximo de carga o intensidad para que su funcionamiento sea correcto (Mukovhe 2018).

Los efectos de esta perturbación son calentamientos anormales de los conductores, en los que la cantidad de calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente (Mukovhe 2018).

Una sobrecarga prolongada causa destrucción de las instalaciones involucradas y si son sucesivas, pueden causar un envejecimiento prematuro de la instalación.

Según (Nikolov et al. 2017), un caso muy evidente de sobrecarga fue el suscitado en las líneas de transmisión de la subestación eléctrica de Barranquilla, el cual causó una explosión que posteriormente generó un incendio, mismo que se extendió a través de los conductores que estaban sobrecalentados afectando a cientos de electrodomésticos de los usuarios.

C. Cortocircuito

De acuerdo a (Parra et al. 2019), podemos decir que los cortocircuitos son otro tipo de problema de estabilidad del sistema de una subestación, puesto que es un contacto accidental entre dos conductores o tierra. La conexión puede ser directa, aunque comúnmente se da a través de un arco eléctrico.

Este tipo de perturbación puede ocasionar grandes averías en la instalación por la dificultad que supone el corte de un arco eléctrico. Las consecuencias de los cortocircuitos son muy graves debido al rápido y excesivo aumento de la corriente.

Los cortocircuitos también provocan calentamiento excesivo a los conductores, por lo que pueden provocar destrucción total del material. Además, pueden causar caída de tensión elevada que puede perturbar el sistema eléctrico.

Según (AJ et al. 2018), existen 4 tipos de cortocircuito según las partes de la instalación que se pongan en contacto:

- **Monofásico a tierra:** Un conductor que entra en contacto con tierra. Este es el caso más frecuente.
- **Bifásico:** Dos fases entran en contacto.
- **Bifásico a tierra:** Dos fases entran en contacto con tierra.
- **Trifásico:** Las tres fases entran en contacto entre sí. Este caso provoca corrientes muy elevadas.

Este tipo de perturbaciones se dan en menos de 5 segundos, por lo que las protecciones a aplicarse deben ser capaces de despejar esta anomalía antes del tiempo en las que se produce.

D. Sobretensiones

Según (González 2021), las sobretensiones se producen cuando hay un aumento de la tensión por encima del nivel que se considera normal, es decir, hay una sollicitación variable en el tiempo cuyo valor máximo supera al valor pico del voltaje nominal del sistema.

Las consecuencias más evidentes de las sobretensiones son: Deterioro del aislamiento cuando se supera su tensión dieléctrica, arcos eléctricos que pueden provocar grandes averías y riesgo humano.

Las sobretensiones pueden generarse de forma interna o externa. Las de forma externa son provocadas por causas ajenas al sistema principalmente por impacto de rayos atmosféricos; y, los de forma interna son producidos por el propio sistema y se dividen en sobrevoltajes temporales y de maniobra.

De acuerdo a (VARGAS 2011), las sobretensiones temporales no suelen superar lo a 1,5 veces la tensión de servicio. En función de este tipo de sobretensión se definen los pararrayos.

Las sobretensiones internas de maniobra son de breve duración y fuertemente amortiguadas. Estas se dan a causa de las maniobras de interruptores. Los casos más típicos en donde se pueden producir estas sobretensiones de maniobra son en la conexión, desconexión y reenganche de líneas de vacío.

Y finalmente las sobretensiones externas o atmosféricas son de duración aún más corta que las de maniobra, por lo que están debidas a la caída de un rayo sobre las líneas o en sus proximidades. Vale recalcar que esa anomalía se da inmediatamente en el lapso de microsegundos.

La Figura 1, muestra el tiempo de incidencia y el voltaje pico de cada tipo de sobretensión o también conocido como sobrevoltaje.

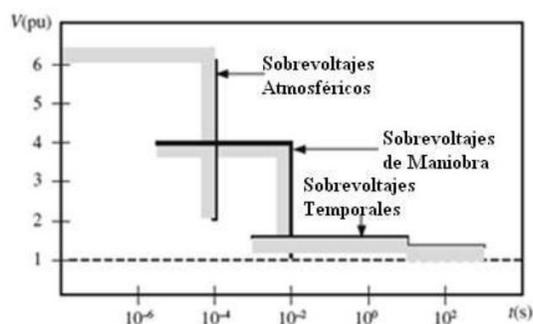


Figura 1. Clasificación de sobretensiones o sobrevoltajes

III. MEDIDAS DE SEGURIDAD

Después de haber analizado los problemas de estabilidad de las Subestaciones, podemos establecer los elementos que conformarán el sistema de protecciones, los cuales deben actuar en el lapso de los microsegundos para evitar grandes daños dentro y fuera del sistema. A continuación, podremos evidenciar las protecciones a utilizar en una Subestación.

A. Conexión a tierra

Según (Cango, Carlos. Pichogagón 2009) (Iberdrola 2013), el sistema de puesta a tierra se instala con el fin de limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente, y evitar que pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla, donde se debe cumplir con varios objetivos:

- Entregar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos.
- Garantizar que las personas dentro de las instalaciones de la Subestación y en sus vecindades, no estén expuesta al peligro de las corrientes eléctricas de choque.

El diseño del procedimiento corresponde a la Estándar 80-2000 de la IEEE y permite obtener seguros de tensiones de paso y de toque de las subestaciones (área cercada) y en sus proximidades. Ya que la tensión de malla representa la peor tensión de toque posible dentro de la subestación.

Teniendo en cuenta que las tensiones de malla son más peligrosas que las tensiones de paso, debido a que se debe instalar una capa superficial de alta resistividad, donde esta capa no se extiende por fuera de la subestación, donde las tensiones de paso pueden ser peligrosas. Sabiendo que las tensiones de toque y de paso, no pueden ser mayores que las tensiones de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano.

Para mallas de puesta a tierra espaciadas, la tensión de malla se incrementará a lo largo de las cuadrículas desde el centro hasta las esquinas de la malla, lo cual va a depender de su tamaño, del número y localización de varillas de tierra, del espaciamiento de los conductores paralelos, del diámetro y profundidad de los conductores y de la resistividad del suelo.

La estructura de una puesta a tierra se compone de una malla horizontal de conductores enterrados, suplementada por varillas de tierra conectadas a la malla con el fin de penetrar suelos

de capas profundas que tienen menor resistividad. Teniendo en cuenta que estas varillas se instalan siempre a lo largo del perímetro y en las esquinas de la malla.

De acuerdo con (Iberdrola 2013), recalca que un elemento conductor de la electricidad, presenta una resistencia al paso de la corriente eléctrica que viene dada por la ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3)$$

Dónde:

R= Resistencia al paso de la corriente

S= Sección de la barra

L= Longitud de la barra

ρ = Resistividad del material

La resistividad se mide en ohmios metro, y representa la resistencia que opone al paso de la corriente un cubo del material de que se trate, de un metro de arista.

El terreno es mal conductor se mide con la ayuda de un telurómetro, siendo el método más generalizado el de Wenner, considerando indispensable que cualquier estudio de una instalación de puesta a tierra parta de una medida real de la resistividad del terreno.

Destacando que la resistividad varía estacionalmente en función de las condiciones climatológicas, y muy especialmente de la humedad, donde sería muy útil realizar un estudio estadístico, o bastando el examen visual del terreno, pudiendo estimar su resistividad por medio de la Tabla 1, dándonos valores orientativos acerca de las variaciones estacionarias de las resistividades de diversos tipos de terreno.

Tabla 1. Resistividad de diversos tipos de Terreno.

Naturaleza del terreno	Resistividad en ohmios*metro
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Arena arcillosa	50 a 500
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Hormigón	2.000 a 3.000
Balastro o grava	3.000 a 5.000

Cumpliendo con las condiciones reglamentarias, interesa que el valor de la resistividad del material (ρ), sea bajo, pero en cambio que la resistividad superficial (ρ_s), tenga un valor elevado,

porque de esta forma la persona situada sobre el terreno ofrece una mayor resistencia al paso de la corriente producida en caso de defecto a tierra.

Los electrodos normalmente utilizados en un sistema puesta a tierra, de acuerdo con la Instrucción Técnica Complementaria, MIE-RAT-13, son:

- Picas hincadas en el terreno
- Cables enterrados
- Placas enterradas

Las dimensiones de las picas se ajustan a las especificaciones ya sea redondo de tubos o perfiles, donde los redondos de cobre o acero recubierto de cobre, no serán de un diámetro inferior a 14 milímetros. Los cables enterrados, sean de varilla, cable o pletina, deberán tener una sección mínima de 50 milímetros cuadrados los de cobre, y 100 milímetros cuadrados los de acero.

Las placas enterradas tendrán un espesor mínimo de 2 milímetros las de cobre y 3 milímetros las de acero. Según (Cango, Carlos. Pichogagón 2009), la resistencia de tierra del conductor, que depende de su forma, dimensiones y de la resistividad del suelo, se calculará por las fórmulas detalladas en la Tabla 2.

Tabla 2 .Resistencia de tierra del conductor.

Tipo de conductor	Resistencia en ohmios
Placa enterrada profunda	$R = 0.8 \frac{\rho}{P}$
Placa enterrada superficial	$R = 1.6 \frac{\rho}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\rho}{P}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \frac{\rho}{P}$
Malla de tierra	$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{l}$

Dónde:

R= Resistencia de tierra del conductor en ohmios

ρ = Resistividad del terreno de ohmios*metro.

P= Perímetro de la placa en metros.

L= Longitud en metros de la pica o del conductor, y en malla la longitud total de los conductores enterrados.

r= Radio en metros de un círculo de la misma superficie que el área cubierta por la malla.

B. Apartarrayos

Según (García 2000), los Apartarrayos son un dispositivo que limita sobretensiones transitorias mediante la descarga de la onda de sobretensión, lo cual evita que continúe el flujo de corriente, permaneciendo habilitados para repetir su funcionamiento.

En su forma más elemental consiste de un par de puntas o electrodos con una cierta separación donde se establece el arco eléctrico.

Dentro de una subestación la selección de tensión para el diseño de un apartarrayo es de gran importancia, ya que de esto se puede obtener el grado de protección del mismo.

Bajo ningún contexto un apartarrayo debe verse expuesto, en servicio a una tensión o sobretensión de frecuencia fundamental, 50 o 60 Hz, que exceda su tensión de extinción, pues de lo contrario el apartarrayo se vería sometido a una sobrecarga. Si dicha sobrecarga excede el límite de descompresión que puede manejar las membranas internas y la válvula de alivio, el encapsulado de porcelana explota.

El apartarrayo se puede conectar de diversas maneras, pero la más usual es:

Conexión entre fase y tierra: Es una de las conexiones más usadas en los sistemas de transmisión de energía eléctrica y en las subestaciones. Entre los conductores activos y tierra se emplazan tres apartarrayos, según lo indica la figura 2.

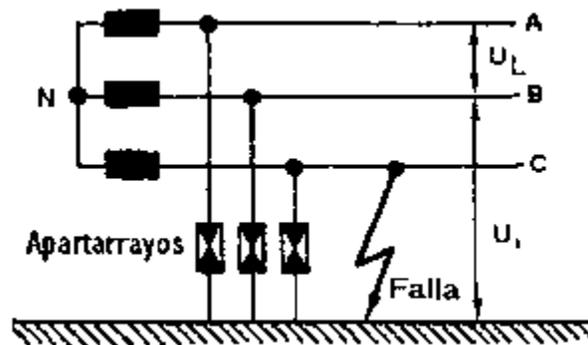


Figura 2. Conexión a tierra y coeficiente de conexión a tierra.

De acuerdo con (Serrano 2011), los apartarrayos también pueden utilizarse para ser conectados a los equipos de la subestación, en especial cerca de los bornes del transformador de potencia, puesto que es el elemento principal de la estructura técnica.

C. Sistema de pararrayos

Según (García 2000), una subestación debe protegerse por un sistema de pararrayos que permita evitar el contacto de fenómenos atmosféricos como los rayos con las estructuras o las personas que laboran dentro de la infraestructura técnica.

La decisión de proveer una estructura de un sistema de pararrayos, depende de la probabilidad del impacto de un rayo en la estructura y las consecuencias que emane este fenómeno (Salman and Li 2017).

El rayo es un fenómeno eléctrico que puede presentar las mismas consecuencias que cualquier otra corriente que circule por un conductor eléctrico, y los efectos causados por este deberán ser considerados de gran importancia, sobre todo los que se indican a continuación (García 2000):

- Efecto óptico
- Efecto acústico
- Efecto electroquímico
- Efecto térmico
- Efecto electrodinámico
- Radiación electromagnética

Al dimensionar las diversas partes que componen el sistema de pararrayos, se debe considerar principalmente los efectos térmicos y electrodinámicos, ya que tienen una notable influencia en el medio de descarga a tierra.

Según (Nikolov et al. 2017), los pararrayos en una subestación estarán constituidos por:

1. Resistencia no lineal, de óxido de zinc, conectada en serie sin explosores.
2. Un contador de descargas.

Los pararrayos estarán constituidos como máximo por un elemento, excepto en 220KV que podrá ser como máximo de dos elementos.

Para subestaciones de alta y media tensión los pararrayos se instalarán en los bornes de los transformadores y en los neutros del sistema, además de que también se situarán en las entradas de las líneas de alta tensión.

D. Neutro aislado

De acuerdo a (Díaz Sorloza 2011), un sistema de neutro aislado es también llamado sistema flotante, en el cual no existe conexión intencional entre los conductores y tierra. Sin embargo, en todos los sistemas hay una conexión capacitiva entre los conductores del sistema y superficies adyacentes que se encuentran a tierra.

Por lo tanto, un sistema aislado es un sistema capacitivamente puesto a tierra por virtud de la capacitancia distribuida del sistema, en la figura 3 se observa lo anteriormente dicho.

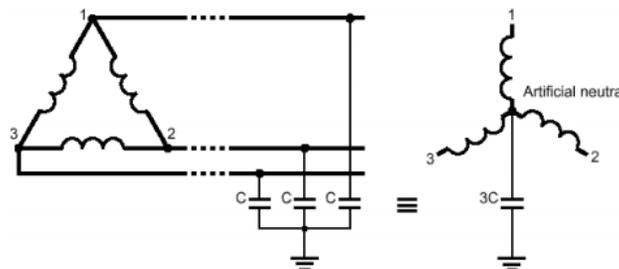


Figura 3. Zonas de guarda, distancia de seguridad y circulación del personal.

En concordancia con (Martínez et al. 2020), el uso de sistemas de neutro aislado tiene limitaciones, ya que solo puede trabajar para sistemas de distribución de electricidad de media tensión, por lo que requiere de esquemas de detección de falla a tierra.

Cuando se produce una falla a tierra en un sistema con neutro aislado, la corriente de falla se distribuye en una subestación de la siguiente manera:

- La fase en falla se pone a tensión de tierra, por lo que no circula corriente a través de la capacidad fase-tierra.
- Las fases sanas se ponen a tensión compuesta, por lo que circula una corriente capacitiva a través de la capacidad fase-tierra. Su valor es $\sqrt{3}$, la corriente capacitiva en régimen permanente.
- La corriente de falla es capacitiva e igual a la suma de las corrientes capacitivas de las fases sanas durante la falla. Su valor es 3 veces la corriente capacitiva por fase en régimen permanente.

Una de las ventajas que tiene el sistema de neutro aislado, es que no es necesario invertir en equipamientos para puesta a tierra, solo para el sistema de protección de la subestación (Martínez et al. 2020).

E. Distancias mínimas de seguridad

De acuerdo con (YEPES 2015), para un correcto dimensionamiento de una subestación se deben tomar unos factores, como son las distancias mínimas en el aire para garantizar un nivel de aislamiento adecuado y las distancias de seguridad para las labores de revisión y mantenimiento sin peligro alguno para el personal.

- **Cálculo de distancia mínimas en aire.**

Parte importante de las subestaciones son de tipo intemperie por lo cual el medio aislante que se aplica es la distancia del viento. Teniendo de esta forma el objetivo de establecer de manera idónea las distancias por medio del viento, así sea entre fase-fase o fase-tierra.

Sabiendo la definición de distancias mínimas en el aire, la soportabilidad ante los impulsos de tensión de sobretensiones transitorias de frente rápido o BIL, debe ser mayor o igual que (\geq) que los valores señalados en la norma (IEC 60071-2, 1996-12) define los niveles de aislamiento normalizados a las tensiones de soportabilidad asignadas de impulso atmosférico y de frecuencia industrial de cota duración para instalaciones eléctricas cuyos equipos está sometidos a una $U_m < 300KV$ (Standards 1996).

En la tabla 3 y 4, tenemos los valores recomendados de (IEC 60071-2, 1996-12) para las separaciones entre fase-tierra y fase-fase para los diferentes valores de aislamiento normalizados al impulso tipo rayo y al impulso tipo maniobra.

Tabla 3. Separación entre fase-tierra y fase-fase.

Tensión soportada a impulso de maniobra normalizada			Distancia en el aire mínima entre fases mm	
Fase-tierra KV	Valor fase-fase	Fase-fase KV	Conductor – conductor	Punta - conductor

	Valor fase- tierra		paralelo	
750	1.5	1125	2300	2600
850	1.5	1275	2600	3100
950	1.5	1425	3100	3600
950	1.7	1615	3700	4300
1050	1.5	1575	3600	4200
1050	1.6	1680	3900	4600
1175	1.5	1763	4200	5000
1300	1.7	2210	6100	7400
1425	1.7	2423	7200	9000
1550	1.6	2480	7600	9400

Tabla 4. Tensión soportada por rayo.

Tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada KV	Distancia en el aire mínima mm	
	Punta - estructura	Conductor - estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1100	

650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

- **Cálculo de distancia de seguridad mínima**

La distancia mínima son los espacios que tienen que tenerse en las subestaciones para que el personal logre circular y hacer sus labores que corresponden sin miedo a estar en peligro sus vidas.

Debemos saber que para decidir las distancias de estabilidad se lo ejecuta con base a los diferentes criterios como:

1. Distancias desde la tierra entre esos, (tensión, altura del personal, etc).
2. Distancia de altura de vehículos utilizados en la subestación.
3. Distancia de cercos o muros, etc.

En la Figura 4, se puede apreciar las distancias de seguridad.

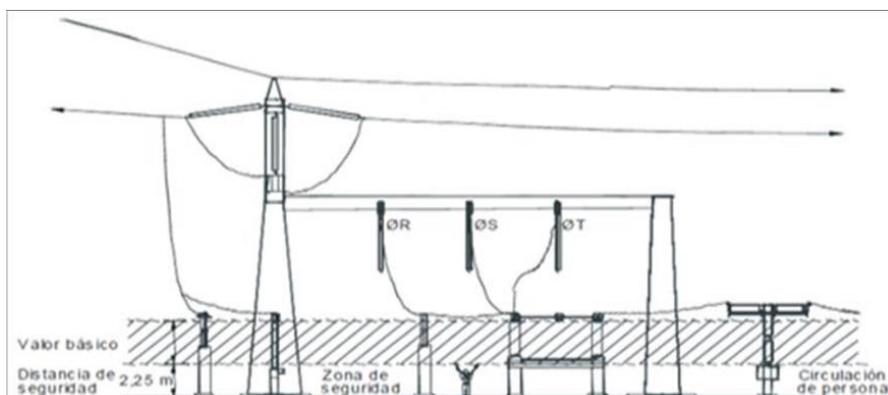


Figura 4. Zonas de guarda, distancia de seguridad y circulación del personal.

Para el cálculo de zona de guarda, la distancia mínima se la representa de la siguiente manera:

$$D = d + 0.9 \quad (3)$$

$$H = d + 2.25 \quad (4)$$

Siendo:

D: Es la distancia horizontal representada en metros, que se debe considerar en las zonas de circulación.

H: Es la altura representada en metros, que debe considerar en todas las zonas de circulación, pero esta nunca debe ser menor a 3 metros.

d: Esta es la distancia mínima que hay entre la fase a tierra correspondiente al nivel de aislamiento de la zona.

• Distancia para el dimensionamiento de subestaciones

Las distancias en una subestación permanecen dadas por su grado de tensión, su configuración estando dada por sus anchos de barras.

Donde las barras de las subestaciones tienen la posibilidad de ser de tipo rígidas o flexibles, teniendo presente que las barras de tipo rígidas la distancia mínima que se va a aplicar entre fase-fase va a ser un 10% de elemento de estabilidad.

Para las barras de tipo flexibles, la distancia mínima que se aplica es en funcionalidad de la distancia de fase-fase más un componente dado por la flecha máxima estática que generalmente es del 3% de la longitud de todo el Barraje.

F. Desenergización automática

Según (Schneider Electric 2018), Dentro de la desenergización automática, este consta de un interruptor automático, (Disyuntor magnético), es un dispositivo capaz de interrumpir un circuito eléctrico cuando la corriente eléctrica que circula por el dispositivo excede del valor nominal, o que se haya producido un corto circuito, con la finalidad de prevenir que se tengan daños a los diferentes equipos eléctricos de la subestación.

La corriente que atraviesa la carga por elevación de corriente o picos de corriente este llegue a elevarse, se creara un campo magnético capaz de hacer que el disyuntor, haga abrir el circuito, de manera inmediata.

En las subestaciones se utiliza interruptores de mayor tamaño en vacío, con el fin de hacer más débil el arco eléctrico, producido cuando se crea un corto circuito, circulando una corriente muy elevada en donde los contactos eléctricos abren el circuito, generándose un arco eléctrico entre los contactos abiertos tras el corto circuito (Schneider Electric 2018).

Los interruptores automáticos, tienen una gran ventaja respecto a los fusibles, que una vez que se rompen por una sobretensión hay que reemplazarlos, en cambio los interruptores al sufrir una sobretensión o corto circuito, pueden ser reutilizados una vez que se localice y repare el daño, por lo cual se procede a rearmar el disyuntor para que esté nuevamente operativo (All RUS Borrowers RUS Electric Staff 2001).

Para el correcto funcionamiento del disyuntor, se debe cumplir con una serie de parámetros que nos dirá que disyuntor tendrá una subestación.

Como es:

- Calibre o intensidad nominal: Siendo esta la intensidad nominal de trabajo para la cual está hecho el dispositivo, teniendo en un rango de 5 hasta 64 A.
- Voltaje de trabajo: Es el voltaje que está diseñado el disyuntor para trabajar, en monofásicos (110-220V) y trifásicos (300-600V).
- Poder de interrupción: Es la intensidad máxima que el disyuntor va a interrumpir, porque de no hacerlo los materiales que están siendo expuestos a este corto circuitos, podrían soldarse e impedir la apertura del circuito.

IV. CONCLUSIONES

Las subestaciones por ser una instalación bastante fundamental en cuanto al abasto eléctrico, se debería disponer de diversos sistemas de protecciones para eludir cualquier avería que se haga a lo largo de la operación de la subestación, las fallas por las que se debería precautelar el buen manejo de los conjuntos y prevenir cualquier infortunio que incluyan al personal humano.

En las fallas más frecuentes poseemos las altas temperaturas en los conductores lo cual desencadena una secuencia de inconvenientes anómalos a la subestación debido al deterioro del material expuesto a las altas temperaturas, que tienen la posibilidad de ofrecer por sobrecargas en el sistema como el excedente de la corriente nominal a la que la subestación ha sido diseñada con los valores máximos de carga, provocando tal cual los cortocircuitos que se proporcionan por el contacto de los conductores a tierra, teniendo claras las fallas que se generan a llevar a cabo las protecciones las cuales tienen que actuar en microsegundos para proteger granes males en la subestación y fuera del sistema, en las protecciones está la conexión a tierra, la que tiene el objetivo de delimitar los grados de potencial terrestres a niveles de tensión y corriente, para evadir colocar en riesgo la estabilidad de los individuos y de los grupos de la subestación, como además el sistema de apartarrayos que limita las sobretensiones transitorias por medio de la descarga de la onda de sobretensiones, y un sistema de pararrayos para eludir que la subestación tenga contacto con cualquier fenómeno atmosférico como los relámpagos a las diversas construcciones o al personal de la subestación, concluyendo con la utilización de un conveniente

dimensionamiento de la subestación para asegurar un grado de retiramiento correcto y las distancias de estabilidad que corresponden para cualquier inspección o mantenimiento sin tener que situar en peligro la vida de cualquier operador de la subestación.

V. REFERENCIAS

- AJ, Christina, M. A. Salam, Q. M. Rahman, Fushuan Wen, S. P. Ang, and William Voon. 2018. "Causes of Transformer Failures and Diagnostic Methods – A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82(xxxx):1442–56.
- All RUS Borrowers RUS Electric Staff. 2001. "Design Guide for Rural Substations." *Rural Utilities Service* 4(June):764.
- Cango, Carlos. Pichogagón, Carlos. 2009. "Elaboracion de Un Manual Para El Diseño y Mantenimiento de Mallas de Puesta a Tierra." *Escuela Politecnica Nacional*. 1–95.
- Cevallos, Juan Aleaga Pablo. 2010. "DISEÑO DE UN LABORATORIO DE PRUEBAS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA LA EMPRESA ELECTRICA REGIONAL DEL SUR S.A.-LOJA." *Review of Social Economy* 3(1):72–80.
- Christodoulou, Christos A., Vasiliki Vita, and Lambros Ekonomou. 2017. "Studies for the More Effective Protection of MV / LV Substations against Lightning Overvoltages Department of Electrical and Electronic Engineering Educators." *International Journal of Circuits and Electronics* 2(Lv):6–10.
- Díaz Sorloza, Oscar Antonio. 2011. "Cálculo, Coordinación y Análisis Del Sistema de Protección Ante Fallas a Tierra En Las Subestaciones de Distribución de 10 Kv En La Set Santa Marina Ubicado En La Provincia Constitucional Del Callao." *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*.
- Garcia, González Hilario. 2000. "PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES DE UNA SUBESTACIÓN ELECTRICA EN 400KV LOCALIZADA EN LA PLANTA DE HYLSA."
- González, Manuel Albeiro Carrillo. 2021. "PRUEBAS A EQUIPOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN."
- Haifeng, Ge. 2010. "Maintenance Optimization for Substations with Aging Equipment." *Electrical Engineering Theses and Dissertations* 7.
- Iberdrola. 2013. "MT 2.11.34 Diseño de Puestas a Tierra En Centros de Transformación En Edificio de Otros Usos, de Tensión Nominal Inferior a 30 KV." 0–38.
- MAGAZINE, TRANSFORMERS. 2019. "Substations Equipment Inspection and Periodic Maintenance."
- Martínez, Alejandro Peralta Javier, Byron Quiñónez Fernando Chere, Raúl de Souza Clemente Ulloa, and Juan Andrés Lucio- Cruz. 2020. "Estudio de Coordinación de Protecciones Eléctricas En CELEC-EP Termoesmeraldas II Aplicando El Software DIGSILENT PowerFactory." *Polo Del Conocimiento* 5(08):1264–76. doi: 10.23857/pc.v5i8.1658.
- Mora Flórez, Juan José, Gilberto Carrillo Caicedo, and Jorge Olmedo Ariza Castillo. 2011. "Diseño Metodológico de Consignas Para Atención de Fallas No Destructivas En Subestaciones Eléctricas." *Ingeniería Y Competitividad* 7(1):7–17.
- Mukovhe, Ratshitanga. 2018. "INVESTIGATION AND DESIGN OF AN INTEGRATED MONITORING, PROTECTION, AND CONTROL SYSTEM OF A POWER RETICULATION NETWORK." (June).
- Nikolov, Nikolay, Neli Dimitrova, Anton Georgiev, and Margreta Vasileva. 2017. "Reliability Assessment of Electricity Distribution Substation Surge Protection System." *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* 1–6. doi: 10.1109/ISSE.2017.8000927.
- Parra, Pablo, David Cardenas, Nino Vega, Esteban Valencia, and Ervin Solano. 2019. "Feeder Configuration and Coordination of Protections for an Electric Substation." *IEEE ICA-ACCA 2018 - IEEE International*

Conference on Automation/23rd Congress of the Chilean Association of Automatic Control: Towards an Industry 4.0 - Proceedings 18–23. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609758.

Salman, Abdullahi M., and Yue Li. 2017. "Multihazard Risk Assessment of Electric Power Systems." *Journal of Structural Engineering* 143(3):04016198. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001688.

Schneider Electric. 2018. "Electrical Installation Guide." *Electrical Installation Guide According to IEC International Standards* 588.

Serrano, Durán José Manuel. 2011. "ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS EN EL MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO, CASO DE: UNA SUBESTACIÓN DE ALTA TENSIÓN."

Standards, Bureau of Indian. 1996. "IS/IEC 60071-2 :2006, Insulation Co-Ordination." 1–129.

Uhl, Robert, Antonello Monti, Julian Lichtinghagen, and Albert Moser. 2016. "Analysis of Transient Electromagnetic Interference between Medium Voltage AC and DC Overhead Transmission Lines and Cables." *2016 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016*. doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514025.

VARGAS, PAMELA MARIANA VACA. 2011. "VERIFICACION DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN COTOCOLLAO DE LA EEQ.S.AEscuela Politécnica Nacional."

Vázquez, Edison Raúl Guamán, and John Edwin Pesántez Delgado. 2014. "Análisis de La Degradación Del Aislamiento Ante Sobrecargas Eléctricas En Los Cables de Mayor Utilización En Las Instalaciones Cíviles de La Ciudad de Cuenca." *Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca* 142.

YEPES, ELIANA PATIÑO. 2015. "DIMENSIONAMIENTO DE SUBESTACIONES DE ALTA TENSIÓN ELIANA PATIÑO YEPES UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE FACULTAD."